

Análisis de gestión de riesgo climático, meteorológico y geodinámico en el estado de Puebla, México.

Dr. Rogelio Ramos Aguilar

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México. Facultad de Ingeniería, Ciudad Universitaria S/N, Colonia San Manuel, Puebla, México.

Mtra. Patricia Máximo Romero

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México. Facultad de Ingeniería, Ciudad Universitaria S/N, Colonia San Manuel, Puebla, México.

Mtro. Máximo Ávila Cruz

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México. Facultad de Ingeniería, Ciudad Universitaria S/N, Colonia San Manuel, Puebla, México.

Mtro. Víctor Galindo López

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México. Facultad de Ingeniería, Ciudad Universitaria S/N, Colonia San Manuel, Puebla, México.

Pasante Perla Cano Maceda

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México. Facultad de Ingeniería, Ciudad Universitaria S/N, Colonia San Manuel, Puebla, México.

Pasante Perla Yoselyne Valencia Fuentes

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México. Facultad de Ingeniería, Ciudad Universitaria S/N, Colonia San Manuel, Puebla, México.

Pasante Jessica Azucena Mejía Hernández

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México. Facultad de Ingeniería, Ciudad Universitaria S/N, Colonia San Manuel, Puebla, México.

Estudiante Mayumi López López

Universidad Autónoma de Guerrero, Centro Regional de Educación Superior Zona Centro Campus Zumpango México

Estudiante Juan Pablo Velazquez Aparicio

Universidad Autónoma de Guerrero, Centro Regional de Educación Superior Zona Centro Campus Zumpango México

Summary

This study analyzes natural hazards in two key areas of the state of Puebla: the Puebla metropolitan area and the Popocatepetl volcano. In the first, the arrival time of a primary and secondary seismic wave from the states of Chiapas, Guerrero, Michoacán, Jalisco, Oaxaca, and Colima is analyzed, in addition to analyzing the velocity isolines (isokinetic), taking as a reference earthquakes of magnitude greater than or equal to 7 degrees according to the National Seismological Service, those that occurred west of Acatlán de Osorio with a magnitude of 7.1 on October 24, 1980, southeast of San Gabriel Chilac with a magnitude of 7.0 on June 15, 1999, and northwest of Chiautla de Tapia with a magnitude of 7.1 on September 19, 2017. For the Popocatepetl volcano area, atmospheric dynamics (wind direction) and types of eruptions that could indicate possible risks to the population are examined.

For both areas, freely available meteorological data was collected and processed using modeling and interpolation software, generating climate maps for different periods of years with Surfer software. The analysis is supported by tools such as Google Earth Pro, GPS Visualizer, and Erupt, to understand its evolution and mitigate risks in the event of a possible eruption. The results are intended to be integrated into risk maps that support disaster planning and prevention in the state of Puebla.

Index words: cartography, model, study, geostatistics, prevention, vulnerability.

Resumen

Este estudio analiza los riesgos naturales en dos zonas claves de estado de Puebla: la zona metropolitana de

Puebla y el volcán Popocatepetl; en la primera se analiza el tiempo de arribo de una onda sísmica primaria y secundaria desde los estados de Chiapas, Guerrero, Michoacán, Jalisco, Oaxaca y Colima, además de analizar las isolíneas de velocidades (isocinéticas), tomando como referencia los sismos de magnitud mayor o igual a 7 grados de acuerdo al Servicio Sismológico Nacional, los ocurridos al Oeste de Acatlán de Osorio con magnitud 7.1 el 24 de Octubre de 1980, al Sureste de San Gabriel Chilac con magnitud 7.0 el 15 de Junio de 1999 y al Noroeste de Chiautla de Tapia de magnitud 7.1 el 19 de Septiembre del año 2017. Para la zona del volcán Popocatepetl, se examina su dinámica atmosférica (dirección del viento) y tipos de erupciones que pudieran indicar posibles riesgos a la población.

Para ambas zonas se recopilaron datos meteorológicos de libre acceso que se procesaron mediante software de modelado e interpolación, generando mapas climáticos en distintos periodos de años con el software Surfer, El análisis se apoya en herramientas como Google Earth Pro, GPS Visualizer y Erupt, a fin de comprender su evolución y mitigar riesgos ante una posible erupción.

Los resultados pretenden integrarse a mapas de riesgo que apoyan la planificación y la prevención de desastres en el estado de Puebla.

Palabras clave: cartografía, modelo, estudio, geoestadística, prevención, vulnerabilidad.

Introducción

El estado de Puebla, identificado como la entidad número 021 por el INEGI (Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática),

es una región de México, que a pesar de no experimentar desastres naturales con la misma frecuencia o gravedad que las zonas costeras, muestra una notable variabilidad en sus patrones meteorológicos y climáticos. Con una temperatura media anual de 17.5 °C y una temperatura máxima promedio de 28.5 °C durante los meses de abril y mayo, el monitoreo de las condiciones atmosféricas y del cambio climático reciente en Puebla resulta fundamental debido a la importancia social, económica y ambiental de sus diversas zonas. Este monitoreo es respaldado por estaciones meteorológicas del SMN (Servicio Meteorológico Nacional, no. 21.249 Africam Safari, no. 21.242 Capulac y no. 21.136 Acajete,) y de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, lo que permite un análisis constante y detallado del clima, especialmente para comprender las alteraciones recientes en el periodo 2000-2024 y proyectar su comportamiento futuro.

Las estaciones utilizadas son las más representativas de la zona de estudio y son la base de datos para el análisis, utilizando las variables de precipitación y temperatura para este caso.

Este trabajo representa un desarrollo novedoso, ya que la poca información existente ha sido generada por los estudios y análisis del Cuerpo Académico de Investigación: Ciencias de la Tierra Aplicada a la Gestión de Desastres Naturales, es casi nula la existencia de información o trabajos académicos y de investigación en estas áreas y zonas de estudio. (Ramos *et al.*, 2024).

Por otro lado, el volcán Popocatepetl es uno de los volcanes más activos de México, representa un riesgo

significativo en el estado. La clasificación y el análisis estadístico de sus sismos volcánicos son esenciales para entender su dinámica y predecir posibles erupciones. Así mismo los modelos eruptivos resultantes nos permiten tomar medidas preventivas, protegiendo así a la población y sus alrededores.

La zona metropolitana y el volcán Popocatepetl de Puebla son regiones cuyas características geomorfológicas describen valles y montañas que se caracterizan por ser escarpadas y contar con valles profundos que la vuelven propensa a deslizamientos y colapsos de sus laderas. Esta inestabilidad se intensifica tanto por factores naturales como por actividades humanas, elevando el riesgo de desastres naturales. Para abordar este riesgo, se realizó un análisis que incluye variables como las distancias y pendientes. Los modelos matemáticos y las herramientas de representación del terreno nos permiten identificar zonas de alto riesgo y generar cartografía de riesgo.

Este trabajo busca proporcionar un análisis de los riesgos climáticos, meteorológicos y geodinámicas en áreas estratégicas del estado de Puebla, ofreciendo una base para la toma de decisiones informadas en la gestión de riesgos y la protección de comunidades vulnerables frente a diversos fenómenos naturales, no solo para la comunidad científica sino principalmente para el Gobierno en las áreas de Protección Civil y Gestión de Riesgo.

Materiales y métodos

Caso zona metropolitana de Puebla-Tlaxcala

La zona metropolitana de Puebla-Tlaxcala está conformada por un total de 38 municipios, siendo Puebla el

núcleo principal y en torno al cual las demás ciudades funcionan, además de que alberga aproximadamente el 50 % de la población del estado de Puebla. Sin embargo, también existen otras localidades de la metrópoli con gran acumulación de población. Gracias a esto, la zona antes mencionada es donde el presente estudio se centra para conocer a profundidad el cambio que se ha tenido a lo largo de los años.

A partir de los datos obtenidos y procesados, se procura ver si existe una frecuencia de fenómenos extremos, como las “islas de calor”, el “gradiente adiabático seco” y los eventos de “El Niño” y “La Niña”, que hayan influido en las temperaturas y patrones de precipitación; además de una deforestación en áreas circundantes relacionadas.

Análisis de datos

Las variables con que se realizó el estudio propuesto se obtuvieron de un total de 12 estaciones para la zona de Puebla, información que fue obtenida de los datos de uso libre a los que

da acceso el Servicio Meteorológico Nacional. Las principales variables rescatadas de dichas estaciones fueron de temperatura y precipitación para los años 2000 al 2024. Posteriormente se clasificaron los datos por décadas, siendo los 3 periodos 2000-2010, 2010-2020 y 2020-2024, respectivamente.

Los datos promediados extraídos del sistema meteorológico nacional y reflejados en las siguientes figuras corresponden a los meses representativos por cada estación del año, procesados en una hoja de cálculo, para la elaboración de tablas y promedios. A partir de la base de datos creada, se introdujeron las variables de las estaciones meteorológicas, en conjunto con sus coordenadas para crear la cartografía correspondiente a primavera, verano, otoño e invierno de los periodos elegidos con anterioridad. La figura 1, realizada con el software especializado en Ciencias de la Tierra Golden Surfer (versión 22.0), muestra la comparativa para las variables de temperatura y de precipitación.

