

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencias e Ingenierías

Tendencias estacionales del sedimento de ceniza proveniente de erupciones vulcanianas del volcán Tungurahua, periodo 2015-2019.

Eliana Salomé Cadena Semanate

Ingeniería Ambiental

Trabajo de integración curricular presentado como requisito
para la obtención del título de
Ingeniera Ambiental

Quito, 19 de diciembre de 2019

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ
COLEGIO DE CIENCIAS E INGENIERÍAS

HOJA DE CALIFICACIÓN
DE TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

Tendencias estacionales del sedimento de ceniza proveniente de erupciones vulcanianas del volcán Tungurahua, periodo 2015-2019.

Eliana Salomé Cadena Semanate

Calificación:

Nombre del profesor, Título académico

René Parra, Ph.D.

Firma del profesor:

Quito, 19 de diciembre de 2019

Derechos de Autor

Por medio del presente documento certifico que he leído todas las Políticas y Manuales de la Universidad San Francisco de Quito USFQ, incluyendo la Política de Propiedad Intelectual USFQ, y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo quedan sujetos a lo dispuesto en esas Políticas.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Firma del estudiante:

Nombres y apellidos:

Eliana Salomé Cadena Semanate

Código:

00124902

Cédula de identidad:

1717877011

Lugar y fecha:

Quito, 19 de diciembre de 2019

RESUMEN

Las emisiones de ceniza del volcán Tungurahua han afectado a cultivos, infraestructuras, tráfico aéreo y salud pública, en diferentes zonas del país. Siendo este uno de los volcanes actualmente activos y de mayor importancia, el pronóstico de la dispersión de ceniza resulta de gran interés. En este estudio se han analizado datos diarios de pronóstico de sedimentación de ceniza provenientes del modelo meteorológico WRF3.7.1 y del modelo de dispersión de ceniza volcánica FALL3D V7.1.4 para 4 años, desde abril 2015 a marzo 2019 con el fin de establecer tendencias estacionales de la sedimentación de ceniza, curvas de probabilidad y sus principales afectaciones. Se estableció que de mayo a octubre, el sedimento de ceniza se da principalmente hacia el oeste del volcán, cubriendo grandes extensiones de terreno, incluso llegando al Océano Pacífico. Por otro lado, desde noviembre hasta abril, la ceniza se acumula en una dispersión multidireccional más simétrica, pero con una tendencia en dirección este a oeste. Se sugiere que las tendencias estacionales se deben al desplazamiento de la ITCZ, influencia de la celda de Hadley, la advección de humedad de la Cuenca Amazónica y los patrones de dirección y velocidad de viento sobre el cráter del volcán. De igual forma se encontró que generalmente el número de poblados afectados en la sierra es mayor de noviembre hasta abril, mientras que en la costa, de mayo a julio. Tungurahua, Chimborazo, Guayas, Los Ríos, Manabí, Bolívar y Cotopaxi son las provincias más afectadas. Los cultivos de maíz y papa se ven afectados con acumulaciones mayores de ceniza, correspondientes a $0.01-1.2101 \text{ kg/m}^2$, en su mayoría durante los meses de noviembre hasta abril. Esa información resulta de gran importancia para la correcta gestión de riesgos ya que las entidades gubernamentales pueden priorizar donde se debe gestionar el riesgo asociado al sedimento de ceniza volcánica. Es necesario disponer tanto de un análisis histórico del sedimento, como del pronóstico de dispersión de ceniza volcánica. A futuro se deben analizar las tendencias estacionales de dispersión de ceniza a diferentes niveles de vuelo y otros posibles escenarios de erupción.

Palabras clave: pronóstico, análisis estacional, gestión de riesgo, curvas de probabilidad, WRF, FALL3D

ABSTRACT

Ash fallout from Tungurahua volcano has affected agricultural land, infrastructure, air traffic and health around the Ecuadorian territory. Being Tungurahua one of the most important active volcanos in the country, the forecast of ash fallout results of great interest. This study analyzes 4 years of daily data from the meteorological model WRF 3.7.1 and transport model FALL3DV7.1.4 (April 2015 - March 2019) with the propose of stablishing seasonal patterns of ash accumulation, probability curves and the principal affectations in land. Throughout the months of May to October ash accumulates west of the volcano covering great extensions of land, even reaching the Pacific Ocean. On the other hand, from November to April ash has a multidirectional dispersion still holding a preference from east to west. It is suggested that this seasonal behavior is due to the displacement of the ITCZ, influence of the Hadley Cell, advection of humidity from the Amazon Basin and wind velocity and direction patterns above the crater. In addition, a higher number of settlements are affected in the highland region of Ecuador from November to April whereas from May to July the impact is greater on the coast. The provinces of Tungurahua, Chimborazo, Guayas, Los Rios, Manabi, Bolivar and Cotopaxi are the most compromised ones during ash fallout events. Moreover, plantations of corn and potato are affected with 0.01-1.2101 kg/m² of ash fallout specially during November to April. These findings are essential for a correct risk management since governmental entities could prioritize where to socialize possible dangers associated with ash fallout events and show the importance of working alongside forecasts. As a future step, seasonal pattens of ash dispersion at different fly levels and other eruption scenarios should be analyzed.

Key words: forecast, seasonal analysis, risk management, probability curves, WRF, FALL 3D.

TABLA DE CONTENIDO

1. Introducción.....	9
1.1 Erupciones como un factor de riesgo en el Ecuador.....	9
1.2 Clasificación de erupciones volcánicas	9
1.3 Impactos de la ceniza volcánica en la salud, agricultura, infraestructura y transporte aéreo	12
1.4 Monitoreo continuo de volcanes en el Ecuador	15
1.5 Alerta temprana y gestión de riesgos	16
1.6 Objetivos	17
1.4.1 Objetivo general.	17
1.4.2 Objetivos específicos.....	17
2. Marco teorico	18
2.1 Dispersión y sedimentación de la pluma de ceniza volcánica.....	18
2.2 Modelos de transporte atmosféricos	19
2.1.1 Enfoques de los modelos de transporte	20
2.1.3 Sistema numérico de pronóstico utilizado por el GICVE.....	21
3. Método y diseño de la investigación	23
3.1 Área de estudio	23
3.2 Simulación y procesamiento de datos	25
3.3 Creación de mapas de sedimentación y análisis de áreas afectadas.....	26
4. Resultados	29
4.1 Mapas de acumulación de ceniza volcánica estacionales	29
4.2 Estimación estacional de poblaciones y ciudades principales afectadas	32
4.3 Afectación por tipo de uso de suelo.....	37
4.4 Afectaciones estacionales al suelo agrícola por tipo de cultivo.....	43
5. Discusión	48
6. Conclusiones y Recomendaciones	52
7. Referencias bibliográficas	55

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Descripción de tipos de erupciones volcánicas	10
Tabla 2 Descripción de los componentes de los MTA	20
Tabla 3 Porcentaje de datos analizados por periodo	26
Tabla 4 Espesor de la ceniza para los rangos C1, C2, C3, C4 y C5.....	27
Tabla 5 Descripción de usos de suelo	27
Tabla 6 Área afectada por la acumulación de ceniza estacional (> 0.0001 kg/m²)	32
Tabla 7 Número de poblados y ciudades principales afectadas por periodo	34
Tabla 8 Área (km²) por uso de suelo por periodo.....	40
Tabla 9 Área (km²) de productos agrícolas afectados en noviembre, diciembre y enero.....	44
Tabla 10 Área (km²) de productos agrícolas afectados en febrero, marzo y abril	44
Tabla 11 Área (km²) de productos agrícolas afectados en mayo, junio y julio	45
Tabla 12 Área (km²) de productos agrícolas afectados en agosto, septiembre y octubre.....	45
Tabla 13 Área en (km²) de productos agrícolas afectados en el análisis anual	46

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Tipos de erupciones volcánicas	11
Figura 2 Altura de la columna de ceniza por tipo de erupción volcánica	11
Figura 3 Mapas de dispersión de nubes de ceniza para el periodo de noviembre-diciembre 1999 (a) y junio-septiembre 2001 (b).....	19
Figura 4 Área de Estudio	23
Figura 5 Rosas de viento sobre el volcán Tungurahua mensuales	24
Figura 6 Mapa anual de sedimentación de ceniza y curvas de probabilidad.....	29
Figura 7 Mapa de sedimentación de ceniza para el periodo de febrero-marzo-abril y curvas de probabilidad.....	30
Figura 8 Mapa de sedimentación de ceniza para el periodo de mayo-junio-julio y curvas de probabilidad.....	31
Figura 9 Mapa de sedimentación de ceniza para el periodo de agosto-septiembre-octubre y curvas de probabilidad	31
Figura 10 Mapa de sedimentación de ceniza para el periodo de noviembre-diciembre-enero y curvas de probabilidad	32
Figura 11 Mapas estacionales de poblados afectados en los diferentes rangos de acumulación de ceniza volcánica.....	33
Figura 12 Número de poblados por provincia de la Sierra donde el sedimento de ceniza corresponde al rango de acumulación C1	34
Figura 13 Número de poblados por provincia de la Costa y Oriente donde el sedimento de ceniza corresponde al rango de acumulación C1	35
Figura 14 Número de poblados por provincia de la Sierra donde el sedimento de ceniza corresponde al rango de acumulación C2	35
Figura 15 Número de poblados por provincia de la Costa y Oriente donde el sedimento de ceniza corresponde al rango de acumulación C2	36
Figura 16 Número de poblados por provincia donde el sedimento de ceniza corresponde al rango de acumulación C3	36
Figura 17 Número de poblados por provincia donde el sedimento de ceniza corresponde al rango de acumulación C4 y C5	37
Figura 18 Mapa de afectación por tipo de suelo para el periodo de febrero, marzo y abril ...	37
Figura 19 Mapa de afectación por tipo de suelo para el periodo de mayo, junio y julio.....	38
Figura 20 Mapa de afectación por tipo de suelo para el periodo de agosto, septiembre, octubre.....	38
Figura 21 Mapa de afectación por tipo de suelo para el periodo de noviembre, diciembre, enero.....	39
Figura 22 Mapa de afectación por tipo de suelo anual	39
Figura 23 Área afectada por tipo de suelo dentro del rango de acumulación de ceniza C1 ...	41
Figura 24 Área afectada por tipo de suelo dentro del rango de acumulación de ceniza C2 ...	41
Figura 25 Área afectada por tipo de suelo dentro del rango de acumulación de ceniza C3 ...	42
Figura 26 Área afectada por tipo de suelo dentro del rango de acumulación de ceniza C4 ...	43
Figura 27 Área afectada por tipo de suelo dentro del rango de acumulación de ceniza C5 ...	43
Figura 28 Comparación de áreas afectadas de cultivos principales por periodo	47

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Erupciones como un factor de riesgo en el Ecuador

El Ecuador está ubicado en el cinturón de Fuego del Pacífico, que se considera el área geográfica del planeta con mayor actividad sísmica y volcánica. De hecho, según El Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional (IGEPN), en el Ecuador, existen 84 volcanes registrados en el territorio continental de los cuales 31 están potencialmente activos, activos o en erupción. Entre los volcanes que han estado en erupción se destacan el Sangay, el Cotopaxi que comenzó una actividad intensa en el 2015, el Tungurahua desde 1999 y el Reventador desde el 2002 (IGEPN, Red de Observatorios Vulcanológicos, 2019).

Muchas de estas erupciones han generado daños en las ciudades principales del país. Tanto así, que los eventos críticos de contaminación del aire en la ciudad de Quito se deben a erupciones volcánicas. En la erupción del 2002 del Reventador, en Quito se presentó un estado de emergencia y los valores de material particulado (PM10) llegaron a ser 21 veces más altos a lo recomendado por la Organización Mundial de la Salud, produciendo adicionalmente, 929 emergencias de salud directas (OMS, 2014).

De igual forma la erupción del volcán Tungurahua en el 2016 afectó a más de 7 poblaciones cercanas cubriendo de ceniza sus plantaciones de maíz, frejol, frutas y pasto para el ganado. En esta ocasión más de 300 cabezas de ganado y 40 hectáreas de maíz fueron comprometidas. (Moreta, 2016)

1.2 Clasificación de erupciones volcánicas

Las erupciones volcánicas comprenden la interacción de una gran variedad de parámetros físico-químicos haciendo complejo su estudio y clasificación. Las emisiones volcánicas pueden presentar mayor o menor contenido de dióxido de silicio (SO₂) y diferentes gases como vapor de agua, dióxido de carbono, ácido sulfhídrico entre otras. Esto incide en la viscosidad,

solubilidad y acidez del magma. En 1973 Walker determina 6 diferentes tipos de erupciones magmáticas y 2 tipos de erupciones hidromagmáticas (cuando el magma entra en contacto con agua bajo la corteza o en la superficie). Esta clasificación se realiza en base al índice de fragmentación (tamaño piroclastos) y al índice de dispersión (cobertura de piroclastos y por ende altura de columna de ceniza). Las erupciones magmáticas son: hawaiana, estromboliana, subpliniana, pliniana, ultrapliniana y vulcaniana, mientras que las hidromagmáticas son: surtseyana y freatopliniana. Una descripción de las mismas se muestra en la Tabla 1 y se ilustra en la Figura 1. (Perez & Rodriguez, 2015)

Tabla 1 Descripción de tipos de erupciones volcánicas

Mecanismos eruptivos	Tipo	Descripción
Hawaiana	Magmática	Erupciones donde se emite principalmente lava y muy poco o nada de gases en el magma. El magma básico sale de forma no violenta y fluye en forma de “ríos” de lava. Tienen una altura de hasta 1 km y una duración de días a años.
Estromboliana	Magmática	Erupciones de baja explosividad con magma básico donde se emiten principalmente lavas y piroclastos por lo que se conocen como explosiones mixtas. La altura de la pluma va de 1 a 5 km y es intermitente presente durante siglos.
Plinianas, Subplinianas y ultraplinianas	Magmática	Erupciones explosivas de conducto abierto con magmas ácidos a intermedios y donde se emiten principalmente depósitos piroclásticos y gases que generan columnas de forma de champiñón (columnas plinianas). La altura de la columna de ceniza es mayor a 30 km y dura de horas a días.
Vulcanianas	Magmática	Erupciones explosivas de conducto cerrado con magmas ácidos e intermedios que emiten principalmente depósitos piroclásticos y generan columnas de menor altura que las erupciones plinianas. La pluma de ceniza es de 5 a 25 km y tiene una duración de minutos a horas.
Surtseyana y freatopliniana	Hidromagmática	Erupciones que suceden cuando el magma se pone en contacto con agua externa ya sea subterránea o de la superficie. Sus magmas son básicos, intermedios y ácidos y sus columnas piroclásticas son en forma de ciprés.

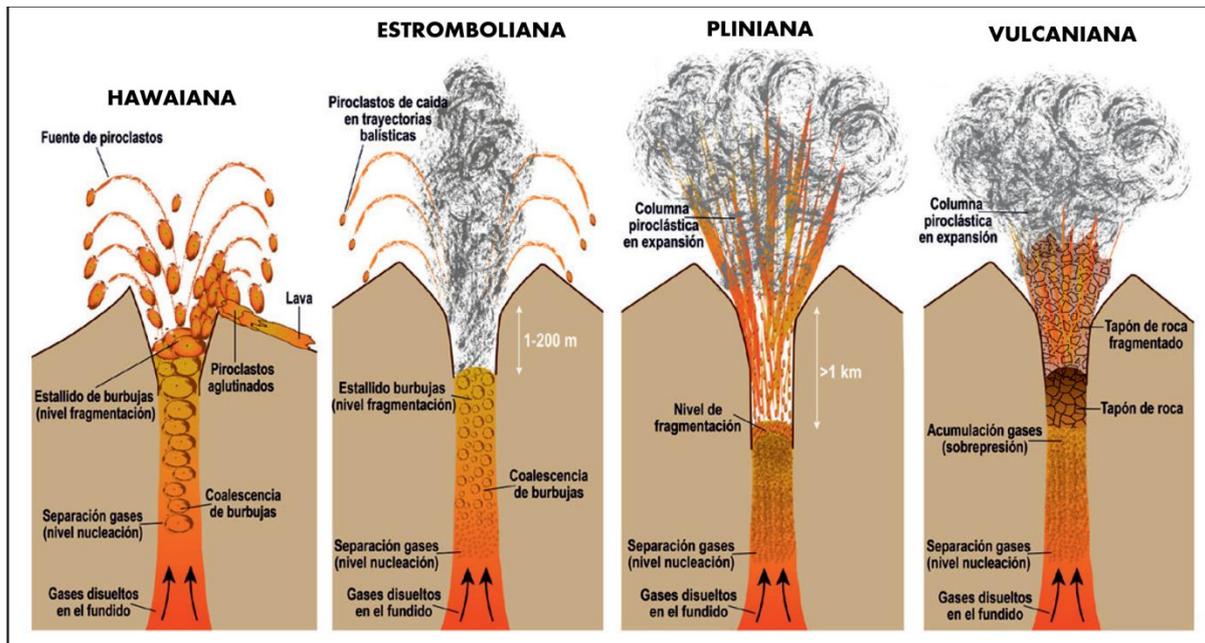


Figura 1 Tipos de erupciones volcánicas (Perez & Rodriguez, 2015)

Por otro lado, en la Figura 2 se muestra la altura de la columna de ceniza para los diferentes tipos de erupciones volcánicas.

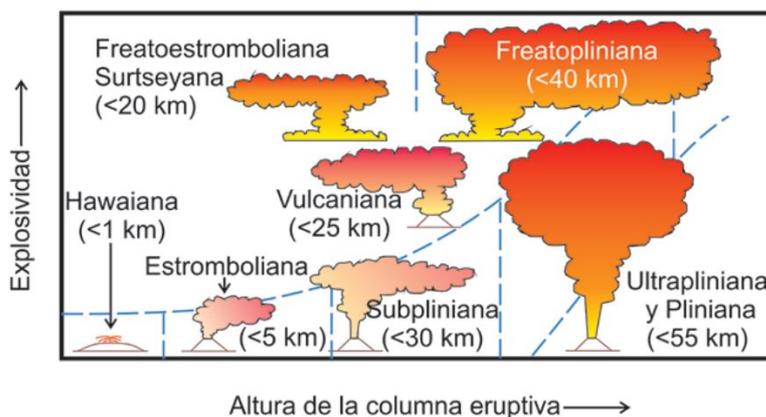


Figura 2 Altura de la columna de ceniza por tipo de erupción volcánica (Perez & Rodriguez, 2015)

El volcán Tungurahua (Lat. 01° 28' S; Lon. 78° 27' W; 5023 m asl) ha tenido actividad intermitente desde 1999, convirtiéndolo en una prioridad de estudio por el riesgo que presenta a la población. Desde septiembre de 1999 hasta mayo del 2006 sus erupciones fueron estrombolianas con ciclos eruptivos cada 12 a 18 meses, con emisiones de ceniza y gases en pequeña intensidad que afectaron a las poblaciones aledañas y causaron daños a cultivos e

infraestructura (Hidalgo, y otros, 2015) Desde el 2007 hasta el 2013 se han producido al menos 5 fases eruptivas con erupciones de flujo piroclástico y desde mediados del 2013 hasta mediados del 2014 el volcán presento erupciones de tipo Vulcanianas (Hall, et al., 2015). Finalmente en los últimos años el volcán presenta erupciones Vulcanianas y Estrombolianas dando por terminada la fase eruptiva en el 2016. (Le Pennec, et al., 2019)

1.3 Impactos de la ceniza volcánica en la salud, agricultura, infraestructura y transporte aéreo

Durante las erupciones volcánicas se emiten gases como vapor de agua (H_2O), dióxido de carbono (CO_2), dióxido de azufre (SO_2), ácido clorhídrico (HCl), ácido fluorhídrico (HF), y cenizas. El HCl y HF generan lluvia ácida y el dióxido de azufre se convierte en ácido sulfúrico (H_2SO_4) en la atmósfera (OPS/OMS & Boischio, 2012). Por otro lado, la ceniza volcánica es una mezcla en diferentes proporciones de obsidiana, minerales, cristales y otros fragmentos de roca usualmente compuestos de silicio, aluminio, sodio, potasio, calcio, magnesio y hierro (USGS, 2015). Estudios de laboratorio de las erupciones vulcanianas del Tungurahua muestran que la ceniza contiene óxido de hierro, óxido de calcio, óxido de potasio, óxido de silicio, óxido de aluminio, óxido de sodio y óxido de manganeso (Bustillos, Romero, & Guevara, 2018) La ceniza puede llegar a cientos de kilómetros del centro de emisión, causando daños en la agricultura, infraestructura, transporte aéreo y perjudicando la salud de los habitantes de las zonas afectadas (Jenkis, et al., 2015).

