



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA
CONSTRUCCIÓN**

CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO AMBIENTE

**TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO
DE INGENIERO GEÓGRAFO Y DEL MEDIO AMBIENTE**

**TEMA: DETERMINACIÓN DE METALES PESADOS PROCEDENTES
DEL PROCESO ERUPTIVO DEL VOLCÁN COTOPAXI EN EL SUELO
DE LA ZONA GANADERA DE MACHACHI.**

AUTOR: VACA PEÑAFIEL, OMAR MESIAS

DIRECTOR: ING. BOLAÑOS GUERRÓN, DARÍO ROBERTO, Ph.D.

SANGOLQUÍ

2019



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA CONSTRUCCIÓN

CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO AMBIENTE

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, *“DETERMINACIÓN DE METALES PESADOS PROCEDENTES DEL PROCESO ERUPTIVO DEL VOLCÁN COTOPAXI EN EL SUELO DE LA ZONA GANADERA DE MACHACHI”*, realizado por el señor *Vaca Peñafiel, Omar Mesias*, el mismo que ha sido revisado en su totalidad, analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar a la señorita para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 16 de enero de 2019.

Una firma manuscrita en tinta azul que parece decir 'Darío Roberto Bolaños'.

.....
Ing. Bolaños Guerrón, Darío Roberto PhD.
DIRECTOR
C.C.: 1715206593



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA
CONSTRUCCIÓN**

CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO AMBIENTE

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Yo, *Vaca Peñafiel, Omar Mesias*, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: ***“DETERMINACIÓN DE METALES PESADOS PROCEDENTES DEL PROCESO ERUPTIVO DEL VOLCÁN COTOPAXI EN EL SUELO DE LA ZONA GANADERA DE MACHACHI”***, es de mí autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando citas bibliográficas.

Consecuentemente el contenido de la investigación mencionada es veraz.

Sangolquí, 16 de enero de 2019.

Omar Vaca P.

.....
Vaca Peñafiel Omar Mesias.
C.C.: 1724911183



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA
CONSTRUCCIÓN**

CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO AMBIENTE

AUTORIZACIÓN

Yo, *Vaca Peñafiel, Omar Mesias*, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, publicar el trabajo de titulación: ***“DETERMINACIÓN DE METALES PESADOS PROCEDENTES DEL PROCESO ERUPTIVO DEL VOLCÁN COTOPAXI EN EL SUELO DE LA ZONA GANADERA DE MACHACHI”***, en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi autoría y responsabilidad.

Sangolquí, 16 de enero de 2019.

Omar Vaca P.

.....
Vaca Peñafiel Omar Mesias.
C.C.: 1724911183

DEDICATORIA

*No dudo ni un solo instante en dedicarte mi vida entera, eres y serás la razón por la cual quiero ser mejor cada día, tengo muy presente la sabiduría, paciencia y dedicación que me muestras en cada momento. El amor que me brindas hace que desaparezca la oscuridad en los días más difíciles. **Blanca de los Ángeles Peñafiel** eres el principal pilar que sostiene mis sueños y mis ganas de culminar los estudios. Madre te amo. Sería injusto no dedicarle este logro a mi padre, **Manuel Vaca Moya**, quiero agradecerle todo lo que me ha brindado a lo largo de este extenso camino, espero que cada día pueda sentirse orgulloso de mí. Junto con mi madre no han permitido que decaiga. La razón por la cual me esfuerzo día tras día es mi familia: **Bladimir, Myrian, Vinicio, María José, Heidi, David y Sonia**. Familia esto es por y para ustedes. A **Dios** por todas las bendiciones.*

OMVP

AGRADECIMIENTOS

***Raquel Castillo** gracias por todo el tiempo y amor que me has dado, tu llegada a mi vida vino acompañada de sonrisas. Me ayudas a crecer como ser humano, tú supiste guiarme para entender el valor que tiene la familia. Haber podido caminar por el mundo a tu lado es simplemente extraordinario y agradezco a Dios que haya sido de tu mano. Mi deseo en la Fontana di Trevi fue disfrutar mientras vamos alcanzando metas juntos, parte de mis rezos en el Vaticano y la Catedral de Santiago fueron para pedir por nosotros y nuestra felicidad. Quiero agradecer a mi tutor **Darío Bolaños**, quien, aparte de contribuir en mi formación académica, me ayudó para no tenerle miedo al mundo. Gracias a usted viajar nunca más se quedará en sueños, sino en metas alcanzables.*

*A **Elena Mafla**, quien hizo que esto sea posible, la dedicación es lo que más admiro de su personalidad. Un simple gracias no me es suficiente, por eso le agradezco desde el fondo de mi corazón por toda la ayuda que nos brindó a Raquel y a mí.*

*Mis agradecimientos a **Paulina Guevara** y su familia, quienes supieron sosegar nuestros corazones cuando estuvimos muy lejos de casa. Fue un enorme gusto volverla a ver.*

***Karla Soledad**, por los enojos, las sonrisas, los días compartidos, tu lealtad, el cariño, la confianza, que hayas estado a mi lado en los mejores y peores momentos, por todo eso te agradeceré toda mi vida. Ser parte de tu vida y que tu formes parte de la mía me llena el corazón, espero que, aunque el tiempo pase nada cambie.*

***Johana** agradezco mucho la amistad y el cariño que me brindas, espero sea una amistad que no tenga fecha de caducidad y el cariño no se quebrante. Gracias totales.*

*Agradezco los días compartidos con amigos como **Silvana, Oscar, Heidi, Diana, Vivi** y **Cristian**.*

Me robaron sonrisas y me dejaron recuerdos memorables. Espero nuestros caminos se sigan cruzando en el transcurso de la vida.

*A **Oswaldo, Sofía** y **Javier** quienes me han formado como profesional, les agradezco infinitamente la comprensión que me han dado en este tiempo. Gracias **Geoint**.*

*Un extenso agradecimiento a **Felipe Macías** y a la Universidad Santiago de Compostela por el apoyo en este proyecto.*

A los docentes de la ESPE que compartieron conmigo parte de sus conocimientos, Gracias.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIÓN	i
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD.....	ii
AUTORIZACIÓN.....	iii
DEDICATORIA.....	iv
AGRADECIMIENTOS	v
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	vi
ÍNDICE DE TABLAS	viii
ÍNDICE DE FIGURAS	ix
RESUMEN.....	x
ABSTRACT	xi
CAPÍTULO I.....	1
1. GENERALIDADES.....	1
1.1. Antecedentes.....	1
1.2. Definición del Problema.....	3
1.3. Justificación e Importancia del Problema.....	3
1.4. Descripción del área de Estudio.	4
1.5. Objetivos.....	5
1.5.1. Objetivo General.....	5
1.5.2. Objetivos Específicos	6
1.6. Metas	6
CAPÍTULO II	7
2. MARCO TEÓRICO	7
2.1. Volcán Cotopaxi y sus procesos eruptivos históricos.....	7
2.2. Cronología de la Erupción del Volcán Cotopaxi en el año 2015	8
2.3. Metales y su origen geogénico	10
2.4. Dinámica de los metales en el suelo	12
2.5. Clasificación de los suelos de acuerdo con el pH y la conductividad eléctrica.....	14
2.6. Métodos para determinar la concentración de metales en el suelo.....	15
CAPÍTULO III	16

3. METODOLOGÍA.....	16
3.1. Muestreo	16
3.2. Preparación de la Muestra	19
3.3. Digestión Ácida	19
3.4. Determinación de la concentración de metales pesados.....	21
CAPÍTULO IV	23
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	23
4.1. Muestreo	23
4.2. Humedad, pH y conductividad eléctrica.....	26
4.3. Concentraciones de Cobre (Cu) y Mercurio (Hg)	29
4.3.1. Hacienda Altamira	29
4.3.2. Hacienda San Ramón.....	30
4.3.3. Hacienda La Laguna	31
4.3.4. Comparativa de concentración en suelo, ceniza y norma.....	32
4.4. Concentraciones de Cadmio (Cd), Plomo (Pb), Arsénico (As) y Talio (Tl)	33
4.4.1. Comparativa de concentración en suelo, ceniza y norma.....	34
4.5. Concentraciones de otros metales pesados	35
4.6. Mapas Web (Geovisualizador)	37
CAPÍTULO V	40
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	40
5.1. Conclusiones.....	40
5.2. Recomendaciones	42
BIBLIOGRAFÍA.....	43

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. <i>Metales traza constituyentes de las rocas comunes y minerales.</i>	11
Tabla 2. <i>Concentración promedio de metales en la corteza terrestre.</i>	11
Tabla 3. <i>Movilidad de elementos traza activos bioquímicamente, en función del pH.</i>	14
Tabla 4. <i>Términos de clase de reacción y sus rangos en pH.</i>	14
Tabla 5. <i>Términos de la clase de salinidad.</i>	15
Tabla 6. <i>Coordenadas de los puntos muestreados y codificación de las muestras.</i>	23
Tabla 7. <i>Contenido de humedad y valor de pH-H₂O (relación 1:2,5) de los suelos analizados.</i> .	26
Tabla 8. <i>Reporte de la conductividad eléctrica en mmhos.cm⁻¹.</i>	28
Tabla 9. <i>Concentraciones de Cu y Hg en mg.kg⁻¹ del suelo de la Hacienda Altamira.</i>	29
Tabla 10. <i>Concentraciones de Cu y Hg en mg.kg⁻¹ del suelo de la Hacienda San Ramón.</i>	30
Tabla 11. <i>Concentraciones de Cu y Hg en mg.kg⁻¹ del suelo de la Hacienda La Laguna.</i>	31
Tabla 12. <i>Concentraciones Cu y Hg en suelo, ceniza y valores máximos permitidos en norma.</i> .	32
Tabla 13. <i>Límites de detección mediante ICP-OES con el equipo PerkinElmer Optima 8300.</i> ...	33
Tabla 14. <i>Límites de detección mediante ICP-OES expresado en mg.kg⁻¹.</i>	33
Tabla 15. <i>Concentraciones Pb, As, Cd y Tl en suelo, ceniza y límites permitidos en norma.</i>	34
Tabla 16. <i>Concentraciones Co, Cr, Ni y Zn en suelo, ceniza y límites permitidos en norma.</i>	35

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Haciendas establecidas como zona de estudio.....	5
Figura 2. Volcán Cotopaxi 2017	7
Figura 3. Actividad Histórica del volcán Cotopaxi.....	8
Figura 4. a) Imagen de la presencia de una laguna en el cráter del volcán. b) Foto del cráter del Cotopaxi en enero 2003 (Patricio Ramón).	9
Figura 5. Interacción de los metales pesados en el suelo provenientes de la ceniza.....	13
Figura 6. Esquemas de muestreo: A) Azar en zig-zag B) Transectos paralelos C) Transectos al azar intersectados D) Muestreo en rejilla.	17
Figura 7. Distribución espacial de los puntos de muestreo de la H. Altamira.	24
Figura 8. Distribución espacial de los puntos de muestreo de la H. San Ramón.	25
Figura 9. Distribución espacial de los puntos de muestreo de la H. La Laguna.	25
Figura 10. Ubicación general de las haciendas.	38
Figura 11. Representación de los puntos de muestreo con su concentración de Cu.....	38
Figura 12. Representación de los puntos de muestreo con su concentración de As, Cd, Pb y Tl.....	39
Figura 13. Información de cada punto de muestreo y las concentraciones de los metales determinados mediante ICP-OES.....	39

RESUMEN

El proceso eruptivo del volcán Cotopaxi en el año 2015 se caracterizó por erupciones de tipo freatomagmáticas con emisiones de cenizas. Un estudio mineralógico de estas cenizas demostró la presencia de metales pesados, los cuales pudieron haber sido transferidos al suelo y así podrían afectar las actividades agrícola y ganadera. Es por esto que, para evaluar la relación de las concentraciones de Cd, Cu, Pb, Hg, Tl y As entre suelo, ceniza y normativa, se definió dentro del zona de afectación como área de estudio las Haciendas Altamira, San Ramón y La Laguna. El muestreo contempló la metodología emitida en la Norma Técnica del Suelo NT004 del Distrito Metropolitano de Quito, se tomaron 3 tipos de muestras: suelo superficial, a 30 cm y 70 cm de profundidad. A continuación, se secó y tamizó las muestras según el protocolo de métodos de análisis para suelos y lodos seleccionado, luego se realizó el proceso de digestión ácida según el método EPA 3050B¹ para posteriormente determinar la concentración de Cd, Cu, Pb, Tl Y As mediante ICP-OES y Hg a través del espectro de absorción atómica AMA 254, obteniendo como resultado que los metales analizados se mantuvieron bajo los límites establecidos en el TULSMA Libro VI: Anexo 2.

PALABRAS CLAVE:

- **GANADERÍA**
- **METALES PESADOS**
- **ICP-OES**
- **ORIGEN GEOGÉNICO**

ABSTRACT

The eruptive process of Cotopaxi volcano in 2015 was characterized by ash emissions and phreatomagmatic eruptions. A mineralogical study of ash showed the presence of heavy metals, which could have been transferred to soil and could affect agricultural and livestock activities. That is why, to evaluate the relationship of Cd, Cu, Pb, Hg, Tl and As concentrations between soil, ash and regulations, Altamira, San Ramón and La Laguna states were defined within the affected area as study area. The sampling contemplated the methodology issued in the Technical Standard of Soil NT004 of Metropolitan District of Quito, 3 types of samples were taken: surface soil, at 30 cm and 70 cm deep. Next, the sample was dried and sieved according to protocol of analysis methods for soils and sludge selected, then acid digestion process was performed according to the EPA 3050B¹ method, to later determine the concentration of Cd, Cu, Pb, Tl and As by means ICP-OES and Hg through the atomic absorption spectrum AMA 254, obtaining as a result that analyzed metal were kept under the limits established in the TULSMA Book VI: Annex 2.