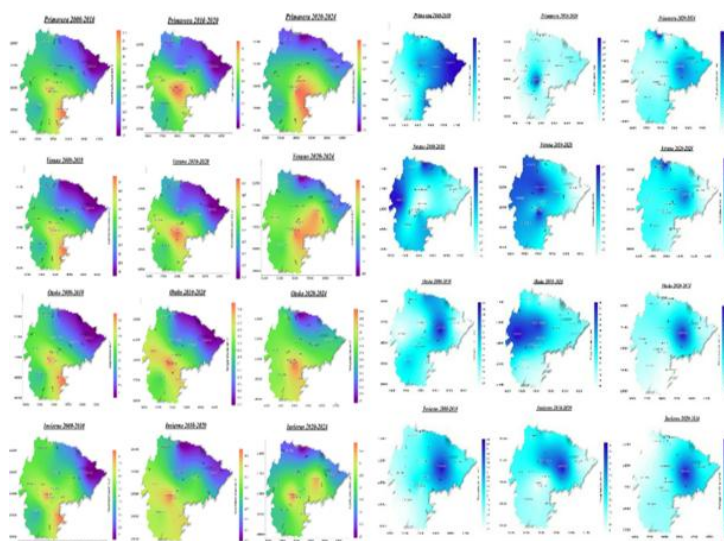


Figura 1: Modelos de temperaturas y precipitación promedio. 2000-2024. Zona metropolitana de Puebla. (a)Temperatura promedio; (b)Precipitación promedio.

En los modelos, las temperaturas más altas durante los periodos elegidos se dieron en la zona centro, con dirección a la ciudad de Puebla y a la zona en que se encuentra la estación no. 21.249 Africam Safari mientras que las más bajas se dan en dirección a las localidades cercanas a la Malinche, como lo es la zona de estación no. 21.136 Acajete. Esto puede deberse a que aquellas áreas cercanas a las cumbres de zonas montañosas, debido a la altura sobre el nivel del mar, sufren de un fenómeno denominado “gradiente adiabático seco”, que es descrito como el cambio de temperatura de una masa de aire mientras es elevado en la atmósfera. Por otra parte, las altas temperaturas en las zonas centrales de Puebla pueden ser ocasionadas por el fenómeno de “islas de calor”, donde las estructuras de zonas urbanizadas como es el caso ocasionan la absorción del calor y su lenta liberación posterior.

Otra observación obtenida de los modelos es que existe un aumento de aproximadamente el 1% en la temperatura promedio de la mayoría de las estaciones, siendo el caso de otoño el que más llama la atención por obtener un cambio de casi el 3% para el periodo de 2020-2024 respecto a 2000-2010. Por otro lado, los datos más altos obtenidos para otoño fueron de 18.91 °C en el sector centro, mientras que el más bajo fue de 15.01 °C, en la localidad de Acajete, respectivamente.

En los mapas de precipitación, el cambio es mucho más drástico respecto a cada estación, especialmente en la temporada de verano en la que la precipitación aumenta, pues se presentaron lluvias en promedio menores para verano del 2020-2024 con respecto al periodo de 2000-2010, siendo el caso contrario el de la temporada de invierno, donde no es común la presencia de lluvias

mayores a 20 mm, caso que sí se dio en el tercer periodo analizado. Esto puede ser a causa de los constantes cambios climáticos que han ocasionado la formación de ciclones y huracanes cuyas consecuencias, si bien se han dirigido a zonas costeras, han repercutido en los estados de la zona centro de México como lo es Puebla.

Se puede apreciar también que, en el caso de la variable de temperatura, un factor común es que la estación no. 21.249 Africam Safari es la que tiene los registros más altos y que como se mencionó brevemente antes, las estaciones centrales registraron siempre mayor actividad. Para el tercer periodo de estudio, un comportamiento anormal fue el registrado en la estación no. 21.242 Capulac y no. 21.136 Acajete, donde existió un aumento de más del 13% con temperaturas de hasta 2 °C mayores, lo que podría significar que además del aumento por el cambio climático, otro factor de variación se ha dado gracias a la deforestación masiva de árboles en consecuencia de la expansión poblacional poco regulada, dejando al suelo en esta zona desnudo y causando que no haya presencia adecuada de evapotranspiración. Cabe destacar que no fue la única época del año en que estas estaciones tuvieron registros más altos de lo normal, pues en verano del 2020-2024 también se presentó esta irregularidad. En general, para el periodo 2020-2024, sí existe un aumento en las temperaturas promedios para todas las estaciones del año respecto al primer y segundo periodo de estudio.

En el cuanto a la precipitación, vemos que en general, los periodos 2000-2010 y 2010-2020 se comportan de forma muy similar, dando concordancia en las lluvias que se presentaron en los meses del estudio. Sin embargo,

para el tercer periodo de estudio, los registros son más variables y existieron valores atípicos en todas las temporadas, especialmente para las estaciones de Capulac y Teolocholco donde la actividad fue mucho mayor de la regular en todas las temporadas, presentando valores de hasta más de 150 mm de lluvia en otoño y más de 20 mm en invierno, lo que significa presencia común de lluvias atípicas en temporadas ajenas a las esperadas. Otoño (noviembre) y verano (junio) fueron los periodos de mayor actividad, registrando valores que van de entre 150 mm a 315 mm en la época de 2020 a 2024.

Una vez obtenidos estos datos, también

se realizó el análisis de los registros históricos de las temperaturas y precipitaciones tanto máximas como mínimas extremas, donde se obtuvieron los datos de temperaturas y de precipitación máximas y mínimas extremas de los cuatro meses de estudio por estación del año, anotando en que meses ocurrieron estos eventos y los años de estos. Posteriormente fueron procesados con el software especializado en modelos ambientales GEOEAS (versión 3.0) para la obtención de sus gráficos de dispersión, analizando su comportamiento. El procedimiento en las figuras 2, 3 y 4, se realizó en primera instancia con los datos de temperaturas

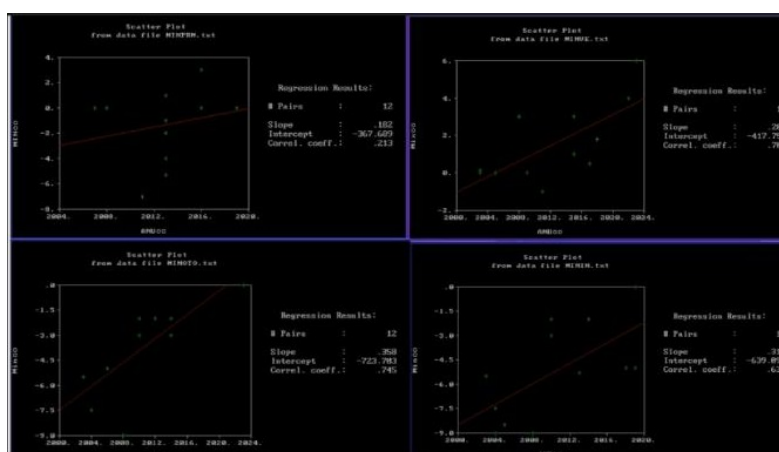


Figura 2: Gráfico de dispersión para temperaturas mínimas 2000-2024. (a) Primavera; (b) Verano; (c) Otoño; (d) Invierno.

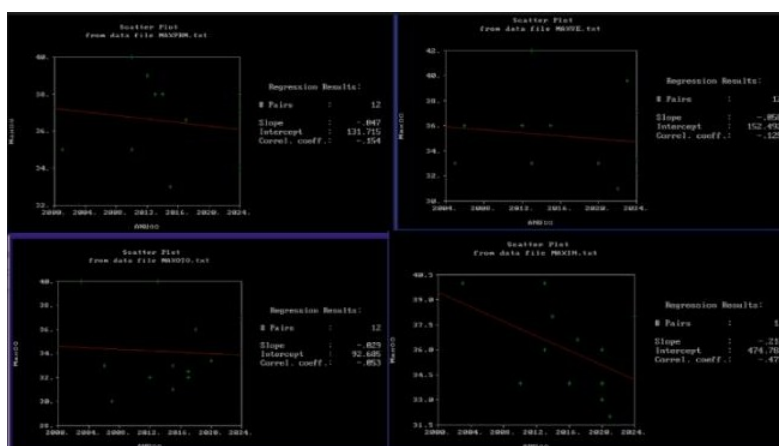


Figura 3: Gráfico de dispersión para temperaturas máximas 2000-2024 (a) Primavera; (b) Verano; (c) Otoño; (d) Invierno.

Para la variable independiente, se colocaron los años más recientes en que las máximas y mínimas extremas ocurrieron, mientras que la variable dependiente fueron las temperaturas registradas en el tiempo especificado.

