

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

**FACULTAD DE INGENIERÍA EN GEOLOGÍA Y
PETRÓLEOS**

**ANÁLISIS DEL IMPACTO SOCIOECONÓMICO DE LOS
LAHARES Y CAÍDA DE CENIZA ANTE UNA EVENTUAL
ERUPCIÓN DEL VOLCÁN CAYAMBE EN LA ACTIVIDAD
FLORÍCOLA EN LOS CANTONES DE CAYAMBE Y PEDRO
MONCAYO**

**TRABAJO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE MAGISTER EN CIENCIAS
DE LA TIERRA Y GESTIÓN DEL RIESGO: MENCIÓN EN EVALUACIÓN DE
AMENAZAS Y MITIGACIÓN DE RIESGOS NATURALES**

FERNANDO MAURICIO PAVÓN CEVALLOS

fernando.pavon@epn.edu.ec

DIRECTOR: DANIEL ANDRADE, Ph.D.

dandrade@igepn.edu.ec

Quito, julio 2017

DECLARACIÓN

Yo, Fernando Mauricio Pavón Cevallos, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentada para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

FERNANDO MAURICIO PAVÓN CEVALLOS

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Fernando Mauricio Pavón Cevallos, bajo mi supervisión.

DANIEL ANDRADE, Ph.D.

DIRECTOR DE TRABAJO

AGRADECIMIENTOS

A mi compañera de luchas y amor de mi vida por el apoyo incondicional en el desarrollo de la maestría. Existe una persona que me inspira confianza, amor y admiración, Carla Vélez.

Al tío Pato y Ximenita por la confianza y cariño brindado desde el momento que me conocieron.

A mis padres, hermanos y familia por el respaldo y amor que me han dado toda la vida; siempre han estado en mi mente y corazón.

DEDICATORIA

A la niña que me demuestra que los retos más difíciles son los que nos dan mayores satisfacciones al conseguirnos. Aquella niña alegre, dulce y cariñosa que me inspira cada día, Martina Isabela Pavón Vélez.

A mis pequeñas traviesas y amadas sobrinas Nicole, Paula y Luciana.

ÍNDICE DE CONTENIDO

DECLARACIÓN	- 2 -
CERTIFICACIÓN	- 3 -
AGRADECIMIENTOS	- 4 -
DEDICATORIA.....	- 5 -
RESUMEN	- 7 -
ABSTRACT	- 8 -
1. INTRODUCCIÓN.....	- 9 -
2. MATERIALES Y MÉTODOS.....	- 11 -
2.1. Determinación de zonas potencialmente afectadas por lahares	- 12 -
2.2. Determinación de zonas potencialmente afectadas por caída de ceniza	- 13 -
Transformación de los archivos kmz (resultados de Ash 3D) en shapefile	- 14 -
Cambio de geometría manteniendo la información de espesores de ceniza	- 14 -
Automatización del proceso por año.....	- 14 -
Creación de una grilla fija (200*200 m) e interpolación determinista.....	- 15 -
Análisis Geoestadístico de los resultados para obtener mapas de probabilidades.....	- 15 -
Combinación de los resultados interpolados de las 120 simulaciones en un solo archivo	- 15 -
2.3. Mapeo de zonas vulnerables a lahares y caída de ceniza	- 16 -
2.4. Identificación de infraestructuras dedicadas a la actividad florícola afectadas por lahares y la caída de ceniza.....	- 17 -
3. RESULTADOS.....	- 19 -
3.1. Afectación por lahares y caída de ceniza según el uso del suelo	- 19 -
3.2. Afectación de la población por caída de ceniza y lahares	- 21 -
3.3. Afectación a infraestructura y edificaciones por caída de ceniza y lahares	- 23 -
3.4. Afectación al sector florícola por caída de ceniza y lahares	- 24 -
Infraestructura productiva.....	- 24 -
Producción.....	- 25 -
4. DISCUSIÓN.....	- 28 -
5. CONCLUSIONES	- 29 -
6. REFERENCIAS.....	- 31 -

ANÁLISIS DEL IMPACTO SOCIOECONÓMICO DE LOS LAHARES Y CAÍDA DE CENIZA ANTE UNA EVENTUAL ERUPCIÓN DEL VOLCÁN CAYAMBE EN LA ACTIVIDAD FLORÍCOLA EN LOS CANTONES DE CAYAMBE Y PEDRO MONCAYO

Fernando Pavón ^{a, b}, Daniel Andrade ^b, Benjamin Bernard ^b

^a Instituto Geográfico Militar. Seniergues E4-676 y Gral. Telmo Paz y Miño. Quito, Ecuador

^b Escuela Politécnica Nacional. Ladrón de Guevara E11-253. Quito, Ecuador

RESUMEN

De acuerdo con el Censo de Población y Vivienda 2010, la población de los cantones Cayambe y Pedro Moncayo alcanza los 118,967 habitantes. El complejo volcánico Cayambe representa un potencial peligro para dichas poblaciones que basan su economía en la floricultura. Hasta el momento no se han hecho estimaciones del impacto económico que tendría una eventual erupción del Cayambe en la zona. Únicamente se tiene como referencia la erupción en el año 2002 del Volcán Reventador, la cual según reportes del IGEPN alcanzó un índice de explosividad volcánica IEV = 4, y que en términos económicos representó alrededor de 300,000 dólares de pérdidas en el sector florícola de Pichincha. En el presente trabajo, se realizó una estimación del impacto económico con respecto a las amenazas por caída de ceniza y flujo de lahares durante una erupción del Cayambe. La determinación de zonas de afectación por caída de ceniza se las obtuvo mediante un análisis estadístico de simulaciones numéricas de escenarios eruptivos. En cambio, las zonas de afectación por lahares fueron tomadas del nuevo mapa de peligros del volcán Cayambe. Se digitalizó 39,006 edificaciones y en especial, las relacionadas con la actividad florícola, utilizando como insumo la fotografía aérea actualizada del sector, con el objetivo de identificar y cuantificar la infraestructura que potencialmente puede ser afectada ante la ocurrencia de ambos fenómenos. El análisis y procesamiento de los datos censales permitió caracterizar el área de estudio y describir el impacto que un evento de este tipo tendría sobre la población local. Así se determinó que la caída de ceniza sería el principal problema ante una erupción del volcán Cayambe, con espesores de ceniza de 50 mm, 30 mm y 20 mm cubren el 81.46% de la superficie con pérdidas que ascienden los 300 USD millones en plantas e

invernaderos. En el caso de lahares las pérdidas se darían en los suelos, los cuales serían enterrados por flujos de lodo y con esto, se estiman pérdidas de entre los 3 USD millones en el caso de lahares secundarios (1,160.66 hectáreas) y 5 USD millones en caso de lahares primarios (1,511.10 hectáreas).

Palabras Clave: Ceniza, Lahar, SIG, Cayambe, Impacto socioeconómico.

ABSTRACT

According to the Population and Housing Census 2010, the population of the Cayambe and Pedro Moncayo cantons reaches 118,967 inhabitants. The Cayambe volcanic complex represents a potential danger for those populations that base their economy on floriculture. So far no estimates have been made of the economic impact of an eventual of the Cayambe volcano eruption in the area. Only the eruption in 2002 of El Reventador Volcano, which according to IGEPN reports reached a volcanic explosivity index VEI = 4, and which in economic terms represented about \$ 300,000 of losses in the Pichincha. In the present work, an estimation of the economic impact with respect to the threats by ash fall and lahars during an eruption of the Cayambe was made. The determination of zones of affectation by ash fall was obtained by means of a statistical analysis of numerical simulations of eruptive scenarios. In contrast, the areas affected by lahars were taken from the new hazard map of the Cayambe volcano. 39,006 buildings were digitized, especially those related to the floricultural activity, using as an input the updated aerial photography of the sector, with the objective of identifying and quantifying the infrastructure that could potentially be affected by the occurrence of both Phenomena. The analysis and processing of the census data allowed to characterize the study area and to describe the impact that an event of this type would have on the local population. Thus it was determined that the ash fall would be the main problem before an eruption of the Cayambe volcano, with ash thickness of 50 mm, 30 mm and 20 mm covering 81.46% of the surface with losses that amount to 300 USD million in plants and greenhouses. In the case of lahars losses occur in soils, which would be buried by sludge flows and with this, losses of between USD 3 million are estimated in case of the case of secondary lahars (1,160.66 hectares) and USD 5 million in lahars Primary (1,511,10 hectares).

Keywords: Ash fall, Lahar, GIS, Cayambe, Socioeconomic impact.

1. INTRODUCCIÓN

La profundización de las relaciones capitalistas de producción en el sector agrario ha significado, para provincias como la de Pichincha, el crecimiento de actividades agroproductivas de exportación (Martínez, 1994), entre ella la producción florícola. De manera particular los cantones Cayambe y Pedro Moncayo son los de mayor desarrollo de esta actividad en la Provincia de Pichincha. Sin embargo en estos cantones, las zonas de producción florícola se ubican en los alrededores del Complejo Volcánico Cayambe, un edificio volcánico que ha presentado significativa actividad en los últimos 11,800 años (Hall y Mothes, 1994). El Cayambe es un volcán activo que se ubica en la parte Norte de la Cordillera Real (Oriental) de los Andes del Ecuador, a 60 km al Nororiente de la capital (Quito) y a 15 km al Oriente de la ciudad de Cayambe (Samaniego et al., 1998). El registro de la actividad más reciente del Cayambe incluye 18 a 20 erupciones en los últimos 4,000 años, las mismas que están distribuidas en tres periodos de actividad volcánica (Samaniego et al., 1998): El primer periodo se habría dado entre los años 3,800 y 3,500 a.p.; el segundo entre 2,500 y 1,700 años a.p.; y el último inició hace 1,100 años a.p. La última erupción del Cayambe ocurrió entre los años 1785 y 1786; se la describe como una erupción subglaciar que habría producido caídas moderadas de ceniza en Cayambe (Samaniego et al., 1998) y la misma habría terminado con un flujo de lava o un lahar en 1786 (Ascázubi, 1802). Los depósitos observados en los estudios de campo corresponden principalmente a flujos de lava, flujos piroclásticos, lahares y caídas de lapilli y ceniza (Samaniego et al., 2004). Todos ellos son fenómenos que pueden afectar de forma importante el normal desenvolvimiento de la actividad florícola y consecuentemente la disponibilidad de empleos y la estabilidad económica del sector. Los vestigios de las erupciones volcánicas en el pasado evidencian el riesgo que una erupción en la actualidad representaría para las zonas de producción florícola en esta zona, tomando en consideración la probabilidad de ocurrencia que actualmente posee para el año 2017 del 68% (IGEPN, 2017).

Según Bernard y Samaniego (2017), en caso de reactivación del Cayambe, el escenario eruptivo pesimista más probable corresponde a una erupción explosiva, o a la formación de un domo o un flujo de lava viscosa, en los flancos Norte, Oriental y Occidental. Como consecuencia, lahares primarios se dirigirían al Oriente por el sistema fluvial de los ríos Salado-Quijos (Samaniego et al., 2004) y podrían (dependiendo del tamaño de la erupción) afectar la principal vía de acceso al sector Nororiental del país, el Sistema de Oleoductos Trans-Ecuatoriano (SOTE) y el Oleoducto de Crudos Pesados (OCP) y al

Proyecto Hidroeléctrico Coca – Codo Sinclair. En cuanto a la caída de ceniza, en esa zona los vientos principalmente van de Oriente a Occidente, por lo que los asentamientos humanos de la parte Occidental podrían verse afectados por este fenómeno. Este escenario también contempla la posibilidad que la explosión o crecimiento de domo se produzca en la cumbre o en el flanco Occidental, lo que pondría en serio peligro por lahares primarios a la ciudad de Cayambe (Samaniego et al., 2004) y por caída de ceniza a la actividad florícola.

El propósito de este estudio es delimitar las zonas dedicadas a la actividad florícola que sufrirían una mayor afectación por lahares y caída de ceniza ante una eventual erupción del volcán Cayambe en los cantones Cayambe y Pedro Moncayo (Figura 1) y determinar/cuantificar el impacto socioeconómico en estas zonas a través del análisis de datos censales.

