

UACM

Universidad Autónoma
de la Ciudad de México

NADA HUMANO ME ES AJENO

COLEGIO DE CIENCIAS Y HUMANIDADES

LICENCIATURA EN PROTECCIÓN CIVIL Y GESTIÓN DE RIESGOS

**Escenarios de dispersión de cenizas emitidas
por el volcán Popocatepetl**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
LICENCIADA EN PROTECCIÓN CIVIL Y GESTIÓN DE RIESGOS

P R E S E N T A

MIRIAM MUÑOZ GARCÍA

DIRECTORA **MTRA. ANA MARÍA ALARCÓN FERREIRA**

CODIRECTOR **DR. ÁNGEL GÓMEZ VÁZQUEZ**

Ciudad de México, noviembre de 2025.

SISTEMA BIBLIOTECARIO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE LA CIUDAD DE MÉXICO COORDINACIÓN ACADÉMICA

RESTRICCIONES DE USO PARA LAS TESIS DIGITALES

DERECHOS RESERVADOS[©]

La presente obra y cada uno de sus elementos está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor; por la Ley de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México, así como lo dispuesto por el Estatuto General Orgánico de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México; del mismo modo por lo establecido en el Acuerdo por el cual se aprueba la Norma mediante la que se Modifican, Adicionan y Derogan Diversas Disposiciones del Estatuto Orgánico de la Universidad de la Ciudad de México, aprobado por el Consejo de Gobierno el 29 de enero de 2002, con el objeto de definir las atribuciones de las diferentes unidades que forman la estructura de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México como organismo público autónomo y lo establecido en el Reglamento de Titulación de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México.

Por lo que el uso de su contenido, así como cada una de las partes que lo integran y que están bajo la tutela de la Ley Federal de Derecho de Autor, obliga a quien haga uso de la presente obra a considerar que solo lo realizará si es para fines educativos, académicos, de investigación o informativos y se compromete a citar esta fuente, así como a su autor ó autores. Por lo tanto, queda prohibida su reproducción total o parcial y cualquier uso diferente a los ya mencionados, los cuales serán reclamados por el titular de los derechos y sancionados conforme a la legislación aplicable.

Agradecimientos

Quiero expresar mi más profundo y sincero agradecimiento a mis profesores, quienes han sido pilares fundamentales en mi formación académica y personal. Su dedicación, sabiduría y apoyo han sido invaluable para mí.

A la Maestra Ana María Alarcón Ferreira, por confiar en este proyecto desde sus inicios como experiencia de servicio social. Su fe en mí y en mi capacidad para llevar a cabo este proyecto ha sido un impulso significativo para mi crecimiento.

Al Doctor Ángel Gómez Vázquez, por compartir generosamente sus conocimientos y experiencia. Su guía y dirección han sido fundamentales en mi desarrollo académico y profesional.

Al Mtro. Enrique Cruz Villagrán, cuya paciencia y comprensión me han permitido crecer y aprender de manera significativa. Su apoyo incondicional y palabras de aliento han sido un faro en momentos de incertidumbre.

A mis jefes de trabajo, que me apoyaron para seguir estudiando y creyeron en mi capacidad para lograr mis metas. En especial a Naymi y José Luis, quienes siempre me brindaron horarios flexibles y me permitieron equilibrar mi trabajo y mis estudios. Su apoyo fue fundamental para mí.

A mis amigos, que siempre me apoyaron y estuvieron allí para mí en los momentos buenos y malos. Su amistad ha sido un regalo invaluable en mi vida.

Y a mis padres... Quienes han sido mi roca, mi apoyo y mi inspiración a lo largo de este camino. Su amor, sacrificio y dedicación han sido la base sobre la cual he construido mis logros. Gracias por creer en mí, por impulsarme a seguir adelante y por ser mi ejemplo a seguir. Este logro es tanto mío como suyo, y espero que se sientan orgullosos de mí como yo lo estoy de ustedes.

A todos ellos, mi más sincero agradecimiento por ser parte de este logro y por ayudarme a alcanzar mis metas.

Dedicatorias

Este trabajo está dedicado a todas las personas que han sido fundamentales en mi vida y me han apoyado en este camino.

A mis padres, quienes sembraron en mí la semilla de la curiosidad y el deseo de aprender. Su amor y apoyo han sido el viento que ha impulsado mi vuelo.

A mis amigos Tania y Roberto, les agradezco por su amistad incondicional y apoyo constante. Su confianza en mí y en mis habilidades ha sido un motor importante para seguir adelante.

A Violeta, quien al principio no sabía que íbamos a ser amigas. Recuerdo que no nos agradamos mucho, pero con el tiempo y las experiencias compartidas en la universidad, descubrimos que teníamos mucho en común y nos apoyamos mutuamente en todo momento. Nuestra amistad ha persistido al día de hoy, y estoy agradecida por haber encontrado en ti una amiga verdadera.

A quienes contribuyeron a mi crecimiento y aprendizaje, aunque nuestros caminos se hayan separado, mi gratitud sigue siendo profunda.

Y parafraseando a Antoine de Saint-Exupéry, como ahora ya es una mujer, le dedico este trabajo a Miriam, cuando era niña, hoy puedo decir que lo logramos, pequeña Miriam. Aquella niña tímida y temerosa, pero llena de sueños, creció y alcanzó una de sus metas. Este logro es un testimonio de que, con dedicación y perseverancia, todo es posible.

A todos ellos, les dedico esta tesis con amor, gratitud y admiración. Que este trabajo sea un reflejo de la huella que han dejado en mi vida y un testimonio de la importancia de la amistad, el apoyo y el amor incondicional.

ÍNDICE

Introducción	1
Objetivo	5
CAPÍTULO I. ANTECEDENTES	6
1.1 GÉNESIS DEL VOLCÁN	6
1.2 UBICACIÓN DEL VOLCÁN POPOCATÉPETL	8
1.3 HISTORIA ERUPTIVA DEL VOLCÁN POPOCATÉPETL	10
1.4 ACTIVIDAD ACTUAL DEL VOLCÁN POPOCATÉPETL	11
CAPÍTULO II. DEFINICIÓN DEL ESTADO DE ALERTA DEL VOLCÁN POPOCATÉPETL	12
2.1 POSIBLES AFECTACIONES CAUSADAS POR EL VOLCÁN POPOCATÉPETL	16
2.2 FENÓMENO DE CAÍDA DE CENIZA	17
2.3 AFECTACIONES POR CAÍDA DE CENIZAS	18
2.4 ATLAS NACIONAL DE RIESGOS (ANR)	21
CAPÍTULO III. METODOLOGÍA PARA LA CONSTRUCCIÓN DE ESCENARIOS	23
3.1 SOFTWARE ASH3D	24
3.2 INDICACIONES PARA UTILIZAR EL SOFTWARE ASH3D	26
CAPÍTULO IV. RESULTADOS: COMPARATIVA ENTRE ESCENARIOS	
CONTENIDOS EN EL ANR Y MODELOS SIMULADOS CON ASH3D	30
CONCLUSIONES	37
REFERENCIAS	42
ANEXO SIMULACIONES	46

INTRODUCCIÓN

La actividad eruptiva del volcán Popocatépetl, ubicado en el centro de México, plantea importantes desafíos para la gestión de riesgos y la protección civil. Dado que la historia eruptiva de un volcán es un componente esencial en la evaluación de los peligros potenciales, este estudio busca contribuir a la actualización de los escenarios y a la comprensión de la dispersión de ceniza volcánica del Popocatépetl, mediante un análisis comparativo entre los escenarios contenidos en el Atlas Nacional de Riesgos y los resultados obtenidos mediante simulaciones con el software ASH3D.

El volcán Popocatépetl es un estratovolcán, es decir es un edificio volcánico que se ha formado por la superposición de material piroclástico y derrames de lava alrededor de un conducto central; el cual está ubicado a unos 65 km al sudeste de la Ciudad de México y a unos 45 km al oeste de la Ciudad de Puebla, es el segundo volcán con mayor altura de México, con una elevación de 5,426 m. s. n. m. (Macías, 2005).

El actual episodio inició el 21 de diciembre de 1994, presentando una actividad caracterizada por el crecimiento y destrucción de domos de lava, explosiones frecuentes, eyección de material incandescente y por la emisión de columnas de ceniza, vapor de agua y gases que se elevan hasta alturas de más de dos a tres km.

De acuerdo con los reportes de la actividad, diariamente se registran emisiones de baja intensidad que incluyen gas, vapor y pequeñas cantidades de ceniza, así como explosiones menores y moderadas que alcanzan columnas de alturas variables por encima del cráter.

La prolongada erupción del Popocatépetl también ha acaparado la atención del público y de las autoridades de Protección Civil porque se encuentra en una región densamente poblada, ya que el volcán se ubica a sólo 70 km del centro de Ciudad de México y a 45 km de la ciudad de Puebla, con cientos de pueblos y comunidades a menos de 60 km del volcán (Lermo et al., 1995).

La razón principal de estudiar el Popocatepetl es que, a partir de un buen conocimiento de la historia eruptiva de un volcán, especialmente en lo que se refiere al tamaño de sus erupciones, su explosividad, su frecuencia e impacto medioambiental; constituye un componente esencial en la evaluación de los peligros potenciales, dado que algunos procesos volcánicos se caracterizan por la probabilidad de que la actividad explosiva con ciertas características que produzca un volcán en un intervalo de tiempo determinado.

Enfatizando, la experiencia mundial ha demostrado que, a menos de que existan datos que indiquen lo contrario, el comportamiento presente o futuro de un volcán, es muy probable que se asemeje a su pasado geológico. Para que la calidad y la fiabilidad de la evaluación de los peligros, la vigilancia volcánica y la previsión de erupciones (a largo y corto plazo), requieren de un enfoque integral con intervención coordinada de varias disciplinas.

La información científica busca reducir el riesgo volcánico para toda la población, pero para lograrlo se requiere realizar y registrar observaciones durante un largo tiempo, este proceso puede ser particularmente desafiante y complejo, especialmente en momentos de alta tensión generados por episodios de crisis ante una actividad volcánica.

Uno de los peligros volcánicos principales asociados a la actividad del volcán Popocatepetl, es la emisión de ceniza; es por eso que en este trabajo se presenta un análisis comparativo entre los escenarios de distribución de ceniza volcánica del volcán Popocatepetl contenidos en el Atlas Nacional de Riesgos (ANR) en distintas fechas donde se han presentado emisiones de ceniza relevantes, contrastándolos con los resultados obtenidos de la simulación de dispersión de ceniza obtenidos mediante el software libre ASH3D del Servicio geológico de los Estados Unidos (USGS) para las mismas fechas. Con ello se podrá disponer de información valiosa respecto a futuras emisiones derivadas de la actividad del volcán en caso de que sea empleada esta herramienta de cómputo que se usó en este estudio.

Los escenarios obtenidos permitirán contar con información que aportará una base comparativa para identificar posibles zonas de dispersión de ceniza y que podrían afectarse con la caída de ceniza volcánica y así tomar medidas preventivas para mitigar el impacto en la infraestructura,

en los servicios, en el sector agropecuario y en la salud de la población que esté en contacto con la ceniza emitida.

Este tipo de información representa un importante factor de decisión para las autoridades responsables de Protección Civil, ya que el costo socioeconómico y humano de las sobre reacciones de las autoridades puede ser muy elevado, lo mismo puede suceder si, por el contrario, las autoridades reaccionan con indiferencia o inacción gubernamental ante los diferentes niveles de actividad volcánica.

Palabras Clave

Ceniza volcánica

Volcán Popocatepetl

Simulaciones

Escenarios de distribución de ceniza

Atlas Nacional de Riesgos

Gestión de riesgos

Dispersión de ceniza

Software ASH3D

OBJETIVO

Elaborar escenarios de distribución de ceniza del volcán Popocatépetl generados con el software ASH3D, a fin de contrastarlos con los escenarios obtenidos en el Atlas Nacional de Riesgos publicado por el Centro Nacional de Prevención de Desastres, para evaluar la utilidad del ASH3D como herramienta en la actualización de escenarios de distribución de ceniza volcánica.

CAPÍTULO I. ANTECEDENTES

1.1 GÉNESIS DEL VOLCÁN

Tras las catastróficas consecuencias causadas por el terremoto de 1985, especialmente en la Ciudad de México, quedó de manifiesto la necesidad de contar con una institución que se enfocará en estudiar los aspectos teóricos que pudieran favorecer la prevención de desastres, fue por este motivo que el gobierno federal estableció el Sistema Nacional de Protección Civil (SINAPROC). En este contexto en 1988 se creó el Centro Nacional de Prevención de Desastres, el cual realiza investigaciones sobre el origen, comportamiento y consecuencias de algunos fenómenos naturales, los resultados repercuten al desarrollo tecnológico en la identificación de peligros, disminución de los riesgos y para el sistema de alertamiento (CENAPRED, 2016b).

La investigación para la prevención de desastres se realiza en diversas áreas una de ellas es la de Riesgos Volcánicos, esta área se encarga del estudio de la actividad volcánica, así como otros fenómenos geológicos relacionados.

Para el volcán Popocatepetl se creó un sistema permanente de monitoreo el cual está conformado por estaciones ubicadas estratégicamente en las laderas circundantes del volcán, ubicadas a diferentes altitudes y distancias del cráter. La instrumentación con la que cuenta entre otros equipos son: 8 sismógrafos de periodo corto y 3 de banda ancha; 4 GPS para medir deformación; cuatro cámaras de video con señal directa hasta el CENAPRED, que transmiten en tiempo real y son publicadas por internet; 3 detectores de flujo en el costado norte del volcán; un *Radar Doppler Meteorológico* una cámara térmica y diversos equipos para mediciones geodésicas, equipos de análisis químicos, determinación de las concentraciones de gases SO₂ y CO₂ (CENAPRED, 2019).

Gracias a estos métodos visuales e instrumentales es posible detectar oportunamente cuando se presenta algún cambio en la actividad del volcán y de esta manera estar en posibilidades de poner en marcha los planes de emergencia por parte de población en conjunto con las autoridades de protección civil.

En el mundo existen diferentes tipos de volcanes según sus características geológicas y origen. El Popocatépetl (5,426 metros sobre el nivel del mar m. s. n. m.) es un estratovolcán formado por cantidades variables de lava solidificada, ceniza volcánica, alternando materiales piroclásticos generados durante períodos alternos de actividad volcánica, los cuales se acumulan en capas o estratos, lo que permite la acumulación de altura considerable, hasta llegar en ocasiones como es este el caso de gran altitud (Macías, 2005).

El tipo de lava del Popocatépetl es viscosa y se endurece a medida que se enfría antes de llegar a grandes distancias. Su fuente magmática es rica en sílice o ácida y contiene dacita, riolita y andesita. Según estudios paleomagnéticos que se han efectuado, han permitido establecer que por los materiales más antiguos tiene una edad aproximada de 730 000 años (Castillo et al., 2015).

El volcán Popocatépetl es un claro ejemplo de la geología de las zonas de subducción, tiene una forma cónica, se estima que tiene un diámetro de 25 km en la parte más grande de su base, la cima presenta un corte tipo elíptico de un cono con una orientación noreste-suroeste. Diversas estimaciones muestran que tiene una distancia entre las paredes de su cráter que varían entre los 660 y los 840 m. Las zonas de subducción contienen volcanes que se presentan en arcos o cadenas longitudinales en los bordes de las placas tectónicas. Estos bordes son donde la corteza oceánica es más baja que la corteza continental, como es el caso del Cinturón de Fuego del Pacífico (Macías, 2005).

Los productos de las erupciones constantes del volcán Popocatépetl, han generado una gran cantidad de materiales sólidos representados por fragmentos de rocas o por lava que se alcanza a solidificar; estos productos sólidos han caído y se han acumulado a diversas distancias del cráter, dependiendo de la intensidad de la actividad que las produce.

Los fragmentos más grandes, han caído por los bordes del cráter y han rodado hacia abajo por las pendientes externas, mientras que los fragmentos más pequeños han sido lanzados hacia los valles adyacentes o se han acumulado al pie del cono del volcán. Según las dimensiones de estos fragmentos sólidos, se pueden dividir en bombas volcánicas, arena y cenizas volcánicas (Servicio Geológico Mexicano, 2017).

1.2 UBICACIÓN DEL VOLCÁN POPOCATÉPETL

De forma regional el volcán Popocatepetl forma parte de la región llamada Cinturón de Fuego del Pacífico, la cual es una de las zonas de subducción que se extiende por las costas del océano Pacífico cuya principal característica es tener algunas de las regiones sísmicas y volcánicas con mayor actividad de nuestro país (Servicio Geológico Mexicano, 2017).

Este cinturón volcánico se extiende de oeste a este de nuestro país. En esta zona se encuentra algunas de las principales estructuras volcánicas (Figura 1), tanto activas como inactivas de la República Mexicana, y más del 75% de la población del país se ha asentado próximas a ellas, debido a que los productos volcánicos en general producen terrenos fértiles y la disposición de agua debido a su altura prominente en ocasiones es abundante.

Figura 1. *Ubicación del volcán Popocatepetl.*



Fuente. Volcanes de México tomado de www.paricutin.umich.mx

Como ya se mencionó con anterioridad el volcán Popocatepetl se encuentra ubicado a unos 70 km al sudeste de la Ciudad de México y a unos 45 km al oeste de la ciudad de Puebla, a 63 km al noreste de Cuernavaca y a 53 km al suroeste de Tlaxcala. Su ubicación geográfica se encuentra en las coordenadas 19°01'20"N y 98°37'40"O (Macías, 2005).