KEYWORDS:

- **LIVESTOCK FARMING**
- **HEAVY METALS**
- **ICP-OES**
- **GEOGENIC ORIGIN**

CAPÍTULO I

1. GENERALIDADES

1.1. Antecedentes

El estratovolcán Cotopaxi de 5897 msnm es considerado como el segundo volcán activo más alto del mundo, debido a que históricamente ha desarrollado cinco grandes procesos eruptivos en los siguientes períodos: 1532-1534, 1742-1744, 1766-1768, 1853-1854 y 1877-1880, es decir representa una amenaza permanente para los asentamientos humanos cercanos al mismo, incluso puede afectar a localidades lejanas. Toulkeridis (2005), explica que un ciclo eruptivo similar al de 1877 es el más probable a repetirse, ocasionando peligros volcánicos como: a) Caída de ceniza; b) Emisión de flujos piroclásticos no relacionados con el colapso de una columna eruptiva del tipo “boiling over”; c) Lahares, originados por la fusión del hielo glacial.

El 27 de mayo del 2015 el Instituto Geofísico del Ecuador emitió un informe en el cual manifestó que: “La actividad sísmica del volcán Cotopaxi ha venido mostrando cambios desde mediados del mes de abril de este año, acentuándose en mayo y, en especial, desde el día 21, registrándose el mayor pico de actividad con más de 180 eventos el sábado 23. Durante mayo se contabilizaron un total de 3000 eventos, incluyendo: 9 vulcano-tectónicos (VT), 2220 de largo período (LP) y 36 de tipo híbrido (HB). Este aumento es considerable con respecto a los 628 eventos registrados en abril, y constituye además el mayor pico de actividad desde que existe el monitoreo instrumental del Cotopaxi” (Secretaría de Gestión de Riesgos, 2015).

En el proceso de reactivación del Cotopaxi en el año 2015, el Instituto Geofísico reportó la emisión de ceniza hasta el mes de noviembre del mismo año (Instituto Geofísico, 2016). La

composición y el tamaño de las partículas de la ceniza volcánica son diferentes una de otra, estas características están relacionadas con la composición de la lava y el grado de fragmentación que se pueda producir en el interior del volcán (Caselli, Vélez, & Agosto, 2011, pág. 10).

Los estudios iniciales de ceniza del volcán determinaron que las explosiones fueron de tipo freáticas, sin embargo, un estudio más detallado de la misma permitió identificar un componente magmático en la ceniza, recalificando las explosiones como “freatomagmáticas” (Instituto Geofísico, 2016).

Por su parte Sánchez (2017), en el análisis mineralógico y multi-elemental de la ceniza volcánica del Cotopaxi, colectada en una hacienda ubicada en el sector de Machachi, determinó las concentraciones de Pb, As y Cu, en cuanto a Cd, Tl y Hg no obtuvo niveles detectables en PPM (mg.km^{-1}). Por otro lado, Toulkeridis (2015), en sus estudios analíticos de ceniza efectuados durante el proceso eruptivo del volcán Cotopaxi del 14 de agosto al 23 de septiembre de 2015, determinó la presencia de Na, Mg, Al, Si, P, S, K, Ca, Ti, Mn y Fe en concentraciones variables en el transcurso del proceso eruptivo del volcán. Los metales presentes en la ceniza se transfieren al suelo, vegetación y/o recursos hidrológicos por procesos de movilización (lixiviación y precipitación), complejación y/o adsorción.

Partiendo de lo mencionado, surgió el presente proyecto de investigación que se encuentra enmarcado dentro del proyecto de investigación “Cuantificación de metales pesados procedentes del proceso eruptivo del volcán Cotopaxi en suelo y pasto de la zona ganadera de Machachi y su relación con la contaminación de la leche producida en la zona” aprobado por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, a cargo del Departamento de Ciencias Exactas. La determinación de

la concentración de metales pesados en el suelo es una etapa que permitirá analizar la transferencia de estos en secuencia desde el suelo hacia el pasto y leche.

1.2. Definición del Problema

Galán & Romero (2010), en su artículo “Contaminación de Suelos por Metales Pesados”, menciona que el suelo actúa como obstáculo para proteger otros medios más sensibles (hidrológicos y biológicos), filtrando, descomponiendo, neutralizando o almacenando contaminantes, y evitando en gran parte su biodisponibilidad.

Así pues, los suelos del sector de Machachi actuaron como barrera protectora ante la caída de ceniza del volcán Cotopaxi, soportando la transferencia de toda la composición mineralógica de la ceniza hacia el suelo. Por lo cual se quiere evaluar la relación existente entre las concentraciones de metales pesados de la ceniza proveniente del proceso eruptivo del volcán Cotopaxi y la concentración existente en el suelo de la zona ganadera de Machachi, determinando el porcentaje de transferencia que presenta de un medio a otro.

1.3. Justificación e Importancia del Problema

El Cantón Mejía tiene una superficie de 105571,74 ha de suelo, de las cuales destina el 32,85% para uso pecuario, de hecho; se considera a Mejía como uno de los sectores ganaderos más emblemáticos de la provincia de Pichincha, existe grandes extensiones de pasto utilizado principalmente para actividades ganaderas, en algunos sectores el manejo es tecnificado y en otros no, por lo cual el pasto en varios sectores crece naturalmente (G.A.D. Municipal del Cantón Mejía, 2015, pág. 168).

Las principales fuentes económicas de Mejía son la ganadería y la agricultura, mismas que se han mantenido con regularidad después del proceso eruptivo del volcán Cotopaxi en el año 2015. Estas actividades productivas demandan extensas superficies de recurso suelo para desarrollarse de forma adecuada (G.A.D. Municipal del Cantón Mejía, 2015).

Se debe caracterizar los suelos, establecer los elementos tóxicos existentes en él y en qué cantidad se encuentran biodisponibles. Conocer la forma en la cual estos elementos pueden ingresar a la cadena trófica, así mismo, determinar el nivel de concentración que se puede admitir en el suelo, donde exista la posibilidad de transferencia a otro organismo (Galán & Romero, 2010, pág. 59).

Debido a los procesos biogeoquímicos se consideró una posible transferencia de metales presentes en la ceniza hacia el suelo, por lo que se requiere determinar la presencia y concentración de metales pesados en el suelo y compararlas con los límites permisibles establecidos en la normativa (TULSMA, Libro VI, Anexo 2).

1.4. Descripción del área de Estudio.

El panorama geográfico del cantón Mejía, posee una fisonomía particular, un clima muy diverso y una geomorfología de relieves variados en todo el territorio. Existen tres zonas naturales marcadas: el valle, el páramo y los bosques occidentales, cada zona tiene sus propias características naturales e incluso culturales (G.A.D. Municipal del Cantón Mejía, 2015).

El área de estudio contempló tres haciendas que fueron afectadas por la caída de ceniza en el 2015, las haciendas Altamira y San Ramón ubicadas en la parroquia de Aloasí a 24,5 Km y 23 Km al Noroeste del volcán Cotopaxi respectivamente; mientras que la hacienda La Laguna se encuentra

en la parroquia de Machachi a 19 Km al Noroeste del volcán, tal como se muestra en la Figura 1. Según el testimonio de Galo Ávila propietario de la Hacienda La Laguna, el predio estuvo expuesto a la caída de ceniza permanentemente y debido a los vientos locales que removían la ceniza de sectores aledaños, esta se trasladaba y se depositaba en la hacienda La Laguna.

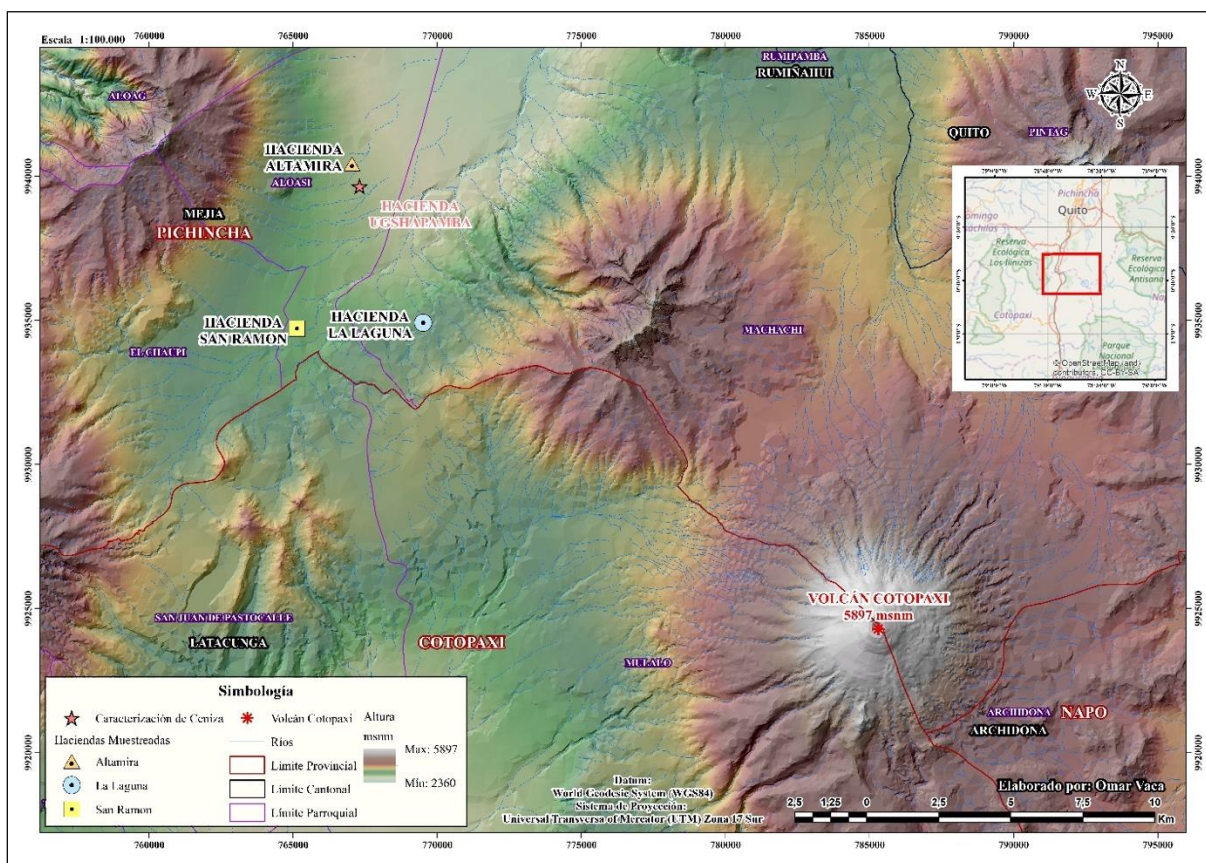


Figura 1. Haciendas establecidas como zona de estudio.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo General

Evaluar la relación entre las concentraciones de metales pesados presentes en suelo, respecto a las concentraciones existentes en ceniza y comparar con los niveles establecidos en norma.

1.5.2. Objetivos Específicos

- Determinar las concentraciones de Cd, Tl, Pb, As, Hg, y Cu en el suelo.
- Elaborar mapas de concentración de metales pesados para la zona de estudio.
- Analizar la influencia de las concentraciones de As, Pb y Cu en ceniza, respecto a las concentraciones en el suelo y comparar con la normativa vigente.

1.6. Metas

- 81 muestras de suelo (27 de suelo superficial, 27 de suelo a 30 cm y 27 suelo a 70 cm de profundidad), extraídas de 3 haciendas de la parroquia de Machachi y Aloasí.
- Reporte de concentraciones de Cd, Tl, Pb, As, Hg, y Cu.
- 6 mapas de concentraciones de metales pesados (un mapa por cada metal pesado detectado).
- Tablas comparativas entre las concentraciones de As, Pb y Cu en suelo, ceniza y normativa ambiental vigente.

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Volcán Cotopaxi y sus procesos eruptivos históricos

El volcán Cotopaxi es un claro ejemplo de un estrato volcán, su forma es casi cónica, resultado de erupciones sucesivas que permitieron la acumulación de rocas, arena y cenizas para lograr un monte cónico casi regular (Figura 2) (Ministerio de Ambiente, 2014, pág. 1 y 2).



Figura 2. Volcán Cotopaxi 2017

Según lo citado por Torres y Oliva (2016) del libro “El Volcán Cotopaxi, una amenaza que acecha”, publicado en el año 2005, manifiesta que: “Las crónicas confirman que en los últimos 771 años han ocurrido 4 episodios laharríticos de grandes dimensiones; 1534, 1742 – 1744, 1768 y 1877 – 1885” ...

En la Figura 3, se hace un recorrido cronológico a la actividad histórica que ha tenido el volcán Cotopaxi desde 1532 hasta el año 1942:

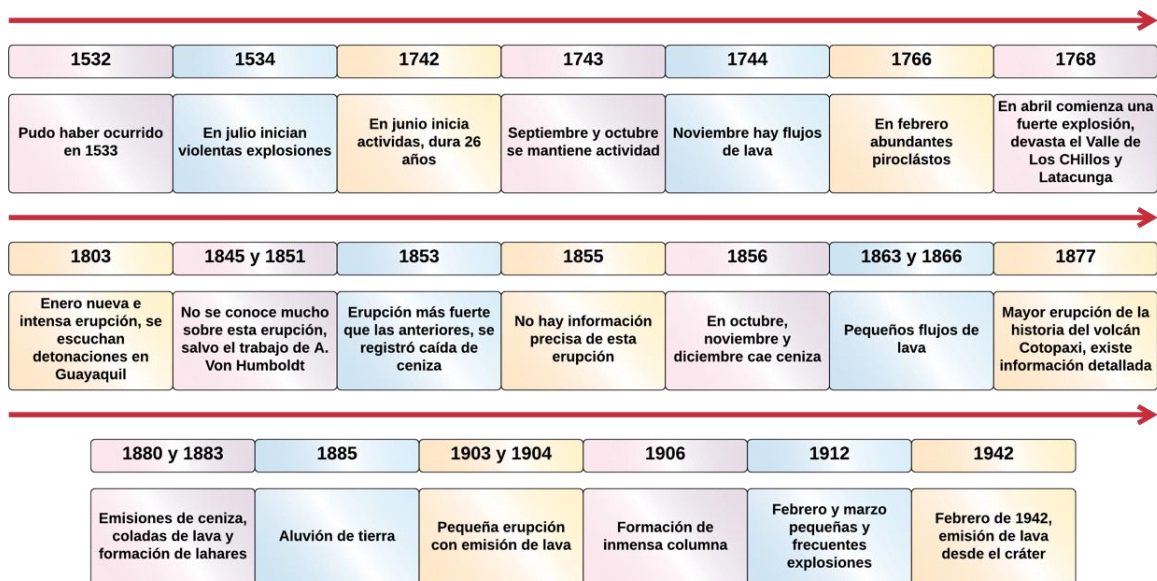


Figura 3. Actividad Histórica del volcán Cotopaxi.