Aunque en cantidades pequeñas puede actuar como fertilizante, en cantidades mayores la ceniza afecta a los cultivos, impidiendo el paso de la luz solar, generando peso extra y acidificando las hojas y frutos (Jenkis, et al., 2015). También puede afectar al ganado, ya que produce bloqueos intestinales por la ingesta de la misma y aumenta el riesgo de fluorosis (OPS/OMS & Boischio, 2012). De igual manera, la ceniza altera los ciclos de nitrógeno y el intercambio de agua y oxígeno del suelo, alterando la fertilidad del mismo a largo plazo. Afecta

además a la maquinaria, vías de acceso y sistemas de riego. (Jenkis, et al., 2015). Estos impactos han sido de gran importancia en el país. De hecho, en el año 2014 alrededor de 4000 hectáreas de cultivos y pasto fueron afectadas por las cenizas del volcán Tungurahua, en las provincias de Tungurahua y Chimborazo (Comercio, 2014).

Otra preocupación en torno a la ceniza volcánica es el riesgo que representa a la salud. Debido a su composición química, la ceniza puede ser corrosiva y llegar acompañada de pequeñas gotas de ácido sulfúrico y clorhídrico con sales de haluro. La OMS y OPS identifican 6 impactos principales relacionados a la ceniza volcánica (OPS/OMS & Boischio, 2012):

1. Sistema respiratorio: Corresponde a la irritación de las vías respiratorias, dificultad para respirar, tos seca o la agravación de condiciones respiratorias crónicas, como el asma debido a la inhalación de partículas finas.
2. Sistema visual: Dolor, escozor, lagrimeo, abrasiones de la córnea o conjuntivitis aguda debido a la presencia de ceniza.
3. Piel: irritación cutánea a la exposición de ceniza.
4. Problemas toxicológicos: afectaciones gastrointestinales debido a la ingesta de agua o comida contaminada.
5. Traumas o golpes debido al colapso de techos o infraestructura en general por la acumulación de ceniza.
6. Exposición a la sílice libre: La sílice cristalina libre (SiO_2) puede causar silicosis. Durante esta enfermedad, el polvo de sílice penetra los bronquiolos y alveolos, causando fibrosis en los tejidos entre los alveolos y capilares. La insuficiencia respiratoria cada vez es mayor y puede ser mortal (Leung, 2012).

Un estudio realizado en las comunidades de Pillate, Manzano y Chonguntus, expuestas crónicamente a la inhalación de ceniza del volcán Tungurahua, sugirió que la población expuesta tenía menor capacidad de retener aire en los pulmones (Cifuentes & Alvarado, 2015).

Esto se confirma también por otra investigación realizada en 17 comunidades afectadas, que además indica que la exposición a la ceniza del volcán Tungurahua, se asocia a alteraciones bronquíticas radiográficas en los pulmones, especialmente en mujeres y mayores de 40 años (Maldonado, Maldonado-Coronel, & Silva, 2018).

Por otro lado, la ceniza también afecta la infraestructura y dificulta el tráfico aéreo. Se han reportado techos colapsados, cierres de vías y daños a las líneas de electricidad y sistemas de comunicación (Toulkeridis & Zach, 2016). En lo referente a las líneas eléctricas, la ceniza se adhiere a las superficies, formando una capa altamente conductiva y ácida que puede generar fluctuaciones en el voltaje y degradación del aislamiento (Bebbington, Cronin, & Turner, 2008). Un estudio en base a la ceniza del Tungurahua y Cotopaxi determinó que la misma puede producir fallas en la torre de transmisión de electricidad y daños en los aisladores (Lopez, et al., 2016). En cuanto al tráfico aéreo, la ceniza volcánica es una amenaza importante debido a que interfiere con el vuelo, aterrizaje y despegue de los aviones. Muchos de ellos sufren daños en las turbinas por la acumulación y solidificación de la ceniza, produciendo pérdida de poder en los motores durante el vuelo (Casadevall, Delos Reyes, & Schneider, 1996). Además, la visibilidad se reduce sustancialmente debido a la acumulación de ceniza en las rutas de vuelo y los aeropuertos se ven obligados a suspender sus actividades por seguridad (Martin, et al., 2009).

Los aeropuertos de Riobamba, Ambato, Latacunga, Guayaquil, Manta, Portoviejo y Cuenca han sido afectados y obligados a cerrar debido a la caída de ceniza proveniente del volcán Tungurahua (julio-agosto 2006, febrero-noviembre-diciembre 2008, mayo 2010, diciembre 2012, julio 2013, febrero 2014) (Daniels, et al., 2011).

1.4 Monitoreo continuo de volcanes en el Ecuador

Debido al eminente riesgo que presentan los volcanes en el Ecuador desde 1977, el Instituto Geográfico de la Escuela Politécnica Nacional (IGEPN) se ha encargado del monitoreo de los mismos. Cuenta con una red de Observatorios Vulcanológicos (ROVIG) que vigilan los volcanes utilizando diferentes tecnologías (IGEPN, Red de Observatorios Vulcanológicos, 2019). Éstas comprenden:

1. Sismómetros para identificar sobrepresiones internas (pequeños temblores) y movimiento de fluidos.
2. Barómetros-sensores infracústicos que miden sobrepresiones en la atmósfera.
3. GPS-inclinómetros-EDM (Metro Electrónico Medidor de Distancia) que detectan hinchamiento en las extremidades por donde pasa el magma.
4. Detectores de gases volcánicos que analizan el ingreso y desgasificación del magma cerca de la superficie
5. Sensores AFM (Acoustic Flow Monitoring) para detectar el trayecto de lahares o flujos piroclásticos

El volcán Tungurahua se categoriza dentro del nivel de vigilancia 1 por lo que es monitoreado utilizando todas las tecnologías mencionadas previamente, con la adición de cámaras visuales y térmicas (IGEPN, Red de Observatorios Vulcanológicos, 2019).

Desde 1997, para la zona del Ecuador el Volcanic Ash-Advisory Center (VAAC) de Washington monitorea la formación de nubes de ceniza volcánica a través de imágenes satelitales. Las nubes de ceniza se diferencian de otros tipos de nubes en sus propiedades radiativas lo que permite que sean vigiladas a través de sensores satelitales infrarrojos (Ellord, Connell, & Hilger, 2003).

También desde 2000, en el volcán Tungurahua se ha implementado un sistema de vigías comunitarios que monitorean la actividad del volcán y alertan de forma temprana a los

moradores para una evacuación efectiva. De igual manera, colaboran con investigadores locales dando a conocer aumentos en la actividad del volcán. (Stone, et al., 2014).

Adicionalmente, el Grupo de Investigación sobre la Ceniza Volcánica en el Ecuador (GICVE) tiene como objetivo desarrollar pronósticos de dispersión de ceniza en el país. Desde el año 2016, el GIVCE publica el pronóstico de dispersión de ceniza por erupciones vulcanianas del Tungurahua, en base a simulaciones numéricas que usan el modelo meteorológico Weather Research and Forecasting (WRF V3.7.1) y el modelo de dispersión de ceniza Fall3D (GICVE, 2019)

1.5 Alerta temprana y gestión de riesgos

A pesar de los esfuerzos realizados, la alerta temprana a erupciones volcánicas podría mejor significativamente en el país (Toulkeridis & Zach, 2016). En octubre, noviembre y diciembre de 1999 el volcán Guagua Pichincha erupcionó durante alerta amarilla. De igual manera, en el 2002 El Reventador se reactivó con la erupción más fuerte en las últimas 14 décadas sin ninguna alerta. (Garcia, Kumagai, & Samanieg , 2007; Smithsonian-Institution, 2016). Casos similares han sucedido con el volcán Tungurahua. En octubre de 1999 la ciudad de Baños y poblaciones cercanas fueron evacuadas por alrededor de 3 meses sin tener lluvias de ceniza ni daños. Más tarde, el 14 de julio del 2006 el volcán tuvo actividad piroclástica y las cenizas causaron graves daños a las poblaciones aledañas y al tráfico aéreo durante alerta naranja (Toulkeridis & Zach, 2016).

Para mejorar la gestión de riesgos en cuanto a las erupciones volcánicas en el Ecuador este estudio pretende utilizar los pronósticos del Grupo de Investigación sobre la Ceniza Volcánica para determinar tendencias estacionales de la dispersión de ceniza del volcán Tungurahua. De esta manera se identifican las comunidades y tipos de suelos que podrían ser afectados por el sedimento de ceniza

1.6 Objetivos

1.4.1 Objetivo general.

Identificar tendencias estacionales de sedimentación de ceniza del volcán Tungurahua a partir del procesamiento de los datos del Grupo de Investigación de Ceniza Volcánica para los años 2015-2019.

1.4.2 Objetivos específicos.

1. Entender el comportamiento de la sedimentación y dispersión de ceniza volcánica en el Ecuador
2. Generar mapas estacionales de probabilidad de sedimento de ceniza del volcán Tungurahua
3. Determinar el tipo de suelo afectado por sedimento de ceniza proveniente del volcán Tungurahua para diferentes estaciones
4. Determinar las provincias con mayor amenaza de sedimentación de ceniza del volcán Tungurahua para sus poblados en las diferentes estaciones
5. Encontrar las ciudades con mayor probabilidad de ser afectadas por la sedimentación de ceniza volcánica del Tungurahua
6. Explorar y aprender las bases del sistema operativo Linux, manejo de scripts y programación con MATLAB

2. MARCO TEORICO

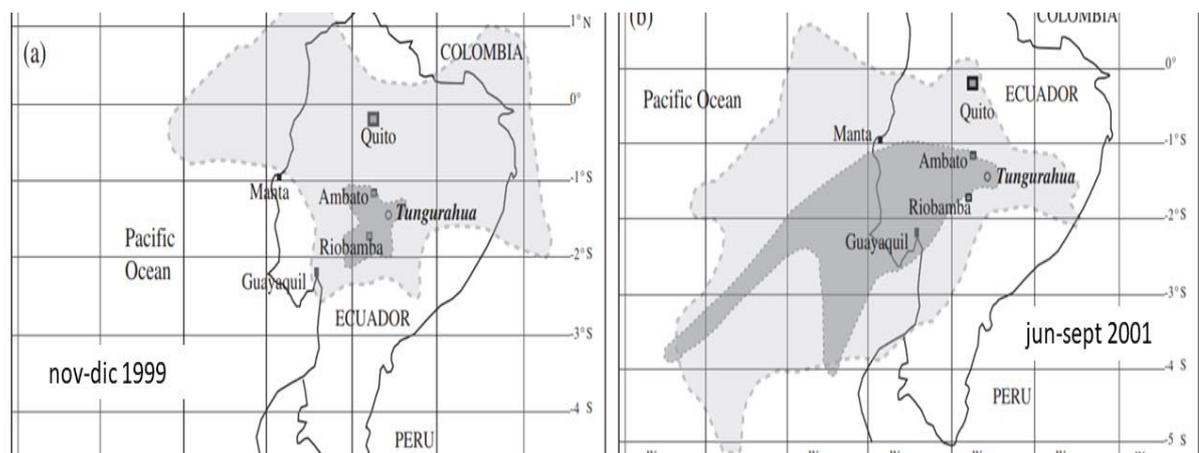
2.1 Dispersión y sedimentación de la pluma de ceniza volcánica

Las plumas volcánicas se generan a partir de una erupción explosiva y corresponden a una mezcla de toba lítica, gases y magma en fragmentos que se convierten en una corriente turbulenta. Existen cuatro parámetros principales que definen las características y comportamiento de la dispersión y sedimento de la pluma de ceniza (Bonadonna, Costa, & Fagents, 2013):

1. Dinámica de la pluma de ceniza: si la velocidad hacia arriba de la pluma es mayor que la del viento, se genera una columna de vertical de gas que eventualmente se expande lateralmente como un paraguas (pluma fuerte) (Figura 1(a)). En caso contrario, se formará una pluma débil que se inclina solamente hacia un lado (Figura 1 (b))
2. Parámetros de la partícula: las partículas dentro de la pluma serán transportadas o empezarán a descender conforme a la velocidad de sedimentación, que depende del tamaño de la partícula. Las partículas pequeñas en el rango de micrómetros o milímetros tienen menores velocidades de sedimentación, por lo que tienden a caer y al mismo tiempo, por advección, seguir la dirección de los vientos locales (Sparks, Bursik, & Carey, 1997).
3. Características atmosféricas: las condiciones atmosféricas del momento de la erupción como densidad y viscosidad del aire afectan el comportamiento de la pluma y sedimentación de ceniza.
4. Procesos de sedimentación: la sedimentación de partículas se promueve por movimientos convectivos y nubes que se forman en la base de la corriente turbulenta (Mayberry, Bonadonna, & Calder, 2002).

Además, existe una dependencia estacional en la dispersión de ceniza volcánica, debido a la influencia de los vientos y condiciones atmosféricas en altura (Leadbetter & Hort, 2010; Le

Penneec, et al., 2012). Un estudio sobre la influencia del tamaño de erupción y de las condiciones atmosféricas durante la actividad del volcán Tungurahua en el período 1999-2001, determinó una diferencia entre dos fases eruptivas. Durante el periodo de noviembre-diciembre se observaron vientos dominantes hacia el noroeste y suroeste. Sin embargo, también existían vientos en las otras direcciones que promovieron la dispersión de ceniza multidireccional (Figura 3(a)) (Le Penneec, et al., 2012). Por otro lado, en la fase de agosto 2001, los vientos predominantes hacia el oeste y sur oeste promovieron la dispersión de ceniza hacia esta dirección, afectando las ciudades de Manta y Guayaquil (Figura 3(b)) (Le Penneec, et al., 2012; Eychenne, Le Penneec, & Troncoso, 2011). En adición, se llegó a similar conclusión, en un estudio sobre la afectación de rutas aéreas por las nubes de ceniza del volcán Tungurahua. Se determinó que las nubes se dispersan mayoritariamente de este a oeste, entre abril a septiembre (Toulkeridis & Zach, 2016).



Fuente: (Le Penneec, et al., 2012)

Figura 3 Mapas de dispersión de nubes de ceniza para el periodo de noviembre-diciembre 1999 (a) y junio-septiembre 2001 (b)

2.2 Modelos de transporte atmosféricos

Los modelos de transporte atmosféricos (MTA) describen el transporte de sustancias naturales (minerales, sal de mar, ceniza volcánica), antropogénicas (aerosoles y material particulado de procesos industriales) y biogénicas (combustión de biomasa) en la atmósfera. Estos modelos describen la dispersión con diferente complejidad y se utilizan para el pronóstico de la

dispersión de ceniza (Folch, 2012). Los modelos de dispersión de ceniza volcánica tienen diferentes propósitos como el pronóstico a corto tiempo, entender los procesos de dispersión (Parra, 2018), la reconstrucción de eventos pasados para determinar parámetros de erupción, la elaboración de mapas probabilísticos para fines de mitigación, planificación territorial y gestión de riesgos (Bonasia, Costa, Folch, Macedonio, & Capra, 2012).

Todos los MTA tienen 3 componentes: un modelo de emisión, un modelo atmosférico y un modelo de transporte. Una descripción de los mismos se muestra en la Tabla 1 (Russell & Dennis, 2000).

Tabla 2 Descripción de los componentes de los MTA

Componente	Descripción
Modelo de Emisión	Describe la emisión o producción de las sustancias en tiempo y espacio. En el caso de las erupciones volcánicas se denominan parámetros de erupción volcánica (ESP) y toman en cuenta factores como granulometría, duración, altura de columna etc.
Modelo Atmosférico	Define las condiciones de la atmosfera en las que va interactuando la sustancia como campos de viento, densidad del aire, temperatura, presión, humedad, altura de la capa límite planetaria, turbulencia, precipitación)
Modelo de Transporte	Describe el transporte de las sustancias y sus mecanismos de remoción. En ocasiones durante el transporte las sustancias se transforman debido a cambios de fase, reacciones fotoquímicas y agregación de partículas. Esto resulta en la necesidad de aumentar un modelo adicional para que en conjunto con el de transporte logren definir los sumideros y procesos finales.

2.1.1 Enfoques de los modelos de transporte

Los modelos de transporte pueden tener dos enfoques: eulerianos o lagrangianos. Los eulerianos trabajan con locaciones fijas, es decir, encuentran las variables en puntos establecidos con respecto a un sistema de referencia. Por otro lado, los modelos lagrangianos trabajan según la trayectoria de una celda atmosférica específica. También pueden considerarse enfoques “on-line” u “off-line”. La mayoría de modelos de dispersión de emisiones volcánicas tienen un enfoque “off-line”, mediante el cual el modelo atmosférico genera la meteorología y alimenta

al modelo de dispersión de ceniza volcánica. Ambos modelos en este caso trabajan de manera independiente, es decir no se toma en cuenta sus interacciones. Por otro lado, en el enfoque “on-line” se encuentran soluciones del modelo meteorológico y de dispersión al mismo tiempo, tomando en cuenta los efectos entre sí y llegando teóricamente a un resultado más exacto. Además, los modelos atmosféricos trabajan a diferentes resoluciones espaciales como a escala global, meso escala o escala local, por lo que es ideal que los modelos de dispersión de ceniza y atmosféricos tengan resoluciones espaciales parecidas (Folch, 2012).