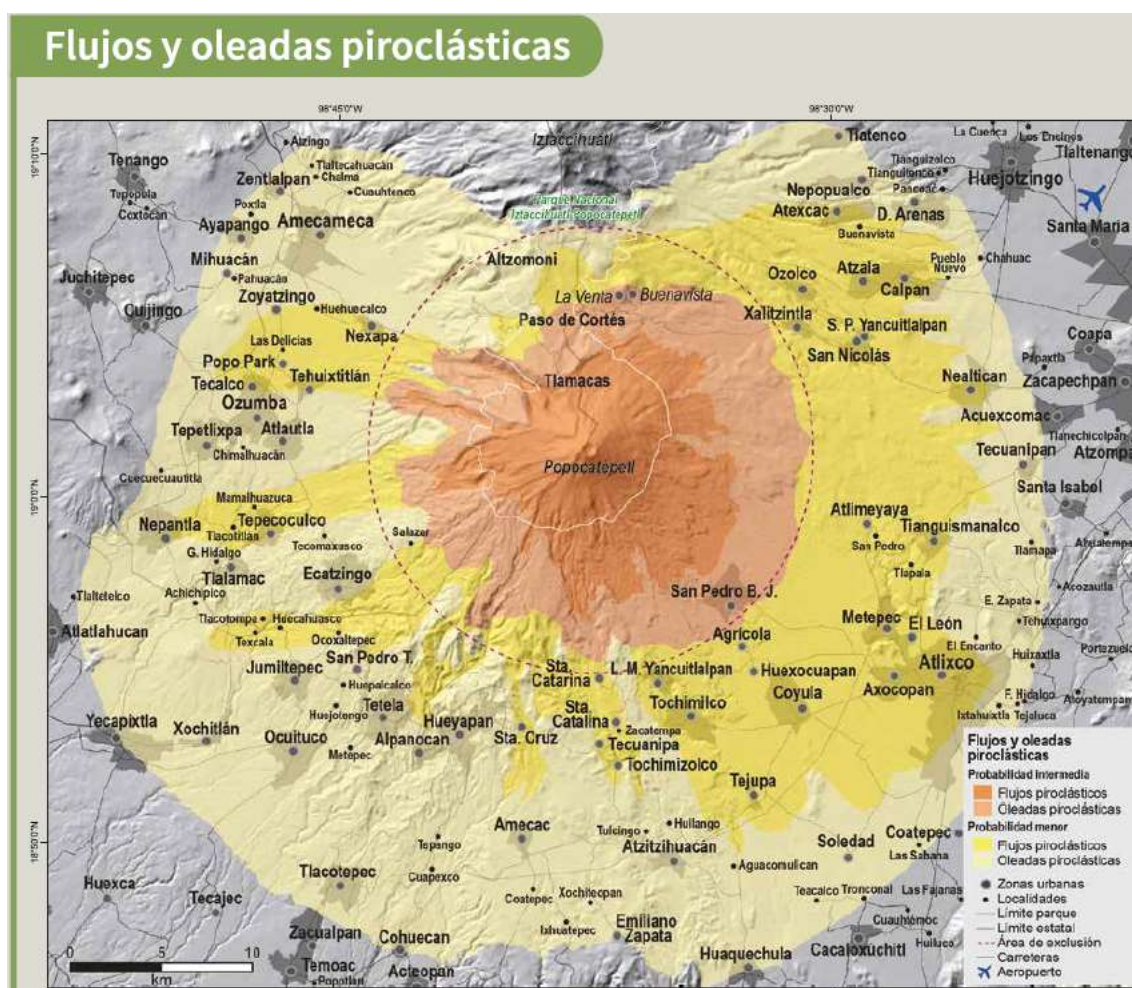
Algunos municipios del Estado de México, de Morelos y de Puebla son directos o próximos al área de influencia de los peligros volcánicos (Figura 2):

Estado de México: Tlalmanalco, Amecameca, Atlautla y Ecatzingo.

Morelos: Tetela del Volcán, Hueyapan, Cuautla

Puebla: Huejotzingo, Nealtican, Cholula, Domingo Arenas, San Nicolás de los Ranchos y Tochimilco.

Figura 2. Zonificación de flujos y oleadas piroclásticas del Popocatepetl.



Fuente: Estudios geológicos y actualización del mapa de peligros del volcán Popocatepetl (2017).

1.3 HISTORIA ERUPTIVA DEL VOLCÁN POPOCATÉPETL

El volcán Popocatépetl es uno de los más activos y peligrosos del mundo debido a su proximidad a zonas pobladas, con más de 25 millones de personas viviendo a menos de 100 km del cráter. Después de 70 años de inactividad, el volcán reinició su actividad en 1994 y desde entonces ha experimentado etapas de erupciones efusivas y explosivas, con crecimiento y destrucción de domos de lava en el interior del cráter. Sus cenizas han alcanzado ciudades como Puebla, México, Querétaro y Veracruz, y los fragmentos de pómez han llegado a distancias cercanas. Además, ha presentado flujos piroclásticos y lahares que han afectado a poblados cercanos como Santiago Xalitzintla. Es importante destacar que la actividad que presentó el Popocatépetl previa al actual episodio eruptivo se remonta a principios del siglo pasado, donde posiblemente tuvo características similares a la actual (CENAPRED, 2012).

Los efectos de la actividad del Popocatépetl en la región han sido diversos; un ejemplo de ello se muestra en el trabajo de Plunket y Uruñuela; quienes describen en su investigación los resultados de varias temporadas de excavaciones arqueológicas realizadas en la región de Tetimpa, en el flanco noreste del Popocatépetl y consistentes en haber encontrado distintas casas y campos agrícolas enterrados repentinamente por una fuerte erupción del volcán entre 2000 años antes de Cristo y 900 después de Cristo (CENAPRED, 2012). Estas conclusiones muestran que las erupciones del volcán Popocatépetl claramente tuvieron impactos negativos en las poblaciones de la época y que se asentaron en las proximidades del mismo.

Después, en 1991 se registró un incremento en su actividad y en 1993 las fumarolas que emanaban del volcán se veían claramente hasta 50 kilómetros a la redonda. El 21 de diciembre de 1994 el Popocatépetl reinició su actividad con la emisión de columnas de ceniza, vapor de agua y gases que se elevaban hasta alturas de dos a tres Km; estas emisiones provenían de pequeñas bocas eruptivas alineadas, que se localizaban en la parte este del interior del cráter. Esta serie de eventos continuaron esporádicamente hasta fines de marzo de 1995, cuando se registró un decremento en las emanaciones de ceniza (CENAPRED, 2012).

Desde 1996 se ha caracterizado por la formación y destrucción de domos de lava, actualmente su actividad se basa en exhalaciones y algunas explosiones, con algunas fumarolas de ceniza.

Otro episodio importante de actividad volcánica ocurrió en diciembre del 2000, en la cual se formó el domo más grande que se ha generado en el actual episodio eruptivo, y que culminó el 22 de enero de 2001, con una explosión, misma que provocó una columna de cenizas de más de 8 km de altura, este evento produjo en el flanco norte, flujos piroclásticos que alcanzaron de 3 a 4 km y un flujo de lodo que recorrió cerca de 15 km, estando próximo al poblado de Santiago Xalitzintla (CENAPRED, 2001).

Durante 2020 y 2021, el Popocatepetl tuvo emisiones continuas de vapor de agua, gas y ceniza, pero muchas explosiones menores y moderadas. Las emisiones de ceniza generalmente se elevaron a 5,8 -7,1 km de altitud y derivaron en muchas direcciones diferentes. Se presentó caída de ceniza en múltiples comunidades durante agosto, octubre y en numerosas ocasiones en enero de 2021. Se registraron anomalías térmicas en imágenes de satélite en el interior del cráter de la cumbre unas cuantas veces al mes. La actividad de tremor fue muy alta a principios de agosto, y de nuevo durante enero de 2021. El número diario de exhalaciones fue mayor a finales de octubre y en noviembre de 2020 (Caballero & Valderrama, 2020).

1.4 ACTIVIDAD ACTUAL DEL VOLCÁN POPOCATÉPETL

Para el año 2022, la actividad sísmica disminuyó con respecto al año anterior. A lo largo de 2022 se registraron un número importante de exhalaciones, sismos volcanotectónicos y explosiones acompañados por emisiones de gases, de cenizas y balístico. Durante este año fue persistente la detección de anomalías térmicas y a fines de enero de ese año el SO₂ tuvo su mayor valor. También se detectó posiblemente el emplazamiento de un domo de lava en noviembre de ese año (Caballero et al., 2021).

CAPÍTULO II. DEFINICIÓN DEL ESTADO DE ALERTA DEL VOLCÁN POPOCATÉPETL

La información generada de esta vigilancia permanente se da a conocer a la población inmediatamente a través de reportes que se publican diariamente en el portal de internet del CENAPRED en la liga <https://www.gob.mx/cenapred>. La manera como se comunica a la población el estado de alerta del volcán Popocatepetl por parte de las autoridades de Protección Civil es mediante el Semáforo de alerta volcánica (Figura 3), el cuál es el resultado de un esfuerzo conjunto de todo el Sistema Nacional de Protección Civil, constituido por autoridades federales, estatales y municipales.

Este instrumento de comunicación traduce la actividad del volcán mediante un código de tres colores, en el cual se tienen distintos escenarios en función del estado que guarda el volcán y describe acciones que debe realizar la población y las autoridades en función con el determinado nivel en el que se encuentre dicho semáforo. La intención de este sistema de comunicación es que la población se informe de una manera pronta, y con un lenguaje de fácil entendimiento.

A continuación, se presenta el esquema básico del semáforo de alerta para el volcán Popocatepetl (Tabla 1), de acuerdo con CENAPRED (2016b).

Tabla 1. El semáforo de alerta está constituido por tres colores y siete fases.

Etapas	Actividad del Volcán	Acciones para los ciudadanos	Acciones para las autoridades
Normalidad (SEMÁFORO VERDE) Fase 1	Volcán en Calma	Conocer e identificar las diferentes señalizaciones Conocer las rutas de evacuación Conocer la ubicación de los refugios temporales	Elaboración, colocación y mantenimiento de las diferentes señalizaciones Definir las diferentes rutas de evacuación posibles Definir la ubicación de los posibles refugios temporales
Fase 2	Fumarolas y actividad sísmica esporádica	Conocer e identificar las diferentes señalizaciones Conocer las rutas de evacuación Conocer la ubicación de los refugios temporales	Elaboración, colocación y mantenimiento de las diferentes señalizaciones Definir las diferentes rutas de evacuación posibles Definir la ubicación de los posibles refugios temporales
Etapas de Alerta (SEMÁFORO AMARILLO)			
Fase 1	El volcán presenta Sismicidad frecuente	Permanecer atentos a las indicaciones de las autoridades Prepararse para una posible evacuación	Mantener informada a la población Informar las diferentes rutas de evacuación Informar de la ubicación de los refugios temporales que se vayan a habilitar
Fase 2	El volcán presenta Exhalación de columnas de vapor de agua. Ligera caída de cenizas en áreas cercanas al volcán Posible caída de material incandescente	Permanecer atentos a las indicaciones de las autoridades Estar listos ante una posible evacuación Ubicar el refugio temporal más cercano	Mantener informada a la población Mantener en buen estado las diferentes rutas de evacuación Estar listos para habilitar los refugios temporales en caso de ser requeridos

Fase 3	Crecimiento acelerado de domos de grandes dimensiones Dstrucción de domo con fuertes explosiones Presencia de fumarolas de gas y vapor de agua Caída leve de cenizas en áreas cercanas al volcán	Permanecer atentos a las indicaciones de las autoridades Prepararse para una posible evacuación	Mantener informada a la población Vigilar las diferentes rutas de evacuación Estar listos para habilitar los refugios temporales en caso de ser requeridos
Etapas de Peligro (SEMÁFORO ROJO)			
Fase 1	El volcán presenta actividad explosiva de peligro intermedio Columna de exhalación de gas y vapor de agua de varios kilómetros de altura Lanzamiento de fragmentos incandescentes sobre las laderas del volcán	Permanecer atentos a las indicaciones de las autoridades Prepararse para una posible evacuación	Mantener informada a la población Informar y vigilar las diferentes rutas de evacuación Informar de la ubicación de los refugios temporales que se vayan a habilitar
Fase 2	El volcán presenta actividad explosiva de peligro alto o extremo Columna de exhalación de gas y vapor de agua de gran alcance Lanzamiento de fragmentos incandescentes a grandes distancias Intensa caída de cenizas en áreas mayores	Permanecer atentos a las indicaciones de las autoridades Evacuar de forma inmediata su lugar de residencia	Mantener informada a la población Ayudar en la evacuación de la población Habilitación y mantenimiento de refugios temporales

Fuente. Elaboración propia con base en información obtenida de CENAPRED (2016b)

Figura 3. Semáforo de alerta volcánica



Fuente: Gobierno de México, 2016

2.1 POSIBLES AFECTACIONES CAUSADAS POR EL VOLCÁN POPOCATÉPETL

Las poblaciones que viven alrededor del volcán Popocatepetl han aprendido a vivir con la posibilidad de que ocurra una erupción y en general conocen que el volcán representa un peligro inminente por alguno o varios de los siguientes aspectos principales:

A continuación, se presentan los principales peligros volcánicos identificados de acuerdo con el mapa de peligros volcánicos del CENAPRED. Este mapa proporciona información valiosa sobre los riesgos asociados que podrían ocurrir en caso de una erupción del volcán Popocatepetl.

Flujos Piroclásticos: los cuales se pueden describir como una mezcla de gases volcánicos, agua, cenizas y otros materiales sólidos, los cuales descienden por las laderas del volcán a grandes velocidades.

Estos flujos se caracterizan por estar formados por una mayor proporción de materiales sólidos y su desplazamiento depende en gran medida de la forma del relieve por el cual pueden transitar

Oleadas de material Piroclásticos: es también una mezcla de gases volcánicos, agua, cenizas y materiales sólidos, pero a diferencia de los flujos, tienen una mayor cantidad de gases disueltos por lo que son de consistencia más ligera lo que les permite avanzar a mayor velocidad y tienen temperaturas más altas

Tanto los flujos como las oleadas pueden causar graves daños por el efecto avalancha arrastrando y destruyendo todo a su paso, y causando incendios de grandes proporciones

Materiales aéreos y lluvia de cenizas: al ocurrir una erupción se arrojan restos de materiales sólidos mezclados con gases y vapor de agua arrojados al aire y suspendidos por el efecto de sustentación causa la constante salida de material, formando lo que se conoce como columna eruptiva (CENAPRED, s.f.).

La parte superior de la columna eruptiva conforme se enfría es arrastrada por el viento causando lluvia de cenizas por varios kilómetros.

Es importante destacar que la comprensión de estos peligros volcánicos es fundamental para la planificación y preparación de las comunidades que viven en las inmediaciones del volcán Popocatepetl.

2.2 FENÓMENO DE CAÍDA DE CENIZA

El fenómeno de caída de ceniza se puede describir como el proceso de movilización de material fragmentado (ceniza, tefra, lapilli), por la acción eólica (del viento) posterior a una erupción volcánica.

Según el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS¹), “la ceniza volcánica es una mezcla de partículas finas de roca y minerales que se producen durante una erupción volcánica (USGS, s.f.). En el caso del Popocatepetl, la ceniza se compone principalmente de partículas de sílice y aluminio (Secretaría de Educación, Ciencia, Tecnología e Innovación de la Ciudad de México [SECTEI], 2020).

En el fenómeno de la dispersión de ceniza influyen varios factores, como son: condiciones atmosféricas como son la velocidad y dirección del viento, la humedad y presión; y la velocidad fraccional de la ceniza, el cual depende de las características de textura y forma de las cenizas (tamaño de grano, densidad, rugosidad superficial, grado de compactación) y de las condiciones de la superficie como rugosidad y humedad (CENAPRED, 2014).

La movilización de la ceniza puede ocurrir tanto a nivel local como regional, por lo que la caída de ceniza se puede presentar sólo en el área cercana al punto de erupción volcánica como a cientos de kilómetros de ahí.

Esto es debido a que para que una nube de ceniza se pueda mantener en la atmósfera y ser transportado por las corrientes de viento, el umbral de velocidad friccional de la ceniza debe ser superado, de lo contrario, las partículas de ceniza se precipitan al suelo por el simple efecto de la gravedad (CENAPRED, 2001).

¹ Por sus siglas en inglés.

2.3 AFECTACIONES POR CAÍDA DE CENIZAS

Dado que en este trabajo se aborda el tema de cenizas volcánicas, se enfatiza a continuación, algunos de los efectos negativos en la población, fauna, vegetación e infraestructura de algunas de las regiones cercanas o lejanas al volcán Popocatepetl, destacan las siguientes:

2.3.1 Daños en la producción de alimentos (agricultura y ganadería)

La ceniza emitida por el volcán Popocatepetl, por su naturaleza química poder ser aprovechada como abono para las plantas, esto siempre y cuando sea en pequeñas cantidades, ya que es capaz de proporcionar micronutrientes que no están presentes en otros fertilizantes y que son necesarios para que tengan un buen crecimiento. Otra función de la ceniza volcánica es que puede servir como plaguicida, pues resulta dañino a las plagas que pueden estar presentes en el suelo (Merino, 2018).

Para que estos beneficios sean posibles, la caída de ceniza debe ser en pequeñas cantidades, ya que cuando la presencia de la ceniza es excesiva, esto afecta a la vegetación ya que las plantas tienen un exceso de nutrientes en sus raíces, así como también al depositarse en las hojas se ven afectadas por no poder llevar a cabo el proceso de fotosíntesis de manera correcta.

De la misma manera, la ganadería se puede ver afectada por la excesiva caída de ceniza ya que al ingerir vegetación o agua contaminada suele intoxicarse y morir. Ambas condiciones afectan de manera directa a la economía de los habitantes de las comunidades más cercanas al volcán Popocatepetl, ya que les puede llegar a producir graves pérdidas en la producción de alimentos y ganado (CENAPRED, 2019).

2.3.2 Daños en el transporte aéreo

Al igual que en el sector primario, la industria de la aviación también puede resultar afectada por la presencia de ceniza volcánica tanto al estar en contacto directo en el aire como con su caída o precipitación en tierra, es decir en los aeropuertos, según se menciona a continuación:

2.3.4 Daño en los aviones: Cuando un avión entra en una nube de cenizas volcánicas sufre importantes daños como la erosión de todas las superficies por fuerte poder abrasivo de la ceniza o el fallo completo de los motores (Ortiz, 1996).