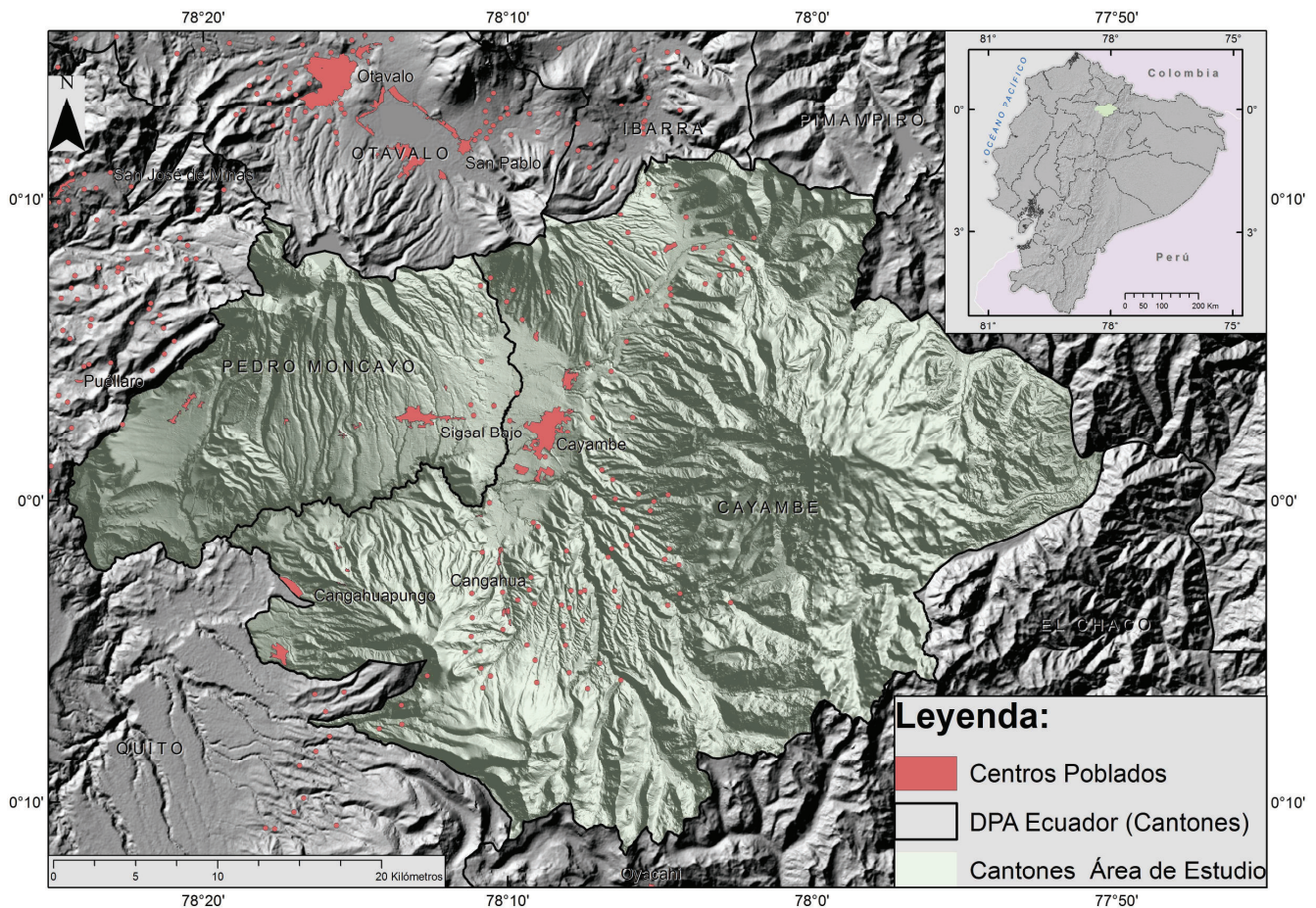


Figura 1: Área de Estudio cantones Cayambe y Pedro Moncayo. Volcán Cayambe: Latitud 00°1.72' Norte; Longitud 77°59.13' Oeste; altura 5,790 metros.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

A través de la revisión de estudios previos (Samaniego, 1996; Samaniego et al., 1998; Samaniego et al., 2002; Samaniego et al., 2004; Samaniego et al., 2004b; Bernard y Samaniego, 2017) se pudo conocer la historia eruptiva del volcán, las fechas de ocurrencia de las principales erupciones, su dinámica y con ello definir escenarios del comportamiento del volcán en eventos futuros, particularmente de los fenómenos de lahares y caída de ceniza. Sin embargo, debido a la falta de información volcánica – física detallada sobre las erupciones recientes del complejo volcánico del Cayambe, para ciertos parámetros como duración, altura de la columna eruptiva, tasa de descarga y volumen de caída se utilizaron los valores definidos por Mastin et al. (2009) con modificaciones para ajustar los resultados a los obtenidos en las turberas en los estudios de Samaniego et al. (1998). Para la determinación de los peligros asociados a la caída de ceniza y lahares del volcán Cayambe se representó una erupción volcánica con un IEV = 3 – 4 (tamaño moderado), el cual es caracterizado por la formación de un domo o un flujo de lava viscosa en los flancos Norte y Oriental (Samaniego et al., 2004b). La creación de un domo podría generar un colapso gravitacional o destrucción explosiva del mismo y con esto, formar nubes ardientes y lahares primarios producto de la fusión parcial del casquete glacial que posee el volcán Cayambe. Este escenario corresponde a una erupción de tipo peleana datada hace 380 años a.p. y se lo conoce como San Marcos –S2 (Samaniego et al., 1998). Es importante mencionar que la caída de ceniza o tefra en zonas pobladas están directamente relacionadas con la velocidad y dirección del viento. Los depósitos de nubes ardientes de tipo “bloques y ceniza” cubren una superficie aproximada de 6.9 km² y tienen un volumen aproximado de 0.4 km³ (Samaniego, 1996). A 4 km al Suroeste de la cumbre del volcán se tiene depósitos de caída de ceniza que superan los 150 mm. Este tipo de evento llamado San Marcos ha ocurrido en 12 ocasiones con erupciones de tamaño similar en los últimos 4,500 años, las cuales pertenecen a 8 periodos eruptivos. Como ejemplo de erupción de tamaño similar eruptivos ocurridos en el Ecuador recientemente se tomó como umbral bajo a la erupción ocurrida en agosto de 2006 con el volcán Tungurahua y en umbral alto con la erupción ocurrida en el volcán Reventador en noviembre de 2002 (Bernard y Samaniego, 2017). El escenario S2 corresponde al peor escenario probable; puesto que, el escenario La Chimba - S3 (Bernard y Samaniego, 2017) no se ha presentado en los últimos 10,000 años (Samaniego et al., 2004). En este sentido, los parámetros utilizados corresponden a un dinamismo eruptivo tipo Peleano o Subpliniano con un IEV = 3 – 4, con duración de seis horas y una altura de la columna eruptiva de 11 Km. Con

esto lo que se obtiene es la tasa de descarga conocida de 4×10^6 kg/s y un volumen de magma 0.03 km^3 (Bernard y Samaniego, 2017).

2.1. Determinación de zonas potencialmente afectadas por lahares

Para determinar las áreas de afectación de lahares (flujos de lodo y escombros volcánicos), se utilizó los polígonos derivados (Figura 2) en las simulaciones de lahares primarios y secundarios realizados por el IGEPN. Estos resultados fueron obtenidos utilizando Modelos Digitales de Terreno (resolución de 4 y 10 metros) y el código VolcFlow; además se realizaron correcciones topológicas y de escala con el objetivo de obtener un mapa a escala 1:10,000, validados en campo y que son coherentes con fenómenos similares ocurridos en otros volcanes tanto del Ecuador como a nivel mundial (IGEPN, 2017).

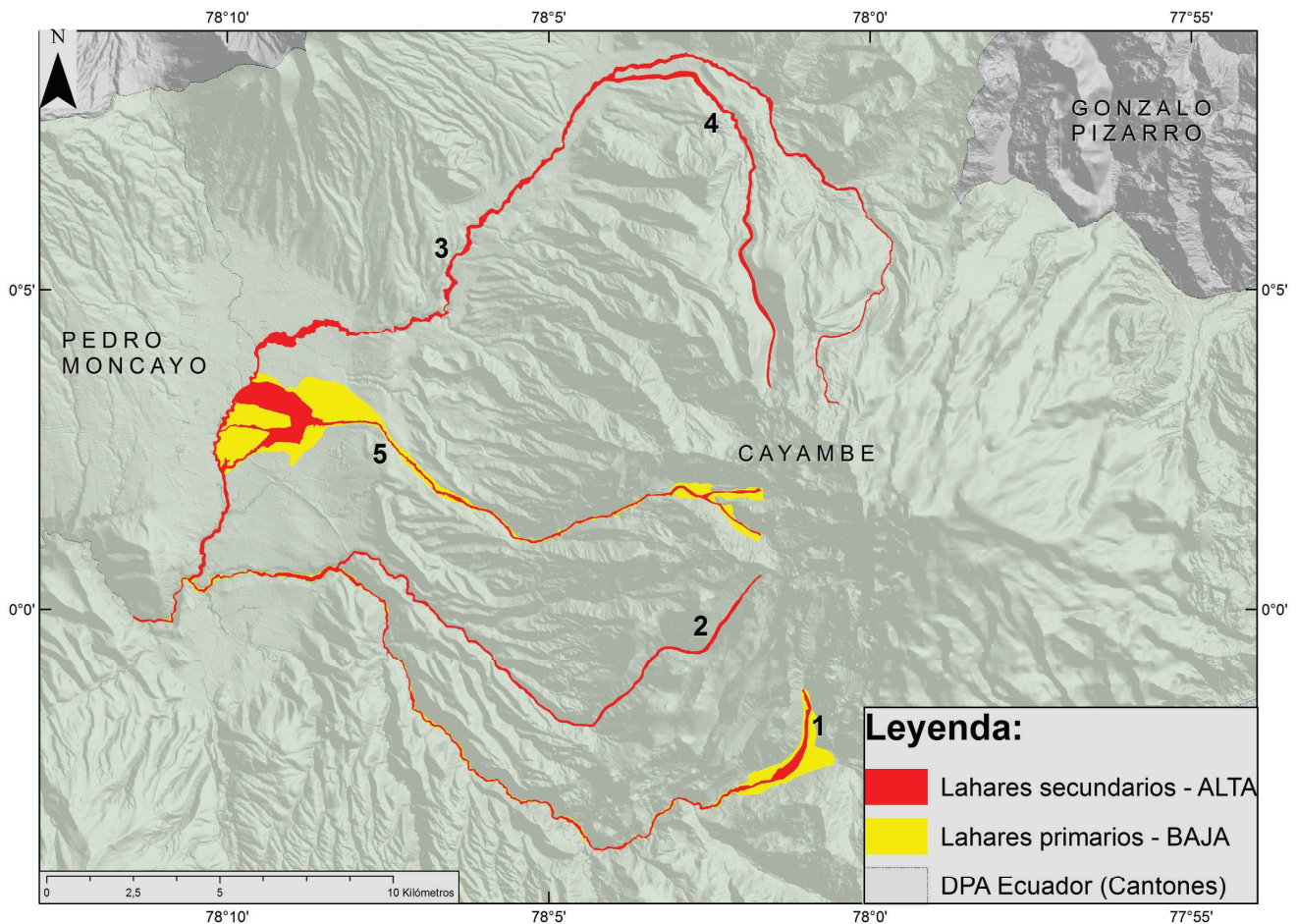


Figura 2: Mapa de peligro por lahares del volcán Cayambe. En caso de un evento tipo “San Marcos”, la zona roja sería afectada con lahares de menor volumen con una alta probabilidad de ocurrencia; mientras que la zona en color amarillo sería afectada con lahares de mayor volumen con una baja probabilidad de ocurrencia. 1) Río Guachalá, 2) Río Purlugara, 3) Río La Chimba, 4) Quebrada Tunas, 5) Río Blanco.

Esta técnica permitió determinar aquellas zonas más susceptibles a ser afectadas por inundaciones de lahares en función de la trayectoria de los ríos de los drenajes Occidentales correspondientes a los Ríos Guachalá, Purlugara, La Chimba, Blanco y la Quebrada Tunas. Como resultado final de este proceso se obtiene un shapefile, en el cual los polígonos muestran las zonas potencialmente afectadas por lahares primarios y secundarios con sus diferentes volúmenes con la probabilidad de ocurrencia (alta y baja). Para el caso de los lahares primarios, se estima que los volúmenes máximos estarían en el orden de los $15 \times 10^6 \text{ m}^3$ determinado que las zonas que podrían ser potencialmente afectadas corresponden a los drenajes de los ríos Blanco y Guachalá (IGEPN, 2017). Para el caso de los lahares secundarios, se estima que los volúmenes máximos en los drenajes de los ríos La Chimba y Guachalá serían de $1 \times 10^6 \text{ m}^3$ y para el drenaje del río Blanco $2.5 \times 10^6 \text{ m}^3$ (IGEPN, 2017).