2.1.3 Sistema numérico de pronóstico utilizado por el GICVE

El sistema numérico de pronóstico utilizado por el Grupo de Investigación de Ceniza Volcánica del Ecuador (GICVE) usa como modelo atmosférico el “Weather Research and Forecasting” (WRF3.7.1), y como modelo de transporte el FALL3D V7.1.4 (Parra, 2018). Con este propósito, primero se genera el pronóstico meteorológico, a partir del pronóstico “Global Forecast System” de la Agencia Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica de los Estados Unidos (NOAA, n.d.), que se usa como condiciones iniciales en la simulación del WRF3.7.1. De esta simulación se obtienen la meteorología para el territorio ecuatoriano con 199 X 199 celdas de 4 km y 35 niveles verticales. A continuación, este resultado se ingresa en el modelo FALL3D, que es un modelo de transporte de emisiones volcánicas euleriano. Este modelo resuelve ecuaciones de advección, difusión y sedimentación de ceniza volcánica. Los componentes del sistema de pronóstico se describen en mayor detalle en (Parra, 2018). Los resultados obtenidos corresponden al escenario de una erupción vulcaniana, similar a la que ocurrió el 14 de julio del 2013. Una de las variables generadas por FALL3D es el sedimento de ceniza que resulta desde el inicio de la erupción, hasta el final de la simulación. Esta es la variable que se ha considerado para este análisis. Por otro lado, la simulación genera otras variables como la concentración de ceniza a diferentes niveles de vuelo (FL200, FL300,

FL400) (GICVE, 2019). Los niveles de vuelo hacen referencia a una superficie de presión atmosférica constante basándose en una presión estándar de 1013.2 hPa. La altura que los niveles de vuelo representan se mide en cientos de pies sobre el nivel del mar. Por ejemplo, FL250 corresponde a 25 000 pies sobre el nivel del mar cuando la presión en el mismo es de 1013.2 hPa. (FlightSafetyFoundation, 2017)

Por otro lado, la erupción vulcaniana del 14 de julio de 2013 fue recomendada por el IGEPN como referencia, para generar el pronóstico de dispersión de ceniza, en razón de ser un evento representativo de las erupciones más fuertes del volcán Tungurahua en los últimos años. Además, existe información de campo y de laboratorio que ha permitido proponer los parámetros de erupción adecuados (Parra R. , 2018; Hall, et al., 2015). La información de pronóstico se ha ido generando desde abril del 2015 hasta la actualidad. Para este estudio se consideró el periodo de abril 2015 - marzo 2019.

La simulación y pronóstico de la dispersión de ceniza volcánica es una línea de investigación de la USFQ, por medio de la cual se ha investigado la influencia de esquemas de capa límite planetaria (Parra R. , 2018), condiciones iniciales (Parra R. , 8th International Symposium on Andean Geodynamics (ISAG), 2019) y resolución espacial (Parra R. , Influence of Spatial Resolution in Modeling the Dispersion of Volcanic Ash in Ecuador, 2019).

3. MÉTODO Y DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

3.1 Área de estudio

La dispersión de ceniza se simuló con una malla de 199 X 199 celdas de 4 km, cubriendo todo el Ecuador continental (Figura 4).

Este estudio se enfoca en la dispersión de ceniza del volcán Tungurahua que está ubicado aproximadamente en el centro del país, en el límite de las provincias de Tungurahua y Chimborazo sobre la Cordillera de los Andes. El Ecuador continental tiene 3 regiones: Costa, Sierra y Amazonia y por tanto diferentes condiciones topográficas que inciden en el clima y en las condiciones atmosféricas y meteorológicas de las diferentes regiones del país (Barrios & Troncoso, 2010).

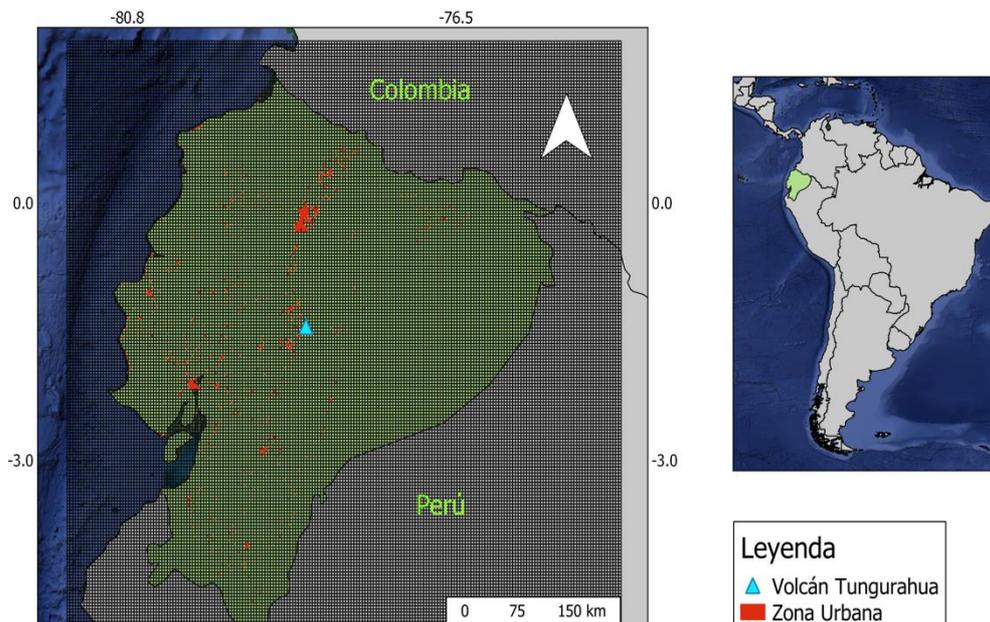


Figura 4 Área de Estudio

Debido a su ubicación, el Ecuador no presenta estaciones marcadas. Para las zonas aldeanas al volcán Tungurahua se ha determinado una estacionalidad interesante que consiste en épocas secas y más calientes de octubre a febrero y de mayor precipitación y menor temperatura de febrero a septiembre (Le Penec, et al., 2012). Por otro lado, en términos generales para la

Sierra ecuatoriana, para este estudio, se identifica a los meses de agosto, septiembre y octubre como periodos secos mientras que a los meses de febrero marzo y abril como periodos lluviosos dejando así a los meses intermedios como periodos de transición.

Además, un análisis del IGEPN concluye que durante los meses de marzo, mayo, junio, julio, agosto, septiembre y diciembre el viento sobre el volcán Tungurahua predomina hacia el oeste con pequeñas variaciones al noroeste y suroeste. Adicionalmente, en noviembre, enero, febrero, abril y octubre el régimen de viento es más desordenado en otras direcciones (Figura 5) (IGEPN & Orellana, Informe anual de emisiones de SO₂ del volcán Tungurahua 2018, 2018).

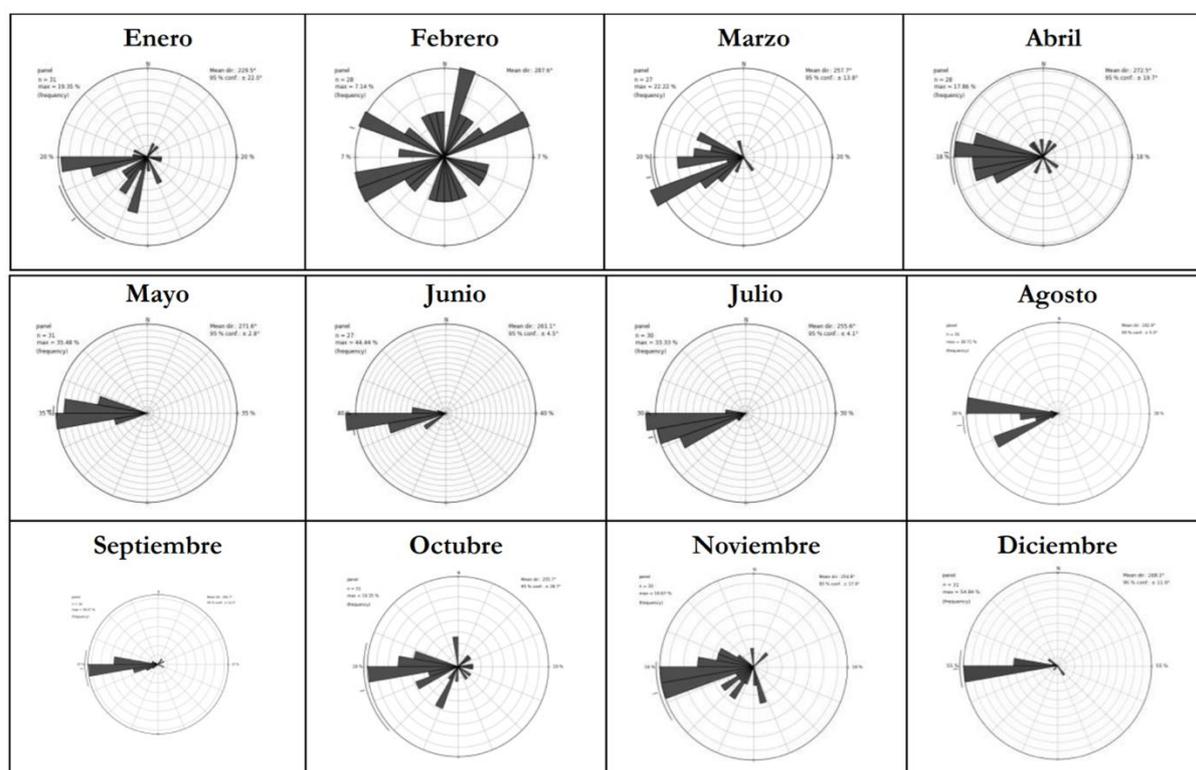


Figura 5 Rosas de viento sobre el volcán Tungurahua mensuales (IGEPN & Orellana, 2018)

Sobre el cráter del volcán Tungurahua, se determinó valores entre 1 y 15 m/s; siendo junio, julio y agosto los meses con valores máximos de velocidad de viento (IGEPN & Orellana, Informe anual de emisiones de SO₂ del volcán Tungurahua 2018, 2018) .

3.2 Simulación y procesamiento de datos

Como primera fase del procesamiento de datos, se realizó un inventario de los pronósticos históricos disponibles de sedimento de ceniza del GICVE, y se simularon los días faltantes del período de estudio (abril 2015- marzo 2019). Los resultados de sedimento de ceniza fueron extraídos de los archivos de simulación, y se clasificaron en cuatro periodos para el análisis estacional. Estos periodos fueron: febrero-marzo-abril (FMA), mayo-junio-julio (MJJ), agosto-septiembre-octubre (ASO) y noviembre-diciembre-enero (NDE). También se analizó un periodo anual (ANUAL) que corresponde al promedio de todas las simulaciones obtenidas de los cuatro años de estudio.

Los datos fueron procesados utilizando MATLAB. Para asegurar el funcionamiento correcto del código base, se utilizó un periodo de prueba de 31 días. Para este periodo se utilizó un código independiente en Fortran 90, y se verificó que los resultados con los dos códigos sean idénticos.

Con el código de MATLAB se extrajo los resultados de la última hora de simulación, que corresponde a la acumulación de sedimento para cada celda por día (39 601 celdas) y se obtuvo el promedio de estos valores para los días existentes en cada trimestre, de los cuatro años de estudio. Las cifras obtenidas fue redondeadas con cuatro decimales.

Por otro lado, utilizando el mismo software, para cada archivo diario se asignó el valor de 1, a las celdas con sedimento de ceniza mayor a 0.0001 kg/m^2 ; y 0 en caso contrario. Se sumaron los resultados de todos los días y luego el total, se dividió sobre el número total de días analizados. Estos valores corresponden a la probabilidad de ocurrencia del sedimento de ceniza para cada celda, con valores mayores a 0.0001 kg/m^2 .

El número de días analizados en este estudio, y el porcentaje que representa del periodo total, se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3 Porcentaje de datos analizados por periodo

Periodo	Días totales del periodo	Días con pronostico	Porcentaje de análisis (%)
FMA	357	315	88.23
MJJ	368	347	94.29
ASO	368	335	91.03
NDE	368	335	91.03
Sumatoria	1461	1332	91.14

3.3 Creación de mapas de sedimentación y análisis de áreas afectadas

Para la elaboración de los mapas de sedimentación de ceniza con las curvas de probabilidad, se proyectaron espacialmente los resultados de cada celda, para los diferentes periodos. Para ello se utilizó el sistema de información geográfica QGis V3.6.0. Se generaron archivos tipo *shapefile* para las curvas de probabilidad y para la sedimentación de ceniza. Para el sedimento de ceniza, los resultados se clasificaron en 5 categorías correspondientes a: 0.0001-0.001 kg/m² (C1), 0.001-0.01 kg/m² (C2), 0.01-0.1 kg/m² (C3), 0.1-0.6 kg/m² (C4) y 0.6-1.2101 kg/m² (C5), que fueron representados con distintos colores. La escala empieza desde 0.0001 debido a que los valores promedios finales obtenidos fueron redondeados a cuatro decimales. Cabe recalcar que las personas notan el sedimento y caída de ceniza cuando el espesor de la misma es mayor a 0.1 mm. En este estudio no se han utilizado estas unidades ya que el registro del peso constituye una medida más confiable. Sin embargo, se puede asumir una densidad de ceniza en conjunto de 1255 kg/m³ (Parra, et al., 2016) (SNGRE, 2009), para generar los espesores de ceniza, a partir del peso por unidad de área (Tabla 4). Es importante destacar que por la humedad esta puede variar hasta llegar a unos 2400 kg/m³.

Tabla 4 Espesor de la ceniza para los rangos C1, C2, C3, C4 y C5

Rango	kg/m ²	mm
C1	0.0001-0.001	0.00007-0.0007
C2	0.001-0.01	0.0007-0.007
C3	0.01-0.1	0.007-0.07
C4	0.1-0.6	0.04-0.47
C5	0.6-1.2101	0.26-0.52

Por otro lado, para las curvas de probabilidad de 10%, 30%, 50%, 70% y 90% se proyectaron los valores obtenidos en el código y se trazaron las líneas correspondientes a estas probabilidades en el mapa.

Finalmente, la malla con los datos promedio de acumulación de ceniza estacional fue cruzada con los usos de suelo por medio de las herramientas de geoprocésamiento vectorial: Clip, Union e Intersect. Se estableció el número total de poblados, ciudades afectadas y el área total afectada de bosques nativos, cultivos, páramo, vegetación arbustiva, vegetación herbácea. Cada categoría de uso de suelo corresponde a la clasificación del Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG, 2014) y se expone en la Tabla 5.

Tabla 5 Descripción de usos de suelo

Uso de Suelo	Descripción
Bosque Nativo	Área donde predominan diferentes especies de árboles nativos.
Cultivos	Área de especies cultivadas para agricultura y con fines pecuarios
Páramo	Área de vegetación herbácea y arbustiva correspondiente al ecosistema de páramo.
Vegetación Arbustiva	Área con especies leñosas no arbóreas
Vegetación Herbácea	Área con especies herbáceas nativas de crecimiento espontáneo que no reciben cuidado ni se utilizan para pastoreo

Para una correcta gestión de riesgos es necesario entender la cantidad de ceniza que se acumula en las diferentes áreas afectadas. Para esto, se utilizó MATLAB de tal manera que se logró encontrar el área afectada por estación para cada rango de ceniza propuesto (C1, C2, C3, C4, C5). Adicionalmente, se determinó la afectación por tipo de cultivo.

El geoprocesamiento espacial se realizó con las capas de uso de suelo de libre acceso del ministerio de agricultura y ganadería (MAG, 2014) y los archivo tipo *shapefile* de poblados y zonas urbanas del Instituto Geográfico Militar (IGM, 2013). Adicionalmente, la capa base corresponde a la capa satelital de Google Maps (Montoya, 2018).

4. RESULTADOS

4.1 Mapas de acumulación de ceniza volcánica estacionales

Se identificaron las diferentes áreas afectadas por la acumulación ceniza según el periodo de análisis. El mapa de sedimento de ceniza sin distinciones estacionales con sus respectivas curvas de probabilidad se muestra en la Figura 6.

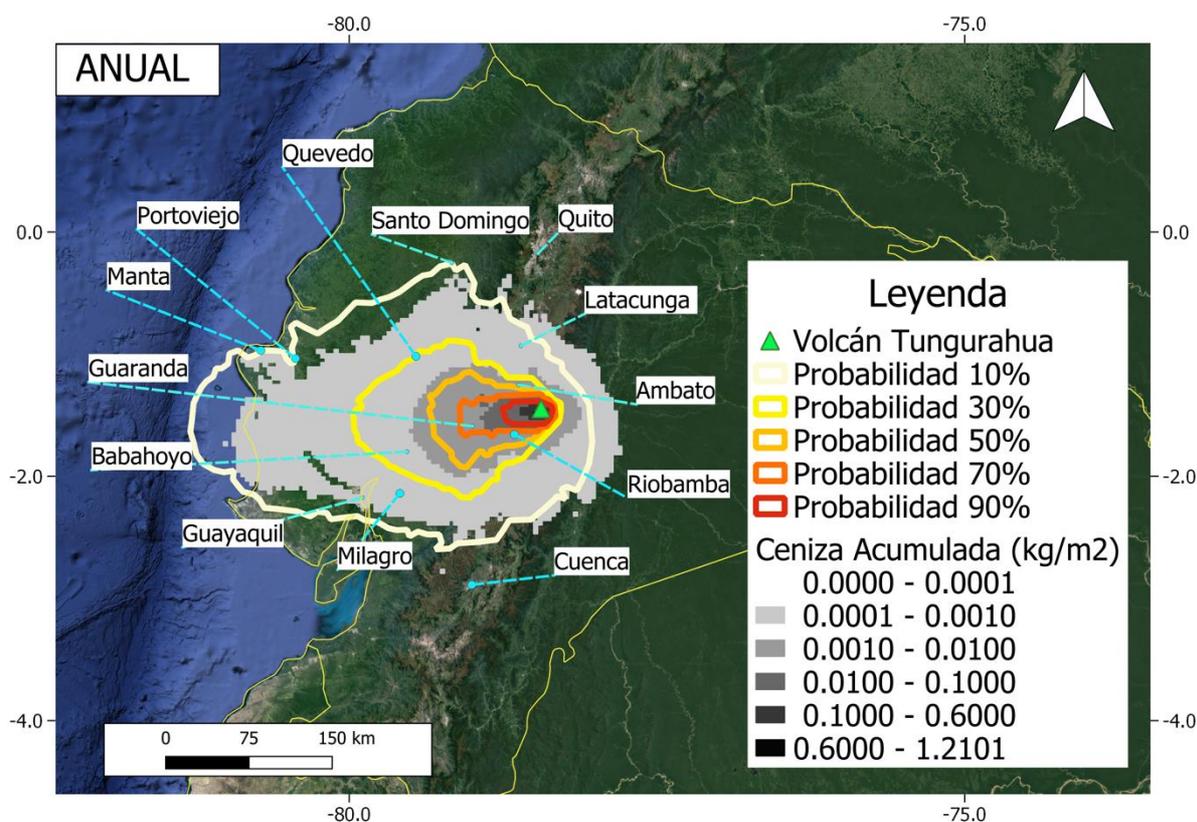


Figura 6 Mapa anual de sedimentación de ceniza y curvas de probabilidad

Por otro lado, los mapas de acumulación de ceniza estacionales se presentan en las Figuras 7, 8, 9 y 10. En estos se puede ver una diferencia entre los periodos secos (MJJ-ASO) y lluviosos (NDE-FMA). En los meses de lluvia, la ceniza se deposita en zonas más cercanas al volcán. Si bien la tendencia de dispersión predomina hacia el oeste, no tiene el mismo alcance que el de los meses secos, donde podría llegar hasta en el Océano Pacífico. También en los meses lluviosos, la ceniza llega a depositarse en áreas más alejadas en dirección sur, norte y este del

volcán, comparadas con las zonas afectadas desde mayo a octubre. De hecho, en los meses de verano se observa una dispersión marcada de este a oeste.

