

Universidad Estatal Amazónica



Centro de Postgrados

Maestría en Agronomía, Mención en Sistemas Agropecuarios

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de
Magíster en Agronomía, mención en Sistemas Agropecuarios**

**Cambio de uso de la tierra y fertilidad edáfica en la zona alta de
la cuenca del río Napo**

Autor: Ing. Frank Ramiro Goyes Vera

Director del Proyecto: Dr. C. Carlos Alfredo Bravo Medina

Puyo – Ecuador

2018

DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS

Yo, Frank Ramiro Goyes Vera con cédula de identidad 1718528324, declaro ante las autoridades educativas de la Universidad Estatal Amazónica, que el contenido del Proyecto de Innovación titulado: **“CAMBIO DE USO DE LA TIERRA Y FERTILIDAD EDÁFICA EN LA ZONA ALTA DE LA CUENCA DEL RÍO NAPO”**, es absolutamente original, auténtico y personal.

En tal virtud y según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente, certifico libremente que los criterios y opiniones que constan en el Proyecto de Innovación son de exclusiva responsabilidad del autor y que los resultados expuestos pertenecen a la Universidad Estatal Amazónica.



Frank Ramiro Goyes Vera

C.I. 1718528324

AUTOR



UNIVERSIDAD ESTATAL AMAZÓNICA

Centro de Postgrados

AVAL

Quien suscribe CARLOS ALFREDO BRAVO MEDINA, Director del Trabajo de Titulación, modalidad Proyecto de Innovación titulado: CAMBIO DE USO DE LA TIERRA Y FERTILIDAD EDÁFICA EN LA ZONA ALTA DE LA CUENCA DEL RÍO NAPO a cargo de FRANK RAMIRO GOYES VERA, egresado(a) de la primera cohorte de la Maestría en Agronomía mención Sistemas Agropecuarios de la Universidad Estatal Amazónica.

Certifico haber acompañado el proceso de elaboración del Proyecto de Innovación y considero cumple los lineamientos y orientaciones establecidas en la normativa vigente de la institución por lo que se encuentra listo para ser sustentado.

Por lo antes expuesto se avala el Proyecto de Innovación para que sea presentado ante la Dirección de Postgrados como forma de titulación como Magíster en Agronomía mención Sistemas Agropecuarios y que dicha instancia considere el mismo a fin de que tramite lo que corresponda.

Para que así conste, firmo la presente a los 30 días del mes de octubre de 2018.

Atentamente,

Carlos Alfredo Bravo Medina

DIRECTOR DE TRABAJO DE TITULACIÓN



UNIVERSIDAD ESTATAL AMAZÓNICA

SISTEMA ANTIPLAGIO URKUND



Oficio No. 064-IL-UEA-2018

Puyo, 20 de noviembre de 2018

Por medio del presente **CERTIFICO** que:

El trabajo de titulación correspondiente al ING. GOYES VERA FRANK RAMIRO, con C.I. 1718528324, con el Tema: "**CAMBIO DE USO DE LA TIERRA Y FERTILIDAD EDÁFICA EN LA ZONA ALTA DE LA CUENCA DEL RÍO NAPO**", de la Maestría en Agronomía, Mención Sistemas Agropecuarios, Director de proyecto PhD. Carlos Bravo Medina, ha sido revisado mediante el sistema antiplagio URKUND, reportando una similitud del 2%, Informe generado con fecha 20 de noviembre de 2018 por parte del director, conforme archivo adjunto.

Particular que comunico para los fines pertinentes

Atentamente,

Ing. Italo Marcelo Lara Pilco MSc.

ADMINISTRADOR DEL SISTEMA ANTIPLAGIO URKUND – UEA - .

**EL TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN DEL PROYECTO DE INNOVACIÓN
CERTIFICA QUE:**

El presente trabajo: "CAMBIO DE USO DE LA TIERRA Y FERTILIDAD EDÁFICA
EN LA ZONA ALTA DE LA CUENCA DEL RÍO NAPO", bajo la responsabilidad del
egresado, Ing. Frank Ramiro Goyes Vera, ha sido meticulosamente revisado, autorizando
su presentación:

MIEMBROS DEL TRIBUNAL

.....
Dr. C. Yoel Rodríguez, PhD.
PRESIDENTE DEL TRIBUNAL

.....
Dra. C. Ruth Arias, PhD.
MIEMBRO DEL TRIBUNAL

.....
Dr. C. Yudel García, PhD.
MIEMBRO DEL TRIBUNAL

DEDICATORIA

Primeramente, dedico este trabajo a Dios, que omnipresente y omnipotente es todo lo que conocemos y sentimos, es la humanidad misma a la cual pertenezco y a la cual sirvo, es el amor y la razón de mi existencia.

Dedico este trabajo especialmente a mis padres, Ramiro Goyes y Gloria Vera, que son las personas más importantes en mi vida, aquellas que siempre han estado junto a mí en cada paso, a quienes amo inmensamente, ellos son los pilares que han hecho de mí un hombre de bien, perseverante, disciplinado y comprometido en todo lo que hago. Sin el esfuerzo y sacrificio por ellos brindado, no hubiera sido posible la realización de este trabajo.

Mi labor no termina aquí, trasciende y continúa, el conocimiento es el legado del hombre y la huella que todos dejamos en aras del saber contribuye a un proyecto mucho mayor, por eso mi obra está dedicada a todos los jóvenes y gente apasionada por la ciencia al igual que yo, a quienes invito a disfrutar de la naturaleza, sus maravillosos fenómenos y la aventura de investigar. Anímense a ser los siguientes protagonistas, ya que las posibilidades son infinitas, el esfuerzo es la clave y nuestras manos aún pueden salvar el mundo en el que vivimos.

Por los nobles ideales de la Ilustración, el buen sentido de nuestra consciencia y una vida sostenible para todos.

Frank Ramiro Goyes Vera

AGRADECIMIENTO

Agradezco en primer lugar a Dios, por concederme la oportunidad y la gracia de vivir, por fortalecer mi espíritu y mi cuerpo, preservar mi salud y expandir mi visión del mundo a través del pensamiento.

Ofrezco el más profundo agradecimiento a mis padres, Ramiro Goyes y Gloria Vera, por el amor, la paciencia, la disciplina y sobre todo el ejemplo con el que han sabido educarme. Gracias a ellos he podido cultivar el ideal de justicia en mi corazón, la prudencia, templanza y fortaleza, virtudes todas ellas, que me han permitido alcanzar una meta tras otra.

Me es importante agradecer a la Universidad Estatal Amazónica (UEA), institución que me ha brindado una de las mejores experiencias personales y académicas en mi formación profesional, gracias por haberme permitido colaborar estrechamente con colegas, profesores, técnicos e investigadores de excelente calidad humana, por los recursos y las facilidades a mi disposición, que fueron de crucial ayuda.

Agradezco de manera muy especial a mi profesor y director de trabajo de titulación, Dr. Carlos Bravo y a la Ing. Sandra Soria, por haber confiado en mí desde nuestros primeros contactos, por su magnífico trabajo de coordinación, gestión, paciencia y solidaridad. Gracias a todos mis profesores del programa de maestría, de quienes asimilé lo mejor de sus enseñanzas y su ejemplo, gracias a los compañeros investigadores, Ing. Daysi Changoluisa, Ing. Daniel Paguay, por su buena voluntad, compromiso y amistad en el desarrollo de la presente investigación.

Por último, pero con el mayor de mis afectos, agradezco enormemente a todos los equipos de “terranautas”, jóvenes estudiantes de ingeniería ambiental de la UEA que se ganaron mi profunda amistad, respeto y admiración por su calidad humana y colaboración en este proyecto, este trabajo es gracias a ellos: Gabriela Moreno, Gonzalo Tomalá, Katherin Gaibor, Ney Grefa, Richard Barroso, Thony Huera, Daniel Álvarez, Cristina Toa, y todos los demás que por cuestión de espacio no avanzo a citar en estas líneas. Gracias a todos.

Frank Ramiro Goyes Vera

RESUMEN EJECUTIVO

La Región Amazónica Ecuatoriana por efecto de los cambios de uso de la tierra ha experimentado altas tasas de deforestación que destruyen su biodiversidad y el recurso suelo. Esta investigación, enmarcada en la línea de Gestión y Conservación Ambiental, se realizó en tres zonas de la cuenca alta del río Napo, provincia de Pastaza, Ecuador. Se determinó el efecto del cambio de uso de la tierra de bosque a sistemas de *chakra*, ganadería, caña de azúcar y papa china sobre los parámetros asociados a la fertilidad integral de los suelos. Los resultados de fertilidad física fueron adecuados en el horizonte superficial, lo cual está relacionado con el contenido de materia orgánica. El pH fue menor a 5 entre los usos de la tierra. En el horizonte superficial, la mayoría de usos de ganadería en Boayacu y Simón Bolívar alcanzaron 0,32 meq 100 ml de K^{1+} y 0,75 meq 100 ml de Mg^{2+} , igualmente, los usos con papa china de Llandia alcanzaron 11,1 mg kg^{-1} de P disponible, posiblemente influenciados por fertilización orgánica, y acumularon 902,64 kg ha^{-1} de biomasa de hojarasca en la misma zona. Las relaciones de parámetros de fertilidad se hallaron entre la Pr y Pt, Mg^{2+} y Ca^{2+} intercambiables. En el horizonte superficial predominaron las relaciones inversas entre Pr y Pa, Pr y Ksat, COT y Da, pH y acidez intercambiable, mientras en la segunda profundidad se relacionaron negativamente la Pt y Da. Los ACP explicaron del 60 al 81% de la varianza total de la fertilidad.

Palabras clave: uso de la tierra, fertilidad del suelo, Amazónica, ACP, Pastaza.

EXECUTIVE ABSTRACT

The Ecuadorian Amazon Region due to changes in land use has experienced high rates of deforestation that destroy its biodiversity, and the soil resource. This investigation settled in the line of Management and Environmental Conservation, was carried out in three zones in the upper Napo River basin, province of Pastaza, Ecuador. The study determined the effect of the change land use of forest to systems as *chakra*, livestock, sugarcane and taro on the parameters associated to the soil integral fertility. The results of physical fertility were adequate in the surface horizon, which is closely related to the content of organic matter. The pH was less than 5 between the land uses. In the surface edaphic horizon, most cattle land uses in Boayacu and Simón Bolívar reached 0,32 meq 100 ml of K^{1+} and 0,75 meq 100 ml of Mg^{2+} , similarly, the taro land uses of Llandia reached 11,1 mg kg^{-1} of available P, possibly influenced by organic fertilization, and they accumulated 902,64 $kg\ ha^{-1}$ of leaf litter biomass in the same zone. The relationships were found between Pr and Pt, interchangeable Mg^{2+} and Ca^{2+} . In the surface horizon, were predominant the negative relationships between Pr and Pa, Pr and Ksat, TOC and Da, pH and interchangeable acidity, while in the subsurface horizon Pt was negatively related with Da. The PCA explained between 60 and 81% of the total variance of the fertility.

Keywords: land use, soil fertility, Amazon, PCA, Pastaza.

TABLA DE CONTENIDOS

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1.Problema científico.....	2
1.2.Hipótesis de la investigación.....	2
1.3.Objetivo general.....	3
1.4.Objetivos específicos.....	3
2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1.Tierra.....	4
2.1.1. Suelo.....	4
2.1.2. Propiedades físicas.....	4
2.1.3. Propiedades químicas.....	5
2.1.4. Propiedades biológicas.....	5
2.2.Uso de la tierra.....	5
2.3.Cambio de uso de la tierra.....	5
2.4.Tipos de uso de la tierra de la RAE y su relación con la fertilidad.....	6
2.4.1. Bosque.....	6
2.4.2. Sistema tipo <i>chakra</i>	6
2.4.3. Ganadería.....	7
2.4.4. Cultivo de caña de azúcar.....	7
2.4.5. Cultivo de papa china.....	8
2.5.Los cambios de uso de la tierra y la fertilidad integral del suelo en la RAE.	8
2.6.ACP de la fertilidad del suelo en la RAE.....	11
3. MATERIALES Y MÉTODOS.....	12
3.1.Localización.....	12
3.2.Tipo de investigación.....	13
3.3.Métodos de investigación.....	13
3.4.Muestreo de suelo y vegetación.....	14
3.5.Medición de propiedades del suelo y vegetación.....	15
3.5.1. Propiedades físicas del suelo.....	15
3.5.2. Propiedades químicas del suelo.....	15

3.5.3. Propiedades biológicas del suelo y vegetación.....	15
3.6.Tratamiento de datos	15
3.7.Recursos humanos y materiales.....	17
3.7.1. Recursos humanos	17
3.7.2. Materiales	17
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	19
4.1.Caracterización de la fertilidad física de las tres zonas bajo estudio (Boayacu, Simón Bolívar y Llandia)	19
4.1.1. Densidad aparente (Da)	19
4.1.2. Conductividad hidráulica saturada (Ksat)	21
4.1.3. Porosidad total (Pt)	24
4.1.4. Porosidad de aireación (Pa)	26
4.1.5. Porosidad de retención (Pr)	29
4.2.Caracterización de la fertilidad química de las tres zonas bajo estudio (Boayacu, Simón Bolívar y Llandia).....	33
4.2.1. pH	33
4.2.2. Acidez intercambiable ($Al^{3+}+H^{1+}$).....	36
4.2.3. Aluminio intercambiable (Al^{3+}).....	38
4.2.4. Disponibilidad de nutrientes	41
4.2.4.1.Fósforo disponible (P)	41
4.2.4.2.Bases intercambiables (K^{1+} , Ca^{2+} y Mg^{2+})	44
4.2.4.3.Nivel de nutrientes en el suelo.....	52
4.3.Caracterización de la fertilidad biológica de las tres zonas bajo estudio (Boayacu, Simón Bolívar y Llandia).....	57
4.3.1. Carbono orgánico total (COT).....	57
4.3.2. Biomasa de hojarasca	59
4.4.Asociación de parámetros de fertilidad edáfica en Boayacu, Simón Bolívar y Llandia bajo distintos usos de la tierra	62
4.5.Análisis de componentes principales de fertilidad edáfica en Boayacu, Simón Bolívar y Llandia	75
5. CONCLUSIONES.....	88
6. RECOMENDACIONES	89

BIBLIOGRAFÍA	90
ANEXO 1	100
ANEXO 2	100

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Localización geográfica de los usos de la tierra de las tres zonas de estudio (Boayacu, Simón Bolívar y Llandia) en la Región Amazónica Ecuatoriana.....	12
Figura 2.	Esquema de muestreo sistemático para la evaluación de la fertilidad del suelo en cada parcela de uso de la tierra seleccionada.....	14
Figura 3.	Densidad aparente bajo distintos usos de la tierra en tres zonas: X) Boayacu; Y) Simón Bolívar y Z) Llandia.....	20
Figura 4.	Conductividad hidráulica saturada bajo distintos usos de la tierra en tres zonas: X) Boayacu; Y) Simón Bolívar y Z) Llandia.....	22
Figura 5.	Distribución de la porosidad total bajo distintos usos de la tierra en tres zonas: X) Boayacu; Y) Simón Bolívar y Z) Llandia.....	25
Figura 6.	Distribución de la porosidad de aireación bajo distintos usos de la tierra en tres zonas: X) Boayacu; Y) Simón Bolívar y Z) Llandia.....	27
Figura 7.	Distribución de la porosidad de retención bajo distintos usos de la tierra en tres zonas: X) Boayacu; Y) Simón Bolívar y Z) Llandia.....	32
Figura 8.	pH bajo distintos usos de la tierra en tres zonas: X) Boayacu; Y) Simón Bolívar y Z) Llandia.....	34
Figura 9.	Acidez intercambiable bajo distintos usos de la tierra en tres zonas: X) Boayacu; Y) Simón Bolívar y Z) Llandia.....	37
Figura 10.	Aluminio intercambiable bajo distintos usos de la tierra en tres zonas: X) Boayacu; Y) Simón Bolívar y Z) Llandia.....	40
Figura 11.	Fósforo disponible bajo distintos usos de la tierra en tres zonas: X) Boayacu; Y) Simón Bolívar y Z) Llandia.....	42
Figura 12.	Potasio intercambiable bajo distintos usos de la tierra en tres zonas: X) Boayacu; Y) Simón Bolívar y Z) Llandia.....	45
Figura 13.	Calcio intercambiable bajo distintos usos de la tierra en tres zonas: X) Boayacu; Y) Simón Bolívar y Z) Llandia.....	48
Figura 14.	Magnesio intercambiable bajo distintos usos de la tierra en tres zonas: X) Boayacu; Y) Simón Bolívar y Z) Llandia.....	51
Figura 15.	Porcentaje de nutrientes suplidos por el suelo o fertilizantes, bajo distintos usos de la tierra en la zona de Boayacu.....	54

Figura 16.	Porcentaje de nutrientes suplidos por el suelo o fertilizantes, bajo distintos usos de la tierra en la zona de Simón Bolívar.....	55
Figura 17.	Porcentaje de nutrientes suplidos por el suelo o fertilizantes, bajo distintos usos de la tierra en la zona de Llandia.....	56
Figura 18.	Carbono orgánico total bajo distintos usos de la tierra en tres zonas: X) Boayacu; Y) Simón Bolívar y Z) Llandia.....	58
Figura 19.	Biomasa de hojarasca bajo distintos usos de la tierra en tres zonas: X) Boayacu; Y) Simón Bolívar y Z) Llandia.....	61
Figura 20.	Diagrama del análisis de componentes principales de las variables físicas, químicas y biológicas del suelo bajo distintos usos de la tierra de 0-10 cm y 10-30 cm de profundidad en la zona de Boayacu.....	78
Figura 21.	Diagrama del análisis de componentes principales de las variables físicas, químicas y biológicas del suelo bajo distintos usos de la tierra de 0-10 cm y 10-30 cm de profundidad en la zona de Simón Bolívar...	81
Figura 22.	Diagrama del análisis de componentes principales de las variables físicas, químicas y biológicas del suelo bajo distintos usos de la tierra de 0-10 cm y 10-30 cm de profundidad en la zona de Llandia.....	86

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Recursos humanos participantes en la investigación.....	17
Tabla 2.	Materiales de campo y laboratorio utilizados en la investigación.....	17
Tabla 3.	Reactivos y equipos de laboratorio utilizados en la investigación.....	18
Tabla 4.	Matriz de correlaciones de las variables físicas, químicas y biológicas del suelo a una profundidad de 0-10 cm entre distintos usos de la tierra de la zona de Boayacu.....	63
Tabla 5.	Matriz de correlaciones de las variables físicas, químicas y biológicas del suelo a una profundidad de 10-30 cm entre distintos usos de la tierra de la zona de Boayacu.....	66
Tabla 6.	Matriz de correlaciones de las variables físicas, químicas y biológicas del suelo a una profundidad de 0-10 cm entre distintos usos de la tierra de la zona de Simón Bolívar.....	68
Tabla 7.	Matriz de correlaciones de las variables físicas, químicas y biológicas del suelo a una profundidad de 10-30 cm entre distintos usos de la tierra de la zona de Simón Bolívar.....	70
Tabla 8.	Matriz de correlaciones de las variables físicas, químicas y biológicas del suelo a una profundidad de 0-10 cm entre distintos usos de la tierra de la zona de Llandia.....	72
Tabla 9.	Matriz de correlaciones de las variables físicas, químicas y biológicas del suelo a una profundidad de 10-30 cm entre distintos usos de la tierra de la zona de Llandia.....	74
Tabla 10.	Matriz de ACP de la fertilidad del suelo bajo distintos usos de la tierra en la zona de Boayacu.....	76
Tabla 11.	Matriz de ACP de la fertilidad del suelo bajo distintos usos de la tierra en la zona de Simón Bolívar.....	79
Tabla 12.	Matriz de ACP de la fertilidad del suelo bajo distintos usos de la tierra en la zona de Llandia.....	83

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO 1

Tabla A1.1.	Niveles críticos de parámetros de fertilidad edáfica para la interpretación de análisis de suelos.....	100
-------------	--	-----

ANEXO 2

Foto A2.1.	Muestreo de suelos y vegetación en los distintos usos de la tierra de la cuenca alta del río Napo: a) Bosque; b) <i>Chakra</i> ; c) Papa china; d) Caña de azúcar y e) Ganadería.....	100
Foto A2.2.	Preparación de muestras no alteradas de suelo y medición de K_{sat} ..	101
Foto A2.3.	Evaluación de la distribución de tamaño de poros en los suelos.....	101
Foto A2.4.	Preparación de muestras y análisis de Al^{3+} , acidez intercambiable y pH.....	101
Foto A2.5.	Análisis de P disponible y bases intercambiables por espectrofotometría.....	101

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

Aproximadamente la mitad de la superficie del planeta ha sido alterada directamente por el hombre, lo que ha alcanzado un nivel de transformación equiparable al de las eras glaciales. Según Aguayo, Pauchard, Azócar y Parra (2009), 1 206 millones de ha y 2 927 millones de ha fueron transformadas en terrenos de cultivo y de pastoreo respectivamente entre los años 1700 y 1990, lo que en conjunto constituye el mayor bioma terrestre al ocupar alrededor del 40% de la superficie del planeta.

En Ecuador, según los datos de la encuesta de superficie y producción agropecuaria continua (ESPAC), el área de labor agropecuaria ocupa el 19,01% (5,39 millones de ha) del territorio nacional, y está conformada en un 42,68% de su superficie por pastos cultivados (INEC, 2016). Todas las provincias del país se encuentran bajo presión por la confluencia del avance de la frontera agrícola, deforestación, ganadería, actividad minera y petrolera que afectan a los recursos naturales como el suelo (FLACSO, MAE y PNUMA, 2008).

La región amazónica representa cerca del 45% del territorio nacional, se considera una de las zonas con mayor biodiversidad (8% de las especies del mundo), tiene una alta riqueza de recursos naturales y forma parte del llamado pulmón de la tierra, donde se cumple parte del ciclo del carbono que es crucial para la ecología del planeta y el clima (Bravo *et al.*, 2017a). Sin embargo, esta región experimenta altas tasas de deforestación producto de los cambios de uso de la tierra, con la consiguiente destrucción de sus bosques, de la biodiversidad, del agua y del suelo, lo que representa el mayor impacto socio ambiental en la Amazonía (Bravo *et al.*, 2015).

El cambio de uso de la tierra a sistemas agrícolas, agroforestales y pecuarios y donde el suelo constituye un componente fundamental por las funciones que cumple, requiere estudios detallados que permitan entender su comportamiento para una adecuada gestión. Uno de los atributos importantes del recurso suelo relacionado con sus múltiples funciones es la fertilidad, la cual probablemente puede ser afectada por el cambio de uso.

Más allá de cuantificar la presencia de elementos esenciales, la fertilidad del suelo implica otros factores o características que pueden influenciar la disponibilidad de nutrientes para las plantas, como los parámetros físicos y biológicos, la mineralogía, el clima, entre otros (McGrath, Spargo y Penn, 2014).

La escasez de estudios de este tipo con un abordaje de enfoque integral de la fertilidad del suelo en la región amazónica, representa una oportunidad para el avance en el entendimiento del funcionamiento de este recurso y la generación de información base para la gestión sostenible en la zona.

Para ello, se planteó realizar un estudio transversal al seleccionar los principales usos de la tierra (parcelas de *chakra*, ganadería, caña de azúcar y papa china) y su comparación con el bosque como uso referencial en tres zonas de la cuenca alta del río Napo (Boayacu, Simón Bolívar y Llandia), localizadas en la provincia de Pastaza.

El presente trabajo constituye un aporte teórico y práctico, como insumo y herramienta para la elaboración de posteriores estudios de fertilidad edáfica a cargo de investigadores y otros académicos del sector público y privado. La investigación realizada sirve como base y guía para los tomadores de decisiones políticas en la administración pública territorial de la provincia de Pastaza, y posee utilidad práctica para las comunidades de la cuenca alta del río Napo en el diagnóstico de su recurso suelo.

1.1. Problema científico

En la Región Amazónica Ecuatoriana (RAE) la deforestación y el avance hacia sistemas agropecuarios minimizan la función del suelo relacionada con el reciclaje de nutrientes, y por lo tanto su fertilidad, lo que afecta el manejo de los sistemas.

1.2. Hipótesis de la investigación

El cambio de uso de la tierra de bosque a diversos sistemas agropecuarios como *chakra*, ganadería, caña de azúcar y papa china, generará alteraciones en la fertilidad del suelo de la zona alta de la cuenca alta del río Napo en la RAE.

1.3. Objetivo general

Evaluar el cambio de uso de la tierra de bosque a sistemas de *chakra*, ganadería, caña de azúcar y papa china, mediante indicadores asociados a la fertilidad del suelo en la zona alta de la cuenca alta del río Napo, RAE.

1.4. Objetivos específicos

- Caracterizar parámetros físicos, químicos y biológicos del suelo como indicadores del cambio de uso de la tierra (bosque, *chakra*, ganadería, caña de azúcar y papa china) sobre la fertilidad edáfica.
- Determinar la relación de parámetros físicos, químicos y biológicos del suelo que afectan a la fertilidad edáfica entre distintos usos de la tierra (bosque, *chakra*, ganadería, caña de azúcar y papa china).

CAPÍTULO II

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

El presente capítulo inicia con la conceptualización general de los términos “tierra”, “suelo” y “uso de la tierra”, a continuación, aborda el fenómeno del cambio de uso de la tierra, luego se detallan algunos de los tipos de uso más representativos en la RAE y su relación con la fertilidad del suelo. Posteriormente, se describen los cambios de uso de la tierra y su efecto sobre la fertilidad integral del suelo en la RAE, así como el análisis de componentes principales (ACP) que caracterizan esa fertilidad.

2.1. Tierra

Está definida ampliamente como el conjunto y relación entre variables de orden físico (suelo, clima, vegetación) y socioeconómico cultural (características socioculturales del agricultor, ubicación geográfica y características económicas de la región), de las que por ejemplo, depende la producción agrícola, y en ese contexto, el suelo es solo un componente de la tierra y sus conceptos no deben ser confundidos (Casanova, 2005).

2.1.1. Suelo

Según Casanova (2005), el suelo es la parte superior de la corteza terrestre, conformada por características físicas, químicas, biológicas y geológicas, de las que dependen el crecimiento de las plantas y el movimiento del agua.

2.1.1.1. Propiedades físicas

Determinan la capacidad de los usos de la tierra que componen. La condición física de los suelos mantiene la rigidez, fuerza de sostén, facilidad de penetración de raíces, aireación, capacidad de drenaje, almacenamiento hídrico, plasticidad y retención de nutrientes (Rucks, García, Kaplán, Ponce de León y Hill, 2004).

2.1.1.2. Propiedades químicas

El pH y la salinidad del suelo son parámetros que definen su fertilidad química. La fertilidad química es la capacidad que tiene el suelo para proveer nutrientes a las plantas en las cantidades necesarias (Maya, 2018).

2.1.1.3. Propiedades biológicas

El COT del suelo incide sobre las propiedades edáficas que afectan al rendimiento sostenido de los cultivos, lo que es posible debido a la relación del COT con la disponibilidad de nutrientes (Martínez, Fuentes y Acevedo, 2008). Por otra parte, la hojarasca junto con las raíces de las plantas, también afectan la estructura del suelo, ya que se relacionan con la captación de lluvia, la infiltración y pérdidas de agua (Drake, 2014).

2.2. Uso de la tierra

Es el resultado de la modificación de la cobertura de la tierra con fines de producción para satisfacer las demandas actuales de una sociedad consumista, de ese modo, se forman varias categorías de uso tales como: producción agrícola y pecuaria, producción forestal, asentamientos humanos, usos de recreación, parques, reservas e industrias (Sánchez, 1997).

2.3. Cambio de uso de la tierra

La mayor presión sobre los suelos es causada por la expansión de la frontera agrícola, la deforestación, la actividad agroindustrial, urbanización, actividad petrolera y minera (FLACSO *et al.*, 2008).

En Ecuador, al implementarse la Ley de la Reforma Agraria en 1960, se promovió la “transformación agrícola” y se intensificó el uso agrícola de la tierra, que sumado al inicio de la explotación petrolera en la década de 1970, conllevó a importantes migraciones y a la creciente colonización de la región amazónica, alterándose las condiciones naturales del medio. Por otro lado, los antiguos colonos amazónicos aún buscan más tierras e incrementan la deforestación incluso en suelos marginales de baja fertilidad y escasa vocación agrícola (FLACSO *et al.*, 2008).

2.4. Tipos de uso de la tierra de la RAE y su relación con la fertilidad

2.4.1. Bosque

A pesar de que en las tierras bajas tropicales se encuentran los bosques húmedos más esplendorosos del mundo, la fertilidad fisicoquímica de suelos ferralíticos de estos ecosistemas está entre las más bajas a nivel global debido a su baja capacidad de retención de nutrientes, baja saturación de bases, pH ácido y alta movilidad de aluminio (Al^{3+}) (Hernández, 2014a). Todo ello está relacionado con la composición del suelo con arcillas caolinitas típicas que son características de las regiones climáticas con altas temperaturas y humedad, de tal forma que la retención de nutrientes del suelo depende principalmente de sustancias húmicas, no obstante, en general los suelos de los bosques húmedos tropicales poseen una fertilidad que varía en función de su grado de meteorización, lixiviación (Hernández, 2014b) y eso se refleja en sus particulares propiedades fisicoquímicas edáficas.

En los ecosistemas forestales, la hojarasca al descomponerse permite más de la mitad de la absorción anual de nutrientes y representa la principal fuente nutritiva del suelo, que junto a las precipitaciones directas y los flujos corticales propician la mejor fertilidad edáfica (López *et al.*, 2013).

2.4.2. Sistema tipo *chakra*

Las *chakras* comprenden diversos sistemas agroforestales tradicionales, espaciales y temporales, practicados por las comunidades *Kichwas* para principalmente cubrir sus necesidades alimentarias anuales, sus principales productos de consumo son la yuca, plátano, naranjilla, palmito, café y cacao (Ordóñez, 2017).

En los sistemas de *chakras*, los *Kichwas* realizan una rotación de suelo cada dos a tres años, cada tres a cinco años o cada siete, de ese modo, luego de cultivar en un sitio establecen una nueva *chakra* en otra área y permiten que el suelo recupere su fertilidad (Santi, 2017). La intensidad de explotación y fertilidad de la *chakra* determina el tiempo en el que entra en período de descanso, sin intervención durante uno a tres años mientras en su lugar se forma un bosque secundario, no obstante, en algunos casos en que se reduce el período de descanso

para la intensificación de cultivos anuales, también se reduce la sostenibilidad del sistema (Arévalo, Vera y Grijalva, 2013).

2.4.3. Ganadería

Los suelos dedicados a la ganadería presentan una alta compactación debido al pisoteo continuo que realiza el ganado, esto en consecuencia provoca únicamente el establecimiento de pastos, ya que poseen raíces poco profundas y abundantes, por otra parte, la quema sucesiva de pasto de baja productividad aporta minerales al suelo, para la nutrición de las nuevas pasturas sembradas (Peña y Vanegas, 2010).

Según Jiménez, Rosas y Falla (2012), el efecto del pisoteo del ganado sobre las propiedades físicas edáficas se da en los primeros 15 cm del suelo y se debe al peso y número de animales, así como a las propiedades del terreno, y de ese modo, se incrementa la densidad aparente del suelo, disminuye el número de poros y se restringe el crecimiento y desarrollo de raíces, lo cual reduce la productividad vegetal.

Por otra parte, es notable la transferencia de nutrientes al suelo del potrero mediante las excretas de los animales, lo que representa un aporte en las proporciones necesarias para las plantas, compuesto por nitrógeno (N), potasio (K^{1+}) y azufre en la orina, mientras la mayoría del calcio (Ca^{2+}), magnesio (Mg^{2+}), el total del fósforo (P) orgánico poco asimilable y el P inorgánico de rápida disponibilidad son entregados por las heces, fertilización natural que se da cíclicamente en cortos períodos de tiempo, y que en caso de ser insuficiente por problemas de sobrepastoreo podría conllevar a pérdidas de la cubierta del pastizal, que ocasionan degradación y erosión del suelo (Cuenca, 2014).

2.4.4. Cultivo de caña de azúcar

La caña de azúcar es uno de los cultivos que más desgastan el suelo debido al ritmo y cantidad de sus cosechas, los nutrientes que más requiere son K^{1+} , N y P, no obstante, el suelo pierde casi toda su capacidad de proveerlos y por lo tanto su fertilización se vuelve imprescindible (García y Serrano, 2015).

Una práctica común en la cosecha de caña de azúcar es la “quema”, que reincorpora materia vegetal al suelo y lo restituye parcialmente (García y Serrano, 2015), sin embargo, también debe tenerse en cuenta que los cultivos de caña de azúcar son ecosistemas asociados a una alta cantidad de bacterias promotoras del crecimiento vegetal, que solubilizan minerales y mejoran la fertilidad del suelo (Cavazos y Payán, 2014).

Benítez (2016), indica que el sistema convencional de cosecha de caña de azúcar mediante quema, muestra una relativamente baja acumulación de hojarasca y residuos vegetales en el suelo, lo cual reduce la disponibilidad de alimento y energía para el desarrollo de los microorganismos benéficos que son biocatalizadores de nutrientes en el suelo y que mejoran la fertilidad edáfica.

2.4.5. Cultivo de papa china

En referencia a Miyasaka *et al.* (1991) (citado por Vega y Walter, 2003), los cuales manifiestan que los niveles altos de Al^{3+} en el suelo no afectan al cultivo de papa china, sus raíces tienen la habilidad de producir ácido cítrico durante la descomposición de la materia orgánica (MO). El ácido cítrico captura al Al^{3+} en su estructura, lo que anula su toxicidad y solubiliza el P de los compuestos inorgánicos del suelo para su fácil absorción por las plantas.

El suelo bajo cultivo de papa china merece especial cuidado con respecto al manejo de malezas a través del aporque y control manual, pues a pesar de que los rendimientos del cultivo dependen principalmente de dicha práctica, un exceso en la remoción de malezas puede exponer el suelo a procesos de erosión eólica e hídrica que inciden directamente en la pérdida de su fertilidad física (Arróliga y Blandón, 2015).

2.5. Los cambios de uso de la tierra y la fertilidad integral del suelo en la RAE

La Amazonía ecuatoriana es parte de la cuenca del Amazonas, que limita con la cordillera de los Andes en el sector con más pasado volcánico. Esta es una región única que ha sido configurada por la disposición de las estructuras geológicas y el cambio climático que la región ha sufrido durante los tiempos geológicos (Custode y Sourdat 1986).

Dos ambientes fisiográficos son dominantes en la región amazónica. Los relieves amazónicos se caracterizan por una disminución gradual de la altitud desde el oeste hasta el este, se asemejan a un conjunto de escaleras que generan dos paisajes característicos: (a) relieves sub-andinos, que incluyen corredores, cadenas montañosas y flancos; y (b) Amazonía peri-andina con colinas peri-andinas, y ambientes piedemontes y fluviales. En los relieves sub-andinos, las pendientes pronunciadas van de 600 a 3000 msnm., mientras que los relieves peri-andinos se encuentran en altitudes inferiores a 600 msnm (Espinosa, Moreno y Bernal, 2018).

Los suelos de los relieves sub-andinos del norte se derivan de ceniza volcánica, mientras que, en el sur, sin cubierta de ceniza volcánica, rocas antiguas han desarrollado suelos ácidos, marrón rojizo, de textura ligera con alto contenido de Al^{3+} . Más de dos tercios de la Amazonía peri-andina tienen suelos ácidos, de textura pesada, muy lixiviados, rojos y bien drenados, desarrollados a partir de sedimentos terciarios, mientras que la sección noreste se desarrolló sobre cuaternarios, los sedimentos cubiertos por ceniza volcánica desarrollaron Andisoles (Espinosa *et al.*, 2018).