La caída de ceniza puede causar daños significativos en las aeronaves que sobrevuelan la región, lo que pone en relieve la importancia de la coordinación entre las autoridades de protección civil, la aviación y el centro de monitoreo del volcán para minimizar el riesgo de accidentes aéreos.

En el caso de caída directa cuando las aeronaves están en tierra, la acumulación de ceniza en grandes cantidades puede llegar a aumentar significativamente el peso de la aeronave y en caso de no limpiar la ceniza de forma inmediata, puede comenzar a causar daños por corrosión en la estructura de las mismas. Otra afectación es la que se ocasiona en los sistemas de ventilación, ya que la ceniza puede llegar a obstruir las entradas del aire, ya que los filtros de aire pueden no estar diseñados para enfrentar este tipo de condiciones adversas (CENAPRED, 2014).

2.3.5 Daños en el tráfico aéreo: los trabajadores de las torres de control tienen que estar pendientes de las condiciones de la actividad del volcán ya que cuando se tiene información de la presencia de ceniza, se activan protocolos de seguridad lo cual causa retrasos o cancelaciones en los vuelos, lo cual genera malestar e inconformidades con los usuarios.

2.3.6 Daños en aeropuertos: de la misma manera se presentan afectaciones en las pistas de aterrizaje, puede ser por la ceniza que penetra en las turbinas de los aviones o por la caída natural de la misma; sea cual sea la causa se producen riesgos tanto para el despegue y aterrizaje seguro de las aeronaves debido a que la ceniza puede provocar la pérdida de tracción o adherencia de las ruedas, así como puede afectar al personal operativo. Para tratar de mitigar este riesgo, se tiene que activar un protocolo de limpieza exhaustiva y remoción de cenizas de las pistas de aterrizaje (CENAPRED, 2014).

La seguridad aérea se fundamenta en la capacidad de prevenir accidentes y garantizar la integridad de las aeronaves. Por lo tanto, la implementación efectiva de medidas preventivas es fundamental para minimizar los riesgos asociados con la caída de ceniza.

2.3.7 Daños al sistema de drenaje y alcantarillado

Para entender mejor los daños que puede causar en alcantarillas y drenajes, es necesario mencionar que algunos de los componentes de la ceniza volcánica son aprovechados por la industria de la construcción en la fabricación de cementos y morteros; por lo tanto la acumulación de cenizas en grandes cantidades tanto en drenajes y alcantarillas puede llegar a provocar la obstrucción de todo el sistema de drenaje, esto debido a que la ceniza tiene componentes que al contacto con el agua, forman una especie de “concreto” que puede llegar a endurecerse y tapar por completo el sistema (Wilson et al., 2012).

Es importante mencionar que algunos de estos escenarios se pueden presentar en las zonas más pobladas y con mayor infraestructura de este tipo, en poblados o ciudades aledañas al Popocatepetl, como pueden ser la Ciudad de Puebla, Ciudad de México, Cuautla Morelos, entre otras.

2.3.8 Daños en las viviendas e infraestructura urbana

Al igual que en el resto de la infraestructura pública, las viviendas que se encuentran más cercanas al volcán Popocatepetl se pueden ver afectadas por la excesiva caída de cenizas esto trae como consecuencia que esta se acumule en los techos, lo cual puede producir efectos adversos tales como:

Los techos pueden hundirse o desplomarse por el peso adicional, ya que las cenizas, compuestas de minerales pesados, generan cargas adicionales, lo que afecta principalmente a las viviendas techadas con materiales poco resistentes, como láminas y madera (De la Cruz, 2008).

Para remediar esta situación, las personas optan por limpiar los techos, pero ponen en riesgo su integridad física, ya que al subir a los techos aumentan el riesgo de desplomarse al sumar el peso de la propia persona al techo que ya tiene mucho peso adicional. Y en el caso en que no es posible la limpieza, la ceniza comienza a generar procesos de corrosión en los mismos techos, lo que al paso del tiempo debilita los materiales reduciendo su vida útil (CENAPRED, 2019).

Es importante mencionar también que cuando se realicen las actividades de limpieza, se deben utilizar equipos de protección personal para evitar que las cenizas ingresen a las vías respiratorias, ojos y aparato digestivo (CENAPRED, 2016a).

2.3.9 Afectaciones en caminos y carreteras

Durante un episodio de caída de ceniza, la movilidad en vehículos se ve seriamente afectada por diversas situaciones, siendo la primera de ella la poca visibilidad ya que la ceniza puede llegar a obstruir el paso de la luz solar, creando un efecto de niebla lo cual aumenta el riesgo de accidentes automovilísticos.

Otro factor de riesgo es que la acumulación de cenizas en los caminos y carreteras causa una seria disminución en la adherencia de las llantas al suelo, provocando derrapes, por lo cual se recomienda mantener una distancia segura entre vehículos y conducir a velocidades bajas

De la misma manera, la ceniza puede ingresar al interior del vehículo por medio de los sistemas de ventilación ya que los filtros de aire no están diseñados para este tipo de agentes, causando daños a la salud de los ocupantes (CENAPRED, 2014).

2.4 ATLAS NACIONAL DE RIESGOS (ANR)

El Atlas Nacional de Riesgos es una herramienta con la cual, es posible identificar peligros y riesgos; para ello se desarrollan modelos para representarlos, requiriendo la participación de profesionales de la administración pública o privada como: investigadores, científicos, gobierno y autoridades de protección civil.

Formalmente el ANR, es un sistema integral de información donde es posible visualizar los agentes perturbadores y daños esperados en ciertas regiones y a diferente escala, resultado de un análisis espacial y temporal sobre la interacción entre los peligros, la vulnerabilidad y el grado de exposición de los agentes afectables. Cuenta con herramientas que da la posibilidad de simular escenarios de riesgos, estimación del sistema expuesto ante un fenómeno perturbador, con el fin de una oportuna toma de decisiones en alguna de las fases de la Gestión

Integral del Riesgo (GIR) como pueden ser: la prevención, mitigación y o la gestión adecuada del territorio (Gobierno de México, s.f.).

El Atlas Nacional de Riesgos representa un enfoque innovador y proactivo en la gestión de riesgos, permitiendo una planificación y toma de decisiones más efectivas. La información detallada y actualizada sobre los riesgos potenciales es fundamental para la protección de las comunidades y la infraestructura. Además, su enfoque integral y multidisciplinario puede ayudar a identificar soluciones más efectivas para mitigar los riesgos y reducir los impactos negativos.

En el ANR, se puede encontrar información referente a mapas de peligros por los distintos fenómenos como (Gobierno de México, s.f.).

- Geológicos
- Hidrometeorológicos
- Químico-Tecnológicos
- Sanitario-Ecológico
- Socio-Organizativo
- Astronómico

Cuenta con aplicaciones de consulta y probables escenarios, también existen mapas históricos de eventos de desastre o información del monitoreo de algunos fenómenos en tiempo real.

Su objetivo es dotar al país de información geográfica sobre el comportamiento de los peligros, su interrelación con los bienes expuestos para estimar su vulnerabilidad y riesgo, fortaleciendo su sistema de consulta, de análisis para generación de escenarios probables, útiles para el diseño de estrategias de prevención de gestión del riesgo y del territorio, de manera coordinada entre el gobierno, la sociedad y el sector privado (Gobierno de México, s.f.).

Esta herramienta en su versión informática puede ser muy útil para la población dado que dota de información expedita sobre agentes perturbadores, asimismo resulta importante que sea utilizada de manera sencilla y accesible. Resulta relevante que se mantenga actualizado, dada la condición inherente de cambio o evolución temporal del riesgo.

CAPÍTULO III. METODOLOGÍA PARA LA CONSTRUCCIÓN DE ESCENARIOS

Para llegar al objetivo planteado, se determinó utilizar una metodología cualitativa para la investigación de tipo descriptivo, orientada a describir y obtener información relacionada con los escenarios de distribución de ceniza volcánica (Ramírez, 2018).

Esta investigación será cualitativa, según lo planteado por Hernández et al. (2014), en el cual postula que este tipo de investigación se basa más en una lógica y proceso inductivo, consistiendo en un proceso que va de lo general a lo particular, y se basa en explorar y describir para generar perspectivas teóricas.

En este trabajo de tesis, se trata de aplicar los postulados generales descritos por Sabino (1992), en el cual sostiene que: “la investigación descriptiva consiste en: describir algunas características fundamentales de conjuntos homogéneos de fenómenos, utilizando criterios sistemáticos que permiten su estructura o comportamiento. De este modo se puede obtener información sistemática sobre las mismas”.

Con las características generales descritas para abordar el trabajo aquí presentado, se planteó como objetivo general el trabajo de tesis: “Construcción de escenarios de caída de ceniza del volcán Popocatepetl”, usando el software libre ASH3D, para realizar un comparativo con algunos de los que encuentran contenidos en el Atlas Nacional de Riesgos.

El programa ASH3D fue seleccionado para este estudio debido a su amplia aceptación y utilización en la comunidad científica global. Su capacidad para simular la dispersión de cenizas volcánicas y evaluar los riesgos asociados ha sido ampliamente demostrada en diversas publicaciones científicas y aplicaciones prácticas. La elección de este programa se basa en su robustez, precisión y capacidad para proporcionar resultados confiables, lo que lo convierte en una herramienta ideal para este tipo de análisis. Su interfaz intuitiva y facilidad de uso lo hacen una herramienta accesible para usuarios no expertos, lo que permite una aplicación más amplia y efectiva en la gestión de riesgos.

3.1 SOFTWARE ASH3D

ASH3D proporciona pronósticos de nubes de ceniza y caída de ceniza.

El Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS por sus siglas en inglés) proporciona pronósticos de la dispersión esperada de cenizas (nubes de cenizas) y la deposición (caída de cenizas) de las erupciones volcánicas utilizando un modelo numérico de transporte atmosférico llamado ASH3D que fue desarrollado por científicos del USGS específicamente para lidiar con las plumas volcánicas. Los observatorios volcánicos del USGS ejecutan ASH3D para cualquier volcán de EE. UU., en nivel de alerta elevado (excepto los volcanes hawaianos efusivos) asumiendo una erupción hipotética razonable USGS proporciona pronósticos de nubes de ceniza volcánica e información sobre la caída de cenizas (USGS, 2021).

Para aquellos interesados en profundizar en los detalles técnicos del modelo, ASH3D resuelve la ecuación de advección-difusión para rastrear la concentración de cenizas en la atmósfera. Si deseas explorar más a fondo la formulación matemática detrás de este modelo, la ecuación es:

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \nabla \cdot [(u + v_s)q] - \nabla \cdot (K\nabla q) = Q$$

Los términos de esta ecuación representan los siguientes procesos físicos:

$\frac{\partial q}{\partial t}$ Es el cambio en la concentración de cenizas a lo largo del tiempo.

$\nabla \cdot [(u + v_s)q]$ Es el término de advección, que explica el transporte de cenizas por el vector de viento 3D (u) y la velocidad de sedimentación en las partículas de ceniza (v_s).

$\nabla \cdot (K\nabla q)$ Es el término de difusión turbulenta donde k es la difusividad turbulenta

Q Es el término fuente que representa la inyección de masa a la atmósfera por encima del volcán.

La velocidad de sedimentación (v_s) es un factor crucial en el modelo, ya que determina la rapidez con la que las partículas de ceniza se precipitan de la atmósfera. Por defecto, ASH3D

calcula la velocidad de sedimentación para cada tamaño de partícula según el método desarrollado por Wilson y Huang (USGS, 2021).

El programa ASH3D (Figura 3) tiene predefinida una base datos de viento que varían en el tiempo y otras propiedades meteorológicas para calcular cómo se transportan las cenizas. Estos parámetros están asociados con varios volcanes o a las coordenadas de estos, de tal manera que las simulaciones obtenidas pueden considerarse confiables. Para que sea procesado un escenario de dispersión de ceniza el programa utiliza parámetros del evento eruptivo, como son: la altura de la columna, duración de la erupción y del tiempo de procesamiento de la simulación, así como el volumen erupcionado (Mastín et al., 2021).

Las cenizas volcánicas son arrastradas por el viento a diferentes distancias según el tamaño, peso de las partículas, la dirección y velocidad del viento. Otro factor muy importante para determinar el terreno abarcado y la cantidad de depósito de tefra es la magnitud de la erupción (Laboratorio Nacional de Observación de la Tierra, 2019).

Para tener acceso a esta herramienta, en la página de internet donde se encuentra el programa, se solicita una cuenta (acceso) (Figura 3), con la que se te proporcionará un usuario y contraseña, esto es necesario para tener acceso a todas las funciones del sistema. Después de iniciar sesión con los datos asignados (acceso), puede hacer clic en "Mis trabajos" en la parte superior de la página, una vez que se pulse el botón de crear trabajo, se asigna un nombre, a partir de este momento, las simulaciones creadas se guardan, y serán visibles los cambios realizados. En "Mis Trabajos", verá una lista de las modelaciones que usted ha ejecutado. Los trabajos que se han ejecutado en los últimos cinco días, como el "Escenario Coso" y el "Evento Rainier", mostrarán un enlace a los resultados. Los trabajos más antiguos se eliminan automáticamente, pero puede volver a ejecutarlos haciendo clic en "Ejecutar" en la segunda columna.

En este trabajo se realizará una validación o comparativo de los escenarios de dispersión de ceniza del volcán Popocatepetl, que aquí se obtengan con el programa ASH3D, contra los contenidos en el ANR. Es importante mencionar que los escenarios de dispersión de ceniza para el volcán Popocatepetl y que encuentran en el portal del ANR, no se ubicó la metodología

con la cual fueron contruidos, asimismo estas capas de información son líneas que aparentemente muestran el posible “alcance máximo” y “extensión” de la dispersión de cenizas que fueron producidas por eventos eruptivos ocurridos en el volcán, desconociendo si son exhalaciones ó explosiones, sin embargo se plasma la fecha de ocurrencia del evento.

3.2 INDICACIONES PARA UTILIZAR EL SOFTWARE ASH3D

A continuación, se describe de manera detallada, los datos que se requieren y el procedimiento para realizar una simulación en el programa ASH3D (Figura 4).

Al iniciar la sesión y para crear una simulación se requiere introducir la siguiente información:

- Nombre: Nombre de la simulación
- Tipo de ejecución:
 - Cenizas en el aire
 - Depósito de cenizas
 - Tanto en el aire como en el depósito
- Elegir el volcán de interés: Al elegir el volcán del que quiere realizar la modelación, automáticamente proporciona los datos de latitud, longitud y elevación.
- Inicio de la erupción: es el momento de inicio de la erupción
- Duración de la simulación (tiempo de cómputo): Es el tiempo en el que el modelo calcula el transporte de una nube de cenizas y es un campo obligatorio. Este valor debe ser de al menos 6 horas, pero inferior a 144 horas
- Duración de la erupción: Es el período de emisión activa de cenizas, es un campo obligatorio. Se introduce un valor entre 0,1 y 24 horas. Puede aplicar la duración de erupción por defecto para su volcán seleccionando el botón "aplicar". Ya que ASH3D calcula el volumen de la erupción usando la altura y duración de la columna, erupciones muy cortas pueden producir muy poca ceniza para ser visibles en una nube o en un mapa de depósitos. Por esta razón, no se permiten erupciones por debajo de 0.1 horas.

- Altura de la columna: Se refiere a la altura que alcanza la columna eruptiva, los valores se expresan en pies o kilómetros sobre el nivel del mar, se suma la altura del volcán más la altura de la columna (Guía de referencia ASH3D).
- Volumen emitido: es el volumen de roca y de material expulsado, este valor debe estar en kilómetros cúbicos. Si no se ingresa ningún valor, el volumen se calcula automáticamente a partir de la altura de la pluma, la duración de la erupción y la elevación de la cumbre del volcán (Mastín et. al 2019).

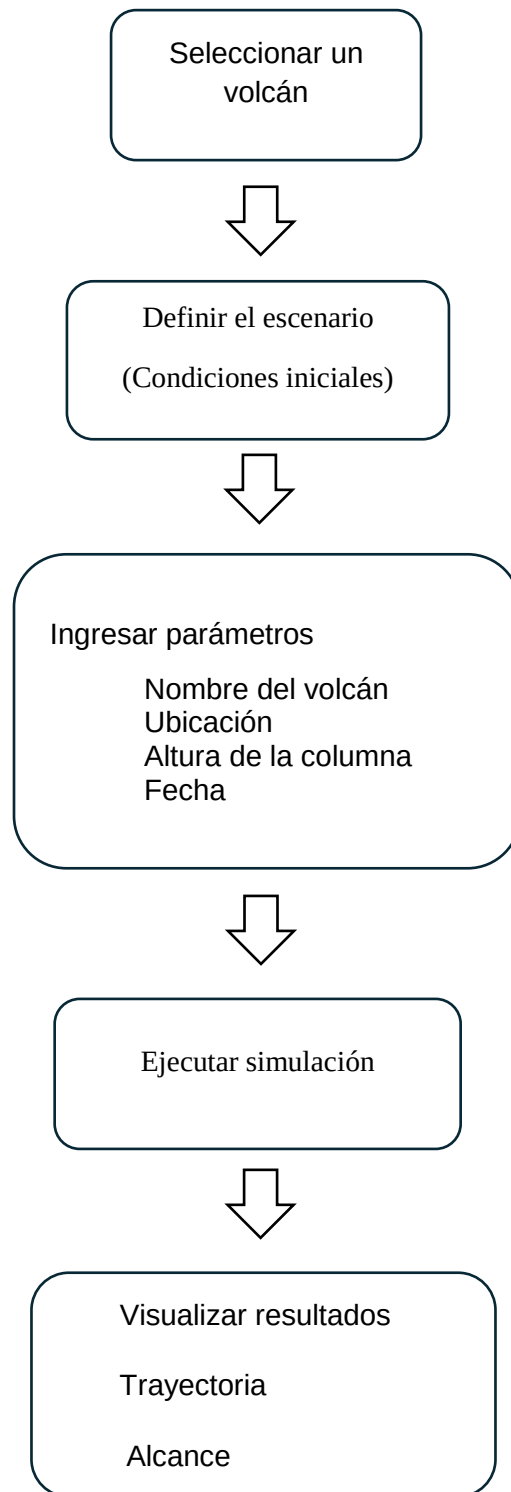
Al introducir los parámetros del volcán elegido, el programa genera automáticamente la trayectoria que seguiría la ceniza emitida, así como un mapa de isopacas, posteriormente se pueden consultar las zonas de dispersión. La plataforma permite descargar los resultados con la opción Download Data.

