

# Manual técnico: interpretación de análisis de suelos, cálculos de encalado y fertilización para los cultivos de café y cacao



PERÚ

Ministerio  
de Desarrollo Agrario  
y Riego



Instituto Nacional de Innovación Agraria





MINISTERIO DE DESARROLLO AGRARIO Y RIEGO  
INSTITUTO NACIONAL DE INNOVACIÓN AGRARIA  
DIRECCIÓN DE SUPERVISIÓN Y MONITOREO EN LAS ESTACIONES EXPERIMENTALES AGRARIAS

# Manual técnico: interpretación de análisis de suelos, cálculos de encalado y fertilización para los cultivos de café y cacao



PERÚ

Ministerio  
de Desarrollo Agrario  
y Riego



# MANUAL TÉCNICO: INTERPRETACIÓN DE ANÁLISIS DE SUELOS, CÁLCULOS DE ENCALADO Y FERTILIZACIÓN PARA LOS CULTIVOS DE CAFÉ Y CACAO

**MINISTERIO DE DESARROLLO AGRARIO Y RIEGO**

**Ministro de Desarrollo Agrario y Riego**

Ángel Manuel Manero Campos

**Viceministra de Políticas y Supervisión del Desarrollo Agrario**

Carmen Inés Vegas Guerrero

**Viceministro de Desarrollo de Agricultura Familiar e Infraestructura Agraria y Riego**

Iván Ramos Pastor

**Jefe del INIA**

Jorge Juan Ganoza Roncal, M. Sc.

**© Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA)**

**Primera edición digital:**

Mayo, 2025

**Publicado:**

Mayo, 2025

**Disponible en:**

<https://repositorio.inia.gob.pe/>

**ISBN:**

978-9972-44-182-0

**Editado por:**

Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA)

Equipo Técnico de Edición y Publicaciones

Av. La Molina 1981, Lima-Perú

Teléf. (511) 2402100 - 2402350

[www.gob.pe/inia](http://www.gob.pe/inia)

**Equipo Técnico de Edición y Publicaciones:**

Janet Flores / **Teléfono:** 964173509 / **Correo electrónico:** [comite\\_publicaciones@inia.gob.pe](mailto:comite_publicaciones@inia.gob.pe)

Todos los derechos reservados.

Prohibida la reproducción de este libro por cualquier medio, total o parcialmente, sin permiso expreso

Hecho el Depósito Legal en la Biblioteca Nacional del Perú N° 2025-04077

**Autores:** Noelito Salgado Veramendi, Elvis Ottos Diaz/ **Fotografía:** Nehemias Granados Dominguez / **Editor**

**general:** Cinthia S. Quispe-Apaza / **Revisión de contenido:** Héctor A. Ramírez-Maguiña, Cinthia S. Quispe-

**Apaza / Diseño y diagramación:** Miguel Alvarez-Escalante



# Tabla de contenido

<b>Presentación</b>	<b>9</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>11</b>
<b>2. Características y evaluación del suelo agrícola</b>	<b>15</b>
2.1. Textura del suelo	15
2.2. Densidad aparente del suelo (Dap)	19
2.3. pH del suelo	21
2.4. Materia orgánica (M. O.)	22
2.5. Nitrógeno (N)	25
2.6. Fósforo (P)	27
2.7. Potasio (K)	30
2.8. Capacidad de intercambio catiónico (CIC)	32
2.9. Carbonato de calcio (CaCO <sub>3</sub> )	36
2.10. Conductividad eléctrica	38
2.11. Análisis de suelos	38
2.12. Tipos de análisis del suelo	39
2.13. Muestreo de suelos	40
<b>3. Suelos asociados al cultivo de café</b>	<b>47</b>
3.1. Características adecuadas del suelo para el cultivo de café	47
3.2. Extracción de nutrientes del cultivo de café	49
<b>4. Resultado e interpretación del análisis del suelo en el cultivo de café</b>	<b>51</b>
4.1. Resultados del análisis del suelo	51
4.2. Interpretación del análisis del suelo	52
<b>5. Cálculo de encalado del suelo en el cultivo de café</b>	<b>55</b>
5.1. Método de encalado 1: neutralización del aluminio	55
5.2. Método de encalado 2: determinación de la cantidad de calcio en el suelo	64
5.3. Fuentes de encalado	69



## Tabla de contenido

<b>6. Cálculos de fertilización en el cultivo de café</b>	<b>71</b>
6.1. Peso de la capa arable (P. C. A.)	71
6.2. Nutrientes disponibles en el suelo	72
6.3. Requerimiento de nutrientes	75
6.4. Requerimiento de nutrientes considerando la eficiencia del fertilizante	76
6.5. Dosis de los fertilizantes	78
6.6. Etapas de aplicación de los fertilizantes	80
<b>7. Suelos asociados al cultivo de cacao</b>	<b>83</b>
7.1. Características adecuadas del suelo para el cultivo de cacao	83
7.2. Extracción de nutrientes del cultivo de cacao	85
<b>8. Resultado e interpretación del análisis del suelo en el cultivo de cacao</b>	<b>87</b>
8.1. Resultados del análisis del suelo	87
8.2. Interpretación del análisis del suelo	88
<b>9. Cálculo de encalado del suelo en el cultivo de cacao</b>	<b>91</b>
9.1. Método de encalado 1: neutralización del aluminio	91
9.2. Método de encalado 2: determinación de la cantidad de calcio en el suelo	100
<b>10. Cálculos de fertilización en el cultivo de cacao</b>	<b>107</b>
10.1. Peso de la capa arable (P. C. A.)	107
10.2. Nutrientes disponibles en el suelo	108
10.3. Requerimiento de nutrientes	111
10.4. Requerimiento de nutrientes considerando la eficiencia del fertilizante	112
10.5. Dosis de los fertilizantes	114
10.6. Etapas de aplicación de los fertilizantes	116
<b>11. Referencias bibliográficas</b>	<b>119</b>





# Presentación

El Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA) es un organismo técnico especializado adscrito al Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego (MIDAGRI), que desarrolla actividades de investigación, transferencia tecnológica, aprovechamiento y conservación de los recursos genéticos y producción de semillas, plántones y reproductores de elevado valor genético.

El INIA, a través de la Dirección de Supervisión y Monitoreo en las Estaciones Experimentales (DSME), viene ejecutando el proyecto de inversión “Mejoramiento de los servicios de investigación y transferencia tecnológica en el manejo y recuperación de suelos agrícolas degradados y aguas para riego en la pequeña y mediana agricultura en los departamentos de Lima, Áncash, San Martín, Cajamarca, Lambayeque, Junín, Ayacucho, Arequipa, Puno y Ucayali”, con CUI N° 2487112, el cual tiene entre sus objetivos evaluar alternativas tecnológicas para el manejo de suelos y agua en la producción agrícola.

En este contexto, el manejo adecuado de la fertilidad del suelo es fundamental para garantizar la sostenibilidad de los sistemas agrícolas, por lo que, el documento aborda los conceptos básicos para la interpretación de los resultados del análisis de suelo y la elaboración de planes de fertilización, con un enfoque específico en los cultivos de café y cacao. Estas prácticas no solo buscan optimizar el uso de fertilizantes y enmiendas, sino también reducir el impacto ambiental y mejorar la rentabilidad de los productores.

Este manual está dirigido a técnicos, extensionistas, agricultores y todos aquellos actores involucrados en la cadena productiva de café y cacao, con el objetivo de proporcionar herramientas técnicas que contribuyan al desarrollo de una agricultura más sostenible y competitiva en el Perú.

**Jorge Ganoza Roncal M. Sc.**

Jefe del Instituto Nacional de Innovación Agraria



# 1. Introducción

En el Perú, el café y cacao son dos de los cultivos de la región amazónica más importantes para la pequeña y mediana agricultura. Según el Sistema Integrado de Estadística Agraria (SIEA, 2025a), hasta el año 2024, el café generó ingresos de S/. 1706.3 millones de soles, representando el 6.9 % de participación del VBP (Valor Bruto de Producción), mientras que con el cacao se generaron ingresos de S/. 737.3 millones de soles, representando el 3 % de la participación del VBP.

El perfil productivo de los principales cultivos, según el Sistema Integrado de Estadística Agraria (SIEA, 2025b), hasta el año 2023, las cifras respecto al cultivo de café indican que se cosecharon 428 726.10 hectáreas, con una producción de 370 257.52 toneladas de grano seco, siendo el precio promedio en chacra S/. 9.20 soles por kilogramo, el rendimiento promedio nacional estuvo en 0.864 toneladas por hectárea y el número de productores fue 211 642. Respecto al cultivo de cacao, la citada fuente indica que se cosecharon 198 243.10 hectáreas, con una producción de 165 886.92 toneladas de grano seco, siendo el precio promedio en chacra de S/. 8.16 soles por kilogramo, el rendimiento promedio nacional estuvo en 0.837 toneladas por hectárea, y el número de productores fue 83 305.

Según el Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI, 2024), en la Encuesta Nacional Agropecuaria (ENA) del año 2023, se identificó que el café pergamino y el cacao se encuentran entre los diez principales cultivos permanentes a nivel nacional. El café pergamino ocupa el cuarto puesto, con un 15.6 % de productores dedicados a su cosecha, mientras que el cacao se sitúa en el sexto puesto, con un 8.3 % de productores.

El café generalmente se encuentra asociado a la sombra de plantas forestales no maderables como guaba y/o maderables como pino o ulcumano. También se suele sembrar asociado a otros cultivos como plátano o palto o como monocultivo. Respecto al cacao, generalmente se encuentra como monocultivo, pero también se puede encontrar asociado a plantas forestales no maderables como guaba y/o plantas forestales maderables como capirona o bolaina u otros cultivos como plátano, cítricos, entre otros.

A pesar de estas prácticas de cultivo diversificadas, los cafetales y cacaotales, en su gran mayoría, se encuentran en condiciones poco tecnificadas, lo que se refleja en rendimientos deficientes. Uno de los factores que limita su productividad es la nutrición inadecuada de los cultivos, considerándose este uno de los grandes desafíos en su producción. Por lo tanto, para lograr incrementar la rentabilidad y la sostenibilidad de los cultivos de café y cacao, es necesario aplicar un adecuado plan de fertilización, conservación del suelo y riego.

En este contexto, el objetivo del presente manual es proporcionar conocimientos técnicos y recomendaciones basadas en experiencias prácticas, que servirán como una guía útil para técnicos, extensionistas, agricultores y todos aquellos actores involucrados en la cadena productiva de café y cacao. Estas herramientas les permitirán mejorar el rendimiento de estos cultivos de manera sostenible y eficiente.





## 2. Características y evaluación del suelo agrícola

El suelo es un subsistema multifuncional que sostiene la cubierta vegetal; además, proporciona nutrientes y agua a las plantas, facilitando así la producción de alimentos. Asimismo, desempeña un papel crucial en la provisión de servicios ecosistémicos, como la conservación de la biodiversidad, el hábitat para microorganismos, la regulación hidrológica y la retención de sustancias contaminantes, como los agroquímicos, evitando que estas lleguen a las aguas subterráneas (González y Fuentes, 2022, citando a Hatfield et al., 2017 y a Jarvis, 1998).

En este sentido, el suelo no solo cumple funciones biológicas y ambientales, sino que también se define como un cuerpo natural complejo. Ocupa un determinado espacio en la superficie terrestre y está compuesto por una fase sólida (minerales y materia orgánica), líquida y gaseosa; a su vez, se caracteriza por su perfil, una sección vertical del suelo, que presenta los horizontes que la conforman y se diferencian del material parental (Soil Survey Staff, 1999). Según Acosta (2007), un suelo ideal consta de cuatro componentes en proporciones bien definidas: aire (25 %), agua (25 %), materia orgánica (5 %) y material mineral (45 %).

### 2.1. Textura del suelo

La textura indica la cantidad relativa de partículas minerales del suelo clasificadas, según su tamaño, como arena, limo y arcilla. Esta propiedad está relacionada con la rapidez con que el agua se infiltra en el suelo, agua y aire (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación [FAO], 2024). El suelo se compone de una matriz sólida de elementos orgánicos e inorgánicos que representa aproximadamente la mitad de su volumen total; la otra mitad se encuentra ocupada por espacios conocidos como poros que pueden almacenar agua y aire en diferentes proporciones (Fernández y Trillo, 2005).

## a. Clases de textura del suelo

Según Soil Science Division Staff (2017), el suelo se clasifica en 12 clases texturales, como muestra la Tabla 1.

**Tabla 1.** Clase textural del suelo

Clase textural	
1	Arcilloso
2	Arcillo limoso
3	Arcillo arenoso
4	Franco arcilloso Limoso
5	Franco arcilloso
6	Franco Arcillo Arenoso
7	Limoso
8	Franco Limoso
9	Franco
10	Franco Arenoso
11	Arena Franca
12	Franco Arenoso

Adaptado de Soil Science Division Staff (2017).

Comúnmente, conviene agrupar dichas clases de textura. Por ejemplo, la Tabla 2 proporciona un resumen de tres grupos generales de textura del suelo y cinco subgrupos. En algunas áreas donde los suelos tienen un alto contenido de limo, se puede usar una cuarta clase general: materiales de suelo limoso, para las clases limoso y franco limoso (Soil Science Division Staff, 2017).

Tabla 2. Grupos generales de textura del suelo

Grupos y subgrupos de texturas del suelo*	Clases texturales
<b>1. Materiales de suelo arcilloso</b>	
Textura fina	Arcilloso
	Arcillo limoso
	Arcillo arenoso
<b>2. Materiales de suelo franco</b>	
Franco Arcillo Arenoso	Franco arcilloso limoso
Textura media	Franco arcilloso
	Franco Arcillo Arenoso
	Limoso
Textura moderadamente gruesa	Franco limoso
	Franco
	Franco arenoso
<b>3. Materiales de suelo arenoso</b>	
De textura gruesa	Arena franca
	Arenoso

\* **Nota:** Estas no son las clases de tamaño de partículas de las familias arenosas, francas y arcillosas definidas en la Taxonomía de suelos. Adaptado de Soil Science Division Staff (2017).

## b. Métodos de análisis de la textura del suelo

Los dos métodos de uso más generalizados para estimar el tamaño de las partículas o la textura del suelo según Gabriels y Lobo (2006) son:

1. El método del hidrómetro de Bouyoucos, es el comúnmente utilizado.
2. El método de la pipeta, utilizado en trabajos de investigación.

### c. Triángulo textural

El triángulo textural (Figura 1) se basa en el sistema de clasificación del USDA (Soil Science Division Staff, 2017). Este sistema categoriza el suelo según el tamaño de las partículas que lo componen, utilizando la siguiente clasificación:

- **Arcilla:** partículas menores de 0.002 mm.
- **Limo:** partículas con tamaño variable de 0.002 a 0.05 mm.
- **Arena:** partículas mayores de 0.05 mm.

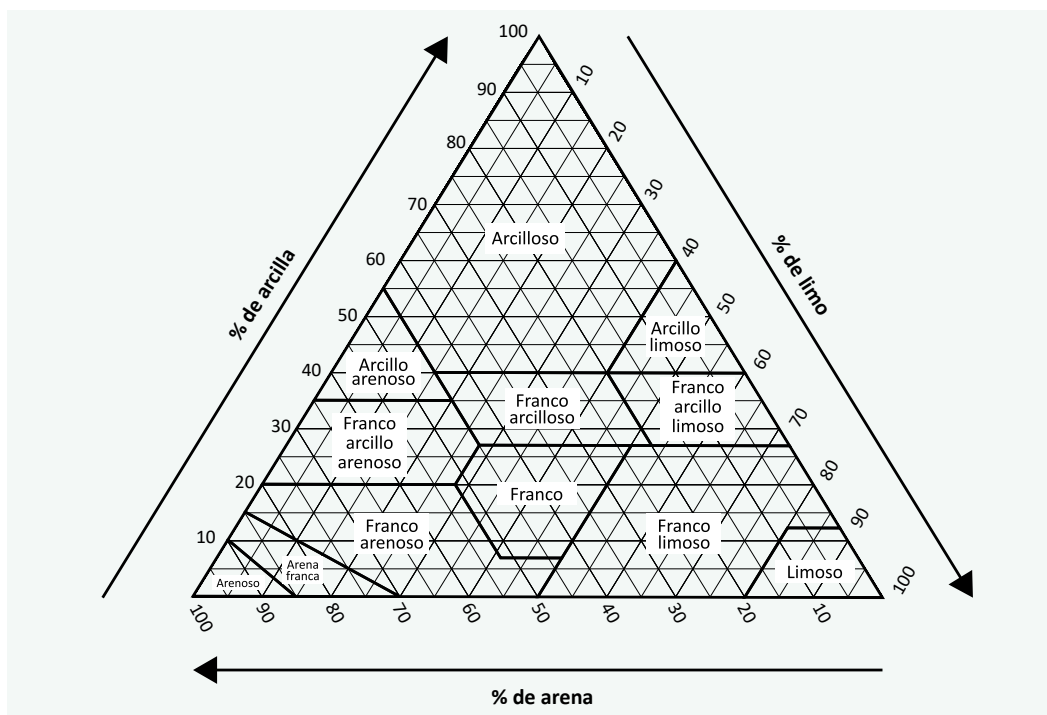


Figura 1. Triángulo textural del suelo (adaptado de Soil Science Division Staff, 2017)

## 2.2. Densidad aparente del suelo (Dap)

Se conoce como densidad aparente (Dap) del suelo a la masa de suelo seco, en una unidad específica de volumen, el cual comprende la fase sólida y los poros del suelo. El valor de esta medida está influenciado por el porcentaje de poros presentes en ese volumen de suelo (Agostini et al., 2014, citando a Blake y Hartge, 1986) Entre los factores que influyen la Dap están la presencia y desplazamiento de la fauna del suelo, crecimiento de las raíces, las prácticas agronómicas y otras actividades que se realicen en el suelo; una Dap con un valor alto relativo a cada clase textural es indicador de menor aireación, mayor resistencia a la penetración, alteraciones desfavorables en los procesos hidrológicos (infiltración y la percolación) lo cual genera condiciones inapropiadas para el crecimiento de las raíces (Hamza y Anderson, 2005 citados por (Agostini et al., 2014). La Dap es considerado como uno de los parámetros físicos a ser evaluado para caracterizar el estado físico del suelo (Agostini et al., 2014, citando a Aparicio y Costa, 2007).

Asimismo, el valor de Dap debe ser conocido para poder transformar las concentraciones de nutrientes, minerales y/o carbono en el suelo para el análisis de sus balances (Taalab et al., 2013).

La masa de suelo seco (Ms) y el volumen total (Vt) de una muestra de suelo sirven como base para el cálculo de la Dap. La masa del suelo seco se obtiene en laboratorio, por medio de una muestra de suelo después de secar dicha muestra a  $110 \pm 5$  °C y alcanzar peso constante (Gabriels y Lobo, 2006).

La densidad aparente (Dap) del suelo, es un dato que requiere del muestreo de campo mediante de una metodología que puede resultar difícil para los productores. Sin embargo, la Dap se puede estimar en base a la clase textural del suelo y el conocimiento del grado de compactación del suelo, presencia de macrofauna, nivel de infiltración, nivel de materia orgánica y sodicidad.

Los valores promedio de Dap para cada grupo de clasificación textural se muestra en la Tabla 3. Sin embargo, un caso particular es el del suelo volcánico, que se caracteriza por presentar baja densidad aparente (Bustos et al., 2023).

**Tabla 3. Densidad aparente del suelo**

Tipos de suelo		Dap (g/cm <sup>3</sup> )
Orgánicos y volcánicos		< 1
Minerales	Arcillosos	1-1.19
	Francos	1.2-1.32
	Arenosos	> 1.32

NOM-021-RECNAT-2000 (2002).

La Tabla 4 muestra la densidad aparente del suelo mineral, según el grupo y la clase textural específicos.

**Tabla 4. Clases texturales y densidad aparente del suelo**

Grupo textural	Clase textural	Dap (g/cm <sup>3</sup> )
Arcillosos	Arcilloso	1.00
	Arcillo limoso	1.13
	Arcillo arenoso	1.16
Francos	Franco Arcilloso Limoso	1.20
	Franco arcilloso	1.22
	Franco Arcillo Arenoso	1.24
	Limoso	1.26
	Franco Limoso	1.28
	Franco	1.30
	Franco Arenoso	1.32
	Arena Franca	1.40
Arenosos	Arenoso	1.50

Soil Science Division Staff (2017), y Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) (2002).

La clase textural del suelo se determina en base a los porcentajes relativos de arena, limo y arcilla del suelo, indicados en el análisis de laboratorio. Con esta información se estima el valor de la Dap teniendo en cuenta que un suelo compacto aumenta el valor de la Dap (un suelo con sobrepastoreo o alto en sodicidad, por ejemplo) y, por el contrario, un suelo suelto tiene una Dap menor, es decir, un suelo con alto contenido de materia orgánica y con presencia de macrofauna.