2.2. Determinación de zonas potencialmente afectadas por caída de ceniza

Para la determinación de zonas potencialmente afectadas por caída de ceniza se utilizó el modelo Ash 3D, el cual simula la dinámica de las nubes de cenizas volcánicas para la zonificación de las áreas potencialmente afectadas por este fenómeno. Ash 3D es un modelo atmosférico euleriano tridimensional para el transporte, dispersión y deposición de tefra, desarrollado para estudiar y predecir los peligros de las nubes de cenizas volcánicas y la caída de tefra (Mastin, et al., 2013). Ash 3D no calcula el comportamiento de una pluma creciente, sino, inyecta tefra en una columna volcánica y los usuarios pueden especificar que las cenizas se concentren en una sola celda, distribuidas uniformemente por toda la columna o distribuidas verticalmente siguiendo la ecuación de Suzuki (Suzuki, 1983; Carey, 1996):

$$\frac{dQ_m}{dy} = Q_m \frac{k^2 \left(1 - \frac{z}{H}\right) \exp\left(k\left(\frac{z}{H} - 1\right)\right)}{H[1 - (1+k)\exp(-k)]} \quad (1)$$

Donde Q_m es la masa total del material emitida en un lapso de tiempo con un tamaño de partícula configurado, H es la altura total de la pluma, z corresponde a la elevación en el penacho y el factor de forma k , es una constante ajustable que controla la distribución de la ceniza con altura. Valores altos en la constante k concentran la masa cerca de la parte superior del penacho; mientras que, un valor bajo de k da una distribución aproximadamente uniforme de la masa con respecto a la elevación (Mastin et al., 2013).

Para la modelación de caída de ceniza del Volcán Cayambe se utilizaron parámetros establecidos anteriormente, con los cuales los resultados obtenidos son concordantes

con los descritos en las turberas de los trabajos de campo de (Samaniego et al. 1998). Las modelaciones se realizaron para el período 2007 – 2016, una simulación de erupción el día 15 de cada mes elegido por ser el más representativo, alternando el inicio del evento cada 6 horas (00:00, 06:00, 12:00 y 24:00) entre los meses. Con esto se obtuvo un total de 120 modelaciones, con las cuales se realizó una interpolación de la información para mejorar las isopacas generadas por el programa.

Transformación de los archivos kmz (resultados de Ash 3D) en shapefile

Con cada una de las modelaciones generadas en Ash 3D, mediante el uso de los SIG, se procedió a la automatización mediante flujos de trabajo, los cuales encadenan secuencias de herramientas de geoprocetamiento, alimentando la salida de una herramienta como entrada en otra herramienta para la transformación de los datos. Esto con la finalidad de replicar el modelo en cada año; puesto que, los archivos originales de salida del código Ash 3D se encuentra en formato con extensión kmz. Una vez exportados los archivos a formato shapefile, se eliminó aquella información no necesaria (límite del modelo generado para cada año y mes) para el análisis de los datos.

Cambio de geometría manteniendo la información de espesores de ceniza

Eliminados los polígonos correspondientes a los límites de cada modelación, estos fueron transformados a puntos, manteniendo los valores de cada uno y posteriormente, se agregó un campo de tipo doble para almacenar la información del espesor del depósito de ceniza; porque en primera instancia, se lo obtuvo de tipo texto. El código Ash 3D arroja una serie de datos en cada punto generado. Para la modelación se tomó en cuenta el dato final que se encuentra en el reporte de cada mes. Para lo cual, mediante una selección por atributos se obtuvo aquellos datos que cumplan la condición y, posteriormente, se eliminaron los elementos y campos con información no utilizada en el procesamiento.

Automatización del proceso por año

Con la información depurada, correspondiente a los valores de los puntos extraídos de la modelación de Ash 3D, de igual manera, mediante el uso de los SIG, se generó un modelo para el año 2007, con la finalidad de automatizar el proceso para el periodo 2007 – 2016, el cual fue ejecutado desde la ventana de Python. De esta manera, lo que se obtuvo es un archivo que servirá como base para interpolar la información en cada año del periodo, en el cual se han generado las modelaciones de caída de ceniza del volcán Cayambe. Posteriormente se agregó un nuevo campo, en el cual se almacenó la

información de caída de ceniza para los 12 meses y finalmente, se eliminaron aquellos campos innecesarios para el análisis.

Creación de una grilla fija (200*200 m) e interpolación determinista

Con los límites de las coordenadas de las 120 modelaciones, se generó una cobertura de puntos con una distancia de 200 por 200 metros entre cada uno; esto con la finalidad de mejorar la interpolación de los datos, los cuales posteriormente se utilizaron para obtener las isopacas del volcán Cayambe. Una vez generado el archivo de puntos, se interpoló la información de cada mes para todos los años. Luego, mediante herramientas de Geoprocesamiento se obtuvieron los valores de cada año en un par de coordenadas, así en una fila se obtienen las simulaciones por mes y año por separado.

Análisis Geoestadístico de los resultados para obtener mapas de probabilidades

Generado el archivo de cada año, el cual contiene la información interpolada por meses, se obtuvo mediante el uso de análisis espacial un solo archivo con las 120 simulaciones, las cuales posteriormente fueron analizadas para obtener la probabilidad de ocurrencia al 50% de caída de ceniza utilizando la mediana de los datos y con esto generar el archivo final de las zonas potencialmente afectadas por la caída de ceniza del volcán. La probabilidad de ocurrencia al 50% es una de la más utilizadas en la comunidad científica (Bonadonna et al., 2005; Biass et al., 2016).

Combinación de los resultados interpolados de las 120 simulaciones en un solo archivo

El resultado final (Figura 3) de este proceso es un shapefile en donde los polígonos representan las zonas potencialmente afectadas por ceniza en sus distintos espesores (> 80 mm, 50 mm, 30 mm, 20 mm, 10 mm, 5mm, 3mm, 1mm, >0).

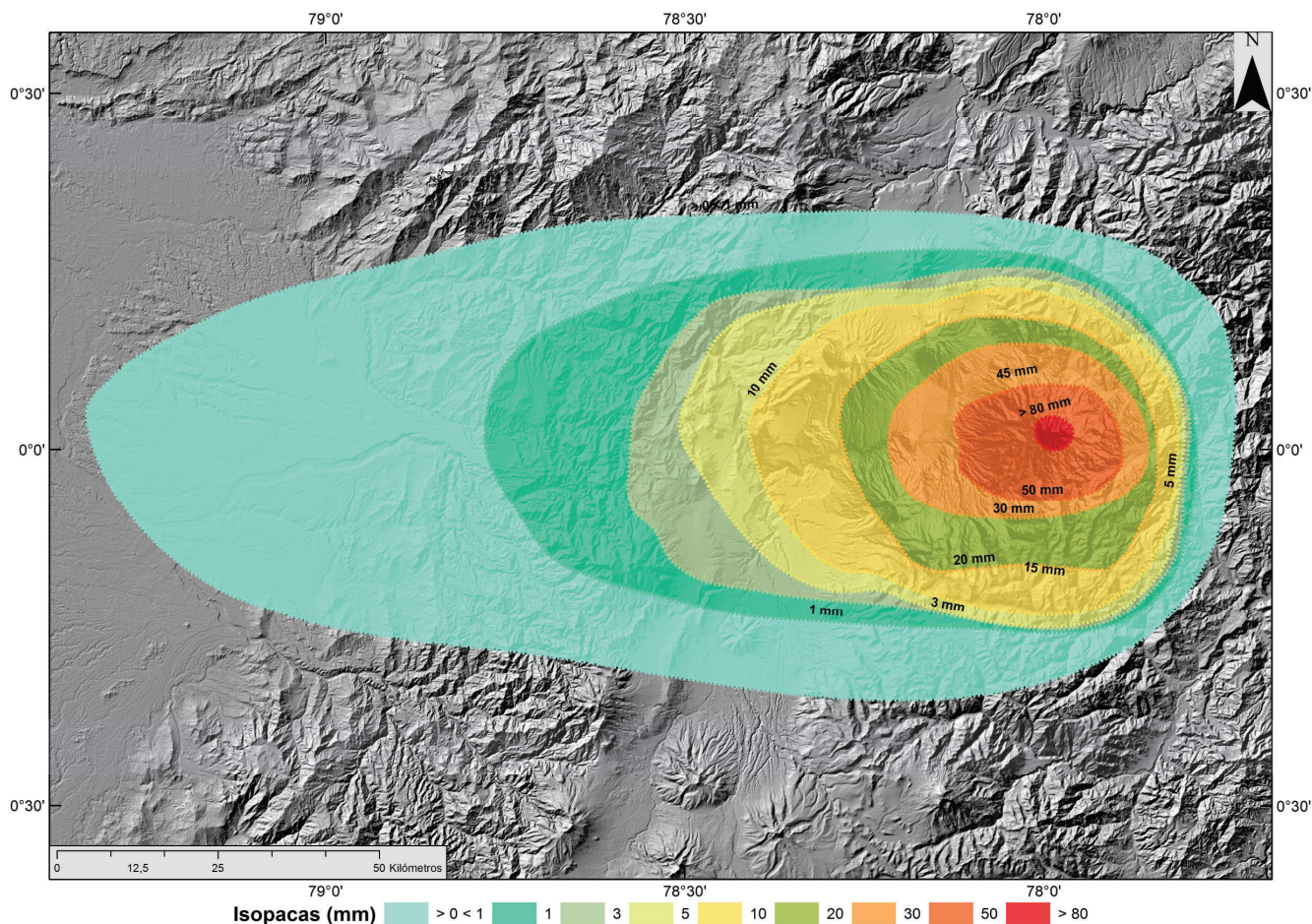


Figura 3: Mapa de peligro por caída de ceniza del volcán Cayambe. En caso de un evento tipo “San Marcos”, la zona con tono rojo oscuro sería afectada con mayor cantidad de acumulación de ceniza; mientras que la zona en tono verde claro sería afectada con acumulación menor de ceniza.

2.3. Mapeo de zonas vulnerables a lahares y caída de ceniza

Con las zonas potencialmente afectadas tanto para lahares como para caída de ceniza, se generó el mapa de zonas vulnerables de ambos fenómenos para los cantones de Cayambe y Pedro Moncayo mediante el uso de análisis espacial y álgebra de mapas. Autores como Yokoyama, et al. (1984); Stieltjes y Mirgon (1998), consideran que la población representa el elemento más vulnerable frente a una amenaza, razón por la cual este factor junto con la infraestructura y la actividad económica, han sido considerados para el presente estudio. En base a ello los factores establecidos para la definición de la vulnerabilidad a los peligros volcánicos (caída de ceniza y lahares) en los cantones Cayambe y Pedro Moncayo fueron: 1) Población 2) Infraestructura, 3) Actividad económica.

2.4. Identificación de infraestructuras dedicadas a la actividad florícola afectadas por lahares y la caída de ceniza

La cuantificación de áreas dedicadas a la actividad florícola cuya infraestructura puede verse afectada por lahares y caída de ceniza se determinó mediante la digitalización de edificaciones relacionadas con esta actividad. Se utilizó como insumo la fotografía aérea disponible del sector (IGM, 2012) y comprobación en campo de las edificaciones levantadas por métodos cartográficos. En este sentido, mediante fotoidentificación se hizo el levantamiento de las estructuras correspondiente a edificaciones (Figura 4) y posteriormente se catalogó la información tomando en consideración los parámetros establecidos, de acuerdo a la tabla de estructuración disponible y elaborada por el ente rector de la información Geográfica – Cartográfica del Ecuador (IGM, 2010).