La fertilidad integral del suelo es definida como una cualidad del recurso suelo capaz de proporcionar adecuadas condiciones físicas, químicas y biológicas para el establecimiento, desarrollo y producción de los cultivos. Desde esta perspectiva se observa al suelo como un sistema vivo, dinámico y no renovable, cuya condición y funcionamiento es clave para la producción de alimentos y para el mantenimiento de la calidad ambiental a escala local, regional y global (Bravo *et al.*, 2017).

En base a ello, un suelo fértil es aquel que conserva sus propiedades físicas (densidad aparente, distribución de porosidad, agregación), químicas (pH, acidez y Al^{3+} intercambiable, disponibilidad de nutrientes, capacidad de intercambio catiónico) y biológicas (actividad biológica, biomasa, MO, relación carbono-nitrógeno) las cuales se relacionan estrechamente, proporcionan un ambiente adecuado para la suplencia de agua, dan soporte físico a las plantas y suministran nutrientes, lo que permite la producción y sostenibilidad de los agro-ecosistemas (García, Ramírez y Sánchez, 2012).

Sin embargo, en la RAE la capacidad de los suelos amazónicos para proporcionar nutrientes está muy marcada por los procesos de formación del suelo y en especial por el clima que ha

ejercido un papel importante en el proceso de ferralitización o enriquecimiento de hierro (Fe) (Custode y Sourdat, 1986). Dicha ferralitización favorecida por las altas precipitaciones, ha contribuido a la lixiviación de las bases intercambiables (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^{1+}) y de sílice. Todo esto, induce a un predominio de minerales poco alterables y de arcillas simples como el cuarzo, caolinita, halloysita, gibsitita y óxidos de Fe, confiriéndoles ciertas características morfológicas y el descenso de los parámetros químicos, principalmente el pH (Gardi *et al.*, 2014; Custode y Sourdat, 1986).

Los cambios de uso de la tierra revelan con mayor notoriedad el efecto de las intervenciones humanas en los ecosistemas terrestres y dichos cambios están influenciados por factores culturales, económicos, políticos e históricos a distintas escalas (Britos y Barchuk, 2008). En este contexto, el avance de la frontera agrícola hacia las áreas de bosque conduce a la aparición de una tierra de labor frágil, susceptible a la erosión y de baja productividad (Pineda, Bosque, Gómez y Plata, 2009).

La deforestación y distintos usos de la tierra como sistemas de cultivos, alteran las propiedades físicas e hidrológicas del suelo, lo que las vuelve inferiores a las propiedades del bosque nativo, y eso se demuestra en un incremento de la densidad aparente y resistencia a la penetración para suelos compactados, así como reducción de la infiltración por efecto del pisoteo del ganado (Aguirre, Ordoñez y Navia, 2009).

En el Parque Nacional Sumaco, provincia de Napo, se evaluaron distintos usos de la tierra (bosque; naranjilla; pasto sin árboles: PSA y pasto con árboles: PCA), obteniéndose un pH fuertemente ácido en el horizonte superficial de bosque, a diferencia de los otros usos en los que el pH fue ligeramente ácido, igualmente bosque presentó mayor contenido de acidez intercambiable ($\text{Al}^{3+}+\text{H}^{1+}$) en el horizonte superficial, lo cual se atribuye a los ácidos derivados de la MO presente en ese uso de la tierra (Díaz, 2016). Los contenidos de N total fueron de adecuados a altos en todos los usos y el carbono orgánico total (COT) fue mayor en bosque y naranjilla (*Solanum quitoense*) por la presencia de residuos vegetales. El P disponible fue escaso, K^{1+} se acumuló en el horizonte superficial especialmente de PSA, y a la misma profundidad Ca^{2+} se acumuló mayormente en naranjilla y bosque por presencia de residuos, sin embargo, junto con Mg^{2+} disminuyó su presencia a mayor profundidad del suelo (Díaz, 2016).

Al comparar las propiedades de fertilidad del suelo entre el bosque y pastizales ganaderos de más de 30 años de establecimiento en Zamora Chinchipe, se encontró mayor acidez en los suelos de bosque y un contenido de MO de medio a alto similar en bosques y pastizales (Jiménez, Mezquida, Capa y Sánchez, 2007). En general, concluyen que ambos usos de la tierra tuvieron bajos contenidos de P, K^{1+} , Ca^{2+} y Mg^{2+} , sin embargo, la prevalencia de N y P en los pastizales, se debió al aporte de los excrementos y orina del ganado. Por otro lado, el contenido de K^{1+} mayor en los pastizales probablemente se atribuye a las quemas previas del bosque que fue reemplazado por pasto.

2.6. ACP de la fertilidad del suelo en la RAE

Al respecto algunos investigadores señalan que los factores asociados a la fertilidad del suelo en diferentes usos de la tierra de la RAE están afectados principalmente por el piso climático, la profundidad, algunos indicadores físicos y químicos como la densidad aparente (Da), porosidad total (Pt), porosidad de retención (Pr), pH, COT, N, P disponible, K^{1+} , Ca^{2+} , boro, y zinc, lo que representa un 70,54% de la variación de la fertilidad (Bravo *et al.*, 2017b).

La caracterización de parámetros morfológicos e índices estructurales del suelo en diferentes usos de la tierra de la Amazonía ecuatoriana mediante un ACP categórico, indica que la Da, COT, número de surcos y porcentaje de pendiente fueron las variables que principalmente definieron la calidad y el potencial de erosión del suelo (Bravo *et al.*, 2017e).

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Localización

El área de estudio se localizó en la cuenca alta del río Napo a una altitud superior a 850 msnm, dentro de las comunidades de Boayacu, Simón Bolívar y Llandia, ubicadas entre el cantón Mera, la parroquia Teniente Hugo Ortiz y la parroquia Fátima, pertenecientes a la provincia de Pastaza (Figura 1).

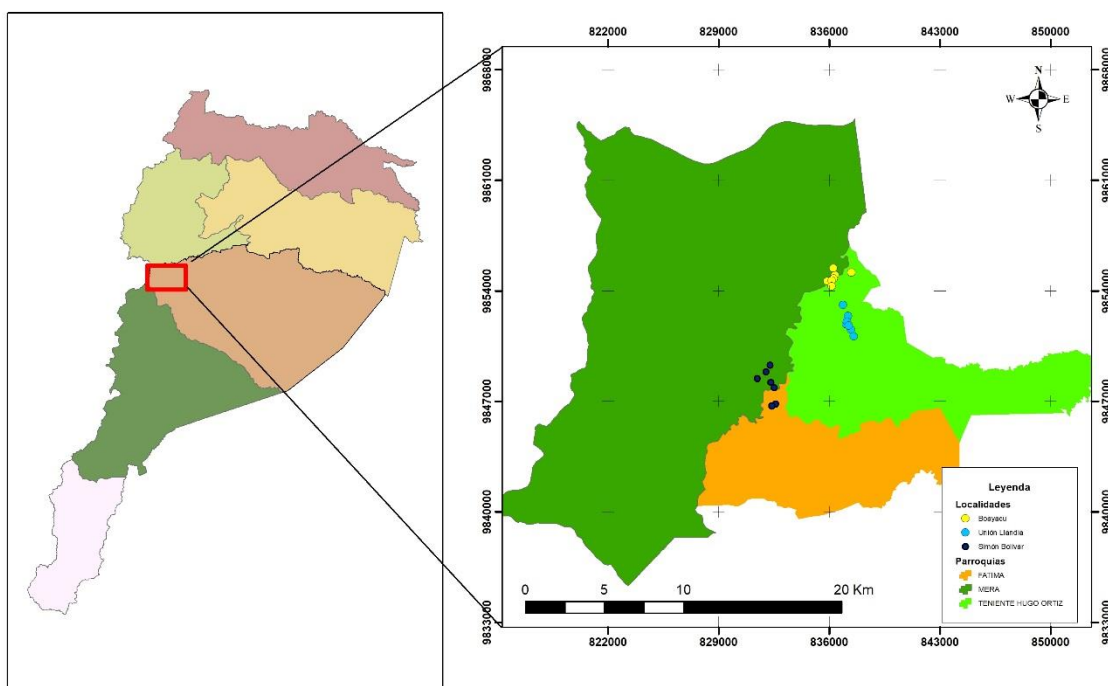


Figura 1. Localización geográfica de los usos de la tierra de las tres zonas de estudio (Boayacu, Simón Bolívar y Llandia) en la Región Amazónica Ecuatoriana.

El clima es característico del bosque muy húmedo Premontano y estuvo marcado por una precipitación promedio mensual de 452,1 mm, temperatura media mensual de 21,6°C y una humedad relativa promedio de 84% (Gobierno Autónomo Descentralizado Parroquial Rural

de Shell, 2015). Las zonas de estudio se encontraron en su mayoría sobre suelos pertenecientes al orden Andisol (SIGTIERRAS, 2015).

En cada comunidad seleccionada se identificaron los principales usos de la tierra agrícola, pecuaria y el bosque como sistema de referencia, tal como se describe a continuación:

- Zona de Boayacu, los usos de la tierra seleccionados fueron: bosque, *chakra* A, *chakra* B, *chakra* C, ganadería A, ganadería B y ganadería C. En donde los usos de *chakra* correspondieron a fincas manejadas por pobladores indígenas y los usos de ganadería pertenecieron a campesinos colonos.
- Zona de Simón Bolívar, los usos estuvieron conformados por: bosque, *chakra* A, *chakra* B, *chakra* C, pasto con árboles A, pasto con árboles B y pasto sin árboles C. Para esta zona, los usos de *chakra* también fueron manejados por indígenas, por otra parte, los usos de la tierra de pasturas correspondieron a fincas de campesinos colonos.
- Zona de Llandia, los usos fueron: bosque, caña de azúcar A, caña de azúcar B, caña de azúcar C, papa china A, papa china B y papa china C. Cabe señalar que los usos agrícolas de esta zona, constituyeron exclusivamente fincas de campesinos colonos.

3.2. Tipo de investigación

La presente investigación es de tipo descriptivo, pues consiste en el registro, análisis, interpretación y descripción de la naturaleza del estado actual, componentes y procesos del fenómeno de estudio, por otro lado, para una mejor comprensión de las variables evaluadas, éstas son categorizadas en diferentes grupos.

3.3. Métodos de investigación

Los métodos de investigación utilizados comprenden la observación y modelación de los procesos naturales que configuran la fertilidad integral del suelo en función de sus variables físicas, químicas y biológicas en las tres zonas de estudio.

3.4. Muestreo de suelo y vegetación

Al usar un esquema de muestreo sistemático, se efectuó la siguiente secuencia (Bravo *et al.*, 2017):

- a) Se seleccionaron los usos de la tierra más representativos en cada zona de estudio.
- b) Por cada uso de la tierra seleccionado se delimitó una parcela que lo representó.
- c) Se estableció un transecto que cubrió toda la variabilidad topográfica, vegetación y suelos en cada parcela (uso de la tierra) seleccionada.
- d) Sobre cada transecto se ubicaron cinco puntos equidistantes de muestreo en función del tamaño de la parcela.
- e) Se estableció una subparcela de 10 m por 10 m en cada punto de muestreo (P1, P2, P3, P4 y P5), en la cual se recolectaron cinco submuestras de suelo a dos profundidades (0-10 cm y 10-30 cm) (Figura 2). Dichas submuestras conformaron la muestra compuesta por punto y se usaron para evaluar los parámetros químicos de fertilidad del suelo y el COT como parámetro biológico.
- f) En la parte central de las subparcelas se colocó un cuadrante de 0,25 m² que definió el área para el muestreo de la hojarasca como parámetro biológico y para la toma de muestras no alteradas de suelo a tres profundidades (0-10 cm, 10-20 cm y 20-30 cm) que se usaron en la evaluación de los parámetros físicos de fertilidad edáfica. (Díaz, 2016).

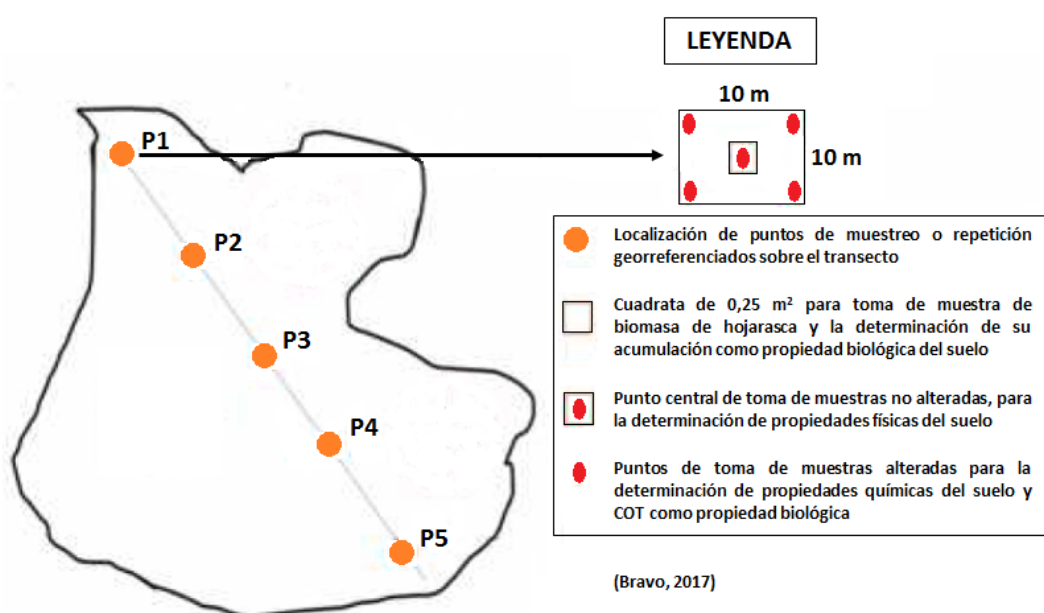


Figura 2. Esquema de muestreo sistemático para la evaluación de la fertilidad del suelo en cada parcela de uso de la tierra seleccionada.

3.5. Medición de propiedades del suelo y vegetación

3.5.1. Propiedades físicas del suelo

Se tomaron muestras de suelo no alteradas con cilindros de 5 cm de largo y 5 cm de diámetro que fueron recolectados con una toma de muestra tipo Uhland para determinar Da por el método del cilindro, porosidad total (Pt), porosidad de aireación (Pa: poros de radio mayor a 15 μm), y Pr por el método de la mesa de tensión a saturación y con una presión de succión de agua de los espacios porosos del suelo de -10 kPa (Blake y Hartge, 1986). Se evaluó la conductividad hidráulica saturada (Ksat) por el método de carga variable de acuerdo a la metodología de Pla (2010).

3.5.2. Propiedades químicas del suelo

El pH se determinó mediante potenciometría con una relación suelo-agua de 1:2,5. La acidez y Al^{3+} intercambiables fueron medidos por titulación (McLean, 1965), y el P disponible junto con las bases intercambiables (Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^{1+}) se determinaron por el método de Olsen modificado (Bertsch, 1995).

3.5.3. Propiedades biológicas del suelo y vegetación

El carbono orgánico total (COT) del suelo se evaluó por el método de digestión húmeda de Walkley y Black (Nelson y Sommers, 1982). Por otro lado, también se recolectó la biomasa de hojarasca del suelo contenida en una cuadrata de 0,25 m^2 en el centro de cada subparcela de muestreo, se midió el peso fresco de la biomasa y luego fue llevada en bolsas de papel a la estufa para su secado durante 48 h a 105°C hasta obtener el peso constante de su materia seca, que luego fue extrapolado a una ha.

3.6. Tratamiento de datos

El conjunto de datos de las propiedades asociadas a la fertilidad del suelo fue analizado en cada una de las zonas (Boayacu, Simón Bolívar y Llandia) y cada profundidad (0-10 cm y 10-30 cm), en función de los usos de la tierra seleccionados como un diseño completamente aleatorizado. Como primer paso se calculó la estadística descriptiva, para posteriormente

realizar el análisis de varianza mediante ANOVA a un factor, que permitió detectar las diferencias significativas con un nivel de confiabilidad del 95%. Luego se realizó una comparación de medias para cada una de las propiedades físicas, químicas y biológicas entre los distintos usos de la tierra, mediante prueba de Tukey (Sokal y Rohlf, 1997).

Para evaluar el grado de correlación entre las propiedades físicas, químicas y biológicas de fertilidad de suelos en las tres zonas de estudio y en cada una de las dos profundidades edáficas consideradas, se utilizó el coeficiente de correlación de Pearson.

Finalmente, se realizó un ACP, técnica multivariada que reduce la dimensionalidad de los datos, mientras conserva la variación del conjunto de datos (Bengio, Courville y Vincent, 2013). Para éste análisis se usó el conjunto de variables conformado por las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo hasta una profundidad de 30 cm. En la matriz de covarianzas de indicadores se seleccionaron los componentes con autovalores mayores o iguales a la unidad (Manly, 2008), asociados a las variables con valores de cargas factoriales mayores a 0,6, y para evaluar los cambios en la fertilidad del suelo entre los distintos usos de la tierra y facilitar su interpretación, se elaboró una matriz ortogonal (Bravo *et al.*, 2017b).

Los datos fueron procesados con el programa estadístico SPSS Statistics ver. 22,0 (IBM, 2013), luego con el auxilio del programa CANOCO ver. 5,0 (Te Braak y Šmilauer, 2012) se hizo un ACP y este último generó la matriz ortogonal.

3.7. Recursos humanos y materiales

3.7.1. Recursos humanos

Tabla 1. Recursos humanos participantes en la investigación

Nombre y apellido	Titulación superior	Cargo
Carlos Bravo Medina	PhD	Tutor de proyecto de innovación
Frank Goyes Vera	Ing	Autor del proyecto de innovación
Daysi Changoluisa	Ing	Jefe de laboratorio de suelos
Daniel Paguay	Ing	Técnico de exploración en campo
Gabriela Moreno	Estudiante	
Gonzalo Tomalá	Estudiante	
Katherin Gaibor	Estudiante	
Cristina Toa	Estudiante	
Ana Rosillo	Estudiante	Equipo de colaboración en muestreo de campo y análisis de laboratorio
María Aldaz	Estudiante	
Mónica Grefa	Estudiante	
Amber Lasso	Estudiante	
Kaina Shiguango	Estudiante	
Saida Zambrano	Estudiante	

Fuente: Goyes, 2018

3.7.2. Materiales

Tabla 2. Materiales de campo y laboratorio utilizados en la investigación

Campo	Laboratorio
Fundas Ziploc®	Bandejas de plástico
Papel aluminio	Botellas de vidrio y plástico
Cilindros metálicos (5 x 5 cm)	Embudos
Bolsas de papel	Picetas
Fundas plásticas (58 x 71 cm)	Probetas
Marcadores permanentes	Mesa de tensión
Libreta	Papel filtro
Pala	Frascos de vidrio
Cuadrante de 0,5 x 0,5 m	Vasos de precipitación
Toma de muestras (Uhland)	Espátulas
Valdes	Balones aforados
Machete	Tubos de ensayo
Flexómetro	Tamices metálicos
Piola	Matraces Erlenmeyer (500 ml)
Esfero	Gasas y bandas de goma

Fuente: Goyes, 2018

Tabla 3. Reactivos y equipos de laboratorio utilizados en la investigación

Reactivos	Equipos
Agua destilada	GPS
KCl 1 N	Balanza analítica
Fenolftaleína	Estufa de aire forzado
Rojo de metilo	Agitador automático
NaOH 0,1 N	Potenciómetro
Solución Olsen	Pipetas automáticas
Goma de acacia	Bureta de titración
Ácido ascórbico	Balanza de precisión
Soluciones minerales	Agitador calentador
Solución de lantano	Agitador vórtex
Dicromato de potasio 1N	Espectrofotómetro de absorción atómica
Ácido sulfúrico	Espectrofotómetro de radiación ultravioleta (680 nm)
Ácido fosfórico	Campana extractora de gases
Difenilamina	Bureta automática digital
Sulfato ferroso 0,5 N	

Fuente: Goyes, 2018

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Caracterización de la fertilidad física de las tres zonas bajo estudio (Boayacu, Simón Bolívar y Llandia)

Los índices estructurales como la densidad aparente (Da), conductividad hidráulica saturada (Ksat) y distribución de la porosidad del suelo para los diferentes tipos de uso de la tierra, fueron usados como parámetros asociados a la fertilidad física del suelo.

4.1.1. Densidad aparente (Da)

Los resultados de la Da bajo distintos usos de la tierra en las tres zonas consideradas, se muestran en la Figura 3. La Da es una variable de alto significado agrícola que se debe interpretar en función de la clase textural del suelo. En este contexto, se ha señalado que en los suelos de textura fina el límite crítico por encima del cual el valor de esta variable refleja problemas de compactación y limitaciones a la germinación de la semilla, desarrollo de la raíz y crecimiento de la planta corresponde a $1,3 \text{ Mg m}^{-3}$, según Pla (2010) y Bravo *et al.* (2017c). De acuerdo a ello, todos los valores de Da reportados en el presente estudio se encontraron por debajo del límite crítico para todas las zonas, usos de la tierra y profundidades evaluadas, lo cual sugiere una adecuada condición estructural y que no existen problemas de compactación del suelo, ni representa una limitación para el desarrollo de cultivos (Bravo *et al.*, 2017c).

Por otro lado, para el horizonte superficial (0-10 cm) la Da fue estadísticamente diferente ($P < 0,05$) entre los usos de la tierra evaluados para las zonas de Boayacu y Simón Bolívar, mientras que en los suelos de Llandia no se encontraron diferencias significativas. En Boayacu, el uso de la tierra con bosque presentó la menor Da ($0,3 \text{ Mg m}^{-3}$), por el contrario, las *chakras* B y C exhibieron el mayor valor ($0,49 \text{ Mg m}^{-3}$). Por otra parte, con respecto a Simón Bolívar, la *chakra* B y los pastos sin árboles C mostraron la mayor Da ($0,38 \text{ Mg m}^{-3}$).

³), mientras el pasto con árboles B mantuvo el menor valor de la variable ($0,28 \text{ Mg m}^{-3}$) (Figura 3).

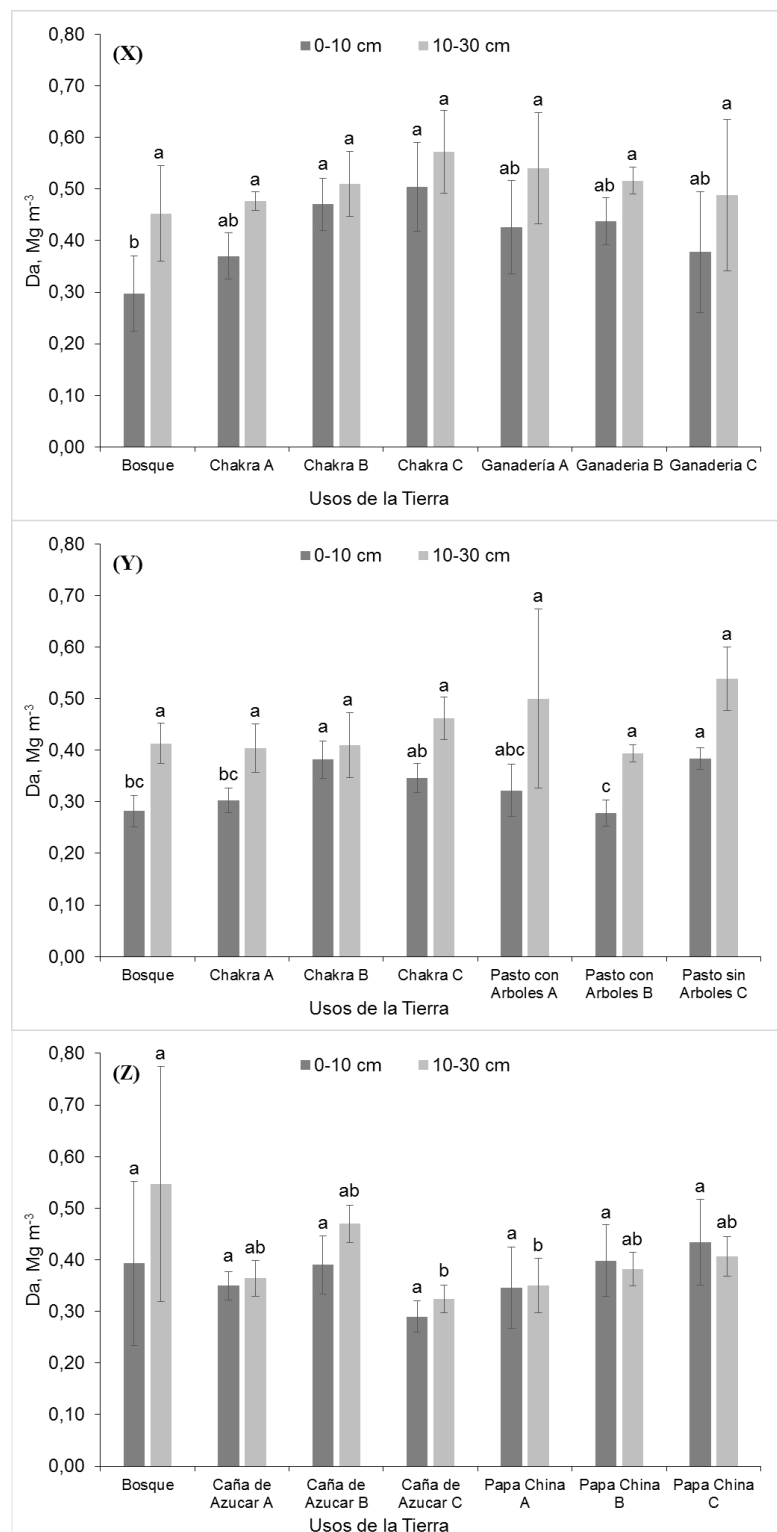


Figura 3. Densidad aparente bajo distintos usos de la tierra en tres zonas: X) Boayacu; Y) Simón Bolívar y Z) Llandia. Letras minúsculas distintas entre columnas para una misma profundidad indican diferencias significativas (Tukey, $P < 0,05$).

Estos resultados coinciden con lo reportado por Bravo *et al.* (2017b) en condiciones amazónicas para el horizonte superficial en usos de la tierra con bosque secundario ($0,56 \text{ Mg m}^{-3}$) y cacao agroforestal bajo sistema tipo *chakra* ($0,63 \text{ Mg m}^{-3}$) de Pastaza y Napo, donde el sistema de *chakra* mostró una mayor Da incluso superior a los sistemas ganaderos. En este sentido, se corrobora lo afirmado por Siqueira (2017), quien manifiesta que el uso de la tierra con bosque mantiene la menor Da debido a sus mejores condiciones de conservación y contenidos de MO que favorecen una mejor condición estructural y menor compactación del suelo.

Para la profundidad de 10-30 cm la Da no mostró diferencias estadísticas para las zonas de Boayacu y Simón Bolívar entre los usos de la tierra, no obstante, se reportaron diferencias estadísticas ($P < 0,05$) para la zona de Llandia, donde el uso de bosque presentó la mayor Da ($0,55 \text{ Mg m}^{-3}$), mientras los usos de caña de azúcar C y papa china A mostraron la menor densidad ($0,34 \text{ Mg m}^{-3}$) (Figura 3).

Adicionalmente, en el presente estudio también se observó un incremento de la Da del suelo con la profundidad, lo cual es coherente con el criterio de Martinkoski, Vogel, Jadoski y Watzlawick (2017), quienes señalan que ese incremento se relaciona con una mayor cohesión natural edáfica por efecto de la presión que ejercen las capas superiores del suelo sobre las inferiores, y también por un mayor depósito en profundidad del material fino procedente del horizonte superficial, lo que reduce los espacios porosos. Sin embargo, los usos de la tierra de papa china A, B y C de Llandia fueron la excepción a ese comportamiento.

4.1.2. Conductividad hidráulica saturada (Ksat)

Se establece que valores de Ksat inferiores a $0,5 \text{ cm h}^{-1}$ están relacionados con limitaciones estructurales en la calidad edáfica, según Pla (2010) y Bravo *et al.* (2017e). A este respecto, en el presente estudio solo se encontraron algunos problemas de conductividad hidráulica de 10-30 cm de profundidad del suelo, para los usos de la tierra de *chakra* B ($0,29 \text{ cm h}^{-1}$) en la zona de Simón Bolívar, y en la misma profundidad limitaciones en los usos de caña de azúcar B ($0,38 \text{ cm h}^{-1}$) y papa china C ($0,21 \text{ cm h}^{-1}$) para Llandia (Figura 4).

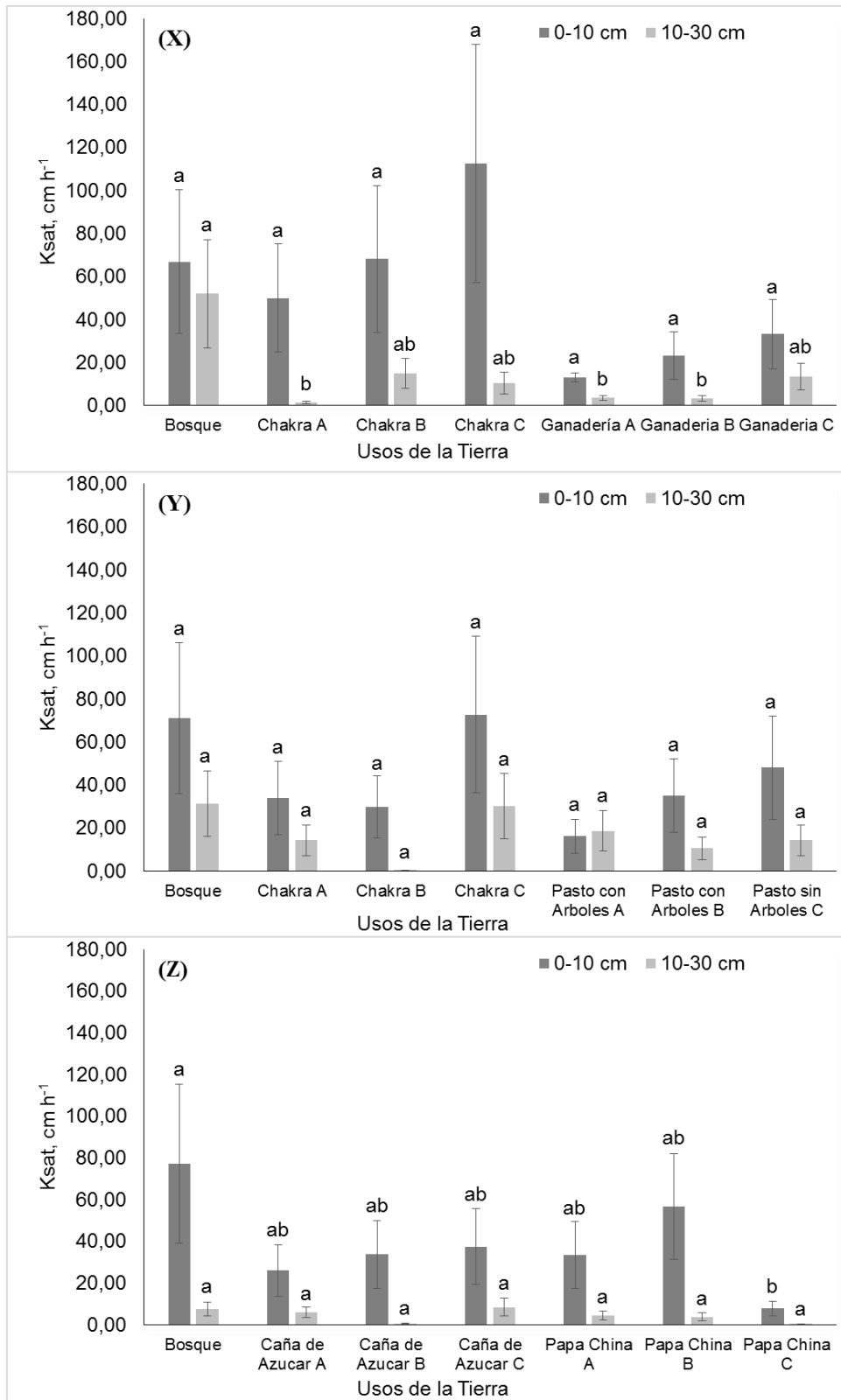


Figura 4. Conductividad hidráulica saturada bajo distintos usos de la tierra en tres zonas: X) Boayacu; Y) Simón Bolívar y Z) Llandia. Letras minúsculas distintas entre columnas para una misma profundidad indican diferencias significativas (Tukey, P < 0,05).

Los valores de la Ksat fueron muy altos en la capa superficial, y disminuyeron con la profundidad (Figura 4), no obstante, en el horizonte subsuperficial la mayoría de usos de la tierra no alcanzaron valores limitantes para la penetración y movimiento de agua ($< 0,5 \text{ cm h}^{-1}$), lo que coincidió con los parámetros señalados por Pla (2010).

No se encontraron diferencias estadísticas en la Ksat de 0-10 cm de profundidad entre los usos de la tierra en Boayacu y Simón Bolívar respectivamente. Solo en la zona de Llandia la Ksat presentó diferencias estadísticas ($P < 0,05$) entre usos de la tierra, registrándose el mayor valor para el bosque ($77,11 \text{ cm h}^{-1}$) y el menor para el uso de papa china C ($7,77 \text{ cm h}^{-1}$) (Figura 4). De acuerdo con Pereira Filho (2016), la Ksat es una variable que indica la facilidad de movimiento del agua a través del suelo y de ahí su importancia para el manejo del recurso edáfico, la producción de cultivos, la preservación del suelo y del ambiente. Cabe resaltar que en suelos poco profundos, bajo intensos regímenes de lluvia, una mayor Ksat puede evitar problemas de escorrentía superficial.

Los resultados obtenidos en el presente trabajo fueron similares a los reportados por Maldonado, Samaniego y Barrero (2016) al noreste de la provincia de Pastaza, donde hallaron una mayor Ksat para el uso de bosque ($32,58 \text{ cm h}^{-1}$) en comparación con el uso de ganadería ($15,86 \text{ cm h}^{-1}$) de 0-10 cm de profundidad, en ese estudio la Ksat estuvo relacionada con una menor Da y una mayor porosidad especialmente de macroporos.

La Ksat de 10-30 cm de profundidad fue estadísticamente similar para todos los usos de la tierra en Simón Bolívar y en Llandia, lo que fue distinto en la zona de Boayacu que mostró diferencias estadísticas ($P < 0,05$) entre los usos de la tierra, encontrándose el mayor valor en el bosque ($51,95 \text{ cm h}^{-1}$) en comparación con los menores valores correspondientes a los usos de *chakra* A, ganadería A y ganadería B ($2,81 \text{ cm h}^{-1}$) (Figura 4).

Resultados similares a los del presente estudio fueron reportados por Caiza (2015) a una altitud de 924 msnm al noreste de la provincia de Pastaza, y resultados semejantes encontrados por Díaz (2016) y Bravo *et al.* (2017c) en la provincia de Napo, donde hallaron una mayor Ksat de 10-30 cm de profundidad para los suelos manejados con bosque en comparación con los usos de ganadería con árboles y sin árboles, respectivamente.

Según Ramos, Pais, Freitas y Junior (2013), algunos estudios han señalado que los menores valores de Ksat reportados en los usos de la tierra de ganadería y cultivos en relación a los usos de bosque, pueden estar relacionados con efectos del pisoteo del ganado.

Si bien, la mayoría de los usos de la tierra en todas las zonas evaluadas mostraron rangos de Ksat que no representaron fuertes limitaciones, fue evidente una disminución drástica en la velocidad de penetración del agua a partir de los 10 cm de profundidad. Tal situación es especialmente importante para la región amazónica por la frecuencia y alta cantidad de agua de lluvia que cae en la zona, por tanto, esa agua que no puede penetrar pudiera generar problemas de erosión hídrica, según Bravo *et al.* (2017e).