## 2.3. pH del suelo

El pH del suelo es la medida de la acidez o alcalinidad (basicidad) del suelo, definido por la actividad de iones de hidrógeno (Weil y Brady, 2017). El pH es comúnmente denominado como "reacción del suelo" y controla todas las interacciones químicas y biológicas que tienen lugar en la solución del suelo. El valor numérico que toma el pH puede ir desde el 0 al 14: a mayor sea el número, menor será la concentración iones de Hidrógeno y, por consiguiente, es decir la sustancia será más ácida; así, se considera ácido cuando tiene un pH entre 0 a 7, neutro cuando su pH es 7 y alcalino cuando tiene un pH entre 7 a 14 (Cremona y Enríquez, 2020). Sin embargo, el suelo no tiene valores extremos. Según la *United States Department of Agriculture* (USDA) el pH que podemos encontrar en los distintos tipos de suelo se puede clasificar en 11 categorías (Soil Science Division Staff, 2017), tal como se muestra en la Tabla 5.

**Tabla 5.** Clasificación de los rangos de pH del suelo

Clasificación	pH del suelo
Ultra ácido	< 3.5
Extremadamente ácido	3.5-4.4
Muy fuertemente ácido	4.5-5.0
Fuertemente ácido	5.1-5.5
Moderadamente ácido	5.6-6.0
Ligeramente ácido	6.1-6.5
Neutro	6.6-7.3
Ligeramente alcalino	7.4-7.8
Moderadamente alcalino	7.9-8.4
Fuertemente alcalino	8.5-9.0
Muy fuertemente alcalino	> 9.0

Soil Science Division Staff (2017).

El pH regula las propiedades químicas del suelo, controlando la disponibilidad de los nutrientes y sobre la capacidad de intercambio catiónico (CIC). El pH afecta las propiedades biológicas del suelo (Thomas, 2017).

En suelos con pH menor a 5.5 se incrementa la solubilidad de los elementos tóxicos como el Al y Mn, afectando el desarrollo normal de la planta y la producción con bajos rendimientos; los métodos utilizados para determinar la acidez activa (actual) miden el pH en la solución del suelo, mientras que la acidez intercambiable (también llamada acidez potencial) mide el pH en una suspensión de suelo con KCl. La suma de todas las formas de acidez es la acidez total del suelo. El pH, por su parte, se define como el logaritmo negativo de la actividad de iones  $H^+$ , que se expresa mediante la siguiente fórmula:  $pH = -\log [H^+]$  (McBride, 1994).

### a. Métodos de análisis del pH del suelo

Según Sales-Dávila et al. (2024) el método más utilizado en los laboratorios es la medición electrométrica del pH mediante la actividad de los iones de hidrógeno utilizando potenciómetros (equipos medidores de pH). Los dos métodos más comunes son las siguientes:

- **Potenciométrico:** utilizado en los laboratorios en métodos oficiales.
- **Colorimétrico:** aplicable en condiciones de campo, usando el papel de tornasol.

## 2.4. Materia orgánica (M. O.)

Según Julca-Otiniano et al. (2006) la materia orgánica (M. O.) del suelo contiene cerca del 5 % de nitrógeno total, es un parámetro crucial estrechamente relacionado con las características físicas, químicas y biológicas del suelo, y es utilizado como indicador de la calidad del suelo (Bautista y Hernández, 2021). El contenido de M. O. del suelo es fundamental en múltiples procesos del ecosistema, como la creación de la estructura del suelo, retención de agua, secuestro de carbono, el ciclo de los nutrientes, eliminación de sustancias químicas antropogénicas y suministro de energía para los microorganismos del suelo (Barrezueta-Unda et al., 2020, citando a Martínez et al., 2018; Zhang et al., 2005). La clasificación del suelo según su contenido de M. O. se detalla en las Tablas 6 y 7.

**Tabla 6. Nivel del contenido de materia orgánica**

Nivel	Materia orgánica (%)	
	Suelos no volcánicos	Suelos volcánicos
Muy bajos	< 0.6	< 4.0
Bajos	0.6-1.5	4.0-6.0
Medios	1.6-3.5	6.1-10.9
Altos	3.6-6.0	11.0-16.0
Muy altos	> 6.0	> 16.0

Adaptado de Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) (2002).

**Tabla 7. Nivel del contenido de materia orgánica**

Nivel	Materia orgánica (%)
Bajo	< 2
Medio	2 - 4
Alto	> 4

Silvera-Pablo (2008), citando a Universidad Nacional Agraria La Molina [UNALM] (2008).

## a. Métodos de análisis de materia orgánica

La materia orgánica generalmente se determina a partir del carbono (C) orgánico, excluyendo el C mineral, por oxidación del C a dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) mediante combustión “vía seca” (calcinación), conocido también como método gravimétrico y por oxidación con ácido crómico “vía húmeda” por volumetría (Jackson, 1982, Eyherabide et al., 2014) o colorimetría (García-Galvis y Ballesteros-González, 2005).

La materia orgánica total analizada incluye los restos de organismos depositados en el suelo y sustancias húmicas. En suelos orgánicos con alto contenido de materia orgánica, se recomienda emplear el método de combustión "vía seca" (Jackson, 1982). Por otro lado, el método de Walkley y Black, 1934 evalúa la materia orgánica a través del contenido de carbono orgánico, a través de la oxidación del carbono orgánico del suelo por medio de una disolución de dicromato de potasio. La Figura 2 muestra la determinación de materia orgánica en la etapa de titulación por retroceso del método Walkley y Black.



**Figura 2.** Determinación de materia orgánica por el método de Walkley y Black

## b. Beneficios de la materia orgánica

Según Creamer et al. (2022) la materia orgánica tiene la capacidad de mejorar las propiedades del suelo de la siguiente forma:

- **Propiedades físicas:** incrementa la porosidad del suelo, mejora la densidad, retención de agua y regula la temperatura del suelo.
- **Propiedades químicas:** regula el pH, incrementa la CIC, mejora la disponibilidad del N, P, K, Ca, Mg, Cu, B y en el almacenamiento de carbono y reciclaje de nutrientes.
- **Propiedades biológicas:** incrementa la actividad microbiana de poblaciones de actinomicetos y micorrizas.

## 2.5. Nitrógeno (N)

El nitrógeno (N) es el elemento más abundante en la atmósfera y se considera como la fuente principal para el suelo. En cambio, la meteorización de las rocas aporta una proporción menor de este elemento. El N atmosférico se incorpora al suelo mediante procesos abióticos o bióticos y se acumula en forma orgánica no asimilable por las plantas. Por consiguiente, se requiere que estos compuestos se mineralicen para que las plantas sean capaces de asimilarlo (Mengel et al., 2001; Wang et al., 2018).

A su vez, el N mineral del suelo se presenta en forma amoniacal ( $\text{NH}_4^+$ ) y nítrico ( $\text{NO}_3^-$ ), estas son asimiladas de forma diferenciada por las plantas, por las condiciones del ambiente y según la especie vegetal (Scarsbrook, 1965; Shafreen et al., 2021).

El contenido de N total en el suelo se expresa como porcentaje de peso de la muestra y se recomienda que dicho valor contenga dos cifras decimales (Tablas 8 y 9); asimismo, en el reporte de análisis del suelo se debe especificar el método que ha sido aplicado para su determinación.

**Tabla 8. Nivel del contenido de Nitrógeno inorgánico**

Nivel	Nitrógeno inorgánico (%)
Muy bajo	< 0.05
Bajo	0.05-0.1
Medio	0.1-0.15
Alto	0.15-0.25
Muy alto	> 0.25

SEMARNAT (2002).

**Tabla 9. Nivel del contenido de Nitrógeno**

Nivel	Nitrógeno (%)
Bajo	< 0.1
Medio	0.1-0.2
Alto	> 0.2

Silvera-Pablo (2008), citando a UNALM (2008).

## a. Funciones y síntomas de deficiencia del nitrógeno en la planta

Según Mengel et al. (2001), el nitrógeno en las plantas interviene en:

- En la división celular.
- En la producción de clorofila.
- En la producción de azúcares, almidón, entre otras sustancias para la nutrición de las plantas.

Los síntomas de la deficiencia de nitrógeno son:

- Clorosis (color amarillento) en las hojas viejas.
- Reducción en el crecimiento de la planta.

## 2.6. Fósforo (P)

El fósforo (P) es absorbido del suelo por las plantas en forma de ortofosfato primario ( $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ) en suelos ácidos con pH menor a 7 y en ortofosfato secundario ( $\text{H}_2\text{PO}_4^{2-}$ ) en suelos con pH superior a 7. La fuente de fósforo en el suelo es la materia orgánica y los minerales de rocas como la apatita (fuente inorgánica). Asimismo, el P cumple funciones estructurales en las macromoléculas, ácidos nucleicos y transferencia de energía (Tisdale y Nelson, 1985). La Figura 3 muestra las diversas formas en la que se encuentra el fósforo en el suelo y sus procesos fisicoquímicos.



**Figura 3.** Esquema del fósforo total y disponible (adaptado de Tisdale y Nelson, 1985)

Incluso, cuando la reserva de P es alta en el suelo solo una pequeña fracción está directamente disponible para la planta pues una mayor parte se halla fijada en formas no solubles. Además, la disponibilidad del P depende del pH del suelo (Tisdale y Nelson 1985).

El fósforo disponible se entiende como el equivalente al fósforo que puede ser absorbido por la planta, Por lo tanto, el método analítico utilizado para su determinación debe ser capaz de extraer del suelo cantidades equivalentes a las que las plantas podrían absorber.

## a. Métodos para determinar fósforo

La interpretación del contenido de fósforo de la muestra de suelo dependerá del método por el cual se analizó. De acuerdo con la (SEMARNAT, 2002), los métodos más usados para estimar el P y estimar la fertilización de los cultivos son los siguientes:

- **Método de Olsen**

Este método, es generalmente utilizado en estudios de fertilidad de suelos para la determinación de fósforo disponible, tanto en suelos neutros como alcalinos. El fósforo es extraído del suelo con una solución de  $\text{NaHCO}_3$  0.5 M ajustada a un pH de 8.5. En suelos neutros, calcáreos o alcalinos, que contienen fosfatos de calcio, este extractante disminuye la concentración de Ca en solución a través de una precipitación del  $\text{CaCO}_3$ , por lo tanto, la concentración de P en solución se incrementa. En suelos ácidos que contienen fosfatos de Al y Fe, la concentración de P en solución se incrementa conforme el pH incrementa. Este extractante evita que se presenten reacciones secundarias en suelos ácidos y calcáreos, debido a que el nivel de Al, Ca y Fe se mantiene muy bajo en dicha solución.

**Tabla 10.** Nivel del contenido de fósforo según el método Olsen

Nivel	Fósforo (ppm)
Bajo	< 5.5
Medio	5.5-11
Alto	> 11

SEMARNAT (2002).

- Método de Bray y Kurtz

Este método, es generalmente utilizado en estudios de fertilidad del suelo para la determinación de fósforo disponible en suelos ácidos. El fósforo determinado con este procedimiento ha mostrado una estrecha relación con la respuesta de los cultivos. La solución extractiva de P consiste en una mezcla de HCl y  $\text{NH}_4\text{F}$ , los cuales remueven las formas de P solubles en ácidos como los fosfatos de calcio y una porción de fosfatos de aluminio y hierro como se muestra en la Tabla 11 (Bray y Kurtz, 1945).

**Tabla 11.** Nivel del contenido de fósforo según el método de Bray y Kurtz 1

Nivel	Fósforo (ppm)
Bajo	< 15
Medio	15-30
Alto	> 30

SEMARNAT (2002).

## b. Funciones y síntomas de deficiencia del fósforo en la planta

El P cumple las siguientes funciones en la planta:

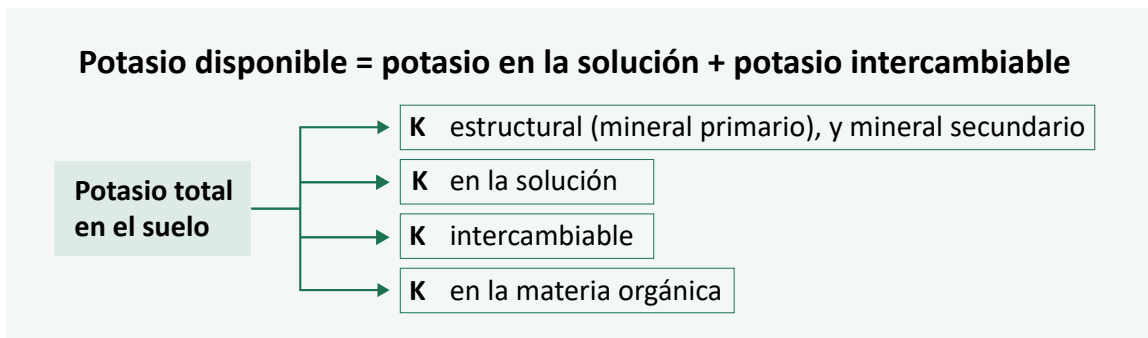
- Estimula el desarrollo radicular.
- Promueve la floración, la formación de la semilla y la producción de frutos.
- Es requerido en las plantas para la fijación biológica del nitrógeno (N).
- La aplicación del fósforo (Fosfato diamónico) es recomendable en la etapa de vivero.

Cuando la planta no posee niveles suficientes de fósforo se presentan los siguientes síntomas:

- Clorosis y manchas marrones o rojizas en hojas viejas.
- Estrés hídrico.

## 2.7. Potasio (K)

Normalmente, el suelo contiene elevadas concentraciones de K, mucho mayores que lo que absorben las plantas. Sin embargo, el K disponible es aquel presente en solución en el suelo y en la fracción intercambiable. El K intercambiable es la forma iónica del potasio unido electrostáticamente a los materiales que componen la fase sólida coloidal mineral y orgánica del suelo. También, hay que tener en cuenta que el exceso de K puede generar deficiencia de Mg y Ca (Mengel y Kirkby, 1987). El Esquema del potasio total y disponible se muestra en la Figura 4.



**Figura 4.** Esquema del potasio total y disponible (Mengel, 2006)

Las Tablas 12 y 13, muestran las escalas del contenido de potasio, con el método acetato de amonio.

**Tabla 12.** Escalas del contenido de potasio

Nivel	Potasio (ppm)
	Método acetato de amonio
Bajo	< 100
Medio	100-240
Alto	> 240

Silvera-Pablo (2008), citando a UNALM (2008)

**Tabla 13.** Escalas del contenido de óxido de potasio

Nivel	K <sub>2</sub> O (kg/ha)
Bajo	< 300
Medio	300-600
Alto	> 600

Silvera-Pablo (2008), citando a UNALM (2008)

### a. Métodos para determinar potasio

Según Soil Survey Staff (2014) los extractantes usados en laboratorio para determinar la cantidad de este elemento son:

- **Acetato de amonio:** estima el potasio en la solución del suelo.
- **Cloruro de calcio:** estima el potasio intercambiable más el potasio en solución del suelo.
- **Mehlich 1 y Mehlich 3:** ambos extractantes estiman el potasio intercambiable más el potasio en solución del suelo.
- **Ácido nítrico:** estima la forma no intercambiable de potasio.

### b. Funciones y síntomas de deficiencia de potasio en la planta

Según Mengel (2006), las funciones del potasio en las plantas son:

- En la fotosíntesis, el potasio regula la apertura y cierre de las estomas.
- Desencadena la activación de enzimas y es esencial para la síntesis de adenosín trifosfato (ATP).
- Desempeña un rol importante en la regulación del agua en las plantas (osmorregulación).

Por el contrario, cuando la planta no tiene la cantidad suficiente de K se aprecian los siguientes síntomas:

- Estrés hídrico.
- Necrosis en la punta y los bordes de las hojas más viejas, preferentemente en la zona de producción.
- Defoliación y granos pequeños.

## 2.8. Capacidad de intercambio catiónico (CIC)

Es la capacidad que tiene el suelo de retener cationes en su fracción sólida y es un indicativo de la fertilidad del suelo. Está en función a la presencia de arcilla (cantidad y tipo) y materia orgánica en el suelo (Bohn et al., 2001).

### a. Método para determinar la CIC

El método para determinar la capacidad de intercambio catiónico (CIC) y las bases intercambiables ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$ ) presentes en el suelo se basa en el uso de una solución saturante de acetato de amonio 1 N con un pH de 7, según lo establecido por Polemio y Rhoades (1977).

Los tipos de CIC son:

- **CIC total.** En suelos con pH superior a 5.5, se recomienda determinar con acetato de amonio (pH 7, 1 N).
- **CIC efectiva.** Se determina en suelos con pH menor de 5.5 y es la suma de las bases cambiabiles ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$  y  $\text{Na}^+$ ) más la acidez cambiabie ( $\text{Al}^{3+} + \text{H}^+$ ) (Thomas y Hargrove, 1984).

$$\text{CICe} = \sum \text{BC} + \sum \text{AC}$$

Donde:

CICe = Capacidad de Intercambio Catiónico efectiva

BC = Bases cambiabiles ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ )

AC = Acidez Cambiabile ( $\text{Al}^{3+} + \text{H}^+$ )

Los Niveles del contenido de Capacidad de Intercambio Catiónico CIC se muestra en la Tabla 14.

**Tabla 14.** Niveles del contenido de Capacidad de Intercambio Catiónico CIC

Capacidad de intercambio catiónico	
Nivel	CIC (Cmol(+) /kg) o (mEq/100 g de suelo)
Muy bajo	< 5
Bajo	5-15
Medio	15-25
Alto	25-40
Muy alto	> 40

SEMARNAT (2002).

## b. Bases cambiables (calcio, magnesio, potasio y sodio)

Las bases cambiables son: calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ), magnesio ( $\text{Mg}^{2+}$ ), potasio ( $\text{K}^+$ ) y Sodio ( $\text{Na}^+$ ); las cuales, están relacionadas con la fertilidad del suelo y se expresa en mEq/100 g de suelo, entendiéndose que a mayor BC, mayor será la fertilidad del suelo (Thomas y Hargrove, 1984). La interpretación de resultados de Ca, Mg y K se muestra en la Tabla 15.

### • Porcentaje de bases cambiables

$$\text{Porcentaje de bases cambiables} = \frac{\sum \text{BC}}{\text{CIC o CICE}} \times 100$$

Dónde:

BC = Bases cambiables ( $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{K}^+ + \text{Na}^+$ )

CICE = Suma de cationes ( $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{K}^+ + \text{Na}^+ + \text{Al}^{3+} + \text{H}^+$ )

Se recomienda que el porcentaje de bases cambiables para el café debe ser mayor al 70 % (Silvera-Pablo, 2008).

La escala del contenido de bases cambiables se muestra en la Tabla 15.

**Tabla 15. Escalas del contenido de bases cambiables**

Capacidad de intercambio catiónico			
Nivel	CIC	CIC	CIC
	(Cmol(+) /kg) o (mEq/100 g de suelo)		
Muy baja	< 2	< 0.5	< 0.2
Baja	2-5	0.5-1.3	0.2-0.3
Media	5-10	1.3-3	0.3-0.6
Alta	> 10	> 3	> 0.6

SEMARNAT (2002).

De acuerdo con Silvera-Pablo (2008) se recomienda una distribución adecuada de saturación de cada uno de los cationes cambiables:

- Saturación de  $\text{Ca}^{2+}$  = 60-75 %
- Saturación de  $\text{Mg}^{2+}$  = 12-20 %
- Saturación de  $\text{K}^{2+}$  = 3-7 %
- Saturación de Al + H = 0-15 %
- Saturación de micronutrientes = 3-5 %

### c. Acidez cambiable (aluminio e hidrógeno)

La acidez cambiable está definida por la presencia de aluminio ( $\text{Al}^{3+}$ ) y cationes hidrógeno ( $\text{H}^+$ ) en la solución del suelo, siendo la hidrólisis del Al que libera iones  $\text{H}^+$  incrementando la acidez y promoviendo la presencia de Al soluble (Thomas y Hargrove, 1984); por lo tanto, cuando es mayor la concentración de Al, será mayor la acidez del suelo y el pH será más baja. Para estimar el requerimiento de la enmienda cálcica se recomienda utilizar el resultado de la saturación de Al.

- **Método para determinar la acidez cambiabile**

La metodología de Lin y Coleman (1960) hace uso del cloruro de potasio para la determinación de la acidez intercambiabile. Además de las bases ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^{+}$  y  $\text{K}^{+}$ ) también hay una cantidad de acidez que puede ser desplazada del complejo intercambiabile del suelo. El pH y la capacidad de intercambio catiónico del suelo fundamentan la cantidad de esta acidez y generalmente está compuesta por el  $\text{H}^{+}$ , el  $\text{Al}^{3+}$  y los ácidos orgánicos.

- **Porcentaje de acidez cambiabile**

$$\text{Porcentaje de acidez cambiabile} = \frac{\sum \text{AC}}{\text{CIC o CICE}} \times 100$$

Dónde:

AC = Acidez cambiabile ( $\text{Al}^{3+} + \text{H}^{+}$ )

CICE = Suma de cationes ( $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{K}^{+} + \text{Na}^{+} + \text{Al}^{3+} + \text{H}^{+}$ )

Se recomienda que el porcentaje de acidez cambiabile para el cultivo de café debe ser menor al 30 % (Silvera-Pablo, 2008).

- **Porcentaje de saturación de aluminio (% Sat. Al)**

$$\% \text{ Sat. Al} = \frac{\text{Al}}{\text{CIC o CICE}} \times 100$$

Dónde:

Al = Aluminio ( $\text{Al}^{3+}$ )

CICE = Suma de cationes ( $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{K}^{+} + \text{Na}^{+} + \text{Al}^{3+} + \text{H}^{+}$ )

Se recomienda que la saturación de aluminio para el café debe ser menor al 30% (Silvera-Pablo, 2008).

#### d. Relaciones catiónicas

Las relaciones catiónicas son datos importantes al momento de decidir las fuentes de corrección del pH del suelo (encalado). La interpretación de relaciones catiónicas ( $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}/\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}/\text{K}^+$  y  $\text{K}^+/\text{Mg}^{2+}$ ) se muestran en la Tabla 16.

**Tabla 16. Relaciones catiónicas ideales**

Relaciones catiónicas	Rango ideal
$\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$	5-8
$\text{Ca}^{2+}/\text{K}^+$	14-16
$\text{Mg}^{2+}/\text{K}^+$	1.8-2.5
$\text{K}^+/\text{Mg}^{2+}$	0.2-0.3

Silvera-Pablo (2008), citando a UNALM (2008).

## 2.9. Carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ )

La cantidad de carbonatos presentes en el suelo están relacionado con su estructura, actividad biológica, bloqueo de nutrientes. Sin embargo, su contenido total no genera un análisis exacto de su importancia que tiene en los procesos químicos del suelo, por ello se debe considerar también el análisis de la caliza activa, por ejemplo, las fracciones más finas, es decir, la “fracción activa” es la que interfiere principalmente en la tasa de hierro extraíble en consecuencia con la clorosis férrica o calcárea en las plantas (Moreno-Vigara et al., 2002).

### a. Método para determinar el carbonato de calcio

De acuerdo con la Norma Oficial Mexicana (SEMARNAT, 2002), resulta importante conocer el contenido de carbonatos en el suelo, debido a que valores altos de los mismos pueden conllevar a deficiencias de fósforo, zinc, hierro y/o manganeso en los cultivos. Los métodos usados para estimar el  $\text{CaCO}_3$  equivalente son los siguientes:

## • Neutralización ácida

Se sigue el método de titulación rápida por Piper, también conocido como método ácido de neutralización. La muestra es tratada con ácido diluido y el ácido restante (no usado por el carbonato), se titula. Los resultados son obtenidos como carbonato de calcio equivalente, dado que la disolución no es selectiva para la calcita, también otros carbonatos pueden ser disueltos de la misma manera, como la dolomita (Bloom et al., 1985).

## • Horton y Newsom

El método tiene la ventaja de ser rápido y reproducible, y permite determinar el carbonato de calcio equivalente de materiales como la calcita ( $\text{CaCO}_3$ ) y dolomita ( $\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$ ); en el método el volumen de aguas desplazado es equivalente al volumen de dióxido de carbono desprendido de la muestra que reaccionó con ácido clorhídrico (Horton y Newsom, 1953). La escala del contenido de carbonato de calcio se muestra en la Tabla 17.

**Tabla 17.** Escalas del contenido de carbonato de calcio

Nivel	Carbonato de calcio (% $\text{CaCO}_3$ )	
	Método de neutralización ácida	Método de Horton y Newsom
Muy bajo	< 0.5	< 0.5
Bajo	0.5-2	0.6-2
Mediano	2.1-15	2.2-15
Alto	16-40	17-40
Muy alto	> 40	> 40

SEMARNAT (2002).

## 2.10. Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica (CEC) es un indicador de las sales presentes en el suelo (Allison et al., 1954). La cantidad de iones (cationes o aniones) en la solución del suelo son percibidas en las mediciones de conductividad eléctrica: a mayor cantidad de cationes o aniones corresponde mayor conductividad eléctrica. Los iones y cationes como  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{H}^+$  y los aniones  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{OH}^-$  se encuentran asociadas con la salinidad. Uno de los métodos más usados para determinar la conductividad es mediante la medición de extracto de saturación del suelo el cual se reporta en unidades de decisiemens por metro (dS/m) (Corwin y Lesch, 2005). La interpretación de los niveles de conductividad eléctrica se presenta en la Tabla 18.

**Tabla 18.** Niveles de conductividad eléctrica en el suelo

Conductividad eléctrica del suelo	
Nivel	CE (dS/m)
No tiene salinidad	< 1.0
Muy ligeramente salino	1.1-2.0
Moderadamente salino	2.1-4.0
Salino	4.1-8.0
Fuertemente salino	8.1-16.0
Muy fuertemente salino	> 16.0

Adaptado de SEMARNAT (2002).

## 2.11. Análisis de suelos

Es una actividad esencial que permite orientar al productor sobre el grado de suficiencia o deficiencia de los nutrientes del suelo, el cual permitirá el éxito en la producción agrícola. El análisis de suelos proporciona una indicación de la capacidad del suelo para suministrar nutrientes (Hochmuth et al., 2018; United States Department of Agriculture, 2001).

## 2.12. Tipos de análisis del suelo

Según Quispe et al. (2022), el Laboratorio de Análisis de Suelos, Aguas y Foliaves (LABSAF) del Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA), cuenta con los siguientes tipos de análisis del suelo, los cuales analizan los parámetros indicados a continuación:

### a. Análisis de caracterización

- Textura, potencial de hidrógeno (pH)
- Materia orgánica (M.O.)
- Nitrógeno (N)
- Fósforo (P)
- Potasio (K)
- Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC)
- Calcio (Ca)
- Magnesio (Mg)
- Sodio (Na)
- Aluminio (Al)
- Hidrógeno (H)
- Carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ )
- Conductividad eléctrica (CE)

### b. Análisis de fertilidad

- pH
- Materia orgánica (M.O.)
- Nitrógeno (N)
- Fósforo (P)
- Potasio (K)
- Conductibilidad Eléctrica (CE)

### c. Análisis completo

Los mismos parámetros del análisis de caracterización más los siguientes microelementos:

- Cobre (Cu)
- Zinc (Zn)
- Manganeseo (Mn)
- Hierro (Fe)

## 2.13. Muestreo de suelos

Según Hochmuth et al. (2018) esta actividad comprende las siguientes etapas:

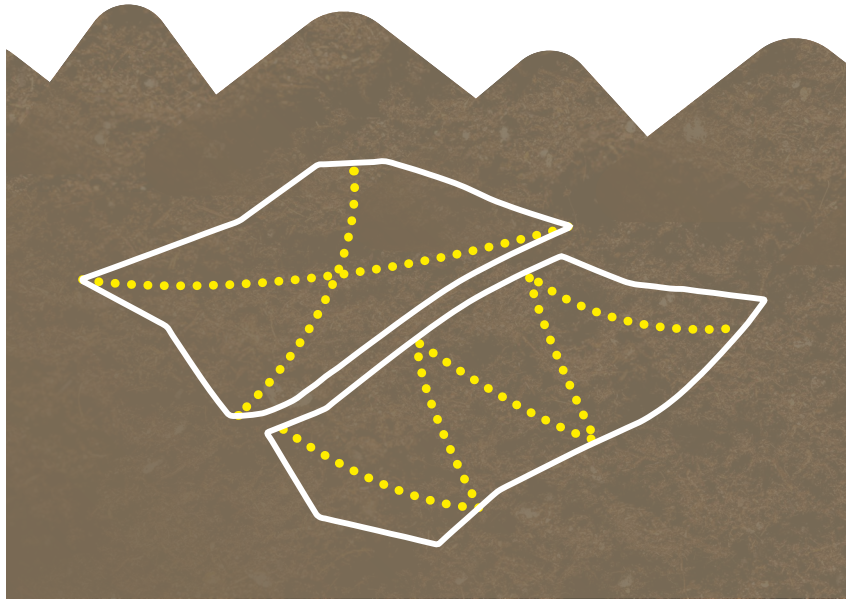
### a. División de la parcela en lotes

El lote debe tener una dimensión mínima de una hectárea y una máxima de tres hectáreas, con plantaciones de la misma edad, de similar color del suelo y con la misma pendiente.

### b. Extracción de las submuestras

Se identifica el área en producción y, posteriormente, se procede a recolectar entre 20 y 30 submuestras o puntos de muestreo. Para garantizar una representatividad adecuada del lote, el muestreo se realiza recorriendo el área mediante el método del zigzag o método en aspa (Figura 5). Previo a la toma de la submuestra, se debe limpiar la materia orgánica de la superficie y se debe evitar zonas cercanas a caminos, composteras, árboles muertos y bordes del lote.

Según Sadeghian-Khalajabadi (2008), en el caso de cultivos en producción se extraen las submuestras de la proyección de la copa de la planta (Figuras 6 y 7), debido a que en esa área es donde se realiza el abonamiento. Después, las submuestras se mezclan hasta obtener homogeneidad y se separa el excedente de muestra hasta obtener 1 kg de suelo. Luego, cada muestra debe ser embolsada y cubierta con cinta de embalaje transparente, para evitar la pérdida de muestra. Posteriormente, se debe etiquetar con los datos necesarios para ubicar el área muestreada. Finalmente, las muestras deben ser llevadas al laboratorio para su análisis.



**Figura 5.** Recorrido en zig-zag y aspa para el muestreo de la parcela



**Figura 6.** Muestreo de suelo en la proyección de la copa en el cultivo de café

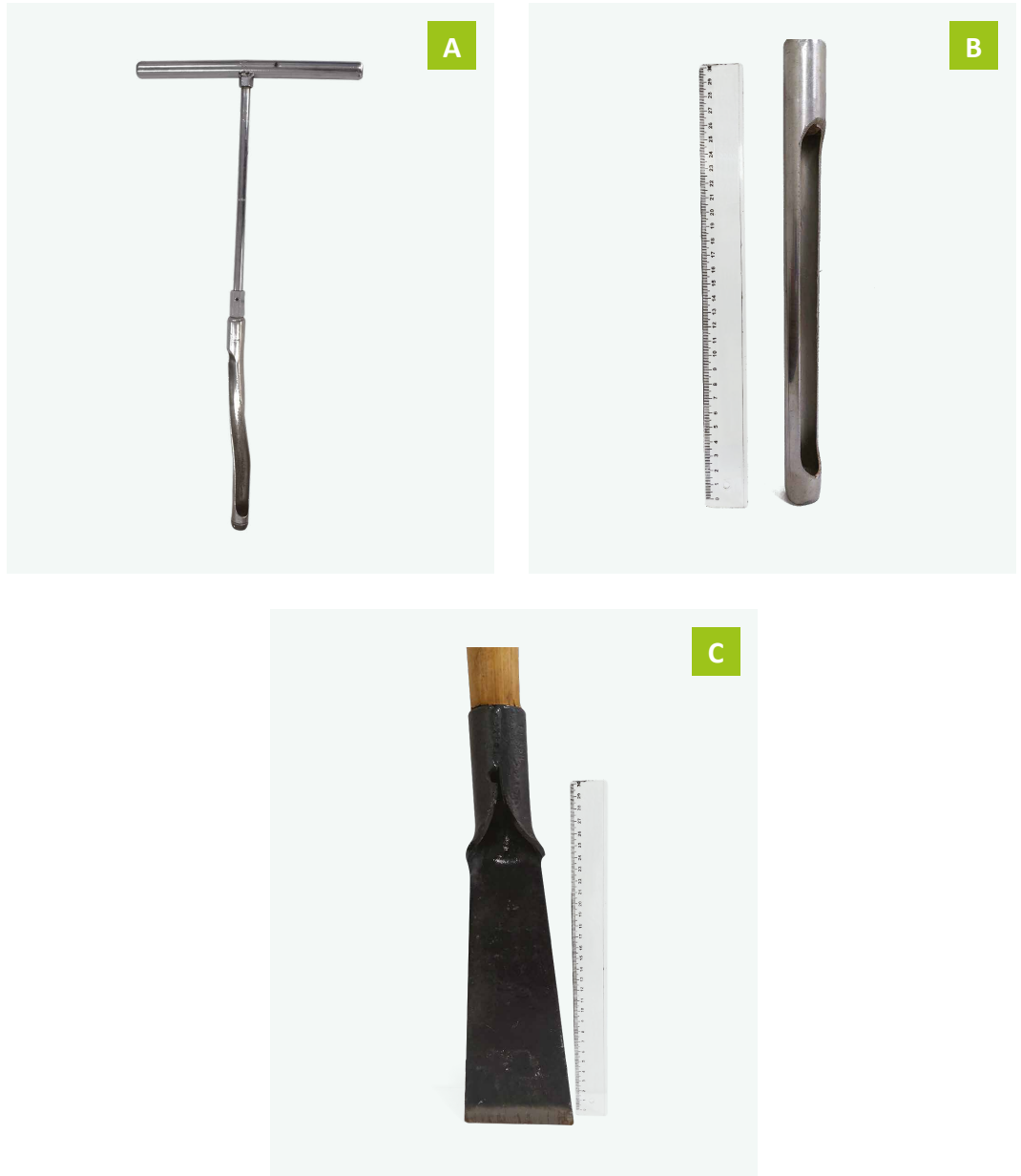


**Figura 7.** Extracción de la submuestra de suelo en el cultivo de café

### c. Material muestreador de suelo

Para esta actividad se recomienda usar un barreno muestreador de suelo de acero cromado con níquel (Figura 8A y 8B), por la facilidad de su manipulación y permite tomar submuestras de forma rápida. También, se puede utilizar una cavadora reforzada recta o poceadora (Figura 8C), que esté limpia y libre de óxidos, para evitar la contaminación de la muestra de suelo.

Actualmente la pala recta ya no es recomendable, debido a que con este se tarda mucho más el muestreo y se extrae demasiada muestra, siendo necesario solo una lámina delgada en cada submuestra.



**Figura 8.** Herramientas para la colecta de muestras de suelo. A) Barreno muestreador de suelo de cuerpo completo, B) parte inferior del barreno muestreador de suelo, C) cavadora reforzada recta o poceadora

#### d. Etiquetado de las muestras

Se debe etiquetar la muestra con los datos de importancia para el interpretador (Figuras 9 y 10) y que muestre los siguientes datos.

1. Cliente: en caso de cooperativas, proyectos, entre otros.
2. N° DNI/RUC del cliente.
3. Nombre(s) y apellidos del productor.
4. Nombre del fundo y/o N°/código de lote.
5. Comunidad.
6. Distrito.
7. Provincia.
8. Región.
9. Cultivo: café, cacao, plátanos, cítricos, palto, entre otros.
10. Tipos de muestra: suelo, agua, foliares, compost, biol, etc.
11. Fecha de muestreo: día/mes/año.
12. Edad del cultivo: en años.
13. Distanciamiento de siembra: 2 x 1 m, 1.2 x 1.8 m, entre otros.
14. Sistema de siembra: cuadrado, rectángulo, tresbolillo, entre otros.
15. Rendimiento de la campaña anterior: En kg/ha o en qq/ha.

De preferencia la etiqueta debe ir protegida por cinta de embalaje, para evitar su deterioro al contacto con el agua.



Figura 9. Muestras de suelo etiquetadas

 <b>IDENTIFICACIÓN DE MUESTRA</b> 	
<b>Ciente:</b>	Instituto Nacional de Innovación Agraria - INIA DNI/RUC: 2013 1365 994
<b>Productor(a):</b>	Aaaaaa Bbbbbb, Cccccccc Dddddddd
<b>Comunidad:</b>	El oconal <b>Fundo - Lote:</b> Bella Vista - Pino R1
<b>Distrito:</b>	Villa Rica <b>Provincia:</b> Oxapampa <b>Región:</b> Pasco
<b>Cultivo:</b>	Café <b>Sistema de siembra:</b> Rectángulo <b>Distanciamiento de siembra:</b> 2 x 1 m
<b>Edad del cultivo:</b>	7 años <b>Rendimiento de la campaña anterior:</b> 1200 kg/ha
<b>Tipo de muestra:</b>	Suelo <b>Fecha de muestreo:</b> 07/set/2023
<b>Tipo de análisis:</b>	Análisis de caracterización de suelo

Figura 10. Muestra de etiqueta para análisis de suelos



## 3. Suelos asociados al cultivo de café

### 3.1. Características adecuadas del suelo para el cultivo de café

El cultivo de café requiere que el suelo presente ciertas características específicas que cumplan con rangos óptimos (Valencia-Aristizábal y Carrillo-Pachón, 1983; Valencia-Aristizábal et al., 1989), como se detallan en la Tabla 19.

**Tabla 19.** Características del suelo y los rangos óptimos para el cultivo de café

Características del suelo	Rango
Textura	Franco, franco arcilloso, franco arenoso, franco limoso
Profundidad efectiva	> 40 cm
pH	Adecuado (5-5.5), manejable (4.5-6)
Materia orgánica (M. O.)	Manejable (> 4 %)
Fósforo (P) (método: Bray II)	6-14 ppm
Calcio (Ca <sup>2+</sup> ) (método: Acetato de amonio)	1.6-4.2 mEq/100g
Magnesio (Mg <sup>2+</sup> ) (método: Acetato de amonio)	0.5-1.4 mEq/100g
Potasio (K <sup>+</sup> ) (método: Acetato de amonio)	0.29-0.4 mEq/100g
Aluminio (Al <sup>3+</sup> ) (método: Yuan)	< 1 mEq/100g
Suma de bases	5-10 mEq/100g
Saturación de aluminio	60 % es el límite superior

Adaptado de Valencia-Aristizábal y Carrillo-Pachón (1983), y Valencia-Aristizábal et al. (1989).

Los estudios sistematizados por Valencia-Aristizábal y Carrillo-Pachón (1983) reúnen información del suelo colombiano para el cultivo de café. Estos datos pueden ser aplicados al suelo peruano del tipo inceptisols, debido a sus características similares. En este tipo de suelos, el café ha presentado buena producción en rangos de pH de 4.5 a 5.5 en Chanchamayo-Junín (Figura 11) y Oxapampa-Pasco.



**Figura 11.** Cultivo de café con buena producción

## 3.2. Extracción de nutrientes del cultivo de café

El cultivo de café requiere de nutrientes para mejorar el rendimiento de grano seco de café expresados en quintales por hectárea (qq/ha) y obtener una buena producción. Para ello, se debe aplicar la cantidad adecuada de fertilizantes de acuerdo con el análisis del suelo correspondiente, la cual debe ser calculada mediante la extracción de macronutrientes que se presenta en la Tabla 20.

**Tabla 20.** Extracción de macronutrientes primarios en el cultivo de café

Nutrientes	Rendimiento (quintales/ hectárea)							
	10	15	20	25	30	40	50	60
N	56	84	112	140	168	224	280	336
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	9	14	18	23	27	36	45	54
K <sub>2</sub> O	63	94	125	157	188	250	313	376

Silvera-Pablo (2008), citando a Sánchez (2007).



## 4. Resultado e interpretación del análisis del suelo en el cultivo de café

### 4.1. Resultados del análisis del suelo

El análisis del suelo nos permite conocer el estado de la fertilidad actual para determinar la cantidad de los nutrientes o enmiendas requeridas (Valencia-Aristizábal y Carrillo-Pachón, 1983; Valencia-Aristizábal et al., 1989). Los análisis físico y químico del suelo (Tabla 21) contienen información necesaria para calcular los nutrientes que deberían aplicarse.

**Tabla 21.** Resultados del análisis del suelo en el cultivo de café

Análisis mecánico			Clase textural	CE		pH (1:1)	M. O.	N	P	K
Arena	Limo	Arcilla		dS/m	mS/m		%	%	ppm	ppm
(%)										
28.96	39.64	31.40	Franco arcilloso	0.15	15	4.3	2.22	0.11	6.2	92

CIC	Cationes cambiabiles						CICe	Base cambiabile %	Acidez cambiabile %	Sat. Al %	CaCO <sub>3</sub> %
	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	Al <sup>3+</sup>	H <sup>+</sup>					
	Cmol(+)/kg o mEq/100 g										
—	4	1.3	0.29	0.01	3.84	0.16	9.6	58.33	41.67	40	0

## 4.2. Interpretación del análisis del suelo

La interpretación de los resultados del análisis del suelo es el primer paso para conocer las características particulares del suelo muestreado para elaborar un plan de fertilización adecuado. Los resultados obtenidos (Tabla 21) se pueden interpretar comparándolos con tablas de niveles de propiedades físicas y químicas del suelo, como se muestra en la Tabla 22.

**Tabla 22.** Modelo de interpretación de los resultados del análisis del suelo en el cultivo de café

Interpretación de los resultados del análisis del suelo				
Ensayo	Unidad	Resultado	Interpretación	Fuente
Potencial de hidrógeno (pH)	-	4.3	Extremadamente ácido	Soil Science Division Staff (2017)
Materia orgánica (M. O.)	%	2.22	Medio	SEMARNAT (2002)
Nitrógeno (N)	%	0.11	Medio	SEMARNAT (2002)
Fósforo (P)	ppm	6.2	Medio	SEMARNAT (2002)
Potasio (K)	ppm	92	Bajo	Silvera-Pablo (2008) citando a UNALM (2008)
Capacidad de intercambio catiónico efectivo (CICe)	Cmol(+)/kg	9.6	Bajo	SEMARNAT (2002)
Calcio (Ca <sup>2+</sup> )	Cmol(+)/kg	4	Bajo	SEMARNAT (2002)
Magnesio (Mg <sup>2+</sup> )	Cmol(+)/kg	1.3	Medio	SEMARNAT (2002)
Potasio (K <sup>+</sup> )	Cmol(+)/kg	0.29	Bajo	SEMARNAT (2002)
Carbonato de calcio (CaCO <sub>3</sub> )	%	0.48	Muy bajo	SEMARNAT (2002)
Conductividad eléctrica (CE)	dS/m	0.15	No tiene salinidad	SEMARNAT (2002)





## 5. Cálculo de encalado del suelo en el cultivo de café

### 5.1. Método de encalado 1: neutralización del aluminio

Este método consiste en aplicar fuente de encalante para neutralizar el contenido equivalente al aluminio intercambiable (Kamprath, 1970), que es un elemento que evita la extracción por las plantas de la mayoría de los nutrientes del suelo.

A nivel mundial, en el 70 % de la tierra potencialmente cultivable, se pueden encontrar concentraciones de aluminio cuya presencia inhibe el crecimiento de las plantas en suelos ácidos. En condiciones de suelos con pH menor a 5, el aluminio se solubiliza presentándose mayormente como  $Al^{3+}$ , esta forma del aluminio es considerada la más tóxica para las plantas, la toxicidad depende de factores como la especie del cultivo, la concentración de aluminio, el período de exposición y las condiciones de crecimiento (Kochian et al., 2005).

#### a. Estimación de saturación de aluminio en exceso

Para este ejemplo, se utilizarán los datos del análisis del suelo de la Tabla 21, donde la saturación de aluminio (Sat. Al) es del 40 %. Aunque, el café tolera hasta un 60 %, sin embargo, se recomienda reducir este valor gradualmente hasta niveles inferiores (Valencia-Aristizábal et al., 1989). Por ello, en este caso, disminuirémos la Sat. Al del 40 al 20 %, lo que implica eliminar un 20 %, como se calcula a continuación:

$$\text{Sat. Al en exceso (\%)} = \text{Sat. Al del análisis (\%)} - \text{tolerancia del cultivo a la Sat. Al (\%)}$$

$$\text{Sat. Al en exceso (\%)} = 40 \% - 20 \% = 20 \%$$

## b. Cálculo de la acidez cambiante del aluminio en exceso

Se consideran los datos de la Tabla 21 y la fórmula:

$$\text{CICe} = 9.60 \text{ mEq}/100 \text{ g}$$

Para hallar el porcentaje de saturación de aluminio en exceso, se usa la siguiente fórmula:

$$\text{Sat. Al (\%)} = \frac{\text{Al}^{3+} \text{ (mEq}/100)}{\text{CICe (mEq}/100)} \times 100$$

Se debe despejar el aluminio, en la fórmula (Fageria y Nascente, 2014).

$$\text{Al}^{3+} \text{ en exceso (mEq}/100 \text{ g)} = \frac{\text{Sat. Al}^{3+} \text{ exceso (\%)} \times \text{CICe (mEq}/100)}{100}$$

$$\text{Al}^{3+} \text{ en exceso (mEq}/100 \text{ g)} = \frac{20 \times 9.60}{100}$$

$$\text{Al}^{3+} \text{ en exceso (mEq}/100 \text{ g)} = 1.92 \text{ mEq Al}^{3+}/100$$

### c. Estimación del peso de la capa arable (P.C.A.)

Según Silvera-Pablo (2008), para hallar el P.C.A. se requiere la “densidad aparente”  $Dap = 1.22 \text{ g/cm}^3$  o  $\text{t/m}^3$  (Tabla 4), que es una información proporcionada por la textura del suelo, según el resultado del análisis del suelo (Tabla 21). El área del cultivo se suele considerar 1 ha de forma estándar. Para el cultivo de café, se considera 0.15 metros de profundidad de muestreo debido a que es la profundidad aproximada de sus raíces activas.

$$\text{P.C.A.} = \text{Área (m}^2\text{)} \times \text{Dap (t/m}^3\text{)} \times \text{Profundidad (m)}$$

$$\text{P.C.A.} = 10\,000 \text{ m}^2 \times 1.22 \text{ t/m}^3 \times 0.15 \text{ m} = 1\,830 \text{ t/ha}$$

Luego, mediante regla de tres simple, transformamos las unidades a kg/ha:

$$\begin{array}{r} 1 \text{ t} \quad \underline{\hspace{2cm}} \quad 1\,000 \text{ kg} \\ 1\,830 \text{ t} \quad \underline{\hspace{2cm}} \quad X \text{ kg} \end{array}$$

$$\text{P.C.A.} = 1\,830 \times 1\,000 = 1\,830\,000 \text{ kg/ha}$$

### d. Determinación del peso miliequivalente (mEq) del calcio

El peso molecular del calcio (Ca) es aproximadamente 40 g/mol y tiene una valencia de 2 ( $\text{Ca}^{2+}$ ). Por ende, para calcular el peso miliequivalente del Ca se realiza el siguiente procedimiento:

$$\text{Peso equivalente del Ca}^{2+} = \frac{\text{Peso molecular}}{\text{Valencia}} = \frac{40 \text{ g}}{2} = 20 \text{ g}$$

$$\text{Peso de 1 mEq de Ca}^{2+} = \text{Peso equivalente del Ca}^{2+} / 1\,000$$

$$\text{Peso de 1 mEq de Ca}^{2+} = \frac{20 \text{ g}}{100} = 0.02 \text{ g Ca}$$

## e. Determinación de la cantidad de calcio por aplicar

Si un miliequivalente (mEq) de aluminio ( $\text{Al}^{3+}$ ) es neutralizado por un mEq de calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ), entonces 1.92 mEq de aluminio serán neutralizados por 1.92 mEq de calcio.

$$\begin{array}{l} 1 \text{ mEq de Al}^{3+} \underline{\hspace{2cm}} 1 \text{ mEq de Ca}^{2+} \\ 1.92 \text{ mEq de Al}^{3+} \underline{\hspace{2cm}} x \text{ mEq de Ca}^{2+} \end{array}$$

$$X = 1.92 \text{ mEq de Ca}^{2+}$$

Para calcular la cantidad de gramos de calcio (Ca) correspondiente a 1.92 mEq de Ca en 100 gramos de suelo, utilizamos una regla de tres simple:

$$\begin{array}{l} 1 \text{ mEq Ca}^{2+}/100 \text{ g de suelo} \underline{\hspace{2cm}} 0.02 \text{ g Ca}^{2+} \\ 1.92 \text{ mEq Ca}^{2+}/100 \text{ g suelo} \underline{\hspace{2cm}} X \text{ g Ca}^{2+} \end{array}$$

$$X = \frac{1.92 \text{ mEq Ca}^{2+}/100 \text{ g suelo} \times 0.02 \text{ g}}{1 \text{ mEq Ca}^{2+}} = 0.0384 \text{ g Ca}^{2+}/100 \text{ g suelo}$$

Por lo tanto, se tiene 0.0384 gramos de calcio por cada 100 gramos de suelo.

A partir de este cálculo, podemos deducir la siguiente fórmula para el cálculo del peso calcio para neutralizar el  $\text{Al}^{3+}$  en exceso a partir de su CIC:

$$\text{Cantidad de calcio (g de Ca}^{2+}/100 \text{ g de suelo)} = \text{mEq Ca}^{2+}/100 \text{ g} \times \frac{0.02 \text{ g Ca}^{2+}}{1 \text{ mEq Ca}^{2+}}$$

Para determinar la cantidad de calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ) necesaria para neutralizar el  $\text{Al}^{3+}$  en exceso en 1 ha, es decir para una capa arable de 1 830 000 kg/ha, se calcula mediante una regla de tres simple:

$$\begin{array}{l} 0.0384 \text{ g de Ca}^{2+} \underline{\hspace{2cm}} 100 \text{ g de suelo} \\ X \text{ g de Ca}^{2+} \underline{\hspace{2cm}} 1\,830\,000 \text{ kg/ha de suelo} \end{array}$$

$$\text{Cantidad de calcio (kg/ha)} = \frac{\text{g de Ca}^{2+}}{100 \text{ g}} \times \text{P.C.A. (kg/ha)}$$

$$\text{Cantidad de calcio (kg/ha)} = \frac{0.0384}{100} \times 1\,830\,000 = 702.72 \text{ kg/ha de Ca}^{2+}$$

#### f. Determinación de la cantidad de carbonato de calcio agrícola ( $\text{CaCO}_3$ )

Una vez determinada la cantidad de calcio requerida, se debe calcular la cantidad de carbonato de calcio agrícola, que es la forma en la que se aplica al suelo. Para determinar el coeficiente de conversión de calcio a cal agrícola utilizaremos los pesos moleculares. El peso molecular de  $\text{CaCO}_3$  es la suma de los pesos atómicos de sus componentes:

Pesos moleculares:

$$\text{Ca} = 40$$

$$\text{C} = 12$$

$$\text{O} = 16 \times 3 = 48$$

$$\text{CaCO}_3 = 40 + 12 + 48 = 100$$

$$\text{Coeficiente de conversión} = \frac{\text{Peso molecular del carbonato de calcio}}{\text{Peso molecular del Ca}}$$

$$\text{Coeficiente de conversión de Ca a CaCO}_3 = \frac{100}{40} = 2.50$$

Por lo tanto, el coeficiente de conversión de calcio (Ca) a cal agrícola ( $\text{CaCO}_3$ ) es 2.5. Esto significa que, para convertir una cantidad de calcio en su equivalente de cal agrícola, se multiplica por 2.5.

## g. Cálculo de la cantidad de carbonato de calcio

$$\text{Cantidad de CaCO}_3 \text{ (kg/ha)} = \text{Cantidad de Ca}^{2+} \text{ (kg/ha)} \times \text{Coeficiente de conversión}$$

$$\text{Cantidad de CaCO}_3 \text{ (kg/ha)} = 702.72 \text{ kg/ha} \times 2.50 = 1\,756.80 \text{ kg/ha de CaCO}_3$$

Por lo tanto, la cantidad de cal agrícola ( $\text{CaCO}_3$ ) necesaria es 1 756.8 kg para 1 830 000 kg/ha de suelo (1 hectárea).

## h. Riqueza del carbonato de calcio

Para determinar la cantidad de carbonato de calcio agrícola ( $\text{CaCO}_3$ ) que debe aplicarse como material encalante, se debe revisar la riqueza de su composición. Esta información debería indicarse en su ficha técnica y para fines de este ejemplo consideramos una riqueza de 70 %. Por lo tanto, solo el 70 % de la cantidad aplicada es efectiva.

Datos del producto corrector del suelo:

- Riqueza del del encalante (% R.E.) = 70%

$$\text{Cantidad efectiva de CaCO}_3 \text{ (kg/ha)} = \frac{\text{Cantidad de CaCO}_3 \text{ kg/ha}}{\% \text{ R.E.}}$$

$$\text{Cantidad efectiva de CaCO}_3 \text{ (kg/ha)} = \frac{1\,756.80}{0.70} = 2\,509.71 \text{ kg/ha de CaCO}_3$$

Para suplir la necesidad de material encalante de 1 756.80 kg/ha de  $\text{CaCO}_3$  considerando una riqueza del carbonato de calcio agrícola del 70 %, se deben aplicar 2 509.71 kg de  $\text{CaCO}_3$  por hectárea.

## i. Determinación del área efectiva del suelo para la aplicación del carbonato de calcio agrícola

La Figura 12 muestra una región sombreada alrededor de la planta con un espesor de 25 cm. Esta superficie corresponde al área efectiva, donde debe dirigirse la aplicación del carbonato de calcio agrícola en el cultivo de café. El cálculo del área efectiva se explica a continuación:

- **Datos del cultivo:**

- Cultivo: café
- Distancia entre plantas: 2 m x 1 m
- Sistema de siembra: rectángulo
- Número de plantas: 5 000 plantas/ha

- **Densidad de siembra (Nº de plantas /ha)**

$$\text{Nº de plantas /ha} = \frac{S}{d1 \times d2}$$

Donde:

S = Superficie o área

d1 y d2 = distancia entre plantas

$$\text{Nº de plantas /ha} = \frac{10\,000 \text{ m}^2/\text{ha}}{2 \text{ m} \times 1 \text{ m}} = 5\,000 \text{ plantas/ha}$$

- **Cálculo del área efectiva:**

$$\text{Área del círculo} = \pi \times r^2$$

Se calcula el área del círculo mayor y menor, como muestra la Figura 12.

$$\text{Área del círculo mayor} = 3.14 \times (0.5 \text{ m})^2 = 0.79 \text{ m}^2/\text{planta}$$

$$\text{Área del círculo menor} = 3.14 \times (0.25 \text{ m})^2 = 0.20 \text{ m}^2/\text{planta}$$

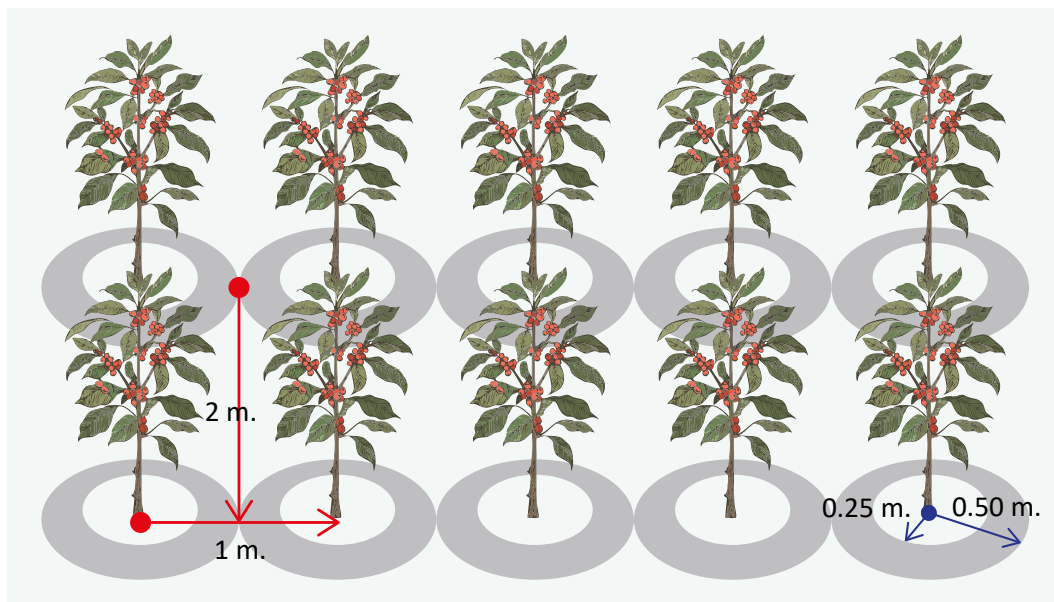


Figura 12. Área efectiva de encalado en el cultivo de café

$$\text{Área efectiva (m}^2/\text{planta)} = \text{Área mayor (m}^2/\text{planta)} - \text{Área menor (m}^2/\text{planta)}$$

$$\text{Área efectiva (m}^2/\text{planta)} = 0.79 - 0.20 = 0.59 \text{ m}^2/\text{planta}$$

$$\text{Área efectiva (m}^2/\text{ha)} = \text{Área efectiva (m}^2/\text{planta)} \times \text{Número de plantas /ha}$$

$$\text{Área efectiva (m}^2/\text{ha)} = 0.59 \times 5\,000 = 2\,950 \text{ m}^2/\text{ha}$$

### • Cálculo del porcentaje de área efectiva (A.E. %)

Mediante regla de tres simple, se plantea la siguiente ecuación:

$$\begin{array}{l} 10\ 000\ \text{m}^2 \quad \underline{\hspace{2cm}} \quad \text{es } 100\ \% \\ 2\ 950\ \text{m}^2 \quad \underline{\hspace{2cm}} \quad \text{X } \% \end{array}$$

$$\text{A. E. \%} = \frac{\text{Área efectiva m}^2 \times 100\ \%}{10\ 000\ \text{m}^2}$$

$$\text{A. E. \%} = \frac{2\ 950 \times 100}{10\ 000} = 29.5\ \%$$

### j. Determinación de la cantidad de producto a aplicarse en el área efectiva

$$\text{Cantidad de CaCO}_3 \text{ para el A.E. (kg/ha)} = \text{kg/ha de CaCO}_3 \text{ eficiente} \times \text{A.E. \%}$$

$$\text{Cantidad de CaCO}_3 \text{ para el A.E. (kg/ha)} = 2\ 509.71 \times \frac{29.5}{100}$$

$$\text{Cantidad de CaCO}_3 \text{ para el A.E. (kg/ha)} = 740.36 \text{ kg/ha de CaCO}_3$$

### k. Determinación de la dosis de encalante

$$\text{Dosis (g / planta)} = \frac{\text{kg / ha de}}{\text{N}^\circ \text{ de plantas/ha}} \times \frac{1\ 000\ \text{g}}{1\ \text{kg}}$$

$$\text{Dosis (g /planta)} = \frac{740.36}{5\ 000} \times 1\ 000 = 148.07 \approx 148\ \text{g/planta}$$

### l. Conclusiones del método de encalado 1

En base a los resultados obtenidos, para neutralizar la alta saturación de aluminio, se debe encalar el suelo aplicando 148 gramos de carbonato de calcio agrícola por planta. Es importante tener en cuenta que el encalado debe realizarse entre 20 y 30 días antes de la fertilización.

## 5.2. Método de encalado 2: determinación de la cantidad de calcio en el suelo

Según Silvera-Pablo (2008), este método consiste en la aplicación de fuentes de calcio cuando la interpretación del análisis de suelos muestra un resultado bajo o muy bajo de calcio y/o un resultado bajo en calcio en las relaciones catiónicas de  $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ .

Datos del análisis del suelo: cationes cambiabiles (ver Tabla 21).

- $\text{Ca}^{2+}$  = 4 mEq/100 g
- $\text{Mg}^{2+}$  = 1.30 mEq/100 g
- $\text{K}^{+}$  = 0.29 mEq/100 g

### a. Cálculo de relaciones catiónicas del suelo

- Relación  $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$  =  $4 / 1.30$  = 3.08
- Relación  $\text{Ca}^{2+}/\text{K}^{+}$  =  $4 / 0.29$  = 13.79
- Relación  $\text{Mg}^{2+}/\text{K}^{+}$  =  $1.3 / 0.29$  = 4.48
- Relación  $\text{K}^{+}/\text{Mg}^{2+}$  =  $0.29 / 1.30$  = 0.22

A continuación, se debe comparar las relaciones catiónicas obtenidas con los valores ideales, como se indica en la Tabla 23.

**Tabla 23.** Relaciones catiónicas del suelo

Relación catiónica	Relación ideal	Relación actual	Nivel
$\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$	5-8	3.08	Bajo en Calcio
$\text{Ca}^{2+}/\text{K}^{+}$	14-16	13.79	Bajo en Calcio
$\text{Mg}^{2+}/\text{K}^{+}$	1.8-2.5	4.48	Alto en magnesio
$\text{K}^{+}/\text{Mg}^{2+}$	0.2-0.3	0.22	Ideal

## b. Determinación de la cantidad óptima de calcio

Para determinar cuántos miliequivalentes (mEq) de calcio por 100 g de suelo se necesitan para obtener una relación Ca/Mg de 5, dado que en 4 mEq de Ca/100 g hay una relación Ca/Mg de 3.08. Este cálculo se realiza mediante una regla de tres simple.

4 mEq de  $\text{Ca}^{2+}$ /100 g \_\_\_\_\_ 3.08 de  $\text{Ca}^{2+}$ /Mg  
 X mEq de  $\text{Ca}^{2+}$ /100 g \_\_\_\_\_ para obtener 5 de  $\text{Ca}^{2+}$ /Mg

$$\text{CIC del Ca}^{2+} \text{ óptimo (mEq/100 g)} = \frac{\text{mEq de Ca}^{2+}/100 \text{ g} \times \text{Relación ideal de Ca}^{2+}/\text{Mg}}{\text{Relación actual de Ca}^{2+}/\text{Mg}}$$

$$\text{CIC del Ca}^{2+} \text{ óptimo/100g (mEq)} = \frac{4 \times 5}{3.08} = 6.49 \text{ mEq de Ca}^{2+} \text{ óptimo/100g}$$

## c. Determinación de la cantidad de calcio a aplicar

Primero, se necesita conocer la cantidad actual de calcio en el suelo y la cantidad óptima de calcio que hemos calculado (6.49 mEq/100g en este caso). Luego, se calcula la diferencia.

$$\text{Ca}^{2+} \text{ a aplicar (g/100g)} = \text{mEq de Ca}^{2+} \text{ óptimo/100g} - \text{mEq de Ca}^{2+} \text{ actual/100g}$$

$$\text{Ca}^{2+} \text{ por aplicar (g/100g)} = 6.49 - 4 = 2.49 \text{ mEq de Ca}^{2+} \text{ por aplicar /100g}$$

#### d. Determinación de la cantidad de calcio (g de Ca<sup>2+</sup>/100 g de suelo)

- Dato del método anterior

Peso mEq de Ca<sup>2+</sup> = 0.02 g Ca<sup>2+</sup> (ver ítem 5.1.D.)

$$\text{Cantidad de Ca}^{2+} \text{ por aplicar /100 g} = \text{mEq de Ca}^{2+}/100 \text{ g por aplicar} \times 0.02 \text{ g de Ca}^{2+}$$

$$\text{Cantidad de Ca}^{2+}/100 \text{ (g)} = 2.49 \times 0.02 = 0.05 \text{ g de Ca}^{2+}/100 \text{ g}$$

#### e. Determinación de la cantidad de calcio en kilogramos por hectárea

Para calcular la cantidad de Ca<sup>2+</sup> en kg/ha en la capa arable del suelo, se puede usar una regla de tres simple.

- Dato del método anterior

Peso de la capa arable (P.C.A.) = 1 830 000 kg/ha (ver ítem 5.1.C.)

Mediante regla de tres simple, planteamos lo siguiente:

$$\begin{array}{l} 0.05 \text{ g de Ca}^{2+} \quad \underline{\hspace{2cm}} \quad 100 \text{ g de suelo} \\ \text{X kg/ha de Ca}^{2+} \quad \underline{\hspace{2cm}} \quad 1\,830\,000 \text{ kg/ha} \end{array}$$

$$\text{Ca}^{2+} \text{ (kg/ha)} = \frac{\text{g de Ca}^{2+} \times \text{P.C.A. (kg/ha)}}{100 \text{ g}}$$

$$\text{Ca}^{2+} \text{ (kg/ha)} = \frac{0.05 \times 1\,830\,000}{100} = 915 \text{ kg/ha de Ca}^{2+}$$

## f. Determinación de la cantidad de carbonato de calcio agrícola ( $\text{CaCO}_3$ )

Para calcular la cantidad de carbonato de calcio agrícola en kg/ha, se utiliza el coeficiente de conversión de  $\text{Ca}^{2+}$  a  $\text{CaCO}_3$  y el valor previamente calculado de  $\text{Ca}^{2+}$  en kg/ha.

- Dato del método anterior

Coeficiente de conversión de  $\text{Ca}^{2+}$  a  $\text{CaCO}_3 = 2.5$  (ver ítem 5.1.F.)

$$\text{Cantidad de } \text{CaCO}_3 \text{ (kg/ha)} = \text{Cantidad de } \text{Ca}^{2+} \times \text{Coeficiente de conversión de } \text{Ca}^{2+} \text{ a } \text{CaCO}_3$$

$$\text{Cantidad de } \text{CaCO}_3 = 915 \times 2.5 = 2\,287.5 \text{ kg/ha de } \text{CaCO}_3$$

## g. Cálculo de la cantidad de carbonato de calcio

Para determinar la cantidad de  $\text{CaCO}_3$  que se debe aplicar, primero se debe revisar la riqueza de su composición, información que debería indicarse en su ficha técnica. En este ejemplo, se considera una riqueza de 70 %, solo esta cantidad aplicada es efectiva para neutralizar la acidez del suelo.

- Datos del producto corrector del suelo:

Riqueza del encalante (% R.E.). = 70 %

$$\text{Cantidad de } \text{CaCO}_3 \text{ eficiente (kg/ha)} = \frac{\text{kg/ha de } \text{CaCO}_3}{\% \text{ R.E.}}$$

$$\text{Cantidad de } \text{CaCO}_3 \text{ eficiente (kg/ha)} = \frac{2\,287.5}{0.7} = 3\,267.86 \text{ kg/ha de } \text{CaCO}_3 \text{ eficiente}$$

## h. Determinación de la cantidad de producto a aplicar en el área efectiva

- Dato del método anterior

Porcentaje del área efectiva (A.E. %) = 29.50 % (ver ítem 5.1. Sección I.)

$$\text{Cantidad efectiva de CaCO}_3 = \text{Cantidad de CaCO}_3 \times \text{A.E. \%}$$

$$\text{Cantidad efectivo de CaCO}_3 = 3267.86 \times (29.5/100) = 964.02 \text{ kg/ha de CaCO}_3$$

## i. Cálculo de la dosis en gramos de CaCO<sub>3</sub> por planta

$$\text{Dosis (g /planta)} = \frac{\text{kg/ha de CaCO}_3}{\text{N}^\circ \text{ de plantas/ha}} \times \frac{1\ 000 \text{ g}}{1 \text{ kg}}$$

$$\text{Dosis (g /planta)} = \frac{964.02}{5\ 000} \times 1\ 000 = 192.80 \approx 193 \text{ g/planta}$$

## j. Conclusiones del método de encalado 2

En base a los resultados obtenidos en el análisis del suelo para el cultivo de café, se recomienda aplicar 193 gramos de carbonato de calcio agrícola (CaCO<sub>3</sub>) por planta. Esta actividad debe realizarse entre 20 y 30 días antes de la fertilización.

- Comparación de dosis entre ambos métodos

Las dosis de encalado pueden variar entre ambos métodos debido a que en el método de neutralización del aluminio, la cantidad de encalado por aplicar dependerá del porcentaje de saturación de aluminio que se desea disminuir. Por lo tanto, la cantidad de encalante aplicado dependerá de los resultados del análisis del suelo y el criterio del interpretador para decidir cual método usar.

### 5.3. Fuentes de encalado

Existen muchas fuentes de material encalante para el suelo con diferentes modos de aplicación. Por lo general, las fuentes de calcio se aplican entre 20 a 30 días antes de la fertilización, mientras que las fuentes de magnesio entre 2 a 3 meses antes. La Tabla 24 muestra las fuentes de encalado más utilizadas.

**Tabla 24.** Fuentes de encalado para suelos ácidos

Nombre común	Nombre químico	Fórmula química
Cal agrícola	Carbonato de calcio	$\text{CaCO}_3$
Cal viva	Óxido de calcio	$\text{CaO}$
Cal hidratada	Hidróxido de calcio	$\text{Ca(OH)}_2$
Dolomita	Carbonato doble de Ca y Mg	$\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$
Cal magnesita	Carbonato de magnesio	$\text{MgCO}_3$



## 6. Cálculos de fertilización en el cultivo de café

### 6.1. Peso de la capa arable (P.C.A.)

Para calcular el peso de capa arable se debe considerar la densidad aparente, el área del terreno (1 ha o 10 000 m<sup>2</sup>) y la profundidad “15 cm” (Silvera-Pablo, 2008).

- **Datos del análisis (ver Tabla 4)**

Textura = Franco arcilloso

Densidad aparente = 1.22 g/cm<sup>3</sup> ó t/m<sup>3</sup>

- **Datos del muestreo del suelo**

Profundidad de muestreo = 0.15 m

$$\text{P.C.A.} = \text{Área (m}^2\text{)} \times \text{densidad aparente (t/m}^3\text{)} \times \text{profundidad (m)}$$

$$\text{P.C.A.} = 10\,000 \text{ m}^2 \times 1.22 \text{ t/m}^3 \times 0.15 \text{ m} = 1\,830 \text{ t/ha}$$

Mediante regla de tres simple, convertimos la P.C.A. a kg/ha:

$$\begin{array}{l} 1 \text{ t} \quad \underline{\hspace{2cm}} \quad 1\,000 \text{ kg} \\ 1\,830 \text{ t} \quad \underline{\hspace{2cm}} \quad X \text{ kg} \end{array}$$

$$\text{P.C.A.} = 1\,830 \times 1\,000 = 1\,830\,000 \text{ kg/ha}$$

## 6.2. Nutrientes disponibles en el suelo

### a. Estimación del nitrógeno disponible (N)

- Datos del análisis (ver Tabla 21)

Nitrógeno (N) = 0.11 %

- Coeficiente de mineralización (C.M.)

La descomposición de la materia orgánica libera el nitrógeno pasando de nitrógeno orgánico a inorgánico este proceso es denominado mineralización (Donahue et al, 1981) y es afectado por muchos factores como la temperatura, precipitación, altitud, pH, relación C/N (Fassbender y Bornemisza, 1987), y varía de 1 a 3 % (Curtin y Wen, 1999, citando a Keeney, 1982).

Para fines de este ejemplo, se tomará el valor de C.M. de 3 % debido a la elevada tasa de mineralización que presenta el suelo de la selva, por las altas temperaturas.

C.M. (%) = 3 % = 0.03

- Disponibilidad del nutriente (D.N.) nitrógeno

Para este ejemplo se considerará un 40 % de nitrógeno disponible, debido a las condiciones edáficas y climáticas que influyen en su disponibilidad. En este sentido, Maciel-Torres et al. (2020) reportaron valores del 34.8 y 40.4 % en suelos agrícolas, Esto no solo respalda la elección del valor mencionado, sino que también refleja la variabilidad asociada a distintos tipos de suelo y clima.

D.N. (%) = Fuente de nitrógeno 40 % = 0.4

**N disponible (kg/ha) = % N/100 x P.C.A. (kg/ha) x C.M. x D.N.**

N disponible (kg/ha) = 0.11/100 x 1830 000 kg/ha x 0.03 x 0.4

N disponible (kg/ha) = 24.16 kg de N/ha

## b. Estimación del fósforo disponible (P)

- Datos del análisis (ver Tabla 21)

Fósforo (P) = 6.20 ppm

- Disponibilidad del nutriente (D.N.) fósforo

La disponibilidad del nutriente fósforo “fósforo disponible” es afectado por el pH y en suelos fuertemente ácidos, el fósforo se fija formando compuestos de aluminio y hierro de solubilidad muy baja (Weil y Brady, 2017). La disponibilidad puede variar de 20 a 25 % (Silvera-Pablo, 2008, citando a Bandy, 2004).

Para fines de este ejemplo, se consideró una tasa del 25 % (0.25) de fósforo disponible, debido a las condiciones ambientales de la selva, como la temperatura que afectan la disponibilidad del fósforo en el suelo.

D.N. (%) = Fuente de fósforo 25% = 0.25

- Coeficiente de conversión de  $P_2$  a  $P_2O_5$

Pesos moleculares:

P = 31

O = 16

$P_2 = 31 \times 2 = 62$

$O_5 = 16 \times 5 = 80$

$P_2O_5 = 62 + 80 = 142$

Coeficiente de conversión de  $P_2$  a  $P_2O_5 = \frac{142}{62} = 2.29$

$$P_2O_5 \text{ disponible (kg/ha)} = P \text{ (ppm)} \times \frac{1}{10^6} \times P.C.A. \text{ (kg/ha)} \times D.N. \times 2.29$$

$$P_2O_5 \text{ disponible (kg/ha)} = 6.20 \times \frac{1}{10^6} \times 1\,830\,000 \times 0.25 \times 2.29$$

$$P_2O_5 \text{ disponible (kg/ha)} = 6.50 \text{ kg de } P_2O_5/\text{ha}$$

### c. Estimación del potasio disponible (K)

- Datos del análisis (Tabla 21)

Potasio (K) = 92 ppm

- Disponibilidad del nutriente (D.N.) potasio

La disponibilidad del nutriente potasio “potasio disponible” es afectado y se pierde con las partículas de erosión del suelo, agua de escorrentía, también otra parte se pierde con el agua por lixiviación (Weil y Brady, 2017) y varía entre el 40 y 50 % (Silvera-Pablo, 2008, citando a Bandy, 2004). Este valor corresponde a la tasa disponible anual del potasio, y para fines de este ejemplo, se consideró una tasa del 40 % (0.4) debido a las condiciones climáticas de la selva.

D.N. (%) = Fuente de potasio 40 % = 0.4

- Coeficiente de conversión de  $K_2$  a  $K_2O$

Pesos moleculares:

K = 39

O = 16

$K_2$  = 39 x 2 = 78

$K_2O$  = 78 + 16 = 94

Coeficiente de conversión de  $K_2$  a  $K_2O$  =  $\frac{94}{78} = 1.205$

$$K_2O \text{ disponible (kg/ha)} = K \text{ (ppm)} \times \frac{1}{10^6} \times \text{P.C.A. (kg/ha)} \times \text{D.N.} \times 1.205$$

$$K_2O \text{ disponible (kg/ha)} = 92 \times \frac{1}{10^6} \times 1\,830\,000 \times 0.4 \times 1.205$$

$$K_2O \text{ disponible (kg/ha)} = 81.15 \text{ kg de } K_2O/\text{ha}$$

### 6.3. Requerimiento de nutrientes

Para estimar el requerimiento de nutrientes, utilizaremos la siguiente fórmula:

$$\text{Requerimiento (kg/ha)} = \text{Extracción del cultivo (kg/ha)} - \text{Nutriente disponible en el suelo (kg/ha)}$$

#### a. Extracción de nutrientes por el cultivo de café

A partir de los datos de la tabla 20, la extracción del cultivo de café para un rendimiento de 30 qq/ha es 168 kg de N, 27 kg de P y 188 kg de K.

#### b. Estimación del requerimiento de nitrógeno (N)

Para estimar el requerimiento de nitrógeno (N), se utiliza la fórmula, considerando el resultado obtenido en el ítem 6.2:

$$\text{Requerimiento de N (kg/ha)} = \text{Extracción de N (kg/ha)} - \text{N disponible (kg/ha)}$$

$$\text{Requerimiento de N (kg/ha)} = 168 - 24.16 = 143.84 \text{ kg de N/ha}$$

Por lo tanto, el requerimiento de nitrógeno es de 143.84 kg/ha.

#### c. Estimación del requerimiento de fósforo (P)

Para estimar el requerimiento de fósforo (P), se utiliza la fórmula, considerando el resultado obtenido en el ítem 6.2:

$$\text{Requerimiento de } P_2O_5 \text{ (kg/ha)} = \text{Extracción de } P_2O_5 \text{ (kg/ha)} - P_2O_5 \text{ disponible (kg/ha)}$$

$$\text{Requerimiento de } P_2O_5 \text{ (kg/ha)} = 27 - 6.50 = 20.50 \text{ kg de } P_2O_5/\text{ha}$$

Por lo tanto, el requerimiento de fósforo es de 20.50 kg/ha.

#### d. Estimación del requerimiento de potasio (K)

Para estimar el requerimiento de potasio (K), se utiliza la fórmula, considerando el resultado obtenido en el ítem 6.2:

$$\text{Requerimiento de K}_2\text{O (kg/ha)} = \text{Extracción de K}_2\text{O (kg/ha)} - \text{K}_2\text{O disponible (kg/ha)}$$

$$\text{Requerimiento de K}_2\text{O (kg/ha)} = 188 - 81.15 = 106.85 \text{ kg de K}_2\text{O/ha}$$

Por lo tanto, el requerimiento de potasio es de 106.85 kg/ha.

### 6.4. Requerimiento de nutrientes considerando la eficiencia del fertilizante

#### a. Porcentaje de eficiencia de los fertilizantes (E.F. %)

El porcentaje de eficiencia de los fertilizantes se muestra en la Tabla 25.

**Tabla 25. Porcentaje de eficiencia de los fertilizantes**

Fertilizantes	Porcentaje de eficiencia del fertilizante (E.F. %)
Nitrogenados (N)	60 %
Fosfatados (P)	25 %
Potásicos (K)	70 %

Silvera-Pablo (2008), citando a UNALM (2008).

Para estimar el requerimiento de los fertilizantes considerando sus porcentajes de eficiencia, se utilizará la siguiente fórmula:

$$\text{Requerimiento eficiente (kg/ha)} = \frac{\text{Requerimiento del nutriente (kg/ha)}}{\text{E.F. \%}}$$

### b. Estimación del requerimiento eficiente de nitrógeno (N)

El requerimiento (143.84 kg de N/ha) se ha calculado en el ítem 6.3.B. Con este dato se reemplaza en la siguiente fórmula:

$$\text{Requerimiento eficiente de N (kg/ha)} = \frac{\text{Requerimiento kg de N/ha}}{\% \text{ E.F. fuente de N}}$$

$$\text{Requerimiento eficiente de N (kg/ha)} = \frac{143.84}{0.6} = 239.73 \text{ kg de N/ha}$$

### c. Estimación del requerimiento eficiente de fósforo (P)

El requerimiento (20.50 kg de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha) se ha calculado en el ítem 6.3.C. Con este dato se reemplaza en la fórmula:

$$\text{Requerimiento eficiente de P}_2\text{O}_5 \text{ (kg/ha)} = \frac{\text{Requerimiento Kg de P}_2\text{O}_5/\text{ha}}{\% \text{ E.F. fuente de P}_2\text{O}_5}$$

$$\text{Requerimiento eficiente de P}_2\text{O}_5 \text{ (kg/ha)} = \frac{20.50}{0.25} = 82.00 \text{ kg de P}_2\text{O}_5/\text{ha}$$

### d. Estimación del requerimiento eficiente de potasio (K)

El requerimiento (106.85 kg de K<sub>2</sub>O/ha) se ha calculado en el ítem 6.3.D. Con este dato se reemplaza en la siguiente fórmula:

$$\text{Requerimiento eficiente de K}_2\text{O (kg/ha)} = \frac{\text{Requerimiento kg de K}_2\text{O/ha}}{\% \text{ E.F. fuente de K}_2\text{O}}$$

$$\text{Requerimiento eficiente de K}_2\text{O (kg/ha)} = \frac{106.85}{0.7} = 152.64 \text{ kg de K}_2\text{O/ha}$$

## 6.5. Dosis de los fertilizantes

Para estimar las dosis de los fertilizantes, utilizaremos la siguiente fórmula:

$$\text{Dosis del fertilizante (kg/ha)} = \frac{\text{Requerimiento eficiente del nutriente (kg/ha)} \times 100 \text{ kg}}{\text{Concentración del fertilizante (kg)}}$$

### a. Dosis de nitrógeno (N)

- Fuente de nitrógeno:

Urea (46 % de N)

Mediante regla de tres simple, se calcula la dosis de urea:

$$\begin{array}{l} 46 \text{ kg de N} \quad \underline{\hspace{2cm}} \quad 100 \text{ kg de urea} \\ 239.73 \text{ kg de N/ha} \quad \underline{\hspace{2cm}} \quad X \text{ kg de urea/ha} \end{array}$$

$$\text{Dosis de la urea (kg/ha)} = \frac{\text{Requerimiento eficiente del N (kg/ha)} \times 100 \text{ kg}}{\text{Concentración de N(kg)}}$$

$$\text{Dosis de la urea (kg/ha)} = \frac{239.73 \times 100}{46} = 521.15 \text{ kg de urea /ha}$$

### b. Dosis de fósforo (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)

- Fuente de fósforo

Superfosfato triple “SFT” (46 % de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)

Mediante regla de tres simple, se plantea lo siguiente:

$$\begin{array}{l} 46 \text{ kg de P}_2\text{O}_5 \quad \underline{\hspace{2cm}} \quad 100 \text{ kg de SFT} \\ 82.00 \text{ kg P}_2\text{O}_5\text{/ha} \quad \underline{\hspace{2cm}} \quad X \text{ kg de SFT/ha} \end{array}$$

$$\text{Dosis de SFT (kg/ha)} = \frac{\text{Requerimiento eficiente del P}_2\text{O}_5 \text{ (kg/ha)} \times 100 \text{ kg}}{\text{Concentración de P}_2\text{O}_5 \text{ (kg)}}$$

$$\text{Dosis de SFT (kg/ha)} = \frac{82.00 \times 100}{46} = 178.26 \text{ kg de SFT/ha}$$

### c. Dosis de potasio (K<sub>2</sub>O)

- Fuente de potasio

Cloruro de potasio “KCl” (60 % de K<sub>2</sub>O)

Mediante regla de tres simple, se plantea lo siguiente:

$$\begin{array}{l} 60 \text{ kg de K}_2\text{O} \quad \underline{\hspace{2cm}} \quad 100 \text{ kg de KCl} \\ 152.64 \text{ kg de K}_2\text{O/ha} \quad \underline{\hspace{2cm}} \quad X \text{ kg de KCl /ha} \end{array}$$

$$\text{Dosis de KCl (kg/ha)} = \frac{\text{Requerimiento eficiente de K}_2\text{O (kg/ha)} \times 100 \text{ kg}}{\text{Concentración de K}_2\text{O (kg)}}$$

$$\text{Dosis de KCl (kg/ha)} = \frac{152.64 \times 100}{60} = 254.4 \text{ kg de KCl /ha}$$

## 6.6. Etapas de aplicación de los fertilizantes

La dosis total de fertilizantes debe dividirse en al menos tres aplicaciones, las cuales se deben realizar en distintas etapas del desarrollo fenológico del cultivo. Se recomienda realizar la primera aplicación de fertilizante al inicio de la floración, la segunda al comienzo de la fructificación y la tercera al inicio de la maduración (Tabla 26). Este fraccionamiento de la dosis se realiza debido a la movilidad de los nutrientes dentro de la planta y a los requerimientos específicos de cada etapa fenológica del cultivo.

**Tabla 26.** Etapas de fertilización del cultivo de café

Fuente de fertilizante	Etapas de fertilización		
	1º Fertilización	2º Fertilización	3º Fertilización
	Al inicio de la floración	Al inicio de la fructificación	Al inicio de la maduración
N	1/3	1/3	1/3
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Todo	...	...
K <sub>2</sub> O	1/3	1/3	1/3
CaO	Todo	...	...
MgO	Todo	...	...
SO <sub>4</sub>	Todo	...	...
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Todo	...	...
CuSO <sub>4</sub>	Todo	...	...
ZnSO <sub>4</sub>	Todo	...	...
MnSO <sub>4</sub>	Todo	...	...
FeSO <sub>4</sub>	Todo	...	...

Adaptado de Silvera-Pablo (2008).





## 7. Suelos asociados al cultivo de cacao

### 7.1. Características adecuadas del suelo para el cultivo de cacao

El cultivo de cacao (Figura 13) requiere que el suelo presente parámetros específicos (Carmona-Rojas et al., 2022). A continuación, en la Tabla 27 se detallan las características del suelo y los rangos óptimos para su cultivo.



**Figura 13.** Parcela productiva de cacao en la EEA Pichanaki -INIA

**Tabla 27.** Características y rangos adecuados para el cultivo de cacao

Características del suelo	Rango
Textura	Franco arcillo arenoso
Profundidad efectiva	$\geq 1.5$ m
pH	5.5-6.5
Materia orgánica (M.O.)	> 4%
Nitrógeno (N)	> 0.2%
Fósforo (P)	> 10 ppm
CIC efectiva	6-12 mEq/100g
Calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ )	4-5 mEq/100g
Magnesio ( $\text{Mg}^{2+}$ )	1.0-1.5 mEq/100g
Potasio ( $\text{K}^+$ )	0.2-0.3 mEq/100g
Aluminio ( $\text{Al}^{3+}$ )	$\leq 1$ mEq/100g
Saturación de aluminio (Sat. $\text{Al}^{3+}$ )	< 20%
Conductividad eléctrica (CE)	< 1 dS/m

Adaptado de Carmona-Rojas et al. (2022).

## 7.2. Extracción de nutrientes del cultivo de cacao

El cultivo de cacao requiere de la cantidad adecuada de macronutrientes y micronutrientes para obtener un buen rendimiento y producción. Para ello, se debe aplicar la dosis adecuada de acuerdo con el análisis del suelo correspondiente, la cual debe ser calculada mediante la extracción de nutrientes del cultivo. El orden de extracción de macronutrientes por las mazorcas de cacao es, de mayor a menor: potasio, nitrógeno y fósforo. La extracción de nutrientes del cultivo para producir 1 000 kg de grano seco de cacao más mazorcas es: 35 kg de N, 8 kg de P, 45 kg de K (Furcal-Beriguete, 2017). Sin embargo, el resto de las estructuras vegetativas de la planta como raíces, tallos y hojas también extraen nutrientes. Se estima que la extracción de grano y mazorca es el 50 % de la extracción total de la planta, cuyos valores se detallan en la Tabla 28.

**Tabla 28.** Extracción de macroelementos primarios del cultivo de cacao

Nutrientes	Rendimiento (kg/ha de cacao)					
	1 000	1 500	2 000	2 500	3 000	3 500
N	70	105	140	175	210	245
P	16	24	32	40	48	56
K	90	135	180	225	270	315

Adaptado de Furcal-Beriguete (2017).



nia  
Instituto de Innovación Agraria  
ABSAF

Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación

## 8. Resultado e interpretación del análisis del suelo en el cultivo de cacao

### 8.1. Resultados del análisis del suelo

El análisis del suelo permite identificar sus características físicas y químicas para conocer el estado de la fertilidad actual y determinar la cantidad de los nutrientes o enmiendas requeridos (Valencia-Aristizábal et al., 1989). La Tabla 29 presenta el resultado de análisis físico y químico del suelo en el cultivo de cacao con valores necesarios para calcular los nutrientes que deben ser aplicados.

**Tabla 29. Resultados del análisis del suelo en el cultivo de cacao**

Análisis mecánico			Clase textural	CE		pH (1:1)	M. O.	N	P	K
Arena	Limo	Arcilla		dS/m	mS/m		%	%	ppm	ppm
%										
66.50	21.3	12.2	Franco arenoso	0.14	14	4.9	2.95	0.15	10.6	104.22

CIC	Cationes cambiabiles						CICe	Base cambiabile %	Acidez cambiabile %	Sat. Al %	CaCO <sub>3</sub> %
	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	Al <sup>3+</sup>	H <sup>+</sup>					
	Cmol(+)/kg o mEq/100 g										
—	4.91	1.12	0.44	0.03	2.84	0.12	9.46	68.71	31.29	30.02	0

## 8.2. Interpretación de los resultados del análisis del suelo

La interpretación de los resultados se realiza comparando los datos obtenidos del análisis del suelo (Tabla 29) con las tablas de los niveles de sus propiedades físicas y químicas, como se muestra en la Tabla 30.

**Tabla 30.** Modelo de interpretación de análisis del suelo para el cultivo de cacao

Interpretación del análisis de suelo				
Ensayo	Unidad	Resultado (del análisis)	Interpretación (nivel)	Fuente
Potencial de hidrógeno (pH)	Nº	4.9	Muy fuertemente ácido	Soil Science Division Staff (2017)
Materia orgánica (M.O.)	%	2.95	Medio	SEMARNAT (2002)
Nitrógeno (N)	%	0.15	Alto	SEMARNAT (2002)
Fósforo (P)	ppm	10.6	Medio	SEMARNAT (2002)
Potasio (K)	ppm	104.22	Medio	UNALM, 2008
Capacidad de intercambio catiónico efectivo (CICe)	Cmol(+)/kg	9.46	Bajo	SEMARNAT (2002)
Calcio (Ca <sup>2+</sup> )	Cmol(+)/kg	4.91	Bajo	SEMARNAT (2002)
Magnesio (Mg <sup>2+</sup> )	Cmol(+)/kg	1.12	Bajo	SEMARNAT (2002)
Potasio (K <sup>+</sup> )	Cmol(+)/kg	0.44	Bajo	SEMARNAT (2002)
Carbonato de calcio (CaCO <sub>3</sub> )	%	0	Muy bajo	SEMARNAT (2002)
Conductividad eléctrica (CE)	dS/m	0.14	No tiene salinidad	SEMARNAT (2002)





## 9. Cálculo de encalado del suelo en el cultivo de cacao

### 9.1. Método de encalado 1: neutralización del aluminio

El presente método se aplica de manera similar que lo aplicado en el cultivo de café (ver sección 5.1).

Los niveles de pH en el suelo inferiores a 5.5 provocan altos niveles de aluminio, que provocan una inhibición del crecimiento radical que resulta en una disminución de la absorción de agua y nutrientes (Casierra-Posada y Aguilar-Avenidaño, 2007).

#### a. Estimación de saturación de aluminio en exceso

En la tabla 30 se indica que la saturación de aluminio es del 30.2 %. Se ha observado que el cacao tiene un límite de tolerancia a la saturación de aluminio inferior al 30 % (Huamani-Yupanqui et al., 2012), por lo que se recomienda reducirla progresivamente hasta niveles inferiores. En este caso, se propone disminuir la saturación de aluminio del 30.02 al 20 %, lo que implica eliminar un 10.02 %. Este proceso se puede calcular mediante la siguiente fórmula:

$$\text{Sat. Al en exceso (\%)} = \text{Sat. Al del análisis (\%)} - \text{tolerancia del cultivo a la Sat. Al (\%)}$$

$$\text{Sat. Al en exceso \%} = 30.02 \% - 20 \% = 10.02 \%$$

Por lo tanto, en el suelo hay un exceso de 10.02 % de saturación de aluminio, un nivel que resulta perjudicial para el desarrollo del cultivo. Para neutralizar este exceso, se recomienda la aplicación de carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ). Es importante destacar que la efectividad de esta enmienda debe evaluarse mediante un análisis del suelo, el cual debe realizarse al año siguiente de su aplicación. Esto permitirá verificar si el problema ha sido corregido y, de ser necesario, ajustar las prácticas de manejo para optimizar los resultados.

## b. Cálculo de la acidez cambiabile del aluminio en exceso

El cálculo de la saturación de aluminio (Sat. Al) se realizó utilizando los datos de la Tabla 30, donde la capacidad de intercambio catiónico efectiva (CICe) es 9.46 mEq/100 g. La fórmula empleada para este cálculo es la siguiente:

$$\text{Sat. Al}^{3+}(\%) = \frac{\text{Al}^{3+}(\text{mEq}/100)}{\text{CICe}(\text{mEq}/100)} \times 100$$

En la fórmula se despeja el aluminio (Fageria y Nascente, 2014).

$$\text{Al}^{3+} \text{ en exceso (mEq}/100 \text{ g)} = \frac{\text{Sat. Al exceso (\%)} \times \text{CICe (mEq}/100)}{100}$$

$$\text{Al}^{3+} \text{ (mEq}/100 \text{ g)} \text{ exceso} = \frac{10.02 \times 9.46}{100}$$

$$\text{Al}^{3+} \text{ (mEq}/100 \text{ g)} \text{ exceso} = 0.95$$

Por lo tanto, el aluminio en exceso es de 0.95 mEq/100g. Este valor indica la cantidad de aluminio intercambiable en exceso presente en 100 gramos de suelo.

### c. Estimación del Peso de la Capa Arable (P.C.A.)

Para estimar el Peso de la Capa Arable (P.C.A.), se necesita conocer la densidad aparente del suelo (determinado a partir de la clase textural), y la profundidad de muestreo. El muestreo del suelo, cuyos resultados analíticos se presentan en la Tabla 29, se realizó a una profundidad de 20 cm.

Textura = Franco arcilloso

Dap = 1.32 g/cm<sup>3</sup> ó t/m<sup>3</sup> (según Tabla 4)

$$\text{P.C.A.} = \text{Área (m}^2\text{)} \times \text{Dap(t/m}^3\text{)} \times \text{Profundidad (m)}$$

$$\text{P.C.A.} = 10\,000 \text{ m}^2/\text{ha} \times 1.32 \text{ t/m}^3 \times 0.20 \text{ m} = 2\,640 \text{ t/ha}$$

Mediante regla de tres simple, se calcula la P.C.A. en kg:

$$\begin{array}{r} 1 \text{ t} \quad \underline{\hspace{2cm}} \quad 1\,000 \text{ kg} \\ 2\,640 \text{ t} \quad \underline{\hspace{2cm}} \quad X \text{ kg} \end{array}$$

$$\text{P.C.A.} = 2\,640 \times 1\,000 = 2\,640\,000 \text{ kg/ha}$$

#### d. Determinación del peso miliequivalente (mEq) de calcio

El peso molecular del calcio (Ca) es aproximadamente 40 g/mol y tiene una valencia de 2. Por ende, para calcular el peso miliequivalente del Ca se realiza el siguiente procedimiento:

$$\text{Peso equivalente del Ca}^{2+} = \frac{\text{Peso molecular}}{\text{Valencia}} = \frac{40 \text{ g}}{2} = 20 \text{ g}$$

$$\text{Peso de 1 mEq de Ca}^{2+} = \text{Peso equivalente del Ca}^{2+} / 1\,000$$

$$\text{Peso de 1 mEq de Ca}^{2+} = \frac{20 \text{ g}}{1\,000} = 0.02 \text{ g Ca}$$

#### e. Determinación de la cantidad de calcio por aplicar

Si 1 miliequivalente (mEq) de aluminio ( $\text{Al}^{3+}$ ) es neutralizado por 1 mEq de calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ), entonces 0.95 mEq de aluminio serán neutralizados por 0.95 mEq de calcio.

$$\begin{array}{l} 1 \text{ mEq de Al}^{3+} \quad \underline{\hspace{2cm}} \quad 1 \text{ mEq de Ca}^{2+} \\ 0.95 \text{ mEq de Al}^{3+} \quad \underline{\hspace{2cm}} \quad X \text{ mEq de Ca}^{2+} \end{array}$$

$$X = 0.95 \text{ mEq de Ca}^{2+}$$

Para calcular la cantidad de gramos de calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ) correspondiente a 0.95 mEq de  $\text{Ca}^{2+}$  en 100 gramos de suelo, utilizamos una regla de tres simple:

$$\begin{array}{l} 1 \text{ mEq Ca}^{2+} \quad \underline{\hspace{2cm}} \quad 0.02 \text{ g Ca}^{2+} \\ 0.95 \text{ mEq Ca} / 100 \text{ g suelo} \quad \underline{\hspace{2cm}} \quad x \end{array}$$

$$x = \frac{0.95 \text{ mEq Ca}^{2+} / 100 \text{ g suelo} \times 0.02 \text{ g}}{1 \text{ mEq Ca}^{2+}}$$

$$x = 0.019 \text{ g Ca} / 100 \text{ g suelo}$$

Por lo tanto, se tiene 0.019 gramos de calcio por cada 100 gramos de suelo.

$$\text{Cantidad de calcio g de Ca}^{2+}/100 \text{ g de suelo} = \text{mEq Ca}^{2+}/100 \text{ g} \times \frac{0.02 \text{ g Ca}^{2+}}{1 \text{ mEq Ca}^{2+}}$$

Para encontrar la cantidad (gramos) de calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ) en 2 640 000 kg/ha (P.C.A.) de suelo, utilizamos regla de tres simple:

$$\begin{array}{l} 0.019 \text{ g de Ca}^{2+} \quad \underline{\hspace{2cm}} \quad 100 \text{ g de suelo} \\ \text{X g de Ca}^{2+} \quad \underline{\hspace{2cm}} \quad 2\,640\,000 \text{ kg/ha de suelo} \end{array}$$

$$\text{Cantidad de calcio (kg/ha)} = \frac{\text{g de Ca}}{100 \text{ g}} \times \text{P.C.A. (kg/ha)}$$

$$\text{Cantidad efectiva de calcio (kg/ha)} = \frac{0.019}{100} \times 2\,640\,000 = 501.60 \text{ kg/ha de Ca/ha}$$

#### f. Determinación del coeficiente de conversión de calcio (Ca) a carbonato agrícola ( $\text{CaCO}_3$ )

Para determinar el coeficiente de conversión de calcio a cal agrícola, utilizaremos los pesos moleculares. El peso molecular de  $\text{CaCO}_3$  es la suma de los pesos atómicos de sus componentes:

- **Pesos moleculares**

$$\begin{array}{l} \text{Ca} \quad = 40 \\ \text{C} \quad = 12 \\ \text{O}_3 \quad = 16 \times 3 = 48 \\ \text{CaCO}_3 = 40+12+48 = 100 \end{array}$$

$$\text{Coeficiente de conversión} = \frac{\text{Peso molecular del producto}}{\text{Peso molecular del Ca}}$$

$$\text{Coeficiente de conversión de Ca a CaCO}_3 = \frac{100}{40} = 2.50$$

Por lo tanto, el coeficiente de conversión de calcio (Ca) a carbonato de calcio agrícola ( $\text{CaCO}_3$ ) es 2.5. Esto significa que, para convertir una cantidad de calcio en su equivalente de cal agrícola, se multiplica por 2.5.

### g. Cálculo de la cantidad de carbonato de calcio agrícola ( $\text{CaCO}_3$ )

$$\text{Cantidad de } \text{CaCO}_3 \text{ (kg/ha)} = \text{Cantidad de Ca (kg/ha)} \times \text{Coeficiente de conversión}$$

$$\text{Cantidad de } \text{CaCO}_3 \text{ (kg/ha)} = 501.60 \times 2.50 = 1\,254 \text{ kg/ha de } \text{CaCO}_3$$

Por lo tanto, la cantidad de cal agrícola ( $\text{CaCO}_3$ ) necesaria es 1 254 kg para 2 640 000 kg/ha de suelo (1 hectárea).

### h. Cálculo del carbonato de calcio agrícola ( $\text{CaCO}_3$ ) considerando 70 % de riqueza

Para calcular la cantidad de carbonato de calcio agrícola ( $\text{CaCO}_3$ ) “material encalante” necesario se debe revisar su composición porcentual, información que debería indicarse en su ficha técnica, en este ejemplo se considera una riqueza de 70 %. Es decir, el 70 % de la cantidad aplicada es efectiva.

$$\text{Riqueza del encalante (\% R.E.)} = 70 \%$$

$$\text{Cantidad efectiva de } \text{CaCO}_3 \text{ (kg/ha)} = \frac{\text{Cantidad de } \text{CaCO}_3}{\% \text{ R.E.}}$$

$$\text{Cantidad efectiva de } \text{CaCO}_3 \text{ (kg/ha)} = \frac{1\,254.00}{0.70} = 1\,791.43 \text{ kg/ha de } \text{CaCO}_3$$

## i. Determinación del área efectiva de suelo para la aplicación del carbonato de calcio agrícola

La Figura 14 muestra una región sombreada alrededor de la planta con un espesor de 40 cm aproximado, esta superficie corresponde al área efectiva donde debe dirigirse la aplicación del carbonato de calcio agrícola. Sin embargo, también se recomienda la aplicación desde el tallo hasta la proyección de la copa del árbol. El cálculo del área efectiva se explica a continuación:

### • Datos del cultivo

Cultivo: Cacao

Sistema de siembra: tres bolillos

Distancia entre plantas: 3 m x 3 m

Número de plantas /ha: 1 283 plantas/ ha

### • Densidad de siembra (Nº de plantas /ha)

$$\text{Nº de plantas /ha} = \frac{S}{d1 \times d2} \times 1.155$$

Donde:

S = Superficie o área

d1 y d2 = distancia entre plantas

1.155 = constante

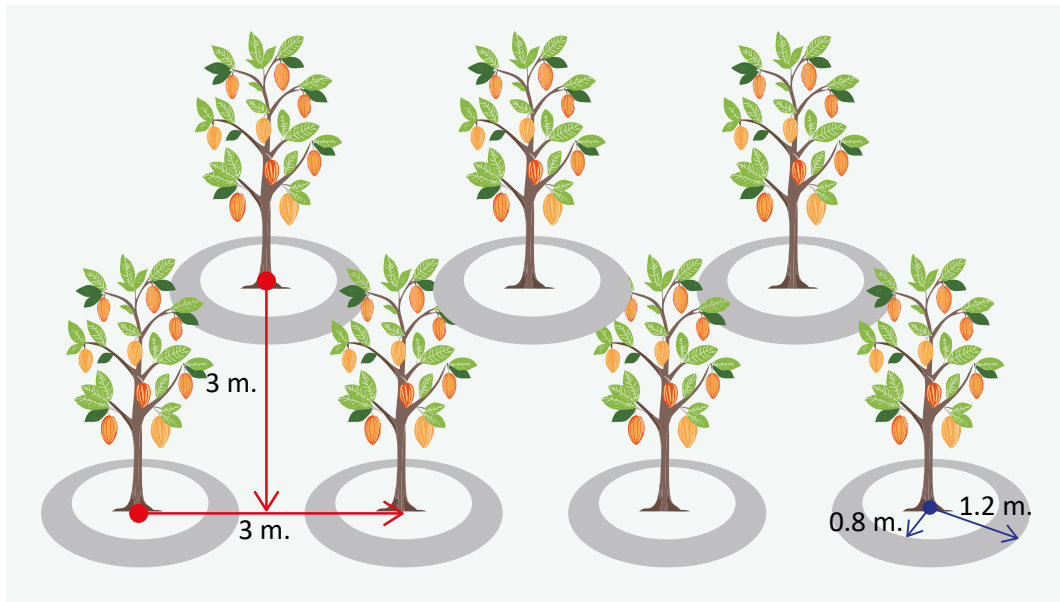
$$\text{Nº de plantas /ha} = \frac{10\,000 \text{ m}^2/\text{ha}}{3 \text{ m} \times 3 \text{ m}} \times 1.155 = 1\,283 \text{ plantas/ ha}$$

### • Hallando el área efectiva

Se calcula el área del círculo mayor y menor según muestra la Figura 14.

$$\text{Área del círculo} = \pi \times r^2$$

Área del círculo mayor =  $3.1416 \times (1.2 \text{ m})^2 = 4.52 \text{ m}^2/\text{planta}$   
 Área del círculo menor =  $3.1416 \times (0.8 \text{ m})^2 = 2.01 \text{ m}^2/\text{planta}$



**Figura 14.** Área efectiva de encalado en el cultivo de cacao

Área efectiva ( $\text{m}^2/\text{planta}$ ) = Área mayor ( $\text{m}^2/\text{planta}$ ) – Área menor ( $\text{m}^2/\text{planta}$ )

Área efectiva ( $\text{m}^2/\text{planta}$ ) =  $4.52 - 2.01 = 2.51 \text{ m}^2/\text{planta}$

Área efectiva ( $\text{m}^2/\text{ha}$ ) = Área efectiva ( $\text{m}^2/\text{planta}$ ) x Número de plantas /ha

Área efectiva ( $\text{m}^2/\text{ha}$ ) =  $2.51 \times 1\,283 = 3\,220.33 \approx 3\,220 \text{ m}^2/\text{ha}$

- **Hallando el porcentaje de área efectiva (A.E. %)**

Mediante regla de tres simple, planteamos lo siguiente:

$$\begin{array}{l} \text{Si } 10\,000 \text{ m}^2 \text{ } \underline{\hspace{2cm}} \text{ } 100 \% \\ \quad 3\,220 \text{ m}^2 \text{ } \underline{\hspace{2cm}} \text{ } X \% \end{array}$$

$$\text{A. E. \%} = \frac{\text{Área efectiva m}^2 \times 100 \%}{10\,000 \text{ m}^2}$$

$$\text{A. E. \%} = \frac{3\,220 \times 100}{10\,000} = 32.20 \%$$

**j. Determinación del producto a aplicarse en el área efectiva**

$$\text{Cantidad de CaCO}_3 \text{ para el A.E. (kg/ha)} = \text{kg/ha de CaCO}_3 \times \text{A.E. \%}$$

$$\text{Cantidad de CaCO}_3 = 1\,791.43 \times 32.20 / 100 = 576.84 \text{ kg de CaCO}_3 / \text{ha}$$

**k. Determinación de la dosis en gramos por planta**

$$\text{Dosis (g /planta)} = \frac{\text{kg/ha de CaCO}_3}{\text{N}^\circ \text{ de plantas/ha}} \times \frac{1\,000 \text{ g}}{1 \text{ kg}}$$

$$\text{Dosis (g /planta)} = \frac{576.84}{1\,283} \times 1\,000 = 449.60 \approx 450 \text{ g/planta}$$

**l. Conclusiones del método de encalado 1**

Se debe encalar el suelo aplicando 450 gramos por planta de carbonato de calcio agrícola (CaCO<sub>3</sub>). Este procedimiento debe realizarse entre 20 a 30 días antes de la fertilización para neutralizar la saturación alta de aluminio.

## 9.2. Método de encalado 2: determinación de la cantidad de calcio en el suelo

El método consiste en la aplicación de la enmienda cálcica, cuando la relación Ca/Mg del análisis del suelo es bajo o muy bajo (Silvera-Pablo, 2008).

Datos del análisis: Cationes cambiabes (según Tabla 31).

$$\text{Ca}^{2+} = 4.91 \text{ mEq}/100 \text{ g}$$

$$\text{Mg}^{2+} = 1.12 \text{ mEq}/100 \text{ g}$$

$$\text{K}^{+} = 0.44 \text{ mEq}/100 \text{ g}$$

### a. Cálculo de relaciones catiónicas del suelo

$$\text{Relación Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+} = 4.91 / 1.12 = 4.38$$

$$\text{Relación Ca}^{2+}/\text{K}^{+} = 4.91 / 0.44 = 11.16$$

$$\text{Relación Mg}^{2+}/\text{K}^{+} = 1.12 / 0.44 = 2.55$$

$$\text{Relación K}^{+}/\text{Mg}^{2+} = 0.44 / 1.12 = 0.39$$

A continuación, se debe comparar las relaciones cationes obtenidas con los valores ideales, como se indica en la Tabla 31.

**Tabla 31.** Relaciones catiónicas del suelo

Relación catiónica	Relación ideal	Relación actual	Nivel
$\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$	5-8	4.38	Bajo en Calcio
$\text{Ca}^{2+}/\text{K}^{+}$	14-16	11.16	Bajo en Calcio
$\text{Mg}^{2+}/\text{K}^{+}$	1.8-2.5	2.55	Alto en magnesio
$\text{K}^{+}/\text{Mg}^{2+}$	0.2-0.3	0.39	Alto en potasio

## b. Determinación de la cantidad óptima de calcio

Para calcular los miliequivalentes (mEq) de calcio por 100 g de suelo que se necesitan para llegar a una relación  $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$  de 5, dado que en 4.91 mEq de  $\text{Ca}^{2+}/100\text{ g}$  hay una relación  $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$  de 4.38, se utiliza una regla de tres simple.

Si en 4.91 mEq de  $\text{Ca}^{2+}/100\text{g}$  \_\_\_\_\_ hay 4.38 de  $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}$   
 X mEq de  $\text{Ca}^{2+}/100\text{g}$  \_\_\_\_\_ para obtener 5 de  $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}$

$$\text{CIC del Ca}^{2+} \text{ óptimo (mEq/100 g)} = \frac{\text{mEq de Ca/100 g} \times \text{Relación ideal de Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}}{\text{Relación actual de Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}}$$

$$\text{CIC del Ca}^{2+} \text{ óptimo (mEq/100 g)} = \frac{4.91 \times 5}{4.38} = 5.60 \text{ mEq de Ca}^{2+} \text{ óptimo/100g}$$

## c. Determinación de la cantidad de calcio a aplicar

Para calcular el calcio que se aplicará al suelo, primero se debe conocer la cantidad actual de calcio en el suelo y la cantidad óptima de calcio que hemos calculado (5.61 mEq/100g en este caso). Luego, calculamos su diferencia.

$$\text{Ca}^{2+} \text{ a aplicar (g/100g)} = \text{mEq de Ca}^{2+} \text{ óptimo/100g} - \text{mEq de Ca}^{2+} \text{ actual/100g}$$

$$\text{Ca}^{2+} \text{ por aplicar (g/100g)} = 5.60 - 4.91 = 0.69 \text{ mEq de Ca}^{2+} \text{ por aplicar/100g}$$

#### d. Determinación de la cantidad de calcio (g de Ca/100 g de suelo)

- **Dato del método anterior:**

Peso mEq de  $\text{Ca}^{2+}$  = 0.02 g  $\text{Ca}^{2+}$  (ver ítem 9.1. Sección D.)

Cantidad de  $\text{Ca}^{2+}$  por aplicar /100g = mEq de  $\text{Ca}^{2+}$ /100g por aplicar x 0.02 g de Ca

g de  $\text{Ca}^{2+}$ /100g = 0.69 x 0.02 = 0.0138 g de  $\text{Ca}^{2+}$ /100g

#### e. Determinación de la cantidad de calcio en kilogramos por hectárea

Para calcular la cantidad de Ca en kg/ha en la capa arable del suelo, se puede usar una regla de tres simple.

- **Dato del método anterior:**

Peso de la capa arable P.C.A. = 2 640 000 kg/ha (ver ítem 9.1. Sección C.)

Mediante regla de tres simple, planteamos lo siguiente:

Hay 0.014 g de Ca \_\_\_\_\_ en 100 g de suelo  
 X kg/ha de Ca \_\_\_\_\_ para obtener 2 640 000 kg/ha

$$\text{Ca (kg/ha)} = \frac{\text{g de Ca} \times \text{P.C.A. (kg/ha)}}{100 \text{ g}}$$

$$\text{Ca (kg/ha)} = \frac{0.0138 \times 2\,640\,000}{100} = 364.32 \text{ kg/ha de Ca}$$

## f. Determinación de la cantidad de carbonato de calcio agrícola ( $\text{CaCO}_3$ )

Para determinar la cantidad de carbonato de calcio agrícola en Kg/ha, se utiliza el coeficiente de conversión de Ca a  $\text{CaCO}_3$  y el valor previamente calculado de Ca en kg/ha.

- **Dato del método anterior:**

Coeficiente de conversión de Ca a  $\text{CaCO}_3$  = 2.50 (ver ítem 9.1.F.)

$$\text{kg/ha de CaCO}_3 = \text{kg/ha de Ca} \times \text{Coeficiente de conversión de Ca a CaCO}_3$$

$$\text{kg/ha de CaCO}_3 = 364.32 \times 2.50 = 910.80 \text{ kg/ha de CaCO}_3$$

## g. Cálculo de la cantidad de carbonato de calcio

Para determinar la cantidad de carbonato de calcio agrícola ( $\text{CaCO}_3$ ) “material encalante” que debe aplicarse se debe revisar su composición, información que debería indicarse en su ficha técnica, en este ejemplo consideramos una riqueza del 70 %. Es decir, si el porcentaje (riqueza) de la enmienda es del 70 %, significa que solo el 70 % de la cantidad aplicada es efectiva.

- **Datos del producto corrector del suelo**

Riqueza del encalante (% R.E.) = 70 %

$$\text{Cantidad de CaCO}_3 \text{ eficiente (kg/ha)} = \frac{\text{kg/ha de CaCO}_3}{\% \text{ R.E.}}$$

$$\text{kg/ha de CaCO}_3 \text{ eficiente} = \frac{910.80}{0.70} = 1301.14 \text{ kg/ha de CaCO}_3$$

## h. Determinación de la cantidad de producto por aplicar en el área efectiva

- **Dato del método anterior**

% de área efectiva (% A.E.) = 32.20 % (ver ítem 9.1. Sección I.)

$$\text{Cantidad efectiva de CaCO}_3 = \text{Cantidad de CaCO}_3 \times \text{A.E. \%}$$

$$\text{kg/ha de CaCO}_3 = 1\,301.14 \times (32.20/100) = 418.97 \text{ kg/ha de CaCO}_3$$

## i. Cálculo de la dosis en gramos CaCO<sub>3</sub> por planta

$$\text{Dosis (g/planta)} = \frac{\text{kg/ha de CaCO}_3}{\text{Nº de plantas/ha}} = \frac{1\,000 \text{ g}}{1 \text{ kg}}$$

$$\text{Dosis (g /planta)} = \frac{418.97}{1\,283} \times 1\,000 = 326.55 \approx 327 \text{ g/planta}$$

## j. Conclusiones del método de encalado 2

En base a los resultados obtenidos en el análisis del suelo para el cultivo de cacao, se recomienda aplicar 327 gramos de carbonato de calcio agrícola (CaCO<sub>3</sub>) por planta. Esta actividad debe realizarse entre 20 y 30 días antes de la fertilización.





# 10. Cálculos de fertilización en el cultivo de cacao

## 10.1. Peso de la capa arable (P.C.A.)

Para el siguiente ejemplo se considerarán los mismos datos del análisis del suelo de la Tabla 4 y una profundidad de raíces de 20 cm.

- **Datos del análisis (Tabla 4).**

Textura = Franco arenoso

Densidad aparente = 1.32 g/cm<sup>3</sup> ó t/m<sup>3</sup>

- **Datos del muestreo del suelo:**

Profundidad de muestreo = 0.20 m

$$\text{P.C.A.} = \text{Área (m}^2\text{)} \times \text{Densidad aparente (t/m}^3\text{)} \times \text{Profundidad (m)}$$

$$\text{P.C.A.} = 10\,000 \text{ m}^2 \times 1.32 \text{ t/m}^3 \times 0.20 \text{ m} = 2\,640 \text{ t/ha}$$

Mediante regla de tres simple, planteamos lo siguiente:

$$\begin{array}{r} 1 \text{ t} \quad \underline{\hspace{2cm}} \quad 1\,000 \text{ kg} \\ 2\,640 \text{ t} \quad \underline{\hspace{2cm}} \quad X \text{ kg} \end{array}$$

$$\text{P.C.A.} = 2\,640 \times 1\,000 = 2\,640\,000 \text{ kg/ha}$$

## 10.2. Nutrientes disponibles en el suelo

### a. Estimación del nitrógeno disponible (N)

#### » Datos del análisis:

Nitrógeno (N) = 0.15 %

#### » Coeficiente de mineralización (C.M.)

Para este ejemplo se considera el coeficiente de mineralización del 3 % y fue explicado en el ítem 6.2.

C.M. = 3 % = 0.03

#### » Disponibilidad del nutriente (D.N.) nitrógeno

Para este ejemplo se considera un 40 % (0.4) de nitrógeno disponible por los factores explicados en el ítem 6.2.

D.N. (%) = Fuente de nitrógeno 40 % = 0.4

$$\text{N disponible (kg/ha)} = \text{N \%} \times \text{P.C.A. (kg/ha)} \times \text{C.M.} \times \text{D.N.}$$

$$\text{N disponible (kg/ha)} = 0.15/100 \times 2\,640\,000 \text{ kg/ha} \times 0.03 \times 0.4$$

$$\text{N disponible (kg/ha)} = 47.52 \text{ kg de N/ha}$$

## b. Estimación del fósforo disponible (P)

### » Datos del análisis:

Fósforo (P) = 10.60 ppm

### » Disponibilidad del nutriente (D.N.) fósforo.

Para este ejemplo se considera 25 % (0.25) de fósforo disponible y los factores que lo definen fueron explicados en el ítem 6.2.

D.N. (%) = Fuente de fósforo x 25 % = 0.25

### » Coeficiente de conversión de $P_2$ a $P_2O_5$

Pesos moleculares:

P = 31

O = 16

$P_2$  = 31 x 2 = 62

$O_5$  = 16 x 5 = 80

$P_2O_5$  = 62 + 80 = 142

Coeficiente de conversión de  $P_2$  a  $P_2O_5$  =  $\frac{142}{62} = 2.29$

$P_2O_5$  disponible (kg/ha) = P (ppm) x P.C.A. (kg/ha) x % D.N. x 2.29

$P_2O_5$  disponible (kg/ha) = 10.60 x  $\frac{1}{10^6}$  x 2 640 000 (kg/ha) x 0.25 x 2.29

$P_2O_5$  disponible (kg/ha) = 16.02 kg de  $P_2O_5$ /ha

### c. Estimación del potasio disponible (K)

#### » Datos del análisis

Potasio (K) = 104.22 ppm

#### » Disponibilidad del nutriente (D.N.) potasio.

Para este ejemplo se considera 40 % (0.4) de potasio disponible y los factores que lo definen fueron explicados en el ítem 6.2.

D.N. (%) = Fuente de potasio 40 % = 0.4

#### » Coeficiente de conversión de $K_2$ a $K_2O$

Pesos moleculares:

K = 39

O = 16

$K_2$  = 39 x 2 = 78

$K_2O$  = 78 + 16 = 94

Coeficiente de conversión de  $K_2$  a  $K_2O$  =  $\frac{94}{78} = 1.205$

$$K_2O \text{ disponible (kg/ha)} = K \text{ (ppm)} \times \frac{1}{10^6} \times P.C.A. \text{ (kg/ha)} \times \% \text{ D.N.} \times 1.205$$

$$K_2O \text{ disponible (kg/ha)} = 104.22 \times \frac{1}{10^6} \times 2\,640\,000 \times 0.4 \times 1.205$$

$$K_2O \text{ disponible (kg/ha)} = 132.62 \text{ kg de } K_2O/\text{ha}$$

### 10.3. Requerimiento de nutrientes

Para estimar el requerimiento de nutrientes, utilizaremos la siguiente fórmula:

$$\text{Requerimiento (kg/ha)} = \text{Extracción del cultivo (kg/ha)} - \text{Nutriente disponible en el suelo (kg/ha)}$$

#### a. Extracción del cultivo de cacao

A partir de los datos de la Tabla 28, la extracción del cultivo de cacao para un rendimiento de 2 000 kilogramos por hectárea (kg/ha); es 140 kg de N, 32 kg de P y 180 kg de K.

#### b. Estimación del requerimiento de nitrógeno (N)

$$\text{Requerimiento de N (kg/ha)} = \text{Extracción de N (kg/ha)} - \text{N disponible (kg/ha)}$$

$$\text{Requerimiento de N (kg/ha)} = 140 - 47.52 = 92.48 \text{ kg de N/ha}$$

#### c. Estimación del requerimiento de fósforo (P)

$$\text{Requerimiento de } P_2O_5 \text{ (kg/ha)} = \text{Extracción de } P_2O_5 \text{ (kg/ha)} - P_2O_5 \text{ disponible (kg/ha)}$$

$$\text{Requerimiento de } P_2O_5 \text{ (kg/ha)} = 32 - 16.02 = 15.98 \text{ kg de } P_2O_5/\text{ha}$$

#### d. Estimación del requerimiento de potasio (K)

$$\text{Requerimiento de } K_2O \text{ (kg/ha)} = \text{Extracción de } K_2O \text{ (kg/ha)} - K_2O \text{ disponible (kg/ha)}$$

$$\text{Requerimiento de } K_2O \text{ (kg/ha)} = 180 - 132.62 = 47.38 \text{ kg de } K_2O/\text{ha}$$

## 10.4. Requerimiento de nutrientes considerando la eficiencia del fertilizante

### a. Porcentaje de eficiencia de los fertilizantes (E.F. %)

El porcentaje de eficiencia de los fertilizantes se muestra en la Tabla 32.

**Tabla 32.** Porcentaje de eficiencia de los fertilizantes

Fertilizantes	Porcentaje de eficiencia del fertilizante (E.F. %)
Nitrogenados (N)	60 %
Fosfatados (P)	25 %
Potásicos (K)	70 %

Silvera-Pablo (2008), citando a UNALM (2008).

Para estimar el requerimiento eficiente de nutrientes, utilizaremos la siguiente fórmula:

$$\text{Requerimiento eficiente (kg/ha)} = \frac{\text{Requerimiento del nutriente (kg/ha)}}{\text{E.F.\%}}$$

### b. Estimación del requerimiento eficiente de nitrógeno (N)

$$\text{Requerimiento eficiente de N (kg/ha)} = \frac{\text{Requerimiento kg de N/ha}}{\% \text{ E.F. fuente de N}}$$

$$\text{Requerimiento eficiente de N (kg/ha)} = \frac{92.48}{0.6} = 154.13 \text{ kg de N/ha}$$

**c. Estimación del requerimiento eficiente de fósforo (P)**

$$\text{Requerimiento eficiente de P}_2\text{O}_5 \text{ (kg/ha)} = \frac{\text{Requerimiento kg de P}_2\text{O}_5/\text{ha}}{\% \text{ E.F. fuente de N}}$$

$$\text{Requerimiento eficiente de P}_2\text{O}_5 \text{ (kg/ha)} = \frac{15.98}{0.25} = 63.92 \text{ kg de P}_2\text{O}_5/\text{ha}$$

**d. Estimación del requerimiento eficiente de potasio (K)**

$$\text{Requerimiento eficiente de K}_2\text{O (kg/ha)} = \frac{\text{Requerimiento kg de K}_2\text{O/ha}}{\% \text{ E.F. fuente de K}_2\text{O}}$$

$$\text{Requerimiento eficiente de K}_2\text{O (kg/ha)} = \frac{47.38}{0.7} = 67.69 \text{ kg de K}_2\text{O/ha}$$

## 10.5. Dosis de los fertilizantes

Para estimar las dosis de los fertilizantes, utilizaremos la siguiente fórmula:

$$\text{Dosis del fertilizante (kg/ha)} = \frac{\text{Requerimiento eficiente del nutriente (kg/ha)} \times 100 \text{ kg}}{\text{Concentración del fertilizante (kg)}}$$

### a. Dosis de nitrógeno (N)

#### » Datos del análisis

Urea (46 % de N)

se calcula de la siguiente forma:

$$\begin{array}{l} 46 \text{ kg de N en } \underline{\hspace{2cm}} \text{ 100 kg de urea} \\ 154.13 \text{ kg de N/ha } \underline{\hspace{2cm}} \text{ X kg de urea/ha} \end{array}$$

$$\text{Dosis de la urea (kg/ha)} = \frac{\text{Requerimiento eficiente del N (kg/ha)} \times 100 \text{ kg}}{\text{Concentración de N(kg)}}$$

$$\text{Dosis de la urea (kg/ha)} = \frac{154.13 \times 100}{46} = 335.07 \text{ kg de urea/ha}$$

## b. Dosis de fósforo ( $P_2O_5$ )

### » Fuente de fósforo

Superfosfato triple “SFT” (46 % de  $P_2O_5$ )

Mediante regla de tres simple, planteamos lo siguiente:

$$\begin{array}{l} 46 \text{ kg de } P_2O_5 \text{ _____ } 100 \text{ kg de SFT} \\ 63.92 \text{ kg } P_2O_5/\text{ha} \text{ _____ } X \text{ kg de SFT/ha} \end{array}$$

$$\text{Dosis de SFT (kg/ha)} = \frac{\text{Requerimiento eficiente de } P_2O_5 \text{ (kg/ha)} \times 100 \text{ kg}}{\text{Concentración de } P_2O_5 \text{ (kg)}}$$

$$\text{Dosis de SFT (kg/ha)} = \frac{63.92 \times 100}{46} = 138.96 \text{ kg de SFT/ha}$$

## c. Dosis de potasio ( $K_2O$ )

### » Fuente de potasio:

Cloruro de potasio “KCl” (60 % de  $K_2O$ )

Mediante regla de tres simple, planteamos lo siguiente:

$$\begin{array}{l} 60 \text{ kg de } K_2O \text{ _____ } 100 \text{ kg de KCl} \\ 67.69 \text{ kg de } K_2O/\text{ha} \text{ _____ } X \text{ kg de KCl /ha} \end{array}$$

$$\text{Dosis de KCl (kg/ha)} = \frac{\text{Requerimiento eficiente de } K_2O \text{ (kg/ha)} \times 100 \text{ kg}}{\text{Concentración de } K_2O \text{ (kg)}}$$

$$\text{Dosis de KCl (kg/ha)} = \frac{67.69 \times 100}{60} = 112.81 \text{ kg de KCl /ha}$$

## 10.6. Etapas de aplicación de los fertilizantes

Las dosis de fertilización se deben distribuir al menos en 3 partes; la primera al inicio de la floración, la segunda al comienzo de la fructificación y la tercera al inicio de la maduración. Esto debido a la movilidad de los nutrientes en el suelo y los requerimientos nutricionales específicos de cada etapa fenológica del cultivo (Tabla 33).

**Tabla 33.** Etapas de fertilización del cultivo de cacao

Fuente de fertilizante	Etapas de fertilización		
	1º Fertilización	2º Fertilización	3º Fertilización
	Al inicio de la floración	Al inicio de la fructificación	Al inicio de la maduración
N	1/3	1/3	1/3
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Todo	...	...
K <sub>2</sub> O	1/3	1/3	1/3
CaO	Todo	...	...
MgO	Todo	...	...
SO <sub>4</sub>	Todo	...	...
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Todo	...	...
Cu SO <sub>4</sub>	Todo	...	...
Zn SO <sub>4</sub>	Todo	...	...
Mn SO <sub>4</sub>	Todo	...	...
Fe SO <sub>4</sub>	Todo	...	...

Adaptado de Silvera-Pablo (2008).





# 11. Referencias bibliográficas

- Acosta, C. (2007). El suelo agrícola, un ser vivo. *Inventio*, 3(5), 55-59. <https://inventio.uaem.mx/index.php/inventio/article/view/713/819>
- Agostini, M. de los Á., Monterubbianesi, M. G., Studdert, G. A., y Maurette, S. (2014). Un método simple y práctico para la determinación de la densidad aparente. *Ciencia Del Suelo*, 32(2), 171–176. [https://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1850-20672014000200003](https://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1850-20672014000200003)
- Allison, L. E., Brown, J. W., Hayward, H. E., Richards, L. A., Bernstein, L., Fireman, M., Pearson, G. A., Wilcox, L. v., Bower, C. A., Hatcher, J. T., y Reeve, R. C. (1954). *Diagnosis and improvement of saline and alkaline soils*. Agriculture handbook No. 60. United States Department of Agriculture. <https://doi.org/10.2136/sssaj1954.03615995001800030032x>
- Barrezueta-Unda, S., Cervantes-Alava, A., Ullauri-Espinoza, M., Barrera-Leon, J., y Condoy-Gorotiza, A. (2020). Evaluación del método de ignición para determinar materia orgánica en suelos de la provincia el Oro-Ecuador. *Revista FAVE-Ciencias Agrarias*, 19(2), 25-36. <https://bibliotecavirtual.unl.edu.ar/publicaciones/index.php/FAVEAgrarias/article/view/9747>
- Bautista, J. I., y Hernández, J. J. A. (2021). Determinación del carbono orgánico por el método químico y por calcinación. *Ingeniería y Región*, 26, 20-28. <https://doi.org/10.25054/22161325.2527>
- Bohn, H. L., McNeal, B. L., y O'Connor, G. A. (2001). *Soil chemistry* (3.ª ed.). John y Wiley Sons. Inc.
- Bloom, P. R., Meter, K., y Crum, J. R. (1985). Titration method for determination of clay-sized carbonates. *Soil Science Society of America Journal*, 49(4), 1070-1073. <https://doi.org/10.2136/sssaj1985.03615995004900040057x>
- Bray, R. H., y Kurtz, L. T. (1945). Determination of total organic and available forms of phosphorus in soils. *Soil Science*, 59(1), 39-45. [dx.doi.org/10.1097/00010694-194501000-00006](https://doi.org/10.1097/00010694-194501000-00006)
- Bustos, T., Dec, D., Valle, S., Clunes, J., y Dörner, J. (2023). Assessment of the structural properties of an andisol under different methods and depths of stubble incorporation into the soil. *Chilean Journal of Agricultural and Animal Sciences*, 39(1), 90-106. <https://doi.org/10.29393/CHJAA39-8EPTJ50008>

- Carmona-Rojas, L. M., Gutiérrez-Rodríguez, E. A., Henao-Ramirez, A. M., y Urrea-Trujillo, A. I. (2022). Nutrition in cacao (*Theobroma cacao* L.) crops: What determining factors should be considered? *Revista de La Facultad de Agronomía*, 121(2), 101. <https://doi.org/10.24215/16699513e101>
- Casierra-Posada, F., y Aguilar-Avenidaño, O. E. (2018). Stress for aluminum in plants: reactions in the soil, symptoms in plants and amelioration possibilities. A review. *Revista Colombiana De Ciencias Hortícolas*, 1(2), 246-257. <https://doi.org/10.17584/rcch.2007v1i2.8701>
- Corwin, D. L., y Lesch, S. M. (2005). Apparent soil electrical conductivity measurements in agriculture. *Computers and electronics in agriculture*, 46(1), 11-43. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2004.10.005>
- Creamer, R. E., Barel, J. M., Bongiorno, G., y Zwetsloot, M. J. (2022). The life of soils: Integrating the who and how of multifunctionality. *Soil Biology and Biochemistry*, 166, 108561. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2022.108561>
- Cremona, M. V., y Enríquez, A. S. (2020). Algunas propiedades del suelo que condicionan su comportamiento: El pH y la conductividad eléctrica. *Presencia*, 73, 5-8. <https://core.ac.uk/download/pdf/335290789.pdf>
- Curtin, D., y Wen, G. 1999. Organic matter fractions contributing to soil nitrogen mineralization potential. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63: 410-415. <https://doi.org/10.2136/sssaj1999.03615995006300020020x>
- Donahue, R. L., Miller, R. W., Shickluna, J. C. (1981). Introducción a los suelos y al crecimiento de las plantas. *European Journal of Soil Science*, 62(5), 728-732.
- Eyherabide, M., Sainz-Rozas, H., Barbieri, P., y Eduardo-Echeverría, H. (2014). Comparación de métodos para determinar carbono orgánico en suelo. *Cienc Suelo (Argentina)*, 32(1), 13-19. [https://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1850-20672014000100002](https://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1850-20672014000100002)
- Fassbender, H. W., y Bornemisza, E. 1987. *Química de suelos con énfasis en suelos de América Latina* (2.ª ed.). Instituto Interamericano de Cooperación Agraria.
- Fageria, N. K., y Nascente, A. S. (2014). Management of soil acidity of south american soils for sustainable crop production. En D. L. Sparks (Ed.), *Advances in Agronomy* (vol. 128, pp. 221-275). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802139-2.00006-8>

- Fernández, R. J., y Trillo, N. (2005). La textura del suelo como fuente de heterogeneidad; sus efectos sobre la oferta de agua para las plantas. En M. Oesterheld, M.R. Aguiar, C.M. Ghersa, J.M Paruelo (Eds.), *La heterogeneidad de la vegetación de los agroecosistemas: Un homenaje a Rolando J. C. León* (pp. 171-192). Editorial Facultad de Agronomía-Universidad de Buenos Aires.
- Furcal-Beriguete, P. (2017). Extracción de nutrientes por los frutos de cacao en dos localidades en Costa Rica. *Agronomía Mesoamericana*, 28(1), 113-129. <https://doi.org/10.15517/am.v28i1.23236>
- Gabriels, D., y Lobo, D. (2006). Métodos para determinar granulometría y densidad aparente del suelo. *Venezuelasuelos*, 14, 37-48. [http://saber.ucv.ve/ojs/index.php/rev\\_venes/article/view/982](http://saber.ucv.ve/ojs/index.php/rev_venes/article/view/982)
- García-Galvis, J., y Ballesteros-González, M. I. (2005). Quality parameters evaluation for organic carbon. *Revista Colombiana de Química*, 34(2), 201-209. <http://www.scielo.org.co/pdf/rcq/v34n2/v34n2a09.pdf>
- González O., E. y Fuentes P., M. H. (2022). Dinámica del glifosato en el suelo y sus efectos en la microbiota. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 38, 127-144. <https://doi.org/10.20937/rica.54197>
- Hochmuth, G., Mylavarapu, R., y Hanlon, E. (2018). *Soil testing for plant-available nutrients — What is it and why do we use it? Collecting the soil sample processing and analyzing the Soil*. Recuperado el 6 de marzo de 2025, de <https://edis.ifas.ufl.edu/publication/SS621>
- Horton, J. H., y Newsom, D. W. (1953). A rapid gas evolution method for calcium carbonate equivalent in liming materials. *Soil Science Society of America Journal*, 17, 414-415. <https://doi.org/10.2136/sssaj1953.03615995001700040029x>
- Huamani-Yupanqui, H. A., Huauya-Rojas, M. Á., Mansilla-Minaya, L. G., Florida-Rofner, N., y Neira-Trujillo, G. M. (2012). Presence of heavy metals in organic cacao (*Theobroma cacao* L.) crop. *Acta Agronómica*, 61(4), 339-344. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/72450>
- Instituto Nacional de Estadística e Informática (2025). *Productores agropecuarios - Principales resultados de la Encuesta Nacional Agropecuaria (ENA) 2018, 2019, 2020, 2021, 2022 y 2023*. <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/7176575/6152298-productores-agropecuarios-principales-resultados-de-la-encuesta-nacional-agropecuaria-ena-2018-2019-2022-y-2023.pdf?v=1731532580>
- Jackson, M. L. (1982). *Análisis químico de suelos* (4.ª ed.). Ediciones Omega.

- Julca-Otiniano, A., Meneses-Florián, L., Blas-Sevillano, R., y Bello-Amez, S. (2006). La materia orgánica, importancia y experiencia de su uso en la agricultura. *Idesia*, 24(1), 49-61. <https://doi.org/10.4067/s0718-34292006000100009>
- Kamprath, E. J. (1970). Exchangeable aluminum as a criterion for liming leached mineral soils. *Soil Science Society of America Journal*, 34(2), 252-254. <https://doi.org/10.2136/sssaj1970.03615995003400020022x>
- Kochian, L. V., Piñeros, M. A., y Hoekenga, O. A. (2005). The physiology, genetics and molecular biology of plant aluminum resistance and toxicity. *Plant and Soil*, 274(1), 175-195. <https://doi.org/10.1007/s11104-004-1158-7>
- Lin, C., y Coleman, N. T. (1960). The measurement of exchangeable aluminum in soils and clays. *Soil Science Society of America Journal*, 24(6), 444-446. <https://doi.org/10.2136/sssaj1960.03615995002400060009x>
- Maciel-Torres, S. P., Figueroa-Viramontes, U., Jacobo-Salcedo, M. D., Trejo-Calzada, R., Pedroza-Sandoval, A., y Encerrado-Alva, R. C. (2020). Disponibilidad de nitrógeno y rendimiento de biomasa de *Ricinus communis* L. fertilizado con biosólidos. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 11(8), 1855-1866. <https://doi.org/10.29312/remexca.v11i8.2082>
- McBride, M. B. (1994). *Environmental chemistry of soils*. Oxford University Press, Inc.
- Mengel, K. (2006). Potassium. En A. V. Barker y D. J. Pillbeam (Eds.), *Handbook of plant nutrition* (pp. 427-453)
- Mengel, K., Kirkby, E. A., Kosegarten, H., y Appel, T. (2001). Nitrogen. En Konrad Mengel y E. Kirkby (Eds.), *Principles of plant nutrition* (5.a ed., pp. 397-434). Springer.
- Mengel, K., & Kirkby, E. (1987). Potassium. En Konrad Mengel y E. Kirkby (Eds.), *Principles of plant nutrition* (pp. 427-453). International Potash Institute.
- Moreno-Vigara, J. J., Peinado-Amores, R. A., Bueno González, J. E. (2002). *Análisis fundamentales en edafología*. Colección ciencias de la naturaleza. Martínez Bernia y Asociados.
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (2024). Textura del suelo. Recuperado el 6 de marzo de 2025 de: [https://www.fao.org/fishery/docs/CDrom/FAO\\_Training/FAO\\_Training/General/x6706s/x6706s06.htm](https://www.fao.org/fishery/docs/CDrom/FAO_Training/FAO_Training/General/x6706s/x6706s06.htm)

- Polemio, M., y Rhoades, J. D. (1977). Determining cation exchange capacity: A new procedure for calcareous and gypsiferous soils. *Soil Science Society of America Journal*, 41, 524-528. <https://doi.org/10.2136/sssaj1977.03615995004100030018x>
- Quispe H., M. R.; Vera V., J. E. y Riveros C., C. (2022). *Díptico: muestreo de suelos y servicios de análisis*. Laboratorio de Suelos Aguas y Foliars LABSAF. Instituto Nacional de Innovación Agraria. <https://repositorio.inia.gob.pe/items/c79f3f8a-6ef4-4c4a-9eda-005034875b69>
- Sadeghian-Khalajabadi, S. (2008). *Fertilidad del suelo y nutrición del café en Colombia: Guía práctica*. Federación Nacional de Cafeteros de Colombia <https://biblioteca.cenicafe.org/handle/10778/587>
- Sales-Dávila, B., Samaniego-Vivanco, T. D., Durand-Pasco, K. A., Norabuena-Segovia, Á. A., Calderón-Espinoza, R. J., Ortega-Vega, J. M., y Munayco-Peralta, K. E. (2024). *Manual para el análisis de suelos agrícolas y agua para riego*. Instituto Nacional de Innovación Agraria. <https://repositorio.inia.gob.pe/items/579d9e8f-663e-47f9-828d-a816b511a50f>
- Scarsbrook, C. E. (1965). Nitrogen availability. En W. V. Bartholomew y F. E. Clark (Eds.), *Soil Nitrogen* (vol. 10, pp. 481-502). <https://doi.org/10.2134/agronmonogr10.c13>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2002). NORMA Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000, que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de los suelos. Estudio, muestreo y análisis. Diario Oficial de la Federación (31 de diciembre de 2002). <https://www.ordenjuridico.gob.mx/Documentos/Federal/wo69255.pdf>
- Shafreen, M., Vishwakarma, K., Shrivastava, N., y Kumar, N. (2021). Physiology and distribution of nitrogen in soils. En C. Cruz, D. Kumar C., K. Vishwakarma y A. Varma (Eds.), *Soil Nitrogen Ecology* (vol. 62, pp. 3-31). [https://doi.org/10.1007/978-3-030-71206-8\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-030-71206-8_1)
- Sistema Integrado de Estadística Agraria (2025a). *Valor bruto de la producción agropecuaria (VBP) – Regional*. Recuperado el 6 de marzo de 2025 de: <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrljoiY2NIOTFkOTMT-MjgxYy00NThjLWE0MjUtNGQwMDA0YTY1Nzc1IiwidCI6IjdmMDg0NjI3LTdmNDAtdNDg3OS004OTE3LTk0Y-jg2ZmQzNWYzZiI9ypageName=ReportSectioncdcb240117bc1370448b>

- Sistema Integrado de Estadística Agraria (2025b). *Perfil productivo de los principales cultivos*. Recuperado el 6 de marzo de 2025 de: <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiYjYwYTk5MDgtM2M0MS00NDMyLTgzNDk5MjNhNjEzYWQyOTNlIiwidCI6IjdmMDg0NjI3LTdmNDAtNDg3OS04OTE3LTk0Yjg2ZmQzNWYzZiJ9>
- Silvera-Pablo, C. C. (2008). *Interpretación de los resultados de un análisis de suelo para la producción de café*. Junta Nacional del Café.
- Soil Survey Staff. (2014). *Kellogg soil survey laboratory methods manual: Soil survey investigations report No. 42: Version 5.0*. United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service. <https://www.nrcs.usda.gov/sites/default/files/2023-01/SSIR42.pdf>
- Soil Survey Staff. (1999). *Soil Taxonomy: A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys* (2.º ed.). Agriculture handbook Number 426. United States Department of Agriculture. <https://www.nrcs.usda.gov/sites/default/files/2022-06/Soil%20Taxonomy.pdf>
- Taalab, K. P., Corstanje, R., Creamer, R., y Whelan, M. J. (2013). Modelling soil bulk density at the landscape scale and its contributions to C stock uncertainty. *Biogeosciences*, *10*(7), 4691-4704. <https://doi.org/10.5194/bg-10-4691-2013>
- Thomas, G. W. (2017). pH. En R. Lal (Ed.), *Encyclopedia of soil science*. CRC Press.
- Thomas, G. W., & Hargrove, W. L. (1984). The chemistry of soil acidity. En F. Adams (Ed.), *Soil Acidity and Liming* (12.ª ed., pp. 3-56). <https://doi.org/10.2134/agronmonogr12.2ed.c1>
- Tisdale, S. L., y Nelson, W. L. (1985). *Fertilidad de los suelos y fertilizantes* (1.ª ed.). Unidad Tipográfica Editorial Hispano Americana.
- United States Department of Agriculture. (2001). *Soil quality test kit guide*. [https://efotg.sc.egov.usda.gov/references/public/WI/Soil\\_Quality\\_Test\\_Kit\\_Guide.pdf](https://efotg.sc.egov.usda.gov/references/public/WI/Soil_Quality_Test_Kit_Guide.pdf)
- Valencia-Aristizábal, G., y Carrillo-Pachón, I. F. (1983). *Interpretación de análisis de suelo para café*. Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. <https://biblioteca.cenicafe.org/bitstream/10778/887/1/avt0115.pdf>

- Valencia Aristizábal, G., Carrillo Pachon, I. F., y Estrada Hoyos, L. I. (1989). Fertilización cafetal según análisis suelos. En Federación Nacional de Cafetaleros de Colombia (Ed.), 50 años de Cenicafé 1938-1988 : Conferencias conmemorativas (pp. 97-103). <https://biblioteca.cenicafe.org/handle/10778/713>
- Walkley, A., y Black, I. A. (1934). An examination of Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*, 37 (1), 29-37. [https://journals.lww.com/soilsci/citation/1934/01000/an\\_examination\\_of\\_the\\_degtjareff\\_method\\_for.3.aspx](https://journals.lww.com/soilsci/citation/1934/01000/an_examination_of_the_degtjareff_method_for.3.aspx)
- Wang, K., Smith, D., y Zheng, Y. (2018). Electron-driven heterogeneous catalytic synthesis of ammonia: Current states and perspective. *Carbon Resources Conversion*, 1(1), 2-31. <https://doi.org/10.1016/j.crccon.2018.06.004>
- Weil, R.R. y Brady, N.C. (2017). *The nature and properties of soils* (15.o ed.). Pearson.





*Instituto Nacional de Innovación Agraria*





D. : Av. La Molina 1981, La Molina  
T. : (511) 240-2100 / 240-2350  
[www.gob.pe/inia](http://www.gob.pe/inia)



PERÚ

Ministerio  
de Desarrollo Agrario  
y Riego



Instituto Nacional de Innovación Agraria

 @INIAPeru  @INIAPeru  @iniaperu  @IniaPeru  @iniaperu  @iniaperu