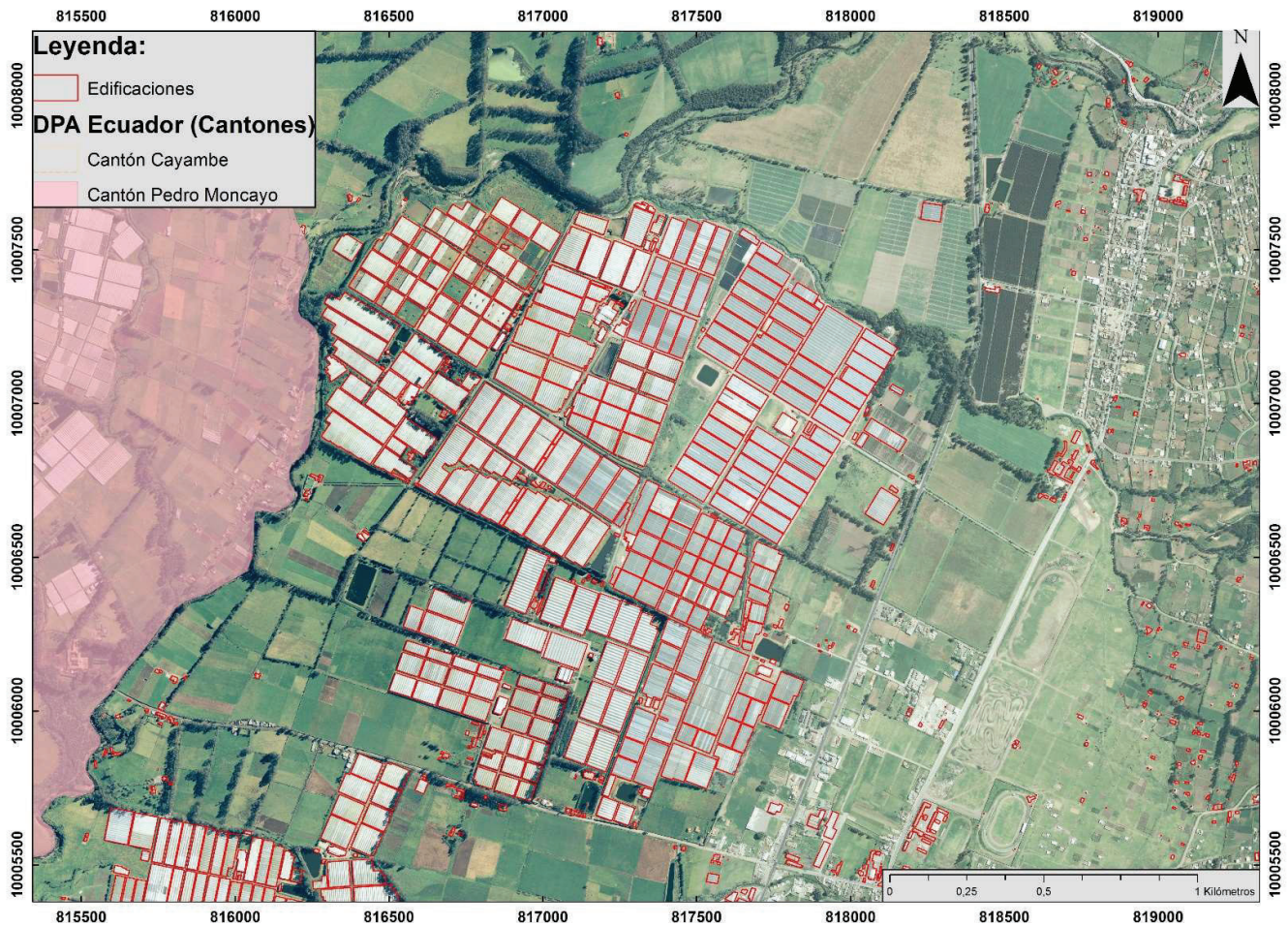


Figura 4: Digitalización de infraestructura de los cantones Cayambe y Pedro Moncayo.

Ortofoto: IGM, 2012.

De esta manera, todos los elementos mayores o iguales a una superficie de 6 m² fueron digitalizados en un archivo tipo polígono; mientras que los de menor superficie fueron representados en un archivo tipo punto a escala 1: 5,000. Se digitalizaron 3,616 edificaciones de tipo punto y 9,654 de tipo polígono, las cuales se sumaron a lo restituído por el IGM. Así, mediante el uso de los SIG, se levantaron un total de 17,916 puntos y 21,090 polígonos (Figura 5); los cuales fueron utilizados como insumo para el análisis de la infraestructura productiva y edificaciones relacionadas a la actividad florícola en los cantones Cayambe y Pedro Moncayo.

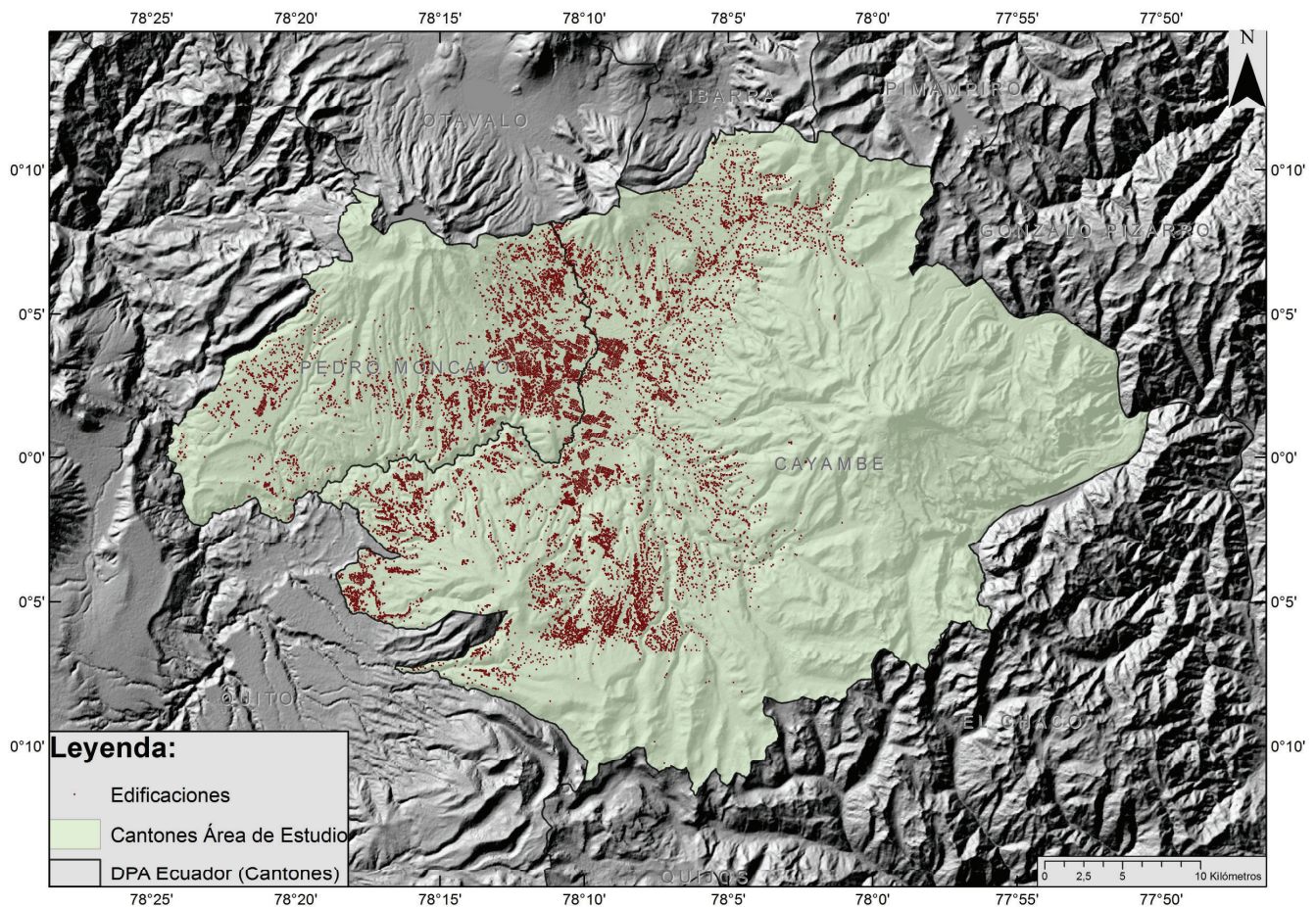


Figura 5: Mapa de edificaciones levantadas por métodos cartográficos.

3. RESULTADOS

3.1. Afectación por lahares y caída de ceniza según el uso del suelo

La caracterización del uso de suelo de los cantones Cayambe y Pedro Moncayo, permitió cuantificar la superficie afectada según el uso tanto por lahares como por caída de ceniza. De esta manera, la extensión de los cantones Cayambe y Pedro Moncayo (153,576 ha) en su totalidad se vería afectada por la caída de ceniza proveniente del volcán Cayambe en caso de una erupción de tipo “San Marcos”; siendo los espesores de ceniza de 50 mm, 30 mm y 20 mm los que cubren el 81.46% de la superficie de los mismos; mientras que, 1.46% de la superficie, correspondientes a las áreas proximales al cráter del volcán se verían afectadas con espesores superiores a 80 mm y el 17.05% de la superficie de los cantones tendrían una afectación con espesores de 5 y 10 mm.

El 52.08% corresponde a vegetación arbustiva y herbácea con una superficie de 79,980 ha, el 32.76% a tierra agropecuaria con una superficie de 50,317 ha. La cobertura de uso de suelo bosque representa el 9.32% con una superficie de 14,320 ha; mientras que, con porcentajes inferiores pero importantes la zona antrópica representa el 3.98% de la superficie de los cantones (6,105 ha), otras áreas el 1.60% (2,455 ha) y cuerpos de agua tan solo el 0.26% con una superficie de 397 hectáreas (Figura 6 y 8).

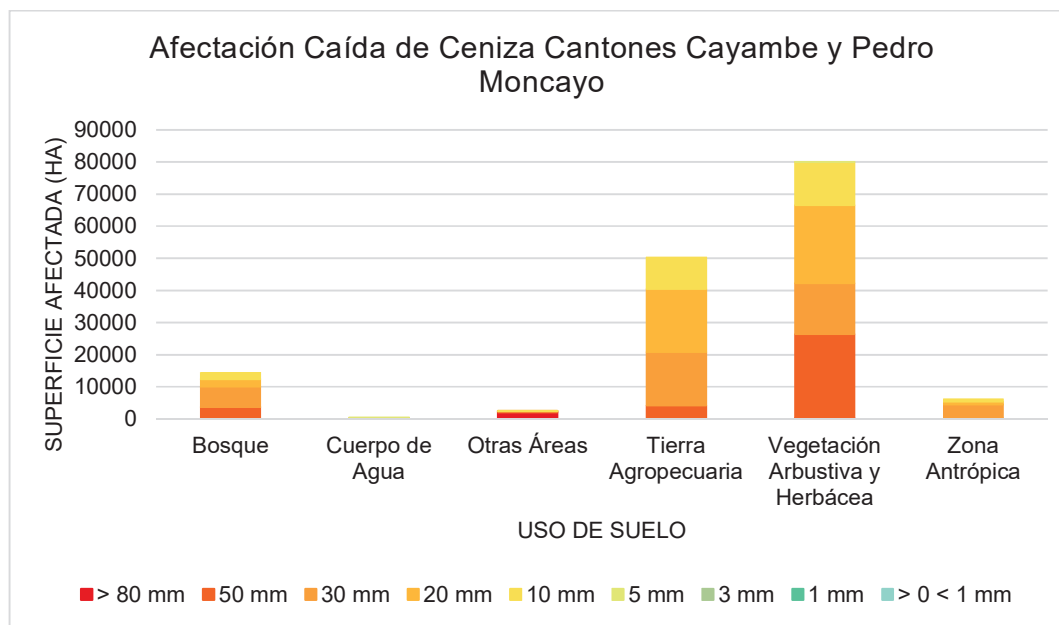


Figura 6: Afectación por caída de ceniza del volcán Cayambe. En caso de un evento tipo “San Marcos”, en tonos rojos superficies afectadas con mayor cantidad de acumulación de ceniza; mientras que en tonos amarillos superficies con una acumulación menor de ceniza.

Un total de 1,511 hectáreas de los cantones Cayambe y Pedro Moncayo, correspondientes al 0.98% de la superficie se verían afectadas por lahares proveniente del volcán Cayambe con una probabilidad de ocurrencia baja (lahares primarios); mientras que, el 0.76% tendría una afectación con una probabilidad alta de ocurrencia (lahares secundarios), correspondiente a 1,160 hectáreas. De la superficie total afectada por lahares, el 44.14% es vegetación arbustiva y herbácea, 32.57% está destinado el uso del suelo como zona urbana. Con superficies menores pero importantes, el uso de suelo tierra agropecuaria tiene el 25.06%. Coberturas de suelo como bosque representan el 2.06%, y cuerpos de agua 0.16%. (Figura 7 - 8).