El programa ASH3D corresponde al tipo de software que permite construir escenarios de dispersión de ceniza (Diagrama 1). Los datos de entrada corresponden a un pequeño grupo de parámetros, el programa realiza varios procesos para producir un valor de salida.

Para obtener resultados precisos, si los datos de entrada son lo más certeros posibles; por ejemplo, para describir el campo de viento, hay que describir la velocidad y dirección con referencia en latitud y longitud, en cada nivel de elevación de la columna.

Al utilizar el simulador ASH3D hay que definir el número de datos de entrada, ya que, al aumentarlos incrementan los cálculos necesarios y el tiempo de procesamiento, lo que motiva que se requieran equipos computacionales más robustos, lo que puede aumentar los costos de su uso y afectar los tiempos de los resultados que se pretenden alcanzar, e imposibilitando, en caso de no tener recursos la posibilidad de realizar este trabajo.

Diagrama 1. Elaboración de escenarios en ASH3D



Fuente. Elaboración propia.

Figura 4. Portal de internet del software ASH3D simulador

The figure consists of three screenshots of the USGS Ash3D web portal interface.

Top-left screenshot: Shows the main landing page. The header includes the USGS logo and navigation links: 'Página de inicio del USGS | Contacto con el USGS | Búsqueda en el USGS'. The main content area features the title 'Ceniza 3D' and the subtitle 'Modelo de dispersión de cenizas volcánicas'. The navigation bar includes links for 'Ceniza 3D', 'Resultados de la carrera pública', 'Recursos', 'Acceso', and 'Solicitar cuenta'.

Top-right screenshot: Shows the 'Crear trabajo Ash3d' form. It includes a 'Nombre' field with a red error message 'El nombre es obligatorio.' and a 'Tipo de ejecución' dropdown menu with a red error message 'Se requiere el tipo de ejecución.' A 'Crear trabajo' button is visible at the bottom right.

Bottom-left screenshot: Shows a list of jobs under the heading 'Empleos de Ash3d -'. A job entry is displayed with a date '14 de enero de 1995' and a 'Correr' button. A note at the bottom states: 'Los resultados de la ejecución se eliminan automáticamente después de 5 días.'

Bottom-right screenshot: Shows a detailed job configuration page. It includes various input fields for simulation parameters, such as 'Inicio', 'Tipo de simulación', 'Cantidad de cenizas', 'Velocidad de viento', 'Dirección de viento', 'Altura de cenizas', 'Altura de viento', 'Altura de cenizas', 'Altura de viento', and 'Altura de cenizas'. A 'Ejecución de modelo' button is visible on the right side.

Fuente. USGS (2021).

En general, en estas imágenes se muestran los datos e información básica para introducir la información necesaria-para modelar un escenario de dispersión de ceniza en el software libre ASH3D.

CAPÍTULO IV. RESULTADOS: COMPARATIVA ENTRE ESCENARIOS CONTENIDOS EN EL ANR Y MODELOS SIMULADOS CON ASH3D

Uno de los pasos iniciales para la comparativa aquí propuesta, fue recabar del portal de internet del CENAPRED, específicamente de la sección de monitoreo, donde se publica la información de la actividad diaria del volcán Popocatepetl. Las fechas de los eventos relevantes del volcán en estos 30 años de actividad, se tomaron del Atlas Nacional de Riesgos (ANR), posteriormente se consultó de la página del monitoreo del CENAPRED, en estas fechas, con el fin de recabar información de esos eventos; como era, dirección de la dispersión de ceniza y alturas de columna. Al contrastar la información se encontró que en algunos casos existe la simulación de dispersión de ceniza en el ANR, pero no hay información que sirva de soporte o sea relevante en los reportes de monitoreo de actividad diaria del volcán y publicada en la página del CENAPRED.

En la tabla 2, se presentan los parámetros que se utilizaron para realizar las modelaciones en el software ASH3D, estos se definieron con base en la información y los reportes diarios de monitoreo del volcán Popocatepetl del CENAPRED y del ANR.

Es importante destacar que, en los casos en que se requirió utilizar datos hipotéticos debido a la falta de información disponible, se consideraron fechas cercanas al evento como referencia, ya que el viento es un factor importante en el modelo y puede influir significativamente en la dispersión de ceniza. Esto permitió obtener una aproximación más realista de los escenarios simulados con ASH3D. La tabla 2 permite visualizar y comparar los datos obtenidos de manera concisa y expedita.

Tabla 2. Comparación de datos del Simulador ASH3D y ANR.

No de simulación	Fecha del evento	Duración de la simulación (hrs)	Altura de la columna (km)	Volumen (Km³)	Observaciones (ver figura de escenarios simulados en anexos)
1a	01 de enero de 1995	0.1	7.3	0.003	No hay similitudes en los modelos, y al no haber más información sobre los eventos de este periodo, se tomaron fechas dentro del mismo para intentar simular las isopacas marcadas en el Atlas Nacional de Riesgos, se experimentó con varias fechas y parámetros basados en la del 13 de febrero ya que esta es la única fecha con datos relevantes encontrados en los reportes diarios de monitoreo (figuras 4 a 11).
1b	08 de enero de 1995	0.1	6.9	0.003	
1c	20 de enero de 1995	1	9.4	0.003	
1d	11 de febrero de 1995	0.1	6.5	0.003	
1f	12 de marzo de 1995	0.1			
Periodo del 5 al 15 de marzo de 1996					
2a	5 de marzo de 1996	0.1	6.426	0.003	En las figuras se muestran todos los escenarios simulados sobrepuestos para poder hacer la comparación con las isopacas del ANR se puede ver una ligera similitud en la dirección, pero en la amplitud no la hay. Además, la ubicación del volcán no coincide (figuras 12 a 15).
2b	10 de marzo de 1996	1	6.6	0.003	
2c	11 de marzo de 1996	1	8.4	0.003	
2d	15 de marzo de 2024	1	7.5	0.001	
3	30 de abril de 1996	12	10.3	0.003	No hay datos relevantes en esta fecha, para hacer el escenario de distribución de ceniza en el modelo ASH3D sólo se utilizó la fecha que aparece en el ANR, es importante aquí mencionar que los demás parámetros son hipotéticos, aunque no fuera de lugar. Asimismo, se considera que los parámetros utilizados para que se asemejara al escenario contenido en el ANR serían eventos irreales. Al sobreponer los resultados de ambos escenarios se puede observar una ligera similitud en la dirección y el alcance de la dispersión de ceniza, pero se observa que hay discrepancia en el centro de emisión para este escenario (figura 16).

4	28 de octubre de 1996	0.1	6.4	0.003	En esta fecha no hay datos relevantes en el monitoreo diario de CENAPRED, sin embargo, está registrado un evento en el ANR, para intentar hacer la simulación se utilizaron parámetros hipotéticos. La dirección de la dispersión si coincide, en la modelación del ASH3D la amplitud es ligeramente mayor (figura 17)
5	29 de octubre de 1996	0.1	9.4	0.0003	Para esta simulación se tomaron los datos recabados del monitoreo diario de CENAPRED, en la comparación con el ANR, se nota coincidencia tanto en amplitud como en dirección (figura 18).
6	30 de junio de 1997	12	7.3	0.003	Para realizar un escenario de dispersión de ceniza de esta fecha en el modelo ASH3D se utilizaron parámetros hipotéticos, ya que no hay datos sobre este evento. En la comparación se observa que no hay similitud en dirección, y no se aprecian coincidencias en el alcance de dispersión de ceniza (figura 19).
7	03 de junio de 2011	1	8.3	0.003	En los reportes diarios del Centro Nacional de Prevención de Desastres están registrados dos eventos uno a las 6:37 con altura de columna de 3 km y otro a las 21:30 con altura de 1 km y dirección del viento hacia el este-noreste. Se utilizaron estos parámetros en el modelo Ash3d. En la comparación de los escenarios se puede ver que hay similitud en la dirección y una ligera coincidencia en el alcance (figura 20).
8	06 de agosto de 2011	10.1 h	6.43	0.003	No hay información que se pueda utilizar para poder hacer la simulación en esta fecha. Para simular el evento marcado en el Atlas Nacional de Riesgos se utilizaron parámetros de acuerdo con los registros de eventos muy cercanos a la fecha. En la comparación de los escenarios, no existen coincidencias en la dirección y tampoco en el alcance de dispersión de ceniza (figura 21).
9	30 de agosto de 2011	0.1 h	6.5	0.003	En los reportes de CENAPRED está registrado un evento a las 11:29 h, marcando una altura en la columna de 1 km, para hacer la simulación. En la simulación con el modelo ASH3D, coincide, sin embargo, en el alcance de dispersión se observa un ligero contraste (figura 22 y 23).
10	08 de diciembre de 2011	1h	6.5	0.003	No hay datos sobre este evento en el ANR, se utilizaron parámetros hipotéticos de acuerdo al historial de eventos del CENAPRED, se observó que hay similitud en dirección, pero el alcance es ligeramente mayor.
11	13 de abril de 2012	1 h	7.5	0.003	En los reportes de monitoreo diario del CENAPRED se registran dos eventos, a las 2:45 y a las 22:20 con alturas de columna de 500 m y 2 km, para poder hacer la simulación en el modelo ASH3D se utilizó la altura de 2 km ya que no permite introducir alturas menores de 1 km. Los resultados obtenidos del modelo fueron comparados y se puede ver que no hay similitud en la dirección y tampoco la hay en el alcance de la dispersión de ceniza, de las tres isopacas marcadas en el ANR ninguna coincide razonablemente con la del modelo ASH3D (figuras 24 y 25).

12	14 de abril de 2012	0.2 h	7.5	0.003	Para esta simulación se utilizó la información que está registrada en la página del monitoreo de CENAPRED, no se observó similitud en la dirección y tampoco en el alcance (figura 26).
13	03 de mayo de 2012	0.1 h	7.5	0.003	En esta simulación se utilizaron parámetros de acuerdo con los datos registrados de la actividad del volcán, registró una altura de 2 km y la dirección del viento hacia el oeste. Se observó similitud en la dirección y el alcance de dispersión de ceniza (figura 27).
14	11 de mayo de 2012	1 h	8.5	0.003	Se registra un evento que produce una columna de ceniza de 3 km de altura. En la comparación del modelo y del ANR, se puede observar que hay similitud en cuanto al alcance, pero en dirección se puede apreciar una ligera diferencia (figura 28).
15	08 de mayo de 2013	1	8.5	0.003	El CENAPRED reporta que este día se registró un episodio de temblor espasmódico de gran amplitud. Este episodio se acompañó de una columna de ceniza que alcanzó unos 3000 metros. Al momento de trasponer los escenarios se nota que coinciden en dirección, pero en amplitud se nota una ligera coincidencia (figura 29).
16	11 de mayo de 2013	0.1	7.5	0.003	En el monitoreo diario se registró un evento a la 22:00 hrs y la altura de la columna fue de 2 km, en la comparación de los escenarios se observa similitud tanto en dirección como en extensión (figura 30)
17	23 de mayo de 2013	1	7.9	0.003	En esta fecha ocurrió una explosión que generó una columna eruptiva de ceniza de 2.5 km de alto por encima del cráter, que el viento transporta inicialmente hacia el oeste. En la comparación de los escenarios se nota similitud en la dirección, pero en la extensión se nota una diferencia considerable (figura 31).
18	17 de junio de 2013	0.1	9.5	0.003	En los reportes de monitoreo se registró una explosión en el volcán Popocatepetl, que generó una columna eruptiva de ceniza de más de 4 km de altura y lanzó fragmentos incandescentes a distancias de hasta 2 km del cráter. En la comparación del modelo contra el ANR, se observa que hay similitud en la dirección, en cuanto al alcance se puede ver que hay una cierta diferencia (figura 32).
19	24 de junio de 2013	1	6.5	0.003	En la página del CENAPRED no existe ninguna actividad relevante registrada para esta fecha, dado que en el ANR si está marcado un evento, se hizo un escenario en el modelo AS3D con los registros del evento que ocurrió el día previo, 23 de junio de 2013 a las 19:00 hrs y con una altura de columna de 800 m, dado que no se puede colocar una altura menor se colocó la de 1 km, en los resultados se observa que hay similitud en la dirección, en alcance es ligeramente mayor en el modelo ASH3D.
20	04 de julio de 2013	1	6.8	0.0001	Se registra actividad en el volcán que genera una columna eruptiva de ceniza con altura de 1.5 km la dirección del viento se registra hacia el noreste. No hay similitud en el modelo con el ANR. ni en dirección y tampoco en amplitud. A manera de ejercicio de aproximación, se modificó la fecha a 05 de julio de 2013 en el modelo ASH3D y se puede ver mayor similitud con el ANR.

21	09 de julio de 2018	1	6.8	0.0001	Están registrados dos eventos uno a las 11:19 columna eruptiva de ceniza con altura de 1.3 km y otro a las 16:20 con altura de la columna de 2 km ambas con dirección del viento hacia el oeste. Se puede observar que hay aproximación en cuanto a la dirección, pero no la hay en el alcance de la distribución.
22	01 de septiembre de 2013	1	6.5	0.003	En los reportes no hay ningún evento registrado, aunque en el ANR si se muestran resultados, por lo que se hizo una simulación en el modelo ASH3D, tomando la fecha registrada en el ANR, único parámetro con el que se contaba. En los resultados se puede observar que se aproximan en la dirección, pero en el trayecto se ve mucho mayor alcance en la simulación del programa ASH3D.
23	03 de agosto de 2013	1	6.5	0.003	En los reportes de monitoreo no hay ningún evento registrado, para hacer la simulación en modelo ASH3D se utilizaron los parámetros siguientes: altura de la columna 6.5 km simulando que la altura sobre el nivel de cráter fuera de 1.2 km, duración de 1h y volumen de 0.003 km.
24	13 de agosto de 2013	1	7.9	0.003	Se puede ver una ligera similitud en cuanto a la dirección, pero en el trayecto de la distribución de ceniza se nota una diferencia considerable.
25	14 de agosto de 2013	12	6.5	0.003	No hay datos relevantes en esta fecha, en los reportes de monitoreo diario se encontraron registros de actividad del día 15 de agosto de 2013 a las 18:34h, una columna de ceniza con altura de 1 km, la dirección de los vientos se registró hacia el sureste, estos datos fueron utilizados para recrear el escenario de dispersión de ceniza del día 14 de agosto que es la que está reportada en el Atlas Nacional de Riesgos. En la comparación hay similitud en la dirección, pero no en el trayecto de la ceniza.
26	18 de agosto de 2013	0.1	6.8	0.001	El Popocatepetl registró exhalaciones de baja intensidad acompañadas de vapor de agua, gas y fue acompañado por una emisión de ceniza de hasta 1.5 km de altura y cuya dirección fue al oeste-suroeste. No se observa similitud en la dirección y tampoco en el trayecto de la distribución de ceniza.

Fuente: Elaboración propia.

El estudio sobre la dispersión de cenizas volcánicas utilizando el software ASH3D revela una serie de hallazgos importantes que contribuyen significativamente a la comprensión de este fenómeno complejo.

Se realizaron 26 simulaciones, con los parámetros mencionados en la Tabla 1, una por cada escenario que se registra en el Atlas Nacional de Riesgos, la tabla anterior resume los parámetros utilizados para realizar las modelaciones en el software ASH3D, los cuales se definieron con base en la información recopilada, los resultados obtenidos en este estudio destacan la importancia de considerar la interacción entre la atmósfera y la ceniza volcánica en la modelación de la dispersión de cenizas. Además, la integración de datos que se registran en el monitoreo del Popocatepetl y el Atlas Nacional de Riesgos es crucial para obtener una visión completa del problema.

Como se menciona anteriormente, los escenarios recreados en el Modelo ASH3D, se realizaron con datos del monitoreo diario de CENAPRED, sin embargo, es necesario enfatizar que se observó que los escenarios del Atlas Nacional de Riesgos, en su mayoría no coinciden con la información de la página de los reportes, incluso existen escenarios contenidos en el ANR que no existen en la página del CENAPRED y no hay evidencia en alguna otra fuente de información en estos casos se usaron parámetros hipotéticos según registros encontrados de fechas o eventos cercanos a la misma.

El porcentaje de coincidencias espaciales entre las simulaciones y los escenarios de dispersión de ceniza contenidos en el Atlas Nacional de Riesgos es del 70%.

Por otro lado, es importante recalcar que no hay información sobre cómo fueron creados o que parámetros se utilizaron para realizar la “simulación” o la manera como se construyeron los escenarios de dispersión de cenizas para el Popocatepetl que se encuentran en el portal del Atlas Nacional de Riesgos.

Algo que fue frecuente observar fue que en los resultados obtenidos de las modelaciones realizadas en ASH3D muestran que la velocidad del viento y la dirección del viento son factores clave en la dispersión de las partículas. Además, se reafirmó que la altura de la columna de cenizas influye notoriamente en la dispersión de las mismas.