Fuente: (Torres & Oliva, 2016)

Adaptado por: Unidad de Investigación Ambiental - MAE, 2016.

2.2. Cronología de la Erupción del Volcán Cotopaxi en el año 2015

A partir del mes de abril de 2015 se evidenció un aumento de la actividad sísmica producida por el volcán Cotopaxi. En el mes de mayo la red de monitorización del Instituto Geofísico registro emisiones de dióxido de azufre (SO₂), datos publicados el 2 de junio en el Informe Especial N°2 del IG-EPN (Instituto Geofísico, 2016).

El Instituto Geofísico (IG-EPN) el 11 de junio de 2015 destacó que la actividad interna del volcán aumentó, y existió presencia de tremor (vibración del conducto), de igual forma la actividad externa donde se observó la presencia de fumarolas provenientes del cráter. Para esta fecha el IG-

EPN pronosticó que la actividad volcánica seguiría en aumento, y probablemente sucederían explosiones freáticas en el cráter (Instituto Geofísico, 2016).

El mes de agosto de 2015 fue determinante respecto a la caracterización del tipo de explosión que acontecería posteriormente, el IG-EPN gracias a registros fotográficos de usuarios de redes sociales pudo identificar dentro del cráter la presencia de una laguna verdosa (Figura 4), con lo cual la probabilidad de que las explosiones del volcán sean de tipo freáticas aumentó. El 14 de agosto en la mañana se produjeron 2 pequeñas explosiones, ocasionando una moderada caída de ceniza en sectores como Jambelí, Machachi, Pedregal, Boliche, Alóag, Tambillo y Amaguaña. A las 10:25 am sucedió otra emisión de ceniza (columna entre 6 y 8 Km sobre el nivel del cráter), la cual tomó dirección NW y SW del volcán (Instituto Geofísico, 2016).

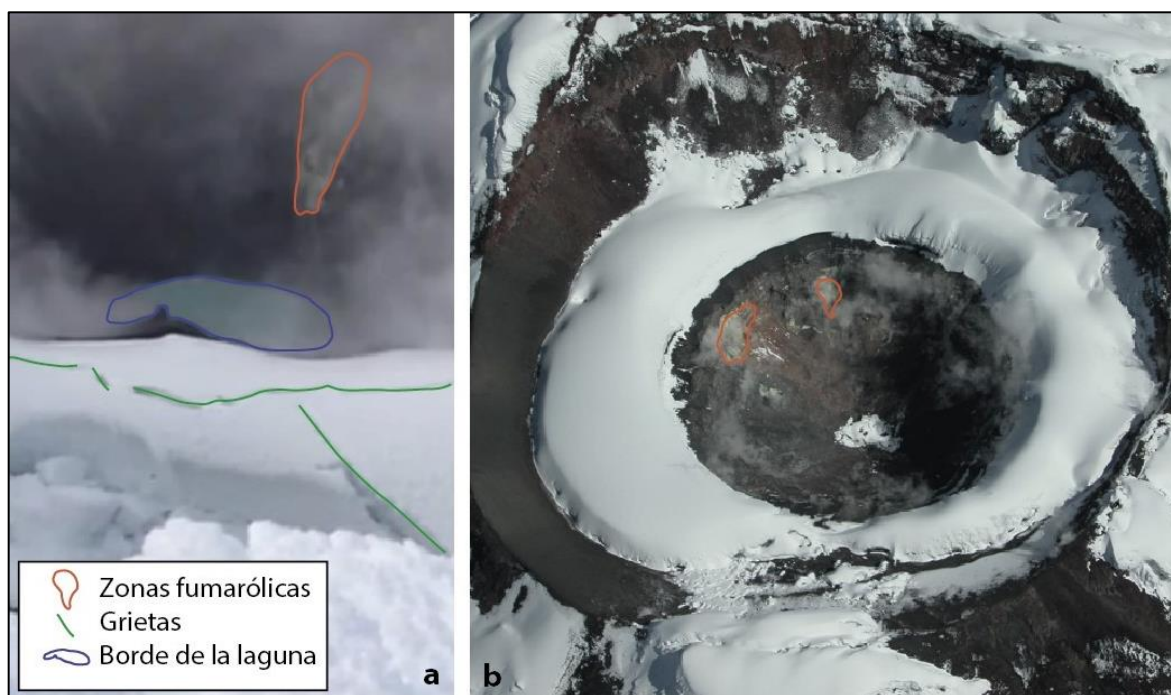


Figura 4. a) Imagen de la presencia de una laguna en el cráter del volcán. b) Foto del cráter del Cotopaxi en enero 2003 (Patricio Ramón).

Nótese que las zonas fumarólicas no son características nuevas.

Fuente: (Crónicas de la erupción del volcán Cotopaxi 2015, 2016)

Inicialmente el IG-EPN calificó a las explosiones como freáticas, pero con un estudio más detallado de la ceniza se estableció que el tipo de explosiones fueron “freatomagmáticas”, tras las explosiones del 14 de agosto la actividad del volcán Cotopaxi se caracterizó por la emisión continua de ceniza. Debido a la dirección de los vientos las zonas afectadas por este fenómeno fueron las ubicadas al occidente del volcán. Incluso sectores tan distantes como Santo Domingo de los Colorados, El Carmen, Quevedo, Portoviejo y Bahía de Caráquez, fueron también afectados por la ceniza (Instituto Geofísico, 2016).

2.3. Metales y su origen geogénico

Se definen los metales pesados como aquellos elementos metálicos cuyo peso específico es mayor de 5 g.cm^{-3} o con un número atómico superior a 20. Desde otro punto de vista se puede clasificar como metales pesados, aquellos que por sus efectos tóxicos y persistencia son considerados como polucionantes ambientales (García, Moreno, Polo, & Hernández, 2002).

Todos los metales que pueden generar un problema de contaminación ambiental existen de forma natural en rocas, suelos, aguas y aire, pero en concentraciones mínimas que no causan efectos adversos (García, Moreno, Polo, & Hernández, 2002, pág. 129).

Naturalmente la presencia de metales es mayor en rocas ígneas que en sedimentarias. La cantidad de metal que se incorporará al suelo de forma natural depende del grado de resistencia de cada mineral que constituye la roca, tal como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1.*Metales traza constituyentes de las rocas comunes y minerales.*

Alteración	Mineral	Ocurre en	Metales constituyentes
Fácil de alterar ↓ Difícil de alterar	Olivina	Rocas ígneas	Mn, Co, Ni, Cu, Zn
	Anortita	Rocas metamórficas	Mn, Cu, Sr
	Augita	Ultra básicas y rocas básicas volcánicas	Mn, Co, Ni, Cu, Zn, Pb
	Hornblenda	Por lo general, en rocas ígneas y metamórficas	Mn, Co, Ni, Cu, Zn
	Albita	Rocas ígneas intermedias	Cu
	Biotita	Rocas ígneas y metamórficas	Mn, Co, Ni, Cu, Zn
	Ortoclasa	Rocas ígneas ácidas	Cu, Sr
	Moscovita	Granito, esquisto y cristales	Cu, Sr
	Magnetita	Rocas ígneas y metamórficas	Cr, Co, Ni, Zn

Fuente: (Mitchell, 1964)

Es decir, la concentración de los metales en el suelo está directamente relacionado con el proceso de formación de este, por lo que depende de la roca madre que dio origen al suelo. Las concentraciones medias de metales en el suelo que existen naturalmente en los suelos a nivel mundial se resumen en la Tabla 2.

Tabla 2.*Concentración promedio de metales en la corteza terrestre.*

Metal	Concentración	Descripción	Fuente
Cadmio	0,3 mg.kg ⁻¹	En los suelos ácidos, el Cadmio se intercambia fácilmente, lo que lo hace disponible para las plantas.	(Sánchez G. , 2016)
Plomo	16 mg.kg ⁻¹	Se produce por fundición del mineral. El agua, el aire y los suelos son depósitos naturales del metal. La presencia de Plomo natural en éstos se debe a la erosión de los suelos y a la actividad volcánica.	(Oriundo & Robles, 2016)
Mercurio	100 µg.kg ⁻¹	El origen del Mercurio en el suelo proviene principalmente de la roca madre.	(Lominchar, Sierra, Rodríguez, & Millán, 2010)
			Continúa =>

Cobre	50 mg.kg ⁻¹	El Cobre es un metal rojizo que ocurre naturalmente en las rocas, el agua, los sedimentos y, en niveles bajos, el aire.	(ATSDR, 2004)
Talio	Entre 0,3 y 0,7 mg.kg ⁻¹	El Talio puro es un metal suave de color blanco azulado que se encuentra distribuido ampliamente en pequeñas cantidades en la corteza terrestre.	(ATSDR, 1992)
Arsénico	2,5 mg.kg ⁻¹	Es un metaloide (presenta propiedades intermedias entre los metales y no metales) que aparece de manera natural y lo podemos encontrar de diferentes formas (compuestos inorgánicos y orgánicos), tanto en estado sólido como líquido.	(Pérez, 2015)

Fuente: Varios.

Estos valores y rangos permiten que los investigadores realicen comparaciones entre las concentraciones existentes en los suelos con los niveles de fondo y evitar el uso del concepto de suelo contaminado cuando no es necesario.

2.4. Dinámica de los metales en el suelo

El suelo es considerado como un depósito natural, donde todo componente que llegue a él tiende a interactuar, tal como se presenta en el siguiente diagrama (ver Figura 5), esto permite la comprensión de la interacción del suelo con los componentes en este caso metales pesados, también se puede predecir los procesos que se pueden llevar a cabo de acuerdo al medio en el que se encuentra el recurso suelo. Suelos que tienen un alto flujo de recursos hídricos son más propensos a llevar a cabo el proceso de precipitación y/o coprecipitación.

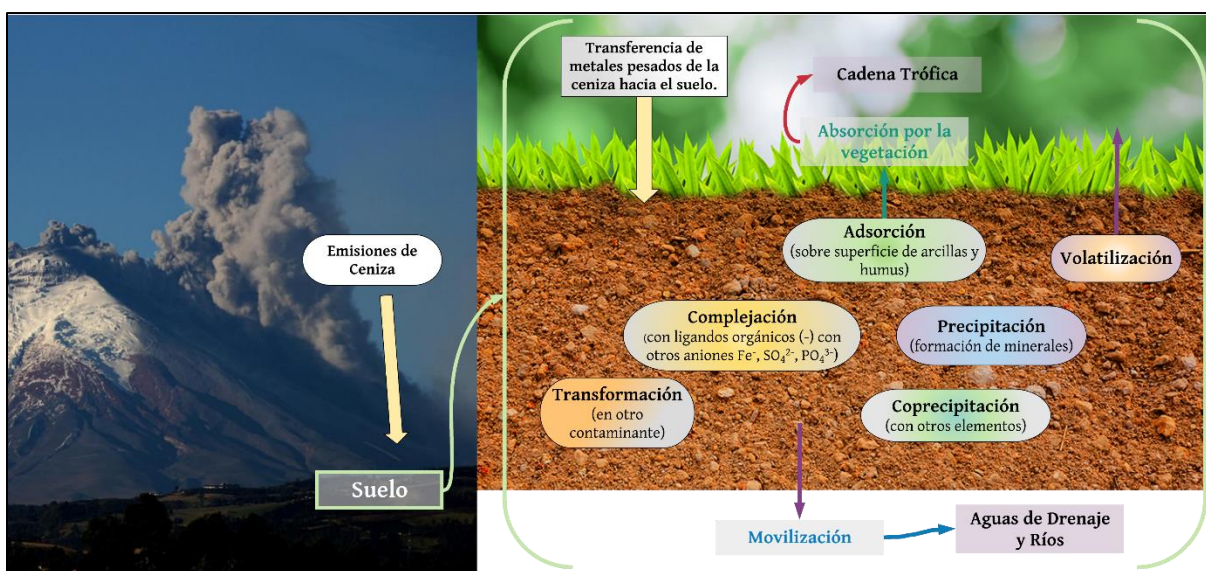


Figura 5. Interacción de los metales pesados en el suelo provenientes de la ceniza.
Fuente: (García, Moreno, Polo, & Hernández, 2002)

El pH es uno de los parámetros del cual dependen los metales para que ocurra uno u otro proceso, de acuerdo con este factor los metales pueden mobilizarse o acumularse, generando un proceso de transferencia hacia los recursos hídricos o un proceso de biodisponibilidad para ser captados por las plantas.

De acuerdo con Felipó (1992) y García et al, (2002), en base a los valores de pH que presente el suelo, se ha definido cuan móviles son ciertos iones de metales, es cierto que existen elementos como el Cadmio que se pueden movilizar en un amplio rango de pH (5,5 a 9,5), pero el pH es un factor determinante para la movilidad de los metales, tal es el caso del Plomo que al contrario del Cadmio solo puede mobilizarse en un pH menor a 5,5. En la Tabla 3, se resume la movilidad de varios metales pesados.