En los gráficos de dispersión para la temperatura, en los valores mínimos extremos se puede ver que la mayor proximidad a la tendencia de nuestra línea se da en aquellos valores cercanos a 0 °C, para primavera y verano, mostrando valores atípicos en los años 2011, siendo más bajo de lo normal, mientras que, en otoño e invierno, la tendencia se acerca a valores entre 5 °C y 7 °C, mostrando valores atípicos para los

años 2016 al 2024 en que la temperatura fue mucho mayor a la normal registrada.

En el caso de la temperatura máxima extrema hay mayor variación con respecto a cada año, para primavera y verano la tendencia se da a valores de entre 30 °C y 36 °C, pero hay valores atípicos para los años que abarcan los periodos de 2020 a 2024, ya que el valor se dispara a más de 37 °C, llegando incluso a los 40 °C. En el caso de otoño e invierno, el valor regular se registra en tendencia de entre 32 °C a 36 °C, pero hay variaciones para el periodo que cubre los años 2018-2024, registrando temperaturas de hasta 37 °C y 40 °C.

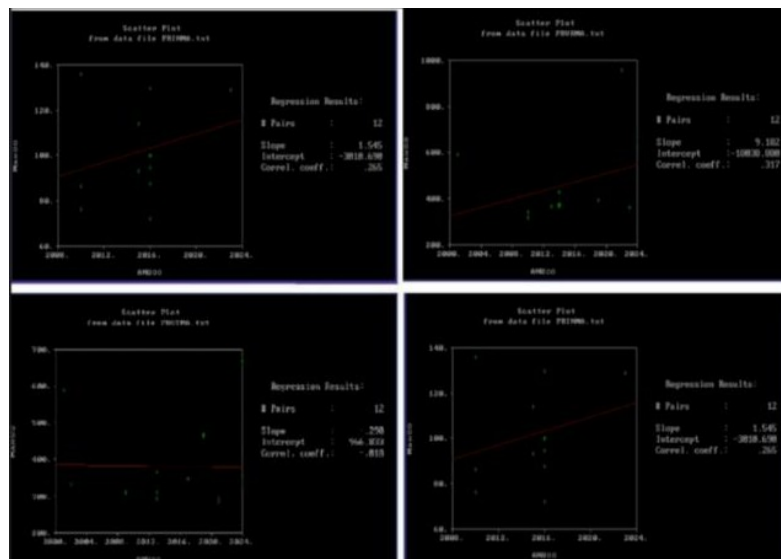


Figura 4: Gráfico de dispersión para precipitación máxima 2000-2024 (a) Primavera; (b) Verano; (c) Otoño; (d) Invierno

Para el caso de precipitación únicamente se generó el gráfico de dispersión para los registros máximos extremos. (Figura 4.)

En los cuatro periodos registrados, existe una tendencia común, siendo verano la temporada con mayor lluvia e invierno con menor. Sin embargo, algo a destacar es que en todas las temporadas existen valores atípicos de precipitación para los años 2022 y

2024, en los que hubo más lluvia de la comúnmente registrada fuera de los periodos generales, especialmente para la temporada de primavera en la que no se suelen presentar este fenómeno en valores mayores a 300 mm.

Análisis general del comportamiento de ondas sísmicas en la dinámica estructural del Estado de Puebla.

El desarrollo se realizó mediante un enfoque cuantitativo-geoespacial que integró el procesamiento de datos sísmicos con su modelización a través de Sistemas de Información Geográfica (SIG). La metodología implementada permitió analizar los efectos potenciales de la actividad sísmica registrada en los Estados de Chiapas, Guerrero, Michoacán, Jalisco, Oaxaca y Colima sobre el territorio de Puebla, con especial énfasis en la región de la Ciudad de Puebla y la Mixteca.

Para el desarrollo de la investigación, se procesaron datos sísmicos mediante herramientas especializadas como Google Earth Pro y Surfer, complementadas con una base de datos estructurada en hojas de cálculo. El análisis incluyó el estudio de las características de propagación de las ondas primarias (P) y secundarias (S) en diferentes medios geológicos (basalto, granito, areniscas y calizas), considerando parámetros fundamentales como el tiempo de arribo y la distancia epicentral.

La generación de mapas de isolíneas se realizó aplicando el algoritmo de interpolación espacial (Kriging), que permitió estimar valores en zonas no

muestreadas a partir de los datos disponibles. Este proceso dio lugar a dos tipos de representaciones cartográficas: mapas isocinéticos (que muestran la velocidad de propagación sísmica) y mapas isócronos (que representan los tiempos de arribo de las ondas).

Los resultados obtenidos se integraron en plataformas SIG para producir material cartográfico detallado, cuyo objetivo principal fue identificar franjas de ruptura sísmica y evaluar su posible influencia en el territorio poblano. La metodología empleada combinó de manera efectiva técnicas geoespaciales avanzadas con modelos físicos de propagación de ondas, proporcionando así herramientas valiosas para la gestión y prevención de riesgos sísmicos en la región.

Para el desarrollo de esta investigación se emplearon diversos equipos tecnológicos y herramientas digitales que permitieron el procesamiento, análisis y visualización de los datos geoespaciales y sísmicos

Para determinar vibraciones sísmicas en el volcán Popocatepetl, comprender y entender mejor la dinámica terrestre, se utilizó un Dron (Figura 5) y sensores de prueba climáticas y detector de movimientos (Figura 6).



Figura 5: Dron DJI Phantom 3 utilizado durante las visitas a campo.



Figura 6: Uso de sensores ambientales y de movimiento en la visita a campo.

Geográficamente el Estado de Puebla colinda con los Estados de Veracruz, Hidalgo, Tlaxcala, Morelos, Guerrero, México y Oaxaca. Dentro de este contexto estatal, se realizó un enfoque técnico que prioriza a la Capital de Puebla y la Mixteca como área de estudio para determinar la distancia y tiempo de arribo de las ondas sísmicas primarias y secundarias. Caracterizado por su geomorfología de riesgo y los procesos sísmicos y tectónicos que presenta.

Identificación de los Estados con mayor actividad sísmica y su importancia para el Estado de Puebla

Se identificó los puntos de rompimiento sísmico que se dan con mayor actividad sísmica y que pudieran afectar a Puebla, principalmente a la Capital Mixteca. Esta selección se fundamentó en los catálogos del Servicio Sismológico

Nacional (SSN), con registros históricos de sismos de magnitud mayor a 7 grados, del periodo de 1900 a la fecha (2025), debido a su alta vulnerabilidad ante eventos sísmicos generados en estas regiones, lo que se traduce en riesgos potenciales para su población, infraestructura y desarrollo económico.

Cálculo de distancias de los principales puntos de rompimiento (Ciudad de Puebla y Mixteca)

El cálculo se implementó con la herramienta Google Earth Pro, para determinar las distancias de puntos de rompimiento sísmico que pudieran afectar a la zona de estudio, de los Estados con mayor actividad sísmica, Chiapas, Guerrero, Michoacán, Jalisco, Oaxaca y Colima, como se observa en la figura 7.



Figura 7: Se realizó el procedimiento para determinar las distancias de los diferentes estados seleccionados, a Puebla (Capital y Mixteca).

Una vez se obtuvieron las distancias lineales (en metros) desde los principales puntos de rompimiento sísmico hacia las áreas de estudio, Puebla y la Mixteca, se

hizo una hoja de cálculo, para procesar la información obtenida aplicando modelos matemáticos.

Tabla 1: Distancias de rompimiento a la zona de estudio.

Lugar de rompimiento	Zona de afectación	Distancia
Chiapas, Cd. Hidalgo	Puebla-Mixteca	740,406 metros
Guerrero, Benito Juárez	Puebla-Mixteca	208,006 metros
Oaxaca, Pinotepa Nacional	Puebla-Mixteca	206,089 metros
Michoacán, Coalcomán	Puebla-Mixteca	543,721 metros
Jalisco, Cihuatlán	Puebla-Mixteca	697,095 metros
Colima, Tecomán	Puebla-Mixteca	628,699 metros

Para el análisis y comprensión del comportamiento de las ondas sísmicas en relación con el riesgo geomorfológico, resulto esencial estimar el tiempo de llegada de las ondas sísmicas desde el punto de origen (rompimiento) hasta las zonas de estudio. En particular, se consideraron tanto las ondas primarias (P) como las ondas secundarias (S). Dado que dicha información no se encontraba disponible en bases de datos consultadas, se procedió a su cálculo mediante la fórmula de la cinemática: $t = \frac{d}{v}$ (1) donde:

- t = tiempo de arribo (segundos),

- d = distancia entre el epicentro y el punto de estudio (metros),

- v = velocidad promedio de propagación de la onda (m/s).

Las velocidades asignadas a los cálculos matemáticos se obtuvieron de datos existentes, estas velocidades están determinadas a los distintos tipos de materiales de propagación sísmica (Basalto, Granito, Areniscas y Calizas), separadas por ondas primarias (P) y secundarias (S), como se muestra en la tabla 2.

Tabla 2: Se muestran las velocidades de las ondas sísmicas primarias (P) y secundarias (S) y sus distintas disposiciones según el medio en el que se mueve.