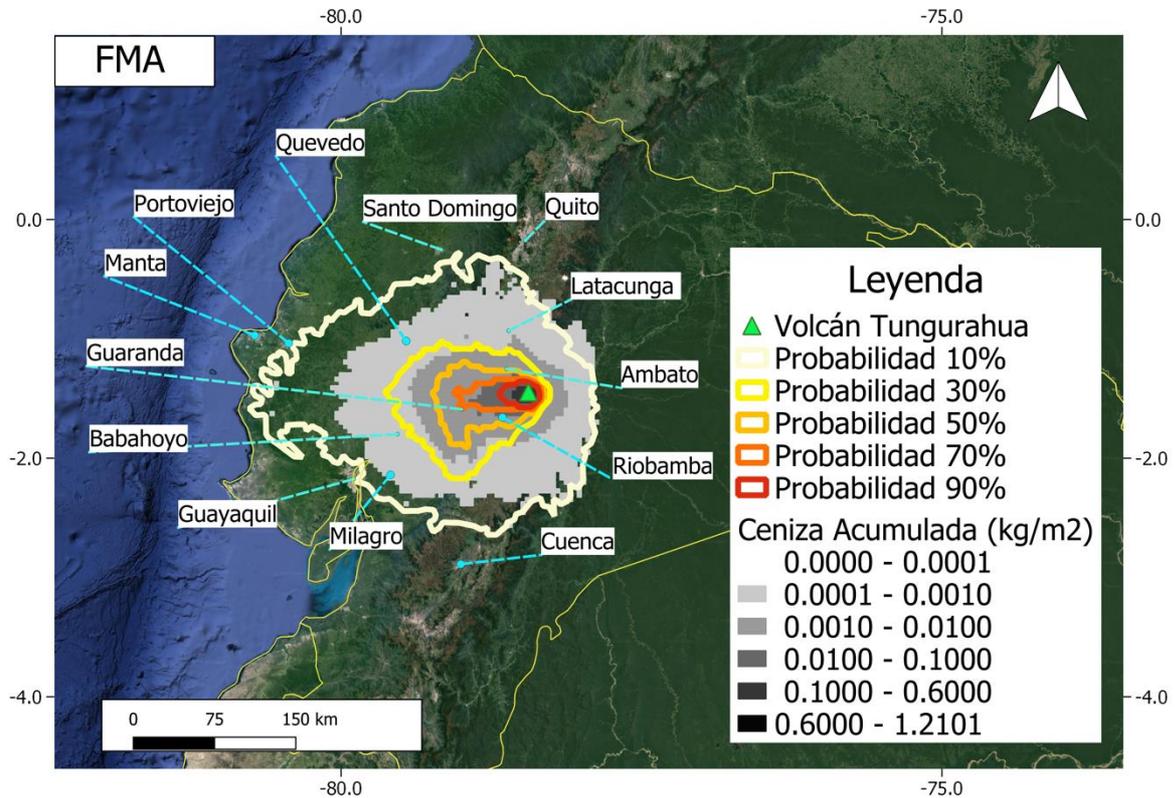


Figura 7 Mapa de sedimentación de ceniza para el periodo de febrero-marzo-abril y curvas de probabilidad

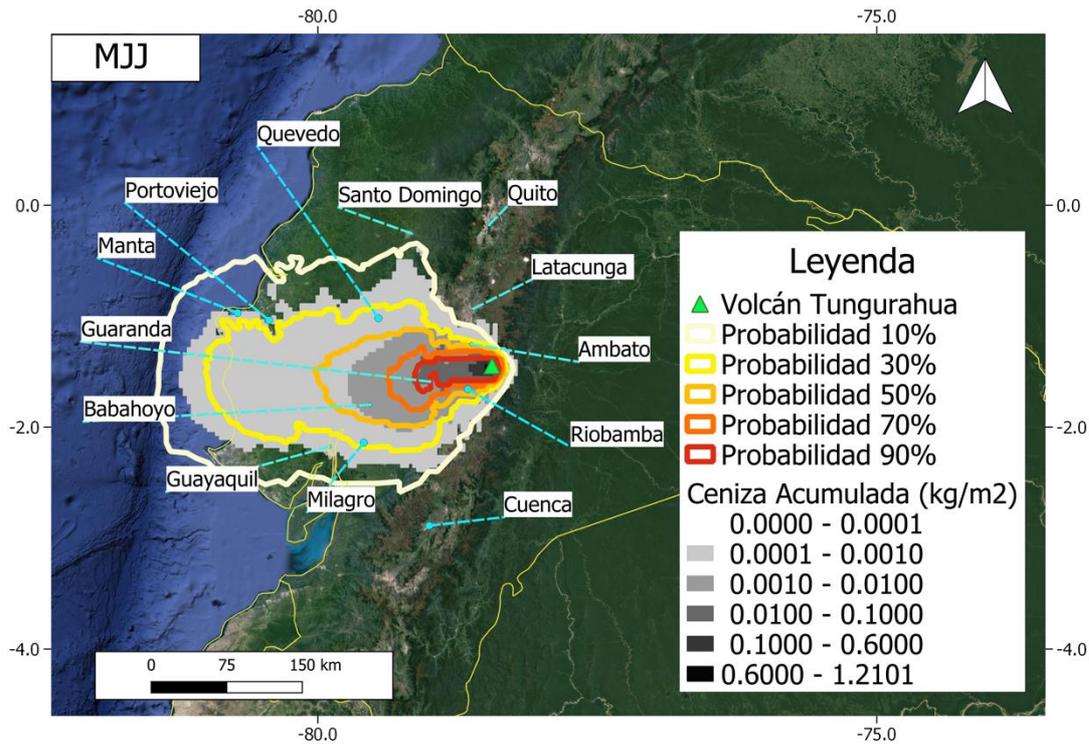


Figura 8 Mapa de sedimentación de ceniza para el periodo de mayo-junio-julio y curvas de probabilidad

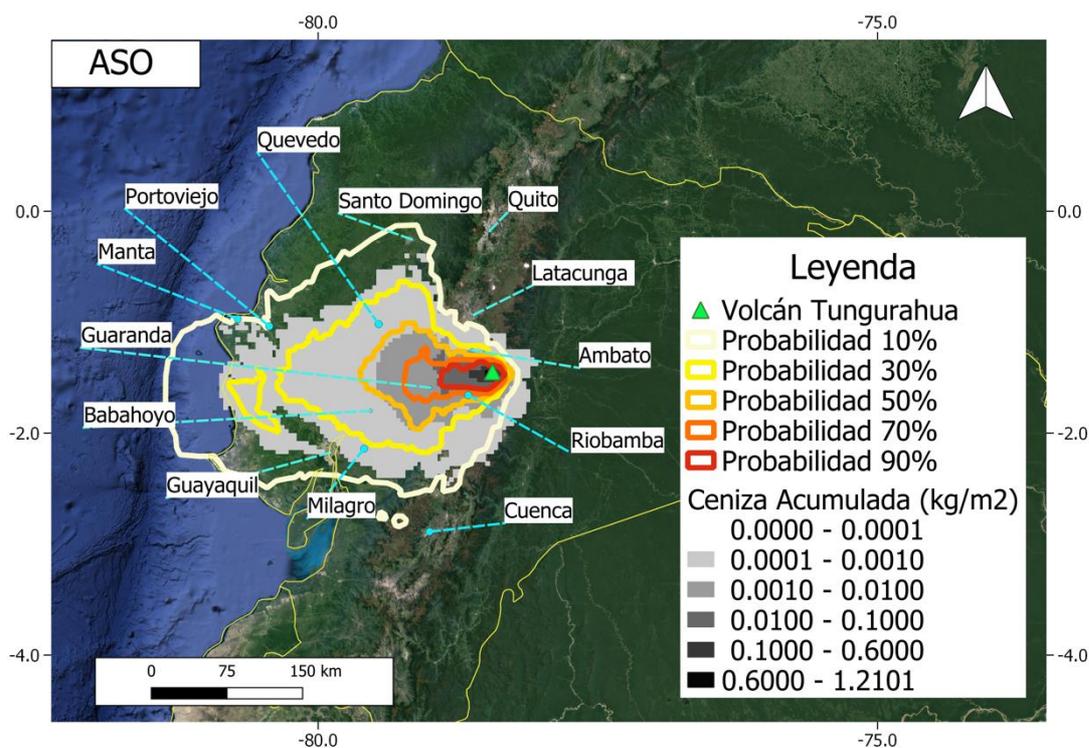


Figura 9 Mapa de sedimentación de ceniza para el periodo de agosto-septiembre-octubre y curvas de probabilidad

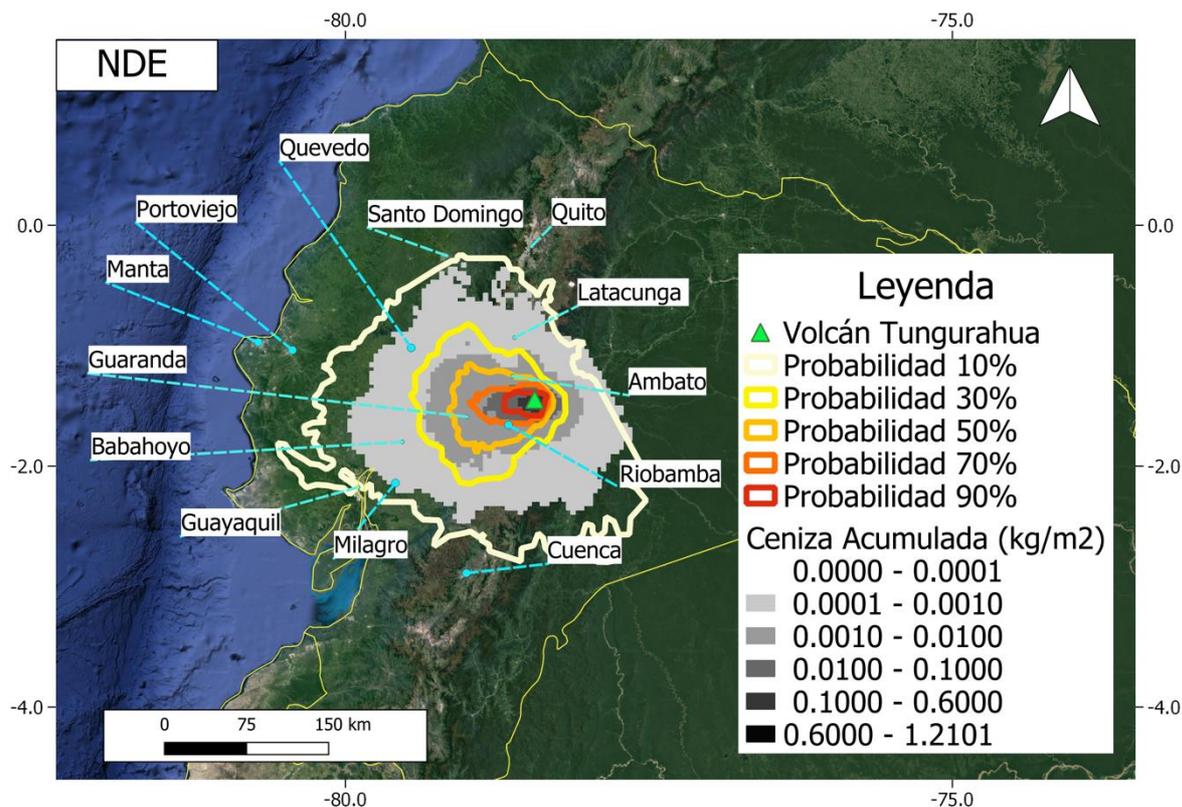


Figura 10 Mapa de sedimentación de ceniza para el periodo de noviembre-diciembre-enero y curvas de probabilidad

El área total afectada para cada periodo estacional se muestra en la Tabla 4.

Tabla 6 Área afectada por la acumulación de ceniza estacional (> 0.0001 kg/m²)

Periodo	Estación	Área total afectada (km ²)
FMA	Lluvioso	37 753.70
MJJ	Transición	45 015.70
ASO	Seco	40 912.70
NDE	Transición	38 679.20
ANUAL	-	52 736.30

4.2 Estimación estacional de poblaciones y ciudades principales afectadas

Se identificaron las poblaciones del Ecuador que incluyen cabeceras cantonales, cabeceras parroquiales, recintos y capitales provinciales; afectadas por el sedimento de ceniza volcánica (Figura 11).

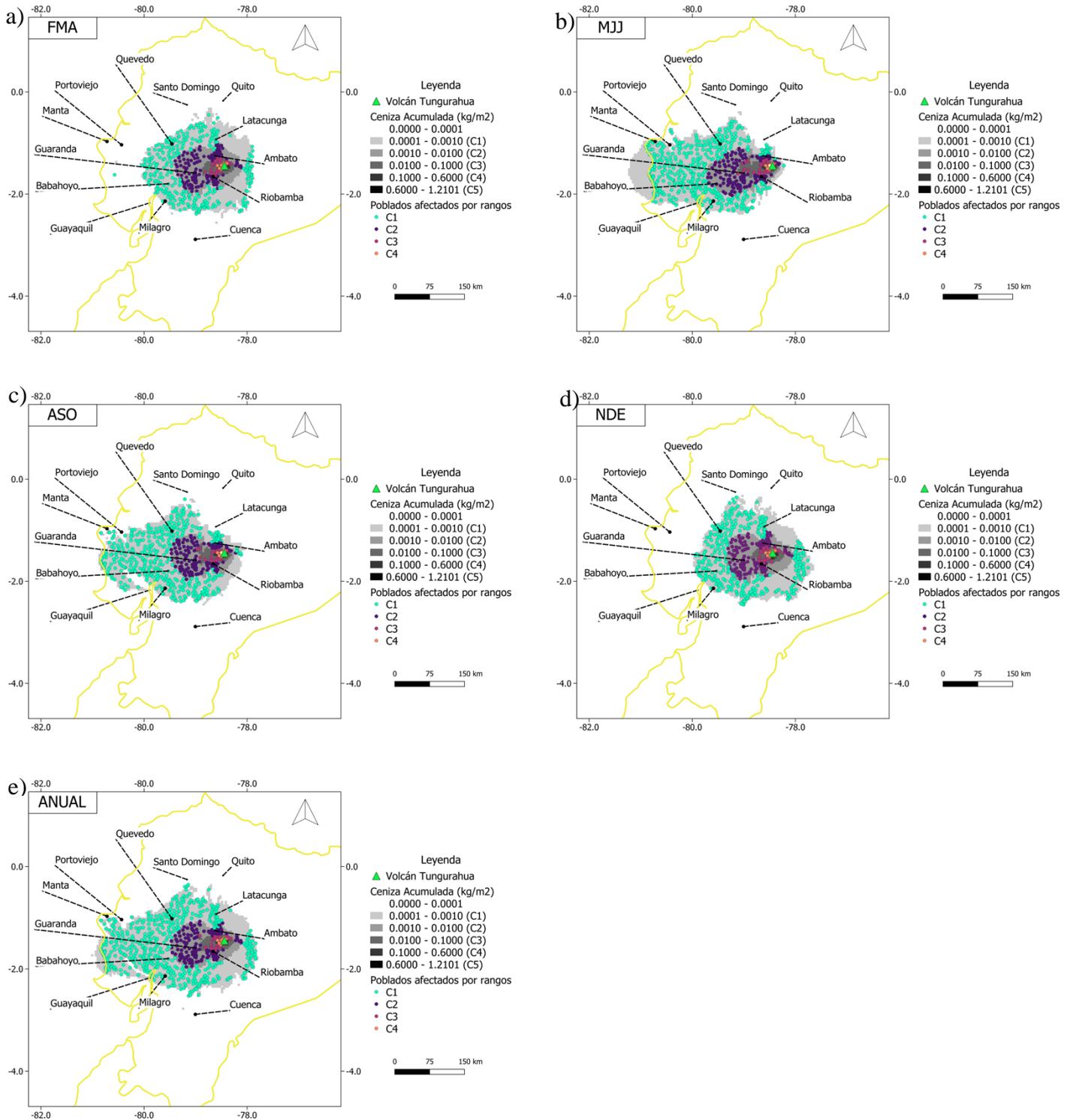


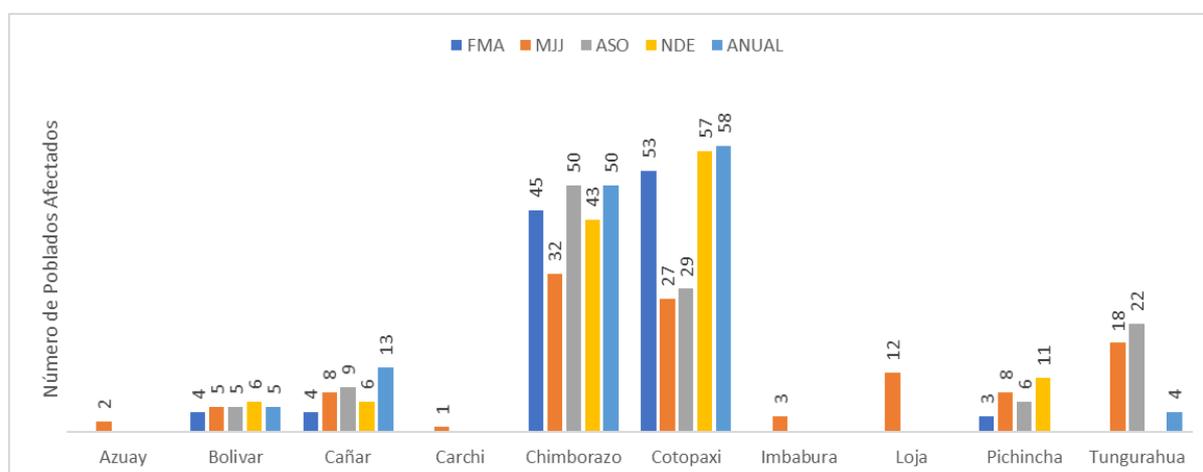
Figura 11 Mapas estacionales de poblados afectados en los diferentes rangos de acumulación de ceniza volcánica.

La sedimentación de ceniza volcánica afecta a poblados en la Sierra, Costa y Oriente. El número total de poblados afectados por periodo y las principales ciudades se muestra en la Tabla 7.