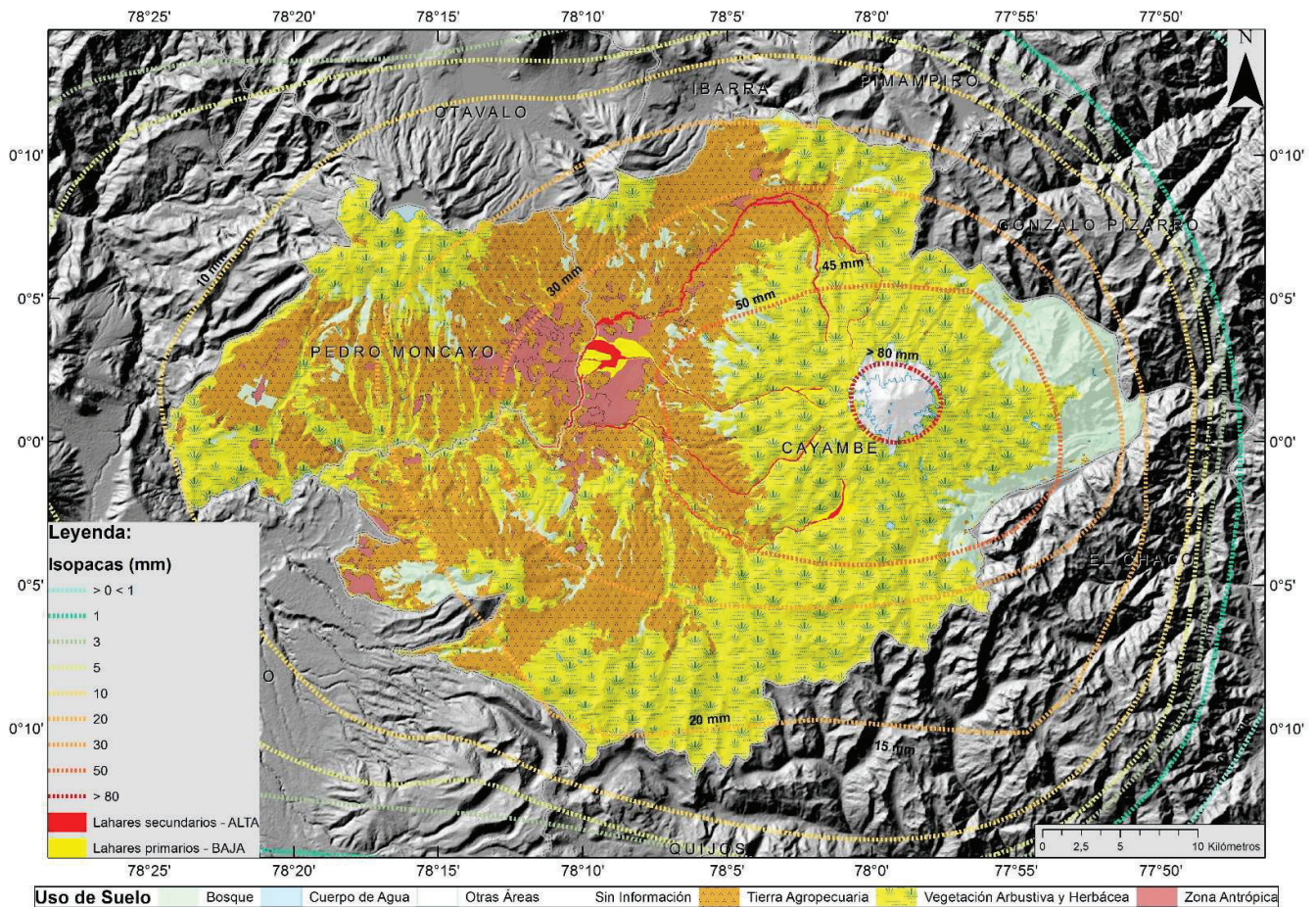


Figura 7: Afectación del uso del suelo de los cantones Cayambe y Pedro Moncayo por caída de ceniza y lahares del volcán Cayambe.

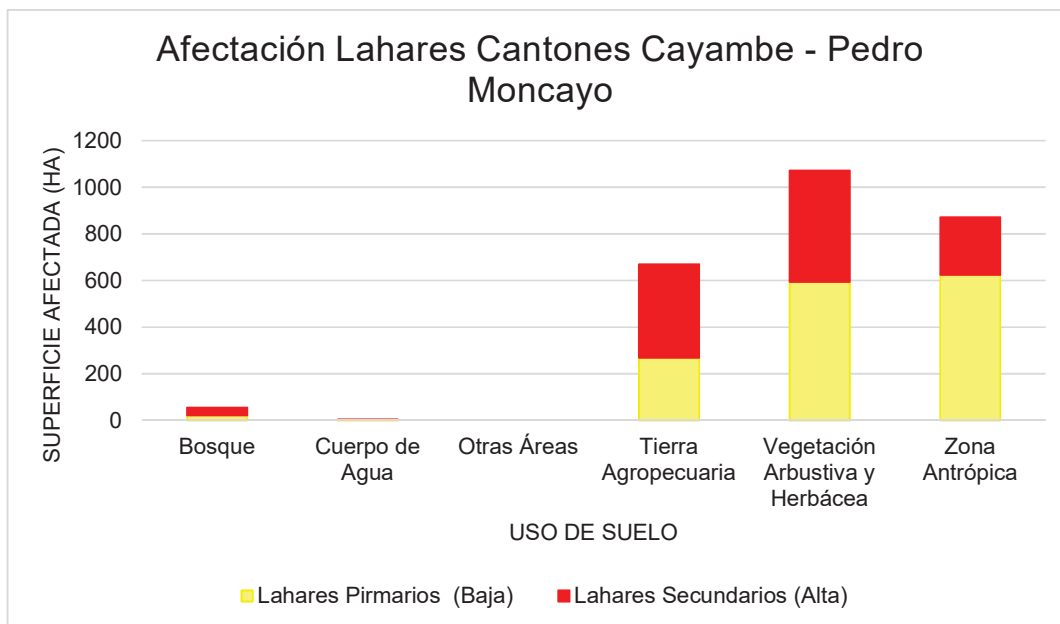


Figura 8: Afectación por lahares del volcán Cayambe. En caso de un evento tipo “San Marcos”, en color rojo superficies afectada por lahares secundarios con una probabilidad de ocurrencia alta; mientras que en color amarillo superficies afectada por lahares primarios con una probabilidad baja.

Un total de 3,217 hectáreas están repartidas en 152 florícolas existentes según el Censo Nacional Florícola en el área de estudio. 21 parroquias de los cantones Cayambe y Pedro Moncayo concentran la actividad económica al cultivo de flores, siendo la más importante por la superficie (1,150 hectáreas) y número de florícolas (88 florícolas), la zona de Tabacundo. Los suelos de los cantones Cayambe y Pedro Moncayo por su fertilidad están destinados a la producción florícola, siendo por tal motivo uno de los principales ingresos económicos para los cantones y de igual manera, rubro importante para el país por las exportaciones de los diferentes tipos de flores que se producen en la zona.

3.2. Afectación de la población por caída de ceniza y lahares

De los 118,967 habitantes de los cantones Cayambe y Pedro Moncayo, 69,880 se encuentran en la zona rural (58.74%); mientras que 49,087 habitantes en la zona urbana (41.26%) de acuerdo a los datos del INEC, 2010. Un total de 15,272 trabajadores se encuentran directamente relacionados a las florícolas en los cantones Cayambe y Pedro Moncayo en lo referente a trabajos en los cultivos de flores, poscosecha, cargos administrativos y de tipo guardianía según los datos obtenidos del Censo Nacional Florícola. De este valor, el 52.97% corresponden a hombres; mientras que el porcentaje restante (47.03%) a mujeres. La mano de obra masculina predomina ligeramente en el cultivo de flores con 848 trabajadores más que mujeres, llegando a un total de 9,990

trabajadores. En lo referente a la poscosecha de las flores, la mano de obra de mujeres es mayor con 357 trabajadoras; es decir 2,054 mujeres y 1,697 hombres. Tanto en la parte administrativa, como para guardianía se evidencia que la mano de obra para el hombre es más solicitada con un 16.04% para la primera y un 88.94% en los cargos antes descritos.

Por la cantidad de habitantes afectados, es necesario medidas de prevención por parte de las autoridades, con la finalidad de salvaguardar la integridad de los habitantes de los 237 poblados disponibles en la cartografía básica oficial a escala 1: 5,000 del IGM. De estos poblados, 35 se verían afectados con espesores hasta 10 mm, 52 con espesores de 20 mm, 57 con espesores de 30 mm y 8 con espesores hasta 50 mm por encontrarse en zonas donde la división censal se encuentra en zonas proximales a la fuente (Figura 9).

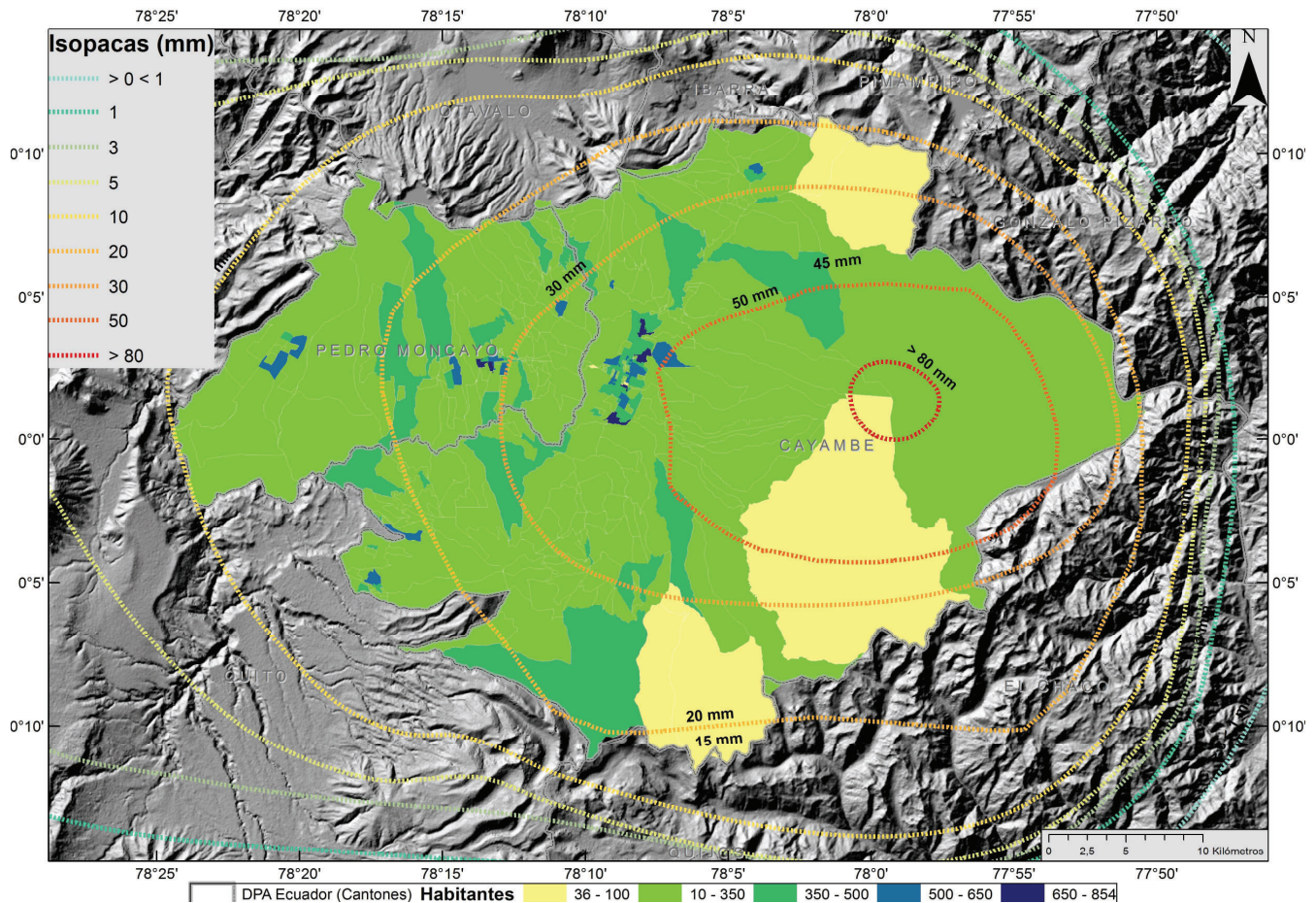


Figura 9: Número de habitantes afectados por nivel censal en los cantones Cayambe y Pedro Moncayo por caída de ceniza del volcán Cayambe en caso de un evento tipo “San Marcos. En tonos amarillos – verdes claros zonas con menor cantidad de habitantes; mientras que en tonos verdes oscuros – azules zonas censales con mayor cantidad de habitantes.

Con respecto a los lahares provenientes del volcán Cayambe, se tendrían 49 poblados afectados por lahares secundarios (probabilidad alta de ocurrencia) y de acuerdo a la división censal del INEC llegarían a una población total de 22,267 habitantes. Para una probabilidad baja de ocurrencia (lahares primarios) del volcán Cayambe se tendría 26 poblados con una población total de 21,461 habitantes afectados.

3.3. Afectación a infraestructura y edificaciones por caída de ceniza y lahares

Mediante técnicas cartográficas se pudo levantar un total de 61,574 edificaciones en los cantones de Cayambe y Pedro Moncayo; de las cuales mediante fotoidentificación se determinó 13,208 edificaciones destinadas a la actividad florícola. 4,272 han sido catalogados como invernaderos y 8,936 como cobertizos. En lo referente a la caída de ceniza, 146 invernaderos y 556 cobertizos se verían afectados con espesores hasta 50 mm. 2,619 invernaderos y 1,574 cobertizos, se verían afectados con espesores de 30 mm. 1,121 invernaderos y 4391 cobertizos tendrían afectaciones hasta 20 mm. Por último, 386 invernaderos y 2,491 cobertizos estarían afectados con espesores hasta 10 mm de caída de ceniza, ante una erupción del volcán Cayambe (Figura 10).

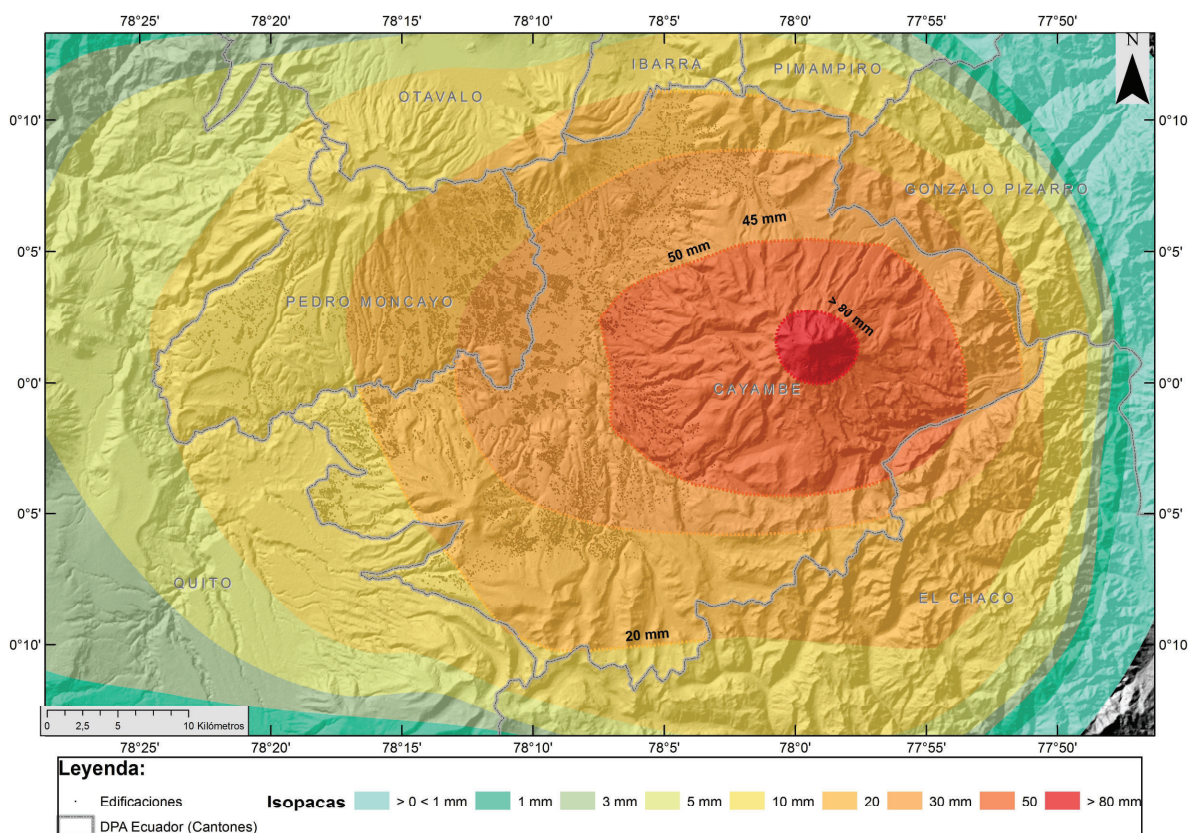


Figura 10: Infraestructura y edificaciones afectadas en los cantones Cayambe y Pedro Moncayo por caída de ceniza del volcán Cayambe en caso de un evento tipo "San Marcos". En tonos claros zonas con espesores menores de ceniza; mientras que en tonos oscuros zonas con mayor espesor de ceniza.

Con respecto a los lahares secundarios (probabilidad alta de ocurrencia) se tendría una afectación de 23 invernaderos, 9 cobertizos y 71 casas; mientras que para lahares primarios (probabilidad de ocurrencia baja), correspondiente a la de mayor extensión de lahares se tendría 236 invernaderos, 14 cobertizos y 593 casas directamente afectados. Esto se obtiene tomando en consideración aquellos invernaderos o cobertizos que se encuentran en los límites de las florícolas delimitadas en el Censo Nacional Florícola (Figura 11).

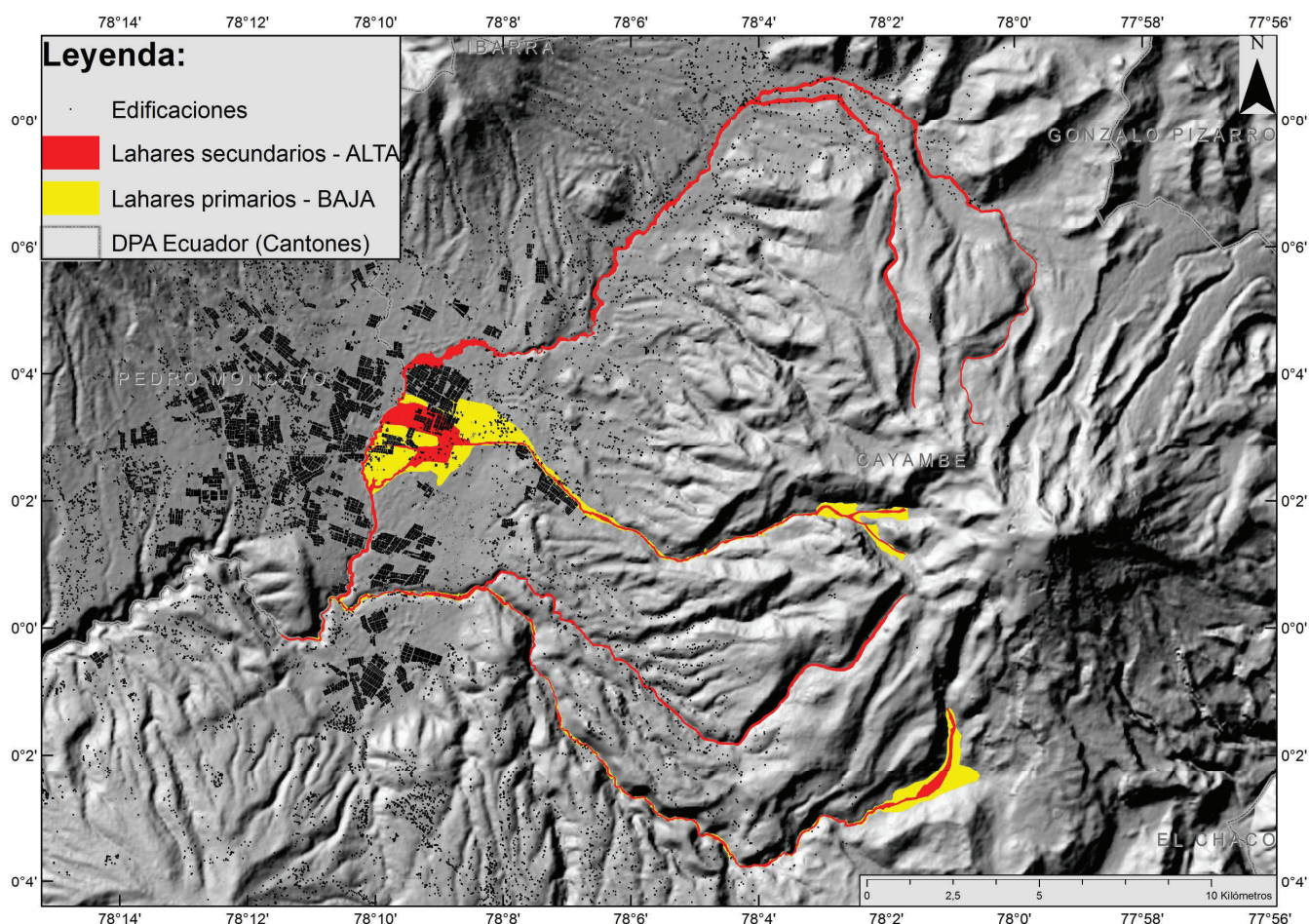


Figura 11: Infraestructura y edificaciones afectadas en los cantones Cayambe y Pedro Moncayo por lahares del volcán Cayambe. En caso de un evento tipo “San Marcos”, en color rojo lahares secundarios con una probabilidad de ocurrencia alta; mientras que, en color amarillo lahares primarios con una probabilidad de ocurrencia baja.

3.4. Afectación al sector florícola por caída de ceniza y lahares

Infraestructura productiva

La clasificación de las edificaciones permitió enfocar el análisis en aquellas infraestructuras correspondientes a invernaderos y cobertizos, ambas relacionadas con la actividad florícola. Adicionalmente, según el Censo Nacional Florícola del Ministerio

de Agricultura y Ganadería (MAGAP, 2009), a escala 1: 5,000, en el área de estudio existen unas 152 florícolas con una extensión total de 3,217 hectáreas; de las cuales 1,434 hectáreas corresponden al cantón Cayambe y 1,927 hectáreas al cantón Pedro Moncayo. La parroquia con mayor número y superficie de florícolas es la de Tabacundo, seguida de la parroquia Cayambe.

Los 152 predios correspondientes a las florícolas de los cantones Cayambe y Pedro Moncayo levantados por el MAGAP en el Censo Nacional Florícola, se los ha dividido en tres grandes grupos según su superficie: **Pequeños (total de 13)**: Aquellos predios cuya superficie se encuentra entre 0 y menor a 3 hectáreas. 6 florícolas pequeñas tendrían afectaciones con espesores de 20 mm y 7 florícolas pequeñas serían afectadas con espesores de 30 mm. **Medianos (total de 92)**: Corresponden a superficies de florícolas entre 3 y 20 hectárea. 8 florícolas medianas tendrían afectaciones con espesores de 10 mm, 25 florícolas medianas serían afectadas con espesores de 20 mm y 68 florícolas medianas afectadas con espesores 30 mm. Con respecto a la probabilidad de ocurrencia de lahares, 10 florícolas medianas afectadas por lahares primarios; mientras que, 9 serían afectadas por lahares secundarios. **Grandes (total de 47)**: Predios cuya superficie supera las 20 hectáreas. 3 florícolas grandes se verían afectadas con espesores de 10 mm, 7 florícolas grandes serían afectadas con espesores 20 mm, 35 florícolas podrían verse afectadas con espesores de 30 mm y 2 florícolas grandes con espesores de 50 mm. Con respecto a la probabilidad de ocurrencia de lahares, 8 florícolas grandes serían afectadas por lahares primarios; mientras que, 9 florícolas grandes serían afectadas por lahares secundarios.

Producción

Los suelos de los cantones Cayambe y Pedro Moncayo, por sus condiciones favorables, están destinados a la producción florícola, siendo esta actividad uno de los principales ingresos económicos para la zona y también rubro de exportación importante para el país y de acuerdo a los datos disponibles para el año 2006 alcanzó la cifra de 444 millones de dólares (EXPOFLORES, 2006). Según los datos del Censo Nacional Florícola (2009) se evidencia una diversificación de las florícolas según el tipo de flor que producen en las 21 parroquias dedicadas a esta actividad. De lo antes expuesto, se evidencia que las florícolas del cantón Cayambe destinan 670.36 hectáreas para el cultivo de rosas, 24.59 hectáreas para flor de verano y 23.88 hectáreas para claveles. Mientras que las florícolas del cantón Pedro Moncayo destinan 707.38 hectáreas para el cultivo de rosas, 6.37 hectáreas para flor de verano y 18.71 hectáreas para claveles.

En el año 2009, el MAGAP determinó el costo aproximado de las florícolas encuestadas en el Censo Nacional Florícola, cuyos valores ascienden a 150,000 dólares por hectárea; de los cuales, el 45% del valor corresponde a las plantas; seguido por la infraestructura de invernaderos con el 25%, el tercer lugar corresponde al valor de la tierra con el 20% y finalmente, el 10% representan las construcciones. Estos valores son muy considerables en caso de una erupción del volcán Cayambe ya que las florícolas con mayor valor de la Provincia de Pichincha se encuentran en los cantones de Cayambe y Pedro Moncayo, potencialmente afectados por caída de ceniza y lahares. (Figura 12 y 13).