Medio	Velocidad de la onda primaria en m/s	Velocidad de la onda secundaria en m/s
Basalto	6400	2150
Granito	5200	3000
Arenisca	3500	2150
Calizas	2400	1350

Una vez se dispusieron los datos para el cálculo matemático, se inició con la obtención del tiempo de arribo de las ondas sísmicas desde el punto de origen (rompimiento) hasta las zonas de estudio.

Se inicio con el cálculo de los tiempos de arribo del Estado de Guerrero, en el cual se tomó como punto de mayor actividad sísmica el municipio de Benito Juárez, localizado en la región Costa Grande. Tomando en cuenta que la distancia del punto de mayor actividad sísmica a la primera área de estudio (Ciudad de Puebla) específicamente la Catedral es de 319,702 metros, el modelo para calcular el tiempo en segundos de arribo se desarrolló con todas las velocidades de la onda primaria de los distintos medios geológicos.

Para el medio de Basalto:

$$t = \frac{319,702}{6400} = 49,953$$

Para el medio de Granito:

$$t = \frac{319,702}{5200} = 61,481$$

Para el medio de Arenisca:

$$t = \frac{319,702}{3500} = 91,343$$

Para el medio de Calizas:

$$t = \frac{319,702}{2400} = 133,209$$

Obtenidos los tiempos de llegada para las ondas sísmicas primarias (P), se calcularon los tiempos de arribo de las secundarias (S) usando el mismo procedimiento, sustituyendo las velocidades correspondientes de la tabla 2.

Para el medio de Basalto:

$$t = \frac{319,702}{2150} = 148,698$$

Para el medio de Granito:

$$t = \frac{319,702}{3000} = 106,657$$

Para el medio de Arenisca:

$$t = \frac{319,702}{2150} = 148,698$$

Para el medio de Calizas:

$$t = \frac{319,702}{1350} = 236,816$$

Obtenidos los tiempos de arribo para las ondas sísmicas primarias (P) y secundarias (S), se organizaron los resultados en dos tablas independientes. Cada tabla representa los valores

calculados de tiempo de llegada, asociados a los distintos medios geológicos de propagación considerados. Estas tablas permitieron visualizar de manera clara las variaciones en los tiempos de arribo según el tipo de material, lo que constituye un insumo clave para el modelado cartográfico posterior. Además, esta representación tabular facilitó la comparación directa entre ambos tipos de ondas y su comportamiento en distintos escenarios geológicos, fortaleciendo el análisis geomorfológico del riesgo sísmico en las zonas de estudio. Esto se muestra en la tabla 3 y 4.

Tabla 3: Tiempos de arribo de ondas sísmicas primarias (P) según medio geológico.

Distancia	Medio	Velocidad (m/s)	Tiempo de llegada (s)
319,702	Basalto	6400	49.953
319,702	Granito	5200	61.481
319,702	Arenisca	3500	91.343
319,702	Calizas	2400	133.209

Tabla 4: Tiempos de arribo de ondas sísmicas secundarias (S) según medio geológico.

Distancia	Medio	Velocidad (m/s)	Tiempo de llegada (s)
319,702	Basalto	2150	148.699
319,702	Granito	3000	106.567
319,702	Arenisca	2150	148.699
319,702	Calizas	1350	236.816

El mismo procedimiento de cálculo fue aplicado para los demás puntos seleccionados tales como Oaxaca, Michoacán, Chiapas, Colima y Jalisco. En cada caso, se identificó un punto de rompimiento sísmico característico dentro del Estado correspondiente, y se determinó la distancia hasta las áreas de estudio de la ciudad de Puebla y la Mixteca, utilizando Google Earth Pro. Posteriormente, se calcularon los tiempos de arribo de las ondas sísmicas primarias (P) y secundarias (S) mediante el modelo matemático, considerando las velocidades de propagación asociadas a los diferentes tipos de medio geológico. Los resultados fueron sistematizados en tablas comparativas para su análisis y uso en los procesos de modelado cartográfico.

Modelación cartográfica

La cartografía obtenida de ondas Primarias referente al Estado de Guerrero, arribando al área de estudio en los diferentes medios geológicos en escala de grises; del análisis de comportamiento de ondas sísmicas primarias de velocidades (isocinéticas) y arribo (isócronas), en escala de grises que afectarán la zona de referencia de estudio (Puebla, Capital y Mixteca). Imagen procesada de la herramienta (Surfer) (Figura 8).

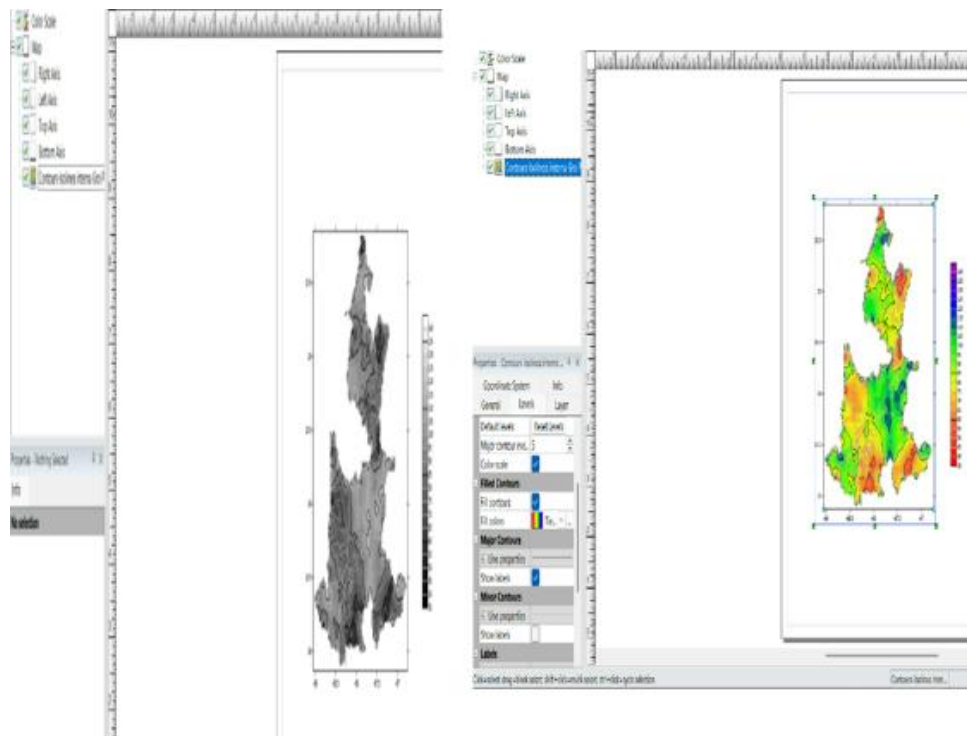


Figura 8: Ejemplo de mapa cartográfico de isolíneas del análisis de comportamiento de ondas sísmicas primarias de velocidades.

Modelación en 2D y 3D de la zona de estudio para representación del terreno (Figura 9).

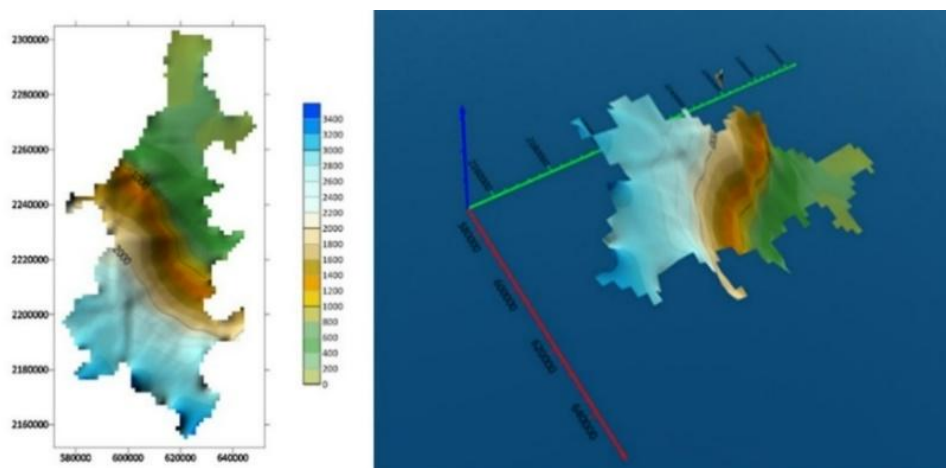


Figura 9: Modelo de la zona metropolitana del estado de Puebla en 2D y 3D.

En los modelos de cálculo de distancias de los valores se encuentran entre punto a punto, se observa que las zonas -5 y 5; una pendiente positiva indica con distancias más cortas corresponden una elevación que sube de izquierda a puntos más próximos entre sí. En una elevación que sube de izquierda el modelo de pendiente, la mayoría negativa refleja un descenso de izquierda

a derecha.

Al analizar todos los modelos, se interpreta que la mayoría del área presenta pendientes entre -5% y 5%. Esto indica que las zonas de mayor elevación, especialmente en el sur de la zona metropolitana, correspondientes a los puntos del 320 a 500 en la

base de datos, presentan un mayor riesgo de colapso estructural. Esta vulnerabilidad se debe a que, en dichas áreas, la gravedad es más intensa, lo que incrementa la probabilidad de deslizamientos y colapsos en terrenos inclinados.