4.1.3. Porosidad total (Pt)

Según Cruz *et al.* (2012), para que un medio o sustrato mantenga una adecuada relación agua-aire que provea las mejores condiciones de crecimiento vegetal, la Pt de ese medio debe encontrarse por encima del 85%. En relación al valor crítico señalado, en su mayoría los usos de la tierra de las tres zonas bajo estudio mostraron niveles óptimos de Pt a excepción de los usos de *chakra* B y C de Boayacu que mostraron valores ligeramente inferiores al límite recomendable en las dos profundidades evaluadas (primera profundidad, 85% y segunda profundidad, 84%).

De igual forma, pero solo de 10-30 cm de profundidad, los usos de ganadería C (81%) y bosque (84%) de Boayacu y Llandia respectivamente, exhibieron un comportamiento limitante. No obstante, de acuerdo con Bravo *et al.* (2017d), un valor de Pt superior a 60% ya se puede considerar alto, condición que se cumple en todos los suelos evaluados en la presente investigación (Figura 5).

La distribución por tamaño de poros es una medida de la proporción de macroporos, mesoporos y microporos, y de la calidad estructural general del suelo. Además, es un indicador de la capacidad del suelo para transmitir agua, aire y calor, de acuerdo con Blanco-Canqui y Ruis (2018).

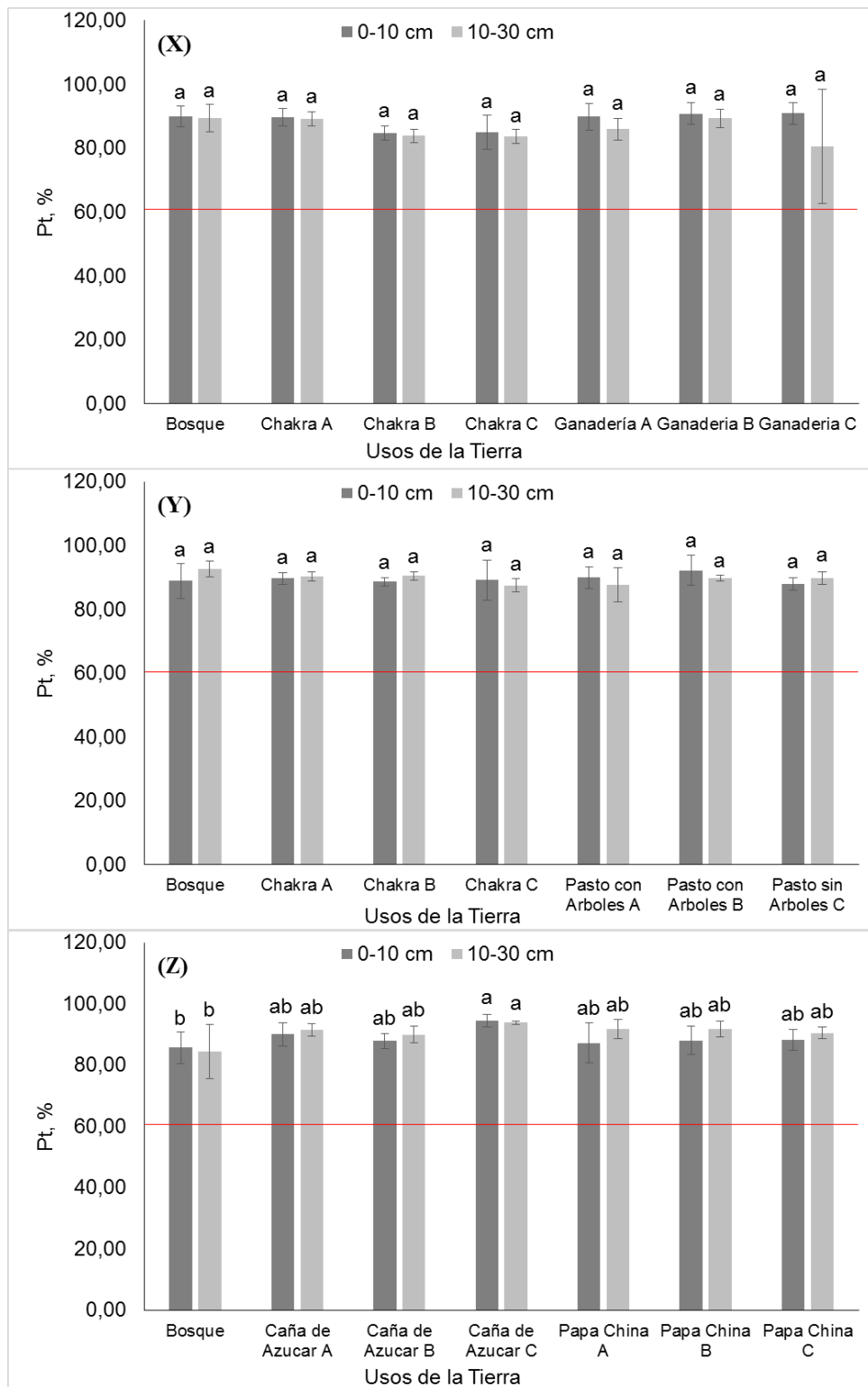


Figura 5. Distribución de la porosidad total bajo distintos usos de la tierra en tres zonas: X) Boayacu; Y) Simón Bolívar y Z) Llandia. Letras minúsculas distintas entre columnas para una misma profundidad indican diferencias significativas (Tukey, $P < 0,05$).

Los valores de Pt están relacionados con las variaciones en la Da, lo que indica la alta correlación de estas variables, según Shaver *et al.* (2002). Los análisis estadísticos no revelaron diferencias estadísticas por efecto de los usos de la tierra en ambas profundidades para las zonas de Boayacu y Simón Bolívar, respectivamente. La zona de Llandia fue la única que registró diferencias estadísticas ($P < 0,05$) de Pt entre usos de la tierra en las dos profundidades del suelo evaluadas, de modo que alcanzó la menor Pt en el uso con bosque (primera profundidad, 86% y segunda profundidad, 84%) y la mayor Pt en caña de azúcar C (primera profundidad, 95% y segunda profundidad, 94%; Figura 5).

Los resultados del presente trabajo encontrados en Llandia discreparon con los reportados por Oliveira, Campos, Freitas y Soares (2015a) al sur del Estado Amazonas en Brasil, quienes hallaron mayores valores de Pt en bosque (38%) en comparación con el uso de tierra de caña de azúcar (34%) de 0-10 cm de profundidad en una caracterización de usos de la tierra.

Cabe resaltar que, las diferencias de Pt para el uso de bosque en comparación con caña de azúcar C de la presente investigación, coinciden con el criterio de Franco (2014) y Mantovanelli *et al.* (2015), quienes indican que en usos de la tierra con antecedentes agrícolas de varios años en los que se han aplicado enmiendas frecuentes al suelo, también mejora la porosidad edáfica.

4.1.4. Porosidad de aireación (Pa)

En base al manejo de suelos, se considera que los valores de Pa inferiores al nivel crítico de 10% pueden ocasionar limitaciones en el flujo de aire, agua, actividad biológica, penetración, crecimiento y respiración de raíces en el suelo, según López, Duval, Martínez y Galantini (2016) y Bravo *et al.* (2017b). En esta investigación, el horizonte superficial no presentó valores de macroporos (Pa) por debajo del límite crítico (10%) para ningún uso de la tierra, por el contrario, para la profundidad de 10-30 cm los usos de la tierra de *chakra* A y ganadería B en Boayacu; pasto con árboles B en Simón Bolívar; así como bosque, caña de azúcar B y papa china C en Llandia, evidenciaron valores de Pa (9%) menores al nivel crítico y posiblemente limitantes (Figura 6).

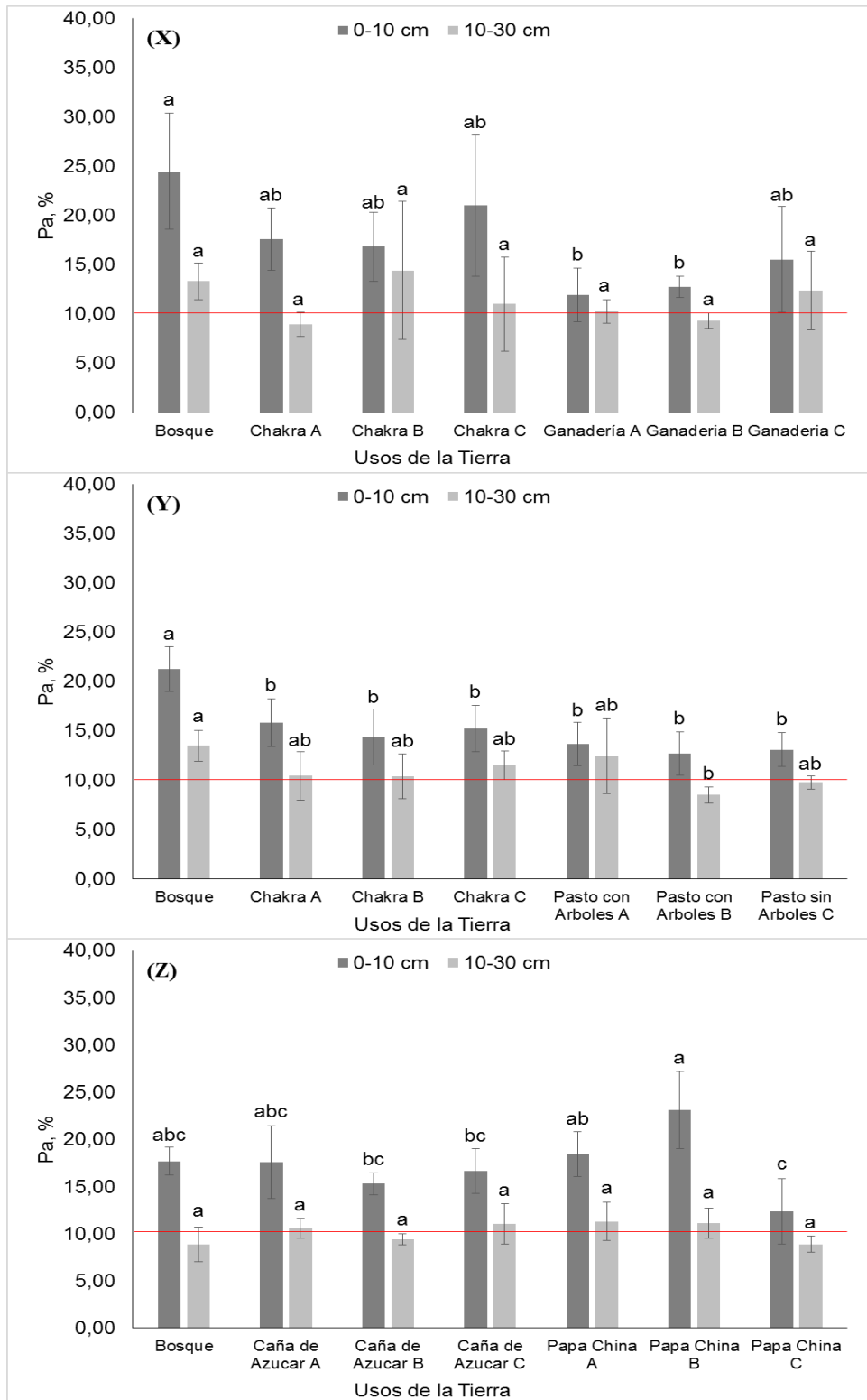


Figura 6. Distribución de la porosidad de aireación bajo distintos usos de la tierra en tres zonas: X) Boyacá; Y) Simón Bolívar y Z) Llanía. Letras minúsculas distintas entre columnas para una misma profundidad indican diferencias significativas (Tukey, $P < 0,05$).

En relación a la porosidad se ha señalado que más que la Pt, es importante su distribución por los efectos que tiene sobre el movimiento de agua y aire, de acuerdo con Pla (2010) y Bravo *et al.* (2017e). Bajo esta perspectiva, la porosidad de aireación (Pa) fue estadísticamente diferente ($P < 0,05$) por efecto de los usos de la tierra de 0-10 cm de profundidad del suelo para las zonas de Boayacu, Simón Bolívar y Llandia (Figura 6). En Boayacu la mayor Pa se obtuvo en el uso de bosque (25%), mientras la menor Pa correspondió a los usos de ganadería A y B (12%). Para Simón Bolívar la mayor Pa también se correspondió con el bosque (21%) y fue diferente a la Pa de todos los demás usos de la tierra de esa zona que fueron estadísticamente iguales (14%). Sin embargo, con respecto a la zona de Llandia, la mayor Pa se obtuvo en el uso de papa china B (23%), mientras la menor Pa se encontró en papa china C (12%) (Figura 6).

En la profundidad de 10-30 cm, la Pa presentó diferencias estadísticas ($P < 0,05$) entre los usos de la tierra de la zona de Simón Bolívar, donde la mayor Pa se obtuvo en el uso de bosque (14%), y el menor valor de la variable se encontró en pasto con árboles B (9%). Por el contrario, en los usos de la tierra de las zonas de Boayacu y Llandia no se presentaron diferencias significativas, pero algunos usos mostraron valores inferiores a 10% considerado como límite por debajo del cual se pueden presentar problemas de aireación (Figura 6).

Estos resultados concordaron con evaluaciones de atributos físicos de calidad de suelos, realizadas por Rocha Junior (2012) y Lima (2013) al este y al sur del Estado de Minas Gerais, respectivamente, donde encontraron en general, mayores valores de Pa para los usos de la tierra de bosque, lo cual se atribuyó a una mayor presencia de MO. Por el contrario, los resultados del presente estudio, fueron opuestos a los hallados por Oliveira (2014) al sureste del Estado de Pará, donde los usos de la tierra de bosque presentaron una Pa menor en comparación con varios usos de ganadería en el horizonte superficial y subsuperficial, así también, los resultados del presente estudio discreparon de los hallazgos de Martinkoski *et al.* (2017) en Brasil, quienes reportaron que el sistema silvopastoril tuvo mayor Pa que el bosque secundario, lo que se atribuye al efecto estructurador de las raíces de gramíneas forrajeras, no obstante, los usos de la tierra descritos por los autores tampoco presentaron niveles limitantes de Pa en el horizonte superficial.

Los resultados obtenidos en Simón Bolívar, coincidieron con lo reportado por Bravo *et al.* (2017d) en la cuenca media del río Napo, donde el horizonte subsuperficial de bosque

exhibió el mayor valor de Pa a diferencia de todos los usos de ganadería con árboles y sin árboles que también alcanzaron niveles limitantes de la variable de 9%. De igual manera, los resultados coincidieron con los hallazgos de Caiza (2015) al noreste de la provincia de Pastaza, donde se encontró una media ponderada mayor de Pa en el uso de bosque (18%) de 10-30 cm de profundidad, en comparación con el sistema silvopastoril (10%).

De manera general se puede apreciar en el presente trabajo que en todos los usos de la tierra de cada una de las zonas evaluadas existe una reducción de la Pa con respecto a la profundidad del suelo (Figura 6), y en ese aspecto, mayores valores de Pa en la superficie del suelo indican un efecto positivo de la MO en la estructura edáfica, de acuerdo con Sales, Silva, Veloso, Carvalho y Miranda (2018).

En relación a la variable de Pa, Gómez-Paccard *et al.* (2015) y Moraes *et al.* (2016) señalan que el tamaño y la continuidad de los poros mejoran la actividad biológica, lo que puede dar como resultado la formación de abundantes canales radiculares y redes de macroporos. Los macroporos pueden aumentar las tasas de infiltración, lo cual es importante particularmente en suelos de textura fina como los suelos de la RAE.

4.1.5. Porosidad de retención (Pr)

Con el propósito de mantener el equilibrio entre los microporos y macroporos del suelo, y al tomar en cuenta los límites críticos de Pa descritos por Pire y Pereira (2011), se acepta que un buen sustrato presente una Pr de 70-90%. Según los parámetros propuestos, en el presente estudio, de 0-10 cm de profundidad, los usos de la tierra que se encontraron ligeramente por debajo del límite crítico del 70% fueron: bosque (66%), *chakra* B (68%) y C (64%) de Boayacu; el uso de bosque (68%) en Simón Bolívar; así como bosque (68%), papa china A (69%) y B (65%) de la zona de Llandia, no obstante, en la profundidad de 10-30 cm, solo el uso de ganadería C (68%) de la zona de Boayacu reportó un valor ligeramente inferior al límite crítico señalado (Figura 7).

De la distribución de tamaño de poros, la Pr o microporos fue la que representó la mayor proporción, lo cual se corresponde con las clases texturales que predominantemente fueron arcillosas. Hubo diferencias estadísticas ($P < 0,05$) de Pr entre los usos de la tierra de 0-10 cm de profundidad para las tres zonas evaluadas. En Boayacu, la menor Pr fue hallada en los

usos de bosque y *chakra* C (65%), y el mayor valor perteneció a los usos de ganadería A y B (78%). Para Simón Bolívar, la menor Pr se obtuvo en el uso de bosque (68%), no obstante, el mayor valor de la variable fue reportado en pasto con árboles B (80%). Al mismo tiempo, en el caso de Llandia, la menor Pr se encontró en el uso de papa china B (65%), a la vez que la mayor Pr fue registrada en los usos de caña de azúcar C y papa china C (77%) (Figura 7).

En relación a lo reportado en las zonas de Boayacu y Simón Bolívar del presente estudio, los resultados tuvieron un comportamiento similar al de una investigación realizada por Soares *et al.* (2016), en la región sur del Estado Amazonas de Brasil, donde el uso de ganadería extensiva presentó una mayor Pr que el bosque nativo de 0-10 cm de profundidad del suelo. Por otra parte, los resultados del presente trabajo también coincidieron con los hallazgos de Nogueira, Fernandes, Ruivo, Rodrigues y Sarrazin (2004) al este del Estado brasileño de Pará, donde en una caracterización física de suelos entre usos de la tierra se reportó el mayor valor de Pr en ganadería (49%) con respecto al uso de bosque (47%) en el horizonte superficial.

El fenómeno observado en el presente estudio coincide con el criterio de Sales *et al.* (2018), quienes manifiestan que en los usos de la tierra de ganadería una mayor Pr puede asociarse al pisoteo animal, lo cual provoca el desarreglo de las partículas edáficas y conduce a la obstrucción de los macroporos con partículas finas, lo que también afecta a la porosidad, infiltración y redistribución de agua en el suelo.

En la segunda profundidad edáfica evaluada hubo diferencias estadísticas ($P < 0,05$) en la Pr por efecto de los usos de la tierra únicamente en la zona de Llandia, donde el uso de bosque reveló la menor Pr (76%), no así para el uso de caña de azúcar C que expuso el mayor valor de la variable (83%). Por otro lado, con respecto a las zonas de Boayacu y Simón Bolívar, no existieron diferencias estadísticas entre sus respectivos usos de la tierra en términos de Pr de 10-30 cm (Figura 7).

Los resultados del presente estudio para Boayacu y Simón Bolívar en el horizonte superficial fueron contrarios a lo reportado por Mascarenhas *et al.* (2017) en el Estado de Rondonia de la Amazonía brasileña, donde al evaluar distintos usos de la tierra de 0-20 cm de profundidad, se encontró que el uso de bosque expresó la mayor Pr en comparación con los usos de pastos cultivados, cacao bajo manejo agroecológico y sistema agroforestal, no

obstante, los mismos autores indicaron que la Pr es una variable que está mayormente determinada por procesos de formación del suelo y el material de origen, de modo que el uso de la tierra como factor tiene una baja influencia en su determinación, lo que coincide con el criterio de Sales *et al.* (2018).

Los hallazgos encontrados concuerdan con Sales *et al.* (2018), quienes manifiestan que en suelos arcillosos normalmente se reporta un mayor porcentaje de Pr que Pa, por otra parte, de acuerdo con Rocha Junior (2012) cabe resaltar que la Pr permite principalmente la retención del agua disponible en el suelo, por lo que, un aumento en el valor de la variable descrita, conlleva a un incremento en la humedad del suelo.

En el análisis integral de la fertilidad del suelo, las propiedades físicas como indicadores de la fertilidad representan variables importantes para cualquier estudio. Los cambios en las propiedades físicas del suelo afectan a todos los servicios del ecosistema que proporcionan los suelos, incluidos los alimentos, la fibra, la alimentación y la producción de combustible, control de la erosión del suelo, mejora en la calidad del agua y del aire, ciclo de nutrientes, la dinámica y el secuestro del carbono (C) en el suelo, la biodiversidad, entre otros (Pla, 2010; Bravo *et al.*, 2017e; Blanco-Canqui y Ruis, 2018). Por ejemplo, los cambios en las propiedades físicas del suelo pueden afectar directamente al establecimiento y producción del cultivo, están relacionados a la compactación del suelo (es decir, Da, resistencia a la penetración), emergencia de plántulas, crecimiento de raíces, producción de cultivos, porosidad e infiltración de agua (Blanco-Canqui y Ruis, 2018).

Los cambios en los agregados del suelo y la estabilidad, pueden afectar la severidad de la erosión del suelo, protección del C y los nutrientes del suelo a nivel de macro y micro escala. Las propiedades hidráulicas (es decir, infiltración de agua, retención) dictan la capacidad del suelo para capturar, retener y liberar agua (Pla, 2010). Por lo tanto, de las evaluaciones realizadas en las tres zonas se puede señalar que en general la mayoría de los usos de la tierra presentan una adecuada condición física, lo cual está relacionado con el antecedente de uso de la RAE principalmente con bosque, que ha permitido una acumulación importante de MO que se traduce en un mejoramiento de las propiedades físicas.

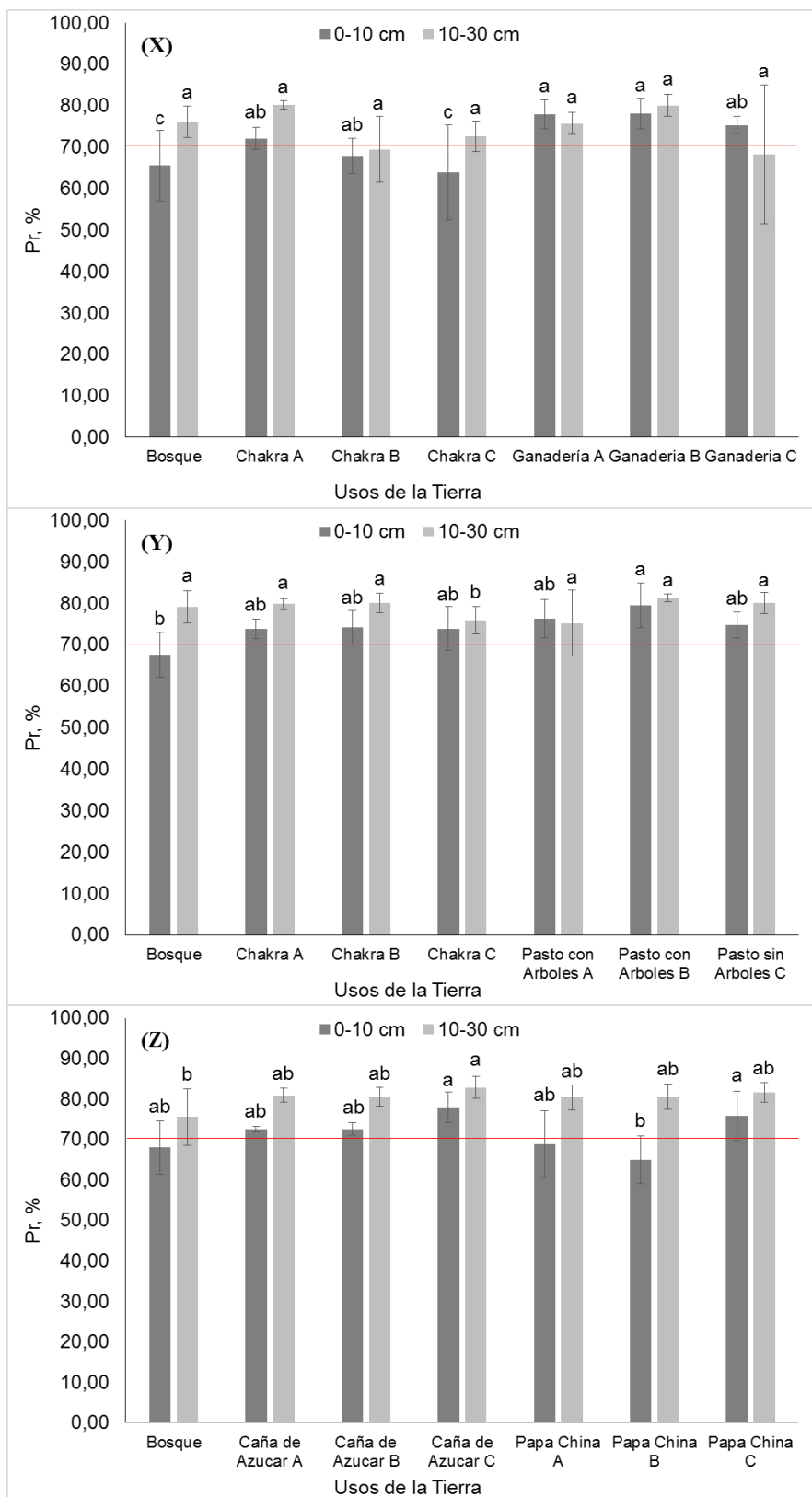


Figura 7. Distribución de la porosidad de retención bajo distintos usos de la tierra en tres zonas: X) Boayacu; Y) Simón Bolívar y Z) Llandia. Letras minúsculas distintas entre columnas para una misma profundidad indican diferencias significativas (Tukey, $P < 0,05$).

4.2. Caracterización de la fertilidad química de las tres zonas bajo estudio (Boayacu, Simón Bolívar y Llandia)

La fertilidad química del suelo y la nutrición de las plantas abarca la gestión de distintos parámetros como el pH, la acidez y Al^{3+} intercambiables, y la disponibilidad de elementos esenciales, lo cual se presenta a continuación.

4.2.1. pH

De acuerdo con los niveles críticos propuestos por el INIAP (2012), valores de pH inferiores a 5 categorizan a los suelos como muy ácidos. En general, y a excepción del uso de la tierra de papa china C de 0-10 cm de profundidad de la zona de Llandia que mostró un pH ácido (5,1), todos los demás usos de la tierra, indistintamente de la profundidad evaluada y de la zona de estudio, exhibieron valores de pH por debajo del límite crítico de 5, cualidad dominante en la cuenca alta del río Napo (Figura 8).

Los resultados de esta investigación coinciden con lo reportado por Bravo *et al.* (2015) en distintos tipos de manejo o usos de la tierra de la Amazonía ecuatoriana, donde hallaron valores de pH de ácido a muy ácido relacionados con los distintos factores formadores del suelo (clima, material parental) que hacen que se produzca un lavado de los principales cationes básicos (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^{1+}) y sean sustituidos por cationes ácidos (Al^{3+} , H^{1+}) que generan una condición de acidez.

Los valores de pH reportados en el presente trabajo también fueron similares a los encontrados por Aquino, Júnior, Campos, Oliveira y Siqueira (2014) al sur del Estado Amazonas, en Brasil, donde en una evaluación de usos de la tierra hallaron niveles muy ácidos de pH de 0-20 cm de profundidad en los suelos analizados, donde los usos de bosque (3,97) mostraron el menor valor de la variable en comparación con los usos de ganadería (4,3), y en ese contexto, la condición general ácida de los suelos estuvo influenciada por el clima tropical lluvioso de la región.

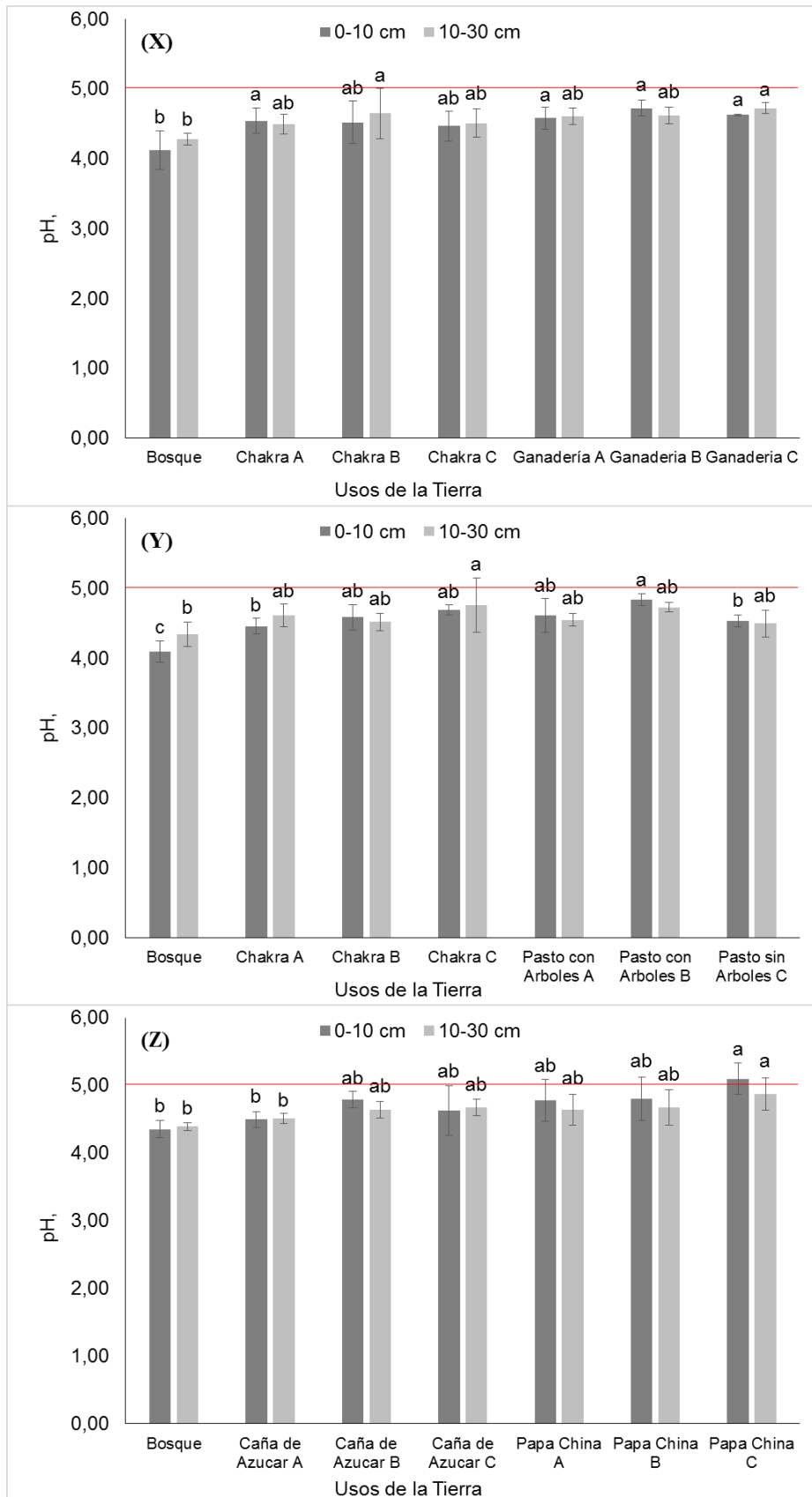


Figura 8. pH bajo distintos usos de la tierra en tres zonas: X) Boayacu; Y) Simón Bolívar y Z) Llandia. Letras minúsculas distintas entre columnas para una misma profundidad indican diferencias significativas (Tukey, $P < 0,05$).

En el presente estudio, para ambas profundidades, se observaron diferencias estadísticas ($P < 0,05$) por efecto de los usos de la tierra en las tres zonas de estudio (Figura 8). Para el horizonte superficial, en Boayacu el valor más bajo de pH se registró en el bosque (4,12), mientras los valores más altos se encontraron en los usos de *chakra* A y las ganaderías A, B y C (4,62). En relación a Simón Bolívar, el pH más bajo también se evidenció en el bosque (4,09), pero el pH más alto correspondió al uso de pasto con árboles B (4,83). Para la zona de Llandia, el menor pH se encontró en los usos de bosque y caña de azúcar A (4,43), por el contrario, el mayor valor se alcanzó en el uso de papa china C (5,1) (Figura 8).

Con respecto a la profundidad edáfica de 10-30 cm, en Boayacu, el bosque (4,28) mantuvo el menor valor de pH, y el mayor valor fue obtenido por el uso de *chakra* B y ganadería C (4,69). Para Simón Bolívar, el menor valor de pH también se evidenció en el bosque (4,34), pero el mayor valor correspondió al uso de *chakra* C (4,76). En relación a la zona de Llandia, las diferencias de pH entre usos de la tierra se comportaron de igual manera que en la primera profundidad, con el menor pH en bosque y caña de azúcar A (4,45), mientras el mayor valor se mantuvo con el uso de papa china C (4,87) (Figura 8).

Las diferencias de pH encontradas coincidieron con las reportadas por Peña, Rodríguez y Suárez (2013) al noroccidente de la Amazonía colombiana entre distintos usos de la tierra y niveles de intervención antrópica, donde se reportaron valores de pH ácido del suelo que fueron menores en los usos de bosque y se diferenciaron del pH de sistemas ganaderos, lo cual se atribuye a la liberación de ácidos húmicos que resultan de una mayor descomposición de hojarasca.

El pH es una variable que tiene incidencia en la disponibilidad de nutrientes esenciales en el suelo y también condiciona la capacidad de las raíces de plantas para la absorción de esos nutrientes, esto se debe a que valores extremos de pH precipitan algunos elementos esenciales y liberan elementos con potencial tóxico como el Al^{3+} , Fe y manganeso (Mn), por otra parte, algunas plantas son muy sensibles a bajos niveles o variaciones de pH, y de igual forma, la actividad microbiana puede resultar perjudicada fuera del intervalo de pH de 5-7, que es donde se produce la mayor actividad, según Santos y López (2015).

4.2.2. Acidez intercambiable ($Al^{3+}+H^{1+}$)

De acuerdo con los niveles críticos de acidez intercambiable (INIAP, 2012), un valor mayor a 1,5 meq 100 ml de suelo, ya es indicador de toxicidad. Bajo la definición indicada, en el presente estudio, en la profundidad de 0-10 cm todos los usos de la tierra de la zona de Boayacu y de Simón Bolívar con excepción de la *chakra* B (nivel medio de 1,02 meq 100 ml), presentaron una concentración tóxica de acidez intercambiable por encima del límite crítico. Por su parte, en la zona de Llandia solo los usos de la tierra de bosque (2,76 meq 100 ml), caña de azúcar A (2,2 meq 100 ml) y C (1,74 meq 100 ml), mostraron niveles tóxicos de acidez intercambiable en la primera profundidad edáfica (Figura 9).

Cabe señalar que, los resultados reportados en el presente trabajo fueron distintos a lo encontrado por Huera, Barroso, Álvarez, Changoluisa y Bravo (2017) en suelos bajo uso de bosque del Puyo, provincia de Pastaza, donde en una caracterización química se encontró un valor medio de acidez intercambiable en el horizonte superficial (1,1 meq 100 ml) que estuvo relacionado con el pH medido y la baja fertilidad natural del suelo, pero no fue mayor al nivel crítico de toxicidad.

La acidez intercambiable mostró diferencias estadísticas ($P < 0,05$) entre usos de la tierra de 0-10 cm de profundidad únicamente para las zonas de Simón Bolívar y Llandia. En Simón Bolívar la mayor acidez intercambiable correspondió al uso de bosque (3,94 meq 100 ml), que fue seguida por el uso de pasto con árboles A (2,56 meq 100 ml), y la menor acidez encontrada en la *chakra* B (1,02 meq 100 ml). Por su lado, la zona de Llandia también concentró la mayor acidez intercambiable en el bosque (2,76 meq 100 ml), no obstante, su valor fue menor para los usos de caña de azúcar B, papa china B y C (0,95 meq 100 ml). En el caso de Boayacu, no se encontraron diferencias estadísticas entre usos de la tierra de 0-10 cm de profundidad para la variable descrita (Figura 9). Por otra parte, en la profundidad de 10-30 cm del suelo, la acidez intercambiable no exhibió diferencias estadísticas entre usos de la tierra para ninguna de las tres zonas bajo estudio (Boayacu, Simón Bolívar, y Llandia) (Figura 9).