Tabla 3.*Movilidad de elementos traza activos bioquímicamente, en función del pH.*

Asociaciones geoquímicas en suelos	Prácticamente inmóviles	Moderadamente móviles	Fácilmente móviles
Ácido (pH<5,5)	Mo	Pb ²⁺ , Cr ³⁺ , Cr ⁶⁺ , Ni ²⁺ , Ni ³⁺ , V ⁵⁺ , As ³⁺ , Co ²⁺ , Co ³⁺	Sr, Ba, Cu, Zn, Cd, Hg
Neutro o débilmente ácido (pH 5,5 – 7,5)	Pb	Sr, Ba, Cu, Cd, Cr ³⁺ , Cr ⁶⁺ , Co ²⁺ , Co ³⁺ , Mo ⁴⁺	Zn, V ⁵⁺ , As ⁵⁺
Alcalino o fuertemente alcalino (pH 7,5 – 9,5)	Pb, Ba, Co	Zn, Ag, Sr, Cu, Cd	Mo ⁶⁺ , V ⁵⁺ , As ⁵⁺

Fuente: (Felipó, 1992).

2.5. Clasificación de los suelos de acuerdo con el pH y la conductividad eléctrica

En el Manual de levantamiento de suelos publicado por el Personal de la División de Ciencias del Suelo (Soil Science Division Staff) en el 2017, se estableció la clase de reacción de los suelos de acuerdo con su pH (ver Tabla 4).

Tabla 4.*Términos de clase de reacción y sus rangos en pH.*

Clase de reacción	Rango de pH
Ultra ácido	< 3,5
Extremadamente ácido	3,5 – 4,4
Muy fuertemente ácido	4,5 – 5,0
Fuertemente ácido	5,1 – 5,5
Moderadamente ácido	5,6 – 6,0
Ligeramente ácido	6,1 – 6,5
Neutro	6,6 – 7,3
Ligeramente alcalino	7,4 – 7,8
Moderadamente alcalino	7,9 – 8,4
Fuertemente alcalino	8,5 – 9,0
Muy fuertemente alcalino	> 9,0

Fuentes: (Soil Science Division Staff, 2017), (TULSMA Libro VI Anexo 2, 2015).

Por otra parte, la conductividad eléctrica (CE) mide la capacidad de un material para conducir la corriente eléctrica, el valor será más alto si la corriente se mueve con mayor facilidad a través del suelo. Esto significa que, a mayor CE, mayor es la concentración de sales. La medida de la CE del suelo permite estimar en forma casi cuantitativa la cantidad de sales que contiene. El análisis de la CE en suelos se hace para establecer si las sales solubles se encuentran en cantidades suficientes como para afectar la germinación normal de las semillas, el crecimiento de las plantas o la absorción de agua por parte de estas. La clasificación de los suelos de acuerdo con la conductividad eléctrica se define en la Tabla 5.

Tabla 5.

Términos de la clase de salinidad.

Clasificación de salinidad	Conductividad eléctrica dS.m ⁻¹ (mmhos.cm ⁻¹)
No salino	< 2
Muy ligeramente salino	2 a < 4
Ligeramente salino	4 a < 8
Moderadamente salino	8 a < 16
Fuertemente salino	≥ 16

Fuente: (Soil Science Division Staff, 2017)

2.6. Métodos para determinar la concentración de metales en el suelo

En la actualidad existen varias técnicas y equipos para determinar la concentración de elementos químicos en agua, suelo, vegetales, rocas etc. Entre las técnicas más avanzadas se tiene a la Espectrometría de Emisión Óptica de Plasma Acoplada Inductivamente (ICP-OES por sus siglas en ingles) y Espectrometría de Absorción Atómica (Boss & Fredeen, 2004) (LECO Corporation, 2008).

CAPÍTULO III

3. METODOLOGÍA

3.1. Muestreo

En la programación del muestreo se utilizó herramientas SIG y GPS para el posicionamiento de los puntos muestreados. Con herramientas SIG de ESRI se levantó un Web Feature Service (WFS) y un Web Map Service (WMS), mismos que se encuentran almacenados en el espacio de la nube de ArcGIS Online.

Se instaló la aplicación “Collector for ArcGIS” en un Smartphone, en esta aplicación se ingresó el usuario (OmarMVP) y las credenciales de ArcGIS Online (Licencia de uso personal) para tener acceso al WMS y WFS antes levantados. Una vez que se ingresó al espacio del usuario, se escogió el WMS levantado para capturar datos en campo. La aplicación empleó el GPS del dispositivo móvil para realizar el posicionamiento geográfico de los puntos de muestreo, en el WFS se almacenó en geometría de punto los sitios de muestreo con sus coordenadas geográficas en WGS84. En Collector se incorporó un BaseMap de imágenes satelitales almacenado en el WMS. Adicionalmente la aplicación permitió almacenar un registro fotográfico de los puntos de muestreo, que permitirán tomar una muestra de suelo en el mismo punto en el caso de requerirlo.

Emplear Collector for ArcGIS permitió guiar la metodología de muestreo, debido a la noción espacial que se obtuvo a través del WMS, por lo tanto, en tiempo real se visualizó los límites de las áreas de pastoreo del ganado de cada hacienda y se estableció el tipo de muestreo más adecuado para cada sitio de estudio.

El muestreo se lo realizó tomando como referencia el TULSMA Libro VI Anexo 2, y la Norma Técnica de Suelo establecida por el Distrito Metropolitano de Quito, donde los tipos de muestreos recomendados se observa en la Figura 6.

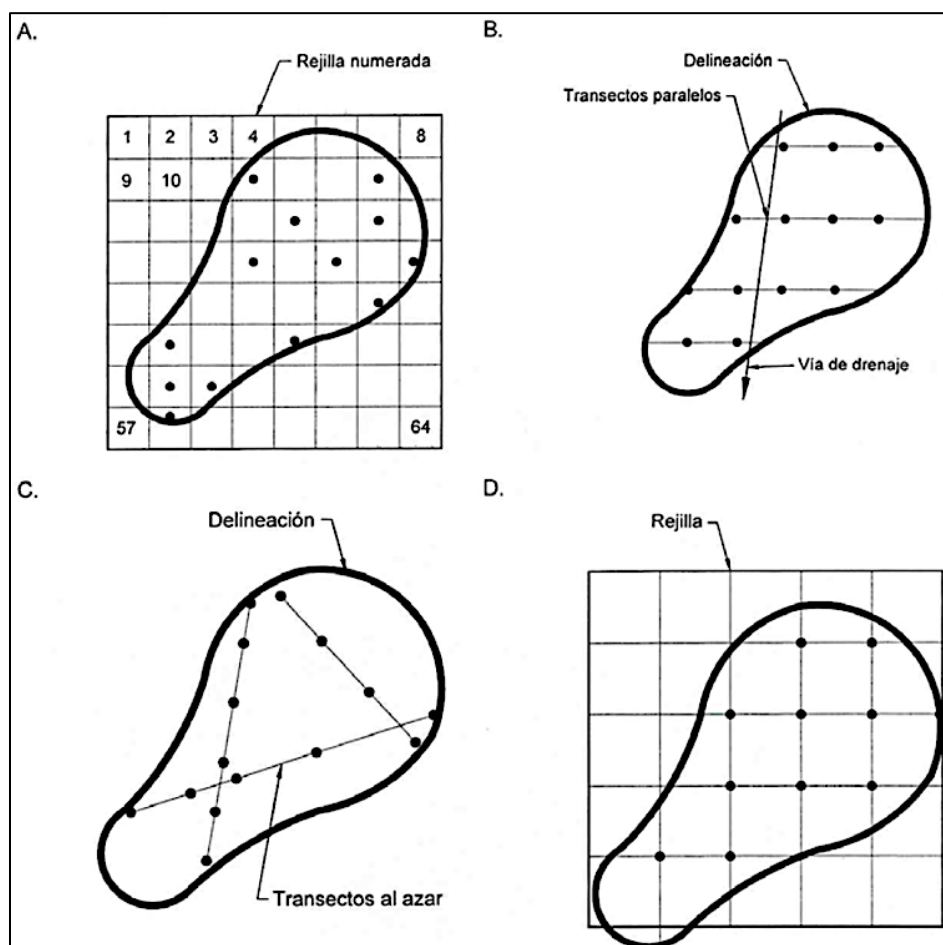


Figura 6. Esquemas de muestreo: A) Azar en zig-zag B) Transectos paralelos C) Transectos al azar intersectados D) Muestreo en rejilla.

Fuente: (Norma Técnica de Suelo NT004, 2013)

El sistema de muestro seleccionado fue al azar en zig-zag, este sistema se realizó en las unidades de muestreo, recorriéndolas en zig-zag y recolectando muestras en sitios al azar. Los puntos de muestreo y, en consecuencia, el número de muestras dependen del tipo de contaminante, de la extensión y profundidad del área afectada, de la variabilidad espacial y analítica del (los)

indicador (es) seleccionado (s) y, especialmente, del criterio del profesional que recolecta las muestras (Distrito Metropolitano de Quito, 2013, pág. 6).

Se tomaron muestras de suelo de la zona ganadera de la parroquia de Machachi y Aloasí, en las haciendas Altamira, San Ramón y La Laguna, las cuales fueron afectadas por la caída de ceniza en el proceso eruptivo del volcán Cotopaxi en el año 2015.

Por cada punto de muestreo se tomó 1 muestra de suelo superficial, 1 muestra de suelo medio (profundidad a 30 cm) y 1 muestra de suelo profundo (profundidad a 70 cm). Se realizaron 3 sesiones de muestreo en los meses de abril, mayo y junio del 2018, en cada sesión se estableció 3 puntos de muestreo por cada hacienda, finalmente se obtuvo 27 puntos de muestreo.

Materiales y Equipos

- **Software**
 - ArcGIS Online
 - ArcGIS Pro
 - Collector for ArcGIS

- **Hardware**
 - Notebook
 - Smartphone

- **Herramientas y utensilios**
 - Barrenadora Manual
 - Guantes de jardinería
 - Palas de jardinería

- Fundas con cierre hermético
- Etiquetas

3.2. Preparación de la Muestra

Las muestras de suelos obtenidas fueron sometidas a dos procesos: secado y tamizado.

Se ingresó la mitad de la muestra a la estufa con una temperatura de 105° C por 24 horas hasta que la masa de la muestra sea constante. Se entiende por masa constante cuando la diferencia entre dos pesadas sucesivas de la muestra fría, con un intervalo de 4 horas entre ellas, no excede del 0,1% de la última masa determinada. Posteriormente se enfrió las muestras en un desecador. Las muestras secas pasaron por los tamices de 2 mm y de 0,5 mm respectivamente.

Materiales y Equipos

- Martillo de madera o de otra superficie suave
- Bandejas
- Fundas con cierre hermético
- Tamiz de acero inoxidable o de otro material inerte, con orificios de 2 mm
- Tamiz de acero inoxidable o de otro material inerte, de orificios de 0,5 mm

Equipos

- Estufa con circulación de aire capaz de mantener una temperatura de 40°C ± 2°C

3.3. Digestión Ácida

El proceso de digestión ácida se realizó en la Universidad de Santiago de Compostela, en el Laboratorio de Edafología del Instituto de Investigaciones Tecnológicas del Campus Universitario

Sur, el método de digestión empleado fue Soil Digestion EPA 3050B¹, el cual es una adaptación que consiste en el siguiente flujo de trabajo debido a las concentraciones que se esperaban:

- a) Pesar 0,5 g de muestra en un tubo falcon
- b) Añadir 2,5 ml de H₂O tipo 1 y 2,5 ml de HNO₃ (proporción 1:1)
- c) Dejar 15 minutos en el digestor automático a 95°C
- d) Añadir 2,5 ml de HNO₃ (concentrado)
- e) Reflujo de 45 minutos a 95°C
- f) Añadir 2,5 ml de HNO₃ (concentrado)
- g) Reflujo de 45 minutos a 95°C
- h) Añadir 1 ml de H₂O + 1,5 ml de H₂O₂
- i) Reflujo de 60 minutos a 95°C (hasta desaparecer vapores marrones)
- j) Evaporar hasta 2,5 ml (≈ 60 minutos)
- k) Añadir 5ml de HCl concentrado
- l) Reflujo de 20 min a 95°C
- m) Dejar enfriar
- n) Aforar a 25 ml con H₂O tipo 1.

Materiales y Equipos

- **Equipos**
 - Balanza analítica
 - Digestor automático
 - Sorbona

- **Reactivos**

- HNO₃
- HCl
- H₂O₂

- **Materiales**

- Tubos falcon
- Piseta
- Pipeta volumétrica 1, 2, 3, 4, 5, 10 y 20 ml
- Gradilla
- Vasos de precipitación
- Tapa de tubos falcon para digestión
- Espátula
- Pinzas

3.4. Determinación de la concentración de metales pesados

Procedimiento

Se emplearon dos equipos pertenecientes al Laboratorio de Edafología de la Universidad de Santiago de Compostela, el equipo de espectrometría de absorción atómica modelo AMA254 *Advanced Mercury Analyzer* y el equipo de ICP-OES modelo PerkinElmer Optima 8300.

El equipo AMA 254 no requiere que la muestra haya sido sometida a digestión ácida, por el contrario, el método es directo, se pesó en promedio 50 microgramos de muestra en una celda y se la insertó en el equipo, proceso controlado por el computador que posee el software ALTEC v.5.0.2.4.7 para su uso. El tiempo estimado de lectura de Hg por muestra fue de 5 minutos.

La concentración de As, Cd, Pb, Tl y Cu fueron determinadas mediante el equipo de ICP-OES.

Adicionalmente se obtuvieron las concentraciones de Co, Cr, Ni y Zn con el mismo equipo.

Materiales y Equipos

- **Equipos**

- AMA 254 *Advanced Mercury Analyzer*
- Computador con Software de AMA 254
- PerkinElmer Optima 8300
- Sorbona
- Balanza analítica

- **Materiales**

- Tubos falcon
- Espátula
- Navecilla de muestra (Sample Boat)

CAPÍTULO IV

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Muestreo

La Tabla 6 indica las coordenadas UTM de los puntos muestreados, las Figuras 7, 8 y 9 muestran su distribución espacial.