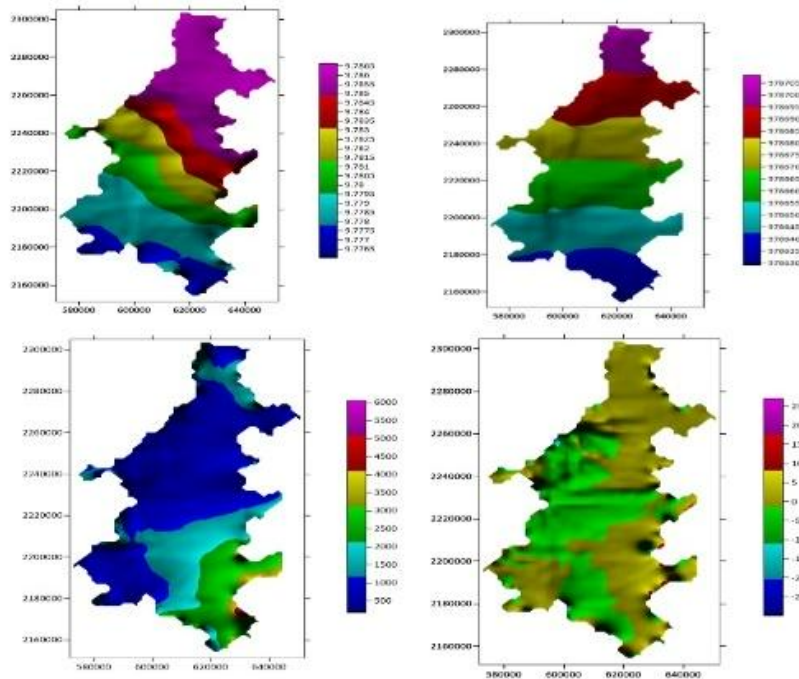


Figura 10: Modelo de la gravedad local, teórica y modelos de distancias y pendientes.

Caso Volcán Popocatepetl

El volcán Popocatepetl está ubicado en el estado de Puebla (19.02° N, 98.62° W) a una distancia de 44,67 km. Para determinar la distancia que existe entre nuestro volcán, específicamente hablando del cráter y Ciudad Universitaria ubicada en Puebla, Puebla. Se utilizó el software de acceso libre Google Earth, que nos ayudara a determinar la distancia de manera más específica con imágenes satelitales.

Aplicando el modelo matemático ideal siguiente:

$$t = \frac{d}{v} = 44667,35 \text{ m}$$

Con ayuda de este mismo software se realizó el cálculo del diámetro del cráter, como apoyo para corroborar si existe una modificación se contó con información de CENAPRED y su Antena de monitoreo sísmico. La observación y análisis del movimiento constante del volcán Popocatepetl proporciona una oportunidad única para mejorar la comprensión dinámica interna.

Se realizaron polígonos en el software de acceso libre Google Earth Pro, con la finalidad de obtener cuatro tipos de polígonos de diferentes zonas del volcán para obtener un estudio e información más específica (Figuras 11, 12 y 13).



Figura 11: Área total de la base del volcán.

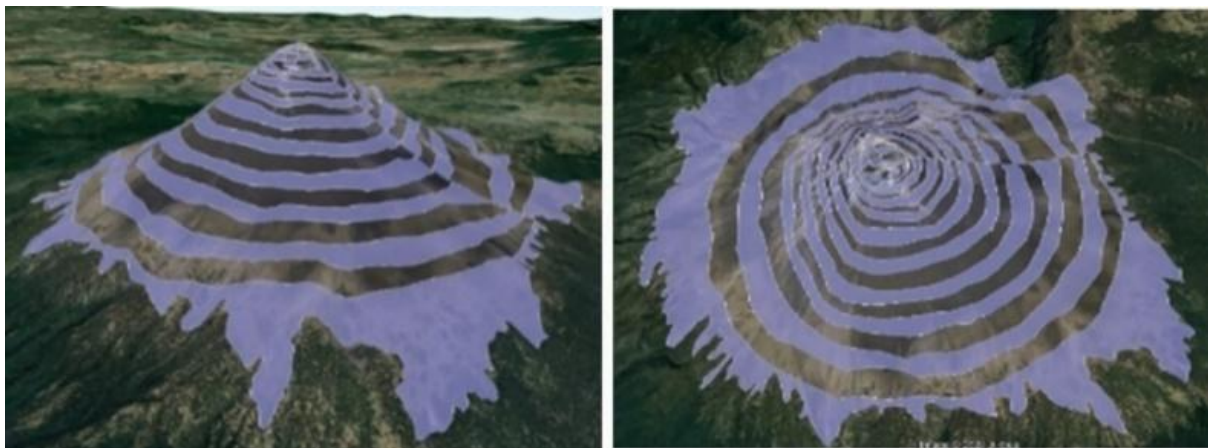


Figura 12: Área total de la base del volcán

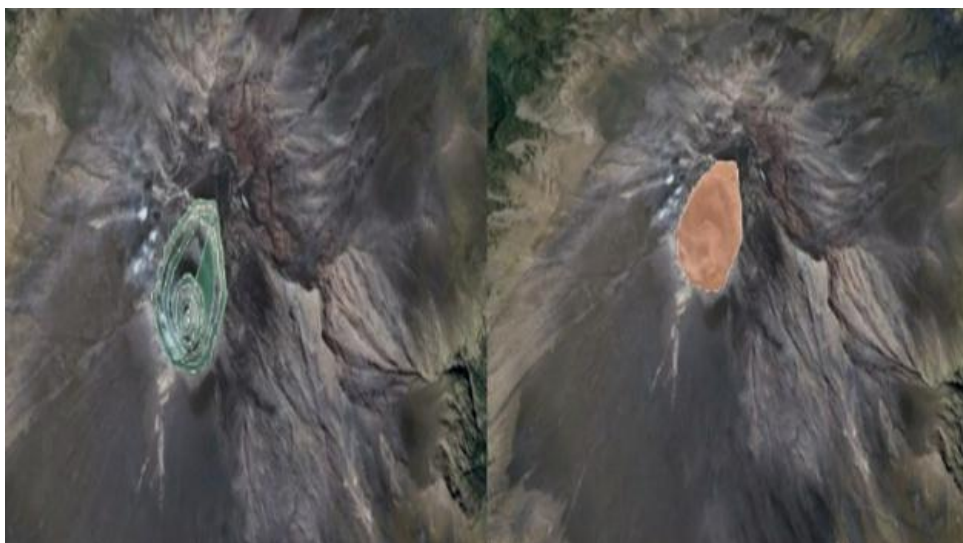


Figura 13: Estructura total del cráter y profundidad.

De la misma manera se realizó en este software el cálculo del área, perímetro y longitud del contorno del cráter. Al realizar los polígonos se hizo la conversión de datos obtenidos de cada uno en una plataforma digital de uso libre llamada GPS VISUALIZER, en donde al descargar e ingresar los archivos los transforma en formato KML, estos archivos aportan la información precisa y necesaria para proceder a crear archivos en el software SURFER, en

donde se realizará la modelación y el análisis de las superficies 3D.

Modelados 3D de la estructura del Volcán.

Representación tridimensional detallada de la forma y estructura del volcán, incluyendo su relieve, pendientes, curvas de nivel, cráteres y otras características geológicas (Figura 14).

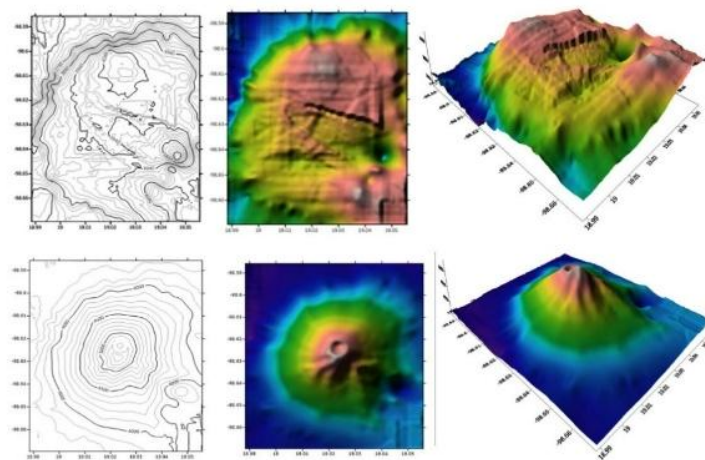


Figura 14: Representación tridimensional de la estructura del volcán.

Modelados 3D de la estructura del cráter

Es una representación tridimensional detallada de la forma y estructura

del cráter, incluyendo características geométricas, como lo es su profundidad, diámetro, forma y las pendientes (Figura 15).