En general, el estudio proporciona una contribución significativa a la comprensión de la dispersión de cenizas volcánicas y sus implicaciones para la salud humana y el medio ambiente. Los resultados del estudio pueden ser utilizados para mejorar la predicción de la dispersión de cenizas volcánicas y reducir el impacto en la salud humana, el medio ambiente y la infraestructura. Además, el estudio destaca la importancia de la colaboración entre los científicos, los tomadores de decisiones y las comunidades afectadas para abordar los desafíos relacionados con la dispersión de cenizas volcánicas.

Proceso de Superposición

El proceso de superposición se llevó a cabo de la siguiente manera:

1. Se importaron los datos de dispersión de ceniza del ANR y de ASH3D en formato KML a Google Earth.
2. Se superpusieron las isopacas y los datos de dispersión de ceniza para visualizar la distribución espacial de la ceniza y su relación con la topografía y la geografía del área.

La superposición de imágenes y datos de dispersión de ceniza en Google Earth permite obtener una visión clara y detallada de la dispersión de ceniza volcánica en el área de estudio. Esto facilitó la interpretación de los resultados y la identificación de patrones y tendencias en la dispersión de ceniza.

CONCLUSIONES

La dispersión de ceniza de un volcán depende de diversos factores, entre los cuales se encuentran la intensidad de la erupción ocurrida, las condiciones o particularidades meteorológicas y las características de la topografía. Teniendo claro este contexto, se debe precisar que la coincidencia observada en los resultados de dispersión de ceniza entre ANR y ASH3D tiene una alta relevancia. Entonces, a pesar de la implementación de diferentes enfoques, métodos y procesos, ambos muestran en general una similitud o generalización en la dirección y amplitud de la dispersión de ceniza. De tal manera que este aspecto es importante para evaluar la efectividad del método de simulación (ASH3D) que se propuso en esta tesis.

En general se observó que aun a pesar de las diferencias, ambos métodos (ANR y ASH3D) reproducen de manera aceptable la dispersión de ceniza producto de los eventos volcánicos que ocurrieron (explosiones o exhalaciones) en las fechas modeladas.

Una conclusión relevante es que el programa ASH3D puede ser utilizado de manera complementaria para tener una respuesta precisa ante situaciones de riesgo volcánico, como son exhalaciones o explosiones y obtener una rápida expresión gráfica de cómo son las dispersiones de ceniza en casi “tiempo real”.

Es importante precisar la existencia de un problema que se presentó para obtener las simulaciones, para fines comparativos, lo cual esencialmente radicó en la falta de datos e información disponible para modelar, por ejemplo, en muchas ocasiones no se tuvo la altura de columna. Como consecuencia, fue necesario recurrir a parámetros hipotéticos para realizar las simulaciones, por lo que esto pudo ser la causa para que no tuvieran semejanza. Sin embargo, esto no es factor para descalificar alguno de los dos escenarios, por lo que los resultados logran capturar los aspectos relevantes, fundamentales y específicos del fenómeno volcánico.

Cabe resaltar que, estas coincidencias generan una base para confiar al momento de proyectar escenarios futuros. Por lo cual, las discrepancias son escenarios de crecimiento, oportunidades e identificación de mejoras para afinar los parámetros, mejorar la calidad de las simulaciones y aumentar el nivel de precisión.

En los escenarios se observa que hay similitudes en la dirección de la dispersión de ceniza, pero persisten diferencias en la extensión de las áreas de dispersión y amplitud y en la ubicación del centro de emisión. Específicamente, ciertos eventos muestran alineación parcial con los registros del CENAPRED, mientras que en otros la falta de datos precisos en el ANR dificulta la validación. Los parámetros más relevantes son la altura de la columna eruptiva, la duración del evento y la dirección del viento, pues determinan el patrón de dispersión de la ceniza y su impacto en áreas pobladas.

Considerando que el ANR es una plataforma de referencia en la gestión del riesgo volcánico para el país, se recomienda su actualización con información más detallada y validada en particular con el tema de los escenarios de dispersión de ceniza de eventos que ocurran en el volcán Popocatepetl. No se trata de modificar los escenarios plasmados en el ANR con simulación obtenida con ASH3D, sino entre cosas, tal vez mejorar la base de datos del ANR para reflejar con mayor precisión la dinámica de los eventos históricos de dispersión de ceniza. La integración de datos actualizados permitirá reducir incertidumbres en la planeación de medidas de respuesta ante futuras erupciones.

El uso de escenarios hipotéticos en situaciones donde los datos observados son limitados es una estrategia que tiene altos problemas de cara a la fiabilidad, concreción y eficacia de las simulaciones con ASH3D. Estos escenarios se basan en supuestos y estimaciones, lo que implica que los resultados derivados de ellos no podrían ser considerados tan precisos. Mientras que los que se basan en datos reales, pueden tener altos índices o tasas de fiabilidad.

Específicamente, en algunos casos, como el de los eventos registrados entre el 21 de diciembre de 1994 y el 12 de marzo de 1995, no hay similitudes claras en los modelos, ya que los reportes del CENAPRED no proporcionan información suficiente para respaldar las simulaciones. Sin embargo, en otros eventos, como el 5 de marzo de 1996 y el 8 de enero de 1995, se observan coincidencias en la dirección de la dispersión de ceniza, aunque la amplitud o el alcance varían considerablemente. Por ejemplo, el evento del 3 de mayo de 2012 muestra similitudes tanto en dirección como en el alcance, mientras que otros, como el 28 de octubre de 1996, presentan solo coincidencias en la dirección, pero con un alcance mayor en la simulación.

Si bien el ANR aborda múltiples peligros volcánicos, es fundamental fortalecer su componente específico de dispersión de ceniza del Popocatepetl, dado que la ceniza volcánica tiene implicaciones directas en la aviación, la salud pública y la infraestructura, por lo que contar con escenarios más precisos facilitará la toma de decisiones de mitigación. Esto implica mejorar la recopilación de datos sobre alturas de columna, dirección y velocidad del viento, y extensión de la dispersión.

Adicionalmente, la ausencia de datos históricos o actuales durante algunos eventos volcánicos clave afecta, limita o atenta la capacidad para generar simulaciones históricas o para tratar de reproducirlas. Cuando no se dispone de información sobre las condiciones meteorológicas o la intensidad exacta de las erupciones, pueden ser forzados a hacer suposiciones generales, erróneas e incluso aisladas basadas en estimaciones, datos incompletos o casos hipotéticos que no comprenden la magnitud de las condiciones particulares. Esto puede generar incertidumbres en las predicciones de la dispersión, tanto en términos de distancia como en cuanto a la dirección que tomará la ceniza.

Utilizando más fidedignos asociados con los eventos volcánicos que han ocurrido en el Popocatepetl, podría permitir identificar posibles discrepancias en las simulaciones, lo que a su vez permitiría su mejora. Por ejemplo, si un modelo predice una dispersión de ceniza mayor a la que realmente se observó en un evento pasado, los investigadores pueden revisar los parámetros de simulación, como la velocidad del viento, la altura de la erupción o la cantidad de ceniza liberada, y ajustarlos para hacer que las predicciones futuras sean más precisas. Adicionalmente, este proceso de validación y ajuste constante, basado en datos reales, es crucial para garantizar la efectividad en situaciones de alto riesgo. Sin esta retroalimentación de los datos reales, podrían volverse obsoletos o ineficaces, comprometiendo las decisiones que se toman en la gestión de riesgos volcánicos.

En términos de gestión de riesgos, la comparación con datos reales no solo es útil para ajustar la precisión, sino que también permite una planificación más eficiente. Al contar con aspectos que han sido ajustados y validados mediante la comparación con eventos pasados, las autoridades y las organizaciones de protección civil pueden estar mejor preparadas para gestionar los impactos de futuras erupciones.

La búsqueda de información en el portal del Atlas Nacional de Riesgos referente a la caída de ceniza del Popocatepetl, para contrastarla con los escenarios de dispersión de ceniza obtenidos con ASH3D, ha permitido concluir que la plataforma del ANR es una herramienta valiosa para consultar e identificar los peligros que pueden afectar a las regiones de exposición a fenómeno perturbador (caída de ceniza) que a su vez pueden afectar a la población.

Con los resultados de este trabajo, pudo observarse que, lo plasmado en el ANR en materia de caída de ceniza, adolecen de parte de su información, por ejemplo, de la metodología con la que fueron construidas las curvas de dispersión. Asimismo, en la mayoría de casos no son comparables los escenarios obtenidos en este trabajo con lo del ANR, algunas posibles causas puedan ser a que no fue posible compaginar las fechas de los eventos eruptivos ahí descritos, con lo que se dispone en la página de internet del CENAPRED, en la sección del monitoreo diario del Popocatepetl

El modelo de dispersión de ceniza ASH3D es una herramienta empleada para identificar y construir escenarios de dispersión de ceniza en la atmósfera que utiliza parámetros como la fecha y la altura de la columna. Asimismo, es posible concluir que si se disponen de los datos de las características de una emisión de ceniza (altura, etc.) en casi tiempo real, se puede pronosticar su dispersión realizando una simulación con el programa ASH3D, lo cual resultaría en una herramienta muy valiosa, por ejemplo, para los aeropuertos.

Si bien al inicio puede llegar a ser complicado utilizar el modelo, es una herramienta muy práctica y bastante útil para recrear escenarios de distribución de ceniza en tiempo real por parte de autoridades de protección civil municipal o estatal para actualizar sus respectivos atlas. Es importante considerar la incertidumbre en ellos, sin embargo, se debe de confiar en que los datos proporcionados en la página del monitoreo del CENAPRED son certeros, dado que disponen de insumos como cámaras de video en tiempo real y otros dispositivos para determinar estos parámetros.

Desde mi punto de vista, es importante que la información con la que contamos en el ANR esté actualizada, que contenga escenarios recientes de la actividad del volcán, esto es porque solo hay información y escenarios hasta el año 2013. Asimismo, es importante que la información que encontremos en la aplicación concuerde con los registros de monitoreo diario del

CENAPRED y que en esta se registren datos relevantes sobre los eventos ocurridos. Actualmente el ARN contiene algunos escenarios que no son reproducibles con el simulador de escenarios de dispersión de ceniza ASH3D.

Este estudio contribuye a mejorar la precisión de los pronósticos y la toma de decisiones en situaciones de emergencia ante una eventual caída de ceniza durante eventos eruptivos que ocurran en el volcán Popocatepetl. En última instancia, este estudio subraya la necesidad de una aproximación integral y multidisciplinaria para abordar el complejo problema de la dispersión de ceniza volcánica.

Queda evidenciado con este trabajo, que, ampliando los conocimientos recibidos en la carrera de Lic. en Protección Civil y Gestión de Riesgos, impartida por la Universidad Autónoma de la Ciudad de México, es factible abordar temas de naturaleza técnico-científica que contribuyan a la mejor comprensión de fenómenos, como es este caso del peligro volcánico.

REFERENCIAS

- Caballero, G. V., & Valderrama, S. (2020). *Actividad del Volcán Popocatepetl*. [https://www1.cenapred.unam.mx/DIR_INVESTIGACION/2021/1er Trimestre/FRACCION_XLI/RV/Analisis y seguimiento de actividad del volcan Popocatepetl para el diagnostico oportuno y publicacion de resultados en el portal de Internet del CENAPRED.pdf](https://www1.cenapred.unam.mx/DIR_INVESTIGACION/2021/1er_Trimestre/FRACCION_XLI/RV/Analisis_y_seguimiento_de_actividad_del_volcan_Popocatepetl_para_el_diagnostico_oportuno_y_publicacion_de_resultados_en_el_portal_de_Internet_del_CENAPRED.pdf)
- Caballero, G. V., Martínez, A., & Valderrama, S. (2021). *Actividad del Volcán Popocatepetl*. https://www1.cenapred.unam.mx/DIR_INVESTIGACION/2022/XLI/RV/Informe-Actividad-Popocatepetl-2021.pdf
- Castillo, M., Muñoz, E., Arce, J. (2015). *Evaluación del sistema erosivo fluvial en el volcán Popocatepetl (México) mediante análisis morfométricos*. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1405-33222015000200004&script=sci_arttext
- Centro Nacional de Prevención de Desastres. (s.f.). *Infografía: Peligros volcánicos*. Universidad Nacional Autónoma de México. <https://www.cenapred.unam.mx/es/Publicaciones/archivos/319-INFOGRAFAPELIGROSVOLCNICOS.PDF>
- Centro Nacional de Prevención de Desastres. (2001). *Las cenizas volcánicas del Popocatepetl y sus efectos para aeronavegación e infraestructura aeroportuaria*. <https://www.cenapred.unam.mx/es/Publicaciones/archivos/111-LASCENIZASVOLCNICASDELPOPOCATPETLYSUSEFECTOSPARALAAERONAVEGACINEINFRAESTRUCTURAAEROPORTUARIA.PDF>
- Centro Nacional de Prevención de Desastres. (2012). *Historia de la actividad del volcán Popocatepetl 17 años de erupciones*. <https://www.cenapred.unam.mx/es/Publicaciones/archivos/225-HISTORIADELAACTIVIDADDELVOLCNPOPOCATPETL-17AOSDEERUPCIONES.PDF>

Centro Nacional de Prevención de Desastres. (2014). *Ceniza volcánica: ¿Qué hacer en caso de caída de ceniza volcánica?*

<https://www.cenapred.unam.mx/es/Publicaciones/archivos/14-CARTELCENIZAVOLCNICA.PDF>

Centro Nacional de Prevención de Desastres. (2016a). *Ceniza volcánica: Efectos en el cuerpo a corto y largo plazo.* <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/110109/313-INFOGRAFACENIZAVOLCNICA.PDF>

Centro Nacional de Prevención de Desastres. (2016b). *¿Cómo y por qué nace el #CENAPRED?* <https://www.gob.mx/cenapred/articulos/como-y-por-que-nace-el-cenapred>

Centro Nacional de Prevención de Desastres. (2019). *Calibración de datos de nubes de ceniza para los Volcanes Mexicanos.* <https://www.gob.mx/cenapred/articulos/monitoreo-y-dispersion-de-ceniza>

De la Cruz, S. (2008). *Volcanes: Peligro y riesgo volcánico en México.* Secretaría de Gobernación.

http://www.proteccioncivil.gob.mx/work/models/ProteccionCivil/Resource/363/1/images/fasciculo_volcanes.pdf

Gobierno de México. (2016). *Semáforo de alerta volcánica del Volcán Popocatepetl* <https://www.cenapred.gob.mx/es/Publicaciones/archivos/270-INFOGRAFAPOPOCATPETL-SEMFORODEALERTAVOLCNICA.PDF>

Gobierno de México. (s.f.). *Preguntas Frecuentes. ¿Qué es el Atlas Nacional de Riesgos (ANR)?*

[http://www.atlasnacionalderiesgos.gob.mx/archivo/faq.html#:~:text=%C2%BFQu%C3%A9%20es%20el%20Atlas%20Nacional,\(LGPC%2C%20Art%202\)](http://www.atlasnacionalderiesgos.gob.mx/archivo/faq.html#:~:text=%C2%BFQu%C3%A9%20es%20el%20Atlas%20Nacional,(LGPC%2C%20Art%202))

Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, P. (2014). *Metodología de la investigación.* <https://www.esup.edu.pe/wpcontent/uploads/2020/12/2.%20Hernandez,%20Fernandez%20y%20BaptistaMetodolog%C3%ADa%20Investigacion%20Cientifica%206ta%20ed.pdf>

Laboratorio Nacional de Observación de la Tierra. (2019). Calibración de datos de nubes de ceniza para los Volcanes Mexicanos. Recuperado de https://www1.cenapred.unam.mx/SUBCUENTA/6a%20SESI%C3%93N%20EXTRAORDINARIA/3.%20GOES_16/CENIZA_REPORTES_3.4_ABRIL_15_2019_BUENO_CON_%C3%8DNDICE+TABLAS+FIGURAS_C.pdf

Lermo, J., Cuenca, J., Chávez-García, F.J., Huidobro, A., Bermúdez, M.L., Rodríguez, M., Quaas, R., Sánchez-Sesma, F.J., Nava, E., Mijarez, H., & Briones, E. (1995). *Historia de la actividad reciente del Volcán Popocatepetl. Volcán Popocatepetl Estudios Realizados durante la Crisis de 1994-1995*. SINAPROC-CENEPRED-UNAM, México, pág. 140 <https://www.cenapred.unam.mx/es/Publicaciones/archivos/149-1.pdf>

Macías, J. L. (2005). Geología e historia eruptiva de algunos de los grandes volcanes activos de México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*. Volumen Conmemorativo del Centenario, Temas Selectos de la Geología Mexicana. Tomo LVII (3), 379-424. <https://www.scielo.org.mx/pdf/bsgm/v57n3/1405-3322-bsgm-57-03-379.pdf>

Mastin, L. G., Randall, M. J., H. F., & Denlinger, R. P. (2021, abril). *Guía del usuario y referencia de Ash3d: un modelo tridimensional para transporte atmosférico euriatlántica*. Informe de expediente abierto 2013-11-22. <https://pubs.usgs.gov/publication/ofr20131122>

Merino, J. A. (2018). *Aprovechamiento de ceniza volcánica como estimulador en el proceso degradativo de materia orgánica de origen vegetal para la obtención de un compost* [Tesis de grado, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo]. <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/10542/1/236T0401.PDF>

Ortiz, R. (1996). *Riesgo volcánico*. https://www.volcanesdecanarias.org/images/DOWNLOAD/Riesgo/01_RIESGO_VOLCANICO.pdf

