**Fomento a la construcción de capacidades en relación a las políticas públicas apoyadas por Contratos de Reforma Sectorial (CRS) en Bolivia 2014/25**

# Fortalecimiento de la capacidad institucional en los sectores de desarrollo integral con coca, tráfico ilícito de drogas y seguridad alimentaria para una eficiente gestión del apoyo presupuestario sectorial en Bolivia

## *DI-012 –Fortalecimiento de Conocimientos en Fertilidad de Suelos del Trópico de Cochabamba, Yungas de La Paz y municipios de migración*

Contrato n° DCI/LA/2017/392-699

N° de identificación: EuropeAid/138320/IH/SER/BO

Proyecto Financiado por la Unión Europea

Implementada por el consorcio:
AGRER — AECOM — TRANSTEC
*Bruselas, noviembre 2019*

**Disclaimer:**
Este informe ha sido elaborado por el consorcio AGRER/AECOM/TRANSTEC con financiamiento de la Unión Europea. Las opiniones aquí expresadas son del consultor y no expresan necesariamente las de la Comisión Europea.

# Fortalecimiento de la capacidad institucional en los sectores de desarrollo integral con coca, tráfico ilícito de drogas y seguridad alimentaria para una eficiente gestión del apoyo presupuestario sectorial en Bolivia (DITISA)

**Contrato Nº DCI/LA/2017/392-699**

Misión DI-012: Fortalecimiento de conocimientos en fertilidad de suelos del Trópico de Cochabamba, Yungas de La Paz y municipios de emigración

## Informe final

Autores: Luis Meneses Junco

Helder Soto Rodríguez

La Paz / Bruselas, noviembre 2019

Consorcio AGRER – AECOM – TRANSTEC

# INDÍCE

**INDíCE** ..... **4**
**Acrónimos** ..... **7**
**1. Introducción** ..... **8**
1.1. Objetivo General de la Misión ..... 8
1.2. Objetivos Específicos de la Misión ..... 8
1.3. Productos de la Misión ..... 8
**2. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO** ..... **9**
2.1. Trópico de Cochabamba (TCbba) ..... 9
2.2. Yungas de La Paz (YLP) ..... 10
**3. METODOLOGIA DE TRABAJO** ..... **13**
3.1. Fertilidad de suelos ..... 14
3.2. Elaboración de mapas en ArcGis en base a modelo geoestadístico ..... 15
**4. RESULTADOS ALCANZADOS EN LA MISIÓN** ..... **23**
4.1. Fertilidad y características físicas y químicas de suelos ..... 23
4.2. Factores edáficos limitantes para la nutrición de cultivos priorizados ..... 36
4.3. Socialización de mapas de fertilidad ..... 41
**5. CONCLUSIONES** ..... **42**
5.1. Trópico de Cochabamba ..... 42
5.2. Yungas de La Paz ..... 43
**6. RECOMENDACIONES** ..... **44**
**7. A N E X O S** ..... **48**
**1. MAPAS DE TCbba**
Mapa 3: Precipitación media anual del TCbba en mm
Mapa 4: Temperatura media anual del TCbba en °C
Mapa 7: Tipo de texturas en suelos de TCbba a profundidad 0 – 20 cm
Mapa 8: Tipo de texturas en suelos de TCbba a profundidad 20 – 40 cm
Mapa 9: Valores de pH en suelos de TCbba a profundidad 0 – 20 cm
Mapa 10: Valores de pH en suelos de TCbba a profundidad 20 – 40 cm
Mapa 11: Valores de Ca en suelos de TCbba a profundidad 0 – 20 cm (cmol (+) kg-1)
Mapa 12: Valores de Ca en suelos de TCbba a profundidad 20 – 40 cm (cmol (+) kg-1)
Mapa 13: Valores de Mg en suelos de TCbba a profundidad 0 – 20 cm (cmol (+) kg-1)
Mapa 14: Valores de Mg en suelos de TCbba a profundidad 20 – 40 cm (cmol (+) kg-1)
Mapa 15: Valores de K en suelos de TCbba a profundidad 0 – 20 cm (cmol (+) kg-1)
Mapa 16: Valores de K en suelos de TCbba a profundidad 20 – 40 cm (cmol (+) kg-1)
Mapa 17: Valores de saturación de bases en suelos de TCbba a profundidad 0 – 20 cm (%)
Mapa 18: Valores de saturación de bases en suelos de TCbba a profundidad 20 – 40 cm (%)

Mapa 19: Valores de P en suelos de TCbba a profundidad 0 – 20 cm (mg kg-1)
Mapa 20: Valores de P en suelos de TCbba a profundidad 20 – 40 cm (mg kg-1)
Mapa 21: Valores de materia orgánica en suelos de TCbba a profundidad 0 – 20 cm (%)
Mapa 22: Valores de materia orgánica en suelos de TCbba a profundidad 20 – 40 cm (%)
Mapa 23: Valores calculados de saturación de Aluminio en suelos de TCbba a profundidad 0 – 20 cm (%)
Mapa 23.1: Valores calculados de saturación de Aluminio en suelos de TCbba a profundidad 20 – 40 cm (%)
Mapa 24: Requerimiento de encalado en TCbba para Banano (kg/ha)
Mapa 25: Requerimiento de encalado en TCbba para Café (kg/ha)
Mapa 26: Requerimiento de encalado en TCbba para Cítricos (kg/ha)
Mapa 27: Requerimiento de encalado en TCbba para Palmito (kg/ha)
Mapa 28: Requerimiento de encalado en TCbba para Piña (kg/ha)

**2. MAPAS DE YLP**

Mapa 5: Precipitación media anual del YLP en mm
Mapa 6: Temperatura media anual del YLP en °C
Mapa 29: Tipo de texturas en suelos de YLP a profundidad 0 – 20 cm
Mapa 30: Tipo de texturas en suelos de YLP a profundidad 20 – 40 cm
Mapa 31: Valores de pH en suelos de YLP a profundidad 0 – 20 cm
Mapa 32: Valores de pH en suelos de YLP a profundidad 20 – 40 cm
Mapa 33: Valores de Ca en suelos de YLP a profundidad 0 – 20 cm (cmol (+) kg-1)
Mapa 34: Valores de Ca en suelos de YLP a profundidad 20 – 40 cm (cmol (+) kg-1)
Mapa 35: Valores de Mg en suelos de YLP a profundidad 0 – 20 cm (cmol (+) kg-1)
Mapa 36: Valores de Mg en suelos de YLP a profundidad 20 – 40 cm (cmol (+) kg-1)
Mapa 37: Valores de K en suelos de YLP a profundidad 0 – 20 cm (cmol (+) kg-1)
Mapa 38: Valores de K en suelos de YLP a profundidad 20 – 40 cm (cmol (+) kg-1)
Mapa 39: Valores de Saturación de Bases en suelos de YLP a profundidad 0 – 20 cm (%)
Mapa 40: Valores de Saturación de Bases en suelos de YLP a profundidad 20 – 40 cm (%)
Mapa 41: Valores de P en suelos de YLP a profundidad 0 – 20 cm (mg kg-1)
Mapa 42: Valores de P en suelos de YLP a profundidad 20 – 40 cm (mg kg-1)
Mapa 43: Valores de materia orgánica en suelos de YLP a profundidad 0 – 20 cm (%)
Mapa 44: Valores de materia orgánica en suelos de YLP a profundidad 20 – 40 cm (%)
Mapa 45: Valores calculados de Saturación de Aluminio en suelos de YLP a profundidad 0 – 20 cm (%)
Mapa 45.1: Valores calculados de Saturación de Aluminio en suelos de YLP a profundidad 20 cm -40 cm (%)

Mapa 46: Requerimiento de encalado en YLP para Banano (kg/ha)
Mapa 47: Requerimiento de encalado en YLP para Cacao (kg/ha)
Mapa 48: Requerimiento de encalado en YLP para Café (kg/ha)
Mapa 49: Requerimiento de encalado en YLP para Cítricos (kg/ha)
Mapa 50: Pendientes de YLP (en grados)

**3. OTROS MAPAS**

Encalado de Cacao –TCbba
Muestras depuradas – Tcbba
Mapa de pendientes - TCbba
Encalado de Palmito – YLP
Encalado de Piña – YLP
Muestras depuradas – YLP
Texturas 0 a 20 – YLP
Texturas 20 a 40 – YLP

**4. BOX PLOTS**
**5. SOCIALIZACIÓN DE MAPAS DE FERTILIDAD**
**6. TÉRMINOS DE REFERENCIA**
**7. SELECCIÓN DE CANDIDATOS**
**8. HOJAS DE PRESENCIA**
**9. PASES A BORDO**

## Lista de cuadros

Cuadro N° 1: Niveles de de reacción del suelo .....13
Cuadro N° 2: Límites de interpretación de los niveles de distintos nutrimentos o características químicas de suelos para cultivos tropicales .....14
Cuadro N° 3: Estadísticas descriptivas (datos cuantitativos): Región Trópico de Cochabamba .....16
Cuadro N° 4: Estadísticas descriptivas (datos cuantitativos): Región Yungas de La Paz .....16
Cuadro N° 5: Matriz de correlaciones (Spearman) .....17
Cuadro N° 6: Niveles óptimos de pH, saturación de Al tolerable y requerimientos estimados de encalado para distintos cultivos. Adaptado de Gauggel, C. 2015; Ferrufino, A. 2001; FAO 2010, IICA, 2017.....28
Cuadro N° 7: Niveles óptimos de pH, saturación de Al tolerable y requerimientos estimados de encalado para distintos cultivos. Adaptado de Gauggel, C. 2015; Ferrufino, A. 2001; FAO 2010, IICA, 2017.....34
Cuadro N° 8: Disponibilidad de nutrientes en suelos del TCbba vs Requerimientos de nutrientes por cultivo.....37
Cuadro N° 9: Disponibilidad de nutrientes en suelos del YLP vs Requerimientos de nutrientes por cultivo.....39

## Acrónimos

| | |
|---|---|
| DITISA | Desarrollo integral con coca, tráfico ilícito de drogas y seguridad alimentaria para una eficiente gestión del apoyo presupuestario sectorial en Bolivia |
| ENDIC | Estrategia Nacional de Desarrollo Integral con Coca |
| ENDIS | Estrategia Nacional de Desarrollo Integral Sustentable |
| ESAME | Estrategia de Seguridad Alimentaria para Municipios Expulsores |
| GAD | Gobierno autónomo departamental |
| GAM | Gobierno autónomo municipal |
| MDRyT | Ministerio de Desarrollo Rural y Tierras |
| SIG | Sistemas de Información Geográfica |
| TCbba | Tópico del departamento de Cochabamba |
| UTM | (en inglés Universal Transverse Mercator, UTM) |
| YLP | Región Yungas del departamento de La Paz |

# 1. INTRODUCCIÓN

Una de las demandas más frecuentes de los productores de las zonas de acción de la ENDIS es información acerca de la fertilidad de sus suelos. Existen varios estudios de suelos, hechos en el pasado reciente en esas regiones por varias instituciones y proyectos; sin embargo, su difusión e interpretación ha sido muy limitada. Generalmente se quedan como documentos de acceso muy limitado a técnicos y menos a los productores.

La Unión Europea en el Trópico de Cochabamba (TCbba) y Yungas de La Paz (YLP) desde hace varios años atrás ha promocionado el manejo de cultivos de varias especies que permitan a los productores diversificar la producción agrícola de la zona, incluyendo banano, café, palmito, piña, y otras más que están dentro de las actividades de los pequeños productores.

En general, los niveles de productividad de los cultivos mencionados varían entre bajos, medios y altos. Se ha comprobado que uno de los factores más restrictivos de la productividad es la acidez de los suelos, la profundidad del suelo y la baja proporción de bases cambiables, que pueden ser corregidos mediante el uso de enmiendas y la fertilización. La difusión de información sobre las características de los suelos de TCbba y YLP así como la identificación de los factores más restrictivos para la productividad de cultivos específicos son importantes para que técnicos de investigación, extensionistas, promotores agrícolas y productores los conozcan mejor y traten de resolver los problemas que conllevan estos suelos a través de la generación y transferencia de tecnología.

El objetivo del presente trabajo es proporcionar a técnicos y productores, mapas de referencia que muestren las características físico-químicas más importantes de los suelos del TCbba y YLP que les permitan identificar los factores más limitantes de suelo para los cultivos priorizados (mencionados) y encontrar información importante que se pueda incorporar en su manejo.

## 1.1. Objetivo General de la Misión

Contribuir al incremento de capacidades y conocimientos de técnicos de entidades nacionales y sub-nacionales, en fertilidad y manejo de suelos en el Trópico de Cochabamba y Yungas de La Paz.

## 1.2. Objetivos Específicos de la Misión

- Preparar mapas de fertilidad y características físicas de suelos en las zonas de interés utilizando información existente para las zonas de interés.
- Identificar factores limitantes para la nutrición de cultivos y dar recomendaciones para superarlos.
- Socializar los mapas en las distintas zonas de trabajo.

## 1.3. Productos de la Misión

1. Elaborados mapas digitales de fertilidad y características físicas de suelos (escala 1:150000) para el Trópico de Cochabamba y Yungas de La Paz. Los mapas deben incluir al menos información sobre los contenidos de fósforo, potasio, calcio, magnesio, pH y textura en los

20 cm superiores del suelo. Se deben utilizar mapas base de las zonas de interés. Los mapas tienen que incluir también modelos digitales de elevación.

2. Identificados factores limitantes para la nutrición de cultivos priorizados y recomendaciones para superarlos. Si se dispusiera de imágenes satelitales, o similares, de áreas de cultivos priorizados (banano, café, cítricos, palmito y piña en el TCbba y banano, cacao, café y cítricos en YLP) éstas deben sobreponerse a los mapas de fertilidad para hacer una mejor caracterización de los factores limitantes de fertilidad para cada cultivo específico y facilitar la comprensión de los usuarios de los mapas.
3. Difundidos mapas de fertilidad de las distintas zonas de trabajo.

Para este propósito los Sistemas de Información Geográfica (SIG) ofrecen un gran potencial como herramienta para el análisis de datos de suelos tanto para la clasificación como la variación espacial de la fertilidad del suelo (HENRÍQUEZ C., KILLORN R., BERTSCH F., SANCHO F. 2005), (MUELLER T.G. 2007) como diversas aplicaciones. Esto permite utilizar los SIG como herramienta preferida para la planificación, análisis y gestión.

Las técnicas estadísticas entre las que se incluyen, diagramas de caja, gráficos de dispersión, análisis de correlación, mapas geoquímicos, suelos entre otros, permiten investigar sobre la estructura, tendencias y asociaciones de las variables, así como conocer los procesos que controlan la variabilidad geoquímica espacial del área de interés.

La determinación de la distribución espacial de la calidad y composición de los suelos a partir de herramientas geo estadísticas para el análisis de datos nos permite obtener resultados de muy alta calidad para los objetivos del presente estudio.

Realizar estimaciones considerando las características de variabilidad y correlación espacial de datos, permitirán identificar preliminarmente, zonas homogéneas con concentración de los componentes químicos y físicos de los suelos para otorgar predicciones confiables y consistentes con los datos.

# 2. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

## 2.1. Trópico de Cochabamba (TCbba)

El área de estudio se halla ubicada en los municipios de Villa Tunari, Shinahota, Chimoré, Puerto Villarroel y Entre Ríos del Departamento de Cochabamba, conocida como Área de Bosque de Uso Múltiple (BUM).

Geográficamente está situada entre las coordenadas UTM 199000 E – 8076000 N y 375000 E – 8158000 N, con alturas que varían de 182 a 420 msnm, tal como se muestra en el mapa 1.

El TCbba comprende dos zonas climáticas: la zona de la llanura que se caracteriza por ser húmeda, una marcada estacionalidad y precipitaciones moderadas y la zona de serranías subandinas y de pie de monte transicional, notablemente perhúmeda y con una estacionalidad poco diferenciada.

El rango de precipitación media anual es de 1000 a 6000 mm año$^{-1}$; ésta última está próxima a la estación Chipiriri. El 80% de la precipitación anual ocurre entre los meses de octubre a abril. El rango de temperatura media anual en el TCbba es de 25 C a 28 C., tal como se presentan en los mapas 3 y 4, respectivamente (Anexo 1).

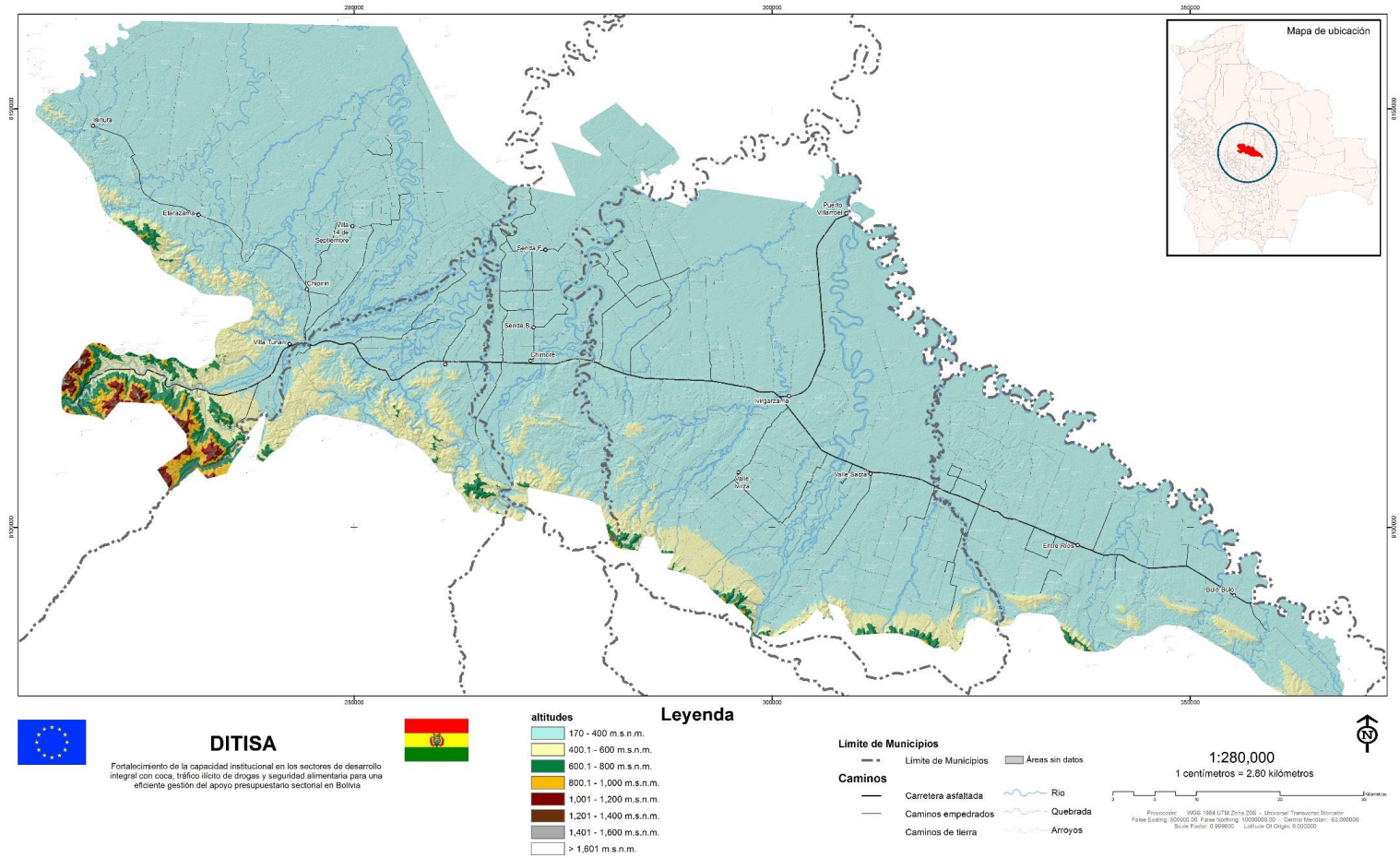
## 2.2. Yungas de La Paz (YLP)

La segunda área de estudio se halla ubicada en los municipios de Coroico, Coripata, Cajuata, Chulumani, Caranavi, Irupana, La Asunta, Palos Blancos y Yanacachi del Departamento de La Paz, que conforman las provincias de Nor y Sud Yungas.

Geográficamente está situada entre las coordenadas UTM de 602000 E, 8133000 N y 745000 E, 8362000 E, con alturas que varían de 300 a 6400 msnm, tal como se muestra en el mapa 4. Este mapa nos muestra que las zonas más bajas están en el municipio de Palos Blancos. Las áreas con altitudes entre 1.500 a 2.500 msnm están a partir de la parte central de los municipios de Caranavi y La Asunta. La zona norte que presenta las mayores altitudes comprenden los municipios de Irupana y Yanacachi.
Las pendientes más bajas (< 5°) están ubicadas en el municipio de Palos Blancos. Las pendientes medias (5,1° a 10°) están ubicadas en el municipio de Palos Blancos, parte de los municipios de Caranavi y La Asunta. Las pendientes más altas (> 10°) están ubicadas desde la parte central de los municipios de Caranavi y La Asunta hasta el límite norte de Yungas.

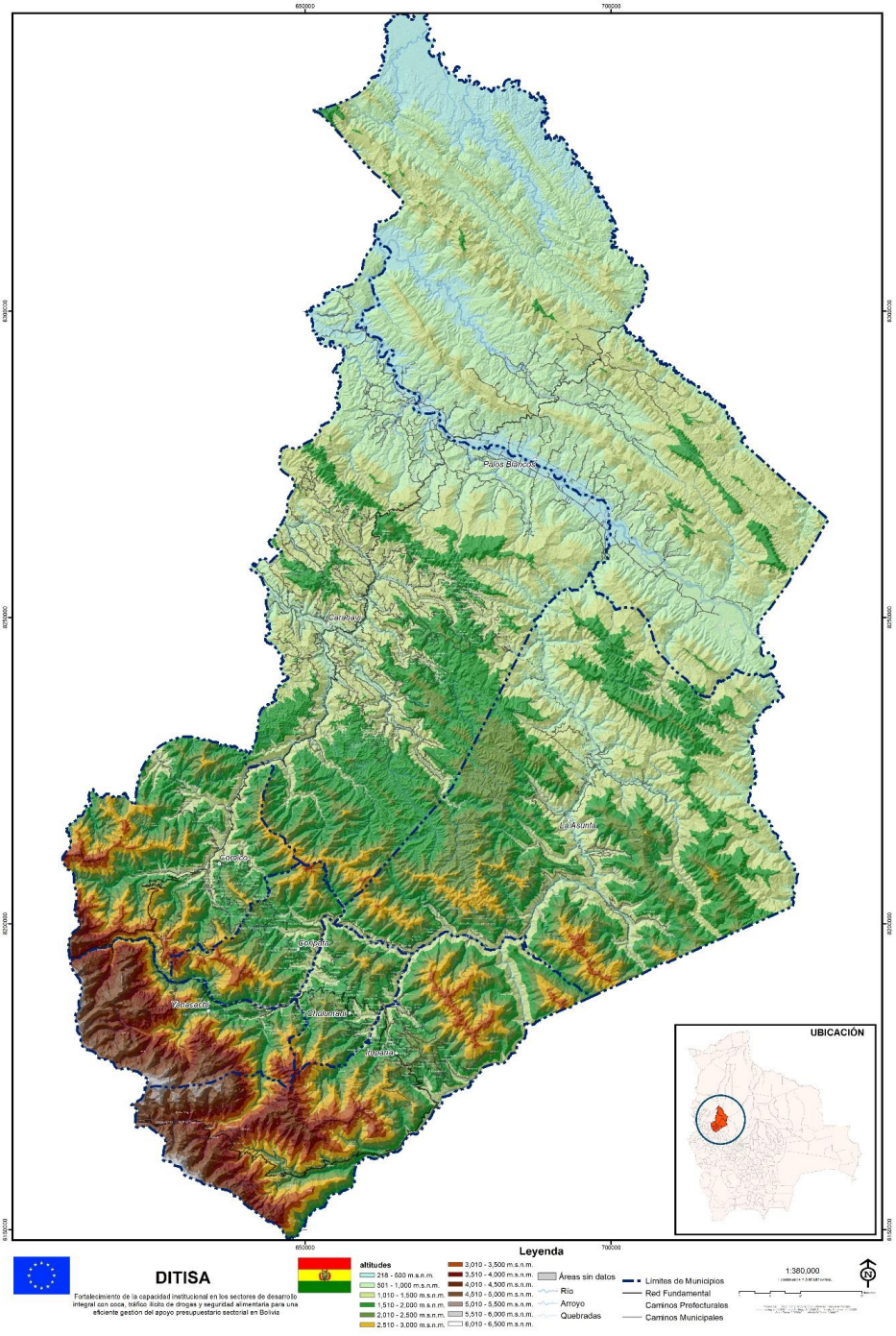
El rango de precipitación media anual es de 397 a 2500 mm año$^{-1}$; ésta última se halla próxima al límite entre La Paz y Beni. El rango de temperatura media anual en YLP es de 10 C a 15 °C., tal como se presentan en los mapas 5 y 6 (Anexo 2).

**Mapa** 1.Altitudes en el TCbba (m.s.n.m.)




*Fuente: propia, sobre Digital Elevation Model - ALOS PALSAR DEM 12,5 m*

**Mapa** 2. Altitudes en YLP (m.s.n.m.)




*Fuente: propia, sobre Digital Elevation Model - ALOS PALSAR DEM 12,5 m*

# 3. METODOLOGIA DE TRABAJO

En este trabajo se recopiló información de varios estudios de suelos realizados en el Trópico de Cochabamba y en Yungas de La Paz, se los reunió en una base de datos georeferenciada con el mismo formato de manera individual en coordenadas UTM WGS 84. El área de estudio correspondió a la zona colonizada del Trópico de Cochabamba, conocida como Área de Bosque de Uso Múltiple (BUM), cubriendo un área aproximada de 550.00 ha. Mientras que el área de estudio de Yungas de La Paz correspondió a 8 municipios, conocida como Nor y Sud Yungas, cubriendo un área aproximada de 1.201.011.500 ha (12.010,115 $km^2$).

La caracterización físico-química de los suelos del TCbba se realizó a partir los análisis de 1700 datos de perfiles reportados por PRODES (1980), Monteith (1995), Soto (1996, 1997, 2000), ZONISIC (2000), Quiroga (2002), A. Ferrufino (2001) y Ferrufino y Meneses (2004). Estos últimos hicieron una recopilación de los análisis físico-químicos de suelos y generaron una base de datos que fue analizada estadísticamente. En este estudio se incluyó información de UNODC (2009). La caracterización físico-química de los suelos de YLP se realizó a partir de los análisis de 480 datos de perfiles reportados por BID AMAZONIA (1999), ECOTOP (2008), ACDIVOCA (1998) y UNODC (2009 y 2011).

Para la representación de los resultados físico-químicos de estas dos regiones se generaron mapas de cada uno de los elementos que se disponen en las bases de datos. Estos mapas incluyen los valores calculados en cada región a una escala aproximada de 1:150.000, para ello se utilizó los promedios ponderados de dichas características que como resultado dio las profundidades de 0 - 20 cm y 20 – 40 cm del suelo.

Las características químicas incluidas en los mapas fueron el nivel de pH, los contenidos de cationes intercambiables: potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg), aluminio (Al); la capacidad de intercambio catiónica efectiva (CICE), la saturación de aluminio, saturación de bases y el contenido de fósforo (P). Dentro las características físicas se incluyeron la textura.

**Cuadro N° 1:** Niveles de reacción del suelo

| Reacción del suelo | Valor |
|---|---|
| Fuertemente alcalino | > 8.0 |
| Moderadamente alcalino | 7.6-8.0 |
| Débilmente alcalino | 7.0-7.5 |
| Neutro | 6.6-7.0 |
| Débilmente ácido | 6.0-6.5 |
| Moderadamente ácido | 5.3-5.9 |
| Fuertemente ácido | 4.5-5.2 |
| Muy fuertemente ácido | < 4.5 |

**Fuente:** Benites 1986 e Instituto Agronómico de Campinas, Brasil (IAC, 1997), Guy Sela 2015

Para la calificación del nivel de nutrimentos u otras características químicas en ambas zonas se utilizaron los parámetros sugeridos por Benites 1986, Instituto Agronómico de Campinas, Brasil (IAC, 1997), Guy Sela 2015 (Cuadro N° 1).

**Cuadro N° 2:** Límites de interpretación de los niveles de distintos nutrimentos o características químicas de suelos para cultivos tropicales

| Elemento/Característica | Nivel | | | |
|---|---|---|---|---|
| | Muy bajo | Bajo | Medio | Alto |
| Materia orgánica (%) | < 2 | 2,1 - 3,0 | 3,1 - 4,0 | > 4,0 |
| Fósforo (mg $kg^{-1}$) | < 5 | 5 - 10 | 10 - 25 | > 25 |
| Calcio (cmol $_{(+)}$ $kg^{-1}$) | < 5 | 6 - 8 | 9 - 10 | > 10 |
| Magnesio (cmol $_{(+)}$ $kg^{-1}$) | < 0,5 | 0,51 - 1,0 | 1,1 - 1,5 | > 1,5 |
| Potasio (cmol $_{(+)}$ $kg^{-1}$) | < 0,45 | 0,46 - 0,7 | 0,71 - 2,0 | > 2,0 |
| Saturación de Aluminio (%) | < 20 | 21 - 40 | 41 - 60 | 61 - 80 |
| Saturación de bases (%) | < 20 | 21 - 40 | 41 - 60 | 61 - 80 |

**Fuente:** Benites 1986 e Instituto Agronómico de Campinas, Brasil (IAC, 1997), Guy Sela 2015

Aplicando la metodología de promedios ponderados a todas las muestras recopiladas en cada una de las zonas de estudio (TCbba y YLP)., se llegó a determinar dos profundidades: una primera capa de 0 a 20 cm y la segunda capa de 20.01 a 40cm. Estas profundidades coinciden con el hecho que la mayoría de los cultivos que se manejan en ambas zonas, las raíces penetran hasta 20 cm; sin embargo, también existen cultivos en los que sus raíces penetran hasta 40 cm.

Para este trabajo en el TCbba se recopilaron más de 1700 muestras distribuidas en varios horizontes del área BUM, después de realizar los análisis estadísticos correspondientes se eliminaron las muestras con valores extremos (máximos y mínimos) que alteraban el promedio normal del conjunto de muestras. Este proceso permitió establecer 1430 muestras depuradas, de las cuales 828 muestras corresponden a la capa de 0 a 20 cm y 602 muestras a la capa de 20.1 a 40 cm de profundidad.

En el caso de YLP se recopilaron más de 630 muestras distribuidas en varios horizontes, similar proceso de análisis estadístico fue realizado al total de muestras inicial, dando como resultado 480 muestras ya depuradas, de las cuales 267 muestras corresponden a la capa de 0 a 20 cm y 213 muestras para la capa de 20.1 a 40 cm de profundidad.

## 3.1. Fertilidad de suelos

Para establecer la fertilidad de suelos de estas dos regiones se presentan las características presentes de texturas, pH, materia orgánica (%), fósforo (mg $kg^{-1}$), calcio (cmol (+) $kg^{-1}$), magnesio (cmol (+) $kg^{-1}$), potasio (cmol (+) $kg^{-1}$), saturación de Al (%) y saturación de bases (%).

Para la presentación de los niveles de los elementos arriba descritos se utilizó e cuadro N° 1 que muestra el nivel en el que se encontraron cada uno de ellos. Finalmente, con el uso de SIG a través

de la geoestadística se elaboraron los mapas correspondientes a las profundidades 0 – 20 cm y 20 – 40 cm, para las dos zonas de estudio.

## 3.2. Elaboración de mapas en ArcGis en base a modelo geoestadístico

**Análisis**

Los procesos anteriores se representan mediante un modelo espacial que, a través de entradas, funciones y salidas, explica el análisis metodológico realizado. El modelo espacial, posee tres grandes elementos a saber:

- Componente de entrada de datos
- Componente de funciones
- Componente de salidas

**Entrada de datos**

Las entradas son las variables primarias y constituyen el insumo principal para el análisis. La base de datos que almacena las características atributivas (tabla con resultados químicos y texturales de cada muestra) y la información espacial, representada por puntos en un formato shapefile[1] ESRI con el área de interés, son la fuente primaria para desarrollar este modelo.
Adicionalmente se ha recopilado información ALOS PALSAR DEM[2]. Permitiendo obtener mapas de pendientes, altitudes. Así como información sobre Temperaturas[3] y Precipitación[4].

**Funciones**

Las funciones sirven para encontrar información derivada, e involucran al análisis exploratorio y estructural, así como la interpolación para determinar la distribución espacial de la calidad de los componentes.

**Análisis exploratorio**

El análisis exploratorio consistió en identificar inicialmente la normalidad, tendencias y valores extremos de los datos para cada variable. Las medidas de tendencia central y las medidas de dispersión, el Nº de observaciones, Nº de valores perdidos, Mínimo, Máximo, Frec. del mínimo, Frec. del máximo, 1° Cuartil, Mediana, 3° Cuartil, Media, Varianza (n-1), Desviación típica (n-1). Tabla 2. Estadísticos descriptivos (Datos cuantitativos): Región Trópico de Cochabamba.

[1] Archivo donde se almacena la información geométrica de los objetos
[2] Digital Elevatión Model, Advanced Land Observation Satellite con una información espacial de 12.5 mts. re muestreados a nivel mundial y de manera multitemporal, con una periodicidad de 46 días, aunque un periodo de mapeo histórico comprendido entre 2006 y 2011.
[3] Estudio del Balance Hídrico y el estudio de Cuencas Hidrográficas de Bolivia. Elaborado por la Unidad de Ordenamiento Territorial del Ministerio de Planificación del Desarrollo, en el año 2002.
[4] En base al empleo de isoyetas, brindando un panorama del comportamiento de precipitación en Bolivia, elaborado por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) con datos actualizados a mayo de 2014.

El análisis exploratorio de datos (A.E.D.) es un conjunto de técnicas estadísticas cuya finalidad es entender la tipología de los datos y de las relaciones existentes entre las variables analizadas.

A.E.D. proporciona métodos sistemáticos sencillos para organizar y preparar los datos, detectar fallas en el diseño y recolección de los mismos, tratamiento y evaluación de datos ausentes (missing), identificación de los casos atípicos (outliers) y normalidad de los datos.

Se realizó el análisis por separado, para cada uno de los datos (pH, Textura, Arena, Limo, Arcilla, Al, Ca, Mg, Na, K, CICE, MO, P, SatAl, Sb). Se siguió el procedimiento determinado para este análisis, vale decir se examinó gráficamente la naturaleza de las variables individuales, donde el análisis incluye el análisis descriptivo numérico que permita cuantificar algunos aspectos gráficos de los datos. Para luego reconocer gráficamente las variables del análisis descriptivo cuantitativo y el grado de interrelación existente entre ellas, se evalúo la normalidad de los datos y se identificó los posibles casos atípicos.

**Cuadro N° 3:** Estadísticas descriptivas (datos cuantitativos): Región Trópico de Cochabamba

| Estadístico | PH | Textura | Arena | Limo | Arcilla | Al | Ca | Mg | Na | K | CICE | MO | P | SatAl | SB |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| No. de observaciones | 1430 | 1430 | 1430 | 1430 | 1430 | 1430 | 1430 | 1430 | 1430 | 1430 | 1430 | 1430 | 1430 | 1430 | 1430 |
| No. de valores perdidos | 49 | 221 | 49 | 49 | 49 | 29 | 1 | 0 | 17 | 2 | 0 | 320 | 276 | 38 | 0 |
| Mínimo | 2.500 | 1.000 | 1.000 | 0.810 | 1.830 | 0.040 | 0.010 | 0.010 | 0.008 | 0.010 | 0.480 | 0.080 | 0.110 | 0.500 | 1.400 |
| Máximo | 7.820 | 12.000 | 97.360 | 85.000 | 85.000 | 13.800 | 10.995 | 7.155 | 1.370 | 1.250 | 20.550 | 8.280 | 20.868 | 96.896 | 100.000 |
| Frec. del mínimo | 1 | 158 | 42 | 1 | 1 | 1 | 1 | 3 | 1 | 1 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 |
| Frec. del máximo | 1 | 75 | 1 | 1 | 1 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 26 |
| 1° Cuartil | 4.400 | 2.000 | 15.040 | 29.200 | 14.720 | 1.800 | 0.400 | 0.200 | 0.050 | 0.096 | 4.594 | 1.280 | 1.475 | 40.148 | 17.205 |
| Mediana | 4.700 | 3.000 | 31.000 | 40.200 | 23.000 | 3.366 | 1.000 | 0.547 | 0.110 | 0.146 | 6.108 | 2.055 | 3.000 | 65.305 | 33.725 |
| 3° Cuartil | 5.100 | 5.250 | 51.600 | 53.000 | 32.340 | 5.060 | 2.300 | 1.300 | 0.180 | 0.224 | 8.491 | 3.197 | 6.800 | 81.000 | 60.889 |
| Media | 4.804 | 4.403 | 34.159 | 41.141 | 24.672 | 3.774 | 1.650 | 0.913 | 0.157 | 0.182 | 6.719 | 2.403 | 4.896 | 58.901 | 41.004 |
| Varianza (n-1) | 0.511 | 10.062 | 504.693 | 262.772 | 165.749 | 6.864 | 3.168 | 0.978 | 0.025 | 0.018 | 9.073 | 2.261 | 22.658 | 699.839 | 790.098 |
| Desviación típica (n-1) | 0.715 | 3.172 | 22.465 | 16.210 | 12.874 | 2.620 | 1.780 | 0.989 | 0.159 | 0.135 | 3.012 | 1.504 | 4.760 | 26.454 | 28.109 |

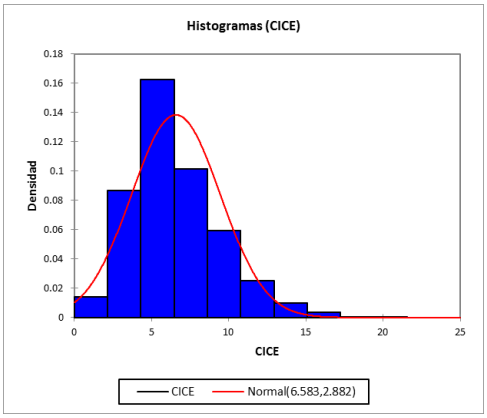
**Cuadro N° 4:** Estadísticas descriptivas (datos cuantitativos): Región Yungas de La Paz

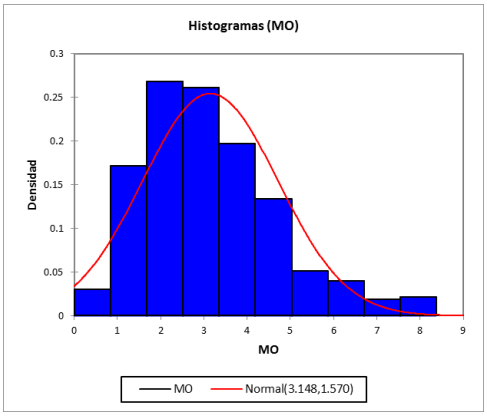
| Estadístico | PH | Textura | Arena | Limo | Arcilla | Al | Ca | Mg | Na | K | CICE | MO | P | SatAl | SB |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| No. de observaciones | 480 | 480 | 480 | 480 | 480 | 480 | 480 | 480 | 480 | 480 | 480 | 480 | 480 | 480 | 480 |
| No. de valores perdidos | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Mínimo | 2.980 | 1.000 | 1.000 | 3.000 | 10.880 | 0.010 | 0.300 | 0.100 | 0.020 | 0.100 | 1.700 | 0.170 | 0.100 | 0.040 | 8.194 |
| Máximo | 7.920 | 11.000 | 73.000 | 65.000 | 76.000 | 11.540 | 22.990 | 9.200 | 1.710 | 2.400 | 30.300 | 12.860 | 57.720 | 89.765 | 99.900 |
| Frec. del mínimo | 1 | 46 | 1 | 1 | 1 | 77 | 10 | 2 | 5 | 29 | 1 | 1 | 3 | 1 | 2 |
| Frec. del máximo | 1 | 147 | 1 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 1° Cuartil | 4.508 | 4.000 | 21.000 | 25.150 | 26.785 | 0.070 | 2.000 | 1.000 | 0.130 | 0.183 | 7.270 | 1.540 | 1.400 | 0.462 | 51.520 |
| Mediana | 5.265 | 5.000 | 34.750 | 31.000 | 33.600 | 0.150 | 4.300 | 1.760 | 0.200 | 0.290 | 11.390 | 2.919 | 2.750 | 2.266 | 84.783 |
| 3° Cuartil | 5.893 | 11.000 | 44.000 | 37.488 | 42.000 | 1.323 | 8.213 | 3.000 | 0.557 | 0.551 | 15.778 | 4.755 | 5.830 | 25.256 | 98.538 |
| Media | 5.220 | 6.338 | 33.293 | 31.848 | 34.771 | 1.090 | 5.719 | 2.120 | 0.355 | 0.435 | 11.813 | 3.544 | 6.352 | 15.441 | 72.995 |
| Varianza (n-1) | 1.020 | 12.600 | 225.384 | 101.368 | 137.417 | 3.872 | 21.985 | 2.352 | 0.111 | 0.152 | 33.443 | 6.856 | 92.386 | 563.039 | 826.925 |
| Desviación típica (n-1) | 1.010 | 3.550 | 15.013 | 10.068 | 11.723 | 1.968 | 4.689 | 1.534 | 0.333 | 0.390 | 5.783 | 2.618 | 9.612 | 23.728 | 28.756 |

El gráfico de Box plot, es un gráfico que suministra información sobre los valores mínimo y máximo, los cuartiles Q1, Q2 o mediana y Q3, y sobre la existencia de valores atípicos y la simetría de la distribución. En este caso nos muestra la localización del centro de los datos y podemos apreciar en esta representación sí existen datos extremos, sin embargo, la consistencia del universo es

razonable. Se encontraron algunos datos atípicos (outliers) y dispersos que estaban fuera del límite superior, los que tuvieron que ser eliminados como datos perdidos (ver gráficas en el Anexo 1).

Una vez retirados los valores extremos por defecto o por exceso, la población muestral final quedó en 1430. También se puede apreciar estos datos en los demás gráficos (P-P Plot y Q-Q Plot). (La información completa de todas las variables en las capas de 0 a 20 y 20.1 a 40).




El cumplimiento de las consideraciones anteriores establece que no existen problemas de estacionariedad (su variación no cambia en función al tiempo) ni normalidad, permitiendo continuar con el tratamiento geoestadístico (ver gráficas arriba).

## Análisis estructural

El análisis estructural busca cuantificar la correlación espacial, el cálculo del semivariograma experimental, el análisis e interpretación del semivariograma y ajuste del modelo teórico al experimental.

Para medir la dependencia lineal entre dos variables con respecto a la medida de la variable, así como a su posición espacial, se calcularon tanto el coeficiente de correlación como el coeficiente de correlación de Spearman (rho). En el Cuadro 5, se muestran los resultados de las correlaciones obtenidos.

**Cuadro N° 5:** Matriz de correlaciones (Spearman)

| Variables | PH | Textura | Arena | Limo | Arcilla | Al | Ca | Mg | Na | K | CICE | MO | P | SatAl | SB |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| PH | **1** | 0.080 | **-0.173** | **0.166** | **0.104** | **-0.287** | **0.367** | **0.392** | 0.054 | 0.043 | **0.205** | **-0.125** | -0.081 | **-0.403** | **0.403** |
| Textura | 0.080 | **1** | **-0.263** | **-0.140** | **0.519** | **0.184** | -0.076 | 0.032 | -0.008 | **-0.109** | **0.139** | 0.064 | 0.002 | **0.124** | **-0.124** |
| Arena | **-0.173** | **-0.263** | **1** | **-0.842** | **-0.798** | **-0.368** | -0.082 | **-0.240** | **0.170** | -0.010 | **-0.448** | 0.071 | **-0.194** | **-0.111** | **0.111** |
| Limo | **0.166** | **-0.140** | **-0.842** | **1** | **0.439** | **0.235** | **0.123** | **0.212** | **-0.152** | 0.039 | **0.347** | **-0.140** | **0.231** | 0.024 | -0.024 |
| Arcilla | **0.104** | **0.519** | **-0.798** | **0.439** | **1** | **0.437** | -0.013 | **0.108** | **-0.173** | -0.056 | **0.393** | 0.027 | 0.069 | **0.236** | **-0.236** |
| Al | **-0.287** | **0.184** | **-0.368** | **0.235** | **0.437** | **1** | **-0.409** | **-0.239** | -0.079 | -0.036 | **0.455** | 0.031 | -0.027 | **0.735** | **-0.735** |
| Ca | **0.367** | -0.076 | -0.082 | **0.123** | -0.013 | **-0.409** | **1** | **0.828** | **0.325** | **0.317** | **0.484** | **0.261** | 0.033 | **-0.869** | **0.869** |
| Mg | **0.392** | 0.032 | **-0.240** | **0.212** | **0.108** | **-0.239** | **0.828** | **1** | **0.330** | **0.380** | **0.594** | **0.260** | -0.026 | **-0.751** | **0.751** |
| Na | 0.054 | -0.008 | **0.170** | **-0.152** | **-0.173** | -0.079 | **0.325** | **0.330** | **1** | **0.359** | **0.303** | **0.382** | **-0.203** | **-0.335** | **0.335** |
| K | 0.043 | **-0.109** | -0.010 | 0.039 | -0.056 | -0.036 | **0.317** | **0.380** | **0.359** | **1** | **0.314** | **0.315** | -0.031 | **-0.331** | **0.331** |
| CICE | **0.205** | **0.139** | **-0.448** | **0.347** | **0.393** | **0.455** | **0.484** | **0.594** | **0.303** | **0.314** | **1** | **0.218** | -0.038 | **-0.137** | **0.137** |
| MO | **-0.125** | 0.064 | 0.071 | **-0.140** | 0.027 | 0.031 | **0.261** | **0.260** | **0.382** | **0.315** | **0.218** | **1** | -0.063 | **-0.190** | **0.190** |
| P | -0.081 | 0.002 | **-0.194** | **0.231** | 0.069 | -0.027 | 0.033 | -0.026 | **-0.203** | -0.031 | -0.038 | -0.063 | **1** | 0.008 | -0.008 |
| SatAl | **-0.403** | **0.124** | **-0.111** | 0.024 | **0.236** | **0.735** | **-0.869** | **-0.751** | **-0.335** | **-0.331** | **-0.137** | **-0.190** | 0.008 | **1** | **-1.000** |
| SB | **0.403** | **-0.124** | **0.111** | -0.024 | **-0.236** | **-0.735** | **0.869** | **0.751** | **0.335** | **0.331** | **0.137** | **0.190** | -0.008 | **-1.000** | **1** |

*Los valores en negrita son diferentes de 0 con un nivel de significación alfa=0.05*

Los valores positivos y negativos de los coeficientes indican que existen correlaciones tanto positivas como negativas, denotando que, a mayor contenido de una variable aumenta la también la otra y a mayor contenido de una disminuye la otra, como se puede apreciar en saturación de aluminio con pH, Al, Ca, SB y Mg de igual manera con saturación de bases con las mismas variables, pero a la inversa. Lo mismo pasa con CICE con las variables Al, Ca y Mg por lo que estas relaciones son de dependencia. El resto tiene correlaciones mínimas a bajas mostrando una correlación que indica que estas variables son independientes.

**Modelo Geoestadístico - Interpolación o estimación espacial**

Kriging es un procedimiento geoestadístico avanzado que genera una superficie estimada a partir de un conjunto de puntos dispersados con valores z. A diferencia de otros métodos de interpolación del conjunto de herramientas Interpolación, utilizar la herramienta Kriging de forma efectiva implica una investigación interactiva del comportamiento espacial del fenómeno representado por los valores z antes de seleccionar el mejor método de estimación para generar la superficie de salida.

Las herramientas de interpolación “IDW” (distancia inversa ponderada) y Spline se conocen como métodos determinísticos de interpolación porque están basados directamente en los valores medidos o en fórmulas matemáticas específicas que determinan la suavidad de la superficie resultante. Hay una segunda familia de métodos de interpolación que consta de métodos geoestadísticos, como Kriging, que están basados en modelos estadísticos que incluyen la autocorrelación, es decir, las relaciones estadísticas entre los puntos medidos. Gracias a esto, las técnicas de estadística geográfica no sólo tienen la capacidad de producir una superficie de predicción, sino que también proporcionan alguna medida de certeza o precisión de las predicciones.

Kriging presupone que la distancia o la dirección entre los puntos de muestra reflejan una correlación espacial que puede utilizarse para explicar la variación en la superficie. La herramienta Kriging ajusta una función matemática a un número específico de puntos o a todos los puntos dentro de un radio especificado, para determinar el valor de salida para cada ubicación. Kriging es un proceso que tiene varios pasos, entre los que se incluyen, el análisis estadístico exploratorio de los datos, el modelado de variogramas, la creación de la superficie y (opcionalmente) la exploración de la superficie de varianza. Este método es más adecuado cuando se sabe que hay una influencia direccional o de la distancia correlacionada espacialmente en los datos. Se utiliza a menudo en la ciencia del suelo y la geología.