La codificación de cada muestra fue asignada de acuerdo con la profundidad del suelo (SS: suelo superficial, SM: suelo medio y SP: suelo profundo), así mismo se codificó la hacienda donde fue tomada la muestra (HA: Altamira, HR: San Ramón o HL: La Laguna), el número de punto (1, 2 o 3) y el mes en que se realizó el muestreo (A: abril, M: mayo o J: junio).

Tabla 6.

Coordenadas de los puntos muestreados y codificación de las muestras.

Referencia		Coordenadas WGS84 UTM 17 Sur		Muestras de Suelo:		
Hacienda	Punto	Este	Norte	Superficial	Medio	Profundo
Altamira	1A	766937,85	9939916,21	SSHA1A	SMHA1A	SPHA1A
	2A	766984,53	9939991,13	SSHA2A	SMHA2A	SPHA2A
	3A	767018,33	9940064,18	SSHA3A	SMHA3A	SPHA3A
	1M	766930,04	9939912,42	SSHA1M	SMHA1M	SPHA1M
	2M	766956,04	9939989,15	SSHA2M	SMHA2M	SPHA2M
	3M	766986,10	9940049,65	SSHA3M	SMHA3M	SPHA3M
	1J	766922,03	9939904,34	SSHA1J	SMHA1J	SPHA1J
	2J	766930,73	9939989,13	SSHA2J	SMHA2J	SPHA2J
	3J	766957,70	9940048,01	SSHA3J	SMHA3J	SPHA3J
San Ramón	1A	764997,13	9934683,17	SSHR1A	SMHR1A	SPHR1A
	2A	765082,60	9934690,88	SSHR2A	SMHR2A	SPHR2A
	3A	764929,28	9934681,62	SSHR3A	SMHR3A	SPHR3A
	1M	765080,29	9934715,41	SSHR1M	SMHR1M	SPHR1M
	2M	765020,49	9934743,70	SSHR2M	SMHR2M	SPHR2M
	3M	764919,78	9934747,08	SSHR3M	SMHR3M	SPHR3M
	1J	765079,26	9934673,35	SSHR1J	SMHR1J	SPHR1J
	2J	765017,16	9934774,51	SSHR2J	SMHR2J	SPHR2J
	3J	764944,31	9934792,00	SSHR3J	SMHR3J	SPHR3J

Continúa =>

La Laguna	1A	770137,21	9933501,47	SSHL1A	SMHL1A	SPHL1A
	2A	769960,72	9933900,38	SSHL2A	SMHL2A	SPHL2A
	3A	769921,31	9934123,32	SSHL3A	SMHL3A	SPHL3A
	1M	770150,49	9933644,80	SSHL1M	SMHL1M	SPHL1M
	2M	769978,36	9933940,74	SSHL2M	SMHL2M	SPHL2M
	3M	769924,23	9934157,78	SSHL3M	SMHL3M	SPHL3M
	1J	770103,21	9933651,53	SSHL1J	SMHL1J	SPHL1J
	2J	769934,07	9933945,63	SSHL2J	SMHL2J	SPHL2J
	3J	769876,88	9934175,43	SSHL3J	SMHL3J	SPHL3J

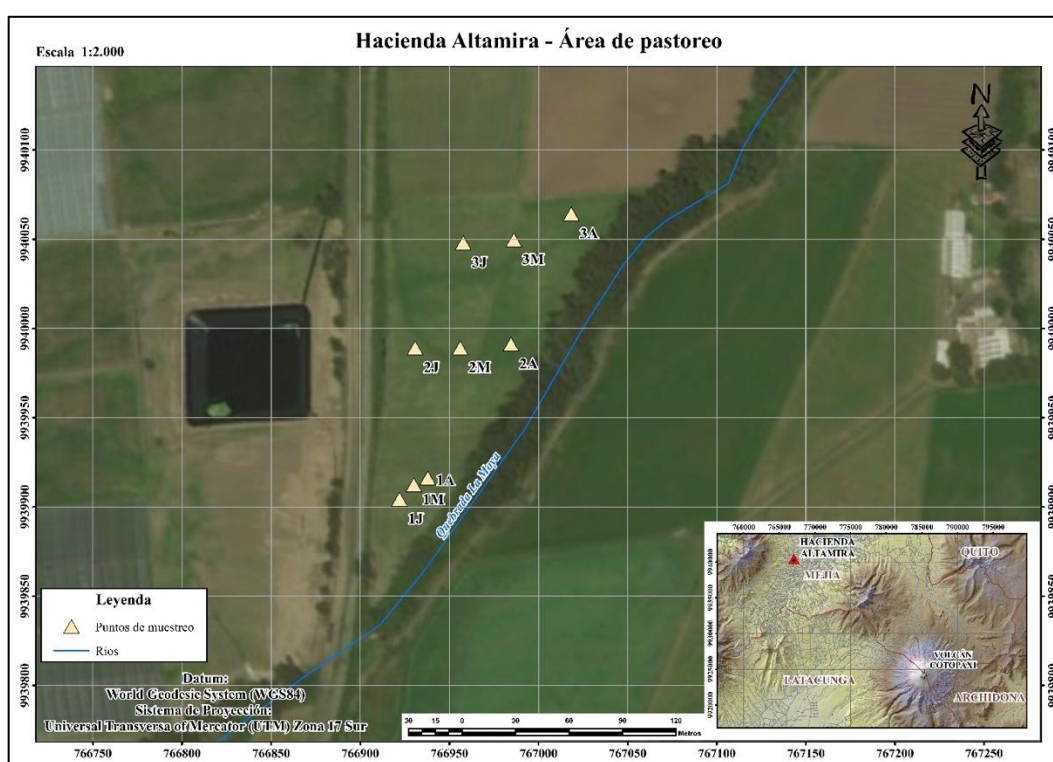


Figura 7. Distribución espacial de los puntos de muestreo de la H. Altamira.

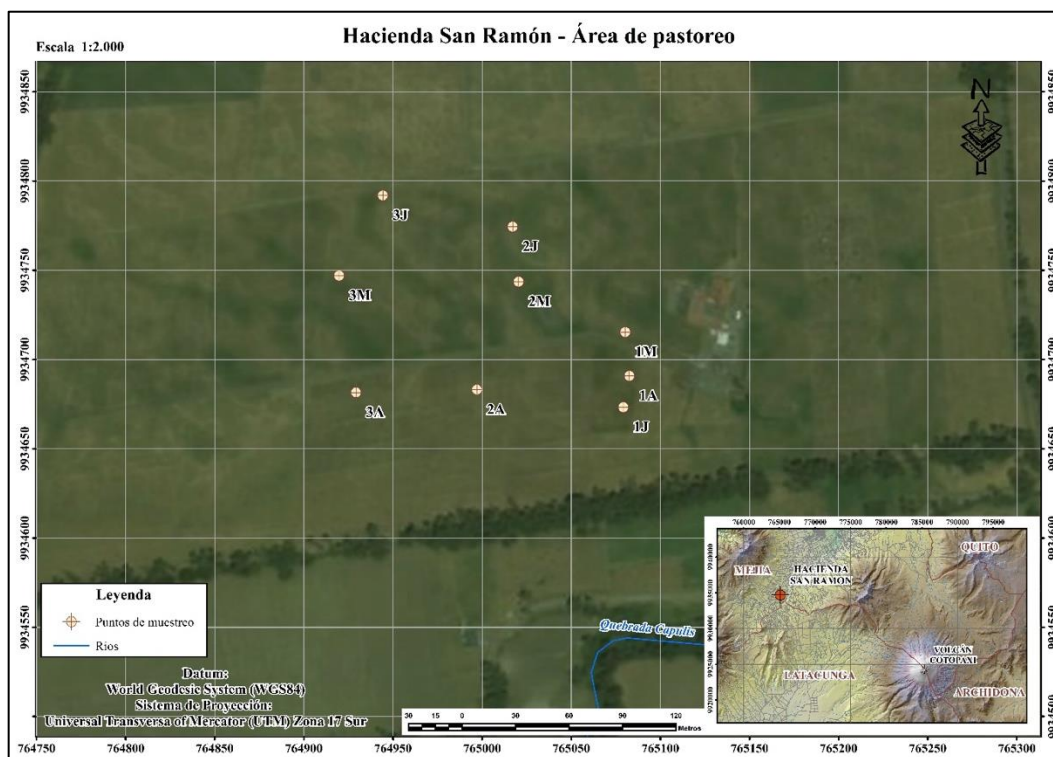


Figura 8. Distribución espacial de los puntos de muestreo de la H. San Ramón.



Figura 9. Distribución espacial de los puntos de muestreo de la H. La Laguna.

4.2. Humedad, pH y conductividad eléctrica

Los resultados de pH y conductividad de las muestras se reportan en la Tabla 7.

Tabla 7.

Contenido de humedad y valor de pH-H₂O (relación 1:2,5) de los suelos analizados.

Sesión	Hacienda San Ramón			Hacienda Altamira			Hacienda La Laguna			
	Muestreo	Muestra	% Humedad	pH	Muestra	% Humedad	pH	Muestra	% Humedad	pH
1ra Sesión: Abril		SSHR1A	36,75%	5,06	SSHA1A	2,26%	5,76	SSHL1A	14,4%	5,11
		SMHR1A	17,07%	6,39	SMHA1A	3,14%	5,72	SMHL1A	11,78%	5,49
		SPHR1A	7,99%	6,52	SPHA1A	5,11%	6,69	SPHL1A	18,96%	5,92
		SSHR2A	26,74%	5,24	SSHA2A	7,59%	4,36	SSHL2A	45,10%	5,05
		SMHR2A	15,52%	5,85	SMHA2A	3,54%	5,66	SMHL2A	18,12%	6,00
		SPHR2A	10,72%	6,36	SPHA2A	5,57%	6,51	SPHL2A	0,72%	6,43
		SSHR3A	43,97%	7,48	SSHA3A	2,22%	5,69	SSHL3A	32,94%	5,82
		SMHR3A	15,05%	7,49	SMHA3A	4,88%	5,77	SMHL3A	16,10%	5,52
		SPHR3A	15,04%	7,45	SPHA3A	9,85%	6,22	SPHL3A	9,13%	5,75
2da Sesión: Mayo		SSHR1M	16,62%	5,46	SSHA1M	4,62%	5,56	SSHL1M	2,17%	5,05
		SMHR1M	9,70%	6,45	SMHA1M	1,30%	6,32	SMHL1M	4,17%	5,75
		SPHR1M	16,53%	6,65	SPHA1M	6,52%	6,65	SPHL1M	3,50%	5,72
		SSHR2M	22,91%	4,88	SSHA2M	5,54%	5,46	SSHL2M	1,77%	4,94
		SMHR2M	1,63%	5,87	SMHA2M	3,08%	6,33	SMHL2M	0,92%	5,74
		SPHR2M	14,82%	5,90	SPHA2M	1,73%	6,72	SPHL2M	0,73%	5,54
		SSHR3M	28,24%	5,19	SSHA3M	7,18%	6,04	SSHL3M	2,30%	5,21
		SMHR3M	19,76%	6,23	SMHA3M	14,49%	5,63	SMHL3M	8,62%	5,54
		SPHR3M	27,62%	6,40	SPHA3M	7,47%	6,21	SPHL3M	14,81%	5,73
3ra Sesión: Junio		SSHR1J	3,07%	5,19	SSHA1J	0,74%	5,65	SSHL1J	2,26%	4,97
		SMHR1J	1,13%	5,96	SMHA1J	1,05%	5,95	SMHL1J	5,34%	5,70
		SPHR1J	1,61%	6,50	SPHA1J	1,14%	6,63	SPHL1J	1,45%	5,83
		SSHR2J	3,14%	5,07	SSHA2J	1,63%	5,62	SSHL2J	3,81%	5,18
		SMHR2J	2,36%	5,43	SMHA2J	1,54%	6,16	SMHL2J	2,82%	5,51
		SPHR2J	1,54%	6,00	SPHA2J	0,86%	6,66	SPHL2J	12,61%	5,79
		SSHR3J	1,97%	4,85	SSHA3J	0,63%	5,89	SSHL3J	2,67%	4,44
		SMHR3J	1,26%	5,74	SMHA3J	0,62%	6,26	SMHL3J	8,13%	5,78
		SPHR3J	1,01%	6,12	SPHA3J	0,82%	6,78	SPHL3J	6,18%	6,01

El pH medio de los suelos superficiales fue: 5,38 en San Ramón, 5,56 en Altamira y 5,09 en La Laguna, por lo cual se clasifican como suelos de fuertemente ácidos a moderadamente ácidos. En las muestras tomadas a 30 cm de profundidad el pH medio fue: 6,16 en San Ramón, 5,98 en Altamira y 5,69 en La Laguna, por lo cual los suelos se consideran moderadamente ácidos a ligeramente ácidos. La clase de reacción de los suelos obtenidos a 70 cm de profundidad de acuerdo

con su pH fueron: moderadamente ácido en La Laguna con pH medio de 5,86 y ligeramente ácido en Altamira y San Ramón con pH medio de 6,43 y 6,56 respectivamente.

El pH presentó un patrón decreciente de acuerdo con la profundidad del suelo, es decir su valor es inversamente proporcional a la profundidad del suelo, esto puede deberse a que las muestras del suelo superficial contienen materia orgánica y por tal razón el pH es mayor. De igual manera el contenido de humedad muestra mayoritariamente un comportamiento parecido al pH (decreciente con la profundidad de la muestra), esto se puede explicar gracias a que el suelo no sufre procesos de infiltración severos.

En la primera sesión de muestreo realizada en el mes de abril del 2018, la totalidad de las muestras presentan un contenido de humedad superior a las muestras de la segunda y tercera sesión de muestreo, coincidiendo con la temporada húmeda y seca. Se destaca que la media del contenido de humedad de las muestras de la Hacienda San Ramón fue superior al promedio de Altamira y La Laguna. El contenido de humedad medio de cada hacienda es el siguiente:

- San Ramón: suelo superficial 20,4%, suelo medio 9,3%, suelo profundo 10,8%.
- Altamira: suelo superficial 3,6%, suelo medio 3,7%, suelo profundo 4,3%.
- La Laguna: suelo superficial 11,9%, suelo medio 8,4%, suelo profundo 7,6%.

El pH y contenido de humedad permitió establecer que era más probable un proceso de lixiviación de los metales en la Hacienda San Ramón, y de acuerdo con la Tabla 3 (movilidad de los metales de acuerdo a su pH), esto puede deberse a que el Cd, Cu y Hg pasarían de ser fácilmente móviles a moderadamente móviles cuando el suelo fuese más profundo debido a que el pH tiende

a ser neutro con la profundidad. En cambio, el Pb pasaría de ser moderadamente móvil a prácticamente inmóvil, por lo contrario, el As pasaría de ser moderadamente móvil en el suelo superficial a fácilmente móvil en el suelo profundo (70 cm).

La conductividad eléctrica se reporta en la Tabla 8 en mmhos.cm^{-1} para comparar con la normativa vigente en el Ecuador (TULSMA) en la cual el límite máximo permisible para suelos agrícolas es de 2 mmhos.cm^{-1} .

Tabla 8.

Reporte de la conductividad eléctrica en mmhos.cm^{-1} .

Sesión Muestreo	H. San Ramón		H. Altamira		H. La Laguna	
	Muestra	mmhos.cm^{-1}	Muestra	mmhos.cm^{-1}	Muestra	mmhos.cm^{-1}
1ra Sesión: Abril	SSHR1A	1,062	SSHA1A	0,073	SSHL1A	0,133
	SMHR1A	0,081	SMHA1A	0,081	SMHL1A	0,060
	SPHR1A	0,101	SPHA1A	0,041	SPHL1A	0,045
	SSHR2A	0,712	SSHA2A	0,561	SSHL2A	0,601
	SMHR2A	0,105	SMHA2A	0,100	SMHL2A	0,139
	SPHR2A	0,163	SPHA2A	0,060	SPHL2A	0,054
	SSHR3A	1,178	SSHA3A	0,239	SSHL3A	0,830
	SMHR3A	0,122	SMHA3A	0,107	SMHL3A	0,064
	SPHR3A	0,082	SPHA3A	0,059	SPHL3A	0,047
2da Sesión: Mayo	SSHR1M	0,584	SSHA1M	0,186	SSHL1M	0,148
	SMHR1M	0,170	SMHA1M	0,057	SMHL1M	0,046
	SPHR1M	0,070	SPHA1M	0,047	SPHL1M	0,046
	SSHR2M	0,482	SSHA2M	0,268	SSHL2M	0,181
	SMHR2M	0,083	SMHA2M	0,050	SMHL2M	0,076
	SPHR2M	0,067	SPHA2M	0,047	SPHL2M	0,153
	SSHR3M	0,551	SSHA3M	0,107	SSHL3M	0,174
	SMHR3M	0,060	SMHA3M	0,273	SMHL3M	0,044
	SPHR3M	0,041	SPHA3M	0,179	SPHL3M	0,035
3ra Sesión: Junio	SSHR1J	0,872	SSHA1J	0,076	SSHL1J	0,117
	SMHR1J	0,115	SMHA1J	0,065	SMHL1J	0,046
	SPHR1J	0,065	SPHA1J	0,037	SPHL1J	0,047
	SSHR2J	0,346	SSHA2J	0,243	SSHL2J	0,219
	SMHR2J	0,045	SMHA2J	0,060	SMHL2J	0,056
	SPHR2J	0,032	SPHA2J	0,041	SPHL2J	0,046
	SSHR3J	0,360	SSHA3J	0,109	SSHL3J	0,157
	SMHR3J	0,083	SMHA3J	0,059	SMHL3J	0,032
	SPHR3J	0,076	SPHA3J	0,054	SPHL3J	0,027

El comportamiento de la CE es similar al pH y contenido de humedad, es decir, su valor máximo se reportó en las muestras de suelo superficial y los valores más bajos los presentaron las muestras de suelo profundo. Los valores de todas las muestras están bajo los límites permisibles de la normativa ecuatoriana.

También se clasificaron los suelos como no salinos, es decir son suelos que no tienen problemas de drenaje debido a que no existe acumulación de sales solubles. Los suelos fértiles presentan al menos pequeñas cantidades de sales solubles, este es el caso de los suelos de las haciendas estudiadas.

4.3. Concentraciones de Cobre (Cu) y Mercurio (Hg)

4.3.1. Hacienda Altamira

Las concentraciones de Cu y Hg en la Hacienda Altamira se presentan en la Tabla 9.

Tabla 9.

Concentraciones de Cu y Hg en mg.kg⁻¹ del suelo de la Hacienda Altamira.

Suelo Superficial			Suelo Medio (30 cm profundidad)			Suelo Profundo (70 cm profundidad)		
Muestra	Cu mg.kg ⁻¹	Hg	Muestra	Cu mg.kg ⁻¹	Hg	Muestra	Cu mg.kg ⁻¹	Hg
SSHA1A	25,388	0,016	SMHA1A	25,890	0,015	SPHA1A	16,703	0,011
SSHA2A	20,900	0,013	SMHA2A	22,328	0,019	SPHA2A	20,792	0,016
SSHA3A	18,489	0,016	SMHA3A	20,076	0,015	SPHA3A	32,350	0,014
SSHA1M	29,635	0,019	SMHA1M	37,163	0,021	SPHA1M	21,087	0,014
SSHA2M	24,890	0,019	SMHA2M	35,329	0,026	SPHA2M	24,235	0,037
SSHA3M	23,191	0,019	SMHA3M	23,665	0,024	SPHA3M	25,085	0,015
SSHA1J	26,389	0,014	SMHA1J	32,118	0,017	SPHA1J	21,406	0,014
SSHA2J	25,487	0,016	SMHA2J	27,345	0,011	SPHA2J	28,982	0,016
SSHA3J	22,222	0,019	SMHA3J	22,201	0,020	SPHA3J	33,090	0,012
Promedio	24,066	0,017	Promedio	27,346	0,019	Promedio	24,859	0,017

La concentración de Cu en las muestras de suelo de la Hacienda Altamira no supera el valor natural de concentración presente en la corteza terrestre. Por su parte, las concentraciones de Hg de los suelos de Altamira superan la concentración natural promedio de 0,01 mg.kg⁻¹ presente en la corteza terrestre.

4.3.2. Hacienda San Ramón

Las concentraciones de Cu y Hg en la Hacienda San Ramón se presentan en la Tabla 10. Se identificó concentraciones anómalas de Cobre mediante el estadístico diagrama de caja y el promedio presentado se calculó omitiendo estos valores.

Tabla 10.

Concentraciones de Cu y Hg en mg.kg⁻¹ del suelo de la Hacienda San Ramón.

Suelo Superficial			Suelo Medio (30 cm profundidad)			Suelo Profundo (70 cm profundidad)		
Muestra	Cu mg.kg ⁻¹	Hg	Muestra	Cu mg.kg ⁻¹	Hg	Muestra	Cu mg.kg ⁻¹	Hg
SSHR1A	158,053	0,013	SMHR1A	242,403	0,015	SPHR1A	27,270	0,021
SSHR2A	888,479	0,015	SMHR2A	1321,731	0,014	SPHR2A	160,432	0,011
SSHR3A	337,954	0,015	SMHR3A	1206,522	0,016	SPHR3A	204,147	0,013
SSHR1M	28,757	0,019	SMHR1M	34,660	0,030	SPHR1M	16,950	0,013
SSHR2M	27,981	0,017	SMHR2M	16,291	0,015	SPHR2M	31,481	0,023
SSHR3M	24,132	0,020	SMHR3M	28,479	0,022	SPHR3M	45,647	0,029
SSHR1J	20,701	0,015	SMHR1J	22,872	0,018	SPHR1J	37,139	0,030
SSHR2J	30,167	0,020	SMHR2J	24,407	0,018	SPHR2J	35,472	0,027
SSHR3J	17,240	0,019	SMHR3J	22,469	0,021	SPHR3J	19,721	0,017
Promedio	24,830	0,017	Promedio	24,863	0,019	Promedio	30,526	0,021

La concentración de Cu en las muestras de suelo de la Hacienda San Ramón a excepción de los valores anómalos, no supera la concentración natural promedio de 50 mg.kg⁻¹ presente en la corteza terrestre. Por el contrario, las concentraciones de Hg de todas las muestras de suelo de San Ramón superan la concentración natural de la corteza terrestre (0,01 mg.kg⁻¹).

Los valores anómalos de concentración de Cu coinciden con el muestreo del mes de abril, en el cual el contenido de humedad y pH del suelo son óptimos para que el metal puede trasladarse con facilidad, por lo que probablemente el metal se pudo trasladar y acumular en los puntos de muestreo 1A, 2A y 3A.

4.3.3. Hacienda La Laguna

Las concentraciones de Cu y Hg en la Hacienda La Laguna se presentan en la Tabla 11. Se identificó concentraciones anómalas de Cobre mediante el estadístico diagrama de caja y el promedio presentado se calculó omitiendo estos valores.

Tabla 11.

Concentraciones de Cu y Hg en mg.kg⁻¹ del suelo de la Hacienda La Laguna.

Suelo Superficial			Suelo Medio (30 cm profundidad)			Suelo Profundo (70 cm profundidad)		
Muestra	Cu mg.kg ⁻¹	Hg	Muestra	Cu mg.kg ⁻¹	Hg	Muestra	Cu mg.kg ⁻¹	Hg
SSHL1A	422,383	0,015	SMHL1A	331,502	0,014	SPHL1A	146,399	0,019
SSHL2A	81,524	0,019	SMHL2A	197,156	0,019	SPHL2A	595,262	0,015
SSHL3A	119,202	0,017	SMHL3A	11,993	0,017	SPHL3A	916,983	0,007
SSHL1M	19,775	0,016	SMHL1M	29,593	0,019	SPHL1M	51,135	0,023
SSHL2M	29,065	0,019	SMHL2M	21,333	0,015	SPHL2M	24,192	0,009
SSHL3M	23,919	0,020	SMHL3M	31,387	0,020	SPHL3M	31,587	0,018
SSHL1J	16,124	0,014	SMHL1J	25,593	0,019	SPHL1J	32,537	0,021
SSHL2J	12,819	0,018	SMHL2J	19,173	0,017	SPHL2J	43,322	0,017
SSHL3J	19,863	0,019	SMHL3J	37,552	0,021	SPHL3J	48,403	0,023
Promedio	20,261	0,017	Promedio	25,232	0,018	Promedio	38,529	0,017

La concentración de Cu en las muestras de los puntos 1A, 2A y 3A fueron identificados como valores anómalos, esto probablemente se debe a la acumulación del Cu en estos puntos de muestreo puesto que la facilidad de este para moverse es muy alta, pH entre 5,09 - 5,86 y contenido de humedad del 20%.

La concentración de Cu a excepción de los puntos identificados como anómalos, no supera la concentración natural promedio de 50 mg.kg^{-1} presente en la corteza terrestre. Por el contrario, las concentraciones de Hg de todas las muestras de suelo de La Laguna superan la concentración natural de la corteza terrestre de $0,01 \text{ mg.kg}^{-1}$.

4.3.4. Comparativa de concentración en suelo, ceniza y norma

Los valores máximos permitidos para suelo agrícola establecidos por el TULSMA Libro VI: Anexo 2 y los valores de concentración de Cobre y Mercurio obtenidos en ceniza por Sánchez (2017) se presentan en la Tabla 12.

Tabla 12.

Concentraciones Cu y Hg en suelo, ceniza y valores máximos permitidos en norma.

Hacienda	Metal	Unidades	Suelo Superficial	Suelo Medio	Suelo Profundo	Ceniza	TULSMA Suelo Agrícola
Altamira			24,066	27,346	24,859		
San Ramón	Cu	mg.kg^{-1}	24,830	24,863	30,526	14,43	63,00
La Laguna			20,261	25,232	38,529		
Altamira			0,017	0,019	0,017		
San Ramón	Hg	mg.kg^{-1}	0,017	0,019	0,017	N/D	0,80
La Laguna			0,017	0,018	0,017		

Fuente: (TULSMA Libro VI Anexo 2, 2015) y (Sánchez E. , 2017).

Las concentraciones de Cu y Hg en los suelos de las haciendas analizadas no exceden los límites máximos permisibles por la normativa ambiental vigente aplicable del Ecuador, por lo que los suelos de las tres haciendas son aptos para actividades agrícolas.

El aporte de ceniza hacia el suelo en concentración de Cu está entre un rango del 37% al 71%, a pesar de que porcentualmente la ceniza aporta Cu hacia el suelo, este mismo se mantiene entre

las concentraciones naturales de la corteza terrestre y debajo de los límites máximos permisibles para suelos agrícolas de la normativa ecuatoriana.

4.4. Concentraciones de Cadmio (Cd), Plomo (Pb), Arsénico (As) y Talio (Tl)

Los resultados de Cd, Pb y As se encuentran bajo los límites de detección del equipo PerkinElmer Optima 8300 mediante el método de ICP-OES. En la Tabla 13 se detallan los límites de detección en ICP-OES para estos elementos.

Tabla 13.

Límites de detección mediante ICP-OES con el equipo PerkinElmer Optima 8300.

Elemento	Límite de detección	Unidades
Cadmio (Cd)	0,10	$\mu\text{g.L}^{-1}$
Plomo (Pb)	0,05	$\mu\text{g.L}^{-1}$
Arsénico (As)	1,00	$\mu\text{g.L}^{-1}$
Talio (Tl)	0,10	$\mu\text{g.L}^{-1}$

Fuente: (PerkinElmer, 2012).

Las muestras de suelo fueron sometidas a un proceso de digestión ácida, como se detalló en la metodología, los límites de detección dados por el equipo de ICP-OES están reportados en $\mu\text{g.L}^{-1}$ (ppb en solución acuosa), por lo que el límite de detección del equipo difiere con los límites que se pueden presentar en el suelo. El equivalente en mg.kg^{-1} se detalla en la Tabla 14:

Tabla 14.