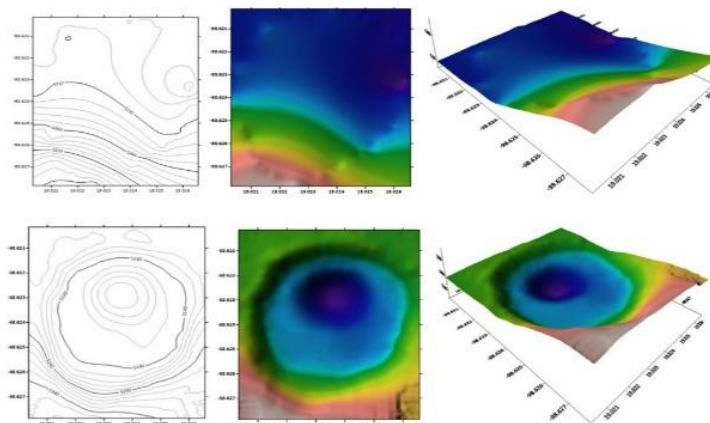


Figura 15: Representación tridimensional detallada de estructura del cráter.

Perfiles de la estructura del volcán.

Se realizó la obtención de perfiles en 2 distintos softwares (Figura 16 y 17), con la finalidad de hacer su análisis comparativo, poder identificar diferencias en su representación topográfica y evaluar la influencia

de la resolución y el método de obtención de datos, así mismo la mejora de la precisión combinando datos de diferentes fuentes para obtener un modelo más preciso e identificar patrones y tendencias en diferentes escalas.

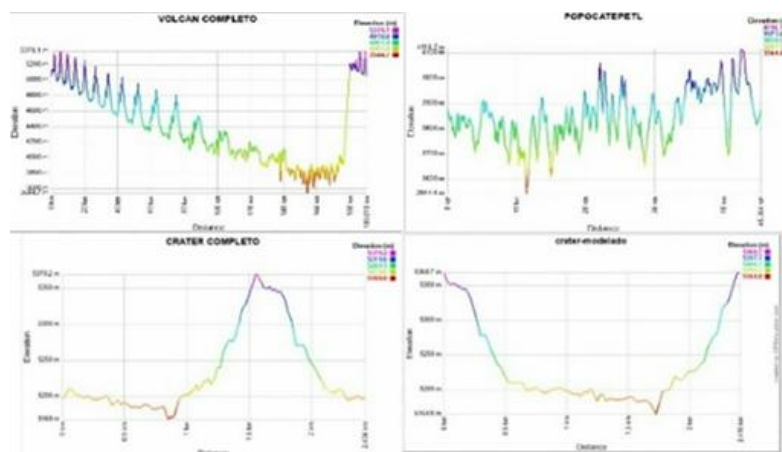


Figura 16: Análisis comparativo de perfiles con GPS Visualizer.

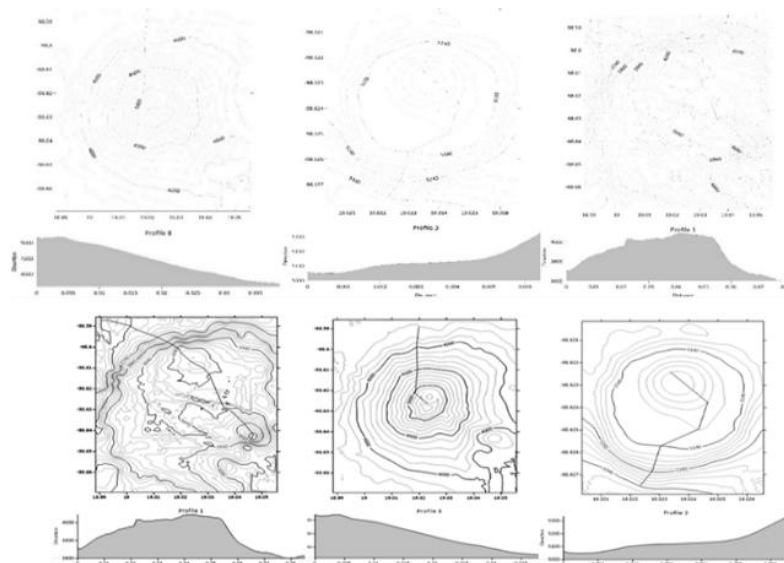


Figura 17: Análisis comparativo de perfiles con Surfer.

Modelos eruptivos en el software Erupt.

El volcán inició un episodio de actividad con nuevas emisiones de ceniza, un tremor indicó el inicio de la erupción del Popocatepetl el 11 de diciembre de 1994, una primera parte duro 135 minutos,

pocas horas después, sería de 90 minutos (Figura 18).

La erupción generó una columna de humo de 8 km por encima del volcán, se registró caída de ceniza volcánica que incluso llegó hasta la Ciudad de México. (CENAPRED, 2024).

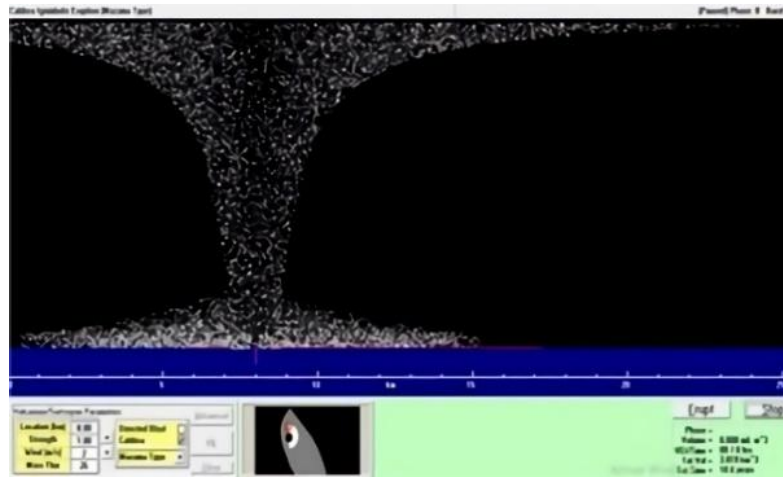


Figura 18: 11 de diciembre del 1994, El despertar del volcán Popocatépetl.

El día 19 de marzo del 2019 el volcán Popocatépetl hizo una erupción violenta y arrojó material incandescente como expulsión de cenizas, la caída de proyectiles balísticos que alcanzaron

un metro de diámetro. La fuerza del gas rompió el domo de lava del cráter, que había alcanzado los 16 millones de metros cúbicos en sólo 19 horas (Figura 19).

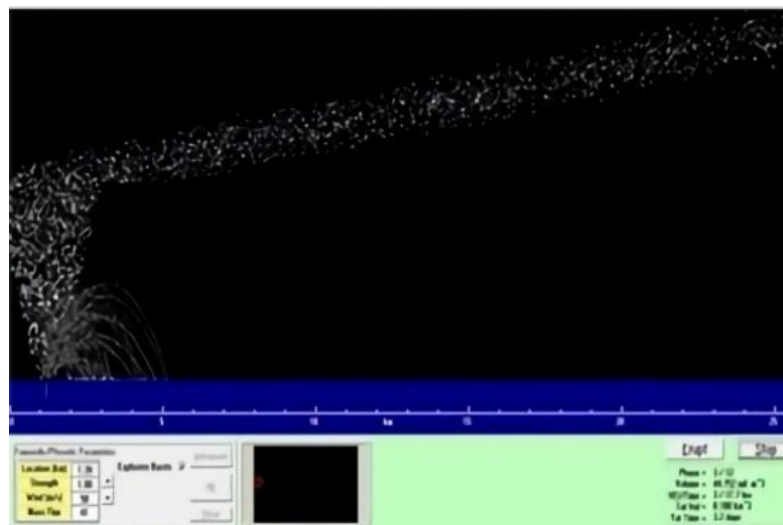


Figura 19: 19 de marzo de 2019, la erupción más violenta.

Una de las últimas actividades registradas fue el día 7 de noviembre del año 2024, en que los escenarios previstos para esta fase y como se muestra en la figura 20 fueron:

- Lluvias de ceniza leves a

moderadas en poblaciones circundantes y en algunas ciudades más lejanas.

- Expulsión de fragmentos incandescentes dentro del radio de exclusión de 12 km.

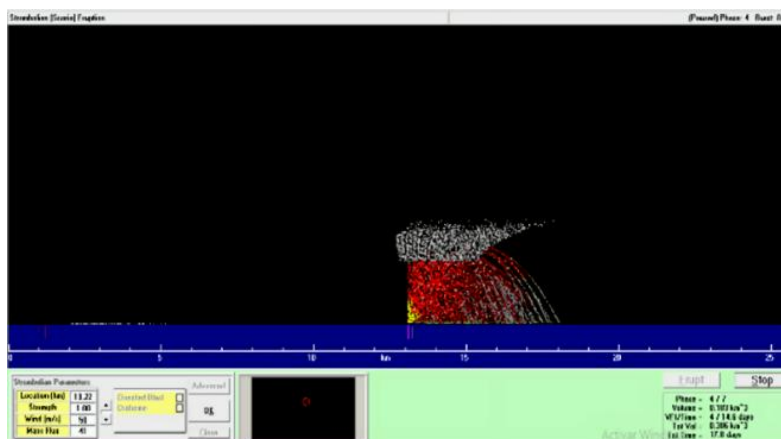


Figura 20: 7 de noviembre del 2024, última actividad.

Análisis general de las zonas de estudio Análisis de pendientes y variables meteorológicas.

Se identificó y delimitó la zona de estudio; para llevar a cabo esta delimitación, se comenzó con la identificación de los 35 municipios que integran la zona. El perímetro de esta área se trazó utilizando el mapa digital del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI,2022), una herramienta confiable para obtener datos geospaciales detallados en México. El perímetro trazado fue transferido al software libre Google Earth, lo cual permitió una visualización de la zona. En esta plataforma de uso libre, se generó una nube de 770 puntos que delimita el área de estudio. Estos puntos se distribuyeron estratégicamente para obtener toda la cobertura de las zonas. Los archivos generados en Google Earth se exportaron en formatos KML y KMZ, los cuales fueron procesados con el software de uso libre Global Mapper. Esta herramienta facilitó la obtención de los datos de las alturas de cada uno de los puntos en coordenadas geográficas y UTM. A través de este proceso de conversión, se lograron obtener las coordenadas XYZ de cada punto en la nube generada, datos esenciales para poder realizar los modelos matemáticos siguientes.

Se analizaron diversos datos correlacionados con las pendientes de la zona de estudio, usando coordenadas UTM, la pendiente, que mide la inclinación en metros de una superficie, se define como la relación entre la diferencia de altura (o desnivel) entre dos puntos y la distancia horizontal entre ellos. Esta relación es equivalente a la tangente del ángulo que forma la línea de medición respecto al eje X, indicando la inclinación de la superficie. La pendiente se expresa como el cambio de altura dividido por la distancia horizontal, representado en la siguiente formula:

$$\text{Pendiente} = \frac{\text{Diferencia de alturas}}{\text{Distancia horizontal}} \times 100 \quad (2)$$

y es fundamental para evaluar el riesgo de colapso en estructuras.

Utilizando las coordenadas UTM (XYZ), se aplicó la fórmula de distancia para cada uno de los 770 puntos.

Una vez calculadas las distancias entre cada punto, se procedió a aplicar la fórmula de la pendiente, utilizando los valores de la coordenada Z y la distancia

correspondiente entre cada uno de los puntos.

Al analizar los resultados de las pendientes, identificamos los puntos con los valores más altos y bajos dentro de la zona de estudio, así como sus ubicaciones exactas. Además, el signo de los valores obtenidos indica la dirección de la inclinación, lo cual nos permite ubicar con precisión las áreas con mayor probabilidad de colapso estructural. Esta información facilita una evaluación de riesgo más detallada, destacando que los puntos de mayor pendiente se encuentran principalmente en la zona sur de la región estudiada, donde se concentra la mayor probabilidad de colapso estructural (tabla 5).

Tabla 5. Resultados del análisis de variables de temperatura y precipitación para primavera de los años 2000 al 2010.

Estación	XUTM	YUTM	Primavera 2000-2010		Primavera 2010-2020		Primavera 2020-2024	
			TEM PROM	PREP PROM	TEM PROM	PREP PROM	TEM PROM	PREP PROM
21248-PUEBLA (DGE)	582,552.81	2,103,685.66	21.05	30.35	20.36	162.18	20.36	25.62
21035-PUEBLA (DGE)	584,926.65	2,102,405.39	19.57	31.34	20.35	30.09	20.35	26.25
21065-PUEBLA (CES)	587,684.43	2,106,567.99	19.67	30.35	20.00	27.64	20.00	25.62
29170-SAN PABLO DEL MONT	586,744.49	2,113,756.48	17.56	38.08	17.19	49.37		
21247-CHOLULA	571,746.45	2,108,558.64	18.68	25.85	19.24	22.90	17.19	23.40
21034-ECHERRERÍA	576,298.78	2,096,066.54	17.38	22.40	17.83	30.10	19.24	36.81
21249-AFRICAM ZAFARI	591,077.09	2,094,288.81	21.73	38.23	19.37	39.79	17.83	38.94
29169-ZACATELCO	579,565.00	2,125,281.00	17.64	31.16	17.05	45.39	19.37	35.80
29030-TEOLOCHOLCO	585,042.00	2,127,950.00	18.25	34.99	18.21	33.36	17.05	95.64
29161-ACXOTLA DEL MONTE	588,373.00	2,127,351.00	16.38	28.81	16.99	30.33	18.21	14.78
21242-CAPULAC	598,941.00	2,111,389.00	17.90	38.42	18.26	36.84	16.99	78.03
21136-ACALETE	609,799.00	2,113,602.00	14.98	44.44	16.41	50.82	18.26	52.45

Fuente: elaboración propia sobre datos obtenidos de las alturas y cálculos de gravedad sobre cada punto.

Resultados y discusión

Los resultados obtenidos en la investigación destacan la interacción entre factores climáticos, geológicos y antrópicos, subrayando los riesgos ambientales (climáticos) que afectan a la zona metropolitana de Puebla. Los patrones identificados en los datos históricos del SMN y CONAGUA reflejan un aumento significativo en la frecuencia e intensidad de fenómenos extremos. Este incremento puede atribuirse a la sinergia entre el calentamiento global y las dinámicas locales que sistemáticamente provocan un aumento estadístico en los fenómenos, alterando incluso el ciclo hídrico.

En el análisis general, el uso de modelos matemáticos y herramientas como Surfer permitieron representar los resultados para así poder tener una visualización y análisis detallado de variables clave. La correlación inversa entre altura y gravedad, detectada en las zonas de mayor elevación, demuestra la vulnerabilidad de estas áreas a fenómenos como deslizamientos de tierra. Esta demostración confirma la importancia de incluir la topografía en la planificación de estrategias de gestión de riesgos, resaltando la necesidad de medidas preventivas específicas en regiones montañosas.

Adicionalmente, los estudios sobre el volcán Popocatepetl revelan avances de importancia en la comprensión de su dinámica eruptiva. El análisis estadístico y la clasificación de los sismos volcánicos ofrecen modelos predictivos valiosos. Estos modelos no solo proporcionan herramientas esenciales para prever erupciones, sino que también fortalecen la capacidad de respuesta ante eventos volcánicos, protegiendo a las comunidades vulnerables cercanas. El estudio

desarrollado dio como resultado la obtención de cartográfica del comportamiento de isolíneas de ondas sísmicas de velocidades (isocinéticas) y arribo (isócronas) de ondas sísmicas primarias (P) y secundarias (S), información analizada y procesada de las zonas de rompimiento técnico de los Estados con mayor actividad (Chiapas, Guerrero, Michoacán, Jalisco, Oaxaca y Colima), y que pudieran afectar principalmente a la Capital y Mixteca del estado de Puebla, es decir la distancia de los puntos de rompimiento y el tiempo de arribo de las ondas en forma general al estado de Puebla.

Los resultados procesados y obtenidos durante la investigación son los siguientes:

a.- Cálculo de tiempo de llegada de ondas sísmicas primarias y secundarias con datos de distancia y velocidad de onda, provenientes de las zonas de estudio (Guerrero, Chiapas, Michoacán, Jalisco, Oaxaca y Colima) arribando a la región de estudio, como se muestra en la tabla 6.

Tabla 6: Tiempo de llegada de ondas P y S generadas en hojas de cálculo, tomando en cuenta los lugares de origen, punto de llegada, los diferentes medios geológicos, distancias y velocidades de las ondas.

Guerrero			
Tiempo de llegada (seg.)			
Distancia	Medio	Onda primaria	Onda secundaria
319,702	Basalto	49.953438	148.698605
319,702	Granito	61.481154	106.567333
319,702	Arenisca	91.343429	148.698605
319,702	Calizas	133.209167	236.816296
Chiapas			
Tiempo de llegada (seg.)			
Distancia	Medio	Onda primaria	Onda secundaria
804,948	Basalto	125.773125	374.394419
804,948	Granito	154.797692	268.316000
804,948	Arenisca	229.985143	374.394419
804,948	Calizas	335.395000	596.257778
Oaxaca			
Tiempo de llegada (seg.)			
Distancia	Medio	Onda primaria	Onda secundaria
299,368	Basalto	46.776250	139.240930
299,368	Granito	57.570769	99.789333
299,368	Arenisca	85.533714	139.240930
299,368	Calizas	124.736667	221.754074
Michoacán			
Tiempo de llegada (seg.)			
Distancia (m)	Medio	Onda primaria	Onda secundaria
523,415	Basalto	81.783594	243.448837
523,415	Granito	100.656731	174.471667
523,415	Arenisca	149.547143	243.448837
523,415	Calizas	218.089583	387.714815
Jalisco			
Tiempo de llegada (seg.)			
Distancia	Medio	Onda primaria	Onda secundaria
670,452	Basalto	104.758125	311.838140
670,452	Granito	128.933077	223.484000
670,452	Arenisca	191.557714	311.838140
670,452	Calizas	279.355000	496.631111
Colima			
Tiempo de llegada (seg.)			
Distancia	Medio	Onda primaria	Onda secundaria
644,043	Basalto	100.631719	299.554884
644,043	Granito	123.854423	214.681000
644,043	Arenisca	184.012286	299.554884
644,043	Calizas	268.351250	477.068889

b.- Estados con mayor actividad sísmica con arribo de ondas sísmicas primarias y secundarias en segundos mínimos y máximos aproximadamente, que impactarían al área de estudio.