Tabla 7 Número de poblados y ciudades principales afectadas por periodo

Periodo	Número total de poblados afectados	Ciudades principales afectadas
FMA	497	Ambato, Babahoyo, Guaranda, Latacunga, Macas, Milagro, Puyo, Quevedo, Riobamba
MJJ	596	Ambato, Babahoyo, Guaranda, Guayaquil, Manta, Milagro, Quevedo, Riobamba
ASO	578	Ambato, Babahoyo, Guaranda, Milagro, Quevedo, Riobamba
NDE	512	Ambato, Babahoyo, Guaranda, Latacunga, Macas, Milagro, Puyo, Quevedo, Riobamba
ANUAL	692	Ambato, Babahoyo, Guaranda, Guayaquil, Latacunga, Milagro, Puyo, Quevedo, Riobamba

Para el rango de menor impacto C1 (0.0001-0.001 kg/m²), la mayor cantidad de poblados afectados se localizan en las provincias de Guayas (159 en MJJ), Los Rios (81 en NDE), Manabi (81 en MJJ), Chimborazo (50 en ASO) y Cotopaxi (57 en NDE) (Figuras 12 y 13). Además, se observa una variación entre los diferentes periodos de estudio. El periodo de mayor afectación fue NDE. En la amazonia ecuatoriana las provincias con mayor afectación promedio fueron las de Morona Santiago y Pastaza, especialmente durante NDE. Sucumbíos y Zamora Chinchipe solo se vieron comprometidas en MJJ. Por otro lado, en la costa ecuatoriana las provincias de El Oro y Esmeraldas solo fueron afectadas durante MJJ.

**Figura 12** Número de poblados por provincia de la Sierra donde el sedimento de ceniza corresponde al rango de acumulación C1

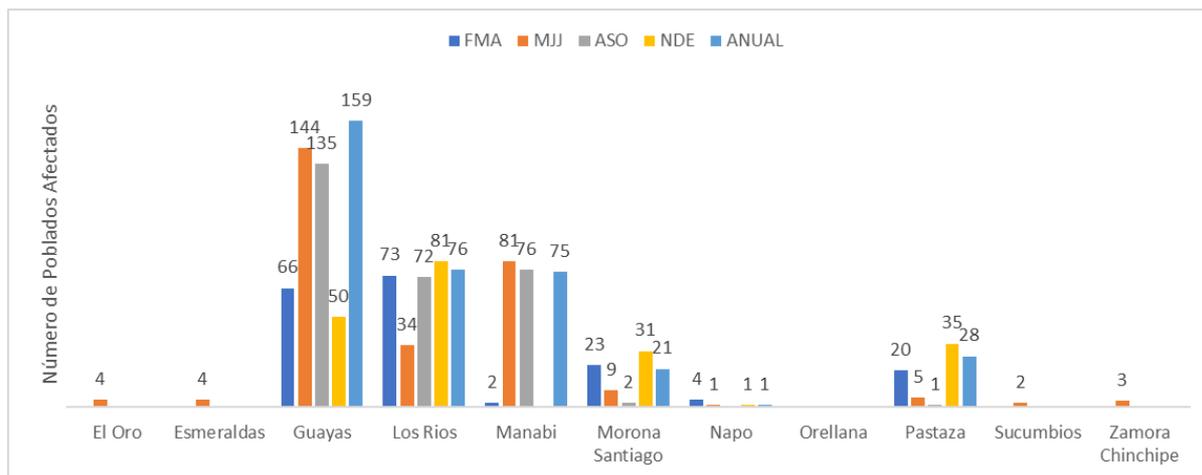


Figura 13 Número de poblados por provincia de la Costa y Oriente donde el sedimento de ceniza corresponde al rango de acumulación C1

Como se muestra en las Figuras 14 y 15, las provincias más afectadas con una acumulación de ceniza dentro del rango C2 ($0.001-0.01 \text{ kg/m}^2$) son Bolívar (62 en FMA), Tungurahua (40 en NDE) y Los Ríos (32 en MJJ). No existe una variación importante entre la cantidad de poblados afectados en la Sierra durante los diferentes periodos de análisis. Sin embargo, en la Costa y Oriente existe una diferencia marcada. Un mayor número de poblados de estas regiones se ven comprometidos durante MJJ y solo en estos meses se observan impactos en las provincias de Esmeraldas, Guayas, Manabí, Napo, Orellana y Zamora Chinchipe (Figura 15)

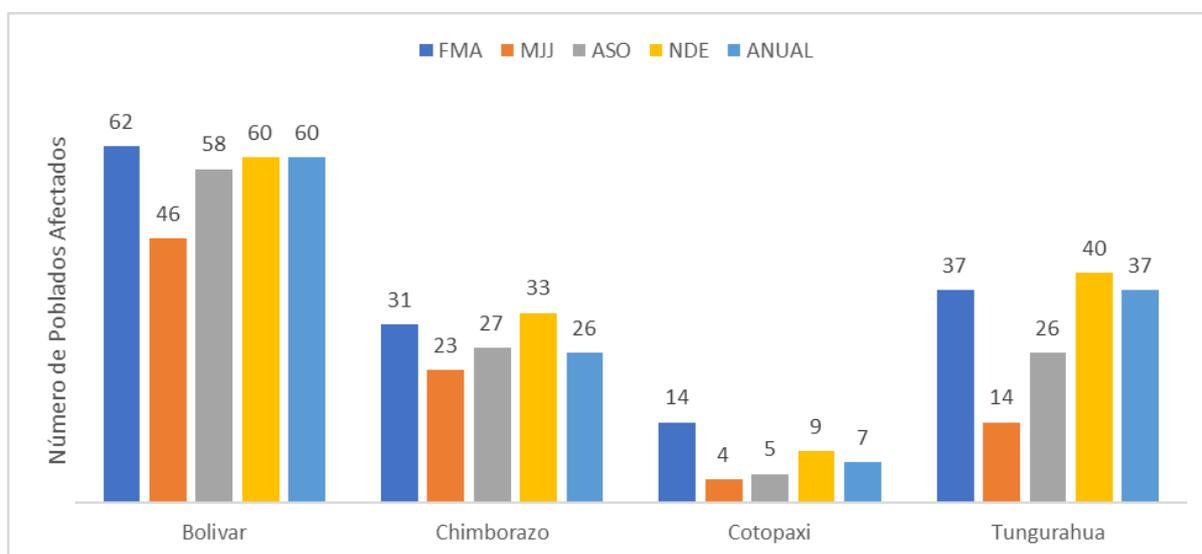


Figura 14 Número de poblados por provincia de la Sierra donde el sedimento de ceniza corresponde al rango de acumulación C2

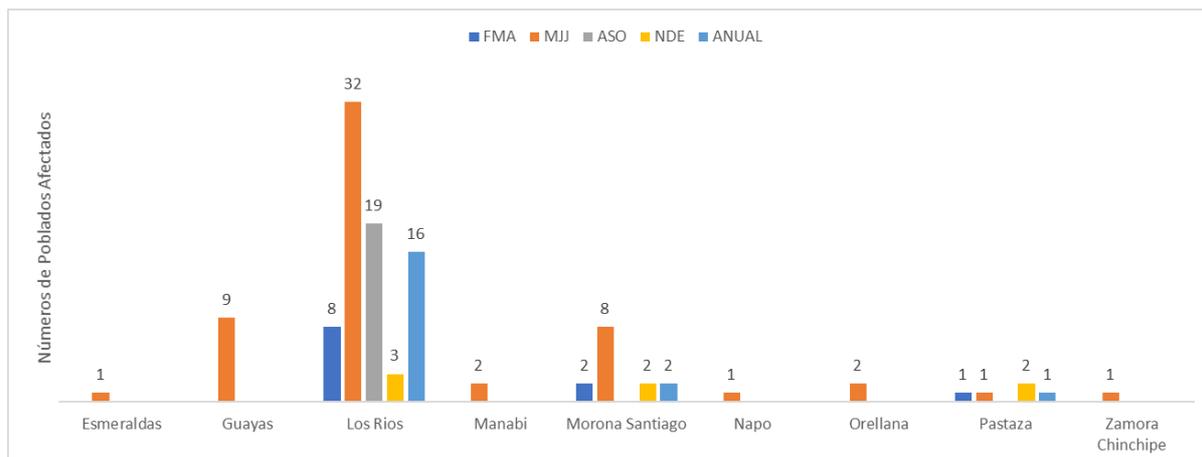


Figura 15 Número de poblados por provincia de la Costa y Oriente donde el sedimento de ceniza corresponde al rango de acumulación C2

Al analizar los poblados afectados por el sedimento de ceniza correspondiente a al rango C3 ($0.01-0.1 \text{ kg/m}^2$) se observa que la provincia de Tungurahua tiene la mayor cantidad de poblados comprometidos (20 en FMA) y que las provincias de la Costa y Oriente solo reciben este sedimento de ceniza en MJJ. (Figura 16)

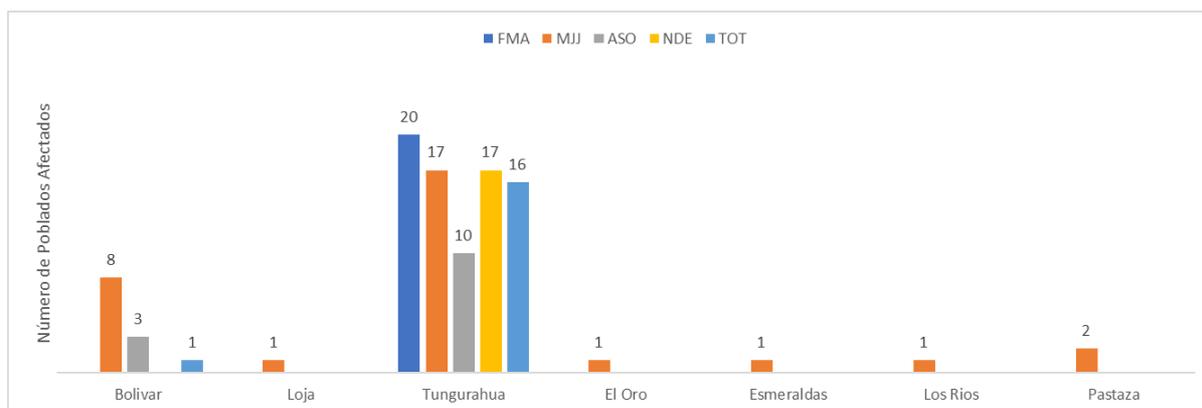


Figura 16 Número de poblados por provincia donde el sedimento de ceniza corresponde al rango de acumulación C3

Solamente poblados de Tungurahua y Chimborazo se afectan con un sedimento de ceniza de $0.1-0.6 \text{ kg/m}^2$ (C4) (Figura 17). El número de poblados, a diferencia de los otros rangos de acumulación de ceniza, permanece constante, para todos los periodos de estudio. Al contrario, el sedimento de $0.6-1.21 \text{ kg/m}^2$ (C5) solamente llega a dos poblados en Chimborazo en los meses secos (mayo, junio, julio, agosto, septiembre y octubre).

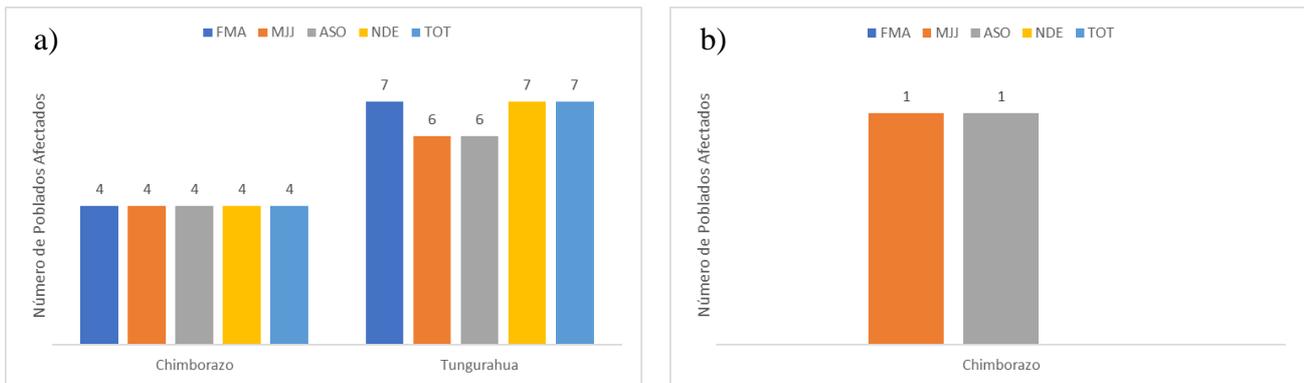


Figura 17 Número de poblados por provincia donde el sedimento de ceniza corresponde al rango de acumulación C4 y C5

El literal a muestra el número de poblados afectados por la sedimentación de ceniza correspondiente a $0.1-0.6 \text{ kg/m}^2$ (C4) mientras que el literal b representa una acumulación de $0.6-1.21 \text{ kg/m}^2$ (C5).

4.3 Afectación por tipo de uso de suelo

Los mapas de afectación de suelo estacionales por la erupción de ceniza del volcán Tungurahua se presentan en las Figuras 18-22.

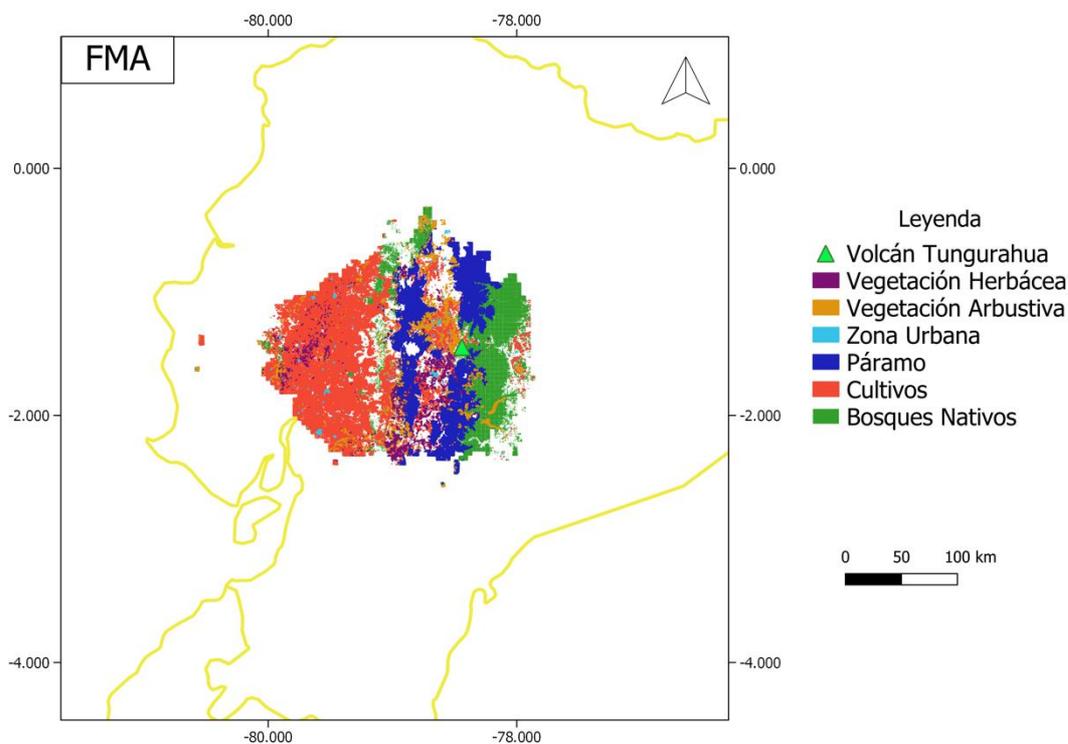


Figura 18 Mapa de afectación por tipo de suelo para el periodo de febrero, marzo y abril

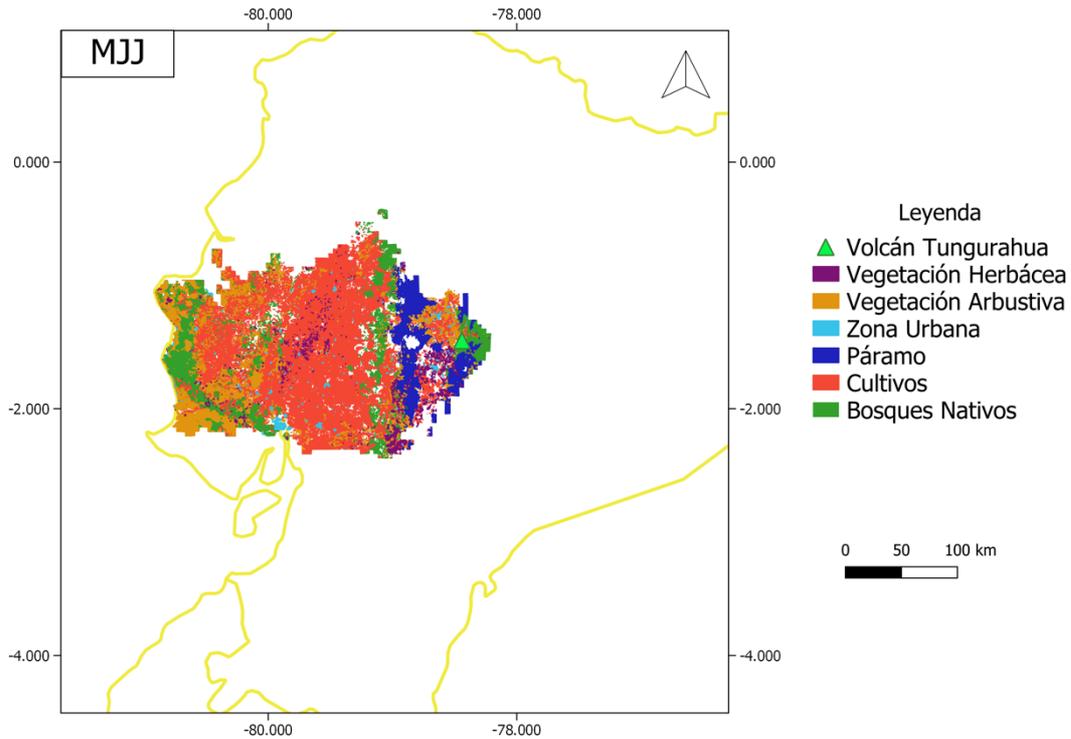


Figura 19 Mapa de afectación por tipo de suelo para el periodo de mayo, junio y julio