Límites de detección mediante ICP-OES expresado en mg.kg^{-1} .

Elemento	Límite de detección	Unidades
Cadmio (Cd)	0,0050	mg.kg^{-1}
Plomo (Pb)	0,0025	mg.kg^{-1}
Arsénico (As)	0,0500	mg.kg^{-1}
Talio (Tl)	0,0050	mg.kg^{-1}

4.4.1. Comparativa de concentración en suelo, ceniza y norma

Los valores máximos permitidos para suelo agrícola establecidos por el TULSMA Libro VI: Anexo 2 y los valores de concentración de Pb, As, Cd y Tl obtenidos en ceniza por Sánchez (2017) se presentan en la Tabla 15.

Tabla 15.

Concentraciones Pb, As, Cd y Tl en suelo, ceniza y límites permitidos en norma.

Hacienda	Metal	Unidades	Suelo Superficial	Suelo Medio	Suelo Profundo	Ceniza	TULSMA Suelo Agrícola
Altamira			< 0,0025	< 0,0025	< 0,0025		
San Ramón	Pb	mg.kg ⁻¹	< 0,0025	< 0,0025	< 0,0025	1,09	16,00
La Laguna			< 0,0025	< 0,0025	< 0,0025		
Altamira			< 0,05	< 0,05	< 0,05		
San Ramón	As	mg.kg ⁻¹	< 0,05	< 0,05	< 0,05	1,04	12,00
La Laguna			< 0,05	< 0,05	< 0,05		
Altamira			< 0,005	< 0,005	< 0,005		
San Ramón	Cd	mg.kg ⁻¹	< 0,005	< 0,005	< 0,005	N/D	2,00
La Laguna			< 0,005	< 0,005	< 0,005		
Altamira			< 0,005	< 0,005	< 0,005		
San Ramón	Tl	mg.kg ⁻¹	< 0,005	< 0,005	< 0,005	N/D	1,00
La Laguna			< 0,005	< 0,005	< 0,005		

Fuente: (TULSMA Libro VI Anexo 2, 2015) y (Sánchez E. , 2017).

La concentración de Pb, As, Cd y Tl se ubican bajo los límites de detección del equipo PerkinElmer Optima 8300, por ende, no superan los límites máximos permisibles establecidos en norma para suelos destinados para actividades agrícolas. Al ser todos estos elementos móviles de acuerdo con las condiciones de pH presente en el suelo de las 3 haciendas, se presume que dichos metales sufrieron un proceso de lixiviación o se unieron a la cadena trófica, es decir, probablemente se hayan precipitado hacia recursos hídricos o hayan sido adsorbidos por el pasto.

Aunque la ceniza volcánica pueda aportar con Pb y As al suelo, estos elementos probablemente disminuyen su concentración con el transcurso del tiempo, es decir, no existe un proceso de acumulación en el suelo.

4.5. Concentraciones de otros metales pesados

A partir de las muestras sometidas a digestión ácida, se pudo determinar en el equipo PerkinElmer Optima 8300 mediante ICP-OES las concentraciones de diversos elementos entre ellos se obtuvo la concentración de metales pesados como: Cobalto (Co), Cromo (Cr), Níquel (Ni) y Zinc (Zn). Ver Tabla 16.

Tabla 16.

Concentraciones Co, Cr, Ni y Zn en suelo, ceniza y límites permitidos en norma.

Hacienda	Metal	Unidades	Suelo Superficial	Suelo Medio	Suelo Profundo	Ceniza	TULSMA Suelo Agrícola
Altamira	Co	mg.kg ⁻¹	7,25	7,50	7,58	5,33	40,00
San Ramón			6,33	7,58	7,14		
La Laguna			7,56	7,32	7,66		
Altamira	Cr	mg.kg ⁻¹	9,85	9,55	10,07	5,99	65,00
San Ramón			9,32	9,52	8,27		
La Laguna			12,24	10,35	9,48		
Altamira	Ni	mg.kg ⁻¹	6,83	6,93	7,16	3,28	50,00
San Ramón			6,53	7,06	6,03		
La Laguna			7,33	7,22	7,98		
Altamira	Zn	mg.kg ⁻¹	33,41	31,23	26,75	15,59	200,00
San Ramón			37,58	31,40	30,43		
La Laguna			33,12	28,84	32,77		

Fuente: (TULSMA Libro VI Anexo 2, 2015) y (Sánchez E. , 2017).

El aporte de Co por parte de la ceniza hacia el suelo está en un rango entre el 69% al 84%. La concentración de Co en la corteza terrestre puede variar entre 1 hasta 40 ppm, suelos donde su concentración es inferior a 3 ppm se los considera deficientes de Cobalto. Los suelos de las

haciendas no se consideran deficientes de Co, por lo tanto, el pasto que crece en este suelo logra satisfacer los requerimientos dietéticos del ganado vacuno (ATSDR, 2004).

En todas las rocas se puede encontrar cromo de forma natural, principalmente en rocas de tipo básicas o ultra básicas. La concentración de cromo en calizas y areniscas puede variar entre 100 y 110 mg.kg⁻¹ (Turekian & Wedepohl, 1961) (Andreu, 1991) (Larios, 2014). La concentración de Cromo en los suelos de las haciendas estudiadas probablemente sea de origen geogénico, es decir, que la ceniza del volcán Cotopaxi contribuyó con Cr al suelo un rango del 48% al 72%.

El Níquel está presente en suelos originados a partir de rocas volcánicas o básicas y que presenten un alto contenido de arcilla y materia orgánica (Larios, 2014). A pesar de que este elemento es necesario para el crecimiento y el metabolismo de las plantas, para los mamíferos no se lo considera como un elemento traza esencial porque no se ha definido con claridad la función bioquímica que desempeña (National Research Council (NRC), 2005) (Larios, 2014). El origen del Ni en los suelos de las haciendas Altamira, San Ramón y La Laguna probablemente podría deberse a los procesos eruptivos del volcán Cotopaxi, en este caso la ceniza volcánica del último periodo eruptivo pudo aportar en un rango del 41 al 54% de la concentración total de Ni.

El Zinc se puede encontrar en las rocas magmáticas, este elemento se encuentra directamente relacionado con la presencia de Cadmio y Plomo, es decir, es posible que los tres metales estén presentes cuando se detectan problemas en el suelo con uno de ellos (Porta, López-Acevedo, & Roquero, 2003). El aporte de Zn desde la ceniza volcánica hacia el suelo está en un rango del 41% al 58%.

Las concentraciones de Co, Cr, Ni y Zn no superan los límites máximos permisibles para suelos agrícolas, es decir, a pesar de la contribución de metales pesados por parte de la ceniza del Cotopaxi hacia el suelo, estos no se clasifican como suelos contaminados, al contrario, se mantienen dentro de los límites naturales y debajo de los límites establecidos en la norma ecuatoriana vigente.

4.6. Mapas Web (Geovisualizador)

Se creó un visualizador geográfico para presentar los resultados de las concentraciones de los metales como As, Cd, Pb, Cu, Hg y Tl, además de la ubicación geográfica de los puntos de toma de muestra. También se puede observar los resultados de todos los metales determinados con el método de ICP-OES en cada muestra, el ambiente de la plataforma de ESRI para el Geovisualizador se muestra en las Figuras 10, 11, 12 y 13.

El link del visualizador geográfico de acceso público es el siguiente: <http://geoint-ec.maps.arcgis.com/apps/webappviewer/index.html?id=b6793a0bcbb64b02ba8311b839991d23>

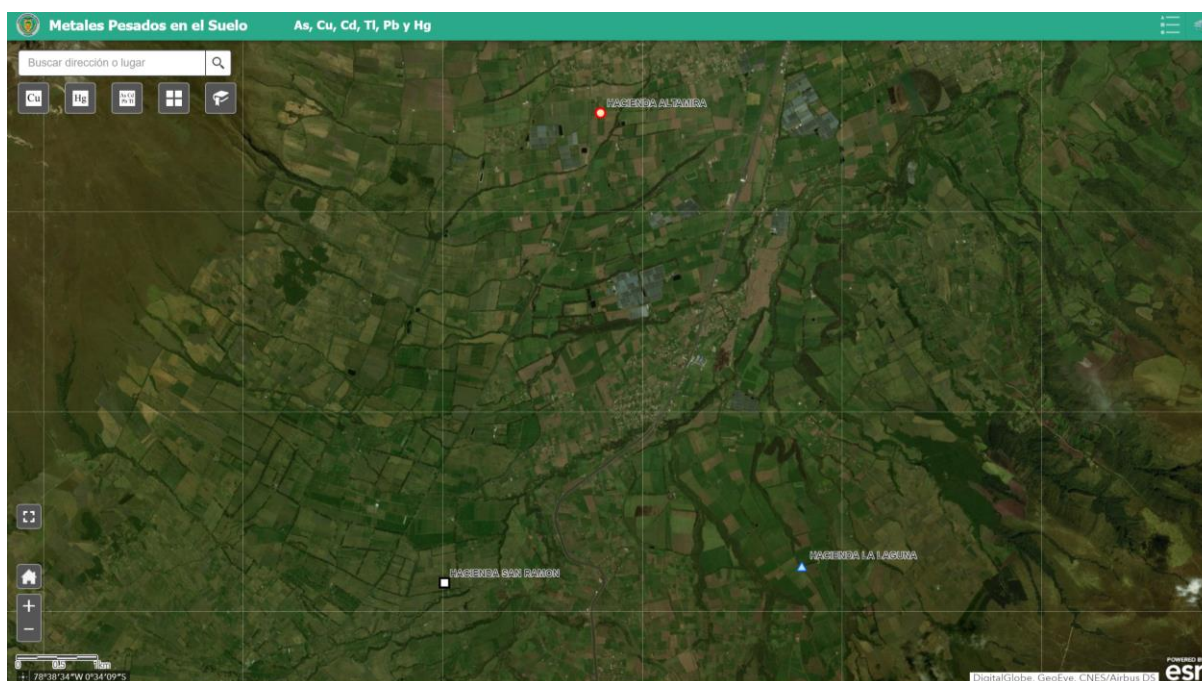


Figura 10. Ubicación general de las haciendas.

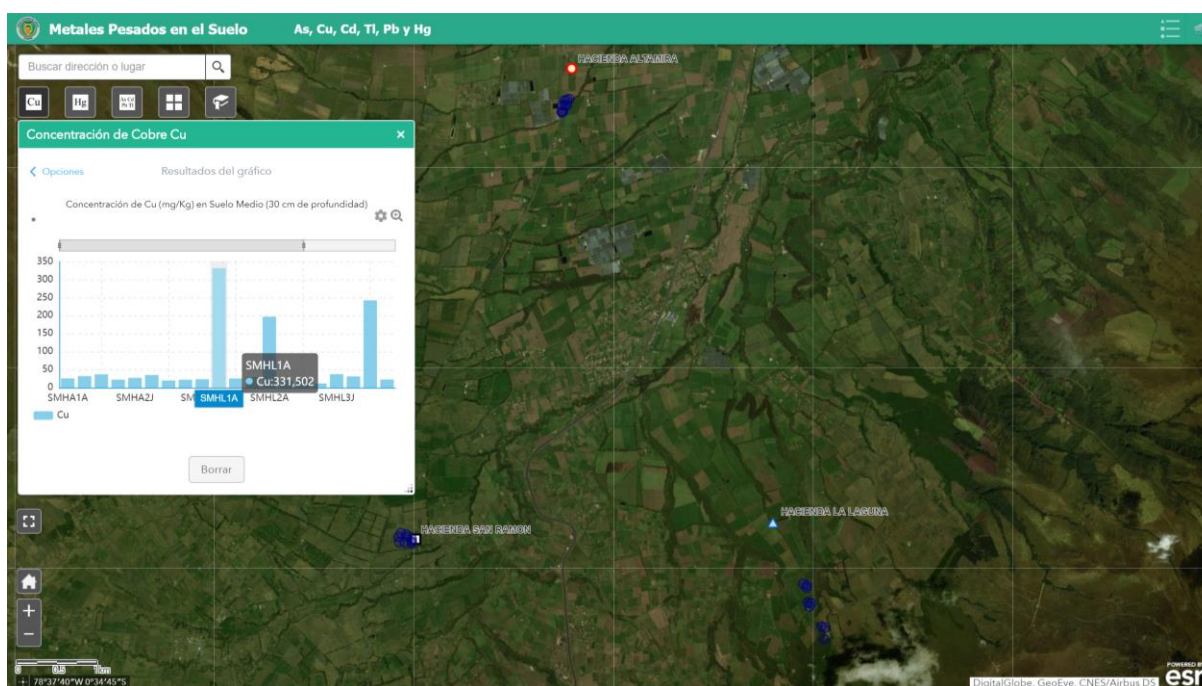


Figura 11. Representación de los puntos de muestreo con su concentración de Cu.

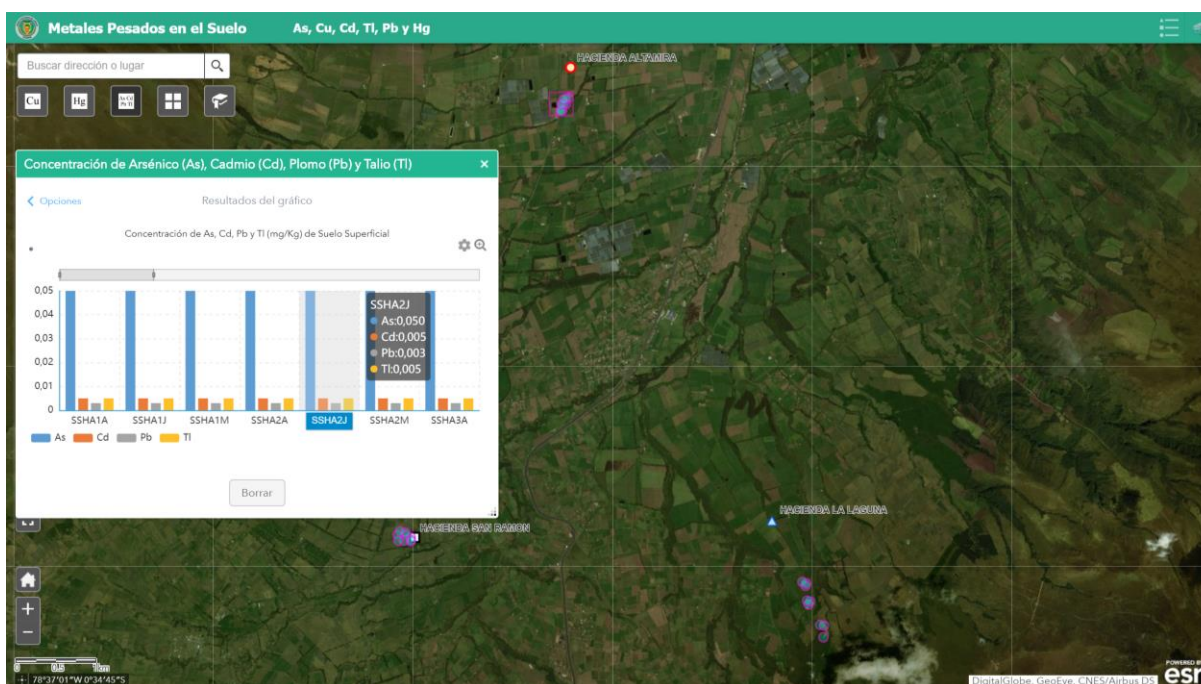


Figura 12. Representación de los puntos de muestreo con su concentración de As, Cd, Pb y Tl.

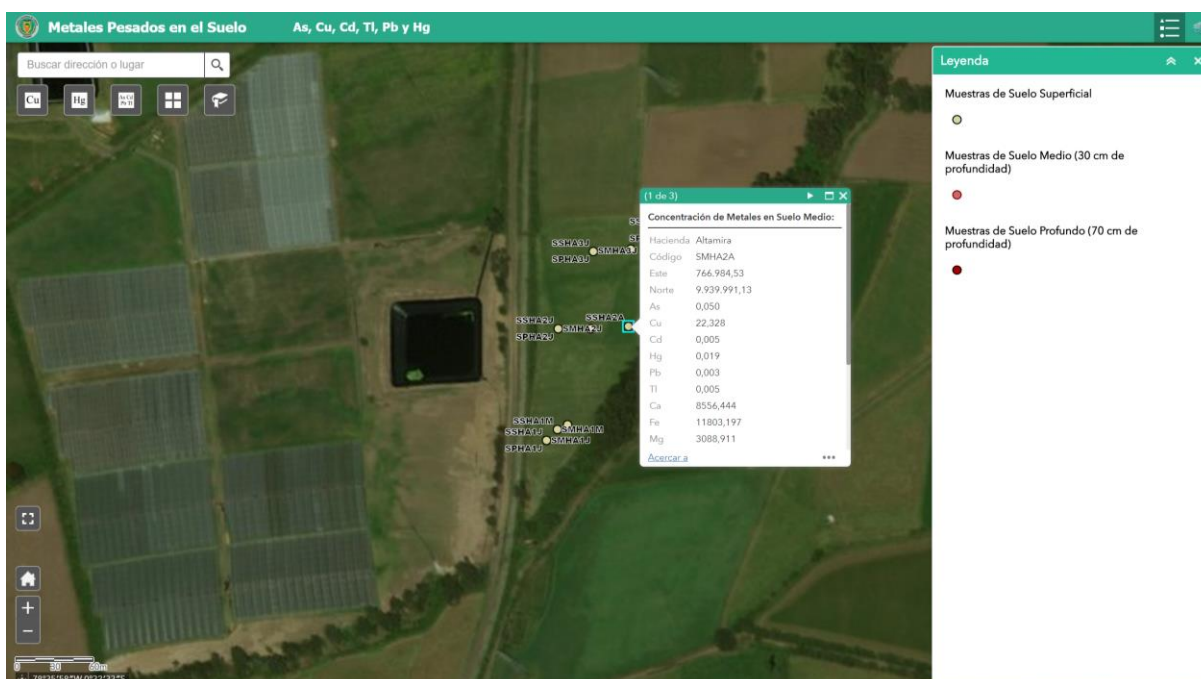


Figura 13. Información de cada punto de muestreo y las concentraciones de los metales determinados mediante ICP-OES.

CAPÍTULO V

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

Las concentraciones fueron: Cd < 0,005 mg.kg⁻¹, Tl < 0,005 mg.kg⁻¹, Pb < 0,0025 mg.kg⁻¹, As < 0,05 mg.kg⁻¹, Hg ≈ 0,018 mg.kg⁻¹ y Cu ≈ 26,58 mg.kg⁻¹, por lo cual no superan los límites máximos permitidos en norma para suelos agrícolas establecidos en el TULSMA Libro VI: Anexo 2, incluso se mantienen por debajo de los límites naturales.

El Cu tiende a ser fácilmente móvil en ceniza, mientras que en el suelo reduce su movilidad debido a que el valor del pH, ceniza < 5,5 y suelo > 5,5, difiere. Por lo que se presume que la ceniza pudo aportar entre el 37 y 71% a la concentración de este metal en el suelo. A pesar de la transferencia de Cu, el suelo no superó el límite máximo de concentración establecido en la normativa vigente del Ecuador.

El As, de acuerdo con el pH, pasó de ser moderadamente móvil en la ceniza a fácilmente móvil en el suelo. Es probable que el As haya sido absorbido por la vegetación presente en el sector y/o se haya lixiviado. La concentración de As en el suelo se mantiene bajo el límite máximo permisible para suelos agrícolas.

El Pb en ceniza fue moderadamente móvil y de acuerdo con el pH el metal fue prácticamente inmóvil en el suelo, por lo cual es muy probable que el pasto haya conseguido absorber este metal, es decir al haberse transferido el Pb de la ceniza al suelo, este se mantendría a niveles superficiales con lo cual sería fácilmente absorbido por la vegetación de raíces pequeñas. De acuerdo con el

límite de detección del estudio la concentración de Pb en el suelo es inferior a $0,0025 \text{ mg.kg}^{-1}$, esto indica que el suelo no supera el límite establecido en norma.

Se obtuvo la concentración de metales como Co y Ni en el suelo, que son moderadamente móviles tanto en suelo como en ceniza, por lo que es probable que la ceniza haya aportado con Co entre el 69 al 84% y con Ni entre el 41 al 54% a la concentración del suelo. Estos metales no se consideran perjudiciales, de hecho, el Co es necesario para los requerimientos dietéticos del ganado. También se obtuvo la concentración de Cr y Zn del suelo, estableciendo el aporte de ceniza hacia el suelo entre los rangos del 48 al 72% y del 41 al 54% respectivamente. Estos elementos no superan los límites establecidos en el TULSMA Libro VI: Anexo 2, por lo que se puede afirmar que los suelos son aptos para realizar actividades agrícolas.

La visualización de los resultados mediante mapas web permite clarificar la distribución espacial del muestreo y a su vez dar acceso a la información de la concentración de los metales pesados en cada punto.

5.2. Recomendaciones

Realizar una evaluación profunda del proceso de movilidad de Plomo y Arsénico, para definir su ubicación y estado actual.

Emplear los resultados de este estudio como línea base para proyectos que busquen establecer si existe un grado significativo de afectación en los suelos debido a procesos eruptivos de los volcanes, específicamente a la emisión de ceniza.

Realizar caracterización de la ceniza, inmediatamente después de las emisiones, para obtener resultados comparables en el transcurso del tiempo. También es conveniente ampliar la zona de estudio y diversificar el tipo de suelos.

BIBLIOGRAFÍA

- Aguilera, E. O., & Toulkeridis, T. (2005). *El volcán Cotopaxi, una amenaza que acecha*. Quito, Ecuador, Pichincha, Ecuador: Sotavento Ed.
- Andreu, A. V. (1991). *Contenido y Evolución de Cd, Co, Cr, Cu, Pb, Ni y Zn en suelos de las Comarca de l'Horta y la Ribera Baixa*. Valencia, España: Universitat de València (Facultat de Farmàcia).
- ATSDR. (1992). *Talio (Tl)*. E.E.U.U: Agency for Toxic Substances and Disease Registry "Division of Toxicology".
- ATSDR. (2004). *Cobalto (Co)*. E.E.U.U.: Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades.
- ATSDR. (2004). *Cobre (Cu)*. E.E.U.U.: Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades "División de Toxicología".
- Boss, C., & Fredeen, K. (2004). *Concepts, Instrumentation and Techniques in Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry*. Shelton, E.E.U.U.: PerkinElmer precisely.
- Caselli, A., Vélez, M., & Agosto, M. (2011). *Manual de Procedimientos ante Caída de Cenizas Volcánicas*. Buenos Aires, Argentina: Facultad de Ciencias Exactas y Naturales.
- Distrito Metropolitano de Quito. (2013). *Norma Técnica de Suelo NT004*. Quito, Ecuador.
- Felipó, M. T. (1992). *Seminario "Contaminación, protección y saneamiento del suelo"*. Valencia, España: Contaminación del suelo e impacto ambiental.
- G.A.D. Municipal del Cantón Mejía. (2015). *Actualización del plan de desarrollo y ordenamiento territorial 2015 - 2025*. Machachi, Ecuador: PDOT "Administración 2014 - 2019".
- Galán, E., & Romero, A. (2010). Contaminación de suelos por metales pesados. *Revista de la sociedad española de mineralogía*, 48-60.
- García, C., Moreno, J., Polo, A., & Hernández, M. (2002). Metales pesados y sus implicaciones en la calidad del suelo. *Ciencia y Medio Ambiente*, 125-138.
- Instituto Geofísico. (16 de Agosto de 2016). *Crónicas de la erupción del volcán Cotopaxi 2015*. Obtenido de Instituto Geofísico-EPN: <https://www.igepn.edu.ec/servicios/noticias/1376-cronicas-de-la-erupcion-del-volcan-cotopaxi-2015>

- Larios, M. (2014). *Niveles de Cd, Co, Cr, Cu, Ni, Pb Y Zn en los suelos de ribera de la cuenca del Río Turia*. Barcelona, España: Universitat de Lleida (Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Agraria).
- LECO Corporation. (2008). *AMA254 Advanced Mercury Analyzer Specification Sheet*. Michigan, E.E.U.U.: LECO Corporation.
- Lominchar, M., Sierra, M., Rodríguez, J., & Millán, R. (2010). *Estudio del Comportamiento y Distribución del Mercurio Presente en Muestras de Suelo Recogidas en la Ribera del Río Valdeazogues*. Madrid, España: CIEMAT.
- Ministerio de Ambiente. (2014). *Parque Nacional Cotopaxi*. Quito, Ecuador: Sistema Nacional de Áreas Protegidas.
- Ministerio de Ambiente. (2015). Norma de calidad ambiental del recurso suelo y criterios de remediación para suelos contaminados. En *Texto Unificado de Legislación Ambiental Secundaria* (págs. 341-370). Quito, Ecuador: Registro Oficial Acuerdo No. 061.
- Mitchell, R. L. (1964). Trace elements in soils. En *Bears* (págs. 320-368). Corporation, New York Chapman and Hall, London: Reid hold Publishing.
- National Research Council (NRC). (2005). *Mineral Tolerance of Animals*. Washington D.C., E.E.U.U.: The National Academies Press.
- Oriundo, C., & Robles, J. (2016). *Determinación de plomo en suelos debido a la contaminación por fábricas aledañas al Asentamiento Humano cultura y progreso del distrito de Ñaña - Chaclacayo*. Lima, Perú: Universidad Nacional Mayor de San Marcos "Facultad de Farmacia y Bioquímica".
- Pérez, I. (2015). *Ecotoxicología del arsénico en suelos de la comunidad de Madrid*. Madrid, España: Universidad Complutense "Facultad de Farmacia".
- PerkinElmer. (2012). *Atomic Spectroscopy Detection Limits*. Shelton, E.E.U.U.: PerkinElmer precisely.
- Porta, J., López-Acevedo, M., & Roquero, C. (2003). *Edafología para la agricultura y el medio ambiente*. Madrid, España: Ediciones Mundi-Prensa.
- Sánchez, E. (2017). *Análisis mineralógico y multielemental de la ceniza volcánica, colectada en una hacienda en el sector de Machachi, por difracción de rayos X (XRD) y espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS), y sus posibles aplicaciones e impacto*. Quito, Ecuador: Pontificia Universidad Católica del Ecuador "Facultad de Ciencias Exactas y Naturales".

- Sánchez, G. (2016). *Ecotoxicología del cadmio, riesgo para la salud de la utilización de suelos ricos en cadmio*. Madrid, España: Universidad Complutense "Facultad de Farmacia".
- Secretaría de Gestión de Riesgos. (2015). Plan de contingencia ante una posible erupción del volcán "Cotopaxi". Cotopaxi, Napo y Pichincha, Ecuador.
- Soil Science Division Staff. (2017). *Soil Survey Manual* (Vol. No 18). E.E.U.U.: United States Department of Agriculture.
- Torres, R., & Oliva, A. (2016). Antología de Volcanes. *Econciencia Verde*(13), 30-54.
- Toulkeridis, T., Cumbal, L., Arroyo, C., Cruz, M., Debut, A., Vaca, A., & Mato, F. (2015). Evaluation of the initial stage of the reactivated Cotopaxi volcano – analysis of the first ejected fine-grained material. *Natural Hazards and System Sciences*, 6947-6976.
- Turekian, K. K., & Wedepohl, K. H. (1961). Distribution of the trace elements in soils. *Consultants Boureau*.
- Zagal, E., & Sadzawka, A. (2007). Protocolo de métodos de análisis para suelos y lodos. *Comisión de Normalización y Acreditación, Sociedad Chilena de la Ciencia del Suelo*, 5-24.