- Ramírez, N. L. (2018). Técnicas de la metodología cualitativa. *Unidades de Apoyo para el Aprendizaje*. CUAIEED/Facultad de Medicina-UNAM. <https://uapa.cuaed.unam.mx/sites/default/files/minisite/static/02414209-e634-4354-b751-5e811888e8e8/tecnicas%20metodologia/index.html>)
- Sabino, C. (1992). *El proceso de Investigación*. https://paginas.ufm.edu/sabino/ingles/book/proceso_investigacion.pdf
- Secretaría de Educación, Ciencia, Tecnología e Innovación. (2020). *Estudio sobre las cenizas del volcán Popocatepetl*. <https://www.sectei.cdmx.gob.mx/comunicacion/nota/estudio-sobre-las-cenizas-del-popocatepetl>
- Servicio Geológico Mexicano. (2017). Volcanes de México. Recuperado de <https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Riesgos-geologicos/Volcanes-de-Mexico.html>
- Wilson, T., Stewart, C., Sword-Daniels, V., Leonard, G. S., Johnston, D. M., Cole, J. W., Wardman, J., Wilson, G., & Barnard, G. T. Volcanic ash impacts on critical infrastructure, *Physics and Chemistry of the Earth*, Parts A/B/C, Volumes 24-46, 2012 ISSN 1474-7065,
- United States Geological Survey. (2021, april). *User's Guide and Reference to the Web Interface of Ash3d. A Three-Dimensional Model for Atmospheric tepra transport and Deposition*. <https://doi.org/10.3133/ofr20131122>

ANEXO SIMULACIONES

Distribución de cenizas periodo de 21 de diciembre de 1994 al 12 de marzo de 1995

Figura 4

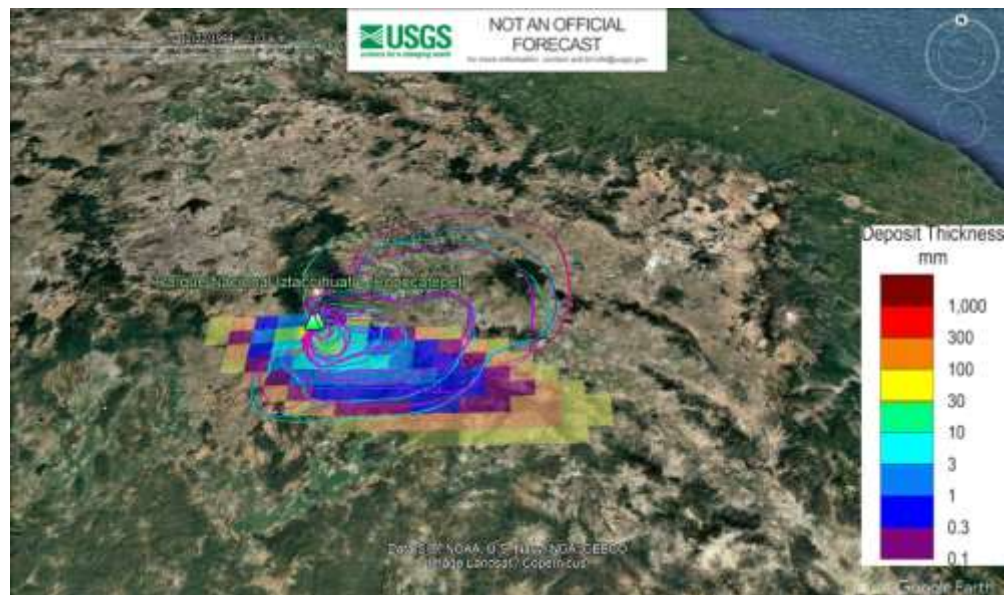
Escenarios de dispersión de ceniza contenidos en el Atlas Nacional de Riesgos



Fuente: Escenarios de distribución de cenizas periodo de 21 de diciembre de 1994 al 12 de marzo de 1995 tomada de ANR

Figura 5

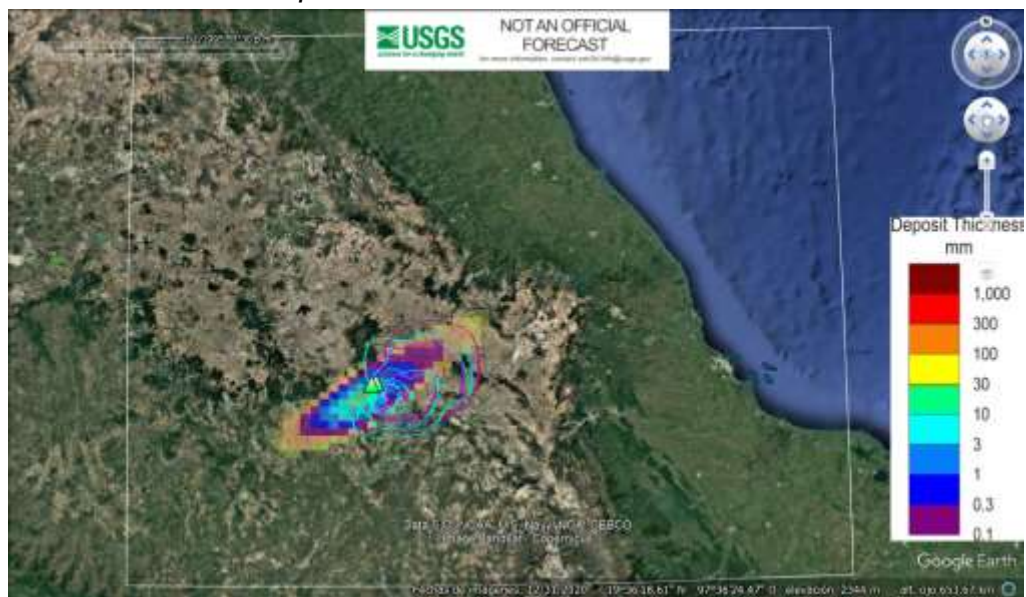
Escenarios de dispersión de ceniza del ANR y ASH3D sobrepuestos



Fuente: Modelos de dispersión de ceniza del volcán Popocatépetl del programa ASH3D y los escenarios contenidos en el ANR traspuestos en Google Earth; elaboración propia.

Figura6

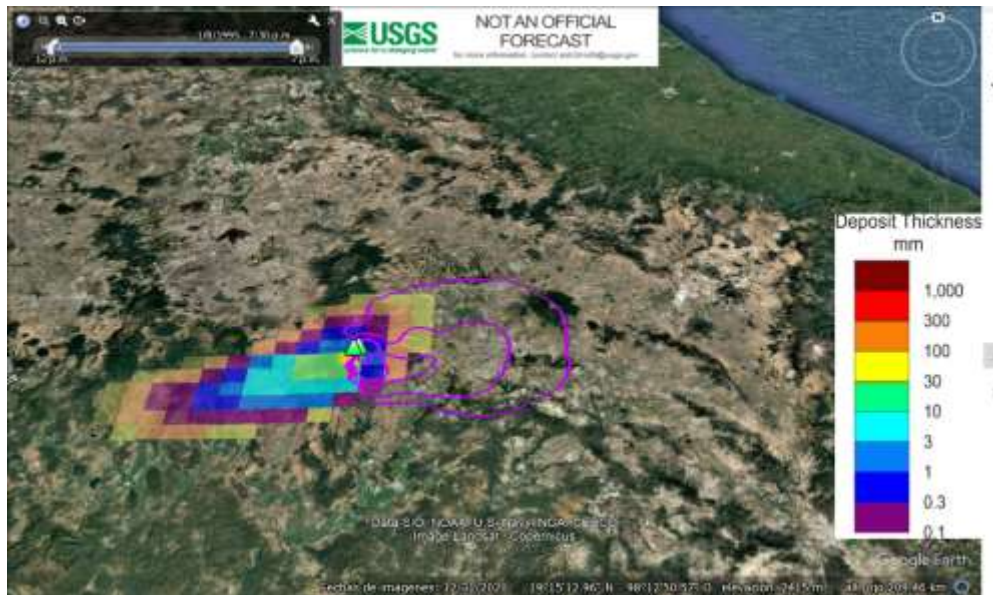
Simulaciones de dispersión de ceniza del 01 de enero de 1995



Fuente: Modelos de dispersión de ceniza del volcán Popocatépetl del programa ASH3D y los escenarios contenidos en el ANR traspuestos en Google Earth; elaboración propia.

Figura 7

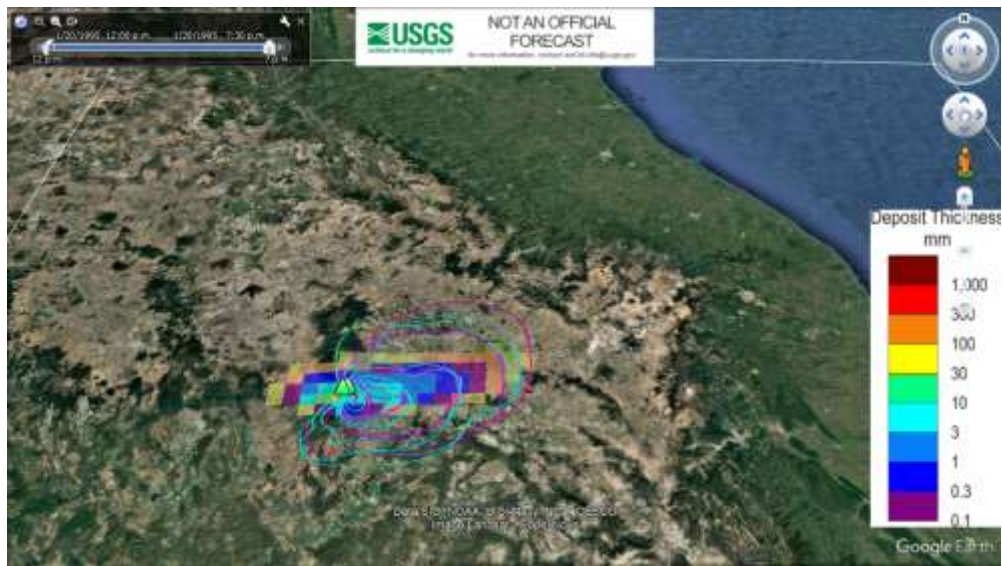
Simulaciones de dispersión de ceniza del 08 de enero de 1995



Fuente: Modelos de dispersión de ceniza del volcán Popocatepetl del programa ASH3D y los escenarios contenidos en el ANR traspuestos en Google Earth, elaboración propia

Figura 8

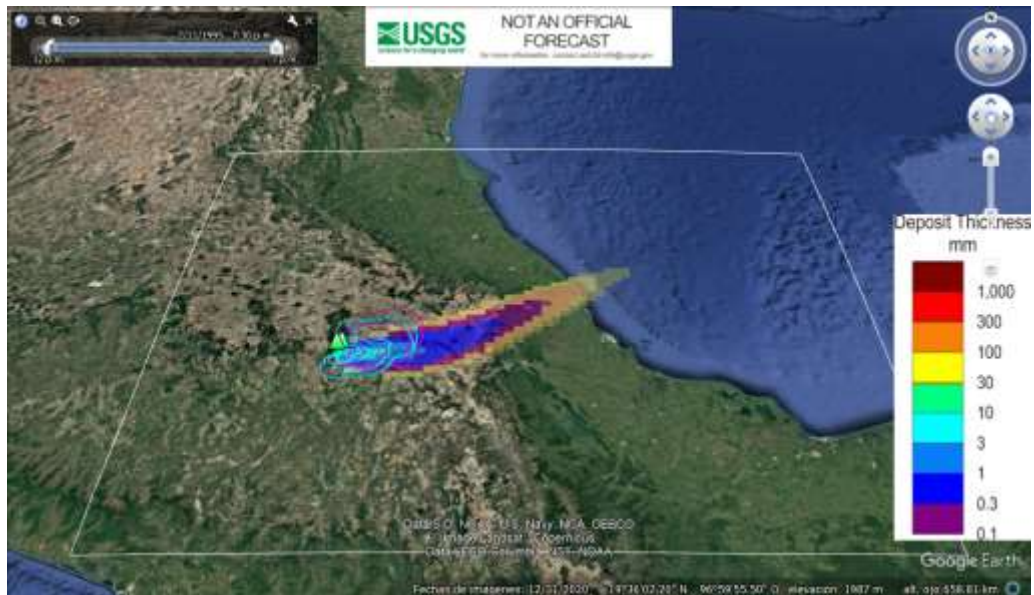
Simulaciones de dispersión de ceniza del 20 de enero de 1995



Fuente: Modelos de dispersión de ceniza del volcán Popocatepetl del programa ASH3D y los escenarios contenidos en el ANR traspuestos en Google Earth, elaboración propia.

Figura 9

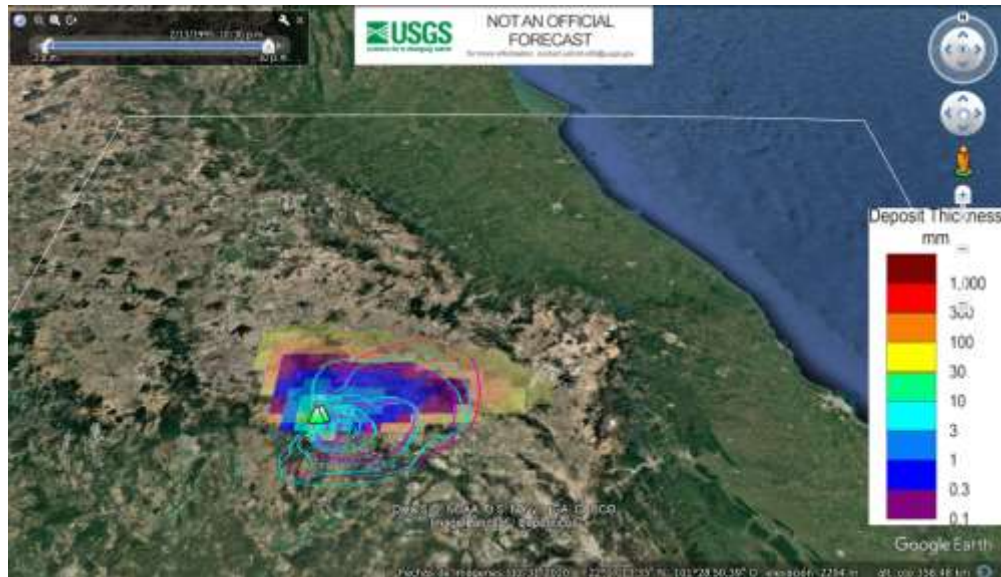
Simulaciones de dispersión de ceniza del 11 de febrero de 1995



Fuente: Modelos de dispersión de ceniza del volcán Popocatepetl del programa ASH3D y los escenarios contenidos en el ANR traspuestos en Google Earth, elaboración propia.

Figura 10

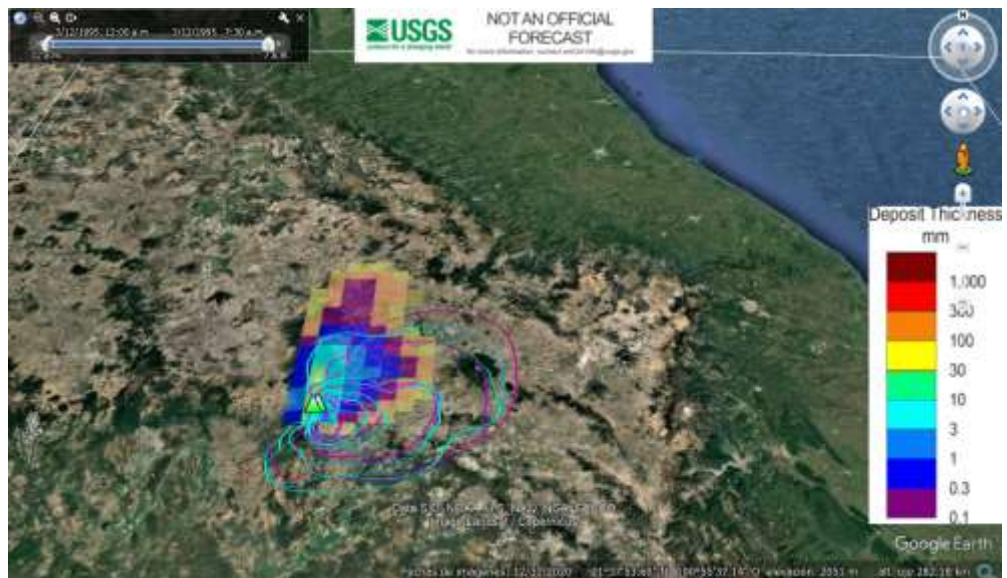
Simulaciones de dispersión de ceniza del 11 de febrero de 1995



Nota: Modelos de dispersión de ceniza del volcán Popocatepetl del programa ASH3D y los escenarios contenidos en el ANR traspuestos en Google Earth, elaboración propia.

Figura 11

Simulaciones de dispersión de ceniza del 12 de marzo de 1995



Fuente: Modelos de dispersión de ceniza del volcán Popocatepetl del programa ASH3D y los escenarios contenidos en el ANR traspuestos en Google Earth, elaboración propia.

Periodo del 05 al 15 de marzo de 1996

Figura 12

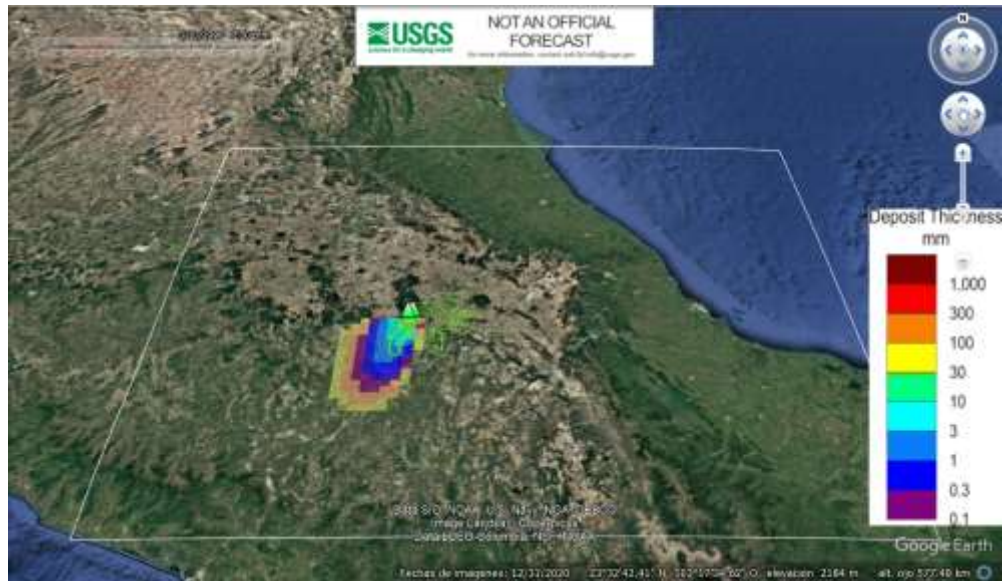
Simulaciones de dispersión de ceniza del 05 de marzo de 1996



Fuente: Modelos de dispersión de ceniza del volcán Popocatepetl del programa ASH3D y los escenarios contenidos en el ANR traspuestos en Google Earth, elaboración propia.

Figura 13

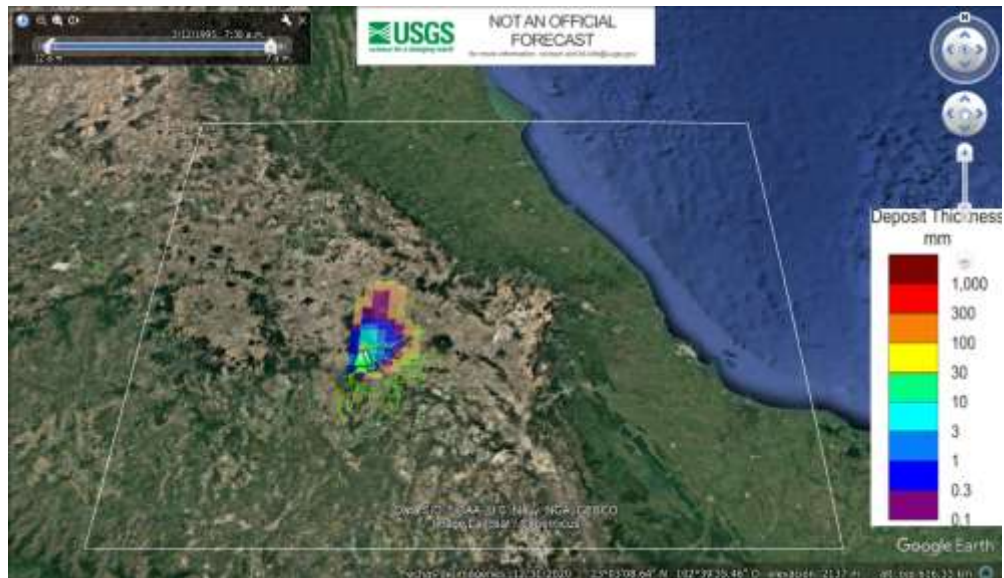
Simulaciones de dispersión de ceniza del 10 de marzo de 1996



Fuente: Modelos de dispersión de ceniza del volcán Popocatépetl del programa ASH3D y los escenarios contenidos en el ANR traspuestos en Google Earth, elaboración propia.

Figura 14

Simulaciones de dispersión de ceniza del 11 de marzo de 1996



Fuente: Modelos de dispersión de ceniza del volcán Popocatépetl del programa ASH3D y los escenarios contenidos en el ANR traspuestos en Google Earth, elaboración propia.

Figura 15

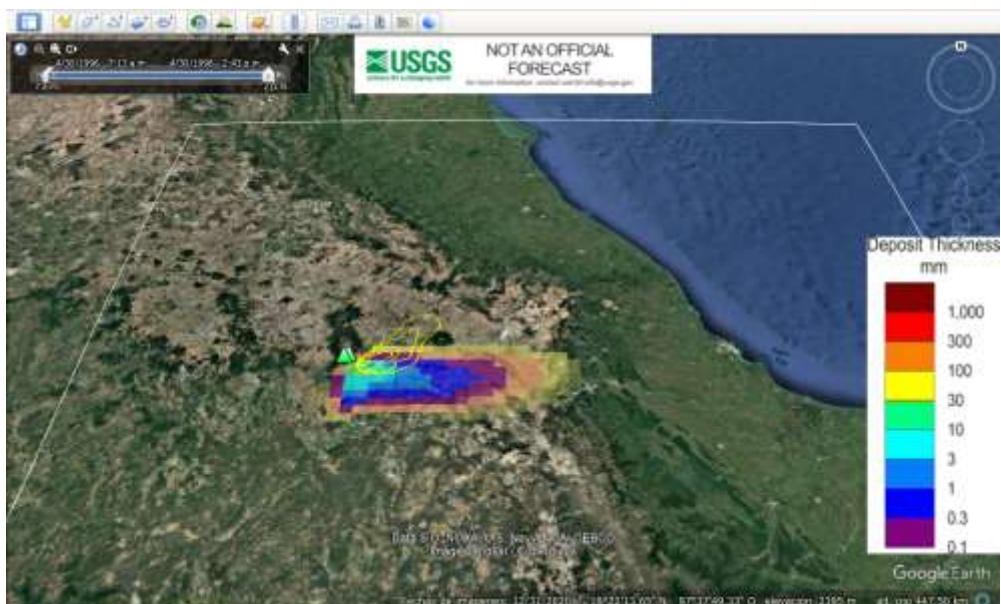
Simulaciones de dispersión de ceniza del 15 de marzo de 1996



Fuente: Modelos de dispersión de ceniza del volcán Popocatepetl del programa ASH3D y los escenarios contenidos en el ANR traspuestos en Google Earth, elaboración propia.

Figura 16

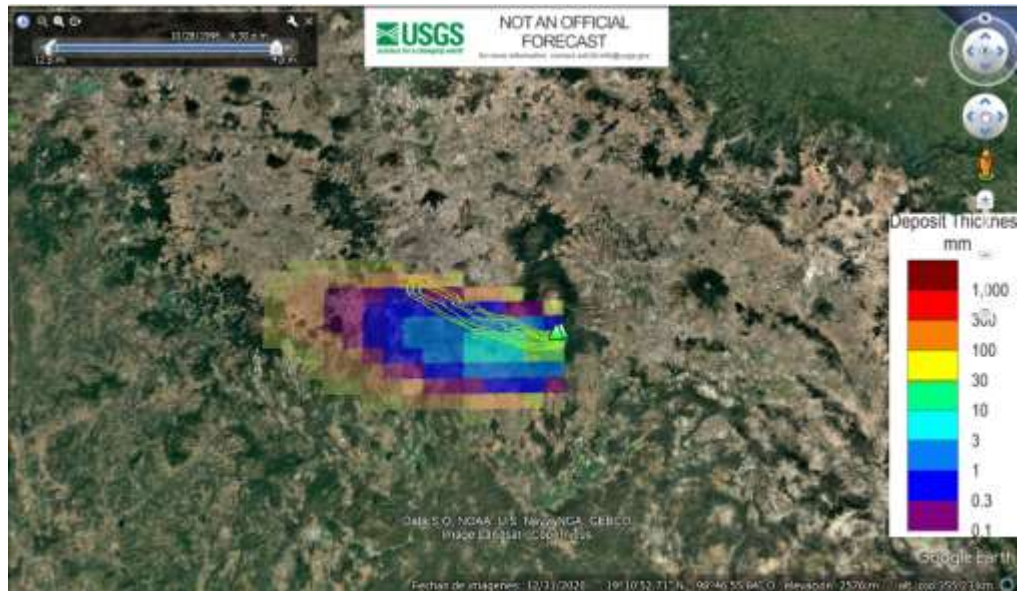
Simulaciones de dispersión de ceniza del 30 de abril de 1996



Fuente: Modelos de dispersión de ceniza del volcán Popocatepetl del programa ASH3D y los escenarios contenidos en el ANR traspuestos en Google Earth, elaboración propia.

Figura 17

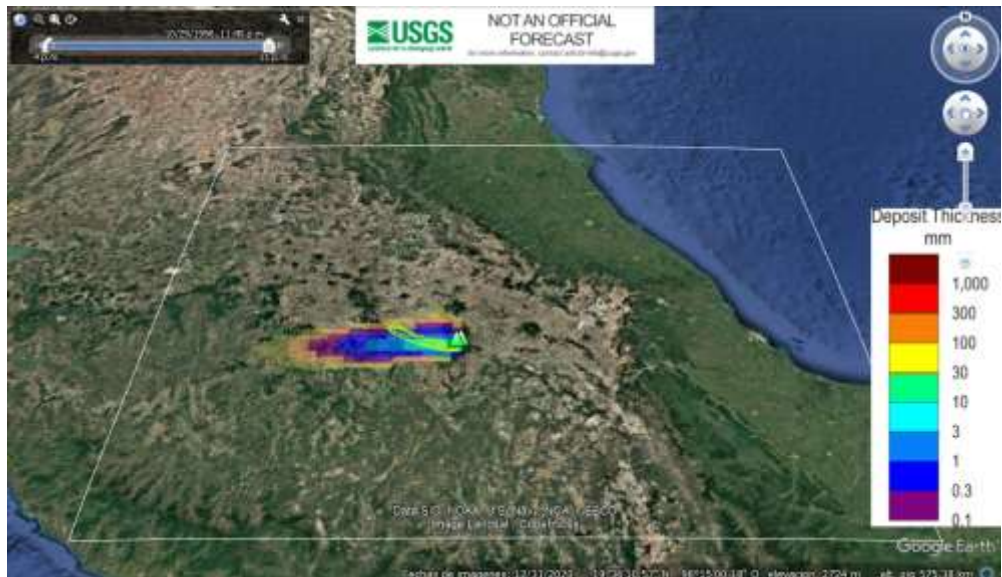
Simulaciones de dispersión de ceniza del 28 de octubre de 1996



Fuente: Modelos de dispersión de ceniza del volcán Popocatepetl del programa ASH3D y los escenarios contenidos en el ANR traspuestos en Google Earth, elaboración propia.

Figura 18

Simulaciones de dispersión de ceniza del 29 de octubre de 1996



Fuente: Modelos de dispersión de ceniza del volcán Popocatepetl del programa ASH3D y los escenarios contenidos en el ANR traspuestos en Google Earth, elaboración propia.

Figura 19

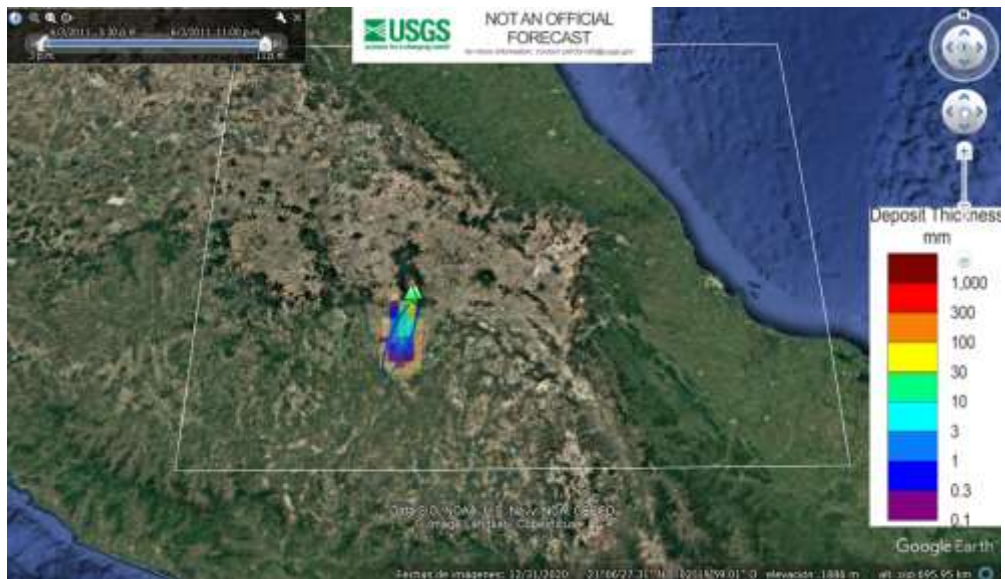
Simulaciones de dispersión de ceniza del 30 de junio de 1997



Fuente: Modelos de dispersión de ceniza del volcán Popocatépetl del programa ASH3D y los escenarios contenidos en el ANR traspuestos en Google Earth, elaboración propia.

Figura 20

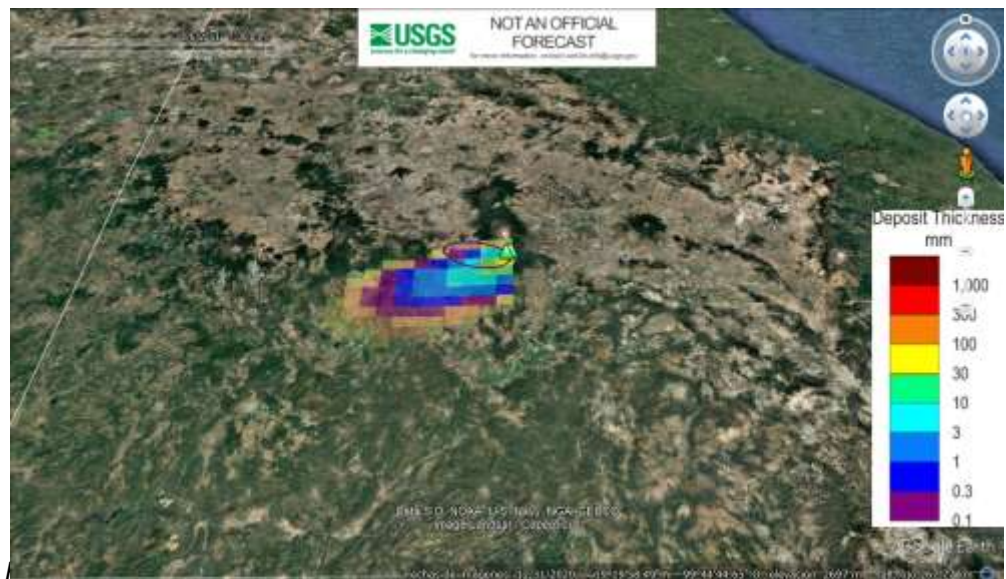
Simulaciones de dispersión de ceniza del 03 de junio de 2011



Fuente: Modelos de dispersión de ceniza del volcán Popocatépetl del programa ASH3D y los escenarios contenidos en el ANR traspuestos en Google Earth, elaboración propia.

Figura 21

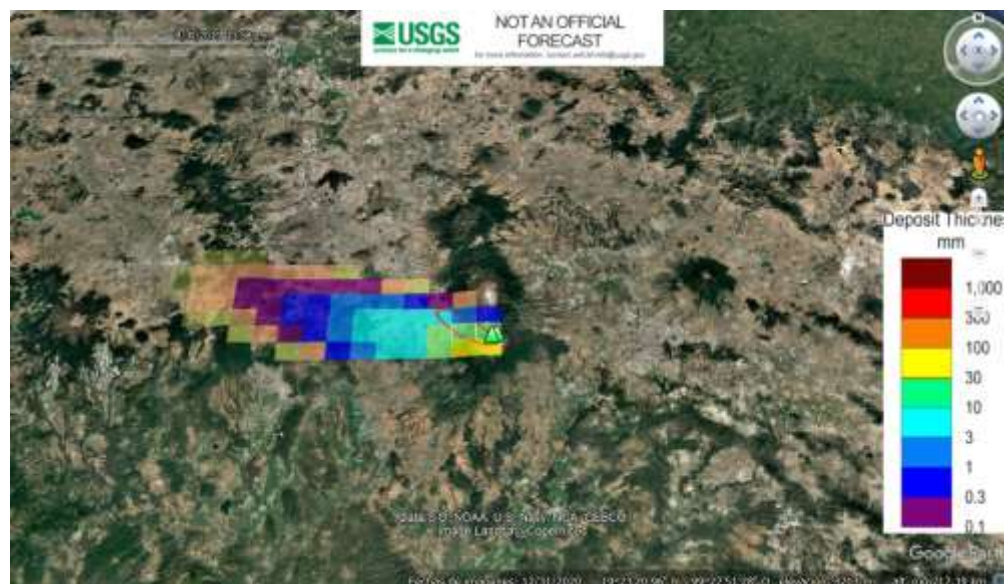
Simulaciones de dispersión de ceniza del 06 de agosto de 2011



ASH3D y los escenarios contenidos en el ANR traspuestos en Google Earth, elaboración propia.

Figura 22

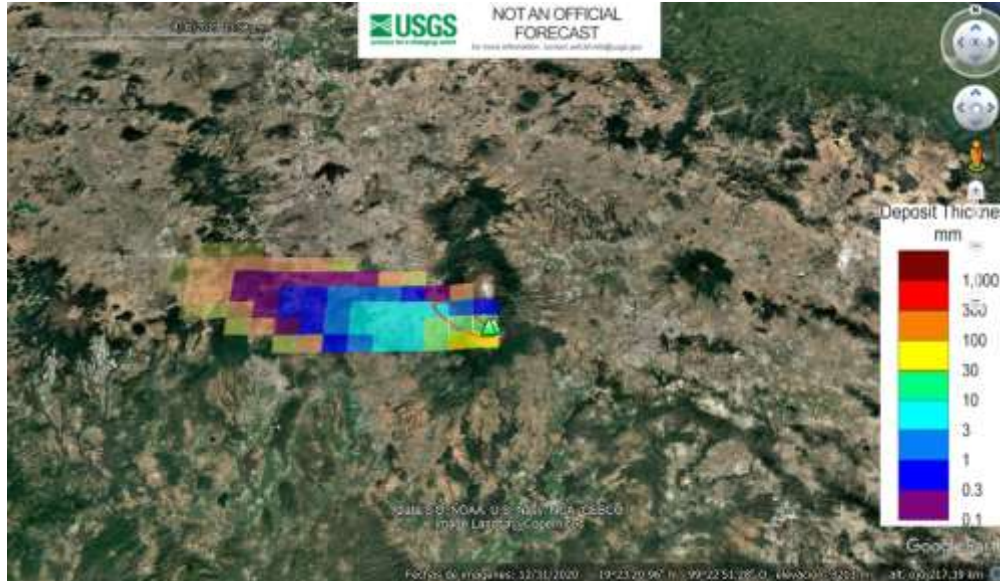
Simulaciones de dispersión de ceniza del 30 de agosto de 2011



Fuente: Modelos de dispersión de ceniza del volcán Popocatepetl del programa Ash3d y los escenarios contenidos en el ANR traspuestos en Google Earth, elaboración propia.