- Guerrero, tiempo de llegada de ondas Primarias es de 49,953 segundos mínimos y 133.209 máximos. Ondas secundarias 106,567 segundos mínimos y 236,816 máximos.

- Chiapas, tiempo de llegada de ondas Primarias es de 125,773 segundos mínimos y 335,395 máximos. Ondas secundarias 268,316 segundos mínimos y 596,257 máximos.

- Oaxaca, tiempo de llegada de ondas Primarias es de 46,776 segundos mínimos y 124,736 máximos. Ondas secundarias 99.789 segundos mínimos y 221,754 máximos.

- Michoacán, tiempo de llegada de ondas Primarias es de 81,783 segundos mínimos y 218,089 máximos. Ondas secundarias 174,471 segundos mínimos y 387,714 máximos.

- Jalisco, tiempo de llegada de ondas Primarias es de 104.758 segundos mínimos y 279.355 máximos. Ondas secundarias 223.484 segundos mínimos y 496,631 máximos.

- Colima, tiempo de llegada de ondas Primarias es de 100.6318 segundos mínimos y 268,351 máximos. Ondas secundarias 214.681 segundos mínimos y 477.069 máximos.

c.- Estados con mayor actividad sísmica con arribo de ondas sísmicas primarias y secundarias en segundos mínimos y máximos aproximadamente, que impactarían a la zona de estudio; específicamente a la Mixteca.

- Guerrero, tiempo de llegada de ondas Primarias es de 32.500 segundos mínimos y 86.669 máximos. Ondas secundarias 69.335 segundos mínimos y 154.078 máximos.

- Chiapas, tiempo de llegada de ondas Primarias es de 115.688 segundos mínimos y 308.502 máximos. Ondas secundarias 246.802 segundos mínimos y 548.443 máximos.

- Oaxaca, tiempo de llegada de ondas Primarias es de 32.201 segundos mínimos y 85.870 máximos. Ondas secundarias 68.696 segundos mínimos y 152.658 máximos.

- Michoacán, tiempo de llegada de ondas Primarias es de 84.956 segundos mínimos y 226.550 máximos. Ondas secundarias 181.240 segundos mínimos y 402.756 máximos.

- Jalisco, tiempo de llegada de ondas Primarias es de 108.921 segundos mínimos y 290.456 máximos. Ondas secundarias 232.365 segundos mínimos y 516.366 máximos.

- Colima, tiempo de llegada de ondas Primarias es de 104.365 segundos mínimos y 278.308 máximos. Ondas secundarias 222.646 segundos mínimos y 494.769 máximos.

Conclusiones

El trabajo integra principalmente el análisis geodinámico terrestre y atmosférico en el estado de Puebla, en México, analizando y correlacionando principalmente los efectos en la zona metropolitana, mostrando que es muy probable que los cambios meteorológicos sean producto de un calentamiento global y las variaciones geológicas en la región. A partir de los datos obtenidos, se

observa que el aumento en la frecuencia de fenómenos extremos, como las “islas de calor”, el “gradiente adiabático seco” los eventos de “El Niño” y “La Niña” pudieran estar correlacionados.

Por otra parte, la clasificación y análisis de los modelos volcánicos que se analizaron son fundamentales para entender la dinámica del volcán y predecir posibles comportamientos eruptivos, el volcán Popocatepetl es uno de los volcanes más activos de México y al realizar los modelos nos ayuda a comprender, entender y predecir si fuera el caso, la tendencia eruptiva del volcán en sus diferentes áreas de estudio. El desarrollo del análisis de la llegada de ondas sísmicas para el estado de Puebla de forma general en cuanto al tiempo de arribo propone una manera práctica y general de cálculos que puedan contribuir para tener una idea del tiempo en que se pudiera percibir un movimiento en la zona metropolitana del Estado, y por tanto que tiempo se tendría aproximado de poder ponerse a resguardo.

El análisis y los resultados del tiempo de llegada de las ondas sísmicas primarias y secundarias desde los diferentes Estados con mayor actividad sísmica que impactarían a Puebla Capital pretenden contribuir de alguna forma a los sistemas de Protección Civil con datos importantes en cuanto a poder poner a parte de la población a salvo. Así, este trabajo resulta crucial para la planificación y gestión del riesgo en la región, brindando una base sólida para decisiones enfocadas en mitigar desastres naturales, proteger a las comunidades vulnerables y proponer medidas de adaptación ante los efectos crecientes del cambio climático y dinámica terrestre en el estado de Puebla.

En conjunto, los resultados obtenidos no solo validan la metodología utilizada, sino que también ofrecen información crucial para la toma de decisiones en políticas de gestión meteorológica y mitigación de riesgos. Sin embargo, se deben considerar las limitaciones inherentes al alcance del estudio, como la dependencia de datos históricos y la posible variabilidad de las condiciones futuras. En conclusión, esta investigación refuerza la importancia de abordar los riesgos naturales meteorológicos y terrestres desde un enfoque multidisciplinario. Los resultados no solo contribuyen al entendimiento del posible cambio climático y sus implicaciones locales, sino que también sientan las bases para la implementación de estrategias efectivas de adaptación y mitigación en el estado de Puebla al contar con información relativa al tiempo de arribo de ondas sísmicas para el mismo Estado.

El conjunto de datos meteorológico, utilizados y analizados durante el estudio están disponibles en el SMN (Servicio Meteorológico Nacional), <https://smn.conagua.gob.mx/es/8-smn-general>

Agradecimientos

Expresamos nuestro más sincero agradecimiento a la Vicerrectoría de Investigación y Estudios de Posgrado de la BUAP, por el apoyo otorgado al proyecto 00560-PV/2025.

Literatura citada

- [1] CENAPRED (2020). Mapa Nacional de Susceptibilidad por inestabilidad de laderas. <http://www.atlasnacionalderiesgos.gob.mx/archivo/inestabilidad-laderas.html>

- [2] CONAPO (2010). Mapa zona metropolitana no. 34. http://conapo.gob.mx/work/models/CONAPO/zonas_metropolitanas_2010/mapas/ZM34.pdf
- [3] GEOEAS (Geographic and Environmental Analysis System). (1992). Versión 3.0 [Software]. Departamento de Geografía, Universidad de California
- [4] Golden Software. (2023). Surfer (Version 22.0) [Software]. <https://www.goldensoftware.com/products/surfer>
- [5] INEGI. (2022). Mapa Digital de México en línea. <https://gaia.inegi.org.mx/mdm6/>
- [6] Máximo Romero, P., Ramos Aguilar, R., Galindo López, V., Ávila Cruz, M., Yáñez Pérez, G., Márquez Máximo, R. & Covarrubias Salvatori, V. (2021). Análisis técnico geoestadístico de los ríos Atoyac y Alseseca que atraviesan la ciudad de Puebla, México. *Revista Contactos*. 119, 5-22. <https://contactos.izt.uam.mx/>
- [7] Ramos Aguilar, R., Máximo Romero, P., Narciso Hernández, J., Mirón Morales, M., & Beltrán Cruz, M. (2012). Geostatistical study for getting the local gravity, slope, and hydrologic calculations of the Xaltelulco, Tepeloncocone, Tenepanco, Colorada y Quimichule canyons from Popocatepetl volcano. *Atmospheric and Climate. Sciences*, 31, 65–84. <https://doi.org/10.4236/ijg.2016.75054>
- [8] Ramos Aguilar, R., Máximo Romero, P., Soto Cruz, B., Alcántara Iniesta, S., & Pérez Luna, J. (2013). Analysis of the meteorological variables for Puebla City 2011–2012 applying the modeling ion-wavelets in a hypothetical manner. *Atmospheric and Climate Sciences*, 3(4), 450–458. <https://doi.org/10.4236/acs.2013.34046>
- [9] Ramos Aguilar, R., Máximo Romero, P., Vázquez García, M. de la C., Martínez Ortiz, A. G., Hernández Andrade, D., & Benítez Ramírez, D. M. (2020). Estudio cartográfico del volcán Popocatepetl, Puebla, México: Volumen edificio volcánico, aceleración de la gravedad y zonas de riesgo para la población. *Contactos. Revista de Educación en Ciencias e Ingeniería*, 115, 37–52. <https://contactos.izt.uam.mx/index.php/contactos/article/view/5>
- [10] Ramos Aguilar, R., Máximo Romero, P., Ávila Cruz, M., Galindo López, V., Ramírez Álvarez, M. de los D., Cárdenas López, L., Morales González, A. E., Vázquez García, M. de la C., & Covarrubias Salvatori, V. (2024). Geoscientific analysis of structural collapses in the city of Juan C. Bonilla, Puebla, Mexico (2021). *Geographical Journal of Central America*. <https://doi.org/10.15359/rgac.72-1>