**La fórmula de Kriging**

El método Kriging es similar al de IDW en que pondera los valores medidos circundantes para calcular una predicción de una ubicación sin mediciones. La fórmula general para ambos interpoladores se forma como una suma ponderada de los datos:

$$\hat{Z}(s_0) = \sum_{i=1}^{N} \lambda_i Z(s_i)$$

donde:

Z(si) = el valor medido en la ubicación n.º i
λi = un peso desconocido para el valor medido en la ubicación n.º i
s0 = la ubicación de la predicción
N = el número de valores medidos

En IDW, el peso, λi, depende solamente de la distancia a la ubicación de la predicción. Sin embargo, con el método Kriging, las ponderaciones están basadas no sólo en la distancia entre los puntos medidos y la ubicación de la predicción, sino también en la disposición espacial general de los puntos medidos. Para utilizar la disposición espacial en las ponderaciones, la correlación espacial debe estar cuantificada. Por tanto, en Kriging ordinario, el peso, λi, depende de un modelo ajustado a los puntos medidos, la distancia a la ubicación de la predicción y las relaciones espaciales entre los valores medidos alrededor de la ubicación de la predicción.

**Creación de un mapa de la superficie de predicción con el método Kriging**

Para llevar a cabo una predicción con el método de interpolación de Kriging, es necesario realizar dos tareas:

- Descubrir las reglas de dependencia.
- Realizar las predicciones.

A fin de completar estas dos tareas, Kriging atraviesa un proceso de dos pasos:

1. Crea los variogramas y las funciones de covarianza para calcular los valores de dependencia estadística (denominada auto correlación espacial) que dependen del modelo de auto correlación (ajustar un modelo).
2. Prevé los valores desconocidos (efectuar una predicción).

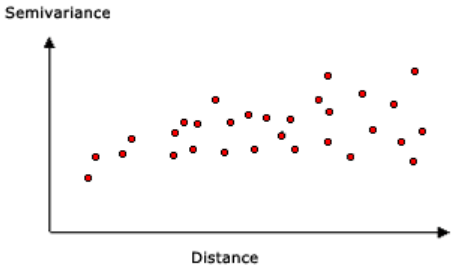
Es a causa de estas dos tareas diferenciadas que se ha dicho que el Kriging utiliza los datos dos veces: la primera vez para estimar la auto correlación espacial de los datos y la segunda para hacer predicciones.

**Variografía**

El ajuste de un modelo, o modelado espacial, también se conoce como análisis estructural o variografía. En el modelado espacial de la estructura de los puntos medidos, puede comenzar con un gráfico del semivariograma empírico, computado con la siguiente ecuación para todos los pares de ubicaciones separados por una distancia h:
Semivariogram (distanceh) = 0.5 * average((valuei – valuej)2).
La fórmula implica calcular la diferencia cuadrada entre los valores de las ubicaciones asociadas.

En la imagen a continuación se muestra la asociación de un punto (en color rojo) con todas las demás ubicaciones medidas. Este proceso continúa con cada punto medido.

Cálculo de la diferencia cuadrada entre las ubicaciones asociadas
A menudo, cada par de ubicaciones tiene una distancia única y suele haber varios pares de puntos. La diagramación de todos los pares rápidamente se vuelve imposible de administrar. En lugar de diagramar cada par, los pares se agrupan en bins de intervalo. Por ejemplo, calcule la semivarianza promedio de todos los pares de puntos que están a más de 40 metros de distancia, pero a menos de 50 metros. El semivariograma empírico es un gráfico de los valores de semivariograma promediados en el eje Y, y la distancia (o intervalo) en el eje X (consulte el diagrama a continuación).




Ejemplo de gráfico de semivariograma empírico

La autocorrelación espacial cuantifica un principio básico de la geografía: las cosas más cercanas son más parecidas que las cosas más separadas entre sí. Entonces, los pares de ubicaciones que están más cerca (extremo izquierdo del eje X de la nube de semivariograma) deberían tener valores más similares (parte inferior en el eje Y de la nube de semivariograma). A medida que los pares de ubicaciones estén más separados entre sí (hacia la derecha en el eje X de la nube de semivariograma), deberían ser más distintos y tener una diferencia cuadrada más grande (hacia arriba en el eje Y de la nube de semivariograma).

**Ajustar un modelo al semivariograma empírico.**

El moldeado del semivariograma es un paso clave entre la descripción espacial y la predicción espacial. La aplicación principal de Kriging es la predicción de los valores de atributo en las ubicaciones que no fueron muestreadas. El semivariograma empírico proporciona información sobre la autocorrelación espacial de los datasets. Sin embargo, no suministra información para todas las direcciones y distancias posibles. Por esta razón, y para asegurar que las predicciones de Kriging tengan varianzas de Kriging positivas, es necesario ajustar un modelo (es decir, una función o curva continua) al semivariograma empírico. En resumen, esto es similar al análisis de regresión, en el que se ajusta una línea o curva continua a los puntos de datos.

**Modelos de semivariograma**

La herramienta Kriging proporciona las siguientes funciones entre las que se puede escoger para modelar el semivariograma empírico: Circular, Esférico, Exponencial, Gaussiano y Lineal.

El modelo seleccionado influye en la predicción de los valores desconocidos, en particular cuando la forma de la curva cercana al origen difiere significativamente. Cuanto más pronunciada sea la curva cercana al origen, más influirán los vecinos más cercanos en la predicción. Como resultado, la superficie de salida será menos suave. Cada modelo está diseñado para ajustarse a diferentes tipos de fenómenos de forma más precisa.

**Comprender un semivariograma: rango, meseta y nugget**

Como se indicó previamente, el semivariograma muestra la autocorrelación espacial de los puntos de muestra medidos. Tal como lo expresa un principio básico de la geografía (las cosas más cercanas son más parecidas), los puntos medidos que están cerca por lo general tendrán una diferencia cuadrada menor que la de aquellos que están más distanciados. Una vez diagramados todos los pares de ubicaciones después de haber sido colocados en un bin, se ajusta un modelo para estas ubicaciones. El rango, la meseta y el nugget se utilizan, generalmente, para describir estos modelos.

**Realizar una predicción**

Después de haber descubierto la dependencia o autocorrelación en sus datos y de haber terminado con el primer uso de sus datos —utilizando la información espacial en los datos para computar distancias y modelar la autocorrelación espacial—, puede hacer una predicción utilizando el modelo ajustado. Después de esto, se aparta el semivariograma empírico.

Ahora puede utilizar los datos para realizar predicciones. Al igual que la interpolación de IDW, Kriging forma ponderaciones a partir de los valores medidos circundantes para prever ubicaciones sin mediciones. Asimismo, los valores medidos que estén más cerca de las ubicaciones sin mediciones tienen la mayor influencia. Sin embargo, las ponderaciones de Kriging para los puntos medidos circundantes son más sofisticadas que las del método IDW.
Este último utiliza un algoritmo simple basado en la distancia, mientras que las ponderaciones de Kriging provienen de un semivariograma que se desarrolló observando la naturaleza espacial de los datos. Para crear una superficie continua del fenómeno, se realizan predicciones para cada ubicación, o centro de celda, en el área de estudio basadas en el semivariograma y la disposición espacial de los valores medidos que son cercanos.

**Gráficos de semivariograma**

Kriging es un procedimiento complejo que requiere de un mayor conocimiento sobre las estadísticas espaciales que lo que se puede abarcar en este tema. Antes de utilizar este método, debe comprender profundamente sus principios básicos y evaluar la adecuación de sus datos para realizar un modelo con esta técnica.

Kriging se basa en una teoría de variables regionalizadas que presupone que la variación espacial en el fenómeno representado por los valores z es estadísticamente homogénea a lo largo de toda la superficie (por ej., se puede observar el mismo patrón de variación en todas las ubicaciones sobre

la superficie). Esta hipótesis de homogeneidad espacial es fundamental para la teoría de variables regionalizadas.

**Kriging Bayesiano Empírico**

El Kriging Bayesiano Empírico (EBK), difiere de los métodos de Kriging clásicos al considerar el error introducido al estimar el modelo de semivariograma. Esto se hace estimando, y luego utilizando, muchos modelos de semivariogramas en lugar de un solo semivariograma. Este proceso conlleva los siguientes pasos:

- Un modelo de semivariograma se estima a partir de los datos.
- Usando este semivariograma, se simula un nuevo valor en cada una de las ubicaciones de datos de entrada.
- Un nuevo modelo de semivariograma se estima a partir de los datos simulados. Luego se calcula una ponderación para este semivariograma utilizando la regla de Bayes, que muestra la probabilidad de que los datos observados puedan generarse a partir del semivariograma.

Con el modelo EBK, en el caso de grandes conjuntos de datos, los datos de entrada se dividen primero en subconjuntos de un tamaño específico que pueden o no superponerse. En cada subconjunto, se producen distribuciones de los semivariogramas. Luego, para cada ubicación, se genera una predicción utilizando una distribución de semivariogramas de uno o más subconjuntos. Cada subconjunto de datos utiliza modelos definidos por valores cercanos, en lugar de estar influenciados por factores muy lejanos, pero cuando se combinan todos los modelos, se crea una imagen completa.

Aunque el modelo EBK predeterminado hace que la distribución de datos de los residuos se acerque más a una distribución gaussiana al eliminar la tendencia local, la distribución de los residuos aún puede ser no gaussiana. En este caso, un modelo con la opción de transformación de datos puede producir mejores predicciones. En Geostatistical Analyst, esto se puede identificar utilizando los diagnósticos del modelo.
El trazado de las distribuciones de contaminación del suelo a 137 Cs en varias áreas de la extensión de los datos muestra que son claramente no gaussianas y difieren según la región, como se muestra en la Figura 4a. Por lo tanto, la distribución de datos local variable claramente forma una característica esencial del modelo de interpolación óptimo. EBK ofrece una opción para transformar el proceso observado en un proceso gaussiano, utilizando la función de transformación de datos estimada como se ilustra en la Figura 4b.

EBK con la opción de transformación de datos estima la distribución de datos muchas veces utilizando el siguiente algoritmo:

1. Los datos se transforman en una distribución gaussiana y se estima un modelo de semivariograma a partir de los datos.

2. Usando este semivariograma, los nuevos datos se simulan incondicionalmente y luego se transforman en cada una de las ubicaciones de los datos de entrada.
3. Los nuevos datos se transforman y se estima un nuevo modelo de semivariograma a partir de los datos simulados.

Los pasos 2 y 3 se repiten un número específico de veces. Cada repetición produce una nueva transformación y semivariograma.

Los pesos para los semivariogramas se calculan utilizando la regla de Bayes.
Las predicciones y los errores estándar de predicción se realizan utilizando ponderaciones y luego se transforman con corrección de sesgo.

# 4. RESULTADOS ALCANZADOS EN LA MISIÓN

## 4.1. Fertilidad y características físicas y químicas de suelos

### 4.1.1. Características generales de los suelos del TCbba

Ferrufino y Meneses (2004) caracterizaron a los suelos de TCbba como de origen aluvial y residual. Los suelos aluviales del Pleistoceno ocupan las llanuras de inundación y las terrazas bajas, mientras que los suelos residuales formados in situ, ocupan las terrazas altas y las colinas (Alvarado, 1986). Estos suelos presentaron variabilidad en las características físicas y químicas, y esta variación puede ocurrir en distancias cortas. Las diferencias se deben mayormente a la posición fisiográfica, que determina el tiempo de exposición a la meteorización, y las diferencias en material parental (Monteith, 1995).

Asimismo, Ferrufino y Meneses (2004) mencionaron en el estudio realizado anteriormente que las características químicas de las llanuras aluviales están fuertemente influenciadas por las características químicas de los sedimentos que arrastran los ríos que las inundan, o que las inundaron en el pasado, por lo que los suelos de las llanuras aluviales reflejan cercanamente las propiedades de sus materiales parentales sedimentarios. Las terrazas medias y altas tienen suelos más intemperizados, por que estuvieron expuestos por un mayor tiempo a factores de formación de suelo como clima, organismos y otros. Los principales órdenes de suelo presentes en el TCbba son Entisoles, ubicados generalmente en las llanuras aluviales y terrazas bajas, Inceptisoles en terrazas medias y Ultisoles en terrazas altas y colinas.

#### 4.1.1.1. Características físicas

**a) Textura**

La caracterización de un suelo es esencial para determinar su apropiado manejo y realizar planificación agrícola. La textura indica el contenido de partículas de arena, limo y arcilla en el suelo. Así mismo, influye en otras propiedades como la densidad aparente, la porosidad y, por lo tanto, el movimiento y el almacenamiento de fluidos (agua y aire) en el suelo (Lacasta et al., 2005)

Las texturas de los suelos de TCbba en la primera capa (0 – 20 cm) predominantemente presentó un promedio de arena de 34%, con un rango entre 1 y 74%. El contenido promedio de limo fue de 42% y los suelos presentaron un rango entre 3 a 76%. Finalmente, el contenido promedio de arcilla fue de 24% con un rango entre 3 y 61%. Consecuentemente, la textura predominante fue la franca, tal como se muestra en el mapa 7 (Anexo 1).

En la segunda capa (20 – 40 cm) esta relación muestra que la mayoría de los suelos presentó un contenido promedio de arena de 33% con un rango entre 1 y 73%. El contenido promedio de limo fue de 32% con un rango entre 1 a 75% y el contenido promedio de arcilla fue de 35% con un rango entre 3 y 60%. Consecuentemente, la textura de esta capa predominante fue la franca seguida de textura franca con predominancia de arcilla, tal como se muestra en el mapa 8 (Anexo 1).

Estas condiciones de textura de los resultados analizados, nos muestran que los suelos del TCbba varían de francos a franco arcillosos (suelos de textura media a suelos de texturas moderadamente finas a finas) predominantemente. Sin embargo, existen también suelos con textura arenosa (gruesa) y arcillo limosa (fina) en los que se manejan los cultivos en el TCbba.

Sin embargo, la textura de los suelos, originan estructuras diferentes en cuanto a porosidad y agregación, que dan lugar a posibles problemas de: endurecimiento, aireación, capacidad de retención hídrica, permeabilidad, etc. (Lacasta y Meco 2005).

**b) Drenaje**

El drenaje, se constituye en un factor determinante cuando las condiciones en general no satisfacen los requerimientos de los cultivos, especialmente aquellos suelos que presentan condiciones de imperfectamente drenados porque los cultivos banano, café, cítricos palmito y piña son altamente sensibles al mal drenaje.

De acuerdo a los estudios de suelos realizados en las subregiones del Tcbba, los tipos de drenaje identificados en los complejos de orillares predominantemente son buenos. En el caso de los meandros abandonados los tipos de drenaje encontrados varían de pobremente a imperfectamente drenados. Respecto a las vegas bajas, vegas medias y vegas altas el tipo de drenaje identificado predominantemente es imperfectamente drenado. En los suelos de las terrazas recientes existen dos tipos de drenaje que se han encontrado, estos varían de buenos a imperfectamente drenados. En los suelos de terrazas subrecientes también existen dos tipos de drenaje identificados mayoritariamente, buenos a imperfectamente drenados. En los suelos de terrazas antiguas existen también dos tipos de drenaje identificados, imperfectamente a bien drenados.

Sin embargo, es necesario realizar más estudios sobre drenaje de suelos en el TCbba, por lo que debe considerarse la elaboración de mapas que muestren las características de drenaje antes de implementar en zonas nuevas los cultivos priorizados.

### 4.1.1.2. Características químicas

**a) Acidez**

A la profundidad de 0 – 20 cm los suelos de TCbba tienen niveles de pH en promedio de 4,7 y un rango entre 2,58 y 7,8 lo que los caracteriza como suelos fuertemente ácidos, con una predominancia del nivel de pH que corresponde a la clase fuertemente ácidos y en menor porcentaje está la categoría moderadamente ácidos, que muestran que hay menor acidez (área comprendida entre Villa 14 de Septiembre y Senda 7). Esta condición demuestra que contienen a menudo altos niveles de aluminio en la solución del suelo, que son perjudiciales para el crecimiento vegetal. En el TCbba predominan los suelos con niveles medios a altos de saturación de Al por lo niveles altos de acidez (fuertemente ácidos), tal como se observa en el mapa 9 (Anexo 1).

A la profundidad de 20 – 40 cm los suelos de TCbba muestran niveles de pH en promedio de 4,9 y un rango entre 2,5 y 7,7 con una predominancia de la clase fuertemente ácidos y en menor porcentaje está las categorías moderadamente ácidos y débilmente ácidos (área comprendida entre Villa 14 de Septiembre y Senda 7), tal como se observa en el mapa 10 (Anexo 1).

Por estas características de los suelos se presenta una disminución de la disponibilidad de algunos nutrimientos como Ca, Mg, K y P ocasionando la reducción del crecimiento de las plantas y favorece la solubilización de elementos tóxicos para las plantas como el Al y Mn.

Los cultivos que son muy tolerantes a estas condiciones de acidez son: habichuelas, altramuz, avena, sandía, patata, centeno y vid, pero para que otros cultivos más ingresen en esta lista se requieren acciones de aplicación de enmiendas (ejm. cal, dolomita).

**b) Bases intercambiables**

La Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) es la capacidad que tiene un suelo para retener y liberar iones positivos. Uno de estos procesos que se desarrolla en el suelo se define como **el cambio iónico,** este cambio son los procesos reversibles por los cuales las partículas sólidas del suelo **adsorben** iones de la fase acuosa liberando al mismo tiempo otros iones en cantidades equivalentes, estableciéndose el equilibrio entre ambas fases. Los cationes retenidos por los coloides del suelo pueden ser reemplazados por otros cationes que se conocen como **cationes intercambiables**. Los cationes intercambiables son $Ca^{2+}$, $Mg^{2+}$, $K^{+}$ y cuando a la suma de bases ($Ca^{2+} + Mg^{2+} + K^{+}$) se le agrega la acidez intercambiable ($Al^{3+} + H^{+}$) se obtiene la capacidad de intercambio catiónico efectiva (CICE) de un suelo. (Pérez Rosales et al., 2017)

El calcio se absorbe como $Ca^{2+}$ y es abastecido a las raíces vía flujo masal o intercepción; la concentración promedio de Ca en plantas de 0.2-1%; el Ca es constituyente de paredes y membranas celulares (estructura y estabilidad); regulador de enzimas; es esencial para la elongación y división celular (García, F., 2011)

Los suelos del TCbba presentan un contenido promedio de 1,93 cmol (+) $kg^{-1}$ de calcio con un rango de 0,01 hasta 12,0 cmol (+) $kg^{-1}$, éstos valores muestran contenidos muy bajos de Ca intercambiable (hasta 5 cmol (+) $kg^{-1}$) a la profundidad de 0 – 20 cm. En la profundidad de 20 – 40 cm presentan un

contenido promedio de 1,26 cmol (+) kg-1 de calcio con un rango de 0,02 hasta 9,0 cmol (+) kg-1 esta predominancia también muestra valores muy bajos (mapas 11 y 12 del Anexo 1). Ferrufino y Meneses (2004) en el estudio realizado mostraron que los suelos del TCbba presentan predominantemente contenidos muy bajos de Ca intercambiable (hasta 3 cmol (+) $kg^{-1}$).

El aluminio afecta vías de señalización que involucran $Ca^{2+}$ya que puede interactuar con calmodulinas y otras proteínas dependientes de este (Siegel & Haug1983).

El magnesio se absorbe como $Mg^{2+}$ y es abastecido a las raíces vía flujo masal o difusión; la concentración promedio de Ca en plantas de 0,1 – 0,4%; el Mg es constituyente de clorófila y de ribosomas (síntesis proteica); se le asocia a reacciones de transferencia de energía (ATP y a reacciones de transferencia de energía (ATP y enzimas) (García, F., 2011).

Los suelos del TCbba presentan un contenido promedio de 1,0 cmol (+) $kg^{-1}$ de magnesio con un rango de 0,01 y 6,4 cmol (+) $kg^{-1}$ , éstos valores muestran una variabilidad desde muy bajos a bajos de Mg intercambiable a la profundidad de 0 – 20 cm (hasta 1,5 cmol (+) $kg^{-1}$), (mapas 13 y 14 del Anexo 1), predominantemente son valores bajos. Estos suelos en la profundidad de 20 – 40 cm muestran un contenido promedio de 0,77 cmol (+) kg-1 de magnesio con un rango de 0,01 y 7,15 cmol (+) kg-1 la misma variabilidad de la primera capa, sin embargo, hay predominancia de valores muy bajos.

La acidez de los suelos limita el crecimiento de las plantas debido a una combinación de factores que incluyen la baja disponibilidad de nutrientes esenciales, especialmente calcio, magnesio y algunos micronutrientes (Kochian et al., 2004)

El potasio no forma compuestos estructurales, existe como $K^+$; regula la fuerza iónica de las soluciones; está involucrado en la actividad de más de 80 enzimas; regula la presión osmótica (por ej. apertura y cierre de estomas) y la transpiración; participa en las funciones en intercambios de energía, translocación de asimilados, absorción de N y síntesis de proteínas (García, F., 2011)

Los suelos del TCbba presentan un contenido promedio de 0,20 cmol (+) $kg^{-1}$ de K intercambiable con un rango de 0,02 hasta 1,25 cmol (+) $kg^{-1}$, éstos valores muestran que varían de muy bajos a medios (hasta 0,25 cmol (+) kg-1) a la profundidad de 0 – 20 cm. Mientras que en la profundidad de 20 – 40 cm presentan un contenido promedio de 0,15 cmol (+) $kg^{-1}$ de K intercambiable con un rango de 0,01 hasta 1,24 cmol (+) $kg^{-1}$ los valores muestran que existe predominancia de valores muy bajos de este elemento (mapas 15 y 16 del Anexo 1).

La relación K/Mg debe estar comprendida entre 0,2 y 0,3. Si esta relación es mayor de 0,5 pueden producirse deficiencias de magnesio por efecto antagónico de potasio. En cambio, si la relación es de alrededor 0,1, se puede producir una deficiencia de potasio inducida por el magnesio (Bernier, R., 2012).

La mayor parte de los suelos del TCbba a la profundidad de 0 – 20 cm muestra un contenido promedio de 45,8 % de saturación de bases, con un rango de 1,4 hasta 100,0 %, éstos valores de saturación de bases (SB) varían desde muy bajos a altos, predominando los valores bajos, lo que los caracteriza como suelos de baja a media fertilidad. A la profundidad de 20 – 40 cm los valores muestran un contenido promedio de 34,2 % de saturación de bases, con un rango de 3,1 hasta 99,2 %, éstos presentan una predominancia de valores bajos y en poca proporción valores de categoría media a altas por lo que se los caracteriza como suelos de baja a media fertilidad (mapas 17 y 18 del Anexo 1).

**c) Capacidad de Intercambio Catiónico Efectiva (CICE)**

La ventaja de una CIC alta no es solamente que la tierra o el sustrato puedan retener muchos elementos fertilizantes y devolverlos posteriormente a la planta, sino que además puede regular o resistir un cambio en el pH. Por ejemplo, si agrega caliza a un suelo arcilloso ácido, el calcio y el magnesio pueden desplazar el hidrógeno (iones ácidos) de los puntos de CIC. Por lo general, los suelos con alta CIC, son aquellos con altos contenidos de arcilla y/o materia orgánica. La alta CIC les brinda mayor capacidad para retener nutrientes, eso normalmente los hace más fértiles.
Fuente: https://www.intagri.com

Los suelos de TCbba en la primera capa (0 – 20 cm) presentan un contenido promedio de 6,58 cmol (+) $kg^{-1}$, con un rango entre 0,50 y 20,5 cmol (+) $kg^{-1}$. Estos valores están dentro de la categoría de contenido bajo, por ello se interpreta que estos suelos tienen bajos niveles de CICE y lo recomendable es hacer correcciones del nivel de pH para mejorar el intercambio de cationes entre el suelo y la planta.

**d) Fósforo**

Los niveles promedio de P en suelos del TCbba se encuentran en la mayor parte de los suelos del TCbba entre 1 y 10 mg kg-1, lo que los caracteriza como suelos con bajos contenidos de este nutrimento. Si bien los contenidos de P en la zona son bajos, en general la capacidad de fijación de P es baja, en comparación de otros suelos de los trópicos de Sud América y aumenta con el contenido de arcilla de los suelos (Ferrufino y Alvarado, 1990).

Los suelos del TCbba presentan un contenido promedio de 8,5 mg $kg^{-1}$ de fósforo con un rango de 0,11 hasta 74,1 mg $kg^{-1}$, éstos valores muestran una variabilidad del contenido de fósforo desde muy bajos a medios de fósforo intercambiable a la profundidad de 0 – 20 cm (<5 mg $kg^{-1}$), predominantemente son valores muy bajos. Estos suelos en la profundidad de 20 – 40 cm muestran contenido promedio de 6,1 mg $kg^{-1}$ de fósforo con un rango de 0,0 hasta 75,0 mg $kg^{-1}$, la misma variabilidad de la primera capa, sin embargo, no hay predominancia entre valores muy bajos y bajos ya que se observa proporciones similares, tal como se muestra en los mapas 19 y 20 del Anexo 1.

En condiciones de suelos ácidos (pH 5.5-4.5, o <4.5) los iones aluminio ($Al^{3+}$) se solubilizan y pueden penetrar células radiculares, lo cual inhibe el crecimiento de las raíces y dificulta la absorción de agua y nutrientes esenciales como fósforo (Kochianet al. 2005).

### e) Materia orgánica

El contenido de materia orgánica varía de sitio a sitio y por lo tanto su contribución a la acidez del suelo es también variable (et al Espinoza-Molina, 1999).
La aplicación de mulch y abonos verdes presenta también una gran efectividad en la reducción de los efectos tóxicos del aluminio en suelos ácidos (Casierra & Aguilar, 2007).

Los suelos del TCbba presentan un contenido promedio de 3,14 % de materia orgánica con un rango de 0,08 hasta 8,28 %, éstos valores varían desde bajos a medios a la profundidad de 0 – 20 cm, presentan ligera predominancia de valores bajos. Estos suelos en la profundidad de 20 – 40 cm muestran contenido promedio de 1,76 % de materia orgánica con un rango de 0,08 hasta 7,7 %, una variabilidad de muy bajos a valores bajos, existiendo predominancia de valores muy bajos (mapas 21 y 22 del Anexo 1).

### f) Saturación de Aluminio

Los suelos ácidos están caracterizados por toxicidades de Al, manganeso (Mn) e hidrógeno (H), y deficiencias de Ca, Mg, P, molibdeno (Mo), y silicio (Si) (Kamprath, 1984; Foy, 1992). Todas esas restricciones son conocidas como el complejo de acidez del suelo. La toxicidad de Al es el componente más importante de dicho complejo. El daño a las raíces es el resultado más evidente de la toxicidad de Al, debido a que el sitio de acción del Al es el ápice radicular (Bennet y Breen, 1991). El sistema radicular se reduce y, consecuentemente, la adquisición de nutrimentos y agua, conduciendo a reducciones en el rendimiento de los cultivos. Las especies de Al consideradas tóxicas Al 3+, Al (OH) 2+ y Al (OH)2 ) para las raíces de los cultivos, predominan a niveles de pH menores a 5.2 (Kinraide, 1991).

La saturación de Al es una medida para identificar el grado de dominancia del Al en el complejo de intercambio en un suelo. Los cultivos de banano, café, cítricos palmito y piña tienen distinta tolerancia al aluminio (Cuadro N° 6).

**Cuadro N° 6:** Niveles óptimos de pH, saturación de Al tolerable y requerimientos estimados de encalado para distintos cultivos. Adaptado de Gauggel, C. 2015; Ferrufino, A. 2001; FAO 2010, IICA, 2017

| Cultivo | pH óptimo | Saturación de Al tolerada (%) | Cal/dolomita (t ha-1) |
|---|---|---|---|
| Banano | 6,0 – 7,0 | 30 | 1.0 – 2.0 |
| Café | 5.5 – 6.5 | 30 | 1.0 – 2.0 |
| Cítricos | 5.5 – 7.0 | 25 | 1.0 – 2.0 |
| Palmito | 4.5 – 6.0 | 50 | 0.5 – 1.5 |
| Piña | 4.5 – 6.0 | 60 | 0.25 – 0.5 |

Los suelos del TCbba presentan un contenido promedio de 52,7 % de saturación de aluminio con un rango de 0,0 hasta 95,8 %, éstos valores varían desde muy bajos a altos, predominando los valores altos a la profundidad de 0 – 20 cm, presentan ligera predominancia de valores bajos.

La acidez del suelo, y consiguientemente la toxicidad de Al, pueden ser corregidas con la aplicación de diversas enmiendas, entre las cuales las más usadas son la cal y la dolomita (Tabla 6). La primera no se puede utilizar libremente en el TCbba porque es una sustancia precursora en la fabricación de cocaína (Ley 1008 de Sustancias Controladas). La dolomita es de uso libre en el TCbba; más aún, existen importantes depósitos en la zona de piedemonte del TCbba. Por otra parte, la dolomita además de disminuir la acidez del suelo, es una fuente importante de Ca y Mg, nutrimentos que se encuentran en bajos niveles en la mayor parte de los suelos de la zona.

En base a los resultados de los análisis se realizó los cálculos correspondientes para incorporar encalados y mejorar la acidez de los suelos del TCbba. Estos cálculos muestran una variabilidad del % de saturación de Aluminio, que van desde muy bajos a altos a la profundidad de 0 – 20 cm (hasta 60 %), presentándose una predominancia de valores altos, que quiere decir que los suelos tienen alta saturación de aluminio (mapa 23 del Anexo 1).

Sobre la base de los Tolerancia de los cultivos expresada en la saturación de aluminio se realizaron cálculos para conocer el requerimiento calculado de enmienda (encalados) que mejorarían las condiciones del suelo disminuyendo la acidez de los mismos en beneficio de los cultivos priorizados banano, café, cítricos palmito y piña.

Los resultados de los cálculos de los encalados expresados en kg/ha fueron mapeados para cada uno de los cultivos anteriormente mencionados considerando los valores de "niveles críticos de saturación de aluminio" de tolerancia para dichos cultivos.

Los cálculos de encalado sólo fueron considerados para la profundidad de 0-20 cm, aquellos suelos que presentan una condición entre 0 a 10% de saturación de aluminio son considerados como suelos que no requiere la aplicación de cal en kg/ha.

El mapa de encalado en TCbba para Banano muestra que el área comprendida entre las localidades de entre Villa 14 de Septiembre y Senda 7 no necesitan de aplicación adicional. Sin embargo, existe una predominancia en las zonas restantes de aplicaciones de encalado mayores a 2000 kg/ha, esta aplicación habrá que hacerla considerando que sobredosis ocasionaría desbalances en los suelos (mapa 24 del Anexo 1).

El mapa de encalado en TCbba para Café muestra que en el área comprendida entre las localidades de entre Villa 14 de Septiembre, Senda 7, Senda B, Senda F, Valle del Sacta y Bulo Bulo no necesitan de aplicación adicional. El resto de las áreas del TCbba requieren encalados desde 500 hasta mayores a 2000 kg/ha, tal como se presenta en el mapa 25 del Anexo 1.

El mapa de encalado en TCbba para Cítricos muestra que en el área comprendida entre las localidades de entre Villa 14 de Septiembre y Senda 7 no necesitan de aplicación adicional. Sin embargo, existe una predominancia en las zonas restantes de aplicaciones de encalado mayores a

2000 kg/ha, esta aplicación habrá que hacerla considerando que sobredosis ocasionaría desbalances en los suelos, tal como se presenta en el mapa 26 del Anexo 1.

El mapa de encalado en TCbba para Palmito muestra que en el área comprendida entre las localidades de entre Villa 14 de Septiembre, Senda 7, Senda B, Senda F, Valle del Sacta y Bulo Bulo no necesitan de aplicación adicional. El resto de las áreas del TCbba requieren encalados desde 500 hasta mayores a 2000 kg/ha, tal como se presenta en el mapa 27 del Anexo 2.

El mapa de encalado en TCbba para Piña muestra que en el área comprendida entre las localidades de entre Eterazama, Isinuta, Villa 14 de Septiembre, Senda 7, Senda B, Senda F, Valle del Sacta, Entre Rios y Bulo Bulo no necesitan de aplicación adicional. El resto de las áreas del TCbba requieren encalados desde 500 hasta 2000 kg/ha, tal como se presenta en el mapa 28 del Anexo 1.

### 4.1.2. Características generales de los suelos de YLP

En la caracterización y descripción de las condiciones de los suelos de Yungas de La Paz los resultados expresan cuáles son aquellas condiciones en las zonas donde se realizaron los muestreos de suelos. Sin embargo, existen zonas de este territorio a las cuáles no se tuvo acceso por ende no se logró realizar el muestro correspondiente. Al elaborar los mapas mediante los procesos geoestadísticos inicialmente se incluyeron todo el territorio de YLP, pero los resultados tenían una variación significativa en los resultados por lo cual se decidió trabajar y analizar las zonas que tienen muestreos.

Los suelos de YLP los procesos de meteorización pedoquímica son intensos, por tales causas, los diferentes tipos de suelos identificados tienen baja reserva mineral y en algunos casos no satisfacen las necesidades nutricionales de los cultivos. Debido a los niveles de acidez y presencia de aluminio, ya que definen una baja capacidad de intercambio catiónico y una susceptibilidad significativa a los procesos de lixiviación por las altas precipitaciones que se registran en la zona de estudio.

#### 4.1.2.1. Características físicas

**a) Textura**

La caracterización de un suelo es esencial para determinar su apropiado manejo y realizar planificación agrícola. La textura indica el contenido de partículas de arena, limo y arcilla en el suelo. Así mismo, influye en otras propiedades como la densidad aparente, la porosidad y, por lo tanto, el movimiento y el almacenamiento de fluidos (agua y aire) en el suelo (Lacasta et al., 2005)

Las texturas de los suelos de YLP en la primera capa (0 – 20 cm) mayoritariamente presentó un contenido promedio de arena de 33% y un rango entre 1 y 73%. El contenido promedio de limo es de 32% y presenta un rango entre 3 a 65%. El contenido promedio de arcilla es de 35% y tiene un rango entre 11 y 76%. Consecuentemente, nos existe una textura predominante porque los valores muestran una textura franca y franca arcillosa, ambas están presentes con un porcentaje muy similar, tal como se muestra en el mapa 29 del Anexo 2.

En la segunda capa (20 – 40 cm) esta relación muestra que la mayoría de los suelos presentó un contenido promedio de arena de 34% y un rango entre 1 y 73%. El contenido promedio de limo es de 40% y un rango entre 3 a 65%. El contenido promedio de arcilla es de 26% con un rango entre 11 y 69%. Consecuentemente no existe una textura predominante porque la textura franca y franca arcillosa se presentan en un porcentaje similar, tal como se muestra en el mapa 30 del Anexo 2.

Estas condiciones de textura de los resultados analizados, nos muestran que los suelos de YLP varían de francos a franco arcillosos (suelos de textura media a suelos de texturas moderadamente finas a finas) predominantemente. Sin embargo, existen también suelos con textura arenosa (gruesa) y arcillo limosa (fina) en los que se manejan los cultivos en el YLP.
Sin embargo, la textura de los suelos, originan estructuras diferentes en cuanto a porosidad y agregación, que dan lugar a posibles problemas de: endurecimiento, aireación, capacidad de retención hídrica, permeabilidad, etc. (Lacasta y Meco 2005).

#### 4.1.2.2. Características químicas

**a) Acidez**

A la profundidad de 0 – 20 cm los suelos de YLP muestran un contenido promedio de arena de 5,3 y un rango entre 2,9 y 7,9 tienen una predominancia de la clase fuertemente ácidos y en menor porcentaje está la categoría moderadamente ácidos, que muestran que hay menor acidez; en las áreas circundantes a Palos Blancos se observa suelos con acidez débil y neutros. Esta condiciones principales demuestra que contienen a menudo altos niveles de Al en la solución del suelo, que son perjudiciales para el crecimiento vegetal, tal como se observa en el siguiente mapa:, tal como se observa en el mapa 31 del Anexo 2.

A la profundidad de 20 – 40 cm los suelos de YLP muestran un contenido promedio de arena de 5,1 y un rango entre 3,0 y 7,4 que son similares condiciones que en la primera capa una predominancia de la clase fuertemente ácidos y en menor porcentaje está la categoría moderadamente ácidos, tal como se observa en el mapa 32 del Anexo 2.

La mayor parte de los suelos del YLP tienen niveles de pH en promedio de 5,2 y un rango entre 3,0 y 7,9, lo que los caracteriza como suelos fuertemente ácidos. Por ello que en los suelos se presenta una disminución de la disponibilidad de algunos nutrimientos como Ca, Mg, K y P ocasionando la reducción del crecimiento de las plantas y favorece la solubilización de elementos tóxicos para las plantas como el Al y Mn.

Los cultivos que son muy tolerantes a estas condiciones de acidez son: habichuelas, altramuz, avena, sandía, patata, centeno y vid, pero para que otros cultivos más ingresen en esta lista se requieren acciones de aplicación de enmiendas (ejm. cal, dolomita)

**b) Bases intercambiables**

La Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) es la capacidad que tiene un suelo para retener y liberar iones positivos. Uno de estos procesos que se desarrolla en el suelo se define como el cambio iónico, este cambio son los procesos reversibles por los cuales las partículas sólidas del suelo

adsorben iones de la fase acuosa liberando al mismo tiempo otros iones en cantidades equivalentes, estableciéndose el equilibrio entre ambas fases. Los cationes retenidos por los coloides del suelo pueden ser reemplazados por otros cationes que se conocen como cationes intercambiables. Los cationes intercambiables son $Ca^{2+}$, $Mg^{2+}$, $K^{+}$ y cuando a la suma de bases ($Ca^{2+}$, $Mg^{2+}$, $K^{+}$) se le agrega la acidez intercambiable ($Al^{3+} + H^{+}$) se obtiene la capacidad de intercambio catiónico efectiva (CICE) de un suelo. (Alejandro Pérez Rosales et al., 2017).

El calcio se absorbe como $Ca^{2+}$ y es abastecido a las raíces vía flujo masal o intercepción; la concentración promedio de Ca en plantas de 0.2-1%; el Ca es constituyente de paredes y membranas celulares (estructura y estabilidad); regulador de enzimas; es esencial para la elongación y división celular (García, F., 2011)

Los suelos del YLP presentan un contenido promedio de 6,43 cmol (+) $kg^{-1}$ de calcio con un rango de 0,3 hasta 23,0 cmol (+) $kg^{-1}$ éstos valores muestran contenidos que varían desde bajos hasta altos de Ca intercambiable (> 10 cmol $_{(+)}$ $kg^{-1}$) a la profundidad de 0 – 20 cm. En la profundidad de 20 – 40 cm presentan un contenido promedio de 4,82 cmol (+) $kg^{-1}$ de calcio con un rango de 0,3 hasta 21,2 cmol (+) $kg^{-1}$ lo que muestra una predominancia de valores muy bajos y en menor proporción valores bajos (mapas 33 y 34 del Anexo 2). Los suelos del YLP presentan, predominantemente contenidos muy bajos de Ca intercambiable, lo que incide negativamente en el desarrollo normal de los cultivos en dicha zona.

El aluminio afecta vías de señalización que involucran $Ca^{2+}$ ya que puede interactuar con calmodulinas y otras proteínas dependientes de este (Siegel & Haug1983).

El magnesio se absorbe como $Mg^{2+}$ y es abastecido a las raíces vía flujo masal o difusión; la concentración promedio de Ca en plantas de 0,1 – 0,4%; el Mg es constituyente de clorófila y de ribosomas (síntesis proteica); se les asocia a reacciones de transferencia de energía (ATP y a reacciones de transferencia de energía (ATP y enzimas) (García, F., 2011).

Los suelos del YLP presentan una variabilidad del contenido promedio de 2,23 cmol (+) $kg^{-1}$ de magnesio con un rango de 0,14 y 9,2 cmol (+) $kg^{-1}$, éstos valores muestran una variabilidad desde muy bajos a altos de Mg intercambiable a la profundidad de 0 – 20 cm (mapas 35 y 36 del Anexo 2), predominantemente son valores altos. Estos suelos en la profundidad de 20 – 40 cm muestran un contenido promedio de 1,98 cmol (+) $kg^{-1}$ de magnesio con un rango de 0,1 y 6,8 cmol (+) $kg^{-1}$, la misma variabilidad de la primera capa, coincidiendo que no hay una predominancia de valores.

La acidez de los suelos limita el crecimiento de las plantas debido a una combinación de factores que incluyen la baja disponibilidad de nutrientes esenciales, especialmente calcio, magnesio y algunos micronutrientes (Kochian et al., 2004)

El potasio no forma compuestos estructurales, existe como $K^{+}$; regula la fuerza iónica de las soluciones; está involucrado en la actividad de más de 80 enzimas; regula la presión osmótica (por

ej. apertura y cierre de estomas) y la transpiración; participa en las funciones en intercambios de energía, translocación de asimilados, absorción de N y síntesis de proteínas (García, F., 2011)

Los suelos del YLP presentan un contenido promedio de 0,48 cmol (+) $kg^{-1}$ de K intercambiable con un rango de 0,10 hasta 2,4 cmol (+) $kg^{-1}$, estos valores muestran contenidos de K intercambiable que varían de muy bajos a altos a la profundidad de 0 – 20 cm, existiendo mayor presencia de contenidos bajos. Mientras que en la profundidad de 20 – 40 cm presentan un contenido promedio de 0,37 cmol (+) $kg^{-1}$ de K intercambiable con un rango de 0,10 hasta 2,4 cmol (+) $kg^{-1}$, lo que demuestra que existe una predominancia de valores muy bajos de este elemento lo que se traduce en reducción significativa de los valores medios (mapas 37 y 38 del Anexo 2).

La relación K/Mg debe estar comprendida entre 0,2 y 0,3. Si esta relación es mayor de 0,5 pueden producirse deficiencias de magnesio por efecto antagónico de potasio. En cambio, si la relación es de alrededor 0,1, se puede producir una deficiencia de potasio inducida por el magnesio (Bernier, R., 2012).

La mayor parte de los suelos del YLP a la profundidad de 0 – 20 cm muestra un contenido promedio de 75,7 % de saturación de bases, con un rango de 10,6 hasta 100,0 %, tiene valores de saturación de bases (SB en %) que varían desde bajos a altos, predominando los valores altos, lo que los caracteriza como suelos de mediana a alta fertilidad. A la profundidad de 20 – 40 cm los valores muestran la misma variabilidad de la primera capa, asimismo se observa que se incrementan las áreas con valores medios, ratificándose la caracterización como suelos de media a alta fertilidad (mapas 39 y 40 del Anexo 2).

**Capacidad de Intercambio Catiónico Efectivo (CICE)**

La ventaja de una CIC alta no es solamente que la tierra o el sustrato puedan retener muchos elementos fertilizantes y devolverlos posteriormente a la planta, sino que además puede regular o resistir un cambio en el pH. Por ejemplo, si agrega caliza a un suelo arcilloso ácido, el calcio y el magnesio pueden desplazar el hidrógeno (iones ácidos) de los puntos de CIC. Por lo general, los suelos con alta CIC, son aquellos con altos contenidos de arcilla y/o materia orgánica. La alta CIC les brinda mayor capacidad para retener nutrientes, eso normalmente los hace más fértiles.
Fuente: https://www.intagri.com

Los suelos de YLP en la primera capa (0 – 20 cm) presentan un contenido promedio de 12,5 cmol (+) $kg^{-1}$, con un rango entre 1,7 y 30,3 cmol (+) $kg^{-1}$. Estos valores están dentro de la categoría de contenido medio, por ello se interpreta que esto suelos tiene un nivel mediano de CICE y lo recomendable sería hacer correcciones del nivel de pH para mejorar el intercambio de cationes entre el suelo y la planta.

### c) Fósforo

Los suelos de YLP presentan un contenido promedio de 7,4 mg $kg^{-1}$ de fósforo con un rango de 0,23 hasta 57,7 mg $kg^{-1}$, estos valores muestran una variabilidad del contenido desde muy bajos a altos de fósforo intercambiable a la profundidad de 0 – 20 cm (> 25 mg $kg^{-1}$), sin presentar una

predominancia. Estos suelos en la profundidad de 20 – 40 cm muestran que hay predominancia de valores muy bajos, tal como se muestra en los mapas 41 y 42 del Anexo 2.

En condiciones de suelos ácidos (pH 5.5-4.5, o <4.5) los iones aluminio ($Al^{3+}$) se solubilizan y pueden penetrar células radiculares, lo cual inhibe el crecimiento de las raíces y dificulta la absorción de agua y nutrientes esenciales como fósforo (Kochianet al. 2005).

**d) Materia orgánica**

El contenido de materia orgánica varía de sitio a sitio y por lo tanto su contribución a la acidez del suelo es también variable (Espinoza-Molina et al, 1999).

Los suelos del YLP presentan un contenido promedio de 4,27 %, con un rango de 0,3 hasta 12,86 %, éstos valores presentan una variabilidad de contenido de materia orgánica desde muy bajos a altos a la profundidad de 0 – 20 cm (> 4,1 %), presentándose predominancia de valores altos. Estos suelos en la profundidad de 20 – 40 cm muestran un contenido promedio de 2,63 %, con un rango de 0,17 hasta 11,9 %, una variabilidad de muy bajos a valores altos, existiendo poca predominancia de valores muy bajos (mapas 43 y 44 del Anexo 2).

La aplicación de mulch y abonos verdes presenta también una gran efectividad en la reducción de los efectos tóxicos del aluminio en suelos ácidos (Casierra & Aguilar, 2007)

**e) Saturación de Aluminio**

La saturación de Al es una medida para identificar el grado de dominancia del Al en el complejo de intercambio en un suelo. Los cultivos de banano, cacao, café y cítricos tienen distinta tolerancia al aluminio (Cuadro N° 7).

**Cuadro N° 7:** Niveles óptimos de pH, saturación de Al tolerable y requerimientos estimados de encalado para distintos cultivos. Adaptado de Gauggel, C. 2015; Ferrufino, A. 2001; FAO 2010, IICA, 2017

| Cultivo | pH óptimo | Saturación de Al tolerada (%) | Cal/dolomita (t ha-1) |
|---|---|---|---|
| Banano | 6,0 – 7,0 | 30 | 1.0 – 2.0 |
| Cacao | 4.0 – 7.0 | 25 | 1.0 – 2.0 |
| Café | 5.5 – 6.5 | 30 | 1.0 – 2.0 |
| Cítricos | 5.5 – 7.0 | 25 | 1.0 – 2.0 |

Los suelos de YLP presentan un contenido promedio de 13,33 % de saturación de aluminio con un rango de 0,0 hasta 89,7 %, éstos valores varían desde muy bajos a altos, predominando los valores altos a la profundidad de 0 – 20 cm, presentan ligera predominancia de valores bajos.

La acidez del suelo, y consiguientemente la toxicidad de Al, pueden ser corregidas con la aplicación de diversas enmiendas, entre las cuales las más usadas son la cal y la dolomita (Tabla 7). La primera no se puede utilizar libremente en el YLP porque es una sustancia precursora en la fabricación de cocaína (Ley 1008 de Sustancias Controladas). La dolomita es de uso libre en el YLP, además de disminuir la acidez del suelo, es una fuente importante de Ca y Mg, nutrimentos que se encuentran en bajos niveles en la mayor parte de los suelos de la zona.

En base a los resultados de los análisis se realizó los cálculos correspondientes para incorporar encalados y mejorar la acidez de los suelos de YLP. Estos cálculos muestran una variabilidad del porcentaje de saturación de Aluminio, que van desde muy bajos a medios a la profundidad de 0 – 20 cm (hasta 60 %), presentándose una predominancia de valores muy bajos, que quiere decir que los suelos tienen baja saturación de aluminio (mapa 45 del Anexo 2).

Sobre la base de la tolerancia de los cultivos expresada en la saturación de aluminio se realizaron cálculos para conocer el requerimiento calculado de enmienda (encalado) que mejorarían las condiciones del suelo disminuyendo la acidez de los mismos en beneficio de los cultivos priorizados banano, cacao, café y cítricos.

Los resultados de los cálculos de los encalados expresados en kg/ha fueron mapeados para cada uno de los cultivos anteriormente mencionados considerando los valores de "niveles críticos de saturación de aluminio" de tolerancia para dichos cultivos.

Los cálculos de encalado sólo fueron considerados para la profundidad de 0-20 cm, aquellos suelos que presentan una condición entre 0 a 10% de saturación de aluminio son considerados como suelos que no requiere la aplicación de cal en kg/ha.

El mapa de encalado en YLP para Banano muestra que en las áreas próximas a Caranavi, Palos Blancos y los centros poblados restantes no se necesita de aplicación adicional, siendo ésta una condición de predominancia en YLP (mapa 46 del Anexo 2). Sin embargo, sólo pequeñas zonas si requerirían de aplicaciones adicionales mayores a 2000 kg/ha, esta aplicación habrá que hacerla considerando que sobredosis ocasionaría desbalances en los suelos.

El mapa de encalado en YLP para Cacao nos muestra que las áreas próximas Caranavi, Palos Blancos y los centros poblados restantes no necesitan de aplicación adicional de encalado. Siendo ésta una condición de predominancia en YLP. Sin embargo, sólo pequeñas zonas si requerirían de aplicaciones adicionales mayores a 2000 kg/ha, tal como se presenta en el mapa 47 del Anexo 2.

El mapa de encalado en YLP para Café nos muestra que las áreas próximas a Caranavi y Palos Blancos no necesitan de aplicación adicional. Sin embargo, sólo pequeñas zonas circundantes a Coroico y Caranavi si requerirían de aplicaciones adicionales desde 1000 kg/ha a mayores 2000 kg/ha, tal como se presenta en el mapa 48 del Anexo 2.

El mapa de encalado en YLP para Cítricos nos muestra que las áreas próximas a Caranavi, Palos Blancos y los centros poblados restantes no necesitan de aplicación adicional, siendo ésta una condición de predominancia en YLP. Sin embargo, sólo pequeñas zonas si requerirían de aplicaciones adicionales mayores a 2000 kg/ha (mapa 49 del Anexo 2).

## 4.2. Factores edáficos limitantes para la nutrición de cultivos priorizados

### 4.2.1. Trópico de Cochabamba para cultivos de banano, café, cítricos, palmito y piña

Del análisis de los mapas generados en este relevamiento se puede inferir que los factores más restrictivos para la productividad y persistencia de los cultivos de banano, café, cítricos palmito y piña son la acidez, la baja fertilidad y el drenaje restringido.

**1) La acidez del suelo como factor restrictivo de la productividad de cultivos**

Los suelos del TCbba nos muestran que para lograr una producción óptima sobre la base de tolerancia de los cultivos expresada en la saturación de aluminio los cálculos de los requerimientos de las enmiendas (encalados) para disminuir la acidez de los suelos, es variable. Existiendo moderada predominancia de las zonas que sí requieren encalados mayores a 2000 kg/ha.

Por ello dichos valores para los cultivos priorizados (banano, café, cítricos palmito y piña) nos muestran valores que van desde aquellas zonas de esta región que no necesitan encalado (para manejo de estos cultivos). Le siguen las zonas que requieren encalados que varían desde 500 hasta mayores a 2000 kg/ha (café, palmito y piña). Finalmente están las zonas donde se requieren encalados mayores a 2000 kg/ha (banano y cítricos).

**2) La baja fertilidad como factor restrictivo de la productividad de cultivos**

Las condiciones de los suelos del TCbba muestran que tienen baja fertilidad, por ello se recomienda usar para estos propósitos fertilizantes, particularmente para los cultivos de ciclo corto. Una de las recomendaciones más pertinentes es utilizar fertilizantes orgánicos que son estiércoles en general, abonos verdes y varias especies de coberturas, principalmente aquellas que pueden cubrir mayor superficie (pastos), ya que estas prácticas a más de mejorar las condiciones de fertilidad, también mejoran las condiciones físicas malas que presentan algunos suelos.

Para obtener altos rendimientos de los cultivos de banano, café, cítricos, palmito y piña será necesario utilizar niveles apropiados de dichos fertilizantes considerando los aspectos biológicos y económicos, para incorporar macro y micro nutrimentos. Es importante mencionar que para el logro de estos altos niveles de rendimiento será necesaria la aplicación de encalados (cal o dolomita). Indudablemente, es necesario realizar investigaciones más a detalle para conocer la respuesta a la aplicación de nutrimentos en las distintas zonas del TCbba.
Asociado a este factor, está la disponibilidad promedio de los nutrientes P y K en kg/ha que nos muestran que los suelos de esta región no satisfacen los requerimientos de los cultivos priorizados. Por ello, en base los resultados analizados estadísticamente y estandarizados se realizaron los

cálculos de éstos cuatro nutrientes a la profundidad de 0 – 20 cm y se obtuvieron las cantidades disponibles de cada uno de ellos en el suelo en kg/ha.

Estos valores de disponibilidad en el suelo fueron comparados con los requerimientos de cada uno de los cultivos priorizados para conocer qué nutrientes disponibles cubren las necesidades y cuáles requieren ser incorporados en un programa de fertilización adicional, ya sea con fertilizantes orgánicos o químicos para lograr un desarrollo normal de los cultivos priorizados. A continuación, se presentan los resultados de las comparaciones realizadas en la siguiente tabla:

**Cuadro N° 8:** Disponibilidad de nutrientes en suelos del TCbba vs Requerimientos de nutrientes por cultivo

| DESCRIPCION / CULTIVO | BANANO | | | |
|---|---|---|---|---|
| | P (kg/ha) | K (kg/ha) | Ca (kg/ha) | Mg (kg/ha) |
| Valores promedio | 42 | 182 | 700 | 180 |
| Necesidad del cultivo | 20 | 600 | 101 | 50 |
| Requerimiento para completar la necesidad | -- | 418 | -- | -- |
| DESCRIPCION / CULTIVO | CAFE | | | |
| | P (kg/ha) | K (kg/ha) | Ca (kg/ha) | Mg (kg/ha) |
| Disponibilidad promedio | 42 | 182 | 700 | 180 |
| Necesidad del cultivo | 20 | 50 | 50 | 25 |
| Requerimiento para completar la necesidad | -- | -- | -- | -- |
| DESCRIPCION / CULTIVO | CITRICOS | | | |
| | P (kg/ha) | K (kg/ha) | Ca (kg/ha) | Mg (kg/ha) |
| Valores promedio | 42 | 182 | 700 | 180 |
| Necesidad del cultivo | 60 | 350 | 180 | 24 |
| Requerimiento para completar la necesidad | 18 | 168 | -- | -- |
| DESCRIPCION / CULTIVO | PALMITO | | | |
| | P (kg/ha) | K (kg/ha) | Ca (kg/ha) | Mg (kg/ha) |
| Valores promedio | 42 | 182 | 700 | 180 |
| Necesidad del cultivo | 38 | 248 | 65 | 43 |
| Requerimiento para completar la necesidad | -- | 66 | -- | -- |
| DESCRIPCION / CULTIVO | PIÑA | | | |
| | P (kg/ha) | K (kg/ha) | Ca (kg/ha) | Mg (kg/ha) |
| Valores promedio | 42 | 182 | 700 | 180 |
| Necesidad del cultivo | 55 | 350 | 15 | 5 |
| Requerimiento para completar la necesidad | 13 | 168 | -- | -- |

La tabla anterior nos presenta valores de P (kg/ha) disponibles en el suelo que no cubren las necesidades de los 5 cultivos priorizados por ello es necesario aplicar fertilización adicional de 18 kg/ha en cítricos y 13 kg/ha en el caso de piña. Mientras que en el caso del Ca y Mg (kg/ha) la disponibilidad en el suelo cubre las necesidades de los 5 cultivos priorizados.
Respecto al K (kg/ha) si se debe adicionar fertilizantes en base a potasio para satisfacer los requerimientos del banano, este valor es de 418 kg/ha; en el caso del café no se requieren nada adicional; en cítricos se requieren 168 kg/ha; en palmito se requieren 66 kg/ha y en piña se requieren 168 kg/ha.

**3) El mal drenaje como factor restrictivo de la productividad de cultivos**

En el caso del mal drenaje, en general su corrección implica gastos significativos, por lo que se constituye, probablemente, en el factor más restrictivo para la agricultura en el TCbba. Por esta razón, las características de drenaje de los suelos debieran ser el factor principal en la zonificación por aptitud de suelos para distintos cultivos.
Los cultivos de banano, café, cítricos palmito y piña son altamente sensibles al mal drenaje, por ello antes de trasplantar dichos cultivos se debe manejar pasturas por al menos un año, la mayor parte de las gramíneas y leguminosas forrajeras cultivadas en el TCbba son poco a medianamente tolerantes a condiciones de drenaje restringido. Es necesario realizar más estudios sobre drenaje de suelos en el TCbba, por lo que debe considerarse la elaboración de mapas que muestren las características de drenaje antes de manejar los cultivos priorizados.

### 4.2.2. Yungas de La Paz para cultivos de banano, cacao, café y cítricos

Del análisis de los mapas generados en este relevamiento se puede inferir que los factores más restrictivos para la productividad y persistencia de los cultivos de banano, café, cítricos palmito y piña son la acidez, la baja fertilidad, la pendiente y la profundidad efectiva.

**1) La acidez del suelo como factor restrictivo de la productividad de cultivos**

Los suelos de YLP nos muestran que para lograr una producción óptima sobre la base de tolerancia de los cultivos expresada en la saturación de aluminio los cálculos de los requerimientos de las enmiendas (encalados) para disminuir la acidez de los suelos es variable, si existe predominancia de las zonas que no requieren encalados para la producción de cultivos.

Por ello dichos valores para los cultivos priorizados (banano, cacao, café y cítricos) nos muestran valores que van desde aquellas zonas de esta región que no necesitan encalados (para manejo de estos cultivos). Le siguen las zonas que requieren encalados que varían desde 1000 hasta mayores a 2000 kg/ha (café). Finalmente están las zonas donde se requieren encalados mayores a 2000 kg/ha (banano, cacao y cítricos).

## 2) La fertilidad como factor restrictivo de la productividad de cultivos

En base a los resultados de los análisis físico-químicos se mencionó que los suelos de YLP tienen mediana fertilidad, por lo tanto, se recomienda usar para este propósito fertilizantes, particularmente para los cultivos de ciclo corto. Una de las primeras recomendaciones es manejar en las superficies a cultivar con pastos, ya que estas prácticas a más de mejorar las condiciones de fertilidad, también mejoran las condiciones físicas consideradas malas que presentan algunos suelos.

Para obtener altos rendimientos de los cultivos de banano, cacao, café y cítricos será necesario utilizar niveles apropiados de dichos fertilizantes considerando los aspectos biológicos y económicos, para incorporar macro y micro nutrimentos. Es importante mencionar que para el logro de estos altos niveles de rendimiento será necesaria la aplicación de encalados (cal o dolomita). Indudablemente, es necesario realizar investigaciones más a detalle para conocer la respuesta a la aplicación de nutrimentos en las distintas zonas del YLP.

Asociado a este factor, está la disponibilidad promedio de los nutrientes P y K en kg/ha que nos muestran cuánto disponen los suelos de esta región. Las cantidades disponibles evidencian que se deben aplicar cantidades adicionales de fertilizantes orgánicos o químicos para lograr un desarrollo normal de los cultivos priorizados, la siguiente tabla nos muestra dichas comparaciones:

**Cuadro N° 9:** Disponibilidad de nutrientes en suelos del YLP vs Requerimientos de nutrientes por cultivo

| DESCRIPCION / CULTIVO | BANANO | | | |
|---|---|---|---|---|
| | P (kg/ha) | K (kg/ha) | Ca (kg/ha) | Mg (kg/ha) |
| **Valores promedio** | 39 | 48 | 460 | 184 |
| **Necesidad del cultivo** | 20 | 600 | 101 | 50 |
| **Requerimiento para completar la necesidad** | -- | 552 | -- | -- |
| **DESCRIPCION / CULTIVO** | **CACAO** | | | |
| | **P (kg/ha)** | **K (kg/ha)** | **Ca (kg/ha)** | **Mg (kg/ha)** |
| **Valores promedio** | 39 | 48 | 460 | 184 |
| **Necesidad del cultivo** | 30 | 190 | 135 | 55 |
| **Requerimiento para completar la necesidad** | -- | 142 | -- | -- |
| **DESCRIPCION / CULTIVO** | **CAFE** | | | |
| | **P (kg/ha)** | **K (kg/ha)** | **Ca (kg/ha)** | **Mg (kg/ha)** |
| **Valores promedio** | 39 | 48 | 460 | 184 |
| **Necesidad del cultivo** | 25 | 50 | 50 | 25 |
| **Requerimiento para completar la necesidad** | -- | 2 | -- | -- |

| DESCRIPCION / CULTIVO | CITRICOS | | | |
|---|---|---|---|---|
| | P (kg/ha) | K (kg/ha) | Ca (kg/ha) | Mg (kg/ha) |
| **Valores promedio** | 39 | 48 | 460 | 184 |
| **Necesidad del cultivo** | 60 | 350 | 180 | 24 |
| **Requerimiento para completar la necesidad** | 21 | 302 | -- | -- |

La tabla anterior nos presenta valores de P (kg/ha) disponibles en el suelo que no cubren las necesidades de los 5 cultivos priorizados por ello es necesario aplicar fertilización adicional de 21 kg/ha en cítricos. Respecto al K (kg/ha) si se debe adicionar fertilizantes en base a potasio para satisfacer los requerimientos del banano, este valor es de 552 kg/ha; en el caso del cacao se requieren 552 kg/ha; en café se requieren 2 kg/ha y en cítricos se requieren 302 kg/ha.
Mientras que en el caso de los nutrientes Ca y Ma (kg/ha) la disponibilidad en el suelo cubre las necesidades de los 5 cultivos priorizados, por lo que no se debe pensar en aplicaciones adicionales.

### 3) La pendiente como factor restrictivo de la productividad de cultivos

Las condiciones topográficas que presentan los suelos de YLP muestran que tienen una variabilidad en cuanto a las pendientes, El mapa de pendientes nos refleja que la mayor presencia es aquellas que están por encima de los 18 grados, esta situación se constituye en una limitante para los cultivos priorizados porque el rendimiento es bajo en estas condiciones. Evidentemente algunos sectores han incorporado medidas de manejo de suelo como ser las terrazas de formación lenta que permiten un mejor manejo del cultivo.

Por la topografía montañosa con pendientes pronunciadas del sector sur de YLP hace necesaria la construcción de terrazas, y surcos en lugares con pendientes baja a media. Esto en razón de realizar un manejo adecuado de los cultivos en suelos con pendientes mayores a cinco grados, por ello se deben implementar obras de conservación de suelo como acequias, barreras vivas, barreras muertas, formación de terrazas, agroforestería con regeneración natural y otras más. En todos los casos el porcentaje de la pendiente es el factor determinante a manejar y el propósito de las obras es reducir su posible efecto, en especial que la pendiente está asociada a la erosión, ya que a mayor pendiente mayor probabilidad que los suelos pierdan material (arena, limo y arcilla) por riego y en época de lluvia.

El segundo grupo corresponde a las zonas que presentan pendientes comprendidas de 5° y 10 grados (desde 10 a 18%), esta condición permite que se pueda manejar el cultivo de cacao. Finalmente están las zonas que presentan pendientes menores a 5 grados (menores a 10%) dentro de los cuáles la parte norte del municipio de Caranavi y aproximadamente el 75% del municipio de Palos Blancos permiten el manejo de todos los cultivos priorizados, tal como se muestra en el mapa 50 del Anexo 2.

**4) La profundidad efectiva como factor restrictivo de la productividad de cultivos**

En YLP la topografía tiene su importancia e incidencia en el manejo de los cultivos de banano, cacao, café, cítricos y otros más. Los suelos identificados presentan profundidades efectivas entre de 0 - 10 cm y de 0-20 cm (al menos 12% de la superficie total) siendo su límite en el subsuelo grava o material parental.
Esta condición no permite a los cultivos priorizados tener un desarrollo normal, ya que estos cultivos requieren entre sus condiciones profundidades de hasta de 50 cm o mayores. A este factor restrictivo se debe añadir la pendiente que impide el crecimiento normal de las raíces.
Para superar la limitante de pendientes asociada a la poca profundidad, han tenido que ser manejadas a través de diferentes prácticas agrícolas, entre ellas realización de terrazas y cultivos en contorno en las áreas con pendientes menores al 25%.
Es importante realizar levantamientos edafológicos a mayor detalle en las mejores tierras de la zona de Yungas YLP que permitan establecer con mayor precisión las potencialidades y limitantes.

## 4.3. Socialización de mapas de fertilidad

Una vez identificadas las condiciones de los suelos en cuanto a la disponibilidad de nutrientes y los factores limitantes para el normal desarrollo de los cultivos priorizados, se estableció el día y lugar en el TCbba para la socialización de los resultados del presente trabajo. Esta actividad fue realizada a técnicos del MDRyT y sus dependencias, técnicos de FONADIN, técnicos de GAMs de esta región e invitados que fueron considerados para el mencionado taller.

Una vez identificadas las condiciones de los suelos en cuanto a la disponibilidad de nutrientes y los factores limitantes para el normal desarrollo de los cultivos priorizados, se estableció el día y lugar en el YLP para la socialización de los resultados del presente trabajo. Esta actividad fue realizada a técnicos del MDRyT y sus dependencias, técnicos de FONADIN, técnicos de GAMs de esta región e invitados que fueron considerados para el mencionado taller.

Se realizaron dos talleres de socialización con los siguientes resultados:

1.- En el TCbba se realizó el taller en el Municipio de Chimoré, en los ambientes de la Mancomunidad de Municipios de Región Trópico en fecha 26 y 27 de septiembre de 2019. En este taller se contó con la participación de los técnicos municipales quienes después de ver y escuchar la presentación realizaron preguntas de interés para aplicarlas en su área de trabajo (ver listas y fotos en anexo 4).

2.- En YLP se realizó el taller en la ciudad de La Paz, en los ambientes del Fondo Nacional de Desarrollo Integral (FONADIN) en fecha 2 de octubre de 2019. En este taller se contó con la participación de los técnicos de ésta institución que están designados en cada uno de los municipios quienes después de ver y escuchar la presentación realizaron preguntas de interés para aplicarlas en su área de trabajo (ver listas y fotos en anexo 4).

# 5. CONCLUSIONES

## 5.1. Trópico de Cochabamba

1) Los suelos del TCbba son categorizados como suelos ácidos, dentro de los cuales estan aquellos que presentan un nivel ligeramente ácido hasta los que son considerados fuertemente ácidos; la categoría que tiene mayor predominio es la denominada fuertemente ácidos.
2) Existe variabilidad en los resultados de las variables texturas, pH, materia orgánica (%), fósforo (mg $kg^{-1}$), calcio (cmol (+) $kg^{-1}$), magnesio (cmol (+) $kg^{-1}$), potasio (cmol (+) $kg^{-1}$), saturación de Al (%), saturación de bases (%) en las profundidades 0-20 cm y 20-40cm.
3) Existe predominancia de la categoría denominada fuertemente ácidos, por lo cual los suelos del TCbba presentan elevados valores de aluminio que inhiben la disponibilidad de calcio, magnesio y fósforo.
4) Existe una predominancia de valores altos de saturación de aluminio, por ello se entiende que incide en el hecho que los suelos tienen bajos niveles de CICE y saturación de bases con efecto en el intercambio de cationes entre el suelo y la planta en bajo.
5) Los resultados de los muestreos de suelos demuestran que existe variabilidad en la fertilidad (baja, media y alta) en los suelos del TCbba, sin embargo, se han identificado un predominio de la categoría de suelos con baja fertilidad.
6) La acidez del suelo es el primer factor restrictivo de la productividad de cultivos priorizados banano, café, cítricos, palmito y piña porque los suelos del TCbba son ácidos y presentan mayoritariamente la condición de fuertemente ácidos.
7) El cálculo de encalado en base al porcentaje de saturación de aluminio dió como resultado diversidad de valores porque los valores críticos de tolerancia al aluminio de los cultivos priorizados son diferentes para cada uno y no existe un valor oficial de esta tolerancia para los cultivos priorizados en Bolivia, además existe variabilidad del porcentaje de saturación de aluminio de país a país para éstos cultivos.
8) La baja fertilidad es el segundo factor restrictivo de los suelos del TCbba porque para obtener alta productividad de los cultivos priorizados todos ellos requieren suelos con mediana a alta disponibilidad de nutrientes, alta saturación de bases y baja saturación de aluminio (alta fertilidad).
9) El mal drenaje es el tercer factor restrictivo de los suelos del TCbba incidiendo en la disminución de la productividad de los cultivos priorizados porque ellos requieren suelos con moderado a buen drenaje para que los procesos físicos puedan llevarse a acabo sin restricciones.
10) La profundidad efectiva de los suelos de TCbba no es un factor restrictivo, si existen suelos con baja profundidad, pero la mayoría de éstos presentan una variación de suelos con moderada profundidad a suelos profundos.
11) Uno de los factores que inciden en la producción y productividad de los cultivos priorizados es el suelo, sin embargo, existen otros factores como el clima (precipitación y temperatura), la variedad del cultivo adaptado a las condiciones edafoclimáticas y la forma de manejo que son las demás condiciones que en conjunto favorecen positivamente al crecimiento de los cultivos priorizados.

## 5.2. Yungas de La Paz

1) Los suelos de YLP son categorizados como suelos ácidos, dentro de los cuales están aquellos que presentan un nivel ligeramente ácido hasta los que son considerados fuertemente ácidos; la categoría que tiene mayor predominio es la denominada fuertemente ácidos.
2) Existe variabilidad en los resultados de las variables texturas, pH, materia orgánica (%), fósforo (mg $kg^{-1}$), calcio (cmol $_{(+)}$ $kg^{-1}$), magnesio (cmol $_{(+)}$ $kg^{-1}$), potasio (cmol $_{(+)}$ $kg^{-1}$), saturación de Al (%), saturación de bases (%) en las profundidades 0-20 cm y 20-40cm.
3) Existe predominancia de la categoría denominada fuertemente ácidos, por lo cual los suelos de YLP presentan elevados valores de aluminio que inhiben la disponibilidad de calcio y fósforo.
4) Existe una predominancia de valores bajos de saturación de aluminio, por ello se entiende que incide en el hecho que los suelos tienen medianos a altos niveles de CICE y saturación de bases con efecto en el intercambio de cationes entre el suelo y la planta en bajo.
5) Los resultados de los muestreos de suelos demuestran que existe variabilidad en la fertilidad (baja, media y alta) en los suelos de YLP, pero se ha identificado una predominancia de la categoría con mediana fertilidad.
6) La acidez del suelo es el primer factor restrictivo de la productividad de cultivos priorizados banano, cacao, café y cítricos porque los suelos de YLP son ácidos y presentan mayoritariamente la condición de fuertemente ácidos.
7) El cálculo de encalado en base al porcentaje de saturación de aluminio dio como resultado diversidad de valores porque los valores críticos de tolerancia al aluminio de los cultivos priorizados son diferentes para cada uno y no existe un valor oficial de esta tolerancia para los cultivos priorizados en Bolivia, además existe variabilidad del porcentaje de saturación de aluminio de país a país para estos cultivos.
8) La mediana fertilidad es el segundo factor restrictivo de la productividad de cultivos priorizados porque todos ellos requieren suelos con mediana a alta disponibilidad de nutrientes, alta saturación de bases y baja saturación de aluminio (alta fertilidad).
9) Las pendientes mayores a 5 grados (10 %) son el tercer factor restrictivo porque los rendimientos de los cultivos priorizados disminuyen considerablemente a medida que la pendiente del suelo va incrementándose.
10) La restricción de profundidad efectiva es el cuarto factor restrictivo de la productividad de los cultivos priorizados porque existen suelos superficiales y los cultivos priorizados requieren suelos con moderada profundidad a profundos.
11) Uno de los factores que inciden en la producción y productividad de los cultivos priorizados es el suelo, sin embargo, existen otros factores como el clima (precipitación y temperatura), la variedad del cultivo adaptado a las condiciones edafoclimáticas y la forma de manejo que son las demás condiciones que en conjunto favorecen positivamente al crecimiento de los cultivos priorizados.

**Sobre el uso de herramientas SIG**

1) La existencia de valores extremos, ya sean por exceso o por defecto, pueden afectar la estacionariedad de los datos y finalmente, la calidad de la estimación. Definir si estos son eliminados o no, requiere del análisis contextual de dichos datos; para este estudio, los criterios usados para la eliminación obedecieron a errores en la medición en campo y/o a concentraciones anómalas puntuales dentro del área de estudio y en la transcripción a la base de datos.
2) Las técnicas geoestadísticas en comparación con las tradicionales presentan mayor confiabilidad, ya que consideran la correlación espacial para predecir un valor asignando pesos o ponderaciones a los puntos que se consideran cercanos para la estimación. Para este caso, el Kriging constituye una técnica ideal para representar las variables del fenómeno objeto de estudio ya que, en los resultados obtenidos de la estimación de las variables, las confiabilidades estuvieron por encima del 90%.
3) El Kriging muestra zonas en las cuales las variables cumplen en mayor o menor grado los valores críticos para encontrar los valores de los contenidos y dependiendo del contenido.
4) El modelo espacial propuesto para este trabajo, en especial la escogencia de los tipos de estimadores Kriging, responde a los objetivos planteados para realizar las predicciones y caracterizar la calidad química de los suelos, convirtiéndose en una metodología útil para el tratamiento de estudio de suelos.

# 6. RECOMENDACIONES

1) Es necesario realizar investigaciones más a detalle para conocer la respuesta a la aplicación de nutrimentos en las distintas zonas del TCbba.
2) Es importante densificar los muestreos en aquellas zonas que poseen pocos muestreos de suelos y se debe realizar levantamientos edafológicos a mayor detalle en la zona del TCbba.
3) Es necesario realizar investigaciones más a detalle para conocer la respuesta a la aplicación de nutrimentos en las distintas zonas del YLP.
4) Es importante densificar los muestreos en aquellas zonas que poseen pocos muestreos de suelos y se debe realizar realizar levantamientos edafológicos a mayor detalle en la zona del YLP.

## BIBLIOGRAFIA


1. AGRUCO. 1988. Manual práctico para la interpretación de análisis de suelos en laboratorio. Universidad Mayor de San Simón. 42 p.
2. Botero P. J. 1978. Fisiografía y Estudio de Suelos. Centro Interamericano de Fotointerpretación (CIAF), Bogotá, Colombia.
3. Burrough, P. A. 1986. Principles of Geographical Information Systems for Land Resources Assessment. New York: Oxford University Press.
4. Castellón, A. 1992. El cultivo del Café en Santa Cruz. Manual de recomendaciones. Santa Cruz, Bolivia. 188 p.
5. Cortés A. y Malagón D. 1984. Los Levantamientos Agrológicos y sus Aplicaciones Múltiples, Bogotá, Colombia, 360 p.
6. Cochrane T. T. 1871. Una guía para la interpretación de datos de laboratorio. Santa Cruz, Bolivia. 19 p.
7. EUROCNSULT. 1999. Zonificación agroecológica y propuesta técnica del plan de uso del suelo de la región amazónica del departamento de La Paz. 181 p.
8. Ferrufino. A. 2001. Respuesta a la fertilización en los cultivos comerciales más importantes del Trópico de Cochabamba. North Carolina State University, Proyecto CONCADE, DAI. 46 p.
9. Ferrufino, A. y L. Meneses. 2003. Mapas de suelos del Trópico de Cochabamba e identificación de restricciones edáficas para cultivos de banano, palmito, piña y pastos. MEMORIAS DEL III CONGRESO DE LA SOCIEDAD BOLIVIANA DE LA CIENCIA DEL SUELO, SANTA CRUZ, SEPTIEMBRE 2003. 31 p.
10. Ferrufino, A. y L. Meneses. 2004. Los suelos del Trópico de Cochabamba (Bolivia): Identificación de restricciones edáficas para cultivos de banano, palmito, piña y pastos. Potash & Phosphate Institute. Informaciones Agronómicas del Cono Sur (Argentina) 21: 1-7.
11. Ferrufino, Armando y Meneses, Luis. 2004. Los suelos del Trópico de Cochabamba, Identificación de restricciones edáficas para cultivos de banano, palmito, piña y pastos, Bolivia.
12. Gribov, A., y K. Krivoruchko (2012). "Nueva transformación flexible de datos no paramétricos para el Kriging Transgalagiano". Geoestadística Oslo 2012, Geología Cuantitativa y Geoestadística, Volumen 17, Parte 1, pp. 51–65, Países Bajos: Springer.
13. Giraldo-Henao, R. 2002. Introducción a la geoestadística teórica y aplicada. Bogotá: Departamento Estadística Universidad Nacional.
14. Gongwe, W., & Jianping, C. 2008. Mineral Resource Prediction and Assessment of Copper Multi-mineral Deposit based on tecnology GIS in the North of Sanjiang Region, China. ScienceDirect, 15 (4), pp. 27-32.
15. Hardy F. 1970. Suelos Tropicales. Pedología Tropical con énfasis en América. Original traducido por Rufo Bazán, Herrero Hermanos, Sucesores S. A. México. 335 p.
16. Harris J., R., Wilkinson, L., & Grunsky, E. 2000. Effective use and interpretation of lithogeochemical data in regional mineral exploration programs: application of Geographic Information Systems (GIS) technology. Ore Geology Reviews, 16 (3-4), pp. 107-143.

17. Heine, G. W. 1986. "A Controlled Study of Some Two-Dimensional Interpolation Methods". COGS Computer Contributions 3 (no. 2): 60–72.
18. Henríquez C., Killorn R., Bertsch F., Sancho F. 2005. La geostadística en el estudio de la variación espacial de la fertilidad del suelo mediante el uso del interpolador Kriging. Agronomía Costarricense 29(2):73-81. [ Links ]
19. Katyal J. C. y Randhawa N. S. 1986. Micronutrientes. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y Alimentación (FAO). Fertilizantes y Nutrición Vegetal 7. 93 p.
20. Krivoruchko, K. (2011). Análisis de datos estadísticos espaciales para usuarios de SIG. Redlands, CA: Esri Press, 928 pp.
21. Lapworth, D., Knights, K., Key, R., Johnson, C., Ayoade, E., Adekanmi, M., y otros. 2012. Geochemical mapping using stream sediments in west-central Nigeria: Implications for environmental studies and mineral exploration in West Africa. Applied Geochemistry, 27 (6), pp. 1035-1052.
22. Londoño, L., & Valdés, J. C. 2012. Geoestadística aplicada. Editorial Académica Española.
23. McBratney, A. B. y R. Webster. "Choosing Functions for Semi-variograms of Soil Properties and Fitting Them to Sampling Estimates". Journal of Soil Science 37: 617–639. 1986.
24. Mejia Rivera, O., Betancur Vargas, T., & Londoño-Ciro, L. 2007. Aplicación de técnicas geoestadísticas en la hidrogeología del bajo cauca antioqueño. Dyna. Universidad Nacional de Colombia, 74 (152), pp. 137-149.
25. Mueller T.G. 2007. Map quality assessment for site-specific fertility management, pp.103-120. In: D. Clay and F. Pierce (ed.). GIS Application in Agriculture. CRC Press. [ Links ]
26. Oliver, M. A. "Kriging: A Method of Interpolation for Geographical Information Systems". International Journal of Geographic Information Systems 4: 313–332. 1990.
27. Partington, G. 2010. Developing models using GIS to assess geological and economic risk: An example from VMS copper gold mineral exploration in Oman. Ore Geology Reviews, 38 (3), pp. 197-207.
28. Petersen G.W., Bell J.C., Mcsweeney K., Nielsen G.A., Robert P.C. 1995. Geographic information systems in agronomy. Advances in Agronomy 55:67-105. [ Links ]
29. Press, W. H., S. A. Teukolsky, W. T. Vetterling y B. P. Flannery. Numerical Recipes in C: The Art of Scientific Computing. New York: Cambridge University Press. 1988.
30. Proyecto AD/BOL/01/F57. 2012. Plan de Ordenamiento de los Yungas de La Paz. UNODC - Bolivia. 310 pp.
31. Proyecto AD/BOL/01/F57. 2012. Plan de Ordenamiento de los Yungas de La Paz. UNODC - Bolivia. 310 pp.
32. Proyecto AD/BOL/01/F57. 2012. Caracterización de la Fertilidad de Suelos en los municipios de La Asunta y Palos Blancos. UNODC - Bolivia. 77 pp.
33. Robinson T.P., Metternicht G. 2006. Testing the performance of spatial interpolation techniques for mapping soil properties. Computers and Electronics in Agriculture 50:97–108. [ Links ]
34. Rodríguez, R. Formulación de recomendaciones para la fertilización de los cultivos: una versión técnica. Cochabamba, Bolivia. 2007, 86 p.
35. Royle, A. G., F. L. Clausen y P. Frederiksen. "Practical Universal Kriging and Automatic Contouring". Geoprocesamiento 1: 377–394. 1981

36. Sánchez P. 1981. Suelos del Trópico Características y Manejo. Traducido por Edilberto Camacho, Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura, San José, Costa Rica. 634 p.
37. Tomczak M. 1998. Spatial interpolation and it uncertainty using automated anisotropic inverse distance weighting (IDW) cross validation-Jackknife approach. Journal of Geographic Information and Decision Analysis 2(2):18-30. [ Links ]
38. YPFB. 2000. Compendio de geología de Bolivia. YPFB-SERGEOMIN. Revista número 1-2. 214 p.

# 7. ANEXOS