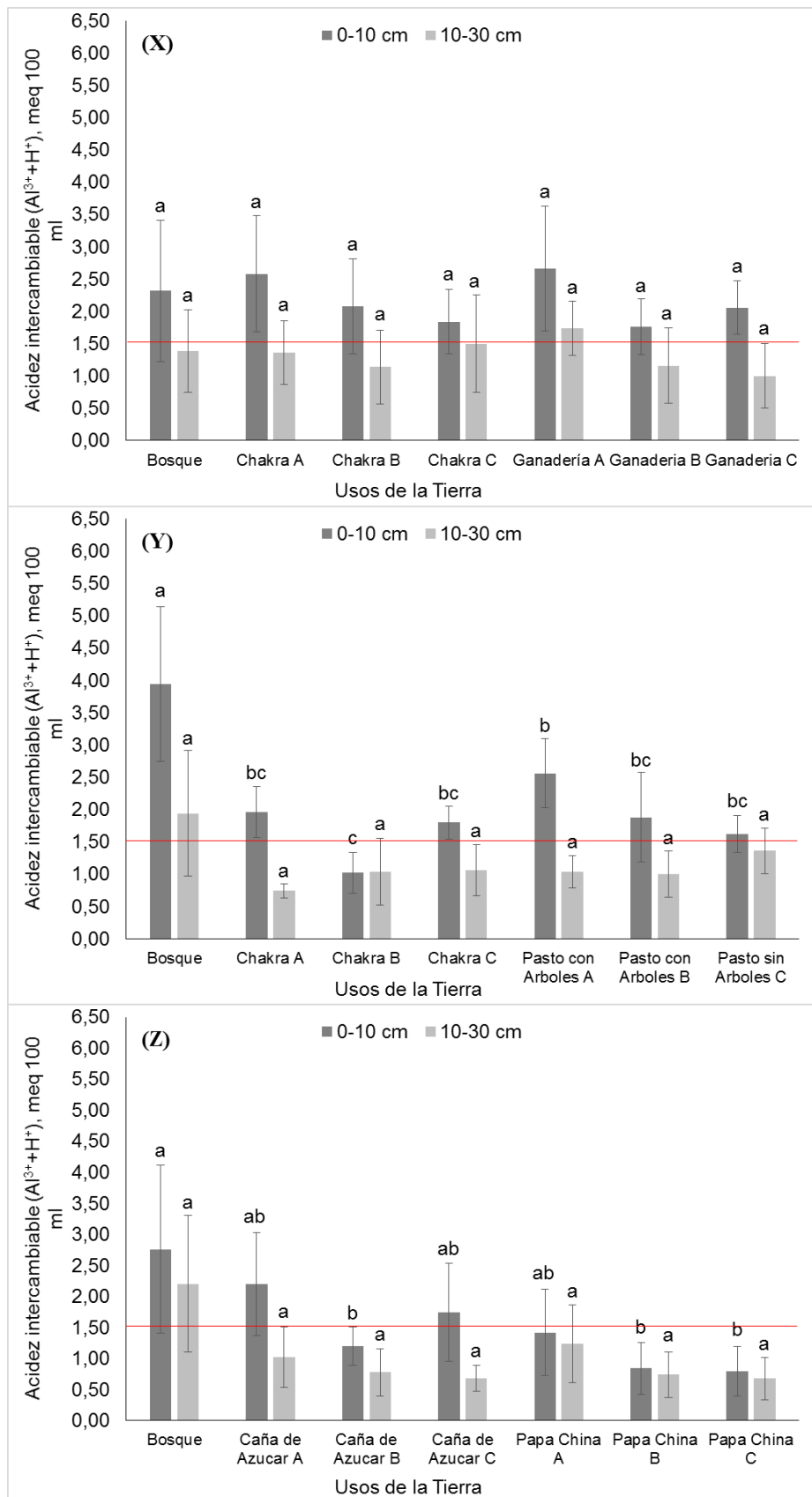


Figura 9. Acidez intercambiable bajo distintos usos de la tierra en tres zonas: X) Boyacú; Y) Simón Bolívar y Z) Llandia. Letras minúsculas distintas entre columnas para una misma profundidad indican diferencias significativas (Tukey, $P < 0,05$).

Las diferencias encontradas en el presente trabajo, coincidieron con los valores de acidez intercambiable reportados por Lao (2017) en la provincia de Alto Amazonas en Perú, donde en una caracterización de suelos (0-15 cm de profundidad) entre distintos usos de la tierra, observaron que los usos de bosque primario y secundario mostraron una mayor acidez intercambiable en comparación con usos de la tierra de ganadería mejorada, degradada, palmito (*Bactris gasipaes*) y palma africana (*Elaeis guineensis*). El fenómeno descrito en el que el uso de bosque mantuvo una mayor acidez intercambiable en comparación con otros usos de la tierra, confirma el criterio de Oliveira *et al.* (2015b) y Carvalho, Daniel, Davide y Souza (2015) quienes señalan que una mayor lixiviación de las bases intercambiables en el suelo de bosque, favorecida por el intenso régimen de lluvias en las mejores condiciones de drenaje durante años, provoca la permanencia de los cationes H^{1+} y Al^{3+} en la fase de intercambio del suelo.

4.2.3. Aluminio intercambiable (Al^{3+})

Si se toma en consideración el nivel crítico de Al^{3+} (1 meq 100 ml) propuesto por el INIAP (2012), se evidencia una concentración tóxica del metal por encima de dicho límite, para el horizonte superficial (0-10 cm) de los usos de la tierra con *chakra* A (1,5 meq 100 ml), ganadería A (1,3 meq 100 ml) y C (1,08 meq 100 ml) en Boayacu; y solo para los usos de pasto con árboles A (1,24 meq 100 cm^{-3} ml) y caña de azúcar A (1,42 meq 100 ml) en las zonas de Simón Bolívar y Llandia respectivamente. No obstante, el resto de los usos de la tierra mostraron concentraciones medias de Al^{3+} , por debajo del límite crítico de toxicidad para todas las zonas evaluadas (Figura 10).

Por otra parte, en lo relativo a la profundidad de 10-30 cm, únicamente el uso de la tierra de *chakra* C en la zona de Boayacu exhibió una concentración tóxica de Al^{3+} (1,18 meq 100 ml) por encima del valor crítico (INIAP, 2012). Para el resto de usos de la tierra de Boayacu y para todos los usos de Simón Bolívar y Llandia, los niveles de Al^{3+} de la segunda profundidad, aunque no se consideraron tóxicos, se mantuvieron en el rango de concentraciones medias (Figura 10).

Se presentaron diferencias estadísticas ($P < 0,05$) de Al^{3+} intercambiable entre los usos de la tierra de 0-10 cm de profundidad para las tres zonas evaluadas. En Boayacu, el menor contenido de Al^{3+} se encontró en el uso de bosque (0,36 meq 100 ml), a diferencia de los

usos de *chakra* A y ganadería A (1,4 meq 100 ml) que mostraron la mayor concentración del elemento. Por su parte, en Simón Bolívar, las menores concentraciones de Al^{3+} se hallaron en los usos de bosque, *chakra* B y pasto sin árboles C (0,35 meq 100 ml), en tanto que el mayor contenido del metal correspondió al uso de pasto con árboles A (1,24 meq 100 ml). Con respecto a la zona de Llandia, el menor contenido de Al^{3+} se reportó para papa china C (0,32 meq 100 ml), en contraste con el uso de caña de azúcar A (1,42 meq 100 ml) que presentó la mayor concentración del catión (Figura 10).

Las distintas concentraciones de Al^{3+} para Boayacu y Simón Bolívar concuerdan con el criterio de Fernandes, Pereira, Menezes, Anjos y Correia (2014), quienes indican que los bosques secundarios en un estado sucesional intermedio incrementan su contenido de MO en el suelo, provocándose una mayor liberación de bases intercambiables, así como la formación de complejos de Al^{3+} con compuestos orgánicos en el suelo. Por otra parte, en lo referente al uso de pasto sin árboles C de Simón Bolívar, los resultados coinciden con Fernandes *et al.* (2014) y Mantovanelli *et al.* (2015), quienes manifiestan que un menor valor de Al^{3+} puede relacionarse con antecedentes de encalado.

Con respecto a las diferencias observadas en Boayacu y Simón Bolívar, resultados similares fueron reportados por Burgos (2016) en varias zonas ganaderas de la subcuenca alta del río Puyo, provincia de Pastaza, donde al evaluar distintos usos de la tierra también se encontraron contenidos de Al^{3+} mayores en los usos de ganadería en contraposición a las concentraciones encontradas en los usos de cultivos y bosque secundario de 0-30 cm de profundidad.

En la profundidad edáfica de 10-30 cm del presente trabajo, el contenido de Al^{3+} solo fue diferente estadísticamente ($P < 0,05$) entre los usos de la tierra de Llandia, donde la menor concentración del metal se presentó en los usos de caña de azúcar A, B, C, papa china B y C (0,38 meq 100 ml), en contraste con la mayor concentración de Al^{3+} encontrada en papa china A (0,9 meq 100 ml). Por su parte, en las zonas de Boayacu y Simón Bolívar no se observaron diferencias estadísticas de Al^{3+} entre los usos de la tierra en la segunda profundidad (Figura 10).

De cualquier manera, generalmente se considera que la mayoría de los suelos amazónicos se clasifican como ácidos y presentan toxicidad de Al^{3+} (Santos, 2016). Es importante resaltar

que el Al^{3+} puede inhibir el crecimiento radicular de las plantas, así como afectar a la disponibilidad de nutrientes e interferir en la mineralización de la MO, de acuerdo con Jordão (2018).

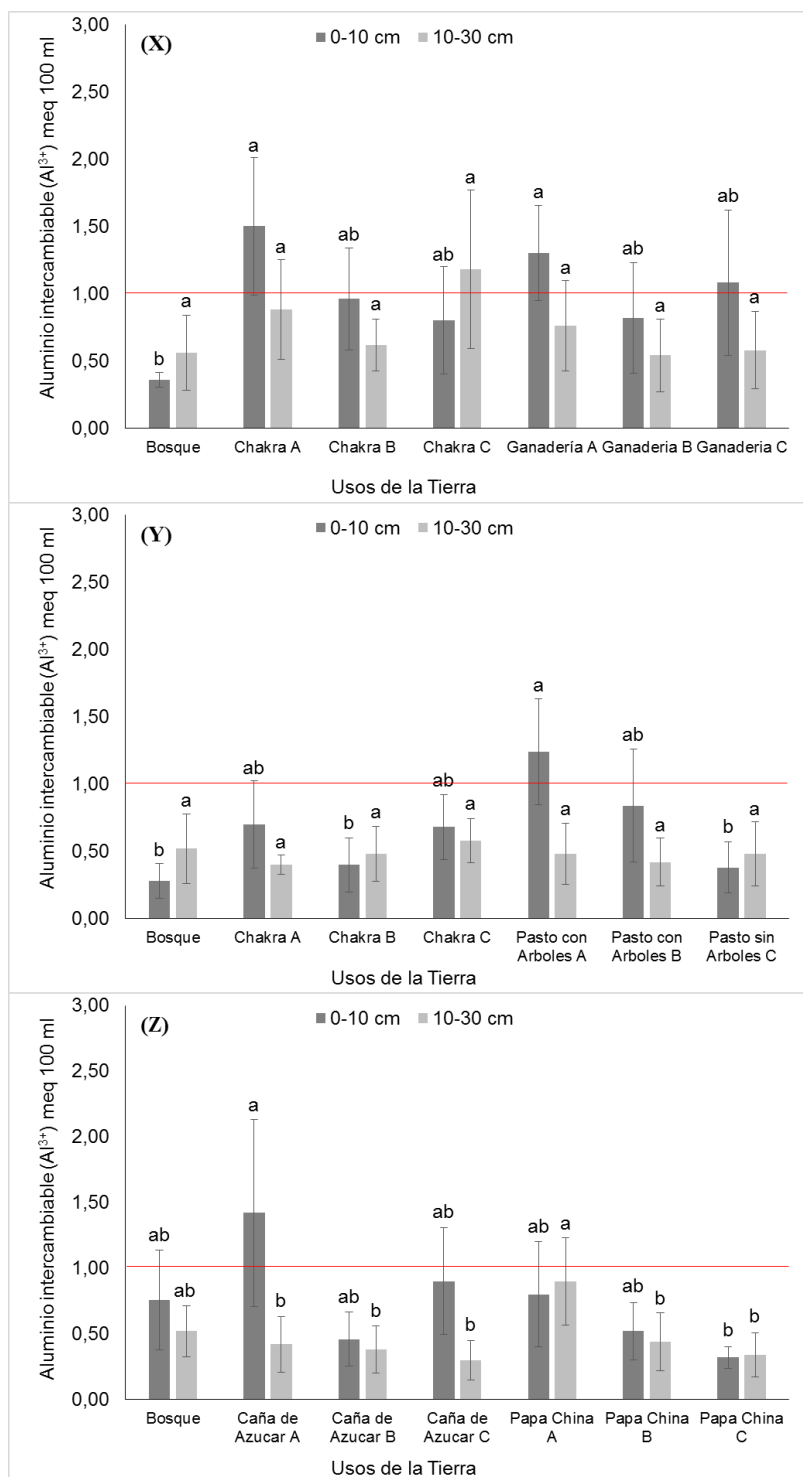


Figura 10. Aluminio intercambiable bajo distintos usos de la tierra en tres zonas: X) Boayacu; Y) Simón Bolívar y Z) Llandia. Letras minúsculas distintas entre columnas para una misma profundidad indican diferencias significativas (Tukey, $P < 0,05$).

4.2.4. Disponibilidad de nutrientes

La fertilidad del suelo y la nutrición de las plantas abarcan la gestión de elementos esenciales necesarios para el crecimiento de las plantas. Por lo general, se considera que 17 elementos cumplen estos criterios y se los divide en macro y micronutrientes, lo cual se basa en su abundancia relativa en el tejido vegetal más que en su necesidad para el crecimiento de las plantas (McGrath *et al.*, 2014). Los macronutrientes generalmente están presentes en el tejido de las plantas a concentraciones superiores a 0,2%, mientras que los micronutrientes están presentes por debajo del 0,01% (en peso seco). En base a ello, a continuación, se presentan los resultados de algunos nutrientes principalmente macro y meso.

4.2.4.1. Fósforo disponible (P)

Los resultados de la presente investigación coincidieron con niveles bajos de P disponible inferiores al nivel crítico de 10 mg kg^{-1} (INIAP, 2012) para la mayoría de usos de la tierra de Boayacu, Simón Bolívar y Llandia en la profundidad de 0-10 cm, las únicas excepciones correspondieron a los usos de la tierra de *chakra* A ($12,3 \text{ mg kg}^{-1}$) y C ($16,52 \text{ mg kg}^{-1}$) en Boayacu; papa china B ($10,54 \text{ mg kg}^{-1}$) y C ($13,24 \text{ mg kg}^{-1}$) en Llandia, que presentaron valores medios del nutriente; y el uso de pasto con árboles A ($20,92 \text{ mg kg}^{-1}$) en Simón Bolívar que fue el único con valor alto de P disponible (Figura 11).

En lo que respecta a la profundidad de 10-30 cm evaluada, con excepción del uso de la tierra de pasto con árboles A ($12,22 \text{ mg kg}^{-1}$) correspondiente a Simón Bolívar (nivel medio de P disponible), todos los usos de la tierra de las tres zonas estudiadas presentaron niveles bajos de P disponible (Figura 11).

La mayoría de los valores de P disponible encontrados en esta investigación fueron similares a los reportados por Lao (2017) en condiciones amazónicas de 0-15 cm de profundidad edáfica, donde en general se observaron bajas concentraciones de P disponible independientemente de los usos de la tierra evaluados. Por otra parte, los valores medios y el valor alto de P disponible en el horizonte superficial del presente estudio coincidieron con lo encontrado por Álvarez *et al.* (2017) en la provincia de Pastaza, donde destacaron los valores altos de P disponible encontrados en usos de la tierra de papa china de 0-20 cm de

profundidad, lo cual estuvo influenciado por la fertilización orgánica con gallinaza durante varios años.

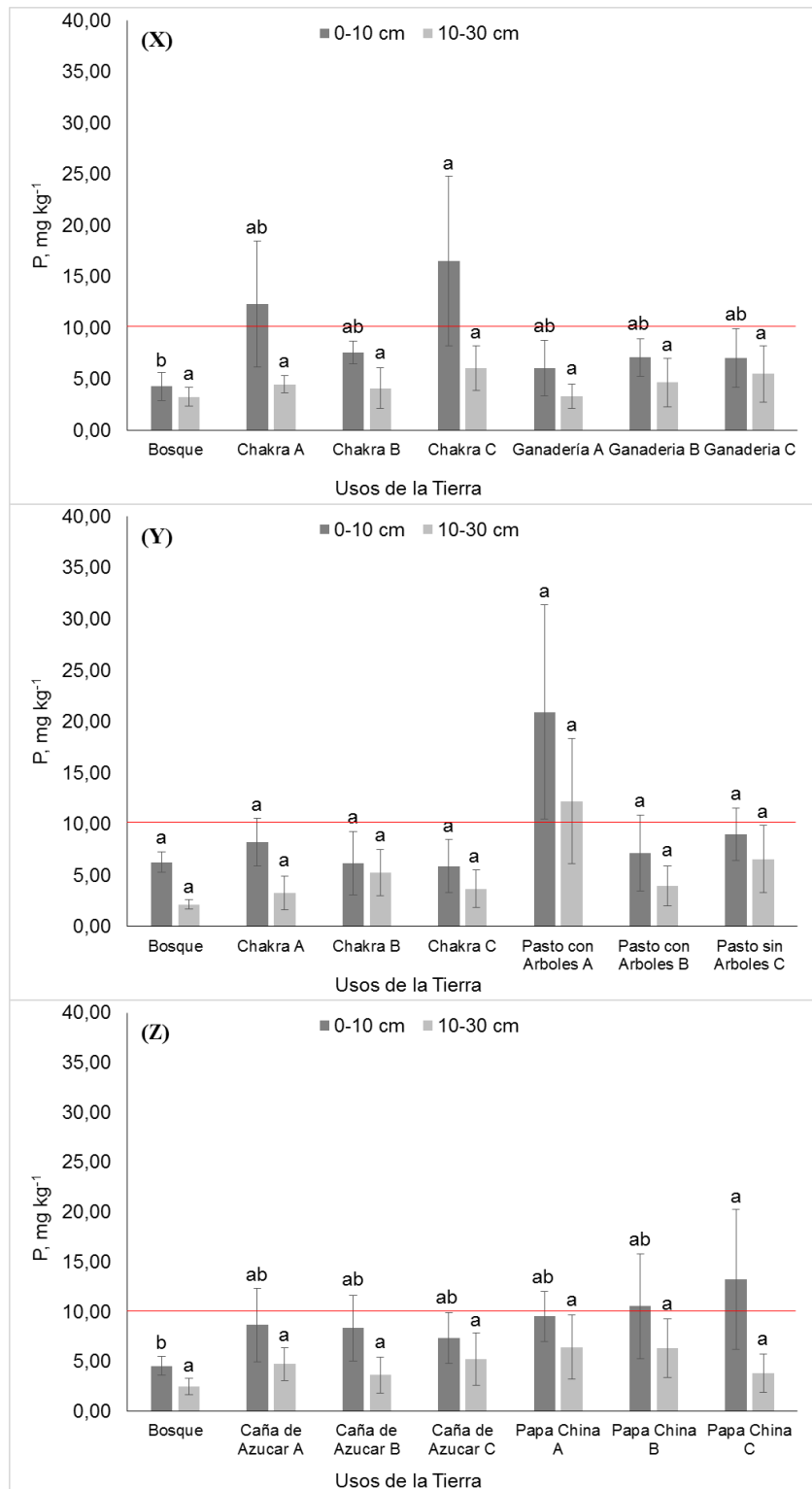


Figura 11. Fósforo disponible bajo distintos usos de la tierra en tres zonas: X) Boayacu; Y) Simón Bolívar y Z) Llandia. Letras minúsculas distintas entre columnas para una misma profundidad indican diferencias significativas (Tukey, $P < 0,05$).

El contenido de P disponible fue diferente estadísticamente ($P < 0,05$) por efecto de los usos de la tierra de 0-10 cm de profundidad para las zonas de Boayacu y Llandia. En Boayacu, la menor concentración de P disponible se encontró en el uso de bosque ($4,28 \text{ mg kg}^{-1}$), a diferencia del uso de *chakra* C ($16,52 \text{ mg kg}^{-1}$) que expresó el mayor contenido del elemento en el suelo. Con respecto a la zona de Llandia, el menor contenido de P disponible en la primera profundidad edáfica, se mantuvo en el uso de bosque ($4,56 \text{ mg kg}^{-1}$), y el mayor valor se encontró en el uso con papa china C ($13,24 \text{ mg kg}^{-1}$). Para la zona de Simón Bolívar no se registraron diferencias estadísticas entre los usos de la tierra en relación al nutriente evaluado (Figura 11).

En lo concerniente a la profundidad edáfica de 10-30 cm, no se encontraron diferencias estadísticas en el contenido de P disponible entre los respectivos usos de la tierra de cada una de las zonas bajo estudio, aunque hubo valores considerados como bajos (Figura 11).

Por otro lado los mayores valores de P disponible encontrados en los usos de cultivos en comparación con el bosque en el horizonte superficial, pueden atribuirse a la aplicación de fuentes de fertilizantes como la gallinaza y al depósito de cenizas en el suelo, provenientes de la quema de cubiertas vegetales anteriores. Por otra parte, la menor acumulación de P disponible en suelos de bosque y sistemas agroforestales del presente estudio, concuerda con el criterio de Freitas *et al.* (2013), quienes señalan que un mayor contenido de biomasa retiene la mayor proporción de P disponible.

Las diferencias observadas en Boayacu y Llandia de la presente investigación fueron semejantes a las reportadas por Burgos (2016) en la subcuenca alta del río Puyo, donde los usos de la tierra de cultivos exhibieron mayores valores del nutriente que el uso de bosque de 0-30 cm de profundidad. De igual forma, estos resultados fueron similares a los hallados por Bravo *et al.* (2017b) de 0-10 cm de profundidad, no obstante, fueron contrarios a lo reportado por Cuenca (2014) y Llontop (2015) en la región amazónica, donde se encontraron mayores valores de P disponible en los usos de la tierra de bosque, en contraste con los usos de ganadería y sistemas agroforestales de 0-30 cm de profundidad, respectivamente.

La mayor acumulación de P disponible en el horizonte superficial de los suelos de esta investigación, coincide con Paula, Santos Filho, Pena y Macedo (2014), quienes sostienen que en la superficie de suelos cultivados, la mayor acumulación del nutriente se debe a su

baja movilidad y la escasa solubilidad de sus compuestos, especialmente en suelos ácidos ricos en óxidos de Fe y Al.

El P disponible en todas las zonas representó una fuerte limitación, lo que concuerda con Casanova (2005), quien afirma que la disponibilidad de P se agrava debido a la alta predominancia de Fe y Al^{3+} en la fracción de intercambio, lo que puede formar compuestos insolubles como fosfatos de aluminio (P-Al) y de hierro (P-Fe) que las plantas no pueden aprovechar. En términos prácticos significa que la fertilización fosfórica debe ser lo más cuidadosa posible al considerar el tipo de fuente y el momento de aplicación de manera que pueda ser aprovechada por los cultivos.

4.2.4.2. Bases intercambiables (K^{1+} , Ca^{2+} y Mg^{2+})

La mineralogía del suelo es una de las propiedades dominantes del suelo que controla la cantidad de nutrientes presentes en la zona de la raíz y la velocidad a la que están disponibles para las plantas (McGrath *et al.*, 2014). En base a ello, el suministro de nutrientes es simplemente la cantidad de nutrientes retenidos en la superficie de las partículas del suelo, ya sea como resultado de la actividad natural geológica o antropogénica (es decir, la fertilización). Estos aspectos son fundamentales tenerlos en consideración para las bases intercambiables y para condiciones amazónicas por el efecto que han tenido los factores formadores del suelo en la disponibilidad de nutrientes (Bravo *et al.*, 2017)

Potasio intercambiable (K^{1+})

De acuerdo con los niveles críticos de disponibilidad de potasio intercambiable (K^{1+}) propuestos por el INIAP (2012), se consideran bajas las concentraciones menores a 0,2 meq 100 ml y altas las concentraciones mayores a 0,38 meq 100 ml de suelo. En la profundidad edáfica de 0-10 cm de la presente investigación, el uso de la tierra de pasto con árboles A (0,58 meq 100 ml) de Simón Bolívar exhibió un valor alto, mientras que los usos de la tierra de ganadería A (0,31 meq 100 ml) y B (0,32 meq 100 ml) de Boayacu; los usos de pasto con árboles B y pasto sin árboles C (0,2 meq 100 ml) de Simón Bolívar; y solo el uso de papa china C (0,26 meq 100 ml) en Llandia, presentaron valores medios de K^{1+} intercambiable (0,2 a 0,38 meq 100 ml) (Figura 12). En contraparte, el resto de usos de la tierra que conformaron la mayoría, presentaron niveles categorizados como bajos.

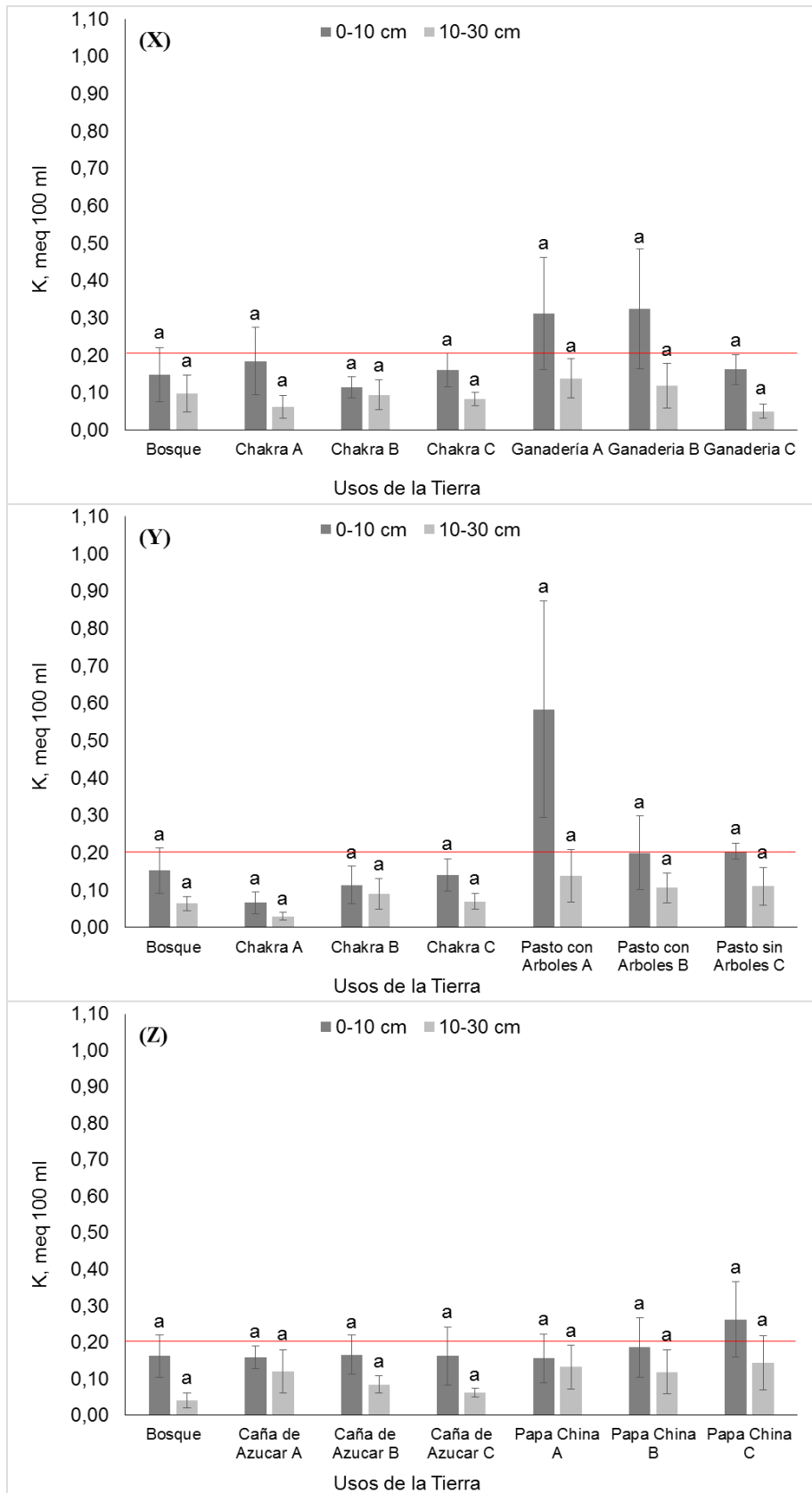


Figura 12. Potasio intercambiable bajo distintos usos de la tierra en tres zonas: X) Boayacu; Y) Simón Bolívar y Z) Llandia. Letras minúsculas distintas entre columnas para una misma profundidad indican diferencias significativas (Tukey, $P < 0,05$).

Sin embargo, en relación al contenido de K^{1+} intercambiable, no se registraron diferencias estadísticas por efecto de los usos de la tierra en ambas profundidades y para ninguna de las tres zonas estudiadas (Figura 12).

La mayor concentración de K^{1+} intercambiable en el horizonte superficial (0-10 cm) de los suelos de esta investigación, concuerda con Silveira Junior, Santos, Santos, Rocha y Alexandrino (2014) quienes indican que la corrección de suelos en usos de ganadería y cultivos, así como una mayor acumulación de residuos orgánicos en suelos de bosque, incrementan el contenido de K^{1+} intercambiable en superficie.

Independientemente de los usos de la tierra y para todas las zonas estudiadas, se observó una disminución para la segunda profundidad (10-30 cm), lo que mostró valores de K^{1+} intercambiable categorizados como bajos, de acuerdo con INIAP (2012).

Los resultados de este trabajo fueron similares a los reportados por Bravo *et al.* (2017b) en la región amazónica, donde se encontraron niveles medios de K^{1+} intercambiable de 0-10 cm de profundidad para usos de la tierra de ganadería y naranjilla (*Solanum quitoense*), en contraposición a los bajos contenidos hallados en usos de bosque, cacao (*Theobroma cacao*) agroforestal y cacao monocultivo.

Las relaciones observadas en el presente trabajo fueron contrarias a lo encontrado por Freitas *et al.* (2013) al norte del Estado de Piauí en la Amazonía brasileña, donde se hallaron diferencias en los contenidos de K^{1+} intercambiable de 0-20 cm de profundidad edáfica, entre varios usos de la tierra en los que la ganadería expresó la mayor concentración del catión, probablemente debido al aporte de residuos orgánicos de origen animal a través de las excretas, y su acelerada descomposición en época lluviosa.

Algunos investigadores señalan que los bajos contenidos de K^{1+} intercambiable en suelos de regiones húmedas atienden a varias razones, entre ellas: a) abundante precipitación que los hace más propensos a mostrar deficiencia debido a su lixiviación, b) la disminución del pH del suelo por debajo de 6 con baja capacidad de intercambio catiónico (CIC) como resultante de los minerales de carga variable y c) mayor competencia por los sitios de intercambio con los iones Al^{3+} e H^{1+} debido a la disolución de minerales de hidróxido de Al (McGrath *et al.*, 2014).

Calcio intercambiable (Ca^{2+})

En coincidencia con los niveles críticos establecidos por el INIAP (2012), se considera baja la concentración de Ca^{2+} intercambiable por debajo de 2 meq 100 ml y alta por encima de 5 meq 100 ml de suelo, no obstante, para el presente estudio, en el horizonte superficial de la zona de Boayacu se reportaron niveles medios del catión de 2,16 meq 100 ml, 2,23 meq 100 ml y 2,82 meq 100 ml para los usos de la tierra de *chakra* A, C y ganadería B, respectivamente, sin embargo, el resto de usos para esa zona solo mantuvo valores bajos de Ca^{2+} intercambiable (Figura 13).

Por otro lado, en el horizonte superficial de las zonas de Simón Bolívar y Llandia, la mayoría de los usos de la tierra alcanzaron niveles medios y bajos de Ca^{2+} intercambiable, sin embargo, las bajas concentraciones del catión fueron halladas únicamente en los usos de bosque (1 meq 100 ml), *chakra* B (1,49 meq 100 ml) y C (1,72 meq 100 ml) de Simón Bolívar, así como en el uso de caña de azúcar A (1,87 meq 100 ml) de Llandia (Figura 13). Se destacó también el uso de papa china C (5,17 meq 100 ml) en Llandia con el único nivel alto de Ca^{2+} intercambiable (INIAP, 2012).

Los resultados reportados en el horizonte superficial de la presente investigación, fueron similares a los obtenidos por Bravo *et al.* (2017b) en un estudio conducido en Napo y Pastaza, donde encontraron en su mayoría niveles medios de 2,93 meq 100 ml, 2,84 meq 100 ml y 3,81 meq 100 ml de Ca^{2+} intercambiable para los usos agrícolas de ganadería, naranjilla y cacao agroforestal, respectivamente.

Para la profundidad de 10-30 cm, con excepción del uso de la tierra de pasto sin árboles C (2,19 meq 100 ml, nivel medio de Ca^{2+} intercambiable) de Simón Bolívar, todos los usos de cada una de las tres zonas evaluadas registraron niveles de Ca^{2+} intercambiable categorizados como bajos (Figura 13).

La concentración de Ca^{2+} intercambiable del suelo fue estadísticamente diferente ($P < 0,05$) entre los usos de la tierra de 0-10 cm de profundidad únicamente para la zona de Boayacu, donde el menor contenido de Ca^{2+} intercambiable se encontró en el uso de bosque (0,31 meq 100 ml) y la mayor concentración del catión se halló en ganadería B (2,82 meq 100 ml). Para las zonas de Simón Bolívar y Llandia, no hubo diferencias estadísticas de concentración de

Ca²⁺ intercambiable por efecto de los usos de la tierra en la primera profundidad del suelo (Figura 13).

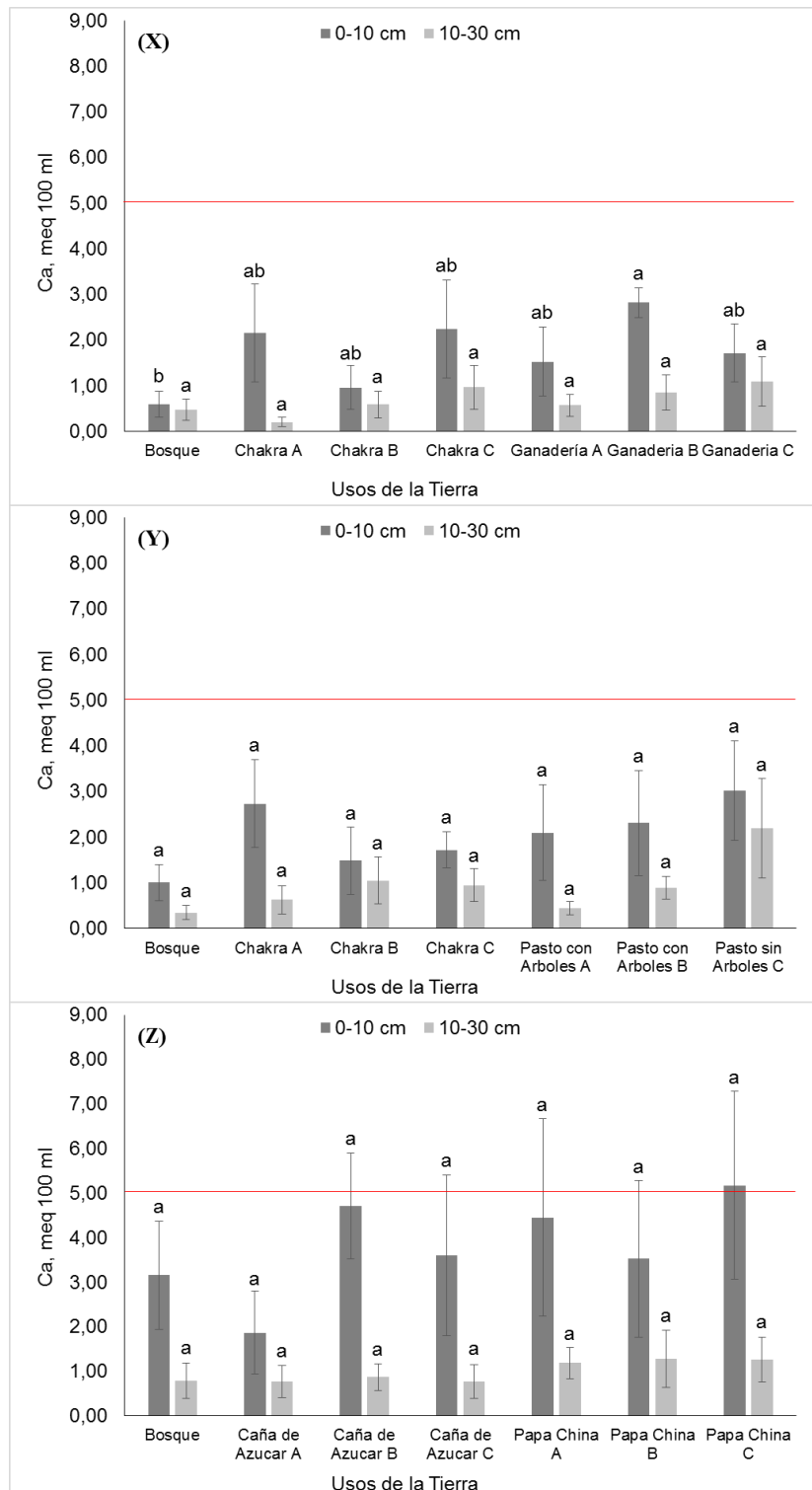


Figura 13. Calcio intercambiable bajo distintos usos de la tierra en tres zonas: X) Boayacu; Y) Simón Bolívar y Z) Llandia. Letras minúsculas distintas entre columnas para una misma profundidad indican diferencias significativas (Tukey, P < 0,05).

En la profundidad edáfica de 10-30 cm del presente estudio, no se hallaron diferencias estadísticas en el contenido de Ca^{2+} intercambiable por efecto de los usos de la tierra en ninguna de las tres zonas evaluadas (Boayacu, Simón Bolívar y Llandia) (Figura 13). No obstante, independientemente de los usos de la tierra, se observa una disminución con la profundidad para todas las zonas estudiadas.

En relación a la diferencia encontrada entre usos de la tierra de la zona de Boayacu, donde el mayor contenido de Ca^{2+} intercambiable fue hallado en el uso de ganadería B en contraposición al uso de bosque, los resultados coinciden con el criterio de Freitas *et al.* (2017), quienes manifiestan que un continuo encalado y fertilización en el suelo cultivado incrementa la concentración de bases intercambiables, además que en el uso de la tierra de bosque existe una mayor retención de nutrientes en la vegetación y no disponibles en el suelo, lo que se agrava por un alto nivel de intemperismo.

Estos resultados fueron similares a los reportados por Aquino *et al.* (2014) y Oliveira *et al.* (2015a) bajo condiciones amazónicas, donde han encontrado diferencias en el perfil edáfico superficial, en las que, la mayor acumulación de Ca^{2+} intercambiable se ha reportado en los usos de ganadería y barbecho, en contraposición al uso de bosque, de acuerdo también con Freitas *et al.* (2013). Por otro lado, los resultados de este estudio difieren de los hallados por Moline y Coutinho (2015), y por Mascarenhas *et al.* (2017), donde es el bosque el que exhibe un mayor contenido de Ca^{2+} intercambiable en comparación con los usos de ganadería y sistemas agroforestales, respectivamente.

Independientemente del uso de la tierra evaluado, la concentración de Ca^{2+} intercambiable disminuyó con la profundidad del suelo, y ese fenómeno concuerda con el argumento de Neves (2013), quien indica que en suelos ácidos de regiones húmedas, parte del Ca^{2+} intercambiable se pierde por lixiviación.

Magnesio intercambiable (Mg^{2+})

Con base en el nivel crítico de Mg^{2+} intercambiable de 0,5 meq 100 ml de suelo, en el presente estudio se reportaron en su mayoría valores medios del nutriente en el rango de 0,5 a 1,5 meq 100 ml (INIAP, 2012) en el horizonte superficial de las zonas de Boayacu y Llandia. Únicamente los usos de la tierra de bosque (0,28 meq 100 ml), *chakra* B (0,34 meq

100 ml) y ganadería C (0,4 meq 100 ml) en Boyacu; así como los usos de caña de azúcar A (0,32 meq 100 ml), caña de azúcar C (0,46 meq 100 ml) y papa china A (0,44 meq 100 ml) en Llandia exhibieron valores bajos del catión. Para Simón Bolívar, en el horizonte superficial la mayoría de usos de la tierra alcanzaron un nivel bajo de Mg^{2+} intercambiable, con excepción de los usos de pasto con árboles B (0,75 meq 100 ml) y pasto sin árboles C (0,84 meq 100 ml) que expresaron valores medios del nutriente (Figura 14).

Los resultados del presente estudio fueron semejantes a los encontrados por Bravo *et al.* (2017b), en el horizonte superficial de suelos bajo distintos usos de la tierra de Napo y Pastaza, donde hallaron niveles medios de Mg^{2+} intercambiable para todos los usos de la tierra evaluados, a excepción de un monocultivo de cacao con nivel alto del nutriente lo cual estuvo asociado a la aplicación de cal agrícola.

Por otro lado, en la presente investigación, en lo concerniente a la profundidad edáfica de 10-30 cm, con excepción del uso de la tierra de pasto sin árboles C (0,57 meq 100 ml, nivel medio de Mg^{2+} intercambiable) de Simón Bolívar, todos los usos de la tierra de las tres zonas evaluadas registraron valores bajos de Mg^{2+} intercambiable, de acuerdo con INIAP (2012) (Figura 14).

Cabe resaltar que el contenido de Mg^{2+} intercambiable, no mostró diferencias estadísticas ($P \geq 0,05$) entre usos de la tierra de 0-10 cm de profundidad para ninguna de las tres zonas estudiadas (Figura 14).

Por otro lado, en el horizonte secundario de Simón Bolívar, la diferencia de concentración de Mg^{2+} intercambiable entre el uso de *chakra* A con respecto al uso de pasto sin árboles C, coincidió con los estudios de Ensinas, Marchetti, Silva, Potrich y Martínez (2014), quienes sugieren una posible relación entre la aplicación de enmiendas con cal dolomita y el incremento de niveles de Mg^{2+} y Ca^{2+} intercambiables en suelos de pasturas.

La reducción de la concentración de Mg^{2+} intercambiable a mayor profundidad, con independencia de los usos de la tierra analizados, coincide con Freitas (2013), quien señala que normalmente la concentración de bases intercambiables disminuye con la profundidad edáfica, lo cual se relaciona con el grado de movilidad de los cationes en el suelo.

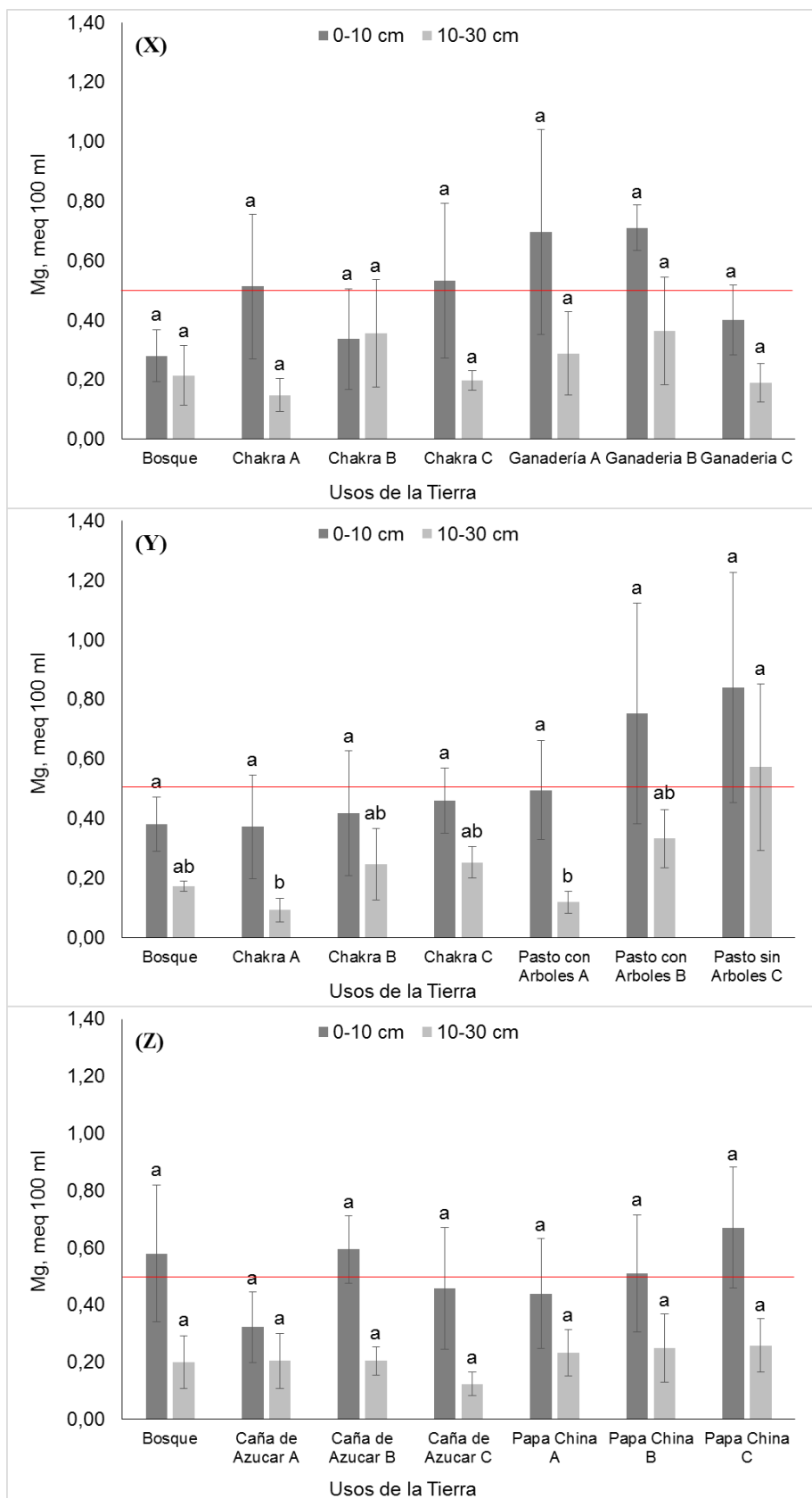


Figura 14. Magnesio intercambiable bajo distintos usos de la tierra en tres zonas: X) Boayacu; Y) Simón Bolívar y Z) Llandia. Letras minúsculas distintas entre columnas para una misma profundidad indican diferencias significativas (Tukey, $P < 0,05$).

El Ca^{2+} y Mg^{2+} intercambiables tienen un comportamiento similar al K^{1+} intercambiable, es decir, están muy influenciados por la mineralogía, tipo de suelo y el pH. Como ha sido señalado por varios investigadores, en suelos amazónicos predomina un pH ácido con alta presencia de Al^{3+} que domina la solución y la CIC, por tanto, afecta a la actividad del Ca^{2+} y Mg^{2+} intercambiables y aumenta su potencial de lixiviación (Bravo *et al.*, 2017; McGrath *et al.*, 2014; Custode y Sourdat, 1986).

En resumen, los resultados obtenidos en cuanto a las características químicas evaluadas, coinciden con otros estudios realizados en la zona y se puede señalar que los mismos muestran pH ácidos, alta acidez y Al^{3+} , baja disponibilidad de nutrientes en especial P, K^{1+} , Ca^{2+} , Mg^{2+} y baja CIC, asociados a minerales silicatos de baja actividad (caolinita) característicos de esta región (Bravo *et al.*, 2017; Custode y Sourdat, 1986).

4.2.4.3. Nivel de nutrientes en el suelo

Con el propósito de ofrecer una herramienta sencilla para el manejo y la aplicación de fertilizantes en los usos de la tierra de las zonas estudiadas, se elaboraron diagramas que permiten interpretar inmediatamente la fertilidad química de los suelos en base a los niveles críticos de contenido de nutrientes establecidos por el INIAP (2012), en donde los niveles de nutrientes (bajo, medio y alto) son representados por los porcentajes (25%, 50% y 75%) de su aporte total requerido para que el suelo alcance una condición óptima de fertilidad (Figura 15, 16 y 17).

En general, se puede apreciar que en la mayoría de los casos para las tres zonas y los distintos tipos de uso, el contenido de la mayoría de los nutrientes solo puede cubrir del 25% al 50% de las demandas de los cultivos, lo cual está fuertemente asociado a los niveles de los nutrientes en el suelo. Además, los resultados de las características químicas indican en términos prácticos que cualquier cambio de uso de la tierra de bosque a uso de tierras bien sea con fines agrícolas o pecuarios necesariamente tiene que ir acompañado con la aplicación de fertilizantes que permitan cumplir con la demanda de los cultivos a sembrar.

En base a lo descrito, y de acuerdo con McGrath *et al.* (2014), la fertilidad del suelo y la nutrición de las plantas abarcan el manejo del ambiente del suelo para proporcionar los nutrientes esenciales que desempeñan un papel vital en el crecimiento, desarrollo,

reproducción o funciones metabólicas de las plantas en las cantidades requeridas por las plantas para un rendimiento óptimo.

Múltiples factores más allá de la simple concentración de nutrientes en el suelo influyen en la capacidad del suelo para suministrar nutrientes a la planta y también la capacidad de la planta para aprovechar y utilizar esos nutrientes. Las propiedades y los procesos químicos, biológicos y físicos del suelo influyen en la utilización de nutrientes por las plantas y en otros factores ambientales como la presión de las plagas, el clima y las prácticas de manejo de cultivos. Por lo tanto, el manejo de la fertilidad debe ser integral.

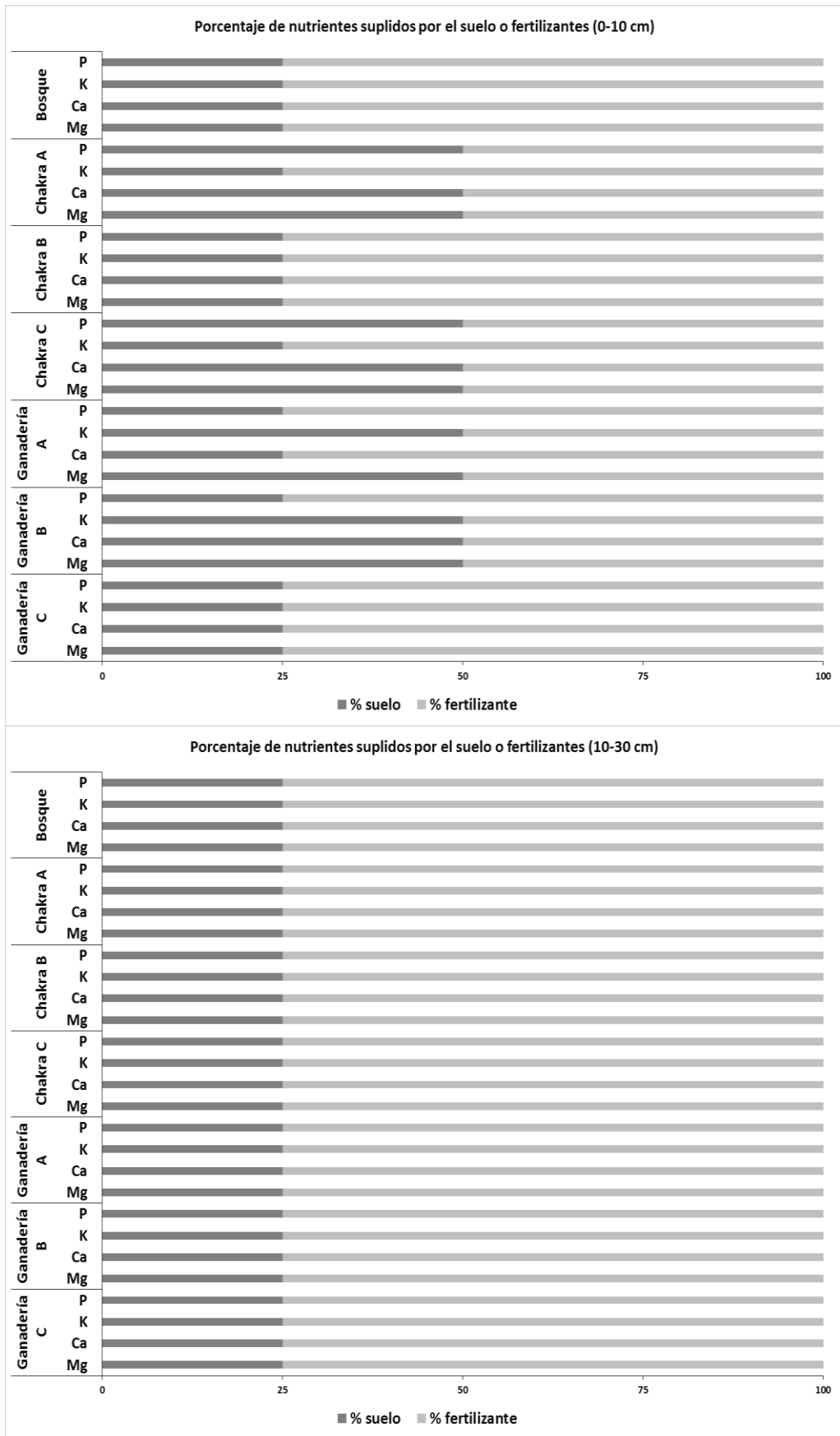


Figura 15. Porcentaje de nutrientes suplidos por el suelo o fertilizantes, bajo distintos usos de la tierra en la zona de Boyacu

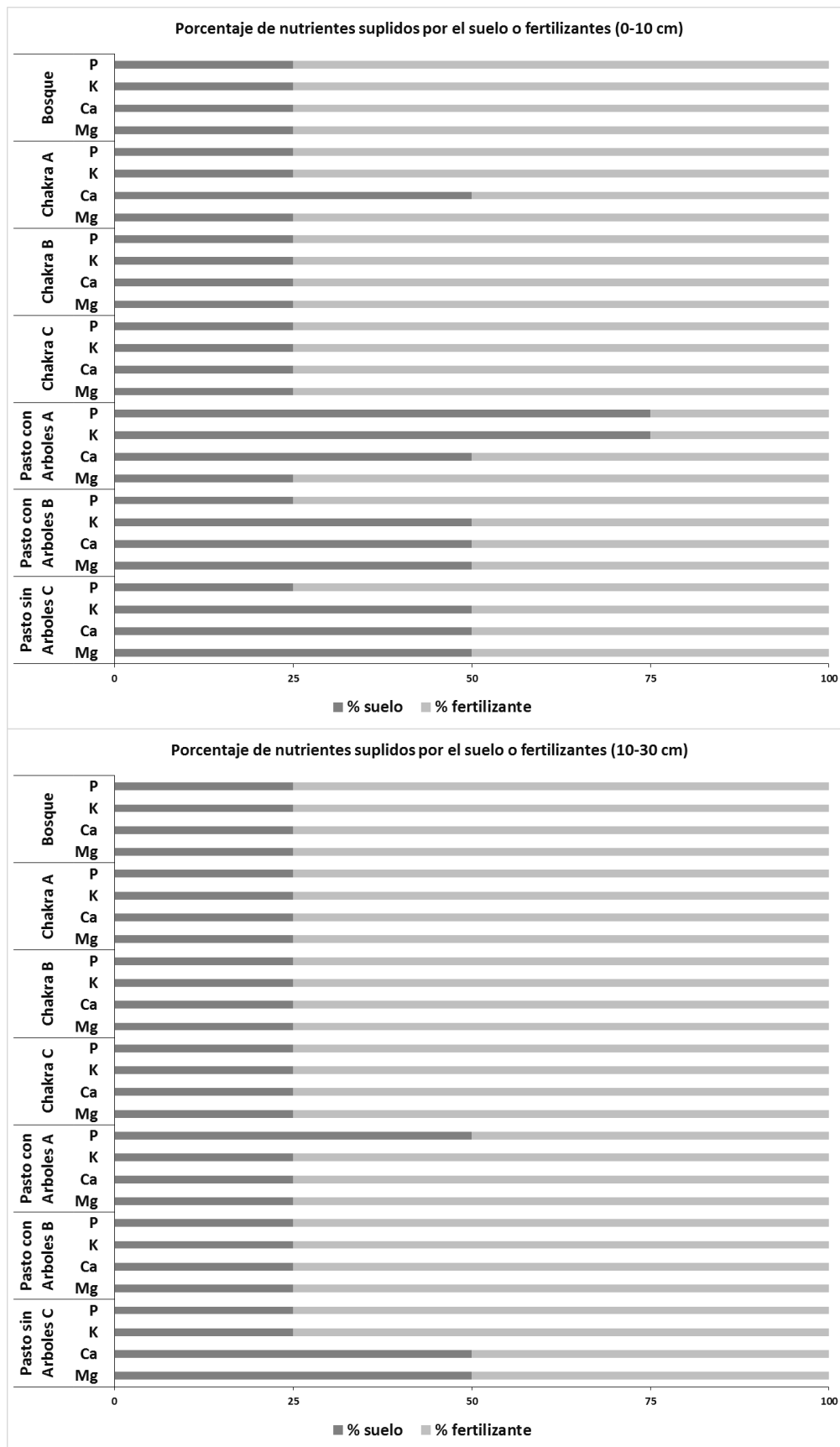


Figura 16. Porcentaje de nutrientes suplidos por el suelo o fertilizantes, bajo distintos usos de la tierra en la zona de Simón Bolívar

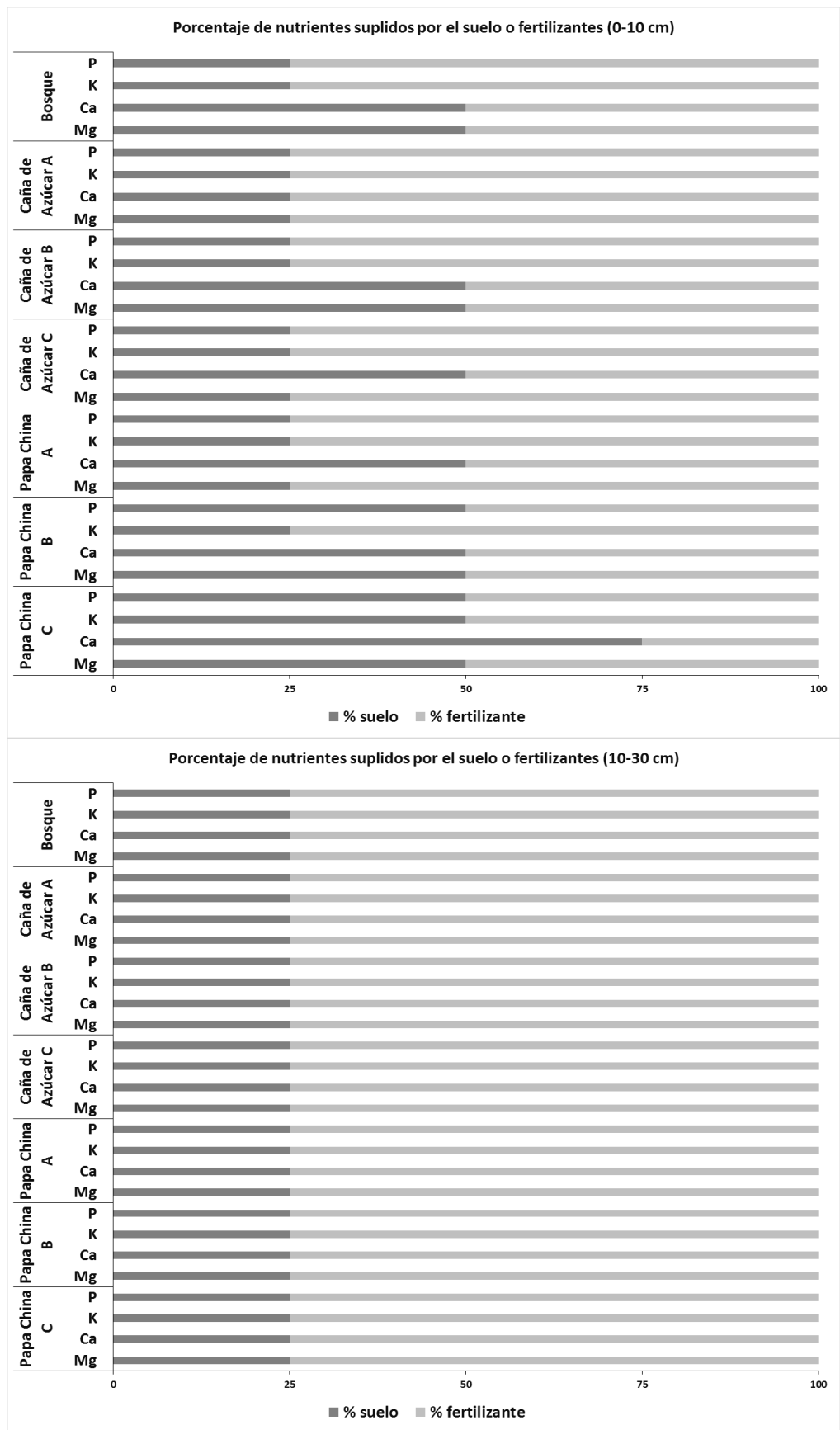


Figura 17. Porcentaje de nutrientes suplidos por el suelo o fertilizantes, bajo distintos usos de la tierra en la zona de Llandia

4.3. Caracterización de la fertilidad biológica de las tres zonas bajo estudio (Boayacu, Simón Bolívar y Llandia)

4.3.1. Carbono orgánico total (COT)

Al comparar los valores obtenidos con el nivel crítico de COT de 5% (INIAP, 2012), se encontró que en el horizonte superficial, todos los usos de la tierra de cada una de las tres zonas evaluadas presentaron porcentajes altos de COT por encima del nivel de referencia señalado (Figura 18). Estos resultados coincidieron con los reportados por Bravo *et al.* (2017d) en la RAE, donde al evaluar los contenidos de COT del suelo bajo distintos usos de la tierra, encontraron que en el horizonte edáfico superficial, todos los usos de la tierra alcanzaron niveles altos de COT.

En la segunda capa (10-30 cm), se encontró que solo los usos de la tierra de bosque (8%) y ganadería C (6%) de Boayacu, exhibieron valores altos de COT, sin embargo, el resto de usos de esa zona mantuvieron valores categorizados como medios dentro de los límites de 3-5% de COT, de acuerdo con INIAP (2012). No obstante, para Simón Bolívar la mayoría de los usos de la tierra y los correspondientes a la zona de Llandia reportaron valores altos de COT para el horizonte subsuperficial (Figura 18).

El COT del suelo fue estadísticamente diferente ($P < 0,05$) por efecto de los usos de la tierra en el horizonte superficial para todas las zonas evaluadas. En Boayacu, la mayor proporción de COT se reportó para el uso de bosque (13%), en contraste con el resto de los usos que fueron estadísticamente iguales (7%). Para Simón Bolívar, la mayor proporción de COT también se observó en el bosque (12%), seguido del uso de pasto con árboles B (10%), y con el menor valor en el uso de pasto sin árboles C (7%). En la zona de Llandia igualmente se encontró el mayor contenido de COT en el uso de bosque (10%), a diferencia del uso de caña de azúcar C (6%) que evidenció la menor proporción de COT para la profundidad indicada (Figura 18).

En comparación con los resultados obtenidos, autores como Oliveira *et al.* (2015a), bajo condiciones amazónicas también hallaron diferencias en el contenido de COT del suelo entre distintos usos de la tierra, lo que reveló los mayores valores para los usos de bosque, sistema

agroforestal y ganadería, mientras en el extremo opuesto la menor acumulación de COT se presentó en los monocultivos de yuca y caña de azúcar.

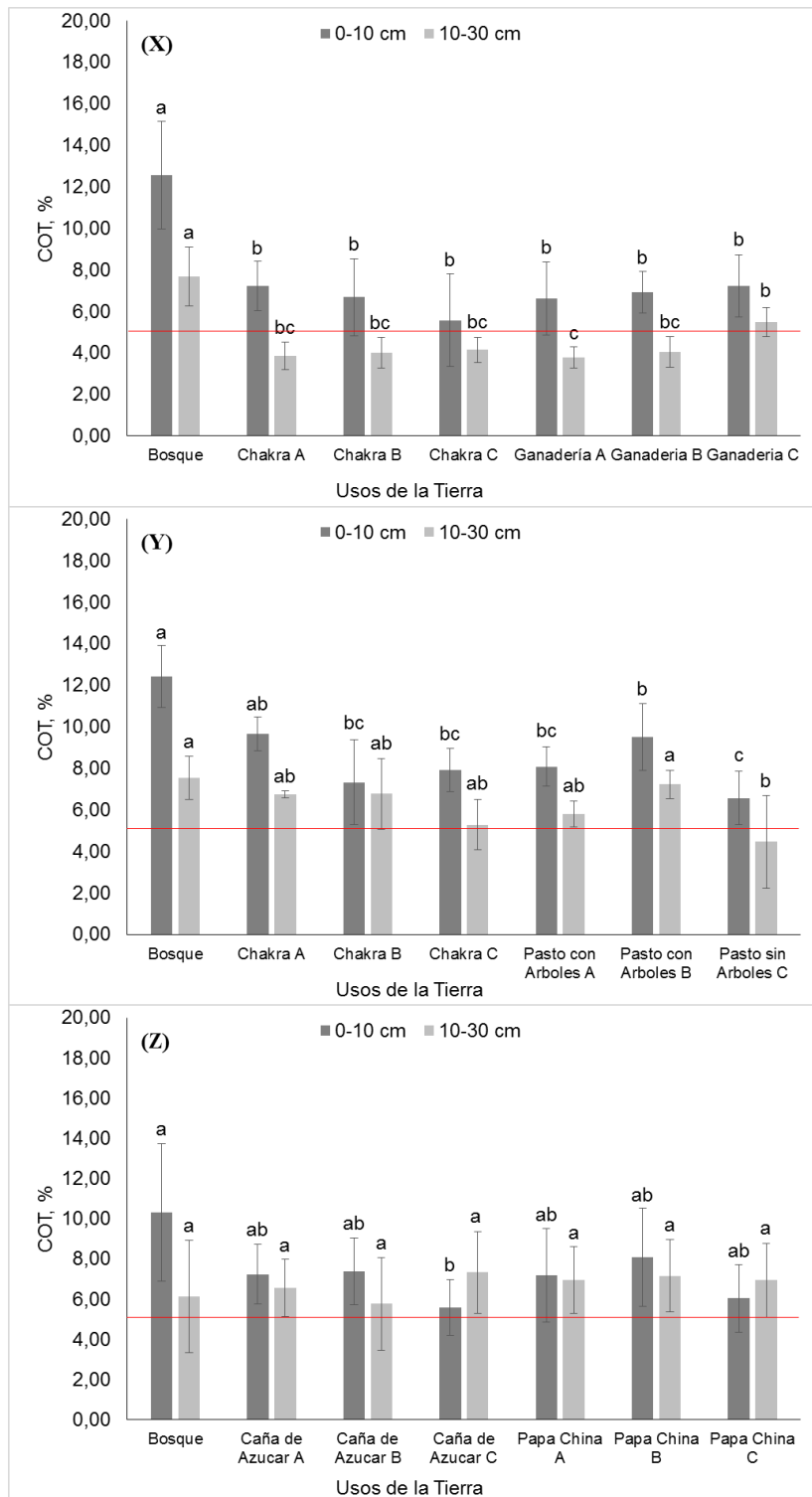


Figura 18. Carbono orgánico total bajo distintos usos de la tierra en tres zonas: X) Boyacu; Y) Simón Bolívar y Z) Llandia. Letras minúsculas distintas entre columnas para una misma profundidad indican diferencias significativas (Tukey, $P < 0,05$).

Por otro lado, estos resultados fueron contrarios a los obtenidos por Freitas *et al.* (2013) entre agroecosistemas amazónicos, donde registraron la mayor proporción de COT en suelos de sistema agroforestal y ganadería, pero un valor comparativamente menor en el uso de bosque, lo que sugiere un buen manejo para la protección de la MO en esos usos cultivados, favorecido por la longevidad de los sistemas.

Para la segunda capa (10-30 cm), el COT presentó diferencias estadísticas ($P < 0,05$) entre los respectivos usos de la tierra de Boayacu y Simón Bolívar. En la zona de Boayacu el COT mantuvo su mayor contenido en el uso de bosque (8%), seguido de la ganadería C (6%), y con la menor proporción correspondiente a la ganadería A (4%). Por su parte, en Simón Bolívar, la mayor cantidad de COT fue hallada en los usos de bosque y pasto con árboles B (7%), mientras que el menor valor de la variable se observó en el uso de pasto sin árboles C (5%). La zona de Llandia no mostró diferencias significativas entre los usos de la tierra para esta profundidad (Figura 18).

Los resultados hallados en la presente investigación, se relacionaron con la historia de uso de los suelos amazónicos, principalmente con bosque con alta capacidad de almacenamiento de COT en los suelos. Esta alta acumulación principalmente en el uso con bosque, conlleva una mayor cantidad de macroporos en los suelos, que incrementan la actividad de microorganismos mineralizadores de la MO, lo que coincide con Díaz, Fachin, Tello y Arévalo (2016), y se genera mayor disponibilidad de COT.

Por otra parte, los efectos de los cambios de uso de la tierra, concuerdan con Dortzbach, Pereira, Blainski y González (2015), quienes señalan que, en condiciones amazónicas, al convertirse los usos de bosque en sistemas ganaderos, se ocasiona una pérdida de 20-30% de COT del suelo en los primeros años después de la tala y quema, no obstante, los contenidos de COT luego de 20 años de ganadería con buen manejo, pueden recuperarse y superar a los del bosque.

4.3.2. Biomasa de hojarasca

Se observaron diferencias estadísticas ($P < 0,05$) en la acumulación de biomasa de hojarasca por efecto de los usos de la tierra en la superficie del suelo de las tres zonas estudiadas (Figura 19). Con respecto a Boayacu, la menor acumulación de biomasa se obtuvo en los

usos de *chakra* A y C (2817,76 kg ha⁻¹), no obstante, la mayor acumulación se encontró en el uso de ganadería C (9735,92 kg ha⁻¹). En el caso de Simón Bolívar, la menor acumulación de biomasa se alcanzó en los usos de bosque y *chakra* A (11096,4 kg ha⁻¹), por el contrario, la mayor acumulación ocurrió en los usos de *chakra* B y pasto con árboles A (35920 kg ha⁻¹). Por otro lado, en Llandia, la mayor acumulación de biomasa correspondió a los usos de caña de azúcar A, B y C (5993,01 kg ha⁻¹), lo que contrastó con los menores valores de la variable encontrados en los usos de papa china A, B y C (902,64 kg ha⁻¹) (Figura 19).

Los resultados del presente estudio encontrados en bosque (7971,2 kg ha⁻¹), ganadería B (8408,96 kg ha⁻¹) y C (9735,92 kg ha⁻¹) de la zona de Boayacu, fueron similares a los reportados por Celentano *et al.* (2011) en Costa Rica, donde al probar modelos de restauración de bosques tropicales, obtuvieron acumulaciones de 7200 kg ha⁻¹ y 10600 kg ha⁻¹ de hojarasca en bosques secundarios y plantaciones forestales diversificadas respectivamente. No obstante, los valores de acumulación de hojarasca del bosque de Simón Bolívar y de todos los usos de Llandia fueron menores a los encontrados por Celentano *et al.* (2011) en el bosque secundario de Costa Rica. Por el contrario, el resto de usos de la tierra de Simón Bolívar mostraron valores de hojarasca muy superiores a los referidos por Celentano *et al.* (2011) en plantaciones forestales.

Las variaciones en la acumulación de biomasa de hojarasca en la presente investigación, concuerdan con el estudio de Castañeda (2014) para las zonas de Tarapotó y Yurimaguas en la época lluviosa de la Amazonía peruana, donde encontraron diferencias en las que, el uso de bosque residual mostró la menor acumulación de hojarasca (6460 kg ha⁻¹) en relación al uso de cacao-bosque (29820 kg ha⁻¹) en Tarapotó, mientras que la menor acumulación de hojarasca de Yurimaguas fue obtenida en un monocultivo de palmito (*Bactris gasipaes*) (4240 kg ha⁻¹), seguida por los usos de bosque secundario y primario (11370 kg ha⁻¹), y la mayor acumulación en un sistema agroforestal multiestrato (16700 kg ha⁻¹). Estos resultados coinciden con Castañeda (2014), quien sugiere que las variaciones en acumulación de biomasa de los usos de la tierra, podrían atribuirse a factores como la antigüedad de los sistemas evaluados, el tipo de cobertura vegetal asociada y las prácticas de manejo.

Las diferencias en la acumulación de biomasa de este trabajo, concuerdan con Freitas (2013), quien señala que la etapa de sucesión ecológica en la que se renuevan con mayor intensidad las hojas de un sistema agroforestal, así como la calidad de los residuos constituyentes que

retrasan la descomposición de la hojarasca, pueden tener un mayor efecto en su acumulación sobre el suelo de sistemas agroforestales en relación con usos de bosque.

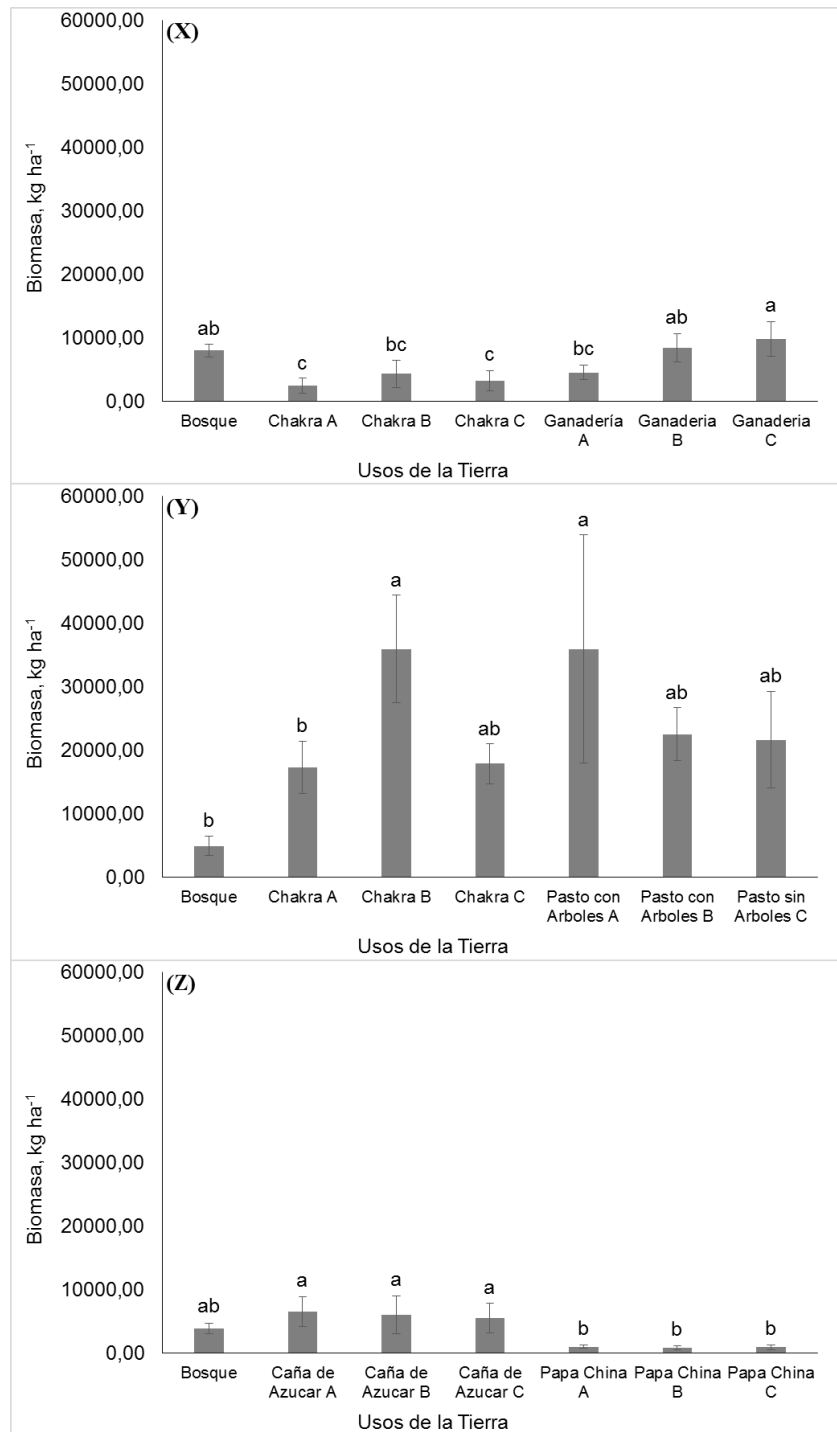


Figura 19. Biomasa de hojarasca bajo distintos usos de la tierra en tres zonas: X) Boayacu; Y) Simón Bolívar y Z) Llandia. Letras minúsculas distintas entre columnas para una misma profundidad indican diferencias significativas (Tukey, $P < 0,05$).

4.4. Asociación de parámetros de fertilidad edáfica en Boayacu, Simón Bolívar y Llandia bajo distintos usos de la tierra.

La asociación entre las distintas propiedades bajo los usos de la tierra de cada una de las tres zonas evaluadas se determinó mediante una matriz de correlación al usar el coeficiente de correlación lineal que fluctúa entre $-1 \leq \rho \leq 1$. No obstante, para su interpretación, se consideró su fuerza y dirección, lo que indica que mientras mayor es el valor absoluto del coeficiente, más fuerte es la relación entre las variables. Así mismo, si ambas variables tienden a aumentar o disminuir a la vez, el coeficiente es positivo (+), mientras que, si una variable tiende a incrementarse y la otra disminuye, el coeficiente es negativo (-).

Bajo esta premisa, para la zona de Boayacu en el horizonte superficial los parámetros asociados a la fertilidad fueron muy variados, lo que mostró algunas relaciones significativas que oscilaron de fuerte ($> 0,60$), moderada (0,30 a 0,60) y débil ($< 0,30$) con dirección en ambos sentidos, bien sea negativa o positiva. Entre los parámetros físicos se observó una fuerte correlación negativa entre la Pr y Pa (-0,85) (Tabla 4), lo que coincide con Martins *et al.* (2015) quienes evaluaron correlaciones de atributos edáficos en suelos arcillosos bajo distintos usos de la tierra en Minas Gerais, Brasil, en donde los autores indicaron que la variación entre Pr y Pa se asocia a que los macroporos del suelo son más susceptibles a los cambios de manejo que los microporos.

También se encontró una fuerte correlación negativa entre el COT y la Da (-0,66) (Tabla 4). Los resultados obtenidos concuerdan con estudios como los de Bravo *et al.* (2017) relacionados con los efectos que producen los cambios de uso de la tierra sobre el ambiente edáfico. Al respecto se señala que la Da se redujo debido a la acumulación de biomasa en la superficie del suelo lo que aumentó el contenido de MO del suelo, que también puede conducir a un aumento de la agregación y a una reducida Da. Adicionalmente, los resultados del presente estudio sugieren que a largo plazo los sistemas agroforestales pueden evitar la compactación mediante la translocación de C en el suelo a capas más profundas producto de un sistema radical más profundo, en concordancia con lo señalado por Blanco-Canqui y Ruis (2018).

Tabla 4. Matriz de correlaciones de las variables físicas, químicas y biológicas del suelo a una profundidad de 0-10 cm entre distintos usos de la tierra de la zona de Boayacu

	Da	Ksat	Pt	Pa	Pr	COT	pH	Acidez	Al ³⁺	P	K ¹⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Biomasa
Da, (Mg m ⁻³)	1,00													
Ksat, (cm h ⁻¹)	-0,04	1,00												
Pt, (%)	-,446**	-,338*	1,00											
Pa, (%)	-,458**	,545**	-0,19	1,00										
Pr, (%)	0,11	-,591**	,673**	-,852**	1,00									
COT, (%)	-,659**	0,03	,345*	,379*	-0,1	1,00								
pH	0,25	-0,33	0,11	-,525**	,454**	-,462**	1,00							
Acidez, (meq 100 ml)	0,00	-0,03	0,09	-0,15	0,16	0,15	-,421*	1,00						
Al ³⁺ , (meq 100 ml)	0,05	-0,17	0,08	-0,27	0,25	-0,20	0,20	,561**	1,00					
P, (mg kg ⁻¹)	0,21	0,26	-0,21	-0,12	-0,02	-,346*	0,19	0,07	0,30	1,00				
K ⁺ , (meq 100 ml)	0,26	-0,22	0,17	-,413*	,400*	-0,18	,387*	0,21	0,23	0,06	1,00			
Ca ²⁺ , (meq 100 ml)	0,15	-0,16	0,18	-,378*	,379*	-0,29	,637**	-0,2	0,12	,484**	,423*	1,00		
Mg ²⁺ , (meq 100 ml)	0,25	-0,28	0,12	-,539**	,471**	-,360*	,632**	0,07	0,25	,388*	,721**	,756**	1,00	
Biomasa, (kg ha ⁻¹)	-,453**	-0,11	,532**	0,01	0,28	,406*	-0,07	0,00	-0,15	-0,29	0,04	-0,12	-0,16	1,00

Da: Densidad aparente; Ksat: Conductividad hidráulica saturada; Pt: Porosidad total; Pa: Porosidad de aireación; Pr: Porosidad de retención; COT: Carbono orgánico total; Al³⁺: Aluminio; P: Fósforo; K¹⁺: Potasio; Ca²⁺: Calcio; Mg²⁺: Magnesio.

** . La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral).

* . La correlación es significativa al nivel 0,05 (bilateral).

La moderada correlación positiva de la K_{sat} con la P_a (0,55) confirma lo indicado por Blanco-Canqui y Ruis (2018), quienes señalan que el mejoramiento de la porosidad del suelo principalmente la P_a , y la continuidad de los poros da origen a un incremento de la actividad biológica, lo que puede dar como resultado la formación de abundantes canales radiculares y redes de macroporos que finalmente se pueden reflejar en un mejoramiento de las propiedades hidráulicas del suelo. Estos resultados coinciden con García, Figueiredo, Dafonte, Almeida y Paz (2015), los cuales manifiestan que puede reducirse el movimiento de agua y aire en el suelo, debido a la interrupción del sistema de macroporos que constituyen los espacios porosos a través de los cuales son distribuidos, el agua, aire y nutrientes.

Los resultados de esta investigación fueron similares a los reportados por Frozzi (2017) al sur del Estado Amazonas en Brasil, donde encontró una correlación negativa entre el carbono orgánico (CO) y la D_a del suelo, lo cual refleja el impacto del CO en la estructura edáfica. El presente estudio mostró una fuerte correlación entre la P_t y la P_r (0,67), no obstante, la relación fue opuesta en el estudio de Muller, Guimarães, Desjardins y Martins (2001), quienes indican que en pasturas degradadas de la Amazonía, hay un incremento de microporos cuando disminuye la P_t .

De igual manera, la P_t también se correlacionó positivamente con la cantidad de biomasa de hojarasca (0,53) acumulada en la superficie del suelo, de modo que estos resultados concordaron con Muñoz, Ferreira, Escalante y López (2013), quienes sostienen que una mayor acumulación de residuos y MO incrementan la porosidad del suelo y reducen su compactación.

El comportamiento de los parámetros químicos en el horizonte superficial, se evidenció a través de dos variables importantes como el pH y las bases intercambiables. En cuanto al pH del suelo, también se registró una fuerte correlación positiva con las concentraciones de Ca^{2+} (0,64) y Mg^{2+} (0,63) intercambiables (Tabla 4), esto puede estar dado a que valores de pH inferiores a 5,5 solubilizan el Al^{3+} en el suelo que en forma intercambiable desplaza a los cationes básicos del complejo de cambio, lo que reduce su disponibilidad y promueve su lixiviación, lo que coincide con Bertsch, (1987). También se observó que la acidez intercambiable del suelo expresó una correlación positiva de 0,56 con la concentración de Al^{3+} intercambiable (Tabla 4), lo que concuerda con Silva (2014), quien afirma que el Al^{3+} intercambiable es un constituyente principal de la acidez en suelos tropicales.

Por otra parte, el contenido de Mg^{2+} intercambiable mostró una fuerte correlación positiva con las concentraciones de Ca^{2+} (0,76) y K^{1+} (0,72) intercambiables (Tabla 4), lo cual indica que el incremento de una de las bases puede mejorar la disponibilidad de las otras, lo cual a su vez se puede reflejar en el aumento de la suma de bases y CIC. El aumento de las tres bases intercambiables puede estar relacionado con el aporte derivado del incremento de la MO.

Para la profundidad del suelo de 10-30 cm, se encontró que en Boayacu, los usos de la tierra mantuvieron una correlación positiva fuerte entre la Pr y Pt (0,88), así como entre la acidez y el Al^{3+} (0,82) intercambiables respectivamente (Tabla 5). La presente correlación positiva entre Pr y Pt, al diferir de la encontrada por Muller *et al.* (2001) podría indicar que en la zona de Boayacu se conserva un buen balance entre Pr y Pa en los suelos evaluados. Por otra parte, los resultados son consistentes con Kisinyo *et al.* (2013) quienes señalan que la alta acidez edáfica presente en zonas tropicales húmedas, está asociada a la toxicidad de Al^{3+} , H^{1+} , Fe y Mn encontrados en esos suelos.

En lo concerniente al Mg^{2+} intercambiable, también se observó una fuerte correlación positiva con las concentraciones de K^{1+} (0,70) y Ca^{2+} (0,69) intercambiables, y existió una moderada correlación inversa entre la Da y la Pt (-0,60) (Tabla 5), lo cual coincide con lo reportado por Marcatto y Silveira (2016), en dónde la Da afecta a la cantidad y tamaño de poros del suelo.

En el horizonte subsuperficial de Boayacu también se mostró una moderada correlación positiva entre las concentraciones de Ca^{2+} intercambiable y de P disponible (0,58), además, cabe destacar que el P disponible del suelo se encontró correlacionado negativamente, pero a un nivel moderado, con la Pt (-0,56) y Pr (-0,51) (Tabla 5). Estos resultados coinciden con Carrasco, Antúnez y Lemus (2010), quienes manifiestan que los microporos responsables de la retención de humedad, son más abundantes en los suelos arcillosos, de modo que constituyen la mayor proporción de la Pt (Navarro y Navarro, 2014), y adicionalmente, de acuerdo con CIAT (1981) y Vargas, Cremades, Villarreal y Medina (2013) mientras mayor es la proporción de arcillas del suelo (caolinitas en medio ácido), también se incrementa la fijación de P en los coloides edáficos, lo que reduce la disponibilidad del nutriente en la solución del suelo.

Tabla 5. Matriz de correlaciones de las variables físicas, químicas y biológicas del suelo a una profundidad de 10-30 cm entre distintos usos de la tierra de la zona de Boayacu

	Da	Ksat	Pt	Pa	Pr	COT	pH	Acidez	Al ³⁺	P	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺
Da, (Mg m ⁻³)	1,00												
Ksat, (cm h ⁻¹)	-0,20	1,00											
Pt, (%)	-,603**	0,10	1,00										
Pa, (%)	-,425*	,425*	0,07	1,00									
Pr, (%)	-,348*	-0,11	,880**	-,415*	1,00								
COT, (%)	-,477**	,383*	0,16	0,26	0,02	1,00							
pH	0,05	-0,30	-0,11	-0,07	-0,07	-0,32	1,00						
Acidez, (meq 100 ml)	-0,23	0,10	-0,09	0,26	-0,21	0,04	-0,21	1,00					
Al ³⁺ , (meq 100 ml)	-0,13	0,00	-0,17	0,26	-0,27	-0,01	-0,16	,816**	1,00				
P, (mg kg ⁻¹)	0,18	-0,11	-,557**	0,01	-,512**	-0,07	0,25	0,27	,364*	1,00			
K ⁺ , (meq 100 ml)	-0,11	0,04	0,07	0,05	0,05	-0,09	0,04	,460**	0,04	-0,05	1,00		
Ca ²⁺ , (meq 100 ml)	0,12	-0,14	-,393*	0,00	-,360*	0,04	0,31	0,24	0,00	,581**	,445**	1,00	
Mg ²⁺ , (meq 100 ml)	-0,12	-0,03	0,04	0,06	0,01	-0,04	0,23	,337*	-0,02	0,15	,698**	,686**	1,00

Da: Densidad aparente; Ksat: Conductividad hidráulica saturada; Pt: Porosidad total; Pa: Porosidad de aireación; Pr: Porosidad de retención; COT: Carbono orgánico total; Al³⁺: Aluminio; P: Fósforo; K¹⁺: Potasio; Ca²⁺: Calcio; Mg²⁺: Magnesio.

** La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral).

* La correlación es significativa al nivel 0,05 (bilateral).

Entre todos los usos de la tierra de Simón Bolívar, se verificó que de 0-10 cm de profundidad edáfica, hubo una fuerte correlación positiva entre la Pt y Pr (0,76), así como entre las concentraciones de Ca^{2+} y Mg^{2+} (0,79) intercambiables del suelo (Tabla 6). Los resultados de la presente investigación sugieren buenas condiciones de porosidad en la zona analizada, independientemente de los cambios de uso de la tierra, lo que coincide con Stefanoski, Santos, Marchão, Petter y Pacheco (2013) quienes indican que una reducción lineal en la Pt y Pa se asocia a un aumento en la Pr relativa. Adicionalmente, las correlaciones positivas encontradas en el presente trabajo confirman lo reportado por Sanz (2013) para suelos de la región amazónica, quien indica que debido a las lluvias abundantes, los suelos de la región evaluada muestran una alta lixiviación que reduce en conjunto la disponibilidad de Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^{1+} intercambiables en los horizontes edáficos.

Cabe señalar que, la Pr se correlacionó inversamente con la Pa (-0,69) y la Ksat (-0,62) (Tabla 6). Lo descrito se fundamenta en que la Ksat se reduce cuando disminuyen los macroporos del suelo, lo que coincide con lo planteado por Pérez y García (2015), y aunque la Pr permite el almacenamiento de agua, los microporos son poco efectivos en la transmisión de fluidos, de acuerdo con Porta, López y Poch (2014). De igual forma, el nivel de pH del suelo tuvo una fuerte correlación negativa con la Pa (-0,65) y una fuerte correlación positiva con la Pr (0,61) (Tabla 6), lo cual estaría causado por la alta lixiviación de cationes básicos del suelo, favorecida por el volumen de macroporos que permiten un buen drenaje.

En lo relativo a la acidez intercambiable, la variable mostró una fuerte correlación negativa con el nivel de pH (-0,63) y positiva con el contenido de COT (0,60) del suelo (Tabla 6). Estos resultados confirman lo planteado por Arruda (2014), quien indica que a medida que el valor de pH disminuye por debajo de 7, se puede comprobar la reacción ácida del suelo. De acuerdo a la correlación positiva del COT con la acidez intercambiable, es importante reconocer que ese comportamiento es común en suelos arcillosos de regiones tropicales húmedas, lo que corrobora lo planteado por Braga, Braga y Venturin (2014). Por otro lado, el contenido de COT exhibió una fuerte correlación inversa con la Da (-0,62) (Tabla 6), esto al considerar que la MO es una variable que mejora las propiedades físicas del suelo, lo que coincide con Vasconcelos, Souza, Cantalice y Silva (2014).

Tabla 6. Matriz de correlaciones de las variables físicas, químicas y biológicas del suelo a una profundidad de 0-10 cm entre distintos usos de la tierra de la zona de Simón Bolívar

	Da	Ksat	Pt	Pa	Pr	COT	pH	Acidez	Al ³⁺	P	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Biomasa
Da, (Mg m ⁻³)	1,00													
Ksat, (cm h ⁻¹)	,025	1,00												
Pt, (%)	-,086	-,521**	1,00											
Pa, (%)	-,276	,369*	-,040	1,00										
Pr, (%)	,118	-,622**	,756**	-,685**	1,00									
COT, (%)	-,618**	,155	-,013	,540**	-,364*	1,00								
pH	,157	-,250	,247	-,648**	,605**	-,406*	1,00							
Acidez, (meq 100 ml)	-,425*	,121	,073	,573**	-,322	,604**	-,630**	1,00						
Al ³⁺ , (meq 100 ml)	-,177	-,258	,086	-,406*	,329	-,022	,384*	,121	1,00					
P, (mg kg ⁻¹)	,026	-,181	-,051	-,179	,081	,064	,020	,166	,351*	1,00				
K ⁺ , (meq 100 ml)	-,104	-,138	,108	-,051	,112	,001	,354*	,111	,375*	,071	1,00			
Ca ²⁺ , (meq 100 ml)	,026	-,139	-,054	-,284	,148	-,026	,324	-,155	,283	,392*	,102	1,00		
Mg ²⁺ , (meq 100 ml)	,025	,033	-,043	-,191	,094	-,019	,311	-,027	,245	,192	,202	,787**	1,00	
Biomasa, (kg ha ⁻¹)	,389*	-,254	,087	-,583**	,446**	-,500**	,346*	-,311	,489**	,150	,053	,114	,143	1,00

Da: Densidad aparente; Ksat: Conductividad hidráulica saturada; Pt: Porosidad total; Pa: Porosidad de aireación; Pr: Porosidad de retención; COT: Carbono orgánico total; Al³⁺: Aluminio; P: Fósforo; K¹⁺: Potasio; Ca²⁺: Calcio; Mg²⁺: Magnesio.

** . La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral).

*. La correlación es significante al nivel 0,05 (bilateral).

En el horizonte superficial de suelos de Simón Bolívar, la Pa también presentó correlaciones moderadas positivas con la proporción de COT (0,54) del suelo y la acidez intercambiable (0,57), mientras mantuvo una correlación moderada inversa con la cantidad de biomasa de hojarasca (-0,58) acumulada en el suelo. La Pt mostró una correlación moderada negativa con la Ksat (-0,52), y así también lo hizo el COT con la biomasa de hojarasca (-0,50) acumulada (Tabla 6). Los resultados de correlación negativa entre Pt y Ksat del presente trabajo coinciden con Navarro y Navarro (2014), quienes reportan una mayor abundancia de microporos en la conformación del volumen total de espacios vacíos del suelo, como característica común en suelos dominados por partículas finas. Por otra parte, los resultados de correlación media entre el COT del suelo y la hojarasca en la presente zona evaluada, se asemejan a los hallazgos de Zanabria y Cuellar (2015) en un ecosistema alto andino peruano, donde encontraron que la biomasa de hojarasca fue el componente que menos contribuyó al almacenamiento de COT en los depósitos de distintos usos de la tierra.

En lo correspondiente a la profundidad edáfica de 10-30 cm, la zona de Simón Bolívar presentó una fuerte correlación positiva entre las concentraciones de Ca^{2+} y Mg^{2+} (0,94) intercambiables (Tabla 7), lo que coincide con el comportamiento de suma de bases observado por Maia (2013), también se encontró que la Pr mostró una fuerte correlación positiva y negativa con la Pt (0,80) y Pa (-0,71) respectivamente, lo que concuerda con Porta *et al.* (2014) al señalar el comportamiento hídrico opuesto entre macroporos y microporos. Por su parte, el K^{1+} intercambiable mostró fuertes correlaciones directas con las concentraciones de Mg^{2+} (0,67) y Ca^{2+} (0,64) intercambiables, mientras la Pt presentó una fuerte correlación negativa con la Da (-0,61) (Tabla 7), similar a lo encontrado por Marcatto y Silveira (2016) al evaluar las relaciones entre propiedades físico-hídricas de suelos. Los resultados del estudio coincidieron con Marcatto, Hercoli, Silveira y Graça (2015) y Bravo *et al.* (2017d), quienes indican que altos valores de Da tienen influencia en la reducción del volumen total de poros del suelo.

En la profundidad edáfica subsuperficial de Simón Bolívar también se observaron correlaciones positivas moderadas entre la Pa y Ksat (0,56), así como entre la acidez y la concentración de Al^{3+} (0,53) intercambiables (Tabla 7). A este respecto, las relaciones observadas son propias de suelos amazónicos, que se caracterizan por tener buena profundidad, textura gruesa, baja fertilidad, alta acidez y concentraciones de Al^{3+} intercambiables, lo que concuerda con la descripción de Vargas, Panduro y Falcón (2013).

Tabla 7. Matriz de correlaciones de las variables físicas, químicas y biológicas del suelo a una profundidad de 10-30 cm entre distintos usos de la tierra de la zona de Simón Bolívar

	Da	Ksat	Pt	Pa	Pr	COT	pH	Acidez	Al ³⁺	P	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺
Da, (Mg m⁻³)	1,00												
Ksat, (cm h⁻¹)	-,128	1,00											
Pt, (%)	-,613**	-,055	1,00										
Pa, (%)	,087	,558**	-,146	1,00									
Pr, (%)	-,488**	-,379*	,797**	-,714**	1,00								
COT, (%)	-,465**	-,146	,202	,030	,125	1,00							
pH	-,096	-,128	-,152	-,134	-,026	-,014	1,00						
Acidez, (meq 100 ml)	,142	-,003	,278	,042	,171	,016	-,479**	1,00					
Al³⁺, (meq 100 ml)	,025	,031	,068	-,005	,052	,043	-,098	,529**	1,00				
P, (mg kg⁻¹)	,015	-,160	-,012	-,247	,143	,117	-,070	-,003	,098	1,00			
Ca²⁺, (meq 100 ml)	,073	-,195	,013	-,208	,137	,157	,293	,003	,202	,274	1,00		
Mg²⁺, (meq 100 ml)	,155	-,162	,013	-,238	,155	,145	,219	,167	,257	,218	,937**	1,00	
K⁺, (meq 100 ml)	,335*	-,055	-,341*	,124	-,318	,279	,218	,027	,115	,300	,636**	,669**	1,00

Da: Densidad aparente; Ksat: Conductividad hidráulica saturada; Pt: Porosidad total; Pa: Porosidad de aireación; Pr: Porosidad de retención; COT: Carbono orgánico total; Al³⁺: Aluminio; P: Fósforo; K¹⁺: Potasio; Ca²⁺: Calcio; Mg²⁺: Magnesio.

** La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral).

* La correlación es significativa al nivel 0,05 (bilateral).

Para la zona de Llandia, se encontró que entre los usos de la tierra analizados de 0-10 cm de profundidad edáfica, hubo una fuerte correlación directa entre la Pt y Pr (0,78), por otro lado, se observó una fuerte correlación negativa entre el nivel de pH del suelo y la acidez intercambiable (-0,77) (Tabla 8), estos resultados coincidieron con el estudio de Quartezeni, Lima, Zucoloto y Xavier (2013) realizado en suelos arcillosos del trópico húmedo brasileño, donde los autores sugirieron prácticas de encalado y fertilización orientadas a disminuir las concentraciones de acidez intercambiable, para elevar el nivel de pH, Ca^{2+} y Mg^{2+} intercambiables.

La Pr también es una variable que tuvo una fuerte correlación inversa con la Pa (-0,69) y la Ksat (-0,61) (Tabla 8), lo cual concuerda con el criterio de Bravo *et al.* (2017d), quienes refieren una mayor dependencia de la tasa de infiltración de agua del suelo con la cantidad de macroporos. Por otra parte, fuertes correlaciones directas fueron halladas entre la acidez y Al^{3+} (0,68) intercambiables; pH del suelo y contenido de Ca^{2+} (0,65) intercambiable; así como entre el Ca^{2+} y Mg^{2+} (0,69) intercambiables (Tabla 8), lo que coincide con Cabezas (2016), quien manifiesta que la pérdida del conjunto de bases intercambiables en la solución del suelo, es consecuencia de un bajo pH que resulta de una alta concentración de Al^{3+} e H^{1+} intercambiables que constituyen la acidez edáfica.

En el horizonte superficial de Llandia, la Da exhibió una correlación moderada inversa y directa con la Pt (-0,52) y la concentración de Mg^{2+} (0,53) intercambiable, respectivamente (Tabla 8). Los resultados de correlación negativa entre la Da y Pt del presente estudio, coinciden con los encontrados por Frozzi (2017), al explicar que los suelos arcillosos son más fácilmente alterados por las prácticas de manejo, lo cual puede compactarlos al reducirse sus espacios porosos y aumentar su Da.

La Ksat estuvo directamente correlacionada con la Pa a un nivel moderado (0,51), mientras la acidez y Al^{3+} intercambiables del suelo presentaron una moderada correlación negativa con las concentraciones de Ca^{2+} (-0,54) y Mg^{2+} (-0,56) intercambiables, respectivamente (Tabla 8). Estos resultados fueron consistentes con lo señalado por Juca (2017), quien resalta que los suelos ácidos poseen concentraciones tóxicas de Al^{3+} intercambiable, y eso conduce a que en su mayoría esos suelos sean deficientes en nutrientes como Ca^{2+} , Mg^{2+} intercambiables y P disponible.

Tabla 8. Matriz de correlaciones de las variables físicas, químicas y biológicas del suelo a una profundidad de 0-10 cm entre distintos usos de la tierra de la zona de Llandia

	Da	Ksat	Pt	Pa	Pr	COT	pH	Acidez	Al ³⁺	P	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Biomasa	
Da, (Mg m ⁻³)	1,00														
Ksat, (cm h ⁻¹)	0,25	1,00													
Pt, (%)	-,524**	-,405*	1,00												
Pa, (%)	-0,01	,508**	-0,09	1,00											
Pr, (%)	-,374*	-,611**	,784**	-,690**	1,00										
COT, (%)	-0,28	0,24	-0,12	0,31	-0,28	1,00									
pH	0,24	-0,24	-0,27	-0,01	-0,19	-0,21	1,00								
Acidez, (meq 100 ml)	-0,11	0,25	0,16	-0,03	0,14	0,04	-,771**	1,00							
Al ³⁺ , (meq 100 ml)	-0,32	-0,07	,424*	0,11	0,24	0,03	-,450**	,684**	1,00						
P, (mg kg ⁻¹)	0,31	-,372*	-0,23	-0,18	-0,06	-0,27	,460**	-,471**	-0,33	1,00					
K ⁺ , (meq 100 ml)	0,19	-0,12	-0,13	-0,16	0,01	-0,01	,343*	-0,27	-0,29	,384*	1,00				
Ca ²⁺ , (meq 100 ml)	0,33	-0,12	-0,28	-0,06	-0,17	-0,22	,651**	-,543**	-,451**	,478**	0,08	1,00			
Mg ²⁺ , (meq 100 ml)	,527**	0,12	-,420*	-0,15	-0,21	-0,17	,498**	-0,32	-,562**	,490**	,434**	,691**	1,00		
Biomasa, (kg ha ⁻¹)	-0,13	-0,04	0,20	-0,17	0,25	-0,04	-0,30	0,18	0,11	-0,11	-0,33	0,01	0,00	1,00	

Da: Densidad aparente; Ksat: Conductividad hidráulica saturada; Pt: Porosidad total; Pa: Porosidad de aireación; Pr: Porosidad de retención; COT: Carbono orgánico total; Al³⁺: Aluminio; P: Fósforo; K⁺: Potasio; Ca²⁺: Calcio; Mg²⁺: Magnesio.

** . La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral).

* . La correlación es significativa al nivel 0,05 (bilateral).

En la profundidad edáfica de 10-30 cm, entre todos los usos de la tierra de la zona de Llandia se comprobó que la Da mantuvo fuertes correlaciones inversas con la Pt (-0,94) y Pr (-0,82), así como una menor correlación inversa de -0,64 con la Pa (Tabla 9). Los resultados reportados fueron semejantes a los hallados por Marcatto y Silveira (2016) al norte del Estado de Paraná en Brasil, donde encontraron correlaciones negativas fuertes entre la Da y la Pa de suelos, no obstante, encontraron moderadas correlaciones positivas entre Da y Pr, sin embargo, luego de analizar conjuntamente la densidad y la cantidad de poros en el suelo, los mismos autores agregan que una reducción de la Pt y la capacidad de movimiento de agua en el perfil edáfico pueden propiciar condiciones de compactación.

Por otra parte, la Pt mostró una fuerte correlación directa con la Pr (0,93), y así también se evidenció una fuerte correlación positiva entre el Ca^{2+} y Mg^{2+} (0,78) intercambiable, no obstante, la concentración de Mg^{2+} intercambiable tuvo una menor correlación de 0,66 con el K^{1+} intercambiable (Tabla 9), lo que concuerda con Trigos (1970), quien afirma que en la proporción de bases intercambiables disponibles en suelos meteorizados de reacción ácida y arcillosos, el K^{1+} es el catión menos abundante con respecto al Ca^{2+} y Mg^{2+} intercambiables, lo que también coincide con Sadeghian, González y Arias (2015), quienes manifiestan que en suelos de la zona cafetera colombiana, el orden natural de adsorción de cationes intercambiables es $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^{1+} > \text{Na}^{1+}$.

En lo relativo a la acidez intercambiable, la variable se correlacionó directa y fuertemente con la Da (0,68), pero mantuvo una fuerte correlación inversa con la Pt (-0,68) y Pr (-0,63) (Tabla 9). Los resultados observados fueron similares a los reportados por Santos *et al.* (2014) en el Estado de Tocantins, Brasil, en donde se hallaron correlaciones positivas entre la Da y acidez intercambiable en llanuras de inundación, lo cual significó un problema para el desarrollo de plantas, debido a una baja absorción de nutrientes agravada con una Da mayor a $1,4 \text{ Mg m}^{-3}$. De igual manera, en el presente estudio se resaltó la fuerte correlación positiva que hubo entre el nivel de pH del suelo y la concentración de Ca^{2+} (0,60) intercambiable (Tabla 9), lo que coincidió con lo señalado por Cabezas (2016), quien sostiene que una reducción en la disponibilidad de nutrientes como consecuencia de un bajo nivel de pH, afecta al crecimiento de las plantas.

Tabla 9. Matriz de correlaciones de las variables físicas, químicas y biológicas del suelo a una profundidad de 10-30 cm entre distintos usos de la tierra de la zona de Llandia

	Da	Ksat	Pt	Pa	Pr	COT	pH	Acidez	Al ³⁺	P	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺
Da, (Mg m ⁻³)	1,00												
Ksat, (cm h ⁻¹)	-0,13	1,00											
Pt, (%)	-,943**	0,02	1,00										
Pa, (%)	-,640**	,564**	,548**	1,00									
Pr, (%)	-,821**	-0,22	,929**	0,20	1,00								
COT, (%)	-,446**	0,26	,390*	0,28	0,33	1,00							
pH	-0,26	-0,10	0,25	0,22	0,20	0,23	1,00						
Acidez, (meq 100 ml)	,681**	0,07	-,675**	-,366*	-,629**	-0,31	-,546**	1,00					
Al ³⁺ , (meq 100 ml)	-0,02	0,18	-0,07	0,16	-0,15	-0,03	-0,33	,390*	1,00				
P, (mg kg ⁻¹)	-,408*	0,21	,350*	,546**	0,17	0,07	0,16	-0,22	0,10	1,00			
K ⁺ , (meq 100 ml)	-0,16	0,14	0,08	0,28	-0,03	0,15	,347*	-0,12	0,13	0,33	1,00		
Ca ²⁺ , (meq 100 ml)	0,09	0,00	-0,06	0,12	-0,13	0,17	,601**	0,02	-0,08	0,31	,583**	1,00	
Mg ²⁺ , (meq 100 ml)	0,24	0,07	-0,23	0,06	-0,30	0,08	,350*	0,30	0,20	0,07	,657**	,778**	1,00

Da: Densidad aparente; Ksat: Conductividad hidráulica saturada; Pt: Porosidad total; Pa: Porosidad de aireación; Pr: Porosidad de retención; COT: Carbono orgánico total; Al³⁺: Aluminio; P: Fósforo; K⁺: Potasio; Ca²⁺: Calcio; Mg²⁺: Magnesio.

** La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral).

* La correlación es significante al nivel 0,05 (bilateral).

En el horizonte subsuperficial de los usos de la tierra evaluados en Llandia, la Pa también exhibió una moderada correlación directa con la Ksat (0,56), Pt (0,55) y la concentración de P disponible (0,55) en el suelo (Tabla 9). Con respecto a la correlación positiva entre Ksat y Pa reportada en el presente estudio, los resultados concuerdan con lo reportado por Marcatto y Silveira (2016), en donde la menor Ksat en cultivos de granos se puede explicar por una disminución en la cantidad de macroporos del suelo, los cuales son responsables del drenaje de agua.

Además, se observó una moderada correlación positiva entre los contenidos de K^{1+} y Ca^{2+} (0,58) intercambiables, mientras el nivel de pH del suelo se correlacionó inversamente con la acidez intercambiable a un nivel moderado (-0,55) (Tabla 9). El comportamiento descrito concordó con Rivera, Moreno, Herrera y Romero (2016) quienes señalan que la acidez de los suelos puede atribuirse a una disminución en el nivel de pH, por efecto de la lixiviación de los cationes básicos Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^{1+} y Na^{1+} intercambiables.

4.5. Análisis de componentes principales de fertilidad edáfica en Boayacu, Simón Bolívar y Llandia

En la zona de Boayacu se encontró que, con cuatro componentes principales (CP) de fertilidad edáfica fue posible explicar el 74% de la varianza acumulada del sistema. El primer CP etiquetado como “Estructural-Disponibilidad de nutrientes”, explicó la mayor varianza del modelo con un valor de 25%, y se relacionó con las variables físicas de Da, Pa, y las variables químicas de fertilidad del suelo como la concentración de acidez, bases intercambiables y COT (Tabla 10). De acuerdo con las correlaciones observadas, las variables que conforman el CP1 han de encontrarse muy interrelacionadas, especialmente en el uso potencial de la tierra de bosque y sistemas agroforestales de la zona estudiada, lo que coincide con Araujo *et al.* (2013) quienes sostienen que en usos de la tierra con abundante vegetación, se promueve la acumulación de MO que aumenta la infiltración hídrica, protege al suelo de la erosión y mejora su actividad biológica.

El CP1 explicó la correlación negativa entre la Da y el resto de variables que lo conformaron, de modo que la Da disminuye a medida que se incrementa el contenido de COT, lo que mejora la estructura del suelo, aumenta la Pa, la disponibilidad de bases intercambiables o también la de cationes ácidos como H^+ y Al^{3+} .

Tabla 10. Matriz de ACP de la fertilidad del suelo bajo distintos usos de la tierra en la zona de Boayacu

Componente	Variables	Factor de peso	Autovalor	Varianza acumulada %
CP1: Estructural- Disponibilidad de nutrientes	Densidad aparente, Mg m ⁻³	-0,6	3,56	25,40
	Porosidad de aireación, %	0,6		
	COT, %	0,6		
	Acidez, meq 100 ml	0,7		
	K ¹⁺ , meq 100 ml	0,6		
	Ca ²⁺ , meq 100 ml	0,6		
	Mg ²⁺ , meq 100 ml	0,6		
CP2: Potencial de hidrógeno	pH	0,7	2,95	46,51
CP3: Microporos- Porosidad total	Porosidad total, %	0,8	2,33	63,13
	Porosidad de retención, %	0,8		
CP4: Aluminio	Al ³⁺ , meq 100 ml	-0,7	1,45	73,46

COT: Carbono orgánico total; **K¹⁺:** Potasio; **Ca²⁺:** Calcio; **Mg²⁺:** Magnesio; **Al³⁺:** Aluminio.

Al integrarse el CP2 y CP3 etiquetados como “Potencial de hidrógeno” y “Microporos-Porosidad total”, respectivamente, se pudo explicar hasta en un 63% la varianza acumulada del modelo establecido, por otra parte, los dos componentes descritos se relacionaron principalmente con la variable química de nivel de pH, y físicas como Pr y Pt (Tabla 10).

El CP2 muestra lo determinante que es el pH del suelo al configurar la fertilidad edáfica y alcanzar como única variable un autovalor de 2,95 para la zona de Boayacu. Por otra parte, el CP3 explica la correlación positiva que existe entre las variables de Pr y Pt lo que es característico en suelos dominados por arcillas.

En lo que respecta al cuarto CP etiquetado como “Aluminio”, su integración al sistema permitió explicar el 74% de la varianza acumulada, y su influencia está determinada por la variable de Al³⁺ intercambiable (Tabla 10).

El CP4 refleja el fuerte impacto que tiene la presencia de Al³⁺ intercambiable en los suelos de Boayacu, lo que forma parte de la naturaleza ácida de los suelos evaluados. De esa forma,

todos los componentes señalados son los que más distinguen las características de fertilidad de los suelos.

Los resultados de varianza acumulada reportados para Boayacu fueron cercanos a los encontrados por Araújo *et al.* (2013) en la región amazónica brasileña (76% de varianza total del sistema explicada con dos CP), donde se realizó un ACP con parámetros físicos, químicos y biológicos del suelo bajo usos de bosque no intervenido y unidades de manejo forestal.

En la Figura 20 se puede apreciar que en la zona de Boayacu la biomasa de hojarasca y el COT fueron las variables de fertilidad edáfica que más fuertemente se correlacionaron con el uso de la tierra de bosque de 0-30 cm de profundidad del suelo, por otra parte, el incremento de COT estuvo asociado a una reducción en la Da y tuvo efecto en la disminución del valor de pH para el uso de la tierra evaluado. Las relaciones coinciden con Muñoz *et al.* (2013), los cuales señalan que mayores contenidos de MO en el suelo, aumentan los espacios porosos, mientras reducen la Da y compactación edáfica, lo que es característico en usos de la tierra con mayor cobertura vegetal. De igual forma, el bajo nivel de pH en usos de la tierra de bosque del presente estudio, puede estar asociado a una mayor acidez intercambiable, que se acentúa en procesos de lixiviación bajo fuertes regímenes de lluvias y buen drenaje, además, la MO del suelo al descomponerse libera compuestos orgánicos que acomplejan al Ca^{2+} y Mg^{2+} intercambiables, lo que reduce su disponibilidad en la solución del suelo e incrementa la acidez intercambiable, de acuerdo con lo planteado por Freitas, Casagrande, Oliveira, Campos y Silva (2015).

Con respecto a los usos de la tierra de *chakra*, se encontró que de 0-10 cm de profundidad edáfica, las variables de mayor correlación fueron el contenido de P disponible, acidez y bases intercambiables, en donde, la condición ácida del suelo reduce los contenidos de P disponible y cationes básicos. Por otra parte, de 10-30 cm de profundidad, los usos de *chakra* de Boayacu exhibieron mayores valores de Da y pH del suelo (sin perder la categoría de ácido), lo que se relacionó con menores contenidos edáficos de COT (Figura 20). Las relaciones descritas para el uso de la tierra estudiado comprobaron lo señalado por Bravo *et al.* (2017a), quienes indican que generalmente bajo condiciones amazónicas de clima y edafogénesis, las variables químicas del suelo muestran valores de pH ácido y baja disponibilidad de nutrientes.

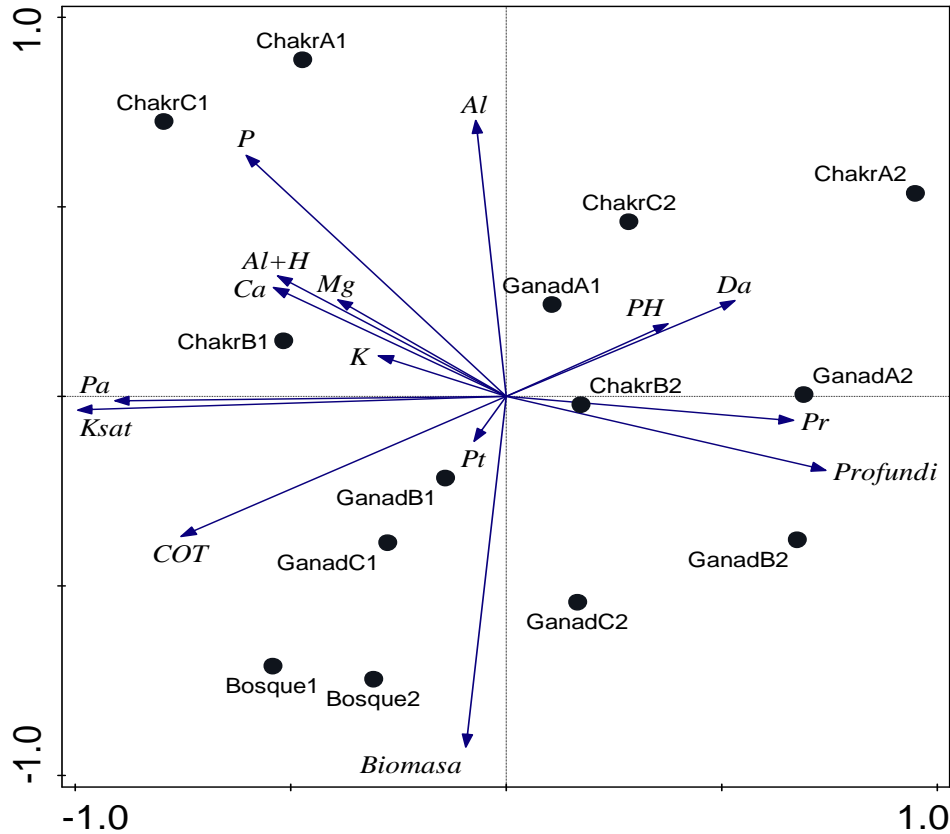


Figura 20. Diagrama del análisis de componentes principales de las variables físicas, químicas y biológicas del suelo bajo distintos usos de la tierra de 0-10 cm y 10-30 cm de profundidad en la zona de Boayacu. Ganad: ganadería; Chakr: *chakra*. La longitud de los vectores determina el valor absoluto (aproximación a 0 o 1) de las correlaciones entre los factores y las variables.

Los usos de la tierra de ganadería analizados de 0-10 cm de profundidad edáfica, expresaron las menores variaciones con respecto a sus valores de parámetros físicos, químicos y biológicos de fertilidad del suelo, no obstante, pudo observarse que los usos de ganadería B y C se correlacionaron débilmente con la variable de Pt (Figura 20), lo que puede estar relacionado con una mejora estructural del suelo cultivado con pasto gramalote (*Axonopus scoparius*), lo que concuerda con estudios realizados por Bravo *et al.* (2017e).

Por el contrario, en la profundidad de 10-30 cm, todos los usos de ganadería de Boayacu se correlacionaron fuertemente con la Pr, presentándose en el cuarto cuadrante con un ángulo de 5° en relación al eje de las abscisas (Figura 20), a este respecto, el comportamiento observado concuerda con Benavides, Morales y Navia (2015), quienes indican que en los pastizales sin cobertura arbórea y con sobrecarga animal, tiende a aumentar la compactación

y Da del suelo hasta los 15 cm de profundidad, lo que también disminuye la Pa del suelo y puede implicar una mayor proporción de Pr.

En la zona de Simón Bolívar, con tres CP de fertilidad del suelo fue posible explicar el 60% de la variabilidad acumulada del sistema. El primer CP etiquetado como “Distribución de poros-Carbono orgánico” representó la mayor varianza del modelo con un valor de 27%, y se asoció principalmente a las variables físicas de distribución de tamaño de poros, así como a las químicas de acidez intercambiable y COT (Tabla 11).

Tabla 11. Matriz de ACP de la fertilidad del suelo bajo distintos usos de la tierra en la zona de Simón Bolívar

Componente	Variables	Factor de peso	Autovalor	Varianza acumulada %
CP1: Distribución de poros-Carbono orgánico	Porosidad de aireación, %	0,8	3,84	27,43
	Porosidad de retención, %	-0,7		
	COT, %	0,8		
	Acidez, meq 100 ml	0,7		
CP2: Disponibilidad de nutrientes-Aluminio	Al ³⁺ , meq 100 ml	0,7	2,86	47,82
	Ca ²⁺ , meq 100 ml	0,7		
	Mg ²⁺ , meq 100 ml	0,7		
CP3: Porosidad total	Porosidad total, %	0,8	1,74	60,26

COT: Carbono orgánico total; **Al³⁺:** Aluminio; **Ca²⁺:** Calcio; **Mg²⁺:** Magnesio.

El CP1 explicó la correlación negativa entre la Pr y el resto de variables que lo constituyen, de tal manera que una mayor Pr implica una menor proporción de macroporos del suelo y por lo tanto, una menor Pa, condición en la que normalmente hay menos lixiviación y por lo tanto se reduce la liberación de Al³⁺ estructural, además menor aireación se asocia con bajo COT.

Por otra parte, al incluirse al sistema el segundo CP etiquetado como “Disponibilidad de nutrientes-Aluminio”, se pudo explicar el 48% de la varianza total acumulada, además cabe resaltar que el CP2 estuvo relacionado fundamentalmente con la concentración de los cationes Al³⁺, Ca²⁺ y Mg²⁺ intercambiables (Tabla 11).

El CP2 de Simón Bolívar, explicó la correlación entre cationes del suelo que afectan a la fertilidad, lo que mostró la relevancia de la asociación positiva entre las bases Ca^{2+} y Mg^{2+} intercambiables, sin embargo, no se mostraron directamente excluyentes con el contenido de Al^{3+} intercambiable.

La integración del CP3 “Porosidad total” representó en conjunto el 60% de la varianza acumulada del modelo, ese componente estuvo principalmente relacionado con la variable de Pt (Tabla 11).

El CP3 destaca la importancia que tuvo el volumen total de espacios porosos del suelo en la determinación de la fertilidad edáfica para Simón Bolívar, al tomar en cuenta que la Pt como única variable representó completamente el autovalor del componente de 1,74.

A este respecto, los resultados fueron similares a los reportados por Mantovanelli *et al.* (2015) en el Estado Amazonas, Brasil, donde luego de analizar parámetros físicos, químicos y biológicos del suelo en distintos usos de la tierra, hallaron que los dos primeros CP de los sistemas evaluados explicaron el 67% de la varianza total, en las profundidades edáficas de 0-5 cm y 5-10 cm, respectivamente. Por otra parte, la varianza acumulada en la zona de Simón Bolívar fue inferior a la hallada por Freitas, Casagrande, Oliveira, Souza Júnior y Campos (2014) en Sao Paulo, donde al realizar el análisis multivariado de parámetros químicos de suelos bajo distintos usos de la tierra, se reportaron porcentajes de varianza acumulada mayores a 70%, que fueron atribuidos a la variabilidad de esos parámetros.

Las variables seleccionadas por sus cargas factoriales de mayor valor ($\geq 0,6$) en el modelo establecido, son las que explicaron la mayor varianza del sistema analizado y contribuyen a la mayor alteración de las características de los suelos en función de su manejo, lo que coincide con Oliveira *et al.* (2015a).

De acuerdo con la Figura 21, los usos de la tierra de bosque de Simón Bolívar, no presentaron correlaciones con ninguna variable de fertilidad edáfica en las dos profundidades del suelo evaluadas, no obstante, los usos de la tierra de *chakra* de 0-10 cm de profundidad se correlacionaron débilmente con las variables de Ksat, Pa, COT, P disponible, acidez, Al^{3+} y bases intercambiables, comportamiento que puede explicarse por un aporte de COT que mejora la estructura edáfica, y por el lavado de bases intercambiables que incrementan la

condición ácida del suelo. Los resultados de este estudio concuerdan con las observaciones de Bravo *et al.* (2017c), quienes manifiestan que el contenido de COT del suelo es producto de los residuos aportados por el anterior uso de la tierra de bosque y el sistema de manejo agroforestal, por otra parte, señalan que la Pa se incrementa con la mayor actividad de macrofauna edáfica en el horizonte superficial, lo que permite un mayor flujo de aire, agua y crecimiento de raíces a través del suelo.

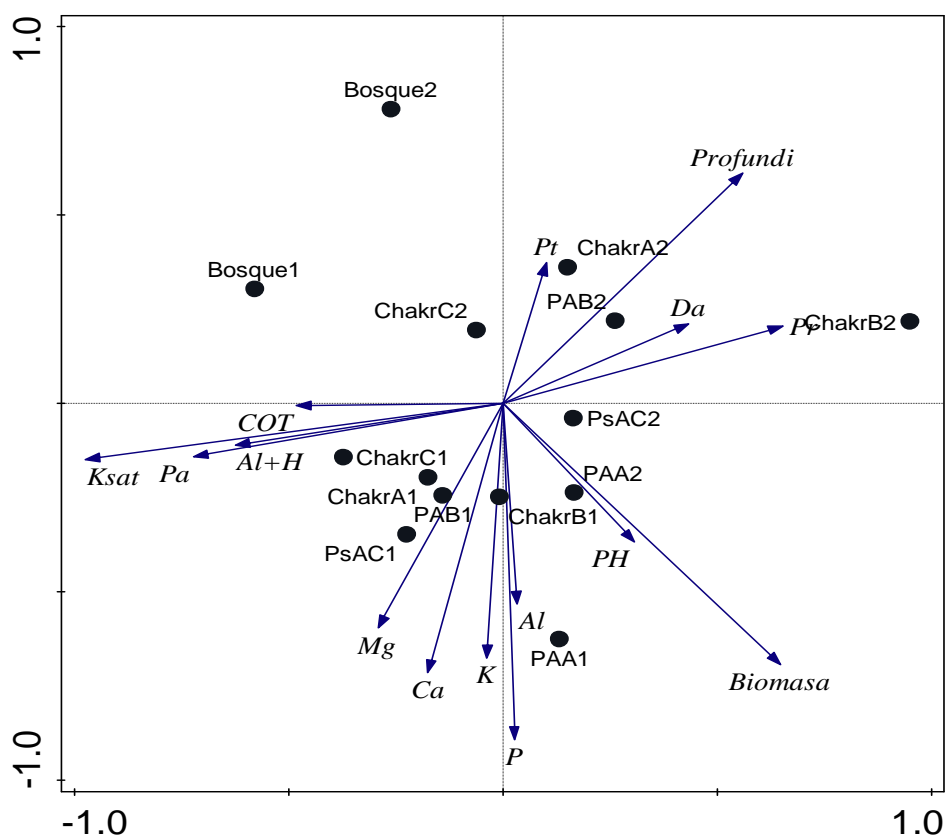


Figura 21. Diagrama del análisis de componentes principales de las variables físicas, químicas y biológicas del suelo bajo distintos usos de la tierra de 0-10 cm y 10-30 cm de profundidad en la zona de Simón Bolívar. PAA: pasto con árboles A; PAB: pasto con árboles B; PsAC: pasto sin árboles C; Chakr: *chakra*. La longitud de los vectores determina el valor absoluto (aproximación a 0 o 1) de las correlaciones entre los factores y las variables.

De igual manera, los resultados de este trabajo corroboran lo observado por Cardona, Peña, Ramírez y Torres (2011), quienes describen los suelos amazónicos como ácidos, con pérdidas de nutrientes por lixiviación, el clima de la región, así como la alta concentración de Al^{3+} intercambiable, tóxico para ciertos cultivos.

Sin embargo, es importante indicar que según Dourojeanni (1987), en investigaciones realizadas en el trópico húmedo se ha demostrado que la conversión de usos de la tierra de bosque a sistemas de *chakra* conduce a una menor acumulación de MO, N, cationes como Ca^{2+} y Mg^{2+} intercambiables, reduce los niveles de pH e incrementa la concentración de Al^{3+} intercambiable en esos suelos, condición que se agrava al perpetuar la actividad agrícola en el mismo sitio.

Por otro lado, los usos de *chakra* de 10-30 cm de profundidad, presentaron una fuerte correlación con las variables físicas de Pt, Pr y Da del suelo, lo que se refleja en la reducción del volumen de macroporos al aumentar normalmente la Da a mayor profundidad edáfica (Figura 21). La correlación descrita coincide con la menor Pa reportada a partir de los 10 cm de profundidad en la mayoría de usos de la tierra bajo condiciones amazónicas, lo que de acuerdo con Bravo *et al.* (2017c) resalta la importancia de la geometría de los espacios porosos para la fertilidad física de los suelos.

En Simón Bolívar, también se encontró que, en los usos de la tierra de ganadería de 0-10 cm de profundidad edáfica hubo una fuerte correlación entre los usos y los cationes intercambiables Al^{3+} , Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^{1+} , incluso con mayores valores que lo reportado en los usos de *chakra* a la misma profundidad, lo que fue observado en el tercer y cuarto cuadrantes con ángulos mayores a 50° y 70° respectivamente en relación al eje de las abscisas (Figura 21).

Las relaciones observadas son similares a las referidas por Clavijo (2016), quien las reporta como características de los suelos amazónicos altamente meteorizados, deficientes en nutrientes y con altos niveles de acidez intercambiable. No obstante, la variabilidad de los parámetros químicos de fertilidad edáfica en los usos de la tierra de ganadería de la zona evaluada coincide con el criterio de Jamioy, Menjivar y Rubiano (2015), quienes mencionan que esas variaciones pueden atribuirse a las diferencias de manejo agronómico, las cuales según Battisti (2017), pueden atenuar las pérdidas de Mg^{2+} y Ca^{2+} intercambiables.

Con respecto a los usos de ganadería de 10-30 cm de profundidad, estos presentaron una correlación débil con las variables de Pt, Pr, Da, nivel de pH y biomasa de hojarasca, manteniéndose bajos valores de pH y una baja influencia de la biomasa de hojarasca en el horizonte edáfico subsuperficial (Figura 21), lo que también se caracterizó por un ligero

incremento en los valores de Da, Pr y reducción de la Pt, que en conjunto coincidieron con la descripción de Medina (2016), quien señala un probable efecto del pisoteo de animales.

En lo referente a la zona de Llandia, el ACP determinó que cinco CP de fertilidad edáfica pudieron explicar el 81% de la varianza acumulada del sistema. El primer CP etiquetado como “Estructural-Disponibilidad de nutrientes” explicó la mayor variabilidad del modelo con un valor de 32%, y estuvo relacionado principalmente con las variables de fertilidad física como Ksat, la distribución del tamaño de poros del suelo, así como con las variables químicas de P disponible y bases intercambiables (Tabla 12).

Tabla 12. Matriz de ACP de la fertilidad del suelo bajo distintos usos de la tierra en la zona de Llandia

Componente	Variables	Factor de peso	Autovalor	Varianza acumulada %
CP1: Estructural-Disponibilidad de nutrientes	Ksat, cm h ⁻¹	0,6	4,42	31,58
	Porosidad de aireación, %	0,7		
	Porosidad de retención, %	-0,8		
	P, mg kg ⁻¹	0,6		
	K ¹⁺ , meq 100 ml	0,7		
	Ca ²⁺ , meq 100 ml	0,8		
	Mg ²⁺ , meq 100 ml	0,9		
CP2: Acidez-Aluminio	pH	-0,7	2,54	49,69
	Acidez, meq 100 ml	0,9		
	Al ³⁺ , meq 100 ml	0,6		
CP3: Densidad-Porosidad total	Densidad aparente, Mg m ⁻³	-0,9	2,12	64,82
	Porosidad total, %	0,7		
CP4: Carbono orgánico	COT, %	-0,6	1,21	73,48
CP5: Hojarasca acumulada	Biomasa, kg ha ⁻¹	0,9	1,10	81,34

Ksat: Conductividad hidráulica saturada; **P:** Fósforo; **K¹⁺:** Potasio; **Ca²⁺:** Calcio; **Mg²⁺:** Magnesio; **Al³⁺:** Aluminio; **COT:** Carbono orgánico total.

El CP1 explicó la correlación inversa entre la Pr y el resto de las variables que lo integran, en donde una mayor abundancia de microporos conduce a un menor volumen de macroporos en el suelo, lo que restringe la Ksat y la disponibilidad de agua, esto implica una menor

disolución y disponibilidad de nutrientes como P, K⁺, Ca²⁺ y Mg²⁺ intercambiables, que permanecen retenidos en los coloides edáficos.

En la integración del segundo (Acidez-Aluminio) y tercer (Densidad-Porosidad total) CP al sistema, se observó que en conjunto permitieron explicar hasta el 65% de la varianza acumulada del modelo, por otra parte, ambos componentes de manera respectiva estuvieron relacionados con las variables químicas de pH, acidez y Al³⁺ intercambiables, así como con las variables físicas de Da y Pt (Tabla 12).

El CP2 refleja la correlación inversa que mantiene el nivel de pH con las variables de acidez y Al³⁺ intercambiables, de tal manera que en la medida en que se incrementa la concentración de Al³⁺ e H⁺, ambos cationes constituyentes de la acidez edáfica, en consecuencia disminuye el valor de pH por debajo de 7 para alejarse de la neutralidad e indicar la reacción ácida.

Por otro lado, el CP3 explica la correlación negativa entre Pt y Da, de modo que cuando se reduce la proporción de los espacios porosos del suelo, entonces se incrementa el peso de ese suelo por unidad de volumen.

La inclusión del CP4 y CP5 etiquetados como “Carbono orgánico” y “Hojarasca acumulada”, respectivamente, permitió explicar en conjunto hasta el 81% de la variabilidad acumulada del sistema, donde los dos componentes descritos, se relacionaron con las variables de COT y biomasa de hojarasca, respectivamente (Tabla 12).

El CP4 explica la influencia que tiene el COT como variable para representar íntegramente un autovalor de 1,21 en el ACP de la fertilidad edáfica en Llandia, lo que resalta la importancia del COT como un indicador biológico para esa zona. Respecto al CP5, este solo está representado por la variable de biomasa acumulada de hojarasca, la cual es otro parámetro biológico determinante en la caracterización de la fertilidad del suelo para Llandia y confiere al CP un autovalor de 1,10.

El porcentaje de varianza explicada por los cinco CP de la zona de Llandia fue semejante al reportado por Oliveira *et al.* (2015a), quienes, al evaluar parámetros físicos, químicos y biológicos de fertilidad edáfica entre distintos usos de la tierra al sur del Estado Amazonas

en Brasil, determinaron cuatro CP que explicaron el 83% de la varianza total del sistema, lo que se atribuye a la variabilidad de los parámetros estudiados.

Cabe resaltar que, en cada una de las tres zonas evaluadas en el presente trabajo, las variables que no formaron parte de ningún CP y que presentaron valores de cargas factoriales inferiores a 0,6, representaron una pequeña parte de la varianza total de los sistemas y, por lo tanto, contribuyeron en menor proporción para la discriminación entre usos de la tierra, lo que coincide con estudios de Pragana, Ribeiro, Nóbrega, Ribeiro Filho y Costa (2012) y Frozzi (2017).

En la Figura 22 se pudo observar diferentes caracterizaciones de los usos de la tierra de Llandia, por efecto de la profundidad del suelo evaluada, de ese modo, se encontró que las variables que más fuertemente se correlacionaron con el uso de la tierra de bosque de 0-10 cm de profundidad, fueron la Ksat, acidez y Al^{3+} intercambiables, mientras que, de 10-30 cm de profundidad, el uso de bosque estuvo débilmente relacionado con la Pt y la biomasa de hojarasca del suelo, de ese modo, los resultados obtenidos coinciden con la descripción de Freitas *et al.* (2015) quienes sostienen que correlaciones similares se atribuyen a una mayor lixiviación bajo intensos regímenes de lluvia en adecuadas condiciones de drenaje típicas en bosques del trópico húmedo, además, indican que el uso de bosque posee altos contenidos de MO con grupos funcionales carboxílicos y fenólicos que liberan altos contenidos de H^{1+} y ocasionan la mayor acidez edáfica. Adicionalmente, los usos de bosque en el horizonte subsuperficial mostraron una menor Pt proporcional al aumento de la Da.

Por otra parte, los usos de la tierra de caña de azúcar mostraron un comportamiento cercano al reportado por el uso de bosque para cada una de las dos profundidades edáficas evaluadas, no obstante, es posible distinguir una correlación ligeramente mayor entre los usos de caña de azúcar y la biomasa de hojarasca acumulada (Figura 22).

Con respecto a la correlación descrita, resultados similares fueron reportados por Almeida *et al.* (2016), al evaluar indicadores de calidad del suelo en cultivos irrigados de caña de azúcar en Minas Gerais, Brasil, donde encontraron que aproximadamente 12000 kg ha^{-1} de depósitos de paja de cultivo (superior a las cantidades de biomasa de hojarasca acumuladas en los usos de bosque del presente estudio), contribuyeron a reducir la Da del suelo a niveles

equiparables con los de la vegetación nativa, lo que destacaría el impacto de la paja de caña de azúcar en la fertilidad física de los suelos, bajo condiciones de cosecha sin quema.

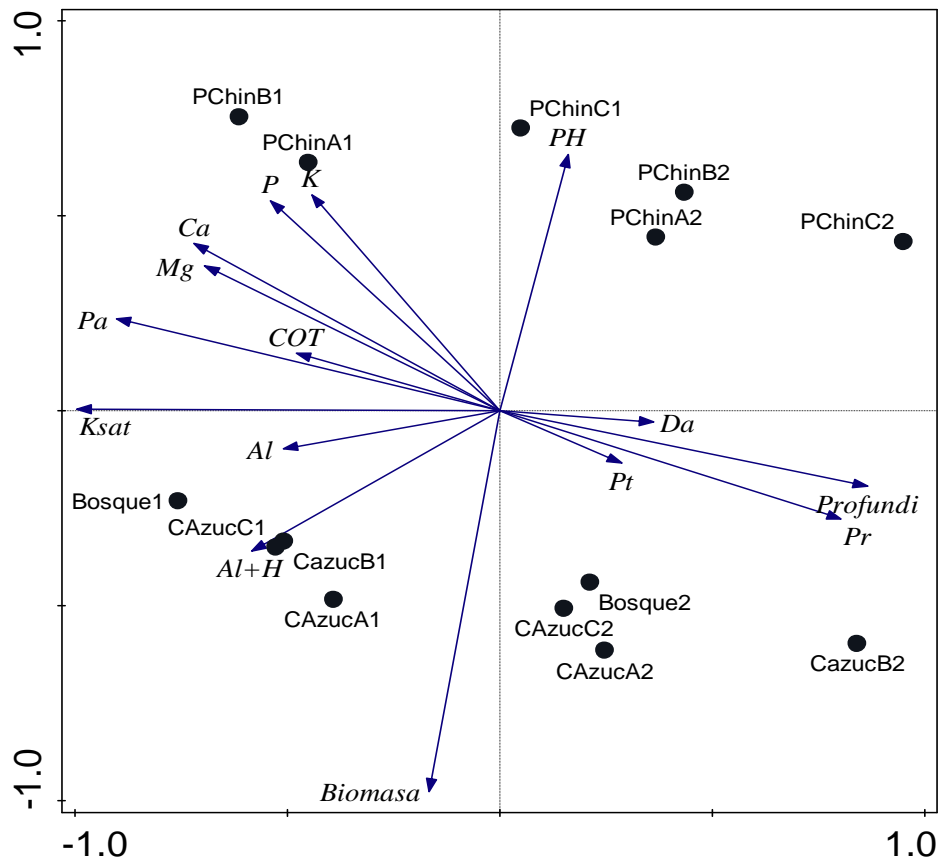


Figura 22. Diagrama del análisis de componentes principales de las variables físicas, químicas y biológicas del suelo bajo distintos usos de la tierra de 0-10 cm y 10-30 cm de profundidad en la zona de Llandia. CAzucA: caña de azúcar A; CazucB: caña de azúcar B; CAzucC: caña de azúcar C; PChin: papa china. La longitud de los vectores determina el valor absoluto (aproximación a 0 o 1) de las correlaciones entre los factores y las variables.

En contrapartida, los usos de la tierra de papa china de Llandia, ubicados en el primer y segundo cuadrante de la Figura 22, indicaron un mayor alejamiento y reflejan una mayor diferenciación de ese uso con respecto a los demás, de ese modo, se observó que las variables más fuertemente correlacionadas con los usos de papa china se presentaron en la profundidad edáfica de 0-10 cm y estuvieron integradas por un mayor nivel de pH y disponibilidad de nutrientes como P disponible y K^{1+} intercambiable, adicionalmente, los usos de papa china

son los que acumularon la menor cantidad de biomasa de hojarasca entre todos los demás usos de la zona evaluada.

De acuerdo con la correlación entre los usos de la tierra de papa china y las variables de fertilidad química señaladas en el presente trabajo, especialmente en lo que respecta al uso de papa china C, los resultados coincidieron con los reportados por Álvarez *et al.* (2017), quienes en relaciones similares indicaron una posible influencia de prácticas de fertilización con abonos orgánicos, que atenúan las pérdidas de nutrientes como P disponible, que es uno de los mayores limitantes en la producción agrícola de suelos amazónicos.

5. CONCLUSIONES

Se encontraron adecuados parámetros de fertilidad física y biológica, relacionados principalmente con el uso de la tierra de bosque en la región amazónica.

Se presentaron bajos niveles de fertilidad química y pH que son producto de la naturaleza ácida de los suelos de la región, lo que se debe a los factores de formación como el material parental y el clima.

En los suelos evaluados, generalmente se observó que el horizonte superficial refleja fuertes correlaciones negativas entre Pr y Pa, lo que se relaciona con la textura arcillosa predominante; se encontraron fuertes correlaciones negativas entre pH y acidez intercambiable, que tienen que ver con los procesos de lixiviación; así como correlaciones inversas entre el COT y la Da, debido a la importante acumulación de MO.

En el horizonte subsuperficial se destacó la relación inversa entre Pt y Da por efecto de una mayor cohesión natural de las partículas del suelo a mayor profundidad.

Por otro lado, el análisis de componentes principales (ACP) de fertilidad, mostró un 74%, 60% y 81% de la varianza total acumulada entre los usos de la tierra para las zonas de Boayacu, Simón Bolívar y Llandia respectivamente.

Se comprobó que, el cambio de uso de la tierra de bosque a diversos sistemas agropecuarios como *chakra*, ganadería, caña de azúcar y papa china, generó alteraciones en la fertilidad del suelo de la zona alta de la cuenca alta del río Napo en la RAE.

6. RECOMENDACIONES

Evaluar parámetros biológicos de fertilidad como biomasa, diversidad y actividad microbiana.

Complementar el estudio con muestreos anuales sucesivos en diferentes épocas del año y con un mayor número de parcelas por cada uso de la tierra.

BIBLIOGRAFÍA

- Aguayo, M., Pauchard, A., Azócar, G., y Parra, O. (2009). Cambio del uso del suelo en el centro sur de Chile a fines del siglo XX. Entendiendo la dinámica espacial y temporal del paisaje. *Revista Chilena de Historia Natural*, 82(3), 361-374.
- Aguirre, D., Ordoñez, Y., y Navia, J. (2009). *Evaluación de algunas propiedades físicas en suelos con diferentes usos en sistemas productivos del Altiplano de Pasto – Departamento de Nariño*. (Tesis doctoral). Universidad de Nariño, San Juan de Pasto, Colombia.
- Almeida, L., Ferreira, V., Fernandes, L., Frazão, L., Oliveira, A., y Sampaio, R. (2016). Indicadores de qualidade do solo em cultivos irrigados de cana-de-açúcar. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 51(9), 1539-1547.
- Álvarez, D., Huera, T., Barroso, R., Changoluisa, D., Ibarra, E., Alemán, R., y Bravo, C. (2017). Caracterización de la fertilidad química en un suelo manejado con el cultivo de la papachina (*Colocasia esculenta*) en el sector Cajabamba, provincia Pastaza. En, R. Alemán, H. Reyes y C. Bravo (Eds.), *Libro de memorias: Simposio Internacional sobre Manejo Sostenible de Tierras y Seguridad Alimentaria – Ecuador 2017*. Ecuador: Universidad Estatal Amazónica.
- Aquino, R., Júnior, J., Campos, M., Oliveira, I., y Siqueira, D. (2014). Distribuição espacial de atributos químicos do solo em área de pastagem e floresta. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, 44(1), 32-41.
- Araújo, A., Mendonça, L., Lima, M., Feitosa, J., Silva, F., Ness, R., y Kerntopf, M. (2013). Modificações nas propriedades dos solos de uma área de manejo florestal na chapada do Areripe. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 37(3), 754-762.
- Arévalo, V., Vera, R., y Grijalva, J. (2013). Mejoramiento de *chakras*, una alternativa de sistema integrado para la gestión sostenible de bosques en comunidades nativas de la Amazonía ecuatoriana. En, 6° *Congreso Forestal Español*. España: Sociedad Española de Ciencias Forestales.
- Arróliga, L., y Blandón, N. (2015). *Evaluación del comportamiento agronómico de ocho variedades de malanga (Colocasia esculenta) en las condiciones edafoclimáticas, Finca Buena Vista, comunidad El Tepeyac; departamento de Matagalpa, I semestre 2015*. Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, Matagalpa, Nicaragua.
- Arruda, L. (2014). *Atributos físicos e químicos de um Latossolo submetido a diferentes usos agrícolas, Martins – RN* (Tesis de maestría). Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, Brasil.
- Battisti, L. (2017). *Núcleos arbóreos em pastagens: efeitos sob os atributos físicos e químicos do solo* (Tesis de maestría). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil.
- Benavides, E., Morales, L., y Navia, J. (2015). Propiedades físicas y contenido de materia orgánica en diferentes usos del suelo en Samaniego, Colombia. *Revista Agroforestería Neotropical*, 1(5), 27-41.
- Bengio, Y., Courville, A., y Vincent, P. (2013). “Representation learning: a review and new perspectives”. *Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 35(8), 1798-1828.

- Benítez, J. (2016). *Estudio de la cosecha en verde para el manejo sostenible del cultivo de caña de azúcar (Saccharum officinarumL.)*. (Tesis de maestría). Universidad de Guayaquil, Guayaquil, Ecuador.
- Bertsch, F. (1987). Acidez. En, *Manual para interpretar la fertilidad de los suelos de Costa Rica* (pp. 37-42). San José, Costa Rica: Editorial de la Universidad de Costa Rica.
- Bertsch, F. (1995). *La fertilidad de los suelos y su manejo*. San José, Costa Rica: Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo.
- Blake, G., y Hartge, K. (1986). Bulk Density. En, A. Klute (Ed.), *Methods of soil analysis. Part 1* (p. 363-375).
- Blanco-Canqui, H., y Ruis, S. (2018). No-tillage and soil physical environment. *Geoderma*, 326, 164-200.
- Braga, R., Braga, F., y Venturin, N. (2014). Caracterização de Latossolo vermelho distroférico típico sob floresta estacional semidecidual – condições químicas. *ENCICLOPÉDIA BIOSFERA*, 10(19), 487-496.
- Bravo, C., Benítez, D., Vargas, J., Alemán, R., Torres, B., y Marín, H. (2015). Caracterización socio-ambiental de unidades de producción agropecuaria en la Región Amazónica Ecuatoriana: Caso Pastaza y Napo. *Revista Amazónica Ciencia y Tecnología*, 4(1), 3-31.
- Bravo, C., Marín, H., Marrero, P., Ruiz, M., Torres, B., Navarrete, H., y Changoluisa, D. (2017a). Evaluación de la sustentabilidad mediante indicadores en unidades de producción de la provincia de Napo, Amazonía ecuatoriana. *Bioagro*, 29(1), 23-36.
- Bravo, C., Ramírez, A., Marín, H., Torres, B., Alemán, R., Torres, R., y Changoluisa, D. (2017b). Factores asociados a la fertilidad del suelo en diferentes usos de la tierra de la Región Amazónica Ecuatoriana. *Revista Electrónica de Veterinaria*, 18(11).
- Bravo, C., Torres, B., Alemán, R., Changoluisa, D., Marín, H., Freile, J., y Navarrete, H. (2017c). Indicadores de calidad física y carbono orgánico en suelos de la Región Amazónica Ecuatoriana bajo diferentes usos de la tierra. En, R. Alemán, H. Reyes y C. Bravo (Eds.), *Libro de memorias: Simposio Internacional sobre Manejo Sostenible de Tierras y Seguridad Alimentaria – Ecuador 2017*. Ecuador: Universidad Estatal Amazónica.
- Bravo, C., Torres, B., Alemán, R., Changoluisa, D., Marín, H., Reyes, H., y Navarrete, H. (2017d). Soil structure and carbon sequestration as ecosystem services under different land uses in the Ecuadorian Amazon Region. En, *International Workshop of Natural Products and Agro-Industrial Processes*. MOL2NET. doi: 10.3390/mol2net-03-xxxx
- Bravo, C., Torres, B., Alemán, R., Marín, H., Durazno, G., Navarrete, H., y Tapia, A. (2017e). Indicadores morfológicos y estructurales de calidad y potencial de erosión del suelo bajo diferentes usos de la tierra en la Amazonía ecuatoriana. *Anales de Geografía de la Universidad Complutense*, 37(2), 247-264.
- Britos, A., y Barchuk, A. (2008). Cambios en la cobertura y en el uso de la tierra en dos sitios del Chaco Árido del noroeste de Córdoba, Argentina. *Agriscientia*, 25(2), 97-110.
- Burgos, E. (2016). *“Determinación de infiltración del suelo en los sectores ganaderos de la cuenca alta del río Puyo”*. Universidad Estatal Amazónica, Puyo, Ecuador.

- Cabezas, R. (2016). *Efecto de fuentes de encalado en las propiedades químicas de suelos ecuatorianos de diferente material parental*. Universidad Central del Ecuador, Quito, Ecuador.
- Caiza, D. (2015). “*Estudio de la degradación física del suelo y plan de manejo ambiental para la finca Luis Cevallos*”. Universidad Estatal Amazónica, Puyo, Ecuador.
- Cardona, G., Peña, C., Ramírez, M., y Torres, M. (2011). Composición y uso potencial de comunidades microbianas asociadas a la rizósfera de frutales promisorios en la Amazonía colombiana. En, *Estudios ecofisiológicos en la Amazonía colombiana. I. Arazá (Eugenia stipitata, Mc Vaugh)* (pp. 17-36). Bogotá, Colombia: Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas – Sinchi.
- Carrasco, J., Antúnez, A., y Lemus, G. (2010). Caracterización de un suelo para el establecimiento de un huerto frutal. En, J. Carrasco y J. Riquelme (Eds.), *Manejo de suelos para el establecimiento de huertos frutales* (pp. 71-80). Rengo, Chile: Instituto de Investigaciones Agropecuarias.
- Carvalho, R., Daniel, O., Davide, A., y Souza, F. (2015). Atributos físicos e químicos de um Neossolo quartzarênico sob diferentes sistemas de uso e manejo. *Revista Caatinga*, 28(1), 148-159.
- Casanova, E. (2005). *Introducción a la ciencia del suelo*. Caracas, Venezuela: Universidad Central de Venezuela.
- Castañeda, G. (2014). *Contribución de carbono de la hojarasca en dieciséis sistemas de uso de tierra a lo largo de la carretera Tarapotó-Yurimaguas*. Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú.
- Cavazos, J., y Payán, H. (2014). Incremento de la calidad y rendimiento en caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.) por medio del uso de la biotecnología. En, *XXXVI Convención y Expo ATAM 2014*. Veracruz, México: Asociación de Técnico Azucareros de México.
- Celentano, D., Zahawi, R., Finegan, B., Casanoves, F., Ostertag, R., Cole, R., y Holl, K. (2011). Restauración ecológica de bosques tropicales en Costa Rica: efecto de varios modelos en la producción, acumulación y descomposición de hojarasca. *Revista de Biología Tropical*, 59(3), 1323-1336.
- CIAT. (1981). Disponibilidad del fósforo en los suelos arroceros cultivados en secano. En, *Fertilización fosfórica del arroz* (pp. 07-13). Cali, Colombia: CIAT.
- Clavijo, J. (2016). *Patrones de uso de la flora y su relación con actividades de conservación de bosques nativos en doce parroquias amazónicas de Ecuador*. Universidad Internacional del Ecuador, Quito, Ecuador.
- Cruz, E., Can, A., Sandoval, M., Bugarín, R., Robles, A., y Juárez, P. (2012). Sustratos en la horticultura. *Revista Bio Ciencias*, 2(2), 17-26.
- Cuenca, D. (2014). *Impacto de la ganadería sobre las características físicas-químicas del suelo, predio Los Altares*. (Tesis de grado). Universidad Nacional Abierta y a Distancia, Caquetá, Colombia.
- Custode, E., y Sourdat, M. (1986). Paisajes y suelos de la Amazonía ecuatoriana: entre la conservación y la explotación. *Cultura: Revista del Banco Central del Ecuador*, 24, 325-337.

- Díaz, A. (2016). *Impacto ambiental del cambio de uso del suelo sobre los parámetros edáficos en la Reserva de Biósfera Sumaco, provincia de Napo*. Universidad Estatal Amazónica, Pastaza, Ecuador.
- Díaz, P., Fachin, G., Tello, C., y Arévalo, L. (2016). Carbono almacenado en cinco sistemas de uso de tierra, en la región San Martín Perú. *RINDERESU*, 1(2), 57-67.
- Dortzbach, D., Pereira, M., Blainski, E., y González, A. (2015). Estoque de C e abundância natural de ^{13}C em razão da conversão de áreas de floresta e pastagem em bioma mata atlântica. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, (39), 1643-1660.
- Dourojeanni, M. (1987). Aprovechamiento del barbecho forestal en áreas de agricultura migratoria en la Amazonía peruana. *Revista Forestal del Perú*, 14(2), 1-33.
- Drake, F. (2014). *Global warming: the science of climate change*. New York, United States of America: Routledge.
- Ensinas, S., Marchetti, M., Silva, E., Potrich, D., y Martínez, M. (2014). Atributos químicos, carbono e nitrogenio total em Latossolo submetido a diferentes sistemas de uso do solo. *Global Science and Technology*, 7(2), 24-36.
- Espinosa, J., Moreno, J., y Bernal, G. (2018). *The soils of Ecuador*. Springer International Publishing AG.
- Fernandes, R., Pereira, M., Menezes, C., Anjos, L., y Correia, M. (2014). Atributos químicos e físicos do solo sob pastagem e estádios sucessionais de floresta estacional. *Revista de la Facultad de Agronomía*, 113(1), 47-56.
- FLACSO, MAE, y PNUMA. (2008). Estado del suelo. En, *GEO Ecuador 2008: informe sobre el estado del medio ambiente* (pp. 73-90). Quito, Ecuador: FLACSO.
- Franco, I. (2014). Expansão da cana-de-açúcar na microrregião sudoeste de Goiás: análise espacial das mudanças do uso e cobertura do solo nos anos de 2001, 2006 e 2011. *Boletim Goiano de Geografia*, 34(3), 481-499.
- Freitas, I. (2013). *Atributos de um Neossolo quartzarênico da pré-Amazônia sob agroecossistemas de produção familiar* (Tesis doctoral). Universidade Federal de Goiás, Goiânia, Brasil.
- Freitas, I., Santos, F., Custódio Filho, R., Correchel, V., y Silva, R. (2013). Agroecossistemas de produção familiar da Amazônia e seus impactos nos atributos do solo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 17(12), 1310-1317.
- Freitas, L., Casagrande, J., Oliveira, I., Campos, M., y Silva, L. (2015). Técnicas multivariadas na avaliação de atributos de um Latossolo vermelho submetido a diferentes manejos. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, 10(1), 17-26.
- Freitas, L., Casagrande, J., Oliveira, I., Souza Júnior, P., y Campos, M. (2014). Análises multivariadas de atributos químicos do solo para caracterização de ambientes. *Revista Agro@mbiente On-line*, 8(2), 155-164.
- Freitas, L., Oliveira, I., Silva, L., Frare, J., Filla, V., y Gomes, R. (2017). Indicadores da qualidade química e física do solo sob diferentes sistemas de manejo. *UNIMAR CIÊNCIAS*, 26(1-2), 8-25.
- Frozzi, J. (2017). *Atributos físicos, carbono orgánico e dimensão fractal da textura em solos sob ambientes naturais e antropizados na região sul do Amazonas* (Tesis de maestría). Universidade Federal do Amazonas, Humaitá, Brasil.

- García, A., Figueiredo, T., Dafonte, J., Almeida, A., y Paz, A. (2015). Estudio con tomografía de resistividad eléctrica del efecto del tráfico de maquinaria en un suelo agrícola. En, S. Martínez y A. Sastre (Eds.), *Estudios en la Zona No Saturada. Vol XII* (pp. 33-141). Alcalá de Henares, España: Universidad de Alcalá.
- García, M., y Serrano, H. (2015). Fertilización de la caña *Saccharum officinarum* L. POACEAE. *Tecno Agro, Avances Tecnológicos y Agrícolas*, 99. <https://tecnoagro.com.mx/revista/2015/no-99/fertilizacion-de-la-cana-saccharum-officinarum-l-poaceae/>
- García, Y., Ramírez, W., y Sánchez, S. (2012). Indicadores de la calidad de los suelos: una nueva manera de evaluar este recurso. *Pastos y Forrajes*, 35(2), 125-138.
- Gardi, C., Angelini, M., Barceló, S., Comerma, J., Cruz Gaistardo, C., Encina Rojas, A., y Jones, A. (2014). *Atlas de suelos de América Latina y el Caribe*. Luxemburgo: Comisión Europea – Oficina de Publicaciones de la Unión Europea.
- Gobierno Autónomo Descentralizado Parroquial Rural de Shell. (2015). *Actualización del plan de desarrollo y ordenamiento territorial*. Recuperado de http://app.sni.gob.ec/sni-link/sni/PORTAL_SNI/data_sigad_plus/sigadplusdiagnostico/1660012930001_DIAGNOSTICO%20PD%20yOT%20SHELL%202015_15-05-2015_15-07-49.pdf (Consultado el 24 de noviembre de 2018).
- Gómez-Paccard, C., Hontoria, C., Mariscal-Sancho, I., Pérez, J., León, P., González, P., y Espejo, R. (2015). Soil-water relationships in the upper soil layer in a Mediterranean Paleixerult as affected by no-tillage under excess water conditions – Influence on crop yield. *Soil and Tillage Research*, 146, 303-312.
- Hernández, L. (2014a). Características biofísicas de los bosques húmedos tropicales. En, L. Hernández y N. Valero (Eds.), *Desarrollo sustentable del bosque húmedo tropical: características, ecología y uso* (pp. 17-51). Ciudad Guayana, Venezuela: Fondo Editorial UNEG.
- Hernández, L. (2014b). Ciclos de nutrientes en bosques húmedos tropicales. En, L. Hernández y N. Valero (Eds.), *Desarrollo sustentable del bosque húmedo tropical: características, ecología y uso* (pp. 52-73). Ciudad Guayana, Venezuela: Fondo Editorial UNEG.
- Huera, T., Barroso, R., Álvarez, D., Changoluisa, D., y Bravo, C. (2017). Caracterización de la calidad química del suelo bajo uso con bosque del paseo turístico Puyo, Pastaza. En, R. Alemán, H. Reyes y C. Bravo (Eds.), *Libro de memorias: Simposio Internacional sobre Manejo Sostenible de Tierras y Seguridad Alimentaria – Ecuador 2017*. Ecuador: Universidad Estatal Amazónica.
- IBM SPSS (2013). IBM SPSS Statistics 22. Algorithms. Chicago: IBM SPSS Inc.
- INEC. (2016). *Encuesta de superficie y producción agropecuaria continua ESPAC 2016*. Ecuador: INEC.
- Jamióy, D., Menjívar, J., y Rubiano, Y. (2015). Indicadores químicos de calidad de suelos en sistemas productivos del piedemonte de los llanos orientales de Colombia. *Acta Agronómica*, 64(4), 302-307.

- Jiménez, C., Rosas, G., y Falla, R. (2012). Efecto de la ganadería en las propiedades físicas del suelo de lomerío en el Centro de Investigaciones Amazónicas Macagual. *Ingenierías & Amazonía*, 5(1), 42-50.
- Jiménez, L., Mezquida, E., Capa, M., y Sánchez, A. (2007). Cambio en las propiedades del suelo por transformación de áreas boscosas en pastizales en Zamora-Chinchipe (Ecuador). *Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales*, 22, 65-70.
- Jordão, H. (2018). *Atributos químicos de solos sob ambientes naturais e antropizados no município de Humaitá, AM* (Tesis de maestría). Universidade Federal do Amazonas, Manaus, Brasil.
- Juca, K. (2017). *Variación de la capacidad tampón en suelos ácidos de origen aluvial y piedemonte costero en la provincia de El Oro*. Universidad Técnica de Machala, Machala, Ecuador.
- Kisinyo, P., Othieno, C., Gudu, S., Okalebo, J., Opala, P., Ng'Etich, W., y Opile, W. (2013). Immediate and residual effects of lime and phosphorus fertilizer on soil acidity and maize production in western Kenya. *Experimental Agriculture*, 50(1), 128-143.
- Lao, C. (2017). *"Fracciones del carbono orgánico lábil en suelos de la Amazonía peruana bajo diversos sistemas de uso"* (Tesis de maestría). Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú.
- Lima, G. (2013). *Variabilidade espacial dos atributos físicos e químicos e índice de qualidade dos solos da sub-bacia das Posses, Extrema (MG), sob diferentes agroecossistemas* (Tesis doctoral). Universidade Federal de Lavras, Lavras, Brasil.
- Llontop, V. (2015). *Propiedades químicas, físicas y biológicas en cuatro sistemas de uso de suelo en la localidad de Cayena, Departamento San Martín*. Universidad Nacional Agraria de la Selva, Tingo María, Perú.
- López, F., Duval, M., Martínez, J., y Galantini, J. (2016). Porosidad de Ustoles bajo siembra directa en el sudoeste bonaerense. *Ciencia del Suelo*, 34(2), 137-184.
- López, J., González, H., Ramírez, R., Cantú, I., Gómez, M., Pando, M., y Estrada, A. (2013). Producción de hojarasca y retorno potencial de nutrientes en tres sitios del estado de Nuevo León, México. *Polibotánica*, 35, 41-64.
- Maia, C. (2013). Qualidade ambiental em solo com diferentes ciclos de cultivo do meloeiro irrigado. *Ciência Rural*, 43(4), 603-609.
- Maldonado, L., Samaniego, E., y Barrero, H. (2016). Caracterización de suelo del bosque primario adyacente en el cantón Arajuno. *Revista Forestal Baracoa*, 35, 1-9.
- Manly, B. (2008). *Métodos estatísticos multivariados: uma introdução*. 3.ed. (p. 229). Porto Alegre, Brasil: Bookman.
- Mantovanelli, B., Silva, D., Campos, M., Gomes, R., Soares, M., y Santos, L. (2015). Avaliação dos atributos do solo sob diferentes usos na região de Humaitá, Amazonas. *Revista de Ciências Agrárias*, 58(2), 122-130.
- Marcatto, F., Herculí, A., Silveira, H., y Graça, C. (2015). Avaliação dos atributos físico-hídricos dos solos em Iguaraçu-PR: subsídios para o manejo e conservação do solo e da água. *Revista Científica "ANAP" Brasil*, 8(13), 84-100.
- Marcatto, F., y Silveira, H. (2016). Relação entre as propriedades físico-hídricas dos solos e os tipos de uso da terra como subsidio ao manejo e conservação do solo e da água na

- bacia hidrográfica do rio Pirapó-PR. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 9(6), 1769-1783.
- Martínez, E., Fuentes, J., y Acevedo, E. (2008). Carbono orgánico y propiedades del suelo. *Revista de la Ciencia del Suelo y Nutrición Vegetal*, 8(1), 68-96.
- Martinkoski, L., Vogel, G., Jadoski, S., y Watzlawick, L. (2017). Qualidade física do solo sob manejo silvipastoril e floresta secundária. *Floresta e Ambiente*, 24, e20160282. doi: 10.1590/2179-8087.028216
- Martins, F., Almeida, R., Mikhael, J., Queiroz, I., Teixeira, W., y Borges, E. (2015). Correlação do COT e porosidade em Latossolo com diferentes usos e manejos na região de Uberaba, MG. *Revista Agrogeoambiental*, 7(2), 81-90.
- Mascarenhas, A., Sccoti, M., Melo, R., Corrêa, F., Souza, E., Andrade, R., y Müller, M. (2017). Atributos físicos e estoques de carbono do solo sob diferentes usos da terra em Rondônia, Amazônia sul-occidental. *Pesquisa Florestal Brasileira*, 37(89), 19-27.
- Maya, M. (2018). Análisis de suelos y aporte de enmiendas. En, *Preparación del terreno para la instalación de infraestructuras, siembra y plantación de cultivos herbáceos. AGAC0108*. Málaga, España: IC Editorial.
- McGrath, J., Spargo, J., y Penn, C. (2014). Soil fertility and plant nutrition. En, *Plant Health* (pp. 166-184). Elsevier. doi: 10.1016/B978-0-444-52512-3.00249-7
- McLean, E. (1965). Aluminium. En, C. Black (Ed.), *Methods of soil analysis. Agronomy No. 9. Part II* (pp. 978-998). Madison, Wisconsin, USA: American Society of Agronomy.
- Medina, C. (2016). Efectos de la compactación de suelos por el pisoteo de animales, en la productividad de los suelos. Remediaciones. *Revista Colombiana de Ciencia Animal*, 8(1), 88-93.
- Moline, E., y Coutinho, E. (2015). Atributos químicos de solos da Amazônia ocidental após sucessão da mata nativa em áreas de cultivo. *Revista de Ciências Agrárias*, 58(1), 14-20.
- Moraes, M., Debiassi, H., Carlesso, R., Franchini, J., Silva, V., y Luz, F. (2016). Soil physical quality on tillage and cropping systems after two decades in the subtropical region of Brazil. *Soil and Tillage Research*, 155, 351-362.
- Muller, M., Guimarães, M., Desjardins, T., y Martins, P. (2001). Degradação de pastagens na região Amazônica: propriedades físicas do solo e crescimento de raízes. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira*, 36(11), 1409-1418.
- Muñoz, D., Ferreira, M., Escalante, I., y López, J. (2013). Relación entre la cobertura del terreno y la degradación física y biológica de un suelo aluvial en una región semiárida. *Terra Latinoamericana*, 31(3), 201-210.
- Navarro, G., y Navarro, S. (2014). El suelo. En, *Fertilizantes: química y acción* (pp. 01-30). Madrid, España: Ediciones Mundi-Prensa.
- Nelson, D., y Sommers, L. (1982). Total carbon, organic carbon, and organic matter. En, A. Page (Ed.), *Methods of soil analysis. Part 2* (p. 539-580).
- Neves, Y. (2013). *Características de diferentes sistemas de uso do solo em Cruzeiro do Sul – Acre* (Tesis de maestría). Universidade Federal de Lavras, Lavras, Brasil.
- Nieto, C., y Caicedo, C. (2012). Análisis del contexto geográfico, socioeconómico y ambiental de la Región Amazónica Ecuatoriana. En, *Análisis reflexivo sobre el*

- desarrollo agropecuario sostenible en la Amazonía ecuatoriana* (pp. 19-36). Joya de los Sachas, Ecuador: INIAP.
- Nogueira, E., Fernandes, A., Ruivo, M., Rodrigues, T., y Sarrazin, M. (2004). Características físicas de um Gleissolo do rio Guamá sob diferentes sistemas de uso. *Revista de Ciências Agrarias*, (42), 85-96.
- Oliveira, I., Campos, M., Freitas, L., y Soares, M. (2015a). Caracterização de solos sob diferentes usos na região sul do Amazonas. *Acta Amazônica*, 45(1), 1-12.
- Oliveira, I., Junior, J., Campos, M., Aquino, R., Freitas, L., Siqueira, D., y Cunha, J. (2015b). Variabilidade espacial e densidade amostral da suscetibilidade magnética e dos atributos de Argissolos da região de Manicoré, AM. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, (39), 668-681.
- Oliveira, M. (2014). *Funcionamiento físico-hídrico do solo em duas topossequencias sob floresta e pastagem em sistema agroextrativista na Amazônia Oriental* (Tesis doctoral). Universidade de São Paulo, Piracicaba, Brasil.
- Ordóñez, F. (2017). *Análisis del proceso de formación y estructura organizativa de la asociación de productores Kichwas del Napo; resistencias y vulnerabilidades*. Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.
- Paula, M., Santos Filho, B., Pena, H., y Macedo, E. (2014). Avaliação da dinâmica dos atributos químicos do solo em sistemas agroflorestais no município de Santa Bárbara-PA, Amazônia-Brasil. *Observatorio de la Economía Latinoamericana*, (201).
- Peña, A., Rodríguez, C., y Suárez, J. (2013). Incidencia de niveles de intervención antrópica sobre propiedades químicas del suelo en coberturas de lomerío (Caquetá, Colombia). *Ingenierías & Amazonía*, 6(1), 5-14.
- Peña, C., y Vanegas, G. (2010). Características de los suelos de la región Amazónica Colombiana. En, *Dinámica de los suelos Amazónicos: procesos de degradación y alternativas para su recuperación* (pp. 09-24). Bogotá, Colombia: Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas Sinchi.
- Pereira Filho, R. (2016). *Determinação das propriedades físicas do solo em função do uso e ocupação em Caçapava do Sul – RS*. Universidade Federal do Pampa, Caçapava do Sul, Brasil.
- Pérez, L., y García, G. (2015). *Evaluación de la conductividad hidráulica del suelo en un sistema agroforestal café (Coffea arábica), en CENECOOP, Masaya, Nicaragua, 2014*. Universidad Nacional Agraria, Managua, Nicaragua.
- Pineda, N., Bosque, J., Gómez, M., y Plata, W. (2009). Análisis de cambio del uso del suelo en el Estado de México mediante sistemas de información geográfica y técnicas de regresión multivariantes. Una aproximación a los procesos de deforestación. *Investigaciones Geográficas*, 69, 33-52.
- Pire, R., y Pereira, A. (2011). Estabilidad de las propiedades físicas de sustratos hortícolas de uso común en el Estado Lara, Venezuela. *Revista Unellez de Ciencia y Tecnología*, (29), 80-88.
- Pla, I. (2010). Medición y evaluación de propiedades físicas de los suelos: dificultades y errores más frecuentes. Propiedades mecánicas. *SuelosEcuatoriales*, 40(2), 75-93.

- Porta, J., López, M., y Poch, R. (2014). Propiedades físicas y comportamiento del suelo. En, *Edafología: uso y protección de suelos* (pp. 139-190). Madrid, España: Ediciones Mundi-Prensa.
- Pragana, R., Ribeiro, M., Nóbrega, J., Ribeiro Filho, M., y Costa, J. (2012). Qualidade física de Latossolos amarelos sob plantio direto na região do cerrado piauiens. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 36(5), 1591-1600.
- Quartezani, W., Lima, J., Zucoloto, M., y Xavier, A. (2013). Correlação e mapeamento da quantidade de calagem por dois métodos distintos para a cultura da Pimenta-do-Reino. *Energia na Agricultura*, 28(2), 90-94.
- Ramos, B., Pais, P., Freitas, W., y Junior, M. (2013). Avaliação dos atributos físico-hídricos em um Latossolo Vermelho distroférrico sob diferentes sistemas de manejo-Lavras/Minas Gerais/Brasil. *Revista de Ciências Agrárias*, 36(3), 440-446.
- Rivera, Y., Moreno, L., Herrera, M., y Romero, H. (2016). La toxicidad por aluminio (Al^{3+}) como limitante del crecimiento y la productividad agrícola: el caso de la palma de aceite. *Revista Palmas*, 37(1), 11-23.
- Rocha Junior, P. (2012). *Indicadores de qualidade do solo e determinação de níveis de degradação de pastagens* (Tesis de maestría). Universidade Federal do Espírito Santo, Alegre, Brasil.
- Rucks, L., García, F., Kaplán, A., Ponce de León, J., y Hill, M. (2004). *Propiedades físicas del suelo*. Montevideo, Uruguay: Universidad de la República.
- Sadeghian, S., González, H., y Arias, E. (2015). El proceso de lixiviación de nutrientes. En, *Lixiviación de nutrientes en suelos de la zona cafetera. Prácticas que ayudan a reducirla* (pp. 08-12). Manizales, Colombia: Federación Nacional de Cafeteros de Colombia.
- Sales, A., Silva, A., Veloso, C., Carvalho, E., y Miranda, B. (2018). Carbono orgânico e atributos físicos do solo sob manejo agropecuário sustentável na Amazônia legal. *Colloquium Agrariae*, 14(1), 1-15.
- Sánchez, A. (1997). *Conceptos básicos de cambios en el uso y cobertura de la tierra, ordenamiento territorial y sistemas de información geográficos*. Managua, Nicaragua: Universidad de Costa Rica.
- Santi, E. (2017). *Estudio del uso y tenencia de territorios de las comunidades Kichwa y Cofanes como ejemplo de manejo sustentable de los recursos naturales*. Universidad San Francisco de Quito, Quito, Ecuador.
- Santos, A. (2016). *Mudança no uso da terra e seu efeito no solo na região de floresta no Estado de Roraima* (Tesis doctoral). Universidade de Brasília, Brasília, Brasil.
- Santos, A., Araújo, A., Santos, P., Oliveira, L., Oliveira, H., y André, T. (2014). Caracterização física e química dos solos de várzeas sob pastejo em relação às superfícies geomórficas. En, *I Encontro de Ciência do Solo da Amazônia Oriental* (pp. 64-72). Gurupi, Brasil: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Núcleo Regional Amazônia Oriental.
- Santos, L., y López, S. (2015). *Valoración de servicios ecosistémicos generados por la construcción de infraestructuras. Desarrollo de la metodología*. Salamanca, España: Ediciones Universidad de Salamanca.

- Sanz, D. (2013). Química del suelo. En, *Bases químicas del medio ambiente*. Madrid, España: Universidad Nacional de Educación a Distancia.
- Shaver, T., Peterson, G., Ahuja, L., Westfall, D., Sherrod, L., y Dunn, G. (2002). Surface soil physical properties after twelve years of dryland no-till management. *Soil Science Society of America Journal*, 66(4), 1296-1303.
- SIGTIERRAS. (2015). *Mapa de órdenes de suelos del Ecuador*. Recuperado de <http://www.sigtierras.gob.ec/mapa-de-ordenes-de-suelos/#> (Consultado el 24 de noviembre del 2018).
- Silva, A. (2014). Crecimiento del maíz en Vertisoles con alto aluminio en la baixada maranhense pre-Amazonia, Brasil. *Agronomía Mesoamericana*, 25(2), 365-370.
- Silveira Junior, O., Santos, A., Santos, P., Rocha, J., y Alexandrino, E. (2014). Distribuição espacial de atributos químicos do solo em áreas sob diferentes usos agrícolas. *Engenharia na Agricultura*, 22(5), 442-455.
- Siqueira, C. (2017). *Atributos do solo e estoques de carbono em sistemas agroflorestais na restauração de áreas degradadas*. (Tesis de maestría). Instituto Agronômico, Campinas, Brasil.
- Soares, M., Campos, M., Oliveira, I., Cunha, J., Santos, L., Fonseca, J., y Souza, Z. (2016). Atributos físicos do solo em áreas sob diferentes sistemas de usos na região de Manicoré, AM. *Revista de Ciências Agrárias*, 59(1), 9-15.
- Sokal, R., y Rohlf, F. (1997). *Biometry. The principles and practice of statistics in biological research*. 3d. ed. New York, USA: Freeman and Company.
- Stefanoski, D., Santos, G., Marchão, R., Petter, F., y Pacheco, L. (2013). Uso e manejo do solo e seus impactos sobre a qualidade física. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 17(12), 1301-1309.
- Te Braak, C., y Šmilauer, P. (2012). *Canoco Reference Manual and User's Guide: Software for Ordination (version 5.0)*. Ithaca, New York, USA: Microcomputer Power.
- Trigoso, R. (1970). *Algunos factores que afectan la fijación simbiótica del nitrógeno* (Tesis de maestría). Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas de la OEA, Turrialba, Costa Rica.
- Vargas, N., Cremades, L., Villarreal, J., y Medina, D. (2013). Determinación de la máxima capacidad de adsorción de la tierra de Arriera en la eliminación de fosfatos en soluciones acuosas. *Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente*, (12), 43-48.
- Vargas, V., Panduro, D., y Falcón, J. (2013). Estudio de la estructura basimétrica del estrato superior de un bosque varillal húmedo en Loreto. *Ciencia Amazónica*, 3(1), 19-23.
- Vasconcelos, R., Souza, E., Cantalice, J., y Silva, L. (2014). Qualidade física de Latossolo amarelo de tabuleiros costeiros em diferentes sistemas de manejo da cana-de-açúcar. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 18(4), 381-386.
- Vega, O., y Walter, N. (2003). *Aislamiento y evaluación de microorganismos solubilizadores de fósforo en suelos de Hawái*. Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia.
- Zanabria, R., y Cuellar, J. (2015). Carbono total almacenado en los depósitos de diferentes sistemas de uso de tierra del ecosistema alto andino, valle del Mantaro, Junín. *Xilema*, 28(1), 43-52.

ANEXO 1

Tabla A1.1. Niveles críticos de parámetros de fertilidad edáfica para la interpretación de análisis de suelos.

	Muy ácido	Ácido	Medianamente ácido	Ligeramente ácido	Prácticamente neutro
pH	0,0 - < 5,0	5,0 - 5,5	> 5,5 - 6,0	> 6,0 - 6,5	> 6,5 - 7,5
	Unidad		Bajo	Medio	Tóxico
Acidez	meq 100 ml		< 0,5	0,5 - 1,5	> 1,5
Al³⁺	meq 100 ml		< 0,3	0,3 - 1,0	> 1,0
	Unidad		Bajo	Medio	Alto
P	mg kg ⁻¹		< 10	10 - 20	> 20
K¹⁺	meq 100 ml		< 0,20	0,20 - 0,38	> 0,38
Ca²⁺	meq 100 ml		< 2,0	2,0 - 5,0	> 5,0
Mg²⁺	meq 100 ml		< 0,5	0,5 - 1,5	> 1,5
COT	%		< 3,0	3,0 - 5,0	> 5,0

Fuente: INIAP, 2012

ANEXO 2



Foto A2.1. Muestreo de suelos y vegetación en los distintos usos de la tierra de la cuenca alta del río Napo: a) Bosque; b) *Chakra*; c) Papa china; d) Caña de azúcar y e) Ganadería.



Foto A2.2. Preparación de muestras no alteradas de suelo y medición de Ksat.



Foto A2.3. Evaluación de la distribución de tamaño de poros en los suelos.



Foto A2.4. Preparación de muestras y análisis de Al^{3+} , acidez intercambiable y pH.



Foto A2.5. Análisis de P disponible y bases intercambiables por espectrofotometría.