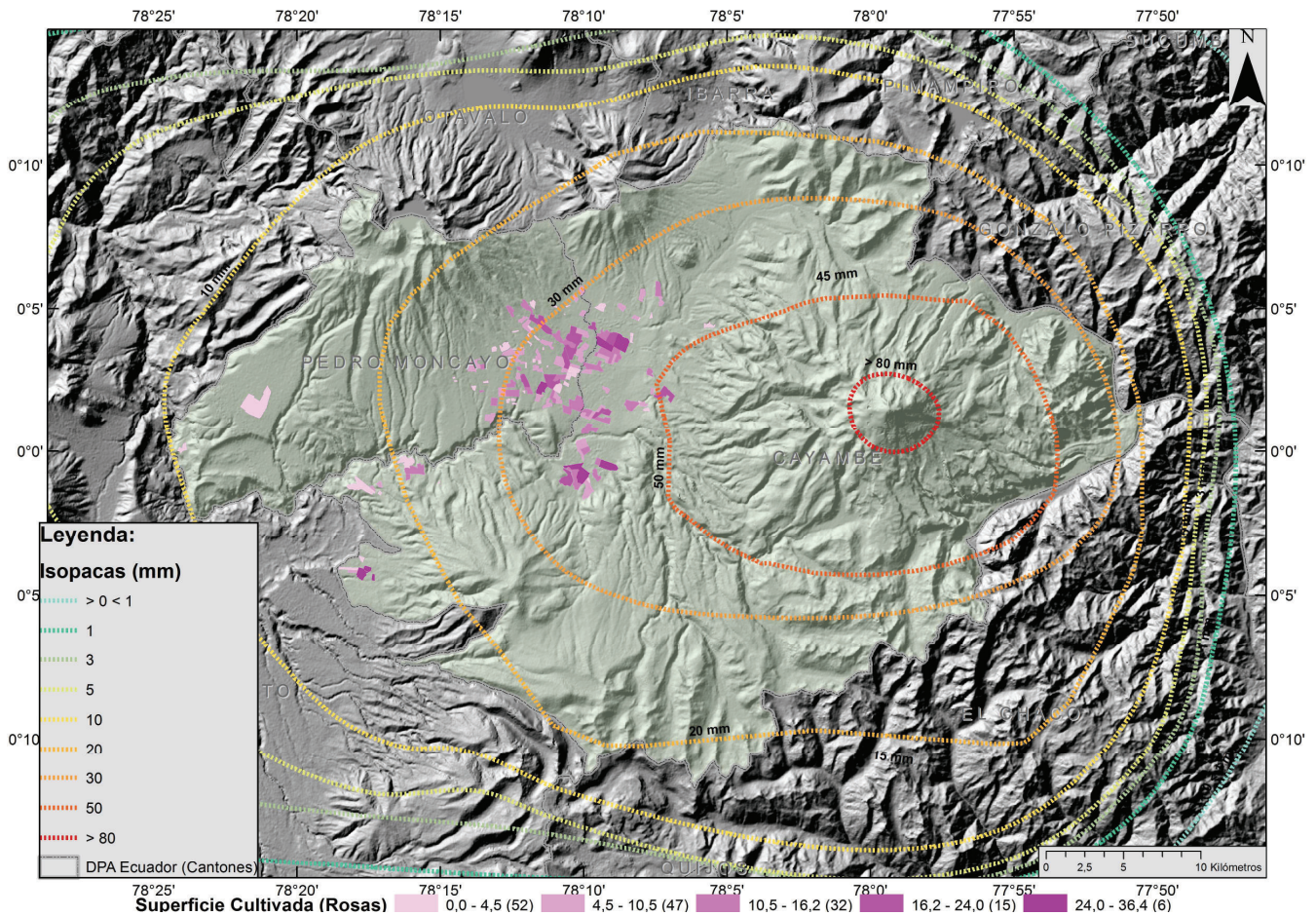


Figura 12: Afectación de florícolas por superficie cultiva de rosas de los cantones Cayambe y Pedro Moncayo por caída de ceniza del volcán Cayambe en caso de un evento tipo “San Marcos”. En tonos morados oscuros florícolas con mayor superficie de cultivos de rosas; mientras que en tonos morados claros florícolas con menor superficie de cultivo de rosas.

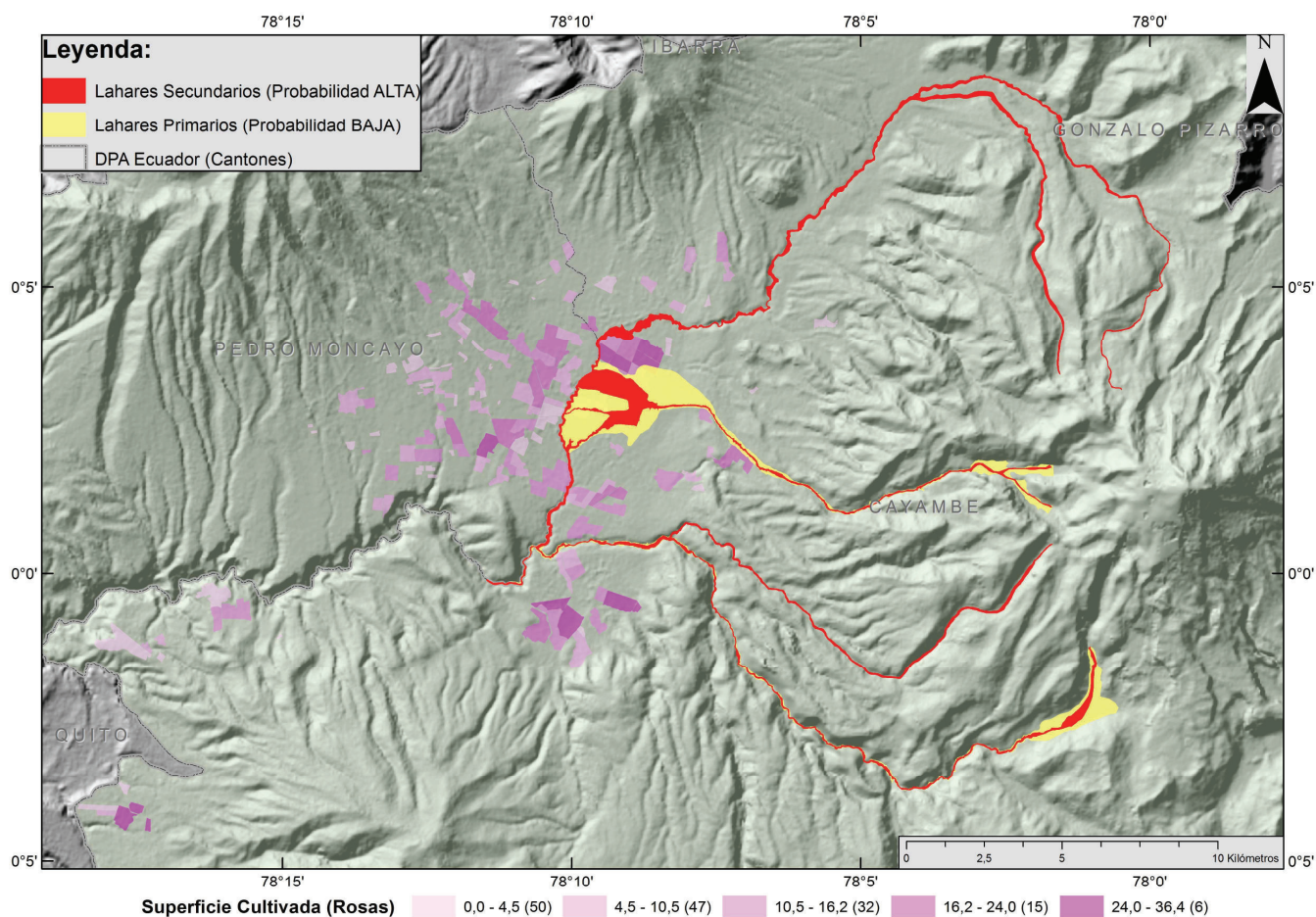


Figura 13: Afectación de florícolas por superficie cultiva de rosas en los cantones Cayambe y Pedro Moncayo por lahares del volcán Cayambe en caso de un evento tipo “San Marcos”. En tonos morados oscuros florícolas con mayor superficie de cultivos de rosas; mientras que en tonos morados claros florícolas con menor superficie de cultivo de rosas.

Con los datos obtenidos del Censo Nacional Florícola se determinó que los valores de las florícolas varían entre 27,000 USD hasta 15 millones de dólares, correspondiente a las fincas donde se cultivan flores de verano y rosas, respectivamente (MAGAP, 2009). Aproximadamente, el 45% de las fincas tienen un valor que oscila entre uno y cinco millones de dólares, seguido con el 40%, que les corresponde el grupo de aquellas que tienen un valor entre 150,000 y 1 000,000 de dólares; mientras que el 12% tiene valores menores a 150.000; y finalmente el 3% tienen valores que superan los 5 millones de dólares (MAGAP, 2009); las cuales tendrían un grado de afectación desde pérdidas parciales a totales en el caso de lahares, dependiendo del evento.

De esta manera, con la información recopilada (MAGAP, 2009) se estimó el costo promedio de pérdidas en las florícolas (Figura 14), en aquellas zonas potencialmente afectadas por ceniza con espesores superiores a 10 mm las plantas e invernaderos tendrían una afectación considerable (Jenkins et al., 2015), llegando a superar los 200

USD millones en pérdidas de plantas y 120 USD millones en los invernaderos. En el caso de lahares las pérdidas se dan en los suelos, los cuales serían enterrados por flujos de lodo y con esto, se estiman pérdidas de entre los 3 USD millones en el caso de lahares secundarios y 5 USD millones en lahares primarios.

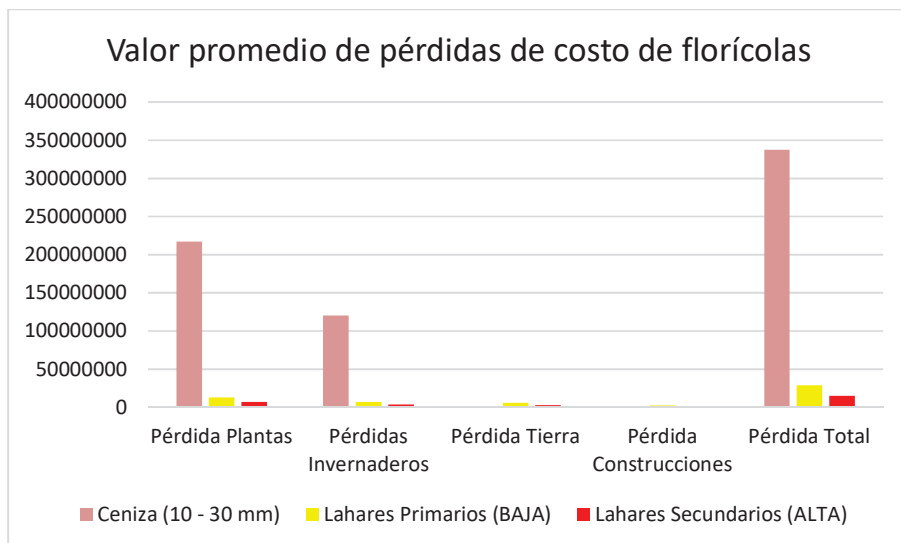


Figura 14: Estimación de pérdidas en costos (USD) de las florícolas de los cantones Cayambe y Pedro Moncayo por caída de ceniza y lahares del volcán Cayambe en caso de un evento tipo “San Marcos”.

4. DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos en el presente estudio con respecto a las simulaciones de caída de ceniza mediante el uso del código Ash 3D en el periodo 2007 – 2016 e interpolaciones de los datos, han permitido la actualización de los peligros volcánicos del volcán Cayambe. Dichos datos han sido validados por especialistas del IGEPN para utilizarlos en la actualización del mapa de amenazas del volcán Cayambe; lo que demuestra que el avance de la tecnología e insumos actualizados permiten modelar con mayor precisión los peligros asociados a las amenazas volcánicas y con ello, tener mejores insumos para la toma de decisiones y gestión de riesgos.

Pese a la actualización de la información de la amenaza volcánica, tanto para lahares como caída de ceniza, es necesario mencionar que los datos de carácter socioeconómico disponibles utilizados para este estudio no presentan la misma actualización. Esto ha dificultado una cuantificación más precisa del impacto social y económico en los cantones de Cayambe y Pedro Moncayo ante una eventual erupción. Eso plantea la necesidad de contar con sistemas de información social y económica con una actualización periódica.

Otro aspecto importante es el nivel de detalle de la información cartográfica disponible, la cual solo incluye un levantamiento de las edificaciones pero no respecto de su estado y año de construcción, aspectos importantes para el análisis de vulnerabilidad de las mismas.

Los datos relacionados con la actividad florícola y sus costos, han sido limitados, esto por la falta de apertura de cuentas de los dueños en el Censo Nacional Florícola, de allí que la cuantificación de las pérdidas sea solo referencial y debe ser considerado como valores mínimos. Asimismo, se sugiere que la cuantificación del impacto económico considere la época del año, factor importante si se toma en cuenta que en ciertas fechas como San Valentín, día de la madre y año nuevo, existe un considerable incremento de las ventas para los floricultores.