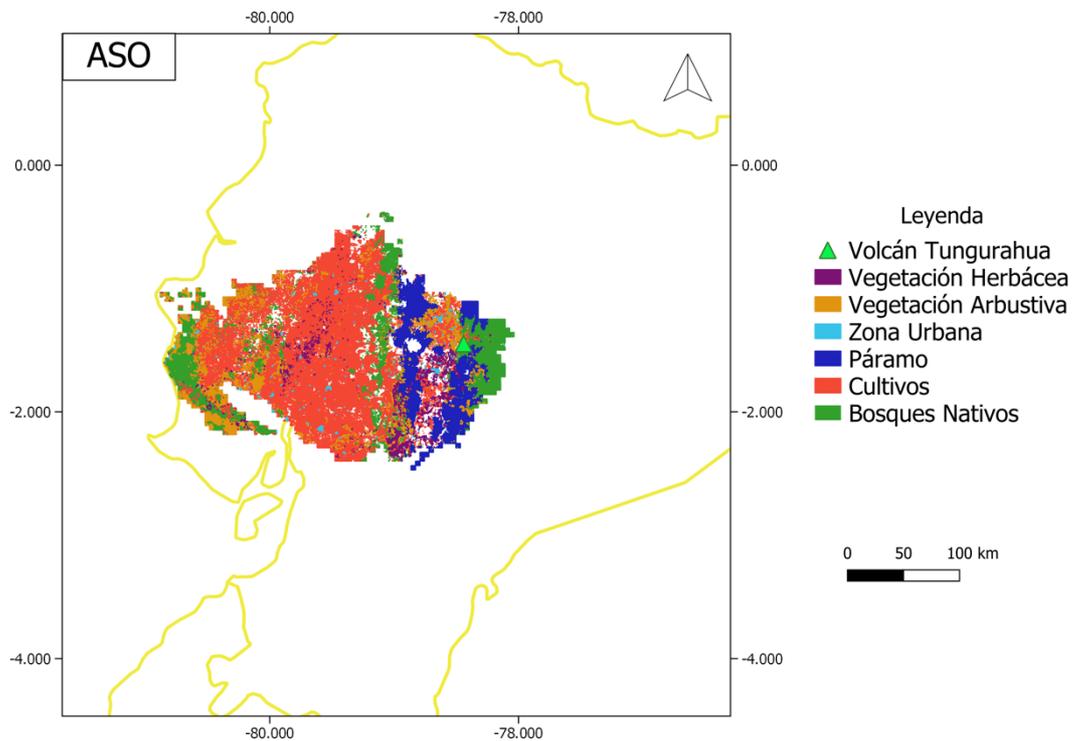


Figura 20 Mapa de afectación por tipo de suelo para el periodo de agosto, septiembre, octubre

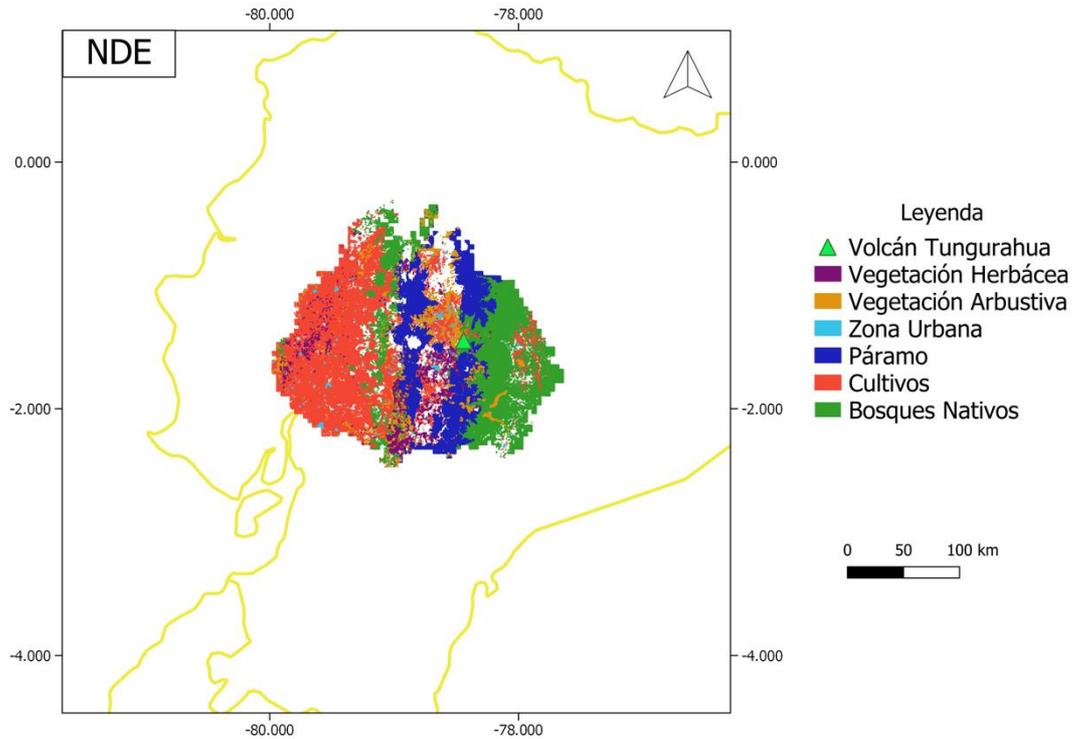


Figura 21 Mapa de afectación por tipo de suelo para el periodo de noviembre, diciembre, enero

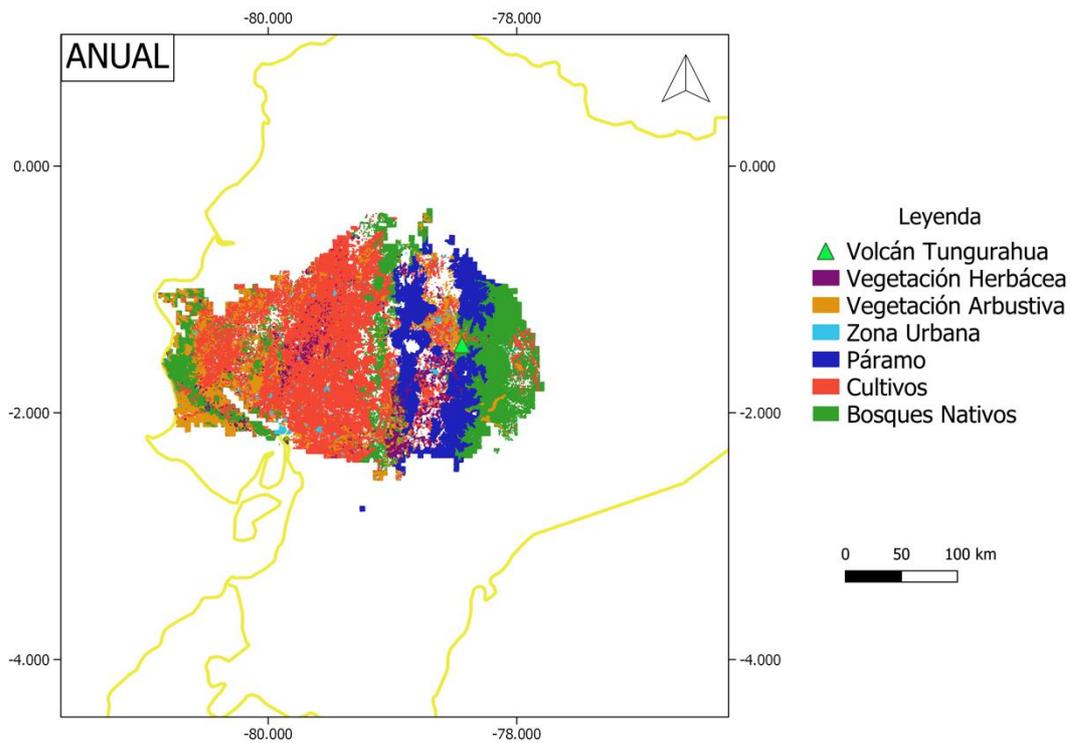


Figura 22 Mapa de afectación por tipo de suelo anual

La Tabla 6 presenta el área total afectada por uso de suelo y por periodo. Para el periodo anual, las categorías más afectadas corresponden a páramo, bosque nativo y cultivos, sin embargo, los cultivos y la vegetación arbórea se ven menos afectados durante los meses lluviosos (FMA y NDE). Por otro lado, los suelos de páramo y bosques nativos se ven menos afectados durante los meses secos (MJJ y ASO).

Tabla 8 Área afectada (km²) por uso de suelo por periodo

Periodo	Páramo	Vegetación Arbórea	Vegetación Herbácea	Zona Urbana	Bosques Nativos	Cultivos
FMA	5780	522	395	128	7852	7520.9
MJJ	2618.6	2004.6	374.2	234.9	6670.1	10 509.7
ASO	3920.5	1124.5	418.4	147.7	7018.8	10 293.0
NDE	5395.0	493.4	404.5	120.2	8332.5	7351.9
ANUAL	5481.1	1609.6	438.8	212.9	10 983.8	10 755.9

A mayor alcance del sedimento de ceniza, se afecta en mayor grado los diferentes tipos de suelo. Para el rango de menor sedimento C1, se afectan en mayor medida las categorías de bosque nativo, páramo y cultivos, especialmente esta última categoría en ASO (Figura 23). Por otro lado, las zonas urbanas se ven menos afectadas durante los meses de lluvia (NDE, FMA) y el páramo en los meses secos (MJJ y ASO).

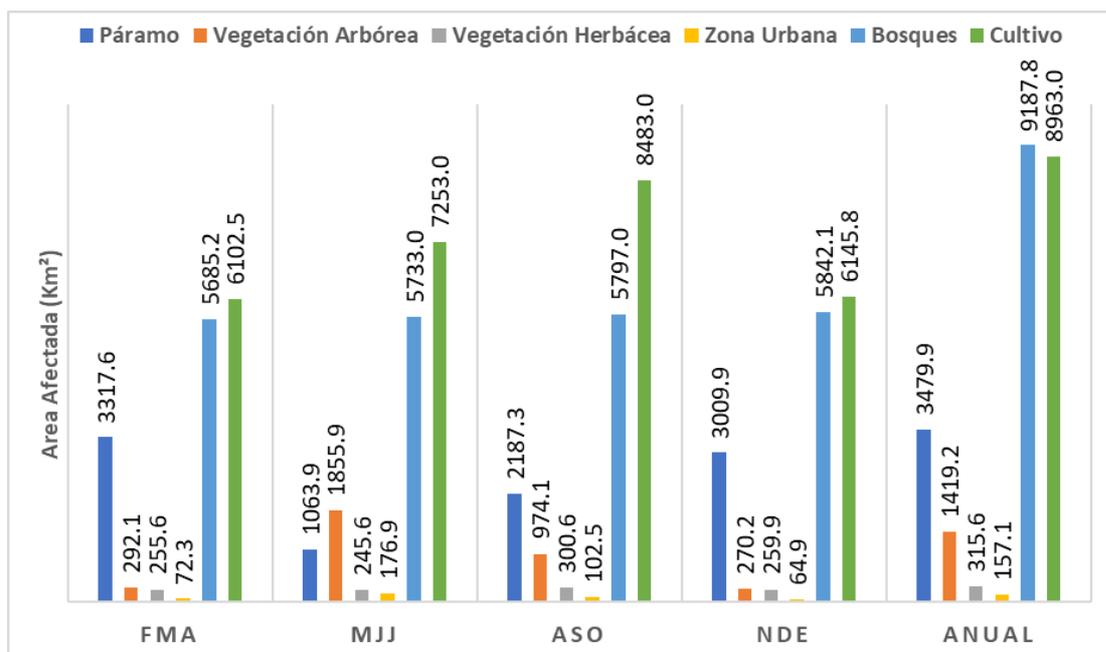


Figura 23 Área afectada por tipo de suelo dentro del rango de acumulación de ceniza C1

Para el rango de acumulación de ceniza C2 el uso de suelo más afectado es de cultivos, durante el periodo de MJJ; seguido por el páramo y los bosques nativos, entre noviembre y abril (Figura 24). La afectación al resto de usos de suelo, a excepción de los cultivos, varía ligeramente durante el año.

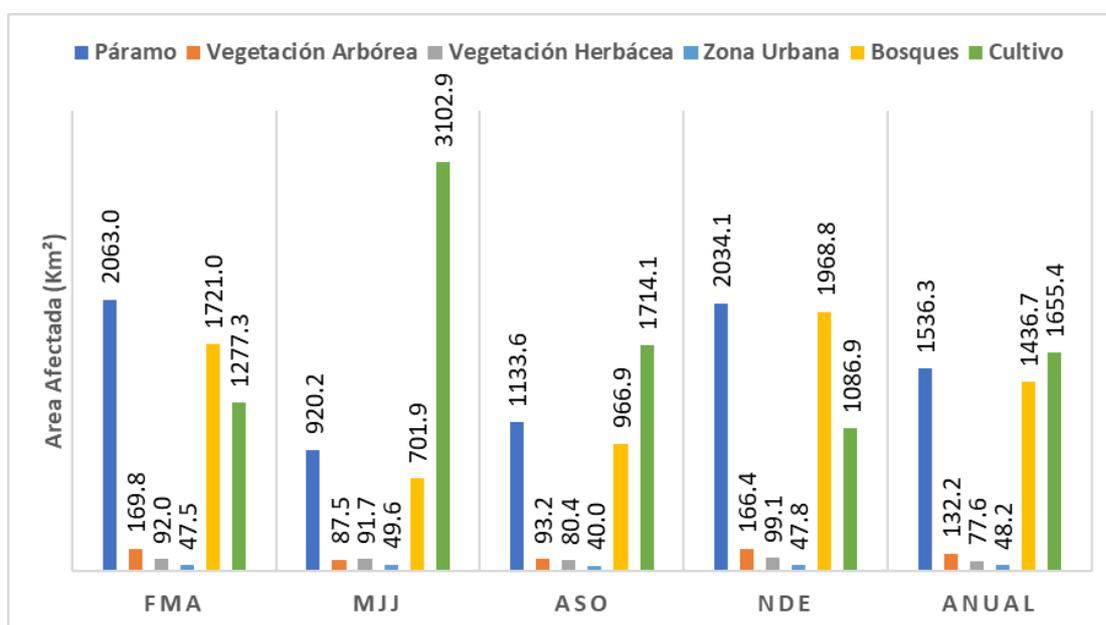


Figura 24 Área afectada por tipo de suelo dentro del rango de acumulación de ceniza C2

Al igual que en los rangos de acumulación de ceniza C1 y C2 en el rango C3 el páramo resulta uno de los tipos de suelo más afectados especialmente en los meses secos (Figura 25). Por otro lado, los bosques nativos se ven más comprometidos en los meses lluviosos. Adicionalmente el área del resto de suelos afectados se mantiene durante el año.

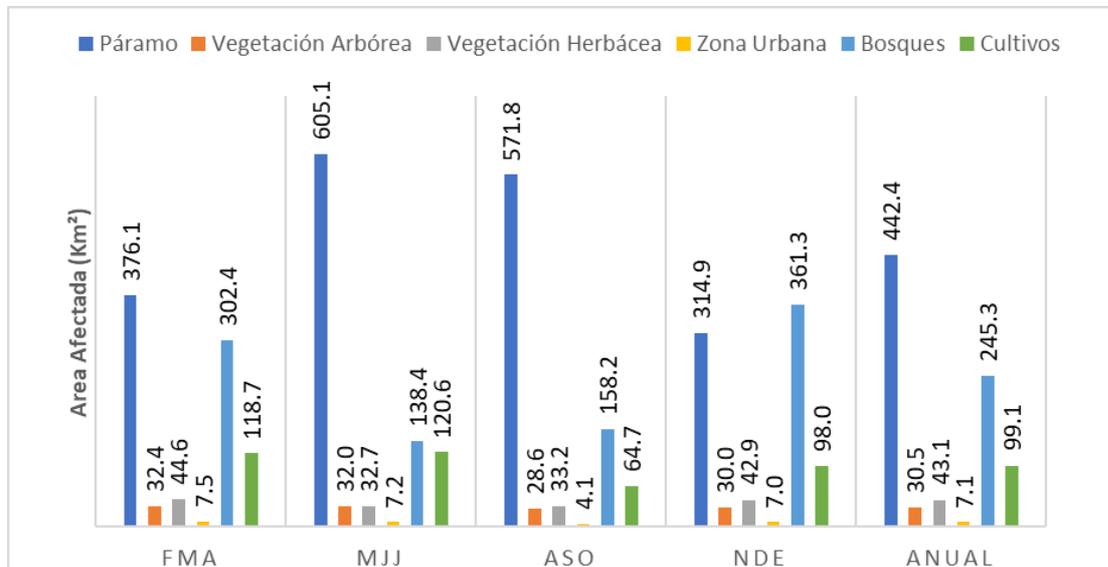


Figura 25 Área afectada por tipo de suelo dentro del rango de acumulación de ceniza C3

Para el rango de sedimento C4 el bosque nativo es el tipo de suelo más afectado en FMA y NDE. El resto de tipos de suelo se afectan de manera relativamente constante durante todo el año (Figura 26). Finalmente, para el rango de mayor acumulación de ceniza, C5 el área afectada por tipo de suelo en los diferentes periodos de estudio es relativamente constante (Figura 27).

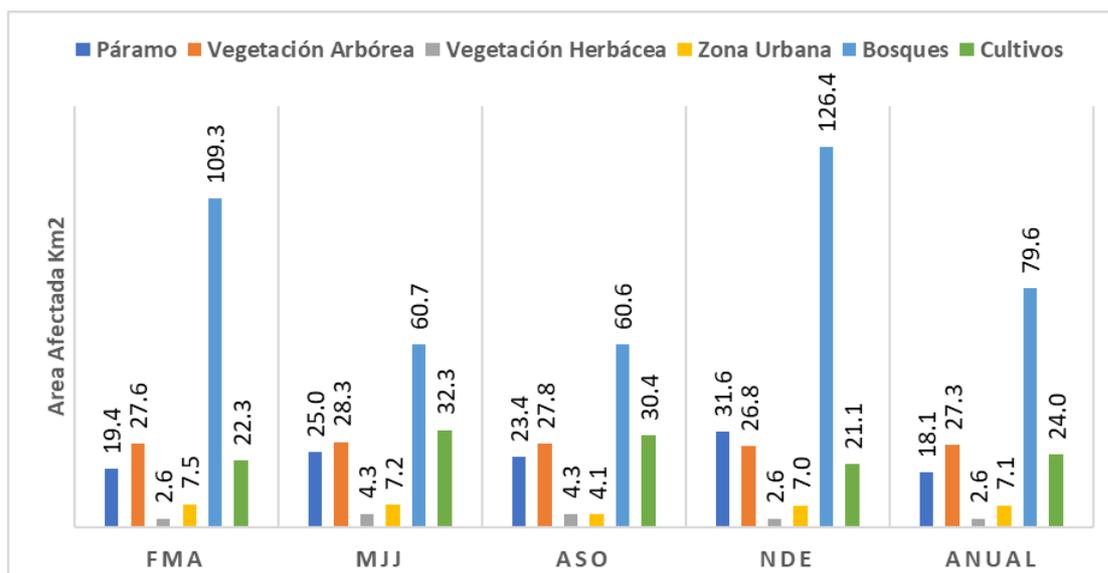


Figura 26 Área afectada por tipo de suelo dentro del rango de acumulación de ceniza C4

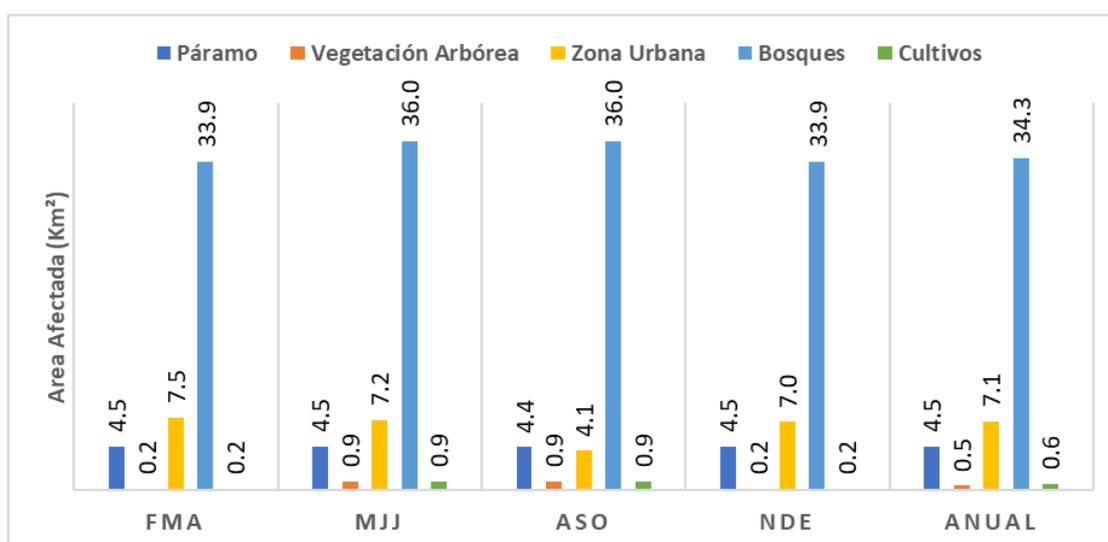


Figura 27 Área afectada por tipo de suelo dentro del rango de acumulación de ceniza C5

4.4 Afectaciones estacionales al suelo agrícola por tipo de cultivo

El sedimento de ceniza afecta a diferentes tipos de cultivos en los periodos de estudio. En promedio, 14 tipos de cultivos se ven afectados. Las tablas 9 y 10 indican el área afectada para cada rango de acumulación de ceniza y por cultivo, para los periodos de NDE Y FMA respectivamente. Los cultivos con impacto en la mayoría de los rangos son el maíz y la papa. Hay extensas áreas de afectación para cultivos como el arroz, banano, cacao y maíz.

Tabla 9 Área (km²) de productos agrícolas afectados en noviembre, diciembre y enero

Producto	C1	C2	C3	C4	C5
Arroz	1726.5	0.5			
Banano	715.6	2.9			
Cacao	1025.7	212.2			
Café	0.1				
Cana de Azucar	322.9				
Chia	0.51				
Maiz	1538.6	303.3	44.1	11.7	0.1
Palma Africana	357.7	2.4			
Palmito	6.1				
Papa	24.4	36.3	2.3	1.9	
Tabaco	17.8	0.1			
Te	7.4				
Otro	400.9	529.1	51.6	7.4	0.1

Tabla 10 Área (km²) de productos agrícolas afectados en febrero, marzo y abril

Producto	C1	C2	C3	C4	C5
Arroz	1689.3	14.6			
Banano	675.3	17.6			
Cacao	899.7	295.7			
Café	20.5				
Caña de Azúcar	497.9				
Chía	0.5				
Maíz	1560.1	409.6	53.7	12.2	
Palma Africana	309.6	13.8			0.1
Palmito	1.8				
Papa	26.6	30.3	5.9	1.9	
Tabaco	18.1	0.2			
Te	7.4				
Otro	395.7	495.6	59.1	8.1	

El área de afectación de cultivos para los periodo MJJ y ASO se presenta en las tablas 11 y 12 respectivamente. Se observa, aunque en áreas muy pequeñas, nuevos cultivos afectados, como la paja toquilla y la abaca.

El maíz y la papa presentan afectaciones en todos los rangos de acumulación de ceniza. Los productos con área más comprometida son el arroz, banano, cacao y maíz.

Tabla 11 Área (km²) de productos agrícolas afectados en mayo, junio y julio

Producto	C1	C2	C3	C4	C5
Abaca	0.3				
Arroz	1884.6	822.3			
Banano	475.5	350.2			
Cacao	1155.1	483.8	0.1		
Café	484.1				
Caña de Azúcar	579.3	22.2			
Chía	0.5				
Maíz	1795.4	885.5	61.9	17.3	0.2
Paja Toquilla	7.4				
Palma Africana	364.1	44.9			
Palmito	2.2				
Papa	23.9	21.6	5.3	2.1	0.2
Tabaco	27.3	2.4			
Otro	453.6	469.9	53.4	12.9	0.3

Tabla 12 Área (km²) de productos agrícolas afectados en agosto, septiembre y octubre

Producto	C1	C2	C3	C4	C5
Abaca	2.3				
Arroz	2386.8	132.4			
Banano	811.7	88.7			
Cacao	1323.1	364.9			
Café	476.7				
Caña de Azúcar	589.9				
Chia	0.5				
Maíz	1923.3	590.9	28.8	16.9	0.3
Paja Toquilla	7.4				
Palma Africana	442.1	30.9			
Palmito	4.3				
Papa	32.2	21.4	6.9	1.7	0.2
Pimienta	0.1				
Tabaco	32.7	1.0			
Otro	449.9	484.9	29.3	11.8	0.3

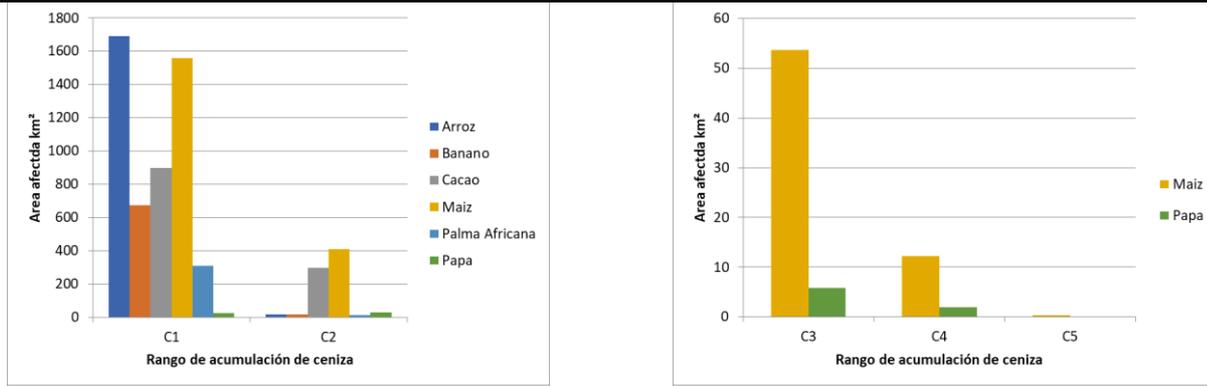
Los tipos de cultivos afectados para el periodo anual se muestran en la Tabla 11. Las afectaciones se ven similares a las obtenidas con el análisis estacional a diferencia de que algunos productos como la abaca, la pimienta y el té.

Tabla 13 Área en km² de productos agrícolas afectados en el análisis anual

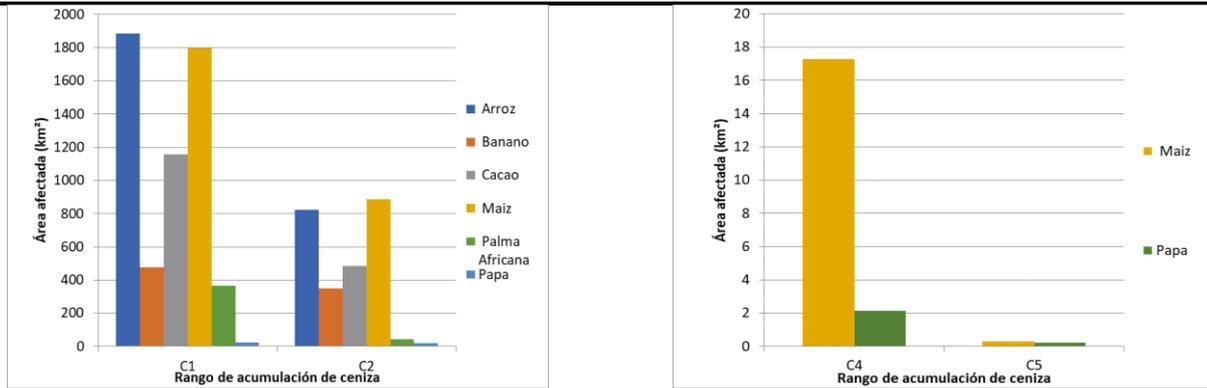
Producto	C1	C2	C3	C4	C5
Arroz	2476.1	201.8			
Banano	810.4	92.1			
Cacao	1338.2	347.6			
Café	479.5				
Cana de Azucar	627.9				
Chia	0.5				
Maiz	2160.1	477.7	43.5	12.2	0.3
Paja	7.4				
Toquilla					
Palma Africana	453.6	16.7			
Palmito	4.7				
Papa	32.4	24.2	6.6	1.7	0.2
Tabaco	32.8	32.8			
Otro	529.9	494.4	48.9	10.1	0.1

La cantidad de sedimento es relevante para entender la afectación que existirá en los diferentes cultivos y usos del suelo. El banano, arroz, cacao y maíz tienen la probabilidad de recibir cantidades pequeñas de sedimento de ceniza dentro del rango C1 y C2, especialmente en los meses secos (MJJ y ASO). Por otro lado, el maíz y la papa son los únicos cultivos afectados por rangos de sedimento más alto especialmente en los meses lluviosos (NDE y FMA) (C3, C4 y C5). (Figura 28)

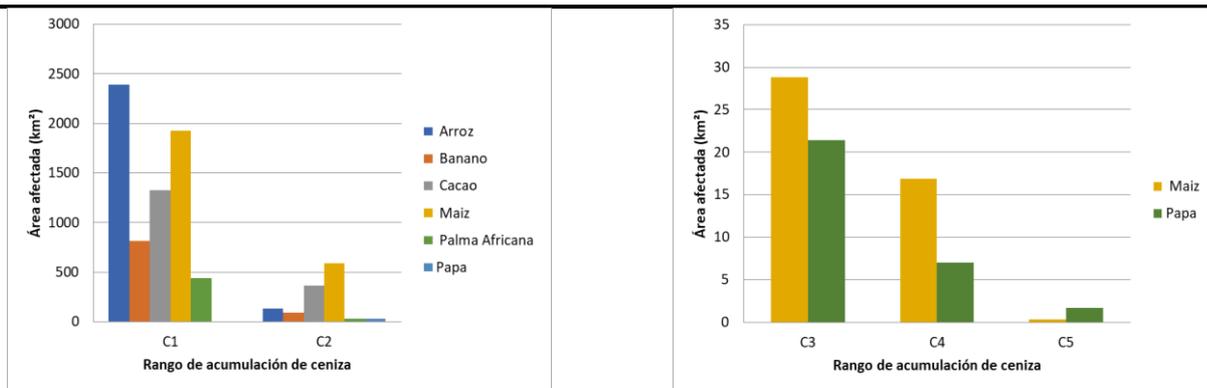
FMA



MJJ



ASO



NDE

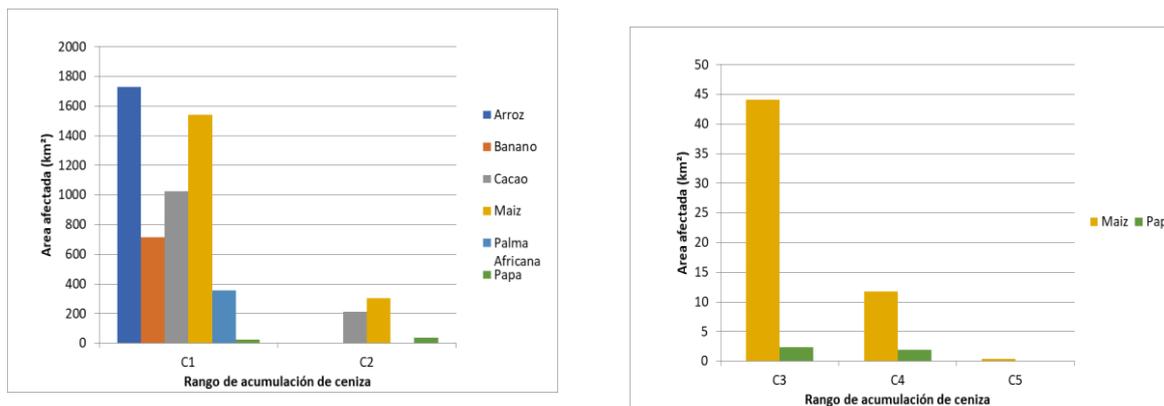


Figura 28 Comparación de áreas afectadas de cultivos principales por periodo

5. DISCUSIÓN

Las tendencias anuales de sedimentación de ceniza identificadas en este análisis concuerdan cualitativamente con mapas de gestión de riesgo publicados por el IGEPN y algunos estudios sobre la dispersión de ceniza volcánica del Tungurahua (Le Pennec, et al., 2012; Toulkeridis & Zach, 2016; Bernard, et al., 2016; IRD & IGEPN, 2008). El análisis y resultados presentados en esta investigación, cubren un periodo de cuatro años, lo cual ha permitido generar información representativa, en relación a las variaciones estacionales y en el periodo anual. De igual forma, esta investigación contribuye con las curvas de probabilidad, información que no ha sido publicada anteriormente en los mapas de gestión de riesgos del IGEPN (IRD & IGEPN, 2008). En este estudio, adicionalmente los rangos de sedimentación de ceniza se presentan con mayor detalle espacial. En los mapas generados por el IGEPN, las áreas de afectación por la caída de ceniza se dividen en solo dos categorías.

Se identificó una tendencia de sedimentación de ceniza entre mayo a octubre y de noviembre a abril. Durante los periodos MJJ y ASO, la ceniza se deposita en dirección marcada hacia el oeste del cráter, pudiendo llegar incluso hasta el Océano Pacífico. En estos meses, la dispersión hacia otras direcciones presenta menor probabilidad. Por otro lado, durante el periodo de NDE y FMA, la ceniza se sedimenta en todas las direcciones, formando una dispersión más simétrica.

Se sugieren posibles razones para explicar este comportamiento. Una de ellas corresponde a los patrones de viento sobre el cráter del Tungurahua (Figura 5), donde los meses de mayores velocidades de viento (de junio a agosto) corresponden a los meses con mayor alcance de la dispersión de ceniza. De igual forma, las direcciones de las tendencias identificadas son congruentes con las rosas de viento mensuales determinadas por el IGEPN (IGEPN & Orellana, Informe anual de emisiones de SO₂ del volcán Tungurahua 2018, 2018).

Otra razón corresponde al desplazamiento de la Zona de Convergencia Intertropical (ITCZ) que afecta a la región Tropical Andina, la celda de Hadley y la advección de humedad de la Cuenca Amazónica (Moran-Tejada, et al., 2016). Debido a que la Tierra recibe mayor radiación en la zona ecuatorial que en los polos, ésta se calienta diferencialmente y genera celdas de circulación global de la atmósfera. La celda más grande y cerca del Ecuador es la celda de Hadley, en la que el aire caliente y húmedo de la zona ecuatorial sube por convección y luego se dirige hacia los polos. Luego, la corriente de aire se enfría y vuelve a descender hacia la superficie, a una latitud aproximada de 30°, y finalmente retorna hacia la zona ecuatorial. Los vientos que ocurren desde los 30° hacia el ecuador son los alisios y van en dirección convergente hacia el oeste (Wallace & Hobbs, 2006). Este patrón de circulación concuerda con la dirección principal del sedimento de ceniza volcánica, hacia el oeste. Adicionalmente la estacionalidad puede deberse al desplazamiento de la ITCZ. La ITCZ es la zona donde convergen los vientos alisios del norte y del sur muy cerca de la línea ecuatorial (6°). Cuando el hemisferio norte se calienta (meses de verano: Julio) la ITCZ se desplaza hacia el norte. Cuando el hemisferio norte se enfría (meses de invierno: Enero) la ITCZ se desplaza hacia el sur para equilibrar los flujos de energía (Bishcoff & Schneider, 2016). Esto genera en nuestra zona de estudio la interacción de masas de aire con diferente temperatura y humedad, lo que afecta la sedimentación de la ceniza volcánica. Cuando la ITCZ se encuentra en el hemisferio sur (en los meses de lluvia NDE y FMA) el Ecuador se ve influenciado por corrientes de viento húmedas y cálidas que favorecen la sedimentación más proximal de la ceniza volcánica. Varios estudios concluyen que en ambientes húmedos, las partículas de ceniza volcánica tienden a formar agregados, propiciando su pronta sedimentación (Del Bello, Taddeucci, Scarlato, Giacalone, & Cesaroni, 2015). Por otro lado, cuando la ITCZ está en el hemisferio norte (en los meses secos MJJ y ASO), hay masas continentales de aire seco y templado que promueven

la dispersión más alejada del sedimento de ceniza (Celleri, Willems, Buteart, & Feyen, 2007; Moran-Tejada, et al., 2016).

Aunque las razones previamente mencionadas aportan a la estacionalidad del sedimento de ceniza volcánica y seguramente sean las más influyentes, la dispersión de ceniza es un fenómeno complejo, en el que interaccionan muchos otros factores como la temperatura, altura de la pluma, turbulencia, tamaño y composición de la ceniza entre otros. Por esta razón, se sugiere un análisis a mayor profundidad para determinar el conjunto de factores que gobiernan este comportamiento.

Cabe recalcar que las simulaciones analizadas corresponden a una erupción que empieza a las 7 de la mañana. Las erupciones generadas a diferentes horas podrían afectar la dispersión.

Aunque en este estudio se han analizado solamente erupciones vulcanianas, se ha establecido una metodología de análisis que puede ser aplicada en el futuro para otro tipo de erupciones. Adicionalmente, en el estudio solo se ha analizado el sedimento de ceniza. Se encuentra pendiente analizar los resultados de dispersión de la pluma de ceniza a diferentes niveles de vuelo.

Los poblados y ciudades principales afectadas por el sedimento de ceniza concuerdan con lo documentado en la literatura (Parra, et al., 2016; Moreta, 2016; Hidalgo, et al., 2015). Cabe recalcar que las ciudades que están fuera de la curva de 10% de probabilidad tienen menor riesgo de sedimento de ceniza (menos del 10%). Sin embargo, no se descarta la llegada de la misma. Este es el caso de Cuenca, donde en la erupción de febrero de 2014 se registró la llegada de ceniza a la ciudad (ElComercio, 2014). Este caso también resalta la importancia de disponer tanto en análisis histórico como operativo el pronóstico de dispersión de ceniza.