Figura 23

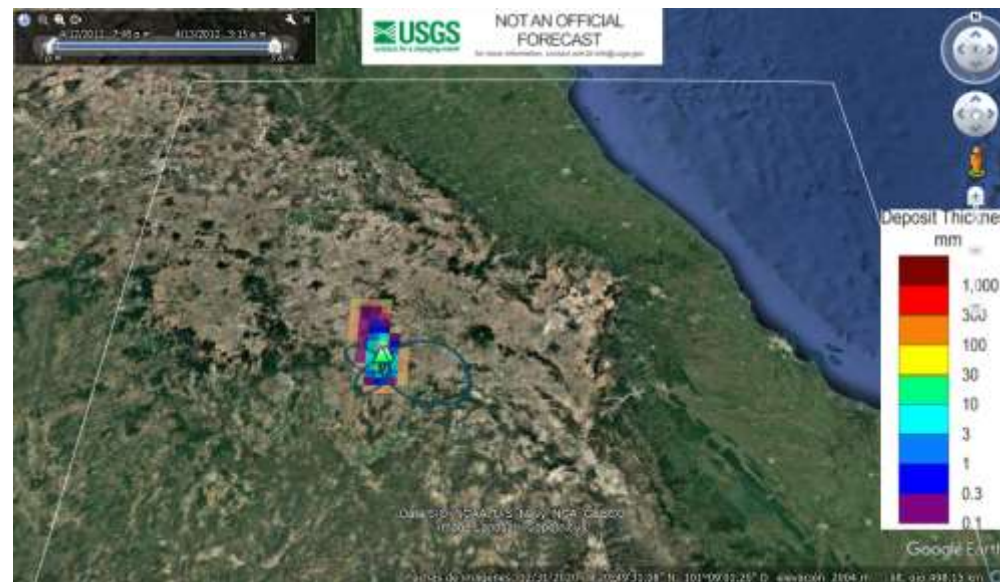
Simulaciones de dispersión de ceniza del 30 de agosto de 2011



Fuente: Modelos de dispersión de ceniza del volcán Popocatepetl del programa ASH3D y los escenarios contenidos en el ANR traspuestos en Google Earth, elaboración propia.

Figura 24

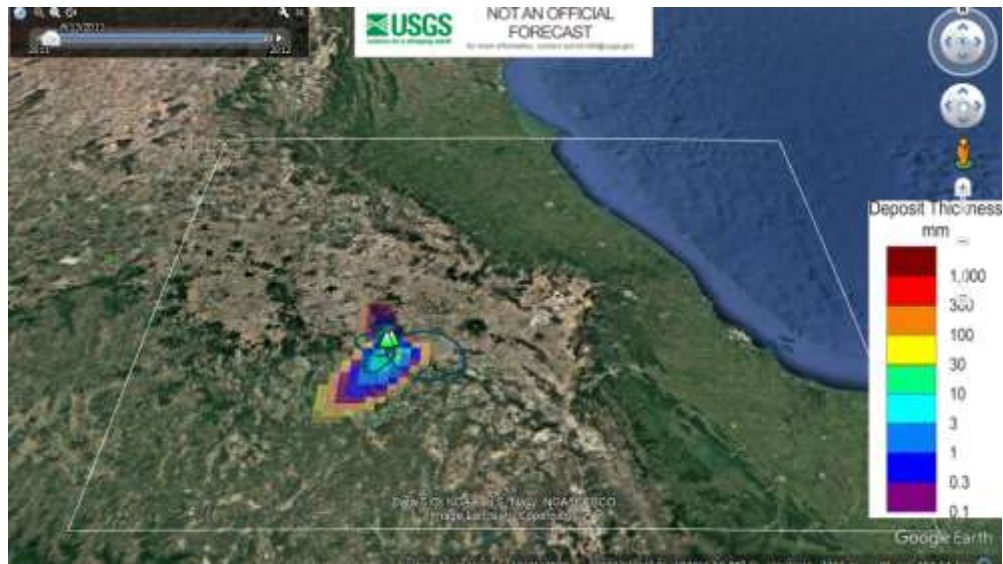
Simulaciones de dispersión de ceniza del 13 de abril de 2012



Fuente: Modelos de dispersión de ceniza del volcán Popocatepetl del programa ASH3D y los escenarios contenidos en el ANR traspuestos en Google Earth, elaboración propia.

Figura 25

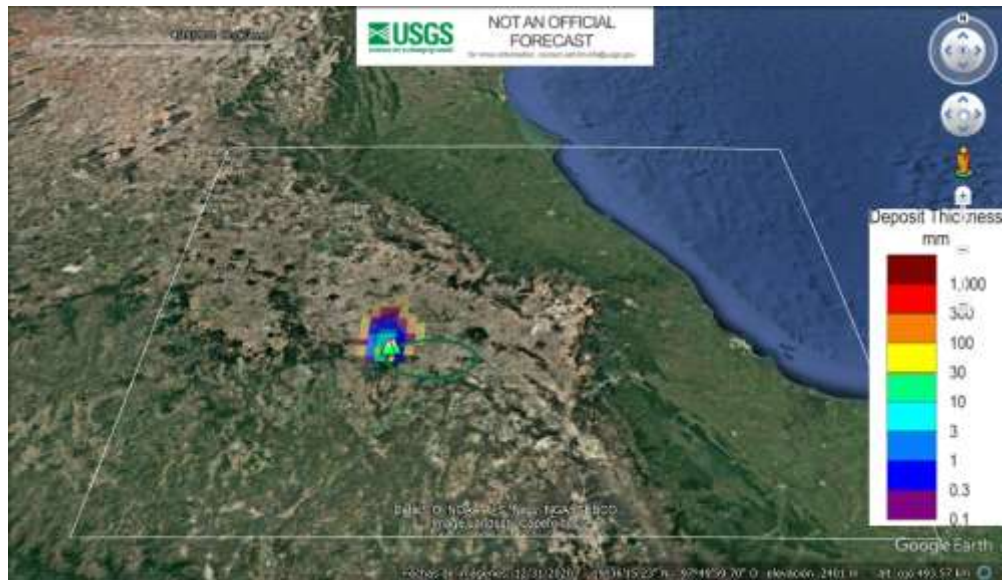
Simulaciones de dispersión de ceniza del 13 de abril de 2012



Fuente: Modelos de dispersión de ceniza del volcán Popocatepetl del programa ASH3D y los dos escenarios contenidos en el ANR traspuestos en Google Earth, elaboración propia.

Figura 26

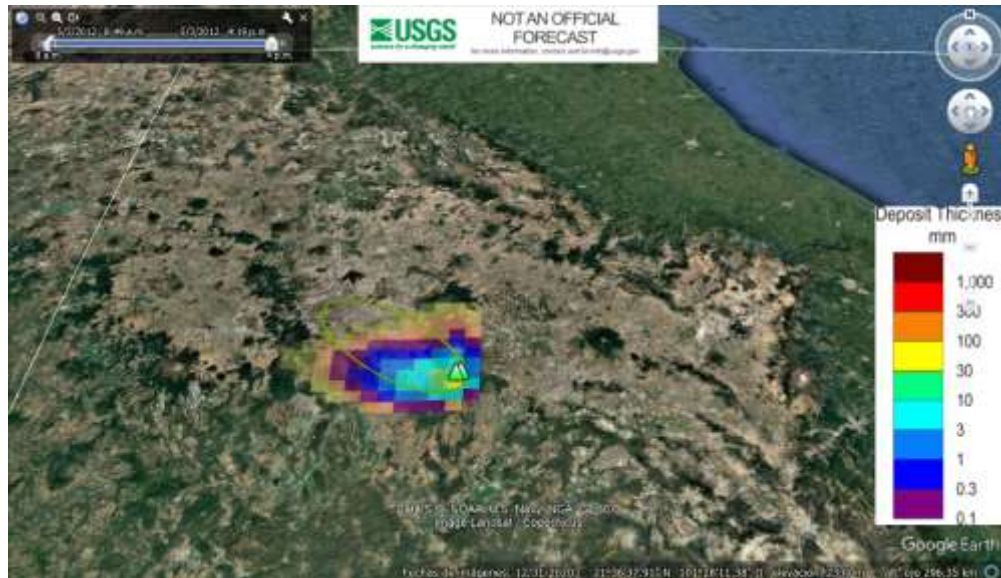
Simulaciones de dispersión de ceniza del 14 de abril de 2012



Fuente: Modelos de dispersión de ceniza del volcán Popocatepetl del programa ASH3D y los escenarios contenidos en el ANR traspuestos en Google Earth, elaboración propia.

Figura 27

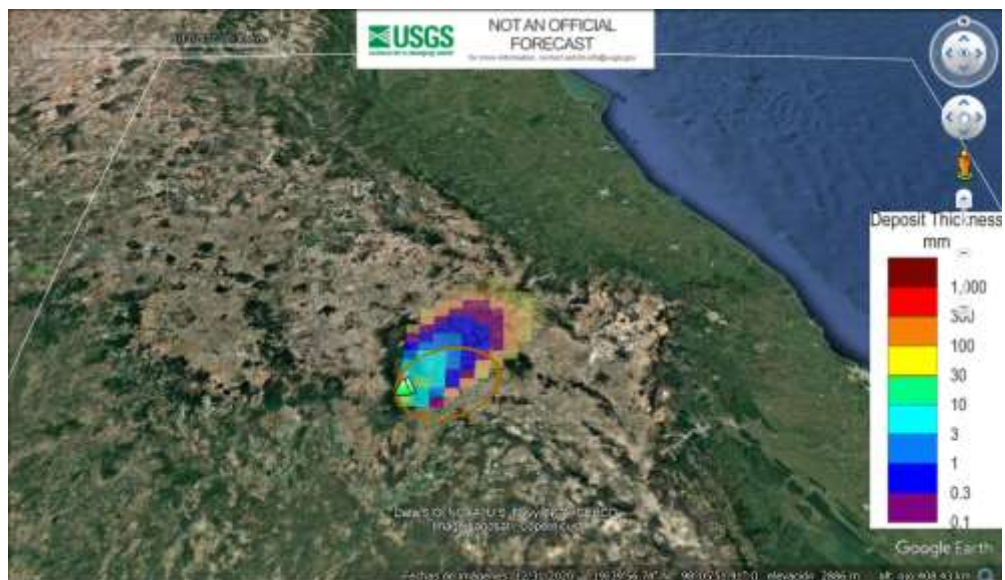
Simulaciones de dispersión de ceniza del 03 de mayo de 2012



Fuente: Modelos de dispersión de ceniza del volcán Popocatepetl del programa ASH3D y los escenarios contenidos en el ANR traspuestos en Google Earth, elaboración propia.

Figura 28

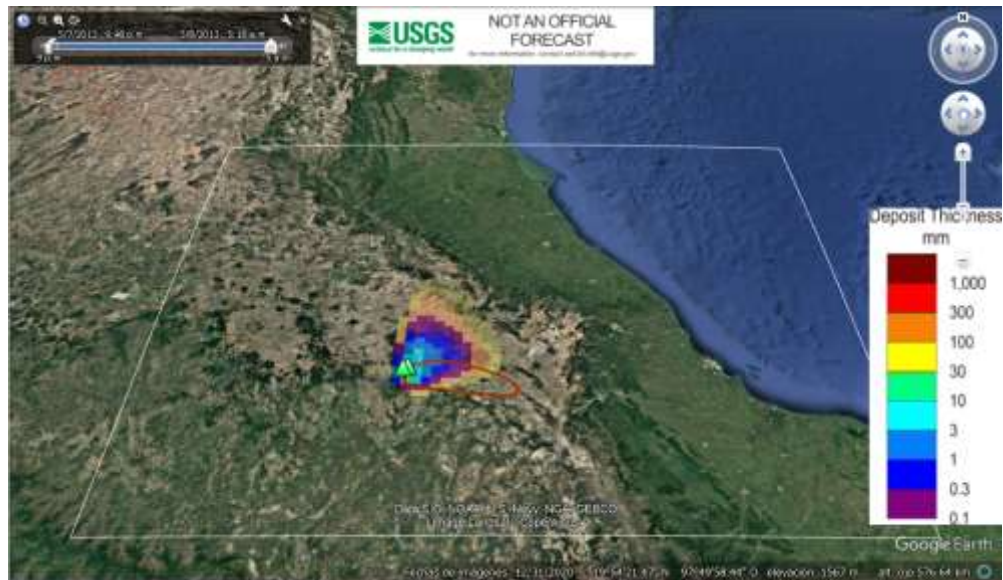
Simulaciones de dispersión de ceniza del 11 de mayo de 2012



Fuente: Modelos de dispersión de ceniza del volcán Popocatepetl del programa ASH3D y los escenarios contenidos en el ANR traspuestos en Google Earth, elaboración propia.

Figura 29

Simulaciones de dispersión de ceniza del 08 de mayo de 2013



Fuente: Modelos de dispersión de ceniza del volcán Popocatepetl del programa ASH3D y los escenarios contenidos en el ANR traspuestos en Google Earth, elaboración propia.

Figura 30

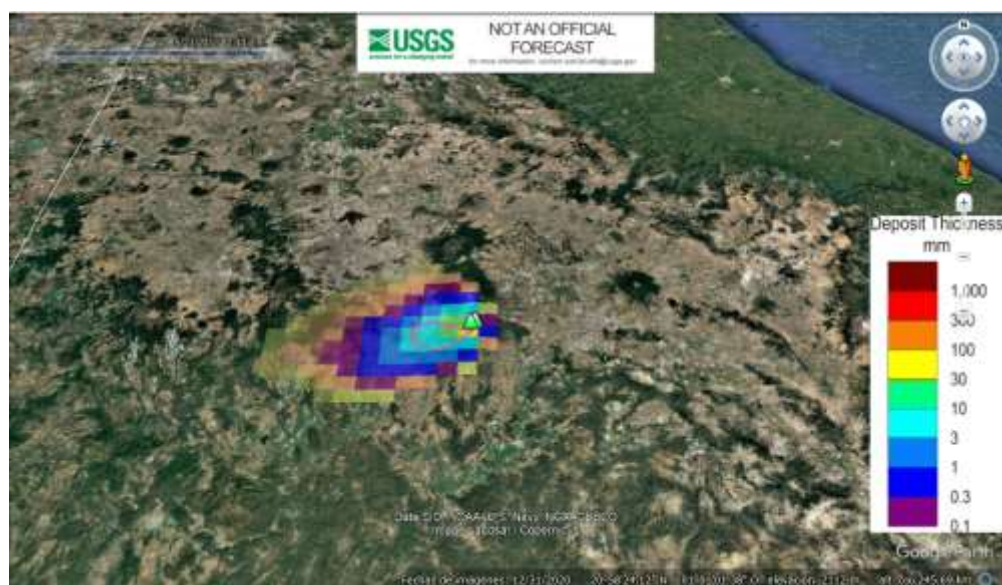
Simulaciones de dispersión de ceniza del 11 de mayo de 2013



Fuente: Modelos de dispersión de ceniza del volcán Popocatepetl del programa ASH3D y los escenarios contenidos en el ANR traspuestos en Google Earth, elaboración propia.

Figura 31

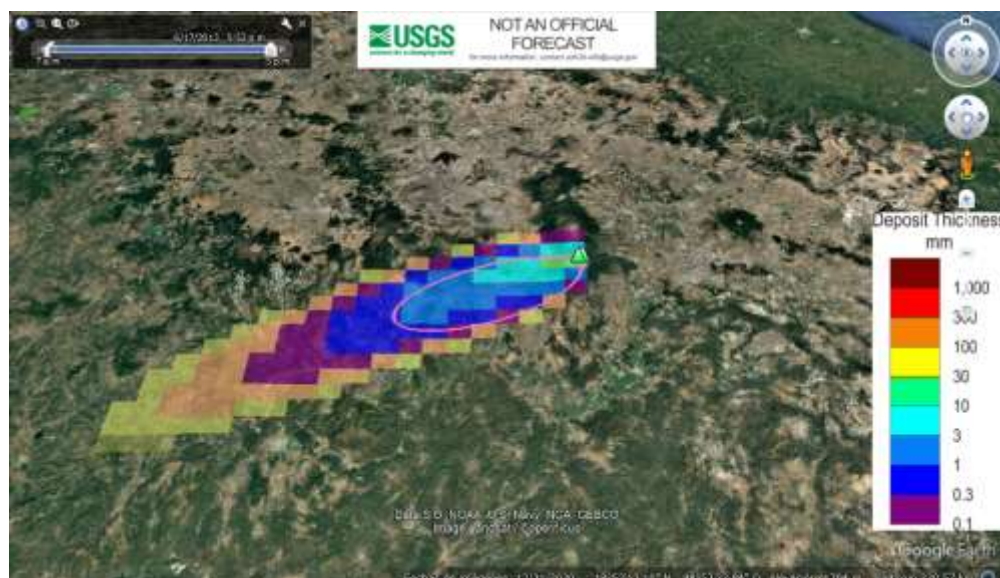
Simulaciones de dispersión de ceniza del 23 de mayo de 2013



Nota: Modelos de dispersión de ceniza del volcán Popocatépetl del programa ASH3D y los escenarios contenidos en el ANR traspuestos en Google Earth, elaboración propia.

Figura 32

Simulaciones de dispersión de ceniza del 17 de junio de 2013



Fuente: Modelos de dispersión de ceniza del volcán Popocatépetl del programa ASH3D y los escenarios contenidos en el ANR traspuestos en Google Earth, elaboración propia.