A pesar de la falta de información social y económica actualizada, el presente estudio puede replicarse en otras áreas y con diferentes volcanes y con esto, brindar insumos necesarios para la gestión del riesgo y la planificación.

5. CONCLUSIONES

Mediante las simulaciones obtenidas por el (IGPN 2017) de lahares (primarios y secundarios) y los distintos espesores (0, 1, 3, 5, 10, 20, 30, 50 y 80 mm) que representan las zonas potencialmente afectadas por ceniza, obtenidas a partir de las 120 simulaciones para el período 2007 – 2016, se generó mapas de amenazas por lahares y caída de ceniza asociada al volcán Cayambe, en zonas de actividad florícola en los cantones Cayambe y Pedro Moncayo.

La superficie de los cantones Cayambe y Pedro Moncayo (153,576 ha) en su totalidad se vería afectada por la caída de ceniza proveniente del Volcán Cayambe en mayor o en menor grado. Así el 17.05% de la superficie de los cantones tendría una afectación con espesores de ceniza de entre 5 y 10 mm el 50% de las veces en caso de una erupción de tipo "San Marcos"; los espesores de ceniza de 20 mm, 30 mm y 50 mm cubrirían el 81.46% de la superficie, en donde se localizan las cabeceras cantonales de Cayambe y Tabacundo; el 1.46% restante, corresponde a las áreas proximales al cráter del volcán que se verían afectadas con espesores superiores a los 80 mm. El 52.08% de la superficie, alrededor de 80,000 ha afectadas por la caída de ceniza, corresponden a vegetación arbustiva y herbácea con una superficie de 79,980 ha, el 32.76% a tierra agropecuaria con una superficie de 50,317.28 ha. La cobertura de uso de suelo bosque representa el 9.32% con una superficie de 14,320 ha; mientras que, con porcentajes

inferiores pero importantes la zona antrópica representa el 3.98% de la superficie de los cantones (6,105 ha), otras áreas el 1.60% (2,455 ha) y cuerpos de agua tan solo el 0.26% con una superficie de 397 hectáreas.

Un total de 1,511 hectáreas de los cantones Cayambe y Pedro Moncayo, correspondientes al 0.98% de la superficie, se verían afectadas por lahares primarios proveniente del volcán Cayambe con una probabilidad de ocurrencia baja; mientras que los lahares secundarios con una probabilidad alta de ocurrencia, tendrían una afectación de 1,160 hectáreas. De la superficie total afectada por lahares, el 40.15% son vegetación arbustiva y herbácea, 32.57% está destinado el uso del suelo como zona urbana, tierras agropecuarias el 25.06%, coberturas de suelo como bosque alcanzan el 2.06%, cuerpos de agua 0.16% y otras áreas el 0.16%.

Según el Censo Nacional Florícola, de las 3,217 hectáreas repartidas en 152 florícolas, 21 parroquias de los cantones Cayambe y Pedro Moncayo basan su economía en el cultivo de flores, siendo la más importante por la superficie (1,150 hectáreas) y número de florícolas (88 florícolas), la parroquia de Tabacundo.

De los 118,967 habitantes de los cantones Cayambe y Pedro Moncayo, 69,880 se encuentran en la zona rural (58.74%); mientras que 49,087 habitantes en la zona urbana (41.26%) de acuerdo a los datos del INEC. De acuerdo con la Cartografía básica oficial a escala 1: 5,000 del IGM en la zona existen un total de 237 poblados registrados, de los cuales 35 se verían afectados por la caída de ceniza con espesores de hasta 10 mm, 52 con espesores de 20 mm, 57 con espesores de 30 mm y 8 con espesores de hasta 50 mm.

Con respecto a los lahares, se tendrían un total de 28, 947 habitantes afectados en 50 poblados. 49 poblados afectados por lahares secundarios con una probabilidad alta de ocurrencia y 26 poblados afectados por lahares primarios con una probabilidad de ocurrencia baja.

Mediante técnicas cartográficas se levantaron un total de 61,574 edificaciones (39,006 digitalizadas y 22,568 restituidas) en los cantones de Cayambe y Pedro Moncayo; de las cuales se determinó que unas 13,208 edificaciones son destinadas a la actividad florícola, correspondientes a 4,272 invernaderos y 8,936 cobertizos. El 61% de los invernaderos (2,619) se verían afectados con espesores de hasta 30 mm. 1,121 construcciones, que representan el 26% se verían afectadas con espesores de 20 mm. 9% de los invernaderos (386) tendrían afectaciones de hasta 10 mm y el 3% (146 invernaderos) estarían afectados con espesores de hasta 50 mm. En aquellas

construcciones que han sido catalogadas como cobertizos, el 48% de las mismas (4,315), tendrían afectación de hasta 20 mm. 2,491 edificaciones que representan el 28% tendrían una afectación de espesores de ceniza de hasta 10 mm. El 18% de las construcciones (1,574) tendrían una afectación de hasta 30 mm y el 6% (556) tendrían una afectación de hasta 50 mm de caída de ceniza, ante una erupción del volcán Cayambe.

Con respecto a los lahares secundarios se tendría una afectación de 103 edificaciones (23 invernaderos, 9 cobertizos y 71 casas); mientras que para lahares primarios se tendría 843 edificaciones directamente afectadas divididas en 236 invernaderos, 14 cobertizos y 593 casas directamente afectados.

Mediante el uso de análisis espacial, álgebra de mapas y datos censales se cuantificó la afectación socioeconómica para una erupción de tamaño moderado (IEV = 3 - 4). Con la información recopilada (MAGAP, 2009) se estimó el costo promedio de pérdidas en las florícolas en aquellas zonas potencialmente afectadas por ceniza con espesores superiores a 10 mm, llegando a superar los 200 USD millones en pérdidas de plantas y 120 USD millones en los invernaderos. En el caso de lahares las pérdidas se dan en las plantas, invernaderos y en los suelos, los cuales serían enterrados por flujos de lodo y con esto, se estiman pérdidas de entre los 3 USD millones en el caso de lahares secundarios y 5 USD millones en lahares primarios.

6. REFERENCIAS

Ascázubi J. (1802). Letter to Baron von Humboldt. In: "von Humboldt A, Briefe aus Amerika, 1799-1804", herausgegeben von Ulrike Moheit, Akademic Verlag, Berlin, 1993.

Bernard B. y Samaniego P. (2017). Escenarios eruptivos en el volcán Cayambe y construcción de un árbol de eventos: Extended abstract volume of the 8th JCT. Quito, Ecuador, p 5.

Biass S., Bonadonna C., Traglia F., Pistolesi M., Rosi M. y Lestuzzi P. (2016). Probabilistic evaluation of the physical impact of future tephra fallout events for the Island of Volcano, Italy. Bull Volcanol 78:37. En: 10.1007/s00445-016-1028-1.

Bonadonna C., Connor C., Houghton B., Connor L., Byrne M., Laing A. y Hincks T. (2005). Probabilistic Modeling of Tephra Dispersal: Hazard Assessment of a

Multiphase Rhyolitic Eruption at Tarawera, New Zealand. J Geophys Res-Solid Earth 110:B03203.

Carey, S. (1996). Modeling of tephra fallout from atmospheric eruptions, in Scarpa, L.A., and Tilling, R.I., eds., Monitoring and Mitigation of Volcanic Hazards: Berlin, Springer Verlag, p. 429-463.

EXPOFLORES - Asociación Nacional de Productores y Exportadores de Flores, (2006).

Hall M. y Mothes P. (1994). Tefroestratigrafía Holocénica de los volcanes principales del Valle Interandino, Ecuador: El contexto geológico del espacio físico Ecuatoriano, ed. R. Marocco, p 47 -67. Corporación Editora Nacional y Colegio de Geógrafos del Ecuador. Quito, Ecuador.

IGEPN, 2016. Informe Especial – Volcán Cayambe N°1. Consultado el 15/04/2017 disponible en: <http://www.igepn.edu.ec/cayambe-informes/cay-especiales/cay-e-2016/15310-informe-especial-volcan-cayambe-n-1/file>.

IGEPN, 2016. Informe Especial – Volcán Cayambe N°2. Consultado el 15/04/2017 disponible en: <http://www.igepn.edu.ec/cayambe-informes/cay-especiales/cay-e-2016/16585-informe-especial-volcan-cayambe-n-2/file>.

IGEPN, 2016. Informe Especial – Volcán Cayambe N°3. Consultado el 15/04/2017 disponible en: <http://www.igepn.edu.ec/cayambe-informes/cay-especiales/cay-e-2016/16567-informe-especial-volcan-cayambe-n-3/file>.

IGEPN, 2016. Informe Especial – Volcán Cayambe N°4. Consultado el 15/04/2017 disponible en: <http://www.igepn.edu.ec/cayambe-informes/cay-especiales/cay-e-2016/16657-informe-especial-volcan-cayambe-n-4/file>.

IGEPN, 2016. Informe Especial – Volcán Cayambe N°5. Consultado el 15/04/2017 disponible en: <http://www.igepn.edu.ec/cayambe-informes/cay-especiales/cay-e-2016/16780-informe-especial-volcan-cayambe-n-5/file>.

IGEPN, 2017. Informe Especial – Volcán Cayambe N°1. Consultado el 15/04/2017 disponible en: <http://www.igepn.edu.ec/cayambe-informes/cay-especiales/cay-e-2017/17196-informe-especial-volcan-cayambe-n-1-1/file>.

IGEPN, 2017. Informe Especial – Volcán Cayambe N°2. Consultado el 15/04/2017 disponible en: <http://www.igepn.edu.ec/cayambe-informes/cay-especiales/cay-e-2017/17425-informe-especial-volcan-cayambe-n-1-2/file>.

- IGM, Instituto Geográfico Militar (2010). Catálogo de objetos del Instituto Geográfico Militar para Cartografía Base Escala 1:5 000.
- IGM, Instituto Geográfico Militar (2012). Ortofoto Cantones Cayambe y Pedro Moncayo.
- INEC, Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (2010). VII Censo de Población y VI de Vivienda.
- Jenkins S., Wilson T., Magill C., Miller V. y Stewart, C. (2015). Volcanic ash fall hazard and risk: Technical Background Paper for the UNISDR 2015 Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction. Global Volcano Model and IAVCEI.
- MAGAP, Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca (2009). Censo Nacional Florícola.
- Mastin L, Guffanti M, Servranckx R, Webley P, Barsotti S, et al. (2009). A multidisciplinary effort to assign realistic source parameters to models of volcanic ash-cloud transport and dispersion during eruptions. *J Volcanol Geotherm Res* 186:10–21. En: 10.1016/j.jvolgeores.2009.01.008.
- Mastin L, Randall M, Schwaiger H y Denlinger R (2013). User's guide and reference to Ash3d—A three-dimensional model for Eulerian atmospheric tephra transport and deposition. U.S. Geological Survey Open-File Report 2013–1122.
- Martínez L. (1994). Los campesinos - artesanos en la sierra central: el caso de Tungurahua, CAAP, Quito.
- Ministerio de Finanzas. (2008). Estadísticas Fiscales.
- Samaniego P. (1996) Estudio vulcanológico y petrológico de la historia reciente del volcán Cayambe. Tesis Ing. Geólogo, Escuela Politécnica Nacional.
- Samaniego P., Monzier M., Robin C. y Hall, M. L. (1998). Late Holocene eruptive activity at Nevado Cayambe Volcano, Ecuador. *Bulletin of Volcanology* 59, 451–459.
- Samaniego P., Robin C., Monzier M., Eissen J. Mothes P, y Hall M. (2004). El Complejo Volcánico Cayambe, Síntesis geológica, actividad holocénica y evaluación de los peligros volcánicos. *Investigaciones en Geociencias*, Instituto Geofísico, Escuela Politécnica Nacional, Quito.
- Samaniego P., Eissen J., Monzier M., Robin C., Alvarado A. y Yepes H. (2004b). Los peligros volcánicos asociados con el Cayambe. Instituto Geofísico, Quito, 95 pp.

- Stieltjes L. y Mirgon C. (1998). Approche méthodologique de la vulnérabilité aux phénomènes volcaniques. Test d'application sur les réseaux de la Martinique. Rapport de synthèse. BRGM, R40098, 218 p.
- Suzuki T. (1983). A theoretical model for dispersion of tephra, in: D. Shimozuru, I. Yokoyama (Eds.), Arc Volcanism: Physics and Tectonics, Terra Scientific Publishing Company (TERRAPUB), Tokyo, pp. 93– 113.
- Yokoyama I., Tilling R. y Scarpa R. (1984). International mobile early-warning system(s) for volcanic eruptions and related Seismic activities. UNESCO, Paris, FP/2106-82-01(2286), 102pp.