Las diferencias estacionales en torno a poblados afectados y tipos de suelo son de gran utilidad para mejorar la gestión de riesgo. Se identifica un mayor número de poblados afectados en la sierra durante FMA y NDE y en la costa durante MJJ. Los municipios y entidades de gestión

de riesgo podrían trabajar para socializar las consecuencias que la caída de ceniza conlleva y definir planes de acción en caso de presentarse un episodio de este tipo, en especial en las provincias de Tungurahua y Chimborazo, que son las más afectadas por los rangos de ceniza de mayor sedimento. Lo mismo puede ser aplicado para socializar las posibles amenazas que representa la ceniza a cultivos o pastizales. Esto es de gran importancia ya que corresponden a sectores económicos relevantes en el país. Aún pequeñas cantidades de ceniza pueden resultar tóxicas para el ganado y afectar adicionalmente a plantaciones (Comercio, 2014) (Jenkis, et al., 2015). Los cultivos afectados con rangos pequeños de sedimentación de ceniza C1 y C2 son el banano, el arroz el cacao y el maíz, durante los periodos de MJJ y ASO. Esto se debe a que, durante estos meses, el sedimento de ceniza tuvo una mayor dispersión. Por otro lado, para los rangos de mayor afectación C3, C4 y C5 solo afectan al maíz y la papa, en mayor magnitud durante los periodos de NDE y FMA. La ceniza durante estos periodos no llega tan lejos y genera mayor acumulación en zonas aledañas.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Durante los periodos de MJJ y ASO la sedimentación de ceniza tiene una dirección primordialmente hacia el oeste, mientras que en los periodos de NDE y FMA la ceniza se acumula en una dispersión multidireccional más simétrica. De esta manera, de mayo a octubre la sedimentación de ceniza afecta a áreas mayores que durante noviembre a abril.
- Los patrones encontrados de dispersión de sedimento de ceniza son el resultado de interacciones complejas y factores condicionales como humedad, temperatura, características de la ceniza, turbulencia, velocidad de viento, altura de la pluma entre otras. El desplazamiento de la ITCZ, la influencia de la celda de Hadley, la advección de humedad de la Cuenca Amazónica y los patrones de dirección y velocidad del viento podrían explicar estas tendencias de forma preliminar.
- Las curvas de probabilidad son de gran importancia para una correcta gestión de riesgos y se sugiere su incorporación a los mapas de peligros publicados por el IGEPN.
- Las ciudades con mayor probabilidad de afectación por el sedimento de ceniza debido a erupciones vulcanianas del volcán Tungurahua son Ambato, Babahoyo, Guaranda, Latacunga, Macas, Milagro, Quevedo y Riobamba.
- Se podría mejorar la gestión de riesgos entorno a la caída de ceniza volcánica para las principales potenciales provincias afectadas (Tungurahua , Chimborazo, Guayas, Los Rios, Manabi, Bolivar, y Cotopaxi), teniendo en cuenta que durante FMA y NDE generalmente el número de poblados afectados en la sierra es mayor mientras que en el periodo de MJJ se afecta en mayor medida la costa. De esta manera, los municipios pueden socializar los posibles peligros y desarrollar un plan de autoprotección donde la población se encuentre preparada.

- No se puede establecer una tendencia estacional general de afectación de uso de suelo que se aplique a todos los rangos de acumulación de ceniza sin embargo se encuentra un patrón dentro del mismo rango entre los meses de FMA-NDE y MJJ-ASO.
- En términos de área general los meses donde se afecta menos a cultivos y vegetación arbórea corresponden a NDE y FMA mientras que los bosques y páramos reciben menor impacto durante los periodos de MJJ y ASO.
- Los productos agrícolas con mayor alteración corresponden al banano, arroz, cacao y maíz durante los periodos de MJJ y ASO con una acumulación de ceniza baja (C1 y C2) y el maíz y la papa en los rangos de mayor sedimento de ceniza (C3, C4, C5) durante NDE Y FMA.
- Los resultados de este estudio son útiles para mejorar la gestión de riesgos en torno a posibles afectaciones al sector agrícola y ganadero del país. Se sugiere una socialización de las afectaciones que podría tener la caída de ceniza en concentraciones bajas explicando la estacionalidad de las tendencias de sedimentación de ceniza y haciendo énfasis en los productos agrícolas de mayor afectación.
- Los análisis estacionales en la dispersión de ceniza resultan importantes ya que análisis anuales pueden ocultar u alterar información relevante para la gestión correcta de riesgos.
- Los resultados obtenidos resaltan la importancia de trabajar en conjunto con el análisis de datos y el pronóstico diario. El volcán Tungurahua es uno de los más estudiados en términos de vulcanología, , sin embargo es necesario mantener y estudiar cómo mejorar el pronóstico
- El enfoque de este estudio fue la sedimentación de la ceniza volcánica de erupciones vulcanianas del Tungurahua suponiendo que la erupción empieza a las 7 am. Por esta razón, se recomienda como pasos futuros analizar tendencias estacionales de dispersión

de ceniza a diferentes niveles de vuelo y otros posibles escenarios de erupción por ejemplo erupciones nocturnas y erupciones subplinianas.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Barrios, J., & Troncoso, A. (2010). *Atlas climatológico del Ecuador*. Quito: Escuela Politécnica Nacional.
- Bebbington, M., Cronin, S., & Turner, M. (2008). Quantifying volcanic ash fall hazard to electricity infrastructure. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 1055-1062.
- Bernard, B., Encalada, M., Proaño, A., Narvaez, D., Gaunt, E., Le Pennec, J., . . . Bernard, J. (2016). Caracterización de las emisiones de ceniza asociadas a la actividad de los volcanes Tungurahua y Cotopaxi. *Congreso Anual de Meteorología y Calidad del Aire*. Quito.
- Bishcoff, T., & Schneider, T. (2016, enero 29). *Why does the ITCZ shift and how?* Retrieved from <https://climate-dynamics.org/why-does-the-itcz-shift-and-how/>
- Bonadonna, C., Costa, A., & Fagents, S. (2013). Modeling tephra sedimentation from volcanic plumes. *Modeling Volcanic Processes*, 173-202.
- Bonasia, R., Costa, A., Folch, A., Macedonio, G., & Capra, L. (2012). Numerical simulation of tephra transport and deposition of the 1982 El Chichon eruption and implications for hazard assessment. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 39-49.
- Bustillos, J., Romero, J., & Guevara, A. (2018). Tephra fallout from the long-lasting Tungurahua eruptive cycle (1999-2014): Variations through eruptive style transition and deposition processes. *Andean Geology*, 47-77.
- Casadevall, T., Delos Reyes, P., & Schneider, D. (1996). The 1991 Pinatubo eruptions and their effects on aircraft operations. Philippines. *Philippines Institute of Vulcanology-University of Washington Press*, 625-636.
- Celleri, R., Willems, P., Buteart, W., & Feyen, J. (2007). Space-time rainfall variability in the Paute basin, Ecuadorian Andes. . *Hydrological Processes*, 21-24.
- Cifuentes, A., & Alvarado, L. (2015). *Efectos en la salud respiratoria de las comunidades de Pillate, Manzano y Chonguntus expuestas crónicamente a la inhalación de ceniza del volcán Tungurahua*. Quito: UDLA.
- Comercio, E. (2014, febrero 2). *4000 hectareas de cultivos y de pastos afectados por la ceniza en Tungurahua y en Chimborazo*. Retrieved from El Comercio: <https://www.elcomercio.com/actualidad/ecuador/000-hectareas-de-cultivos-y.html>
- Daniels, V., Wardman, J., Stewart, C., Wilson, T., Johnston, D., & Rossetto, T. (2011). *Infrastructure impacts, management and adaptations to eruptions at Volcan Tungurahua, Ecuador*. Lower Hutt: Institute of Geological and Nuclear Sciences.
- Del Bello, E., Taddeucci, J., Scarlato, P., Giacolone, E., & Cesaroni, C. (2015). Experimental investigation of the aggregation-disaggregation of colliding volcanic ash particles in turbulent, low humidity suspensions. . *Geophysical Research Letters*, 1068-1075.
- ElComercio. (2014, febrero 2). La Ceniza del Volcán Tungurahua llegó a Cuenca y Cañar. *EL Comercio*.
- Ellord, G., Connell, B., & Hilger, D. (2003). Improved detection of airborne volcanic ash using multispectral infrared satellite data. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*.
- Eychenne, J., Le Pennec, J., & Troncoso, L. (2011). Causes and consequences of bimodal grain-size distribution of tephra fall deposited during August 2006 Tungurahua eruption (Ecuador). *Bull Bolcanol*, 187-205.
- FlightSafetyFoundation. (2017, julio 20). *Altitude Flight Level and Height*. Retrieved from https://www.skybrary.aero/index.php/Altitude,_Flight_Level_and_Height

- Folch, A. (2012). A review of tephra transport and dispersal models: Evolution, current status and future perspectives. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 96-115.
- García, A., Kumagai, H., & Samaniego, P. (2007). Seismic, petrologic and geodetic analyses of the 1999 dome-forming eruption of Guagua Pichincha volcano, Ecuador. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 333-351.
- GICVE. (2019, marzo). *Grupo de Investigación de Ceniza Volcánica en el Ecuador*. Retrieved from https://www.usfq.edu.ec/programas_academicos_en_curso/colegios/politecnico/institutos/gicve/Paginas/default.aspx
- Hall, M., Steele, A., Bernard, B., Mothes, P., Vallejo, S., Douillet, G., . . . Aguirre, S. (2015). Sequential plug formation, disintegration by Vulcanian explosions, and the generation of granular Pyroclastic Density Currents at Tungurahua volcano (2013–2014), Ecuador. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 90-103.
- Hidalgo, S., Battaglia, J., Arellano, S., Steele, A., Bernard, B., Bourquin, J., . . . Vasconez, F. (2015). SO₂ degassing at Tungurahua volcano (Ecuador) between 2007 and 2013: Transition from continuous to episodic activity. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 1-14.
- IGEPN. (2019). *Preguntas frecuentes*. Retrieved from <https://www.igepn.edu.ec/component/fsf/?view=faq&catid=1&start=10>
- IGEPN. (2019, marzo 25). *Red de Observatorios Vulcanológicos*. Retrieved from Instituto Geofísico de la Politécnica Nacional: <https://www.igepn.edu.ec/red-de-observatorios-vulcanologicos-rovig>
- IGEPN, & Orellana, R. (2018). *Informe anual de emisiones de SO₂ del volcán Tungurahua 2018*. Retrieved from [igepn.edu.ec/tungurahua-gases/tung-ga/21917-informe-anual-emision-de-so2-tungurahua-2018/file](https://www.igepn.edu.ec/tungurahua-gases/tung-ga/21917-informe-anual-emision-de-so2-tungurahua-2018/file)
- IGM. (2013). *CAPAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA BÁSICA DEL IGM DE LIBRE ACCESO*. Retrieved octubre 10, 2019, from <http://www.geoportaligm.gob.ec/portal/index.php/cartografia-de-libre-acceso-escala-50k/>
- IRD, & IGEPN. (2008). Retrieved from Mapas de Peligros: <https://www.igepn.edu.ec/publicaciones-vulcanologia/mapas-de-peligros>
- Jenkins, S., Wilson, T., Magill, C., Miller, V., Stewart, C., Blong, R., . . . Costa, A. (2015). *Volcanic fall hazard and risk*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Le Pennec, J., Ramón, P., Bablon, M., Bernard, B., Samaniego, P., Mothes, M., . . . Hidalgo, S. (2019). *Multiple growth and collapse of Tungurahua Volcano- Intra workshop Field Trip*. Quito: IGEPN.
- Le Pennec, J., Ruiz, G., Ramón, P., Palacios, E., Mothes, P., & Yepes, H. (2012). Impact of tephra falls on Andean communities: The influences of eruption size and weather conditions during 1999-2001 activity of Tungurahua volcano, Ecuador. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 91-103.
- Leadbetter, S., & Hort, M. (2010). Volcanic ash hazard climatology for an eruption of Helka Volcano, Iceland. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 230-241.
- Leung, C. C. (2012). Silicosis. *The Lancet*, 2008-2018.
- Lopez, A., Ramirez, J., Vasconez, F., Bernard, B., Valencia, F., Hidalgo, S., . . . Franklin, Q. (2016). Impacto de la Ceniza Volcánica sobre la rigidez dieléctrica de aisladores de suspensión de HVAC: el caso de los volcanes Tungurahua y Cotopaxi (Ecuador). *Congreso REDU: Red Ecuatoriana de Universidades y Escuelas Politécnicas para Investigación y Posgrados*. Quito: Escuela Politécnica Nacional.

- MAG. (2014). *Catálogo de Metadatos del Minsiterio de Agricultura y Ganaderia*. Retrieved octubre 10, 2019, from Mapa de Cobertura y Uso de la tierra en el Ecuador continental - Categoría: Vegetación herbácea, escala 1:100.000, año 2013 - 2014: <http://geoportal.agricultura.gob.ec/geonetwork/srv/eng/catalog.search#/metadata/3214cd5f-e65c-4293-9e91-a250cace605e>
- MAG. (2014). *Catálogo de Metadatos del Ministerio de Agricultura y Ganaderia*. Retrieved octubre 10, 2019, from Mapa de Cobertura y Uso de la tierra en el Ecuador continental - Categoría: Mosaico agropecuario, escala 1:100.000, año 2013 - 2014: <http://geoportal.agricultura.gob.ec/geonetwork/srv/eng/catalog.search#/metadata/3299df36-a9a2-4e47-b10d-cee0ef4f871d>
- MAG. (2014). *Catálogo de Metadatos del Ministerio de Agricultura y Ganaderia*. Retrieved octubre 10, 2019, from Mapa de Cobertura y Uso de la tierra en el Ecuador continental - Categoría: Bosque nativo, escala 1:100.000, año 2013 - 2014: <http://geoportal.agricultura.gob.ec/geonetwork/srv/eng/catalog.search#/metadata/59074371-ed89-4675-9e38-23e30452549b>
- MAG. (2014). *Catálogo de Metadatos del Ministerio de Agricultura y Ganaderia*. Retrieved octubre 10, 2019, from Mapa de Cobertura y Uso de la tierra en el Ecuador continental - Categoría: Páramo, escala 1:100.000, año 2013 - 2014: <http://geoportal.agricultura.gob.ec/geonetwork/srv/eng/catalog.search#/metadata/7bf16c57-b77d-42eb-bc82-750267319b08>
- MAG. (2014). *Catálogo de Metadatos del Ministerio de Agricultura y Ganaderia*. Retrieved octubre 10, 2019, from Mapa de Cobertura y Uso de la tierra en el Ecuador continental - Categoría: Vegetación arbustiva, escala 1:100.000, año 2013 - 2014: <http://geoportal.agricultura.gob.ec/geonetwork/srv/eng/catalog.search#/metadata/e521a646-6470-47ff-8031-c79a482a16b9>
- MAG. (2014). *Catálogo de Metadatos del Ministerio de Agricultura y Ambiente*. Retrieved octubre 10, 2019, from Mapa de Cobertura y Uso de la tierra en el Ecuador continental - Categoría: Pastizal, escala 1:100.000, año 2013 - 2014: <http://geoportal.agricultura.gob.ec/geonetwork/srv/eng/catalog.search#/metadata/cb9f8a81-b85c-4a93-82a9-94c1bb040116>
- Maldonado, F., Maldonado-Coronel, V., & Silva, J. (2018). Enfermedades respiratorias restrictivas-obstruccionales y ceniza del volcán Tungurahua en el año 2007. *La Ciencia al Servicio de la Salud y Nutricion*, 9-13.
- Martin, R., Watt, S., Pyle, D., Mather, T., Mathews, N., Georg, R., . . . Quayle, B. (2009). Environmental effects of ashfall in Argentina from the 2008 Chaiten volcanic eruption. *Volcano Geothermal Res.*, 462-472.
- Mayberry, G., Bonadonna, C., & Calder, E. (2002). *Tephra fallout in the eruption of Soufriere Hills Volcano, Montserrat*. London: Geological Society London Memoir.
- Montoya, S. (2018, march 19). *How to add a Google Map/Terrain/Satellite layer in QGIS3*. Retrieved from <https://www.hatarilabs.com/ih-en/how-to-add-a-google-map-in-qgis-3-tutorial>
- Moran-Tejada, E., Bazo, J., Lopez, J., Aguilar, E., Azorín, C., Sanchez, A., & Vicente, S. (2016). Climate trends and variability in Ecuador (1966-2011). *International Journal of Climatology*, 3839-3855.
- Moreta, M. (2016, febrero 26). Ceniza del Volcán Tungurahua afecta la ganadería y agricultura de Penipe. *El comercio*.
- NOAA. (n.d.). *Global Forecast System*. Retrieved from <https://www.ncdc.noaa.gov/dataaccess/model-data/model-datasets/global-forecast-system-gfs>

- OMS. (2014). *Efectos de la erupción del volcán reventador (2002) en los sistemas de agua y alcantarillado*. Retrieved from https://guzlop-editoras.com/web_des/ciennat/agua/pld1236.pdf
- OPS/OMS, & Boischio, A. (2012, abril 30). *Los impactos a la salud asociados con las cenizas de los volcanes*. Retrieved from https://www.paho.org/hq/index.php?option=com_content&view=article&id=8194:2013-los-impactos-salud-asociados-cenizas-volcanes&Itemid=39797&lang=es
- Parra, R. (2018). Influence of boundary layer schemes in modeling the dispersion and sedimentation of volcanic ash in Ecuador. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 83-93.
- Parra, R. (2018). Numerical system for forecasting volcanic ash dispersion in Ecuador. *IEE Third Ecuador Technical Chapters Meeting*.
- Parra, R. (2019). 8th International Symposium on Andean Geodynamics (ISAG). *Influence of the startup period from initial conditions in modeling the dispersion of volcanic ash in Ecuador*. Quito: IGEPN.
- Parra, R. (2019). Influence of Spatial Resolution in Modeling the Dispersion of Volcanic Ash in Ecuador. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 67-77.
- Parra, R., Bernard, B., Narvaez, D., Le Penne, J.-L., Hasselle, N., & Arnau, F. (2016). Eruption Source Parameters for forecasting ash dispersion and deposition from vulcanian eruptions at Tungurahua volcano: Insights from field data from the July 2013 eruption. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 1-13.
- Perez, F., & Rodriguez, A. (2015). Cómo se miden las erupciones volcánicas. El índice de explosividad volcánica. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 24-32.
- Russell, A., & Dennis, R. (2000). NARSTO critical review of photochemical models and modeling. *Atmospheric Environment*, 2283-2324.
- Smithsonian-Institution. (2016). *Volcano data, weekly and motnly reports*. Retrieved from Global Volcanism: <http://www.nmnhwww.si.edu/>
- SNGRE. (2009). *Revista Informativa de la Secretaría Técnica de Gestion de Riesgoss*. Quito.
- Sociedad-Ecuatoriana-de-Pediatría. (2007). Guía Práctica par ael Manejo de Enfermedades Agudas Producidad por la Ceniza Volcánica. *Revista Ecuatoriana de Pediatria*, pp. 64-65.
- Sparks, R., Bursik, M., & Carey, S. (1997). *Volcanic Plumes*. Chichester: Wiley.
- Stone, J., Simmons, P., Cole, P., Loughlin, S., Ramon, P., & Mothes, P. (2014). Risk reduction through community-based monitoring: the vigías of Tungurahua, Ecuador. *Journal of Applied Volcanology*, 1-14.
- Toulkeridis, T., & Zach, I. (2016). Wind directions of volcanic ash charged clouds in Ecuador- implications for the public and flight safety. *Geomatics, Natural Hazard and Risk*, 242-256.
- USGS. (2015, 12 17). *Volcanic Ashfall Impacts Workin Group*. Retrieved from The United States Geological Survey: https://volcanoes.usgs.gov/volcanic_ash/components_ash.html
- Wallace, J., & Hobbs, P. (2006). *Atmospheric Science*. San Diego: Elsevier.