

# **Análisis general de un estudio de riesgo geodinámico (caso meteorológico, volcán Popocatepetl y Sierra Norte) en el estado de Puebla, México.**

**Dr. Rogelio Ramos Aguilar**

Facultad de Ingeniería de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Puebla, México

**Mtra. Patricia Máximo Romero**

Facultad de Ingeniería de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Puebla, México

**Mtro. Máximo Ávila Cruz**

Facultad de Ingeniería de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Puebla, México

**Mtro. Víctor Galindo López**

Facultad de Ingeniería de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Puebla, México

**Pasante Perla Cano Maceda**

Colegio de ingeniería Topográfica y Geodesia de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

**Pasante Perla Yoselyne Valencia Fuentes**

Colegio de ingeniería Topográfica y Geodesia de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

**Pasante Jessica Azucena Mejía Hernández**

Colegio de ingeniería Topográfica y Geodesia de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

**Estudiante Mayumi López López**

Universidad Autónoma de Guerrero

**Estudiante Juan Pablo Velazquez Aparicio**

Universidad Autónoma de Guerrero

## Abstract

This work addresses the analysis of natural hazards in the region of Puebla, Mexico, focusing on three key areas: The Puebla-Tlaxcala metropolitan area, the Popocatepetl volcano and the Sierra Norte de Puebla. For the metropolitan area, a collection and analysis of meteorological data from open access national information is carried out, using modeling and interpolation software to represent climatic variables in different periods by means of Surfer mapping. As for the volcano, its dynamics, geochemical composition and the types of earthquakes that indicate possible expulsions of material are studied, in order to understand its evolution and mitigate risks associated with an eruption using 4 types of software, the first one Google Earth Pro, GPS Visualizer, Erupt and Surfer. Finally, in the Sierra Norte, slope stability is evaluated through a geostatistical study that considers gravity acceleration, distances and slopes to identify geological structures with potential risk of collapse. The information obtained was processed to generate risk maps to facilitate disaster planning and prevention in this region.

**Keywords:** analysis, risk, mapping, geostatistics, prevention.

## Resumen

Este trabajo aborda el análisis de riesgos naturales en la región de Puebla, México, centrándose en tres áreas clave: la zona metropolitana Puebla-Tlaxcala, el volcán Popocatepetl y la Sierra Norte de Puebla. Para la zona metropolitana, se realiza una recopilación y análisis de datos meteorológicos a partir de información nacional de acceso libre, utilizando software de modelación e interpolación para representar las variables climáticas en diferentes

períodos mediante cartografía en Surfer. En cuanto al volcán, se estudia su dinámica, composición geoquímica y los tipos de sismos que indican posibles expulsiones de material, con el fin de comprender su evolución y mitigar riesgos asociados a una erupción utilizando 4 tipos de software, el primero Google Earth Pro, GPS Visualizer, Erupt y Surfer. Finalmente, en la Sierra Norte se evalúa la estabilidad de laderas mediante un estudio geoestadístico que considera la aceleración de la gravedad, distancias y pendientes para identificar estructuras geológicas con potencial riesgo de colapso. La información obtenida se procesó para generar mapas de riesgo que faciliten la planificación y prevención de desastres en esta región.

**Palabras clave:** análisis, riesgos, cartografía, geoestadística, prevención.

## 1. 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) 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.

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 Sierra Norte de Puebla, región montañosa que se caracteriza por su geología y geomorfológica, con montañas escarpadas y valles profundos que la vuelven propensa a deslizamientos y colapsos de 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 geoestadístico que incluye variables como la aceleración de la gravedad, 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.

## **2. Caso zona metropolitana de Puebla-Tlaxcala**

### **2.1 Zona de estudio**

La zona metropolitana de Puebla-Tlaxcala está conformada por un total de 38 municipios (figura 1), siendo Puebla el núcleo principal y en torno al cual las demás ciudades funcionan, además de que es donde aproximadamente el 50% de la población de esta metrópoli se agrupa. 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.



Datos promedio			Primavera 2000-2010		Primavera 2010-2020		Primavera 2020-2024	
Estación	XUTM	YUTM	TEM PROM	PREC PROM	TEM PROM	PREC PROM	TEM PROM	PREC 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(OBS)	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- ECHEVERRIA	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
29050 - 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 - ACAJETE	609,799.00	2,113,602.00	14.98	44.44	16.41	50.82	18.26	52.45

Tabla 1: Temperaturas y precipitación promedio en primavera. Datos: SMN (2024), CONAGUA (2024).

Datos promedio			Verano 2000-2010		Verano 2010-2020		Verano 2020-2024	
Estación	XUTM	YUTM	TEM PROM	PREC PROM	TEM PROM	PREC PROM	TEM PROM	PREC PROM
21248-PUEBLA (DGE)	582,552.81	2,103,685.66	19.85	124.16	19.36	162.18	19.08	159.58
21035-PUEBLA(DGE)	584,926.65	2,102,405.39	18.86	165.86	19.42	202.17	20.40	161.43
21065-PUEBLA(OBS)	587,684.43	2,106,567.99	18.37	124.16	18.59	162.18	19.56	159.58
29170- SAN PABLO DEL MONT	586,744.49	2,113,756.48	16.47	131.22	16.14	198.61		
21247- CHOLULA	571,746.45	2,108,558.64	18.08	190.85	18.43	184.82	19.14	157.10
21034- ECHEVERRIA	576,298.78	2,096,066.54	16.80	146.27	17.02	175.38	18.48	171.85
21249- AFRICAM ZAFARI	591,077.09	2,094,288.81	20.40	165.55	18.57	156.66	19.88	114.68
29169-ZACATELCO	579,565.00	2,125,281.00	16.64	161.09	16.37	188.38	18.04	185.12
29050 - TEOLOCHOLCO	585,042.00	2,127,950.00	16.94	150.61	17.01	183.91	17.60	315.26
29161 - ACXOTLA DEL MONTE	588,373.00	2,127,351.00	14.96	187.81	15.55	157.72	16.45	148.20
21242 - CAPULAC	598,941.00	2,111,389.00	16.88	146.12	17.21	173.91	20.18	263.63
21136 - ACAJETE	609,799.00	2,113,602.00	14.98	132.15	15.27	139.54	17.56	94.20

Tabla 2: Temperaturas y precipitación promedio en verano. Datos: SMN (2024), CONAGUA (2024).

Datos promedio			Otoño 2000-2010		Otoño 2010-2020		Otoño 2020-2024	
Estación	XUTM	YUTM	TEM PROM	PREC PROM	TEM PROM	PREC PROM	TEM PROM	PREC PROM
21248-PUEBLA (DGE)	582,552.81	2,103,685.66	18.80	68.47	18.73	82.57	18.36	58.38
21035-PUEBLA(DGE)	584,926.65	2,102,405.39	17.70	66.95	18.23	76.00	19.04	50.85
21065-PUEBLA(OBS)	587,684.43	2,106,567.99	17.17	68.47	17.35	82.57	17.96	58.38
29170- SAN PABLO DEL MONT	586,744.49	2,113,756.48	15.74	43.66	15.56	91.01		
21247- CHOLULA	571,746.45	2,108,558.64	16.95	36.10	18.05	94.45	17.50	66.06
21034- ECHEVERRIA	576,298.78	2,096,066.54	15.74	77.17	16.40	68.89	17.54	55.20
21249- AFRICAM ZAFARI	591,077.09	2,094,288.81	18.98	47.20	18.07	66.09	18.38	42.90
29169-ZACATELCO	579,565.00	2,125,281.00	16.07	64.98	16.25	71.78	17.18	80.54
29050 - TEOLOCHOLCO	585,042.00	2,127,950.00	15.55	70.30	15.80	75.16	15.95	65.61
29161 - ACXOTLA DEL MONTE	588,373.00	2,127,351.00	14.26	87.93	14.53	63.09	14.88	57.61
21242 - CAPULAC	598,941.00	2,111,389.00	15.28	111.28	16.06	75.98	16.84	165.74
21136 - ACAJETE	609,799.00	2,113,602.00	13.83	36.83	14.35	73.53	16.84	59.10

Tabla 3: Temperaturas y precipitación promedio en otoño. Datos: SMN (2024), CONAGUA (2024).

Datos promedio			Invierno		Invierno		Invierno	
			2000-2010		2010-2020		2020-2024	
Estación	XUTM	YUTM	TEM PROM	PREC PROM	TEM PROM	PREC PROM	TEM PROM	PREC PROM
21248-PUEBLA (DGE)	582,552.81	2,103,685.66	16.35	2.37	16.55	2.79	16.90	5.73
21035-PUEBLA(DGE)	584,926.65	2,102,405.39	14.18	1.16	15.41	3.54	15.90	6.38
21065-PUEBLA(OBS)	587,684.43	2,106,567.99	13.94	2.37	14.79	2.79	15.08	5.73
29170- SAN PABLO DEL MONT	586,744.49	2,113,756.48	12.69	1.82	13.45	8.30		
21247- CHOLULA	571,746.45	2,108,558.64	14.20	1.13	15.49	5.24	14.98	2.40
21034- ECHEVERRIA	576,298.78	2,096,066.54	12.06	0.68	15.01	4.19	14.68	5.76
21249- AFRICAM ZAFARI	591,077.09	2,094,288.81	16.55	1.65	15.81	4.28	15.83	5.50
29169-ZACATELCO	579,565.00	2,125,281.00	13.16	1.55	14.07	5.51	13.78	1.28
29050 - TEOLOCHOLCO	585,042.00	2,127,950.00	13.96	1.29	13.89	6.69	13.53	8.70
29161 - ACXOTLA DEL MONTE	588,373.00	2,127,351.00	11.94	2.22	12.13	4.86	12.90	4.25
21242 - CAPULAC	598,941.00	2,111,389.00	13.90	4.45	14.62	10.27	16.60	23.25
21136 - ACAJETE	609,799.00	2,113,602.00	9.53	1.75	12.75	3.43	14.15	9.08

Tabla 4: Temperaturas y precipitación promedio en invierno. Datos: SMN (2024), CONAGUA (2024).

Los datos promediados en las tablas corresponden a los meses representativos por cada estación del año, procesados en el software de Microsoft Excel, 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 2, realizada con el software Golden Surfer, muestra la comparativa para las variables de temperatura.

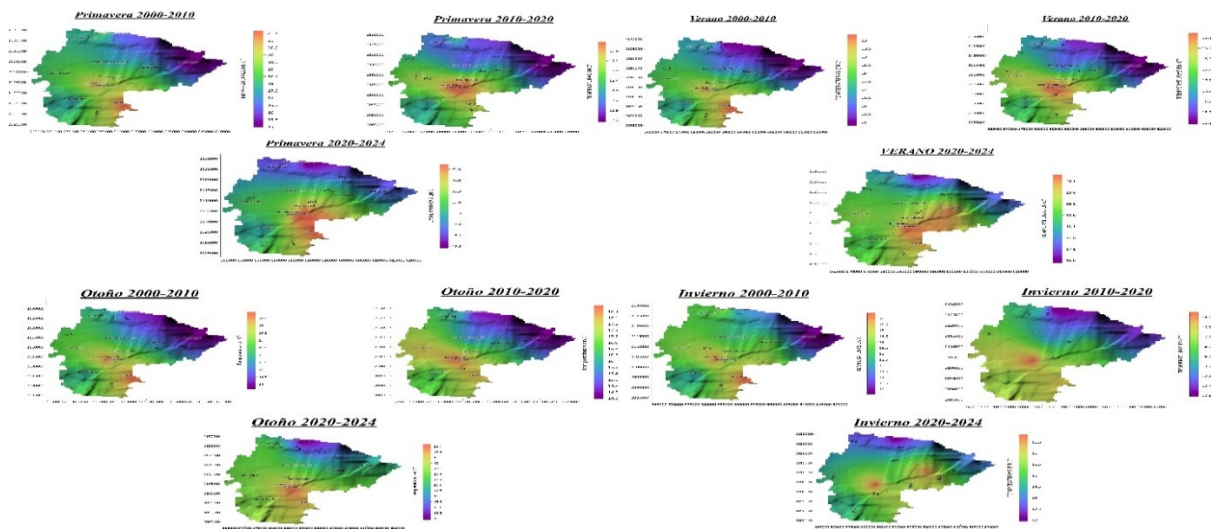


Figura 2: Modelos de temperaturas promedio. 2000-2024. Zona metropolitana de Puebla. Surfer 2023. Datos: SMN (2024), CONAGUA (2024).

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. 21249 mientras que las más bajas se dan en dirección a las localidades cercanas a la Malinche, como lo es la zona de estación no. 21136. 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

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 2020-2024 respecto a 2000-2010. 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.

Para la variable de precipitación promedio, se crearon los siguientes modelos. (Figura 3)

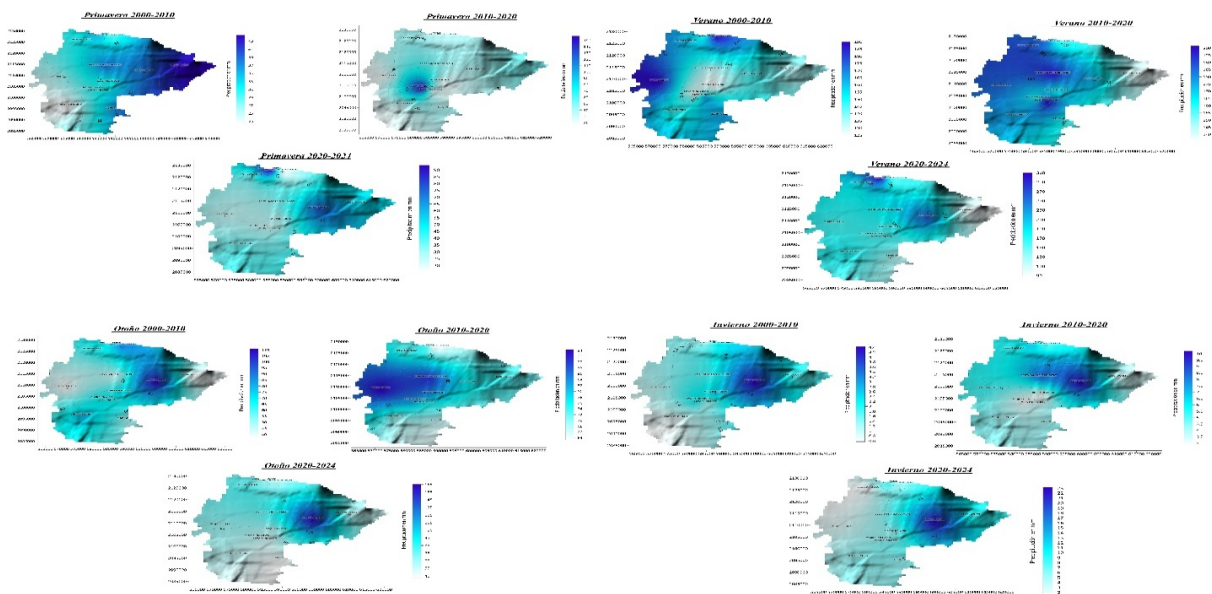
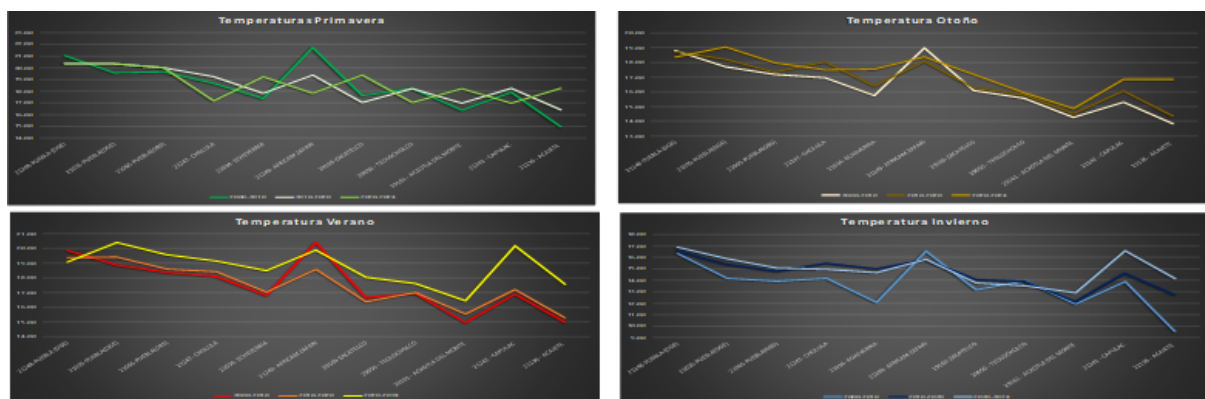


Figura 3: Modelos de precipitación promedio. 2000-2024. Zona metropolitana de Puebla. Surfer 2023. Datos: SMN (2024), CONAGUA (2024).

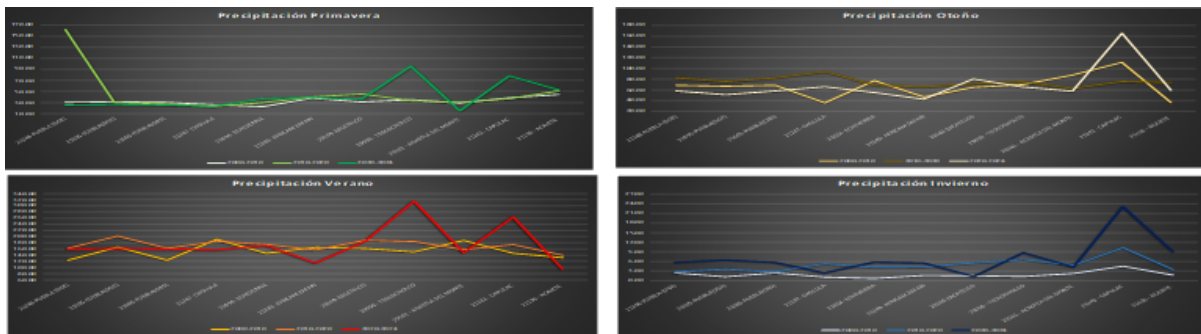
En los mapas de precipitación, el cambio es mucho más drástico por estación, especialmente en la temporada de verano en la que la precipitación aumenta. Pues se presentaron lluvias en promedio menores para verano del 2020-2024 con respecto al periodo de 2000-2010, siendo el caso contrario el de la temporada de invierno, donde no es común la presencia de lluvias mayores a 20 mm, caso que si se dio en el tercer periodo analizado. Esto, puede deberse especialmente a 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 como lo es Puebla.

Posteriormente, se generaron Gráficas para analizar a mayor profundidad el comportamiento tanto de temperatura como de precipitación. (Gráficas 1 y 2).



Gráfica 1: Temperaturas promedio. 2000-2024. Zona metropolitana de Puebla. Datos: SMN (2024), CONAGUA (2024).



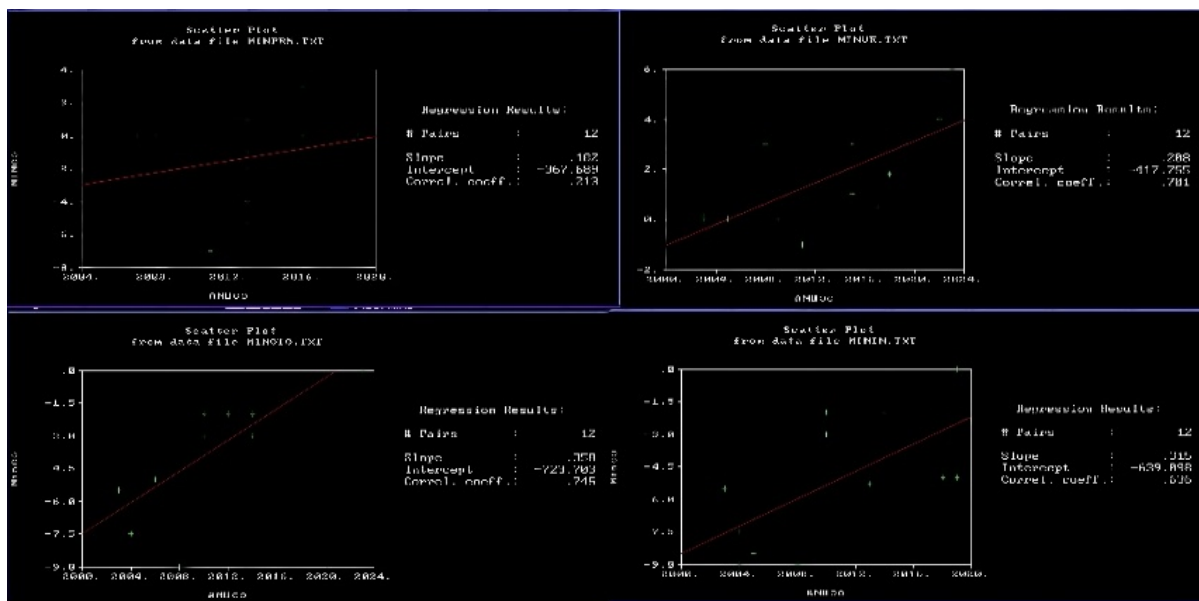
Gráfica 2: Precipitación promedio. 2000-2024. Zona metropolitana de Puebla. Datos: SMN (2024), CONAGUA (2024).

En los Gráficas, se aprecia que, en el caso de la variable de temperatura, un factor común es que la estación 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 de Capulac y 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, 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, si existe un aumento en las temperaturas promedios para todas las estaciones del año respecto al primer y segundo periodo de estudio.

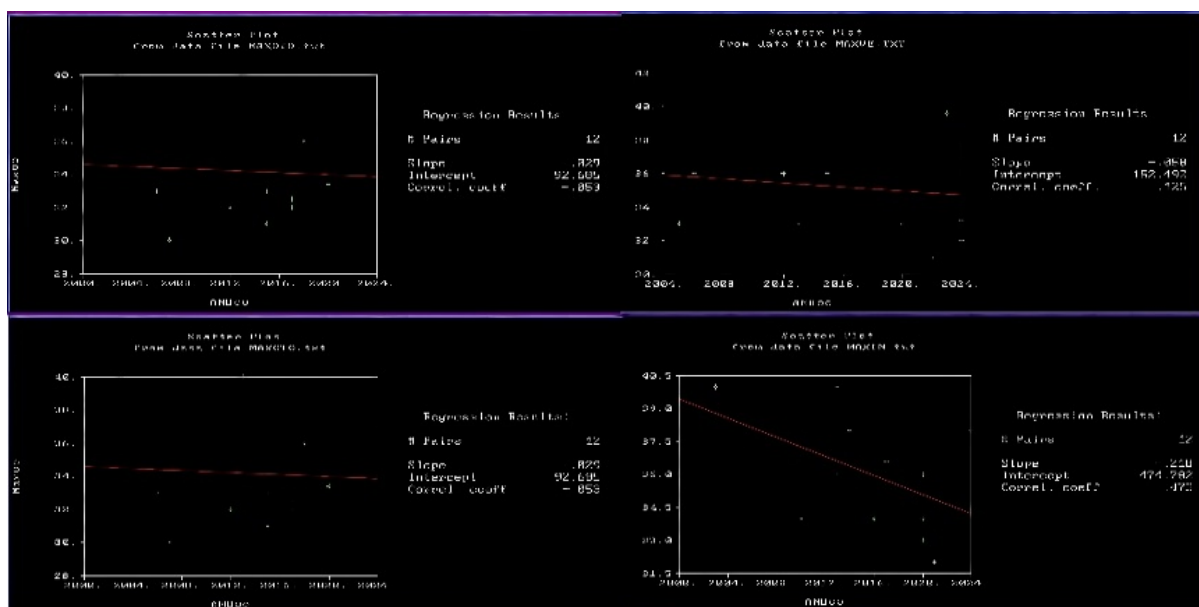
En el segundo Gráfica, vemos que en general, los periodos 2000-2010 y 2010-2020 se comportan de forma muy similar, dando concordancia en las lluvias que se presentaron en

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 Telocholco 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 obtenidas las gráficas, 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 en GEOEAS para la obtención de sus Gráficas de dispersión, analizando su comportamiento. El procedimiento se realizó en primera instancia con los datos de temperaturas.



Gráfica 3: Gráfica de dispersión para temperaturas mínimas 2000-2024. GEOEAS. Datos: SMN (2024), CONAGUA (2024).



Gráfica 4: Gráfica de dispersión para temperaturas máximas 2000-2024. GEOEAS. Datos: SMN (2024), CONAGUA (2024).

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 Gráficas de dispersión para la temperatura, en los valores mínimos

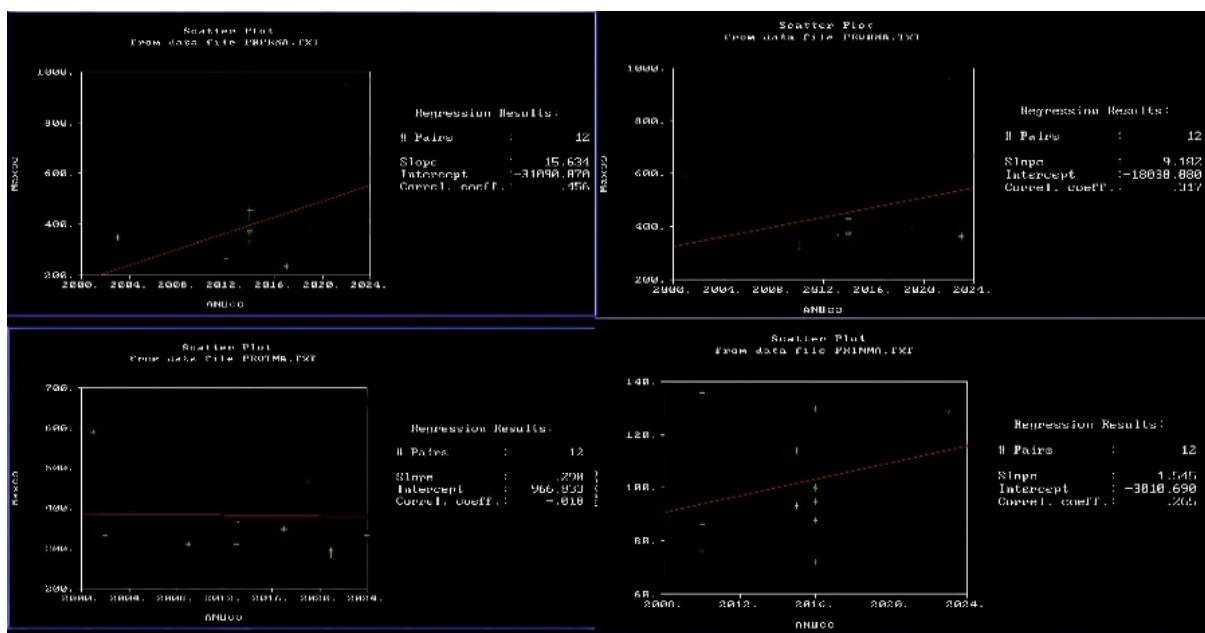
extremos se puede ver que la mayor proximidad a la tendencia de nuestra línea se da en aquellos valores cercanos a 0 °C, para primavera y verano, mostrando valores atípicos en los años 2011, siendo más bajo de lo normal, mientras que, en otoño e invierno, la tendencia se acerca a valores entre 5 °C y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

Para el caso de precipitación únicamente se generó el grafico de dispersión para los registros máximos extremos. (Gráfica 5).



Gráfica 5: Gráfica de dispersión para precipitación máximas 2000-2024. GEOEAS. Datos: SMN (2024), CONAGUA (2024).

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.

### 3. 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, (figura 4).

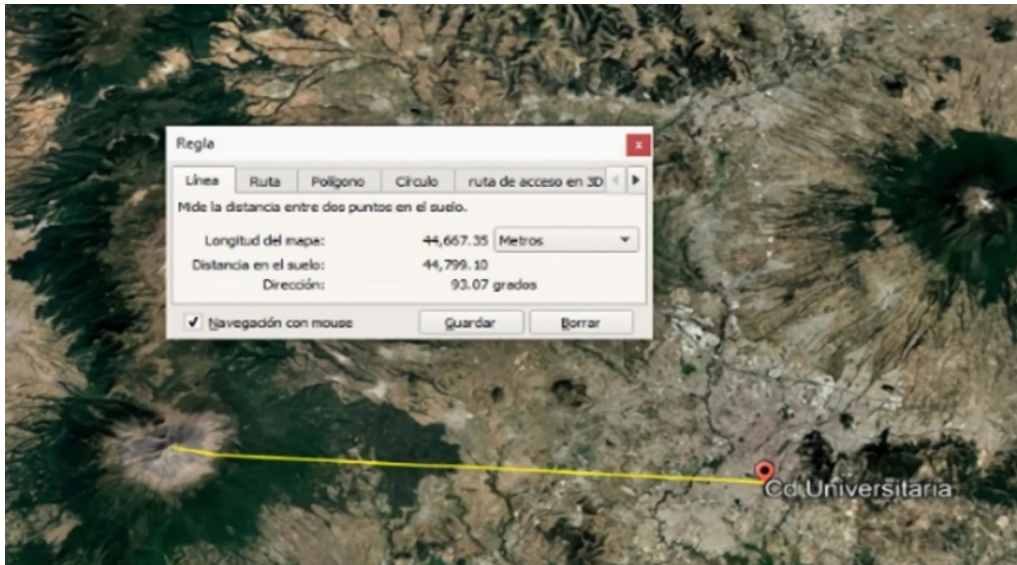


Figura 4: Determinación de distancia entre el cráter y ciudad universitaria Puebla. Fuente: Google Earth. (2024).

Aplicando el modelo matemático ideal siguiente:

$$t = \frac{d}{v} = 44,667,35 \text{ m} \quad (1)$$

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, (figura 5).

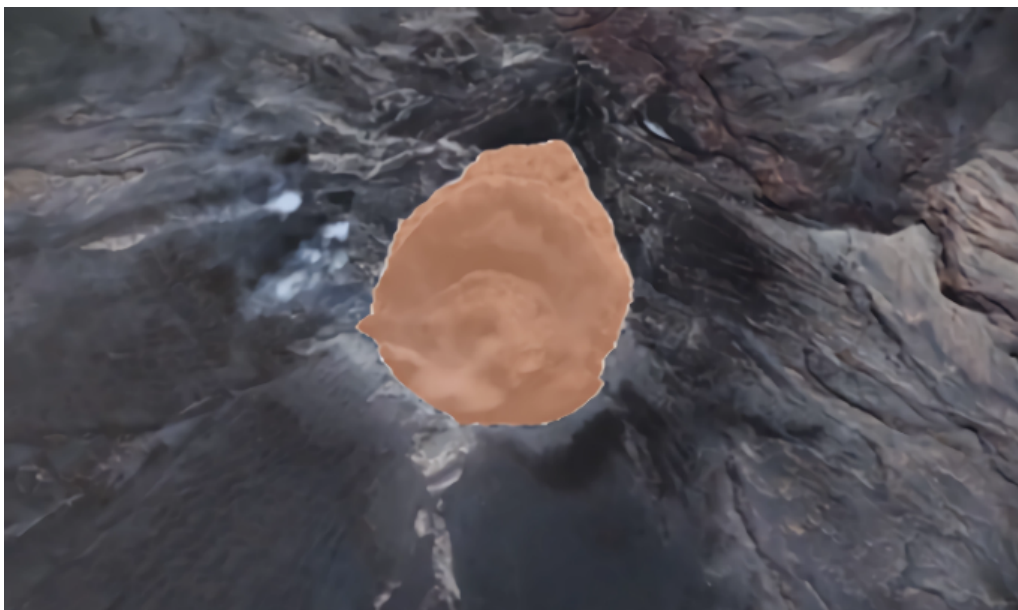


Figura 5: Determinación de distancia entre el cráter y ciudad universitaria Puebla Fuente: Google Earth. (2024).

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 6,7,8 y 9).



Figura 6: Área total de la base del volcán. Fuente: Google Earth. (2024).

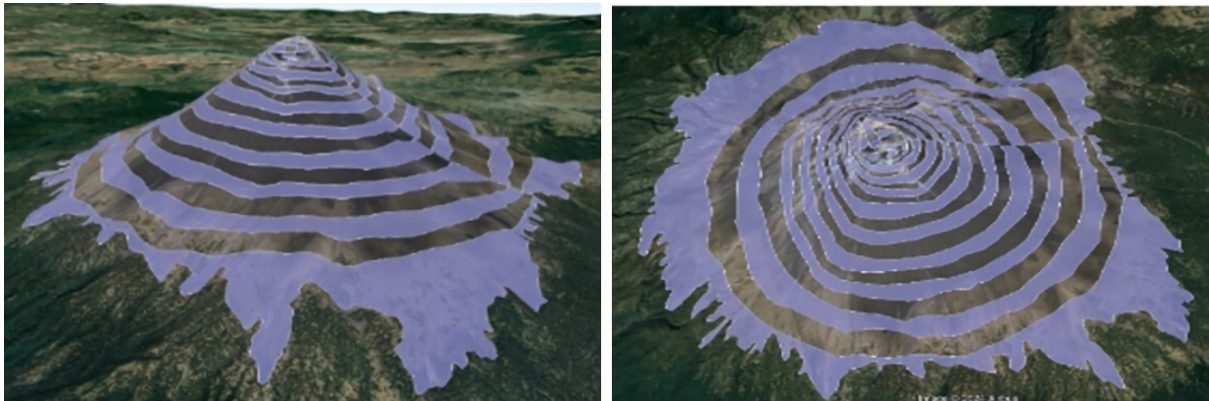


Figura 7: Estructura total del volcán, este tiene una forma de espiral desde el centro de nuestro cráter hasta su base. Fuente: Google Earth. (2024).

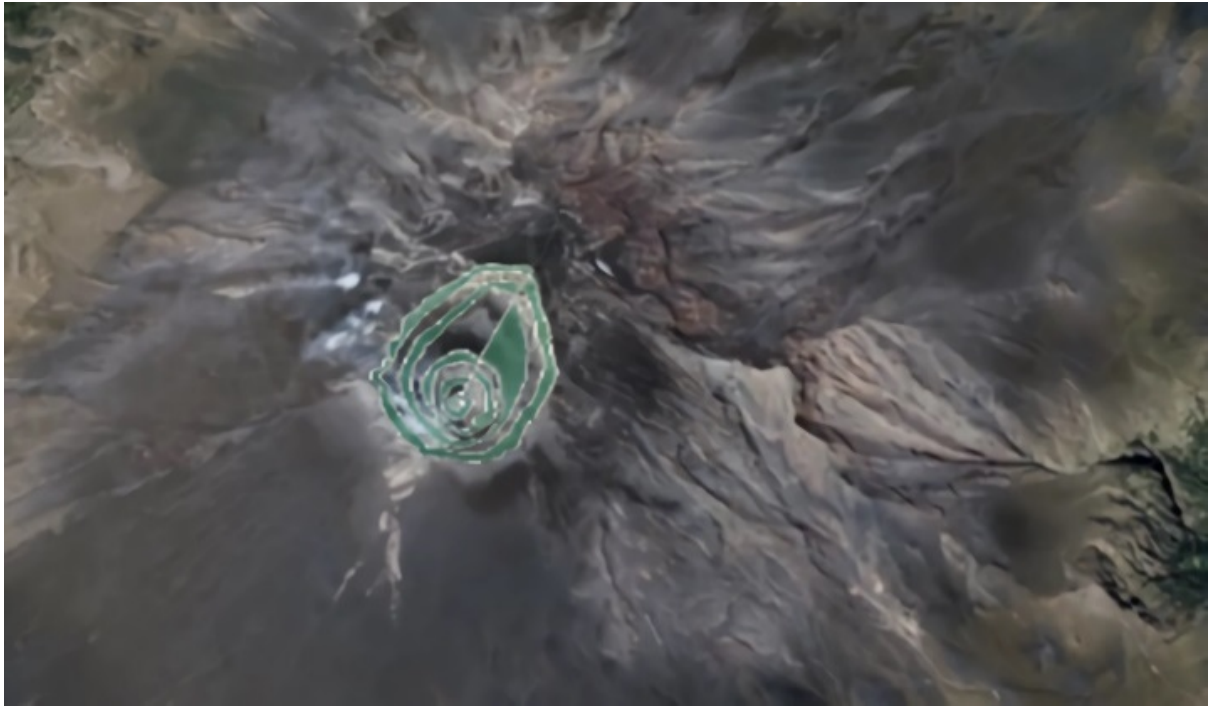


Figura 8: Estructura del edificio volcánico en forma de espiral Fuente: Google Earth. (2024).

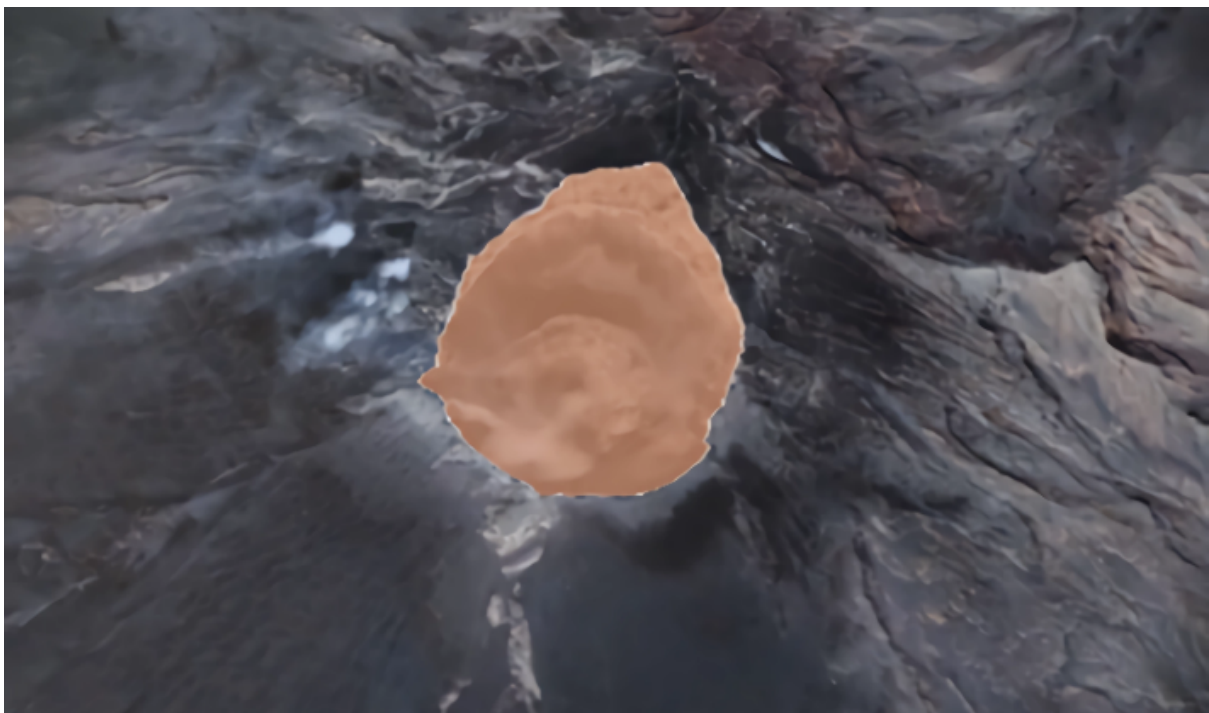


Figura 9: Estructura total edificio volcánico analizado. Fuente: Google Earth. (2024).

De igual forma se realizó en este mismo software el cálculo del área, perímetro y longitud del contorno de nuestro cráter dándonos los siguientes datos (figura 10 y 11):

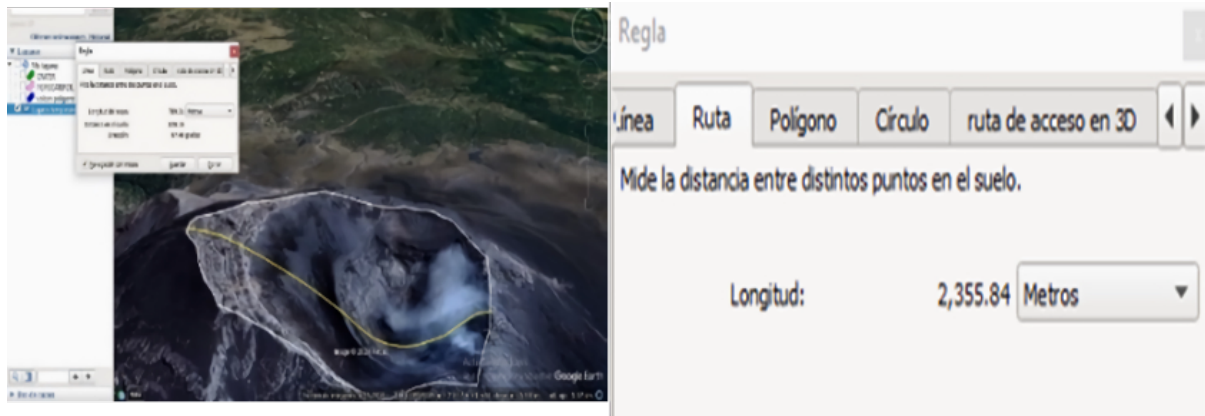


Figura 10: Dimensiones del edificio volcánico analizado, longitud: 2,355.84 metros. Fuente: Google Earth. (2024).

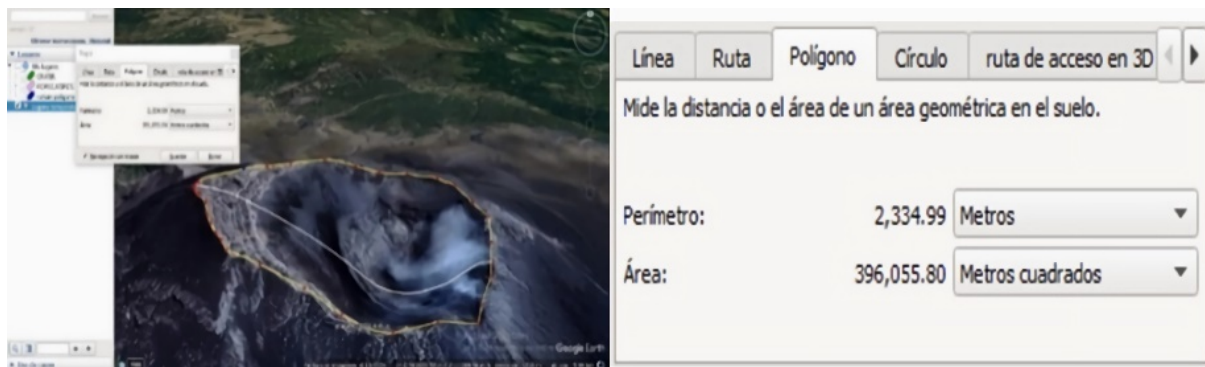


Figura 11: Dimensiones del cráter, área: 396,055.80m<sup>2</sup>, perímetro: 2,334.99 m. Fuente: Google Earth. (2024).

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.

### 3.1 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, (figuras 12 y 13).

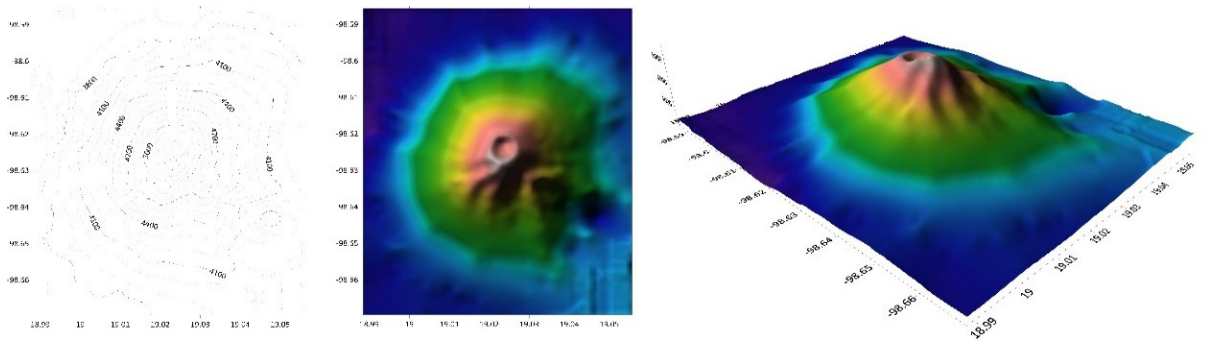


Figura 12: Representación tridimensional de la estructura del volcán. Surfer 2023. Datos: Globap Mapper y google Earth (2024).



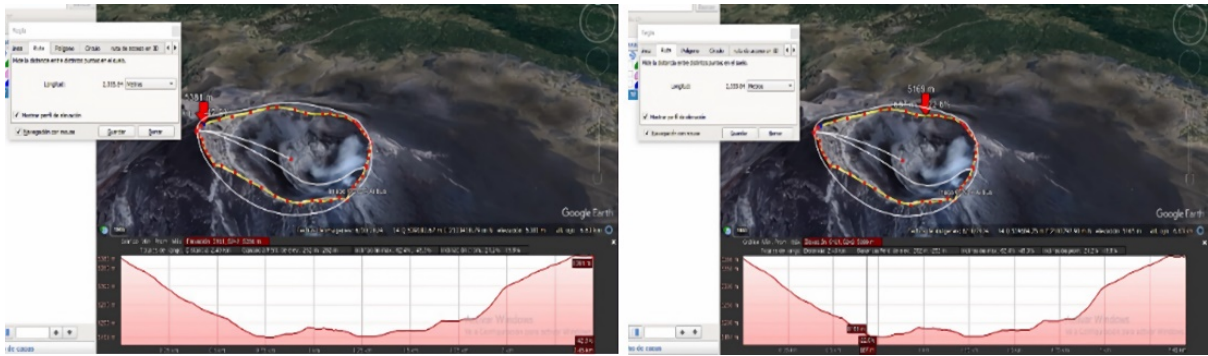


Figura 16: Análisis comparativo de perfiles. Google Earth (2024). Datos: Globap Mapper y google Earth (2024).

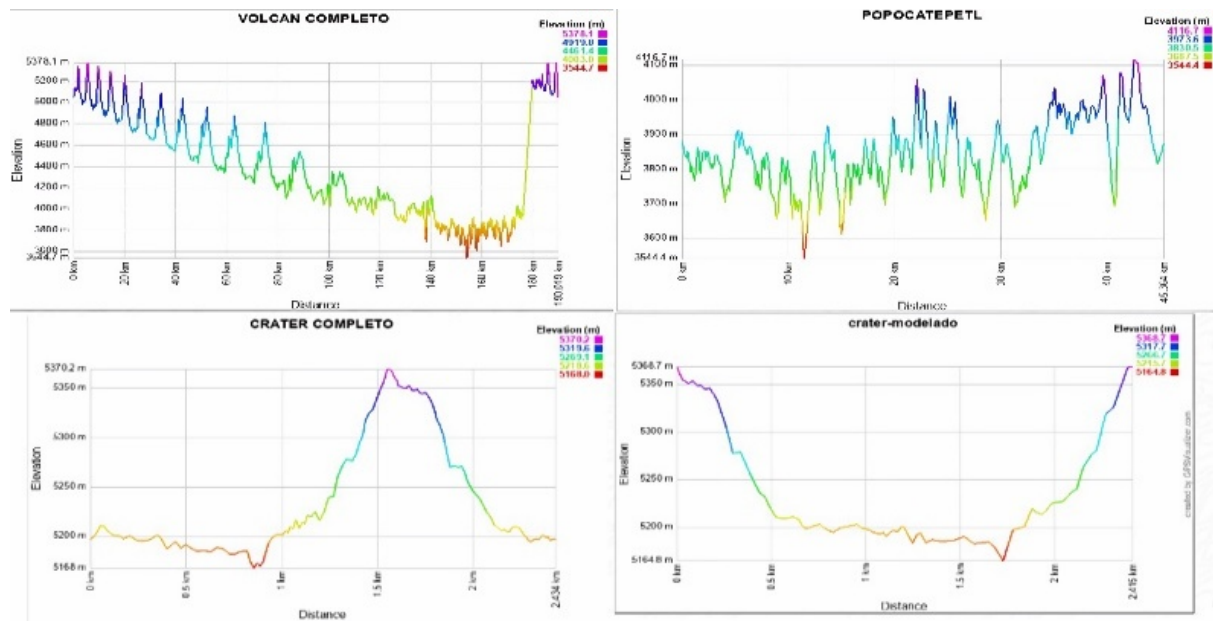


Figura 17: Análisis comparativo de perfiles. GPS Visualizer. Datos: Globap Mapper y google Earth (2024).

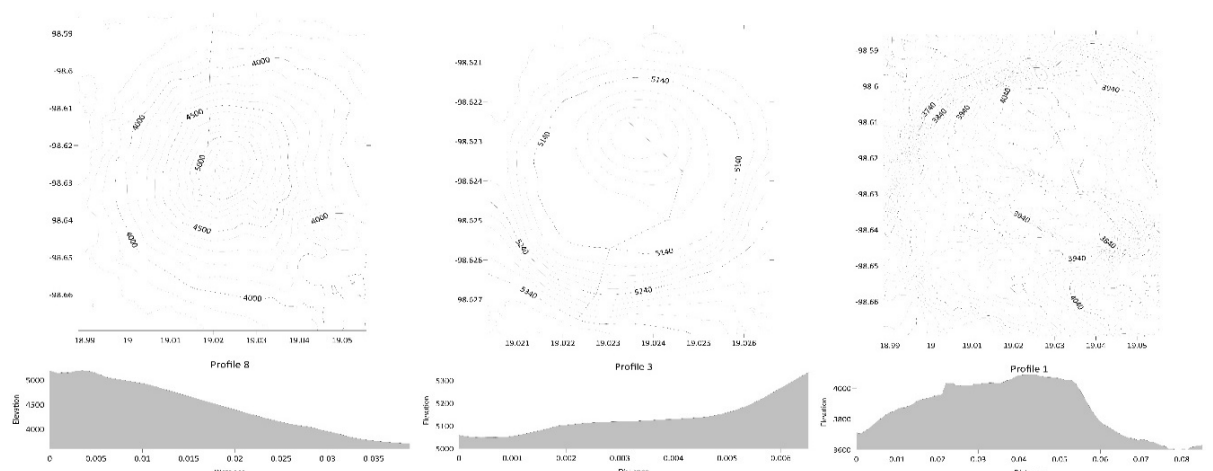


Figura 18: Análisis comparativo de perfiles Surfer (2023). Datos: Globap Mapper y google Earth (2024).

### 3.4 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 Popocatépetl, una primera parte duro 135 minutos, pocas horas después, sería de 90 minutos.

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

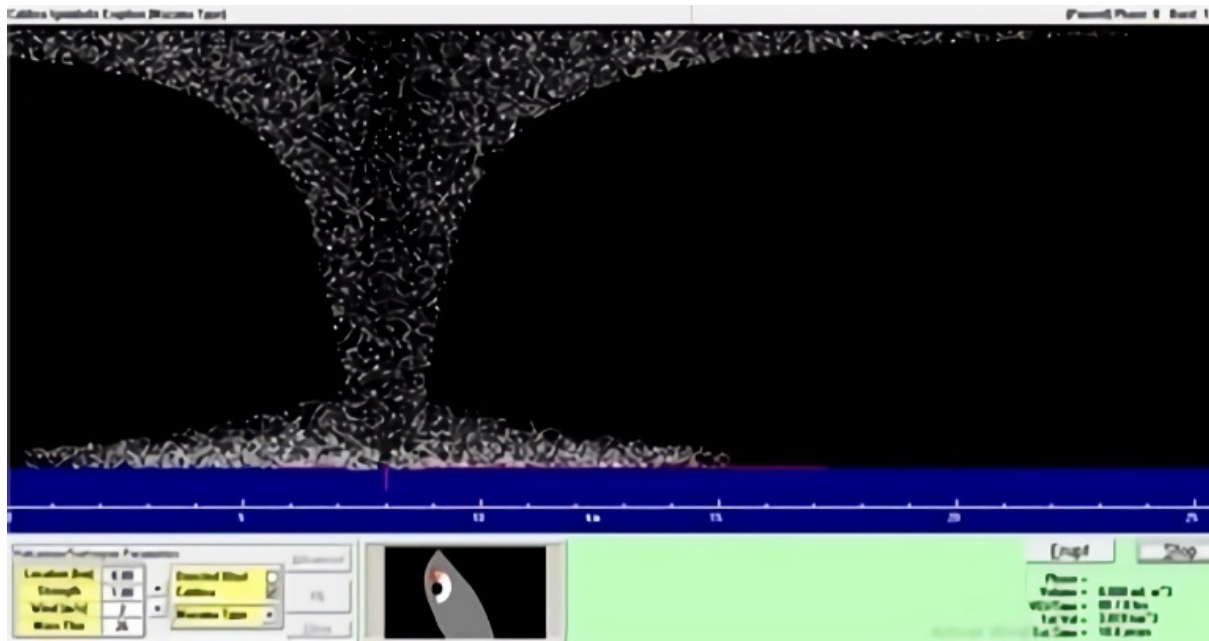


Figura 19: 11 de diciembre del 1994, El despertar del volcán Popocatépetl. Erupt. Datos: Globap Mapper y google Earth (2024).

El 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.

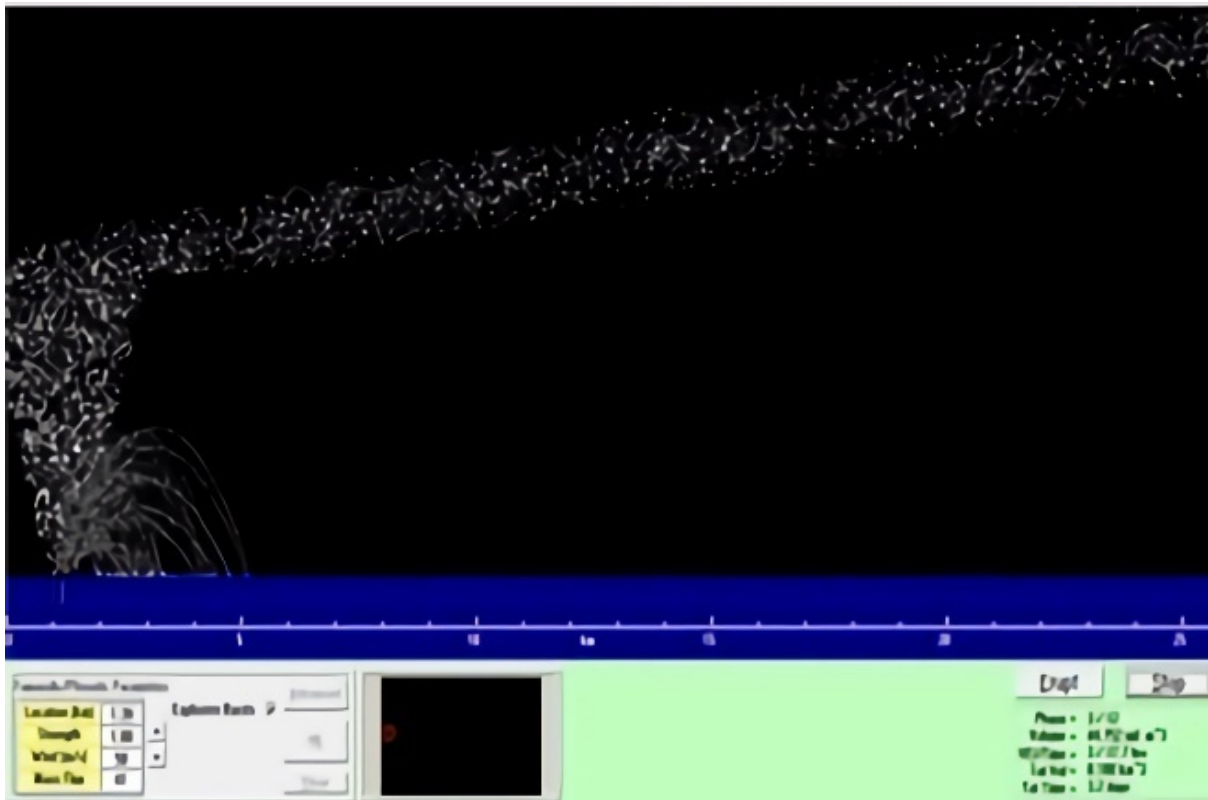


Figura 20: 19 de marzo de 2019, La erupción más violenta. Erupt. Datos: Global Mapper y google Earth (2024).

Los escenarios previstos para esta fase son:  
 • 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 kilómetros.

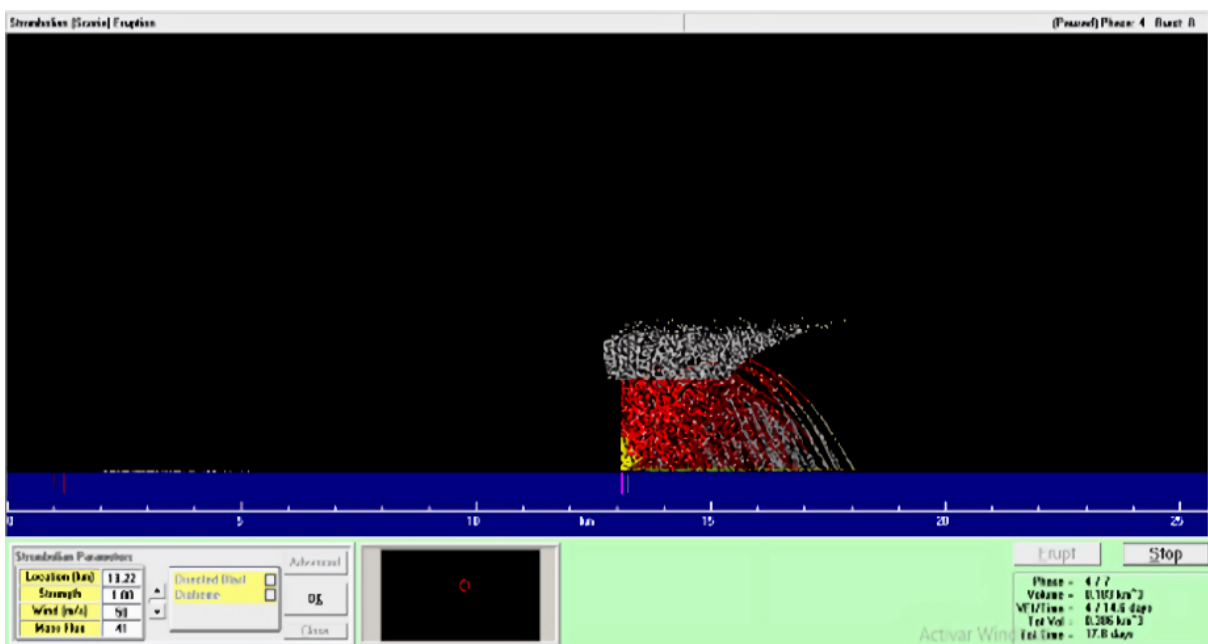


Figura 21: 7 de noviembre del 2024, última actividad. Erupt. Datos: Globap Mapper y google Earth (2024).

## 4. Caso Sierra Norte del Estado de Puebla

**4.1 Zona de estudio** Se identificó y delimitó la zona de estudio correspondiente a la Sierra Norte de Puebla; 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, (figura 22), 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 la Sierra Norte.

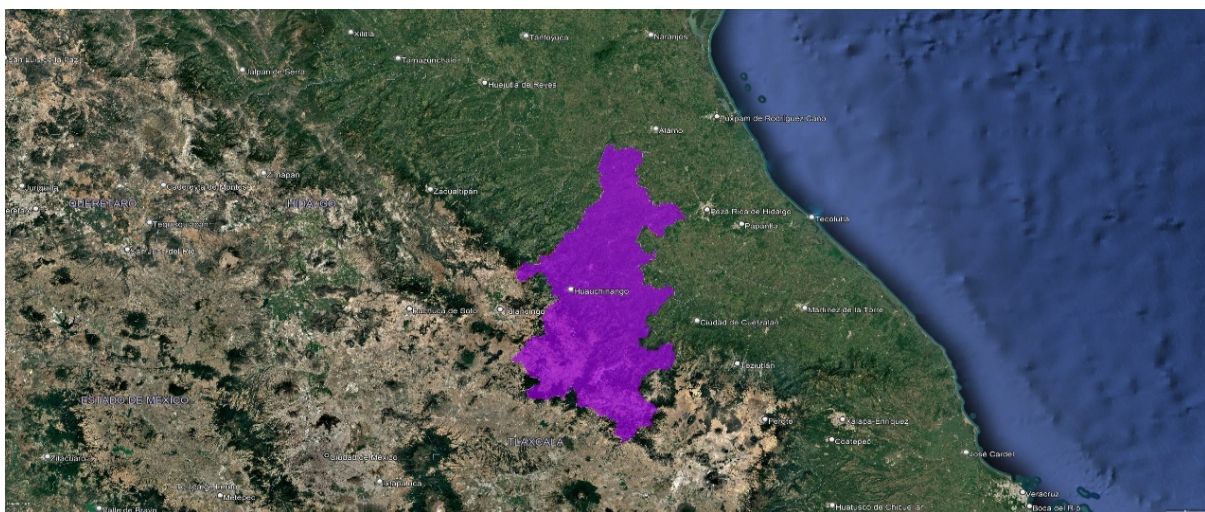


Figura 22: Ubicación de la zona de estudios "Sierra Norte del Estado de Puebla". Fuente: Google Earth (2024)

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 (tabla 5). 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.

No.	Latitud	Longitud	Altura	No.	Latitud	Longitud	Altura
1	20.839896	-97.842173	75.904739	38	20.5723	-97.92721	187.655487
2	20.839448	-97.84583	85.204384	39	20.569231	-97.932693	211.438171
3	20.836481	-97.849213	91.458725	40	20.567578	-97.935077	206.981979
4	20.832994	-97.852438	91.020203	41	20.569446	-97.93659	217
5	20.835089	-97.858913	80.212822	42	20.566668	-97.939378	219.751785
6	20.832784	-97.868089	88.62014	43	20.562139	-97.943965	351.50058
7	20.831122	-97.870639	88.67437	44	20.552482	-97.962971	556.677429
8	20.834059	-97.87896	189.960754	45	20.54533	-97.973733	449.497253
9	20.799277	-97.894239	150.355774	46	20.540644	-97.980298	506.007538
10	20.717234	-97.921772	308.866974	47	20.525862	-97.981543	345.362976
11	20.703008	-97.898071	119	48	20.523302	-97.97258	474.099976
12	20.696115	-97.903187	117.84375	49	20.514841	-97.979178	551.049988
13	20.689913	-97.912405	117.720222	50	20.516932	-97.984979	350.988892
14	20.671279	-97.917888	139.120148	51	20.515423	-97.986688	358.088776
15	20.665177	-97.908168	166.904617	52	20.514155	-97.990566	406.956177
16	20.654007	-97.91202	183.666199	53	20.510665	-97.992032	418.522675
17	20.650019	-97.908606	160.701599	54	20.507602	-97.992899	435.323883
18	20.644672	-97.907645	176.150955	55	20.505423	-97.997209	583.783447

Tabla 5: Coordenadas geográficas. Datos: Global mapper (2024). Parte 1

19	20.640917	-97.901657	155.558472	56	20.503241	-97.995882	600.453186
20	20.62391	-97.894755	157.50914	57	20.502539	-97.993363	592.341858
21	20.609356	-97.905103	171.499374	58	20.499963	-97.993021	470.72818
22	20.608155	-97.908682	157.692337	59	20.498147	-97.991065	346.350342
23	20.605326	-97.90564	165.911041	60	20.497877	-97.990004	303.846588
24	20.603507	-97.906552	149.153717	61	20.497296	-97.989825	291.596771
25	20.599935	-97.906093	161.277878	62	20.496461	-97.989632	289.291931
26	20.593981	-97.908347	185.96933	63	20.495428	-97.988818	285.722412
27	20.593271	-97.910871	161.851456	64	20.494532	-97.990067	286.106049
28	20.589843	-97.910704	162.773636	65	20.492785	-97.991921	293.769714
29	20.588028	-97.909538	168.667877	66	20.485099	-97.99333	351.456573
30	20.586307	-97.909742	181.986404	67	20.485698	-97.995333	305.371796
31	20.587106	-97.912317	172.354126	68	20.486993	-97.999325	311.301575
32	20.586413	-97.914807	178.131546	69	20.484518	-97.998061	313.658539
33	20.581892	-97.918023	184.262848	70	20.482653	-97.999841	313.087036
34	20.579505	-97.921341	190.535568	71	20.483092	-98.000837	321.880432
35	20.577381	-97.922942	190.527023	72	20.482706	-98.001765	308.848907
36	20.575063	-97.923774	186.350739	73	20.482669	-98.006321	321.64447
37	20.573161	-97.927709	196.89856	74	20.482715	-98.008763	321.221466

Tabla 6: Coordenadas geográficas. Datos: Global mapper (2024). Parte 2

## 4.2 Cálculo de la aceleración de la gravedad en la latitud

La aceleración de la gravedad es el efecto de la atracción universal que impulsa a los cuerpos hacia el centro de la Tierra, siendo la fuerza que determina su peso. Representada por la letra  $g$ , la aceleración de la gravedad se define como el aumento constante de la velocidad en una unidad de tiempo, experimentado por un cuerpo en caída libre, y es inversamente proporcional a la masa  $m_0$  del cuerpo en kilogramos (kg), dada por la fórmula:  $g = f/m_0$ . (2) (Capra. s.f.)

Para llevar a cabo el análisis de la aceleración de la gravedad en la Sierra

$$(\varphi) = 978032.7 (1 + 0.00527904 \sin^2 \varphi + 0.00002327 \sin 4\varphi + 0.00000012 \sin 6\varphi) mGal \quad (3)$$

$$(\varphi) = 9.780318 (1 + 0.0053024 \sin^2 \varphi - 0.0000058 \sin^2 2\varphi) - 3.086 * 10^{-6} * H [m/s^2] \quad (4)$$

Con los resultados obtenidos, podemos interpretar la información y evaluar la estabilidad de las pendientes, considerando que la aceleración de la gravedad influye directamente en el comportamiento de los materiales y estructuras geológicas. Estos valores destacan los puntos máximos y mínimos, así como sus ubicaciones específicas. La zona que abarca los puntos de 320 a 500 consecutivamente, cubriendo los municipios de Chignahuapan, Ixtacamaxtitlán y Aquixtla, presenta valores mínimos en los puntos más altos debido a que la gravedad es mínima en donde hay mayor elevación. Por otro lado, los valores máximos se encuentran entre los puntos 63 y 590 en los puntos más bajos debido a que la gravedad es mayor en puntos más bajos por la atracción de la tierra, cubriendo los municipios de Francisco Z. Mena, Pantepec, Venustiano Carranza y Jalpan, en una distribución de izquierda a derecha en retroceso.

Norte de Puebla, se emplearon dos fórmulas: la de gravedad teórica o normal Internacional del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) (fórmula 3) y la de gravedad local INEGI (fórmula 4). Ambas se aplicaron en cada uno de los 770 puntos, con el propósito de correlacionar los resultados de los datos obtenidos. Estos datos permiten no solo calcular la aceleración de la gravedad en función de la posición geográfica y la elevación de cada punto, sino también analizar los modelos matemáticos en la representación de la realidad física de la zona de estudio, utilizando los siguientes modelos matemáticos.

## 4.3 Análisis geoestadístico

Con los valores de gravedad obtenidos en cada punto de la zona de estudio, se llevaron a cabo análisis geoestadísticos utilizando modelos matemáticos como la desviación estándar, el coeficiente de correlación, la covarianza y el coeficiente de variación.

La desviación estándar (fórmula 5) es una medida de dispersión en estadística descriptiva que permite evaluar cuánto se desvían los datos individuales respecto a la media. Una desviación estándar baja sugiere que los datos están cercanos a la media, mientras que un alta indica una mayor dispersión de valores.

La covarianza (fórmula 6) permite determinar si dos variables tienden a variar de manera conjunta, y en este caso se utilizó para analizar la relación entre la gravedad y la cantidad total de puntos muestreados. El coeficiente de variación (fórmula 7) ayuda a medir

la dispersión relativa de los datos en torno a un punto central, generalmente la media.

Por último, el coeficiente de correlación (fórmula 8) es una herramienta

estadística que mide el grado de asociación lineal entre dos variables, proporcionando información sobre la dirección y fuerza de la relación entre la gravedad y la altitud en este caso.

$$S = \sqrt{\frac{\sum(X-\bar{X})^2}{n-1}} \quad (5)$$

$$Cov(X, Y) = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{n} \quad (6)$$

$$cv = \frac{\sigma}{\bar{X}} \quad (7)$$

$$\rho = \frac{S_{xy}}{S_x S_y} \quad (8)$$

Al concluir el análisis geoestadístico se obtuvieron los siguientes resultados de cada uno de los modelos matemáticos llevados a cabo (figura 23). El valor de los resultados de la desviación estándar indica que tanto la altura como la gravedad teórica presentan una mayor dispersión de valores, mientras que la gravedad local mantiene una desviación baja, lo que sugiere que sus datos están próximos a la media.

relación entre los valores de altura, tanto para la gravedad teórica como para la gravedad local entre los 770 puntos. Esto representa la evaluación de cómo estas variables pueden cambiar conjuntamente en el área de estudio. Respecto al coeficiente de correlación, este se aproxima a -1 tanto para la gravedad local como para la teórica, lo cual indica una correlación fuerte e inversa entre las variables de gravedad (teórica y local) y la altura.

El análisis de la covarianza revela la

FORMULAS		RESULTADOS	
Desviación estándar	$S = \sqrt{\frac{\sum(X - \bar{X})^2}{n - 1}}$	ALTURA	1102.334217940960
		GRAVEDAD TEORICA	20.428181593504
		GRAVEDAD LOCAL	0.003581053486
Covarianza	$Cov(X, Y) = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{n}$	ALTURA Y GRAVEDAD T	-19645.545558273500
		ALTURA Y GRAVEDAD L	-3.940880150859
		ALTURA Y GRAVEDAD T	-0.872410924367
Coeficiente de correlación	$\rho = \frac{S_{xy}}{S_x S_y}$	ALTURA Y GRAVEDAD L	-0.998318527521
		ALTURA	0.890083096351
Coeficiente de variación	$CV = \frac{\sigma}{\bar{X}}$	GRAVEDAD TEORICA	0.00002087
		GRAVEDAD LOCAL	0.000366061

Figura 23: Resultados del análisis geoestadístico. Datos: Global mapper (2024).

#### 4.4 Cálculo de la aceleración de la gravedad en la latitud

Las distancias se calcularon entre dos puntos específicos, siendo esto esencial para los cálculos de pendiente, ya que dependen de la relación entre la elevación y la distancia horizontal entre los puntos. Para obtener estas mediciones, se aplicó la fórmula correspondiente (fórmula 9) usando coordenadas UTM (Guzmán, J. H. 2022). La pendiente, que mide la inclinación de una superficie, se define como la

$$d = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \quad (9)$$

$$\text{Pendiente} = \frac{\text{Diferencia de alturas}}{\text{Distancia horizontal}} * 100 \quad (10)$$

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

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 (fórmula 10) y es fundamental para evaluar el riesgo de colapso en estructuras.

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.

#### 4.5 Modelación en el software de uso libre Surfer.

Modelación en 2D y 3D de la zona de estudio para representación del terreno. (Figura 24)

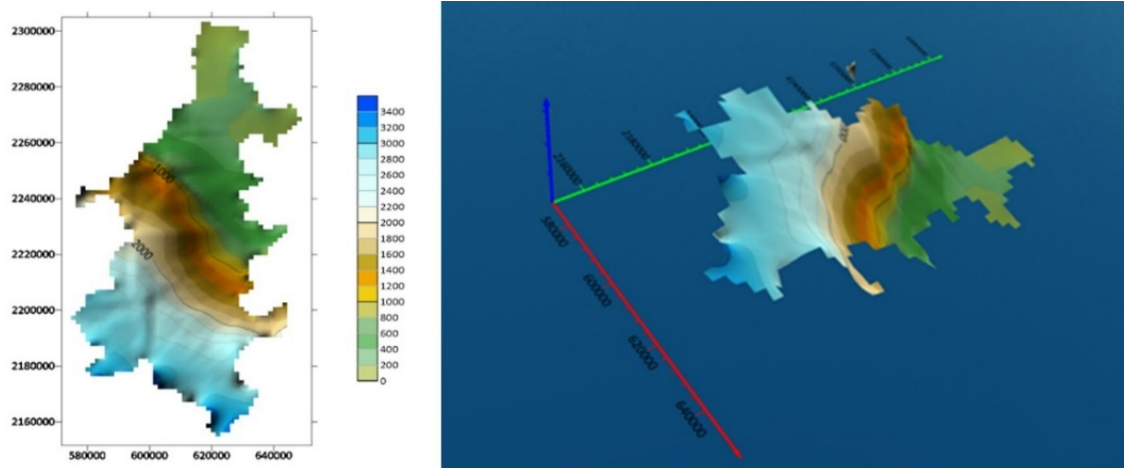


Figura 24: Modelo de la Sierra Norte en 2D y 3D. Surfer 2023. Datos: Global mapper (2024)

En los modelos de gravedad local y teórica (figura 25), se observa que los puntos de mayor altitud corresponden a valores de gravedad más bajos, mientras que los valores de gravedad más altos se encuentran en las zonas

más bajas. Esto indica que las áreas de mayor altitud incluyen los municipios de Chignahuapan, Ixtacamaxtitlán y Aquixtla.

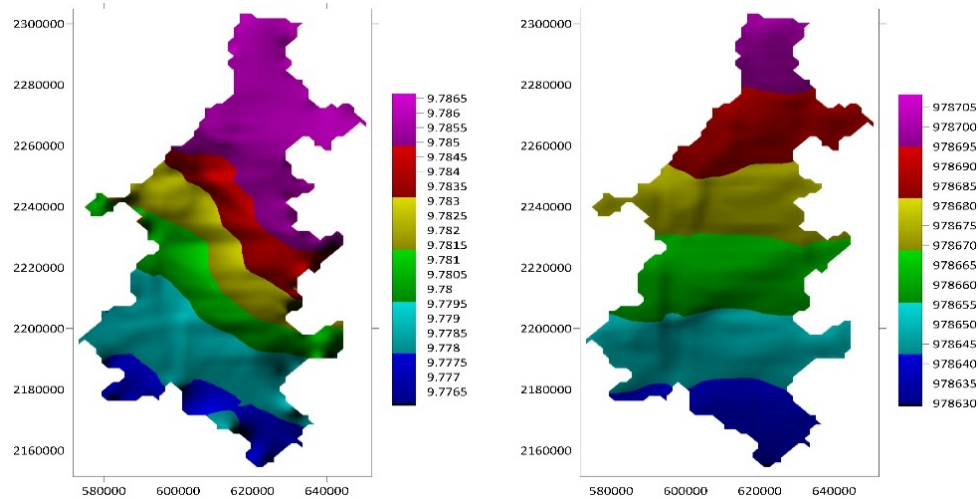


Figura 25: Modelo de la gravedad local y teórica. Surfer 2023. Datos: Global mapper (2024).

En los modelos de cálculo de distancias (figura 26) punto a punto, se observa que las zonas con distancias más cortas corresponden a puntos más próximos entre sí. En el modelo de pendiente (figura 26), la mayoría de los valores se

encuentran entre -5 y 5; una pendiente positiva indica una elevación que sube de izquierda a derecha, mientras que una pendiente negativa refleja un descenso de izquierda a derecha.

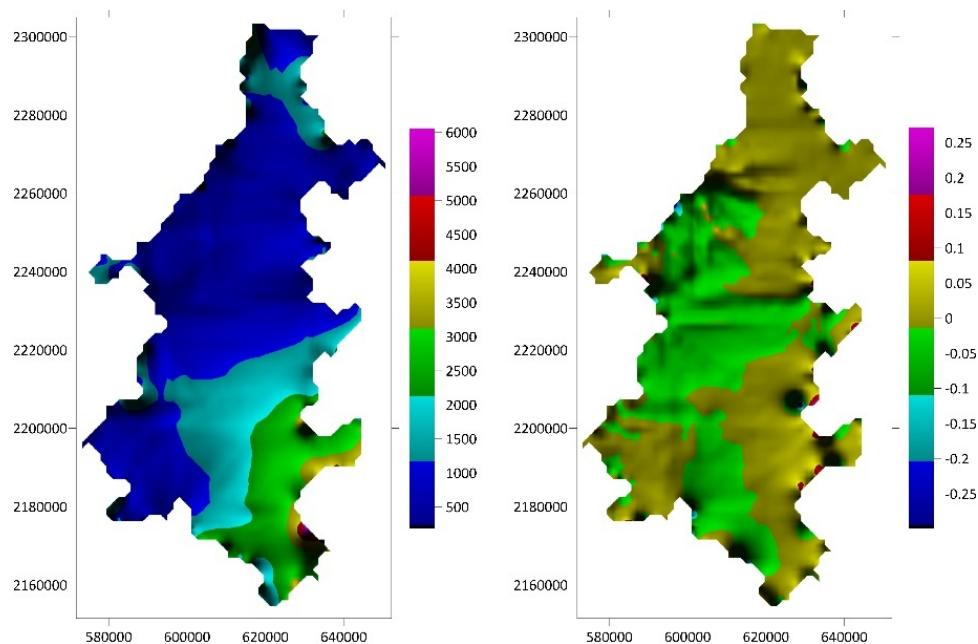


Figura 26: Modelo de la gravedad local y teórica. Surfer 2023. Datos: Global mapper (2024).

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 Sierra Norte de Puebla, 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.

### 5. Discusión de resultados

Los resultados obtenidos en la investigación destacan la interacción entre factores climáticos, geológicos y antrópicos, subrayando los riesgos ambientales 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 ámbito geoestadístico, 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.

### 6. Conclusión

El trabajo integra principalmente el análisis del cambio climático en la zona metropolitana de Puebla, mostrando los efectos adversos del 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", ha impactado las temperaturas y patrones de precipitación. Además, la deforestación en áreas circundantes contribuye al aumento de la temperatura y altera el ciclo hídrico.

Por otra parte, la clasificación y análisis estadísticos de los sismos volcánicos que se realizaron son fundamentales para entender la dinámica del volcán y predecir posibles erupciones, el volcán Popocatepetl es uno de los volcanes más activos de México, al realizar los modelos eruptivos nos ayudan a comprender, entender y predecir la actividad volcánica en diferentes áreas de estudio.

Los análisis geoestadísticos reflejan una correlación inversa entre altura y

gravidad, evidenciando que las áreas a mayor elevación presentan un mayor riesgo de inestabilidad en las pendientes, lo cual representa una amenaza para las comunidades locales. Las herramientas estadísticas aplicadas aportaron precisión al estudio, permitiendo una interpretación detallada de las condiciones de estabilidad del terreno. Así, esta investigación 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 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 ambiental 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 ambientales desde un enfoque multidisciplinario. Los resultados no solo contribuyen al entendimiento del 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.

## Referencias

- [1] 5802-(3) Capra. s.f. "Boletín del Servicio Geológico Mexicano." <http://boletinsgm.igeolcu.unam.mx/bsgm/index.php/180-sitio/>

articulos/cuarta-epoca/5802/6588023capra:~=En%20la%20Sierra%20Norte%20de%20Puebla%20se%20tiene%20una%20situaciÃ³n,en%20sus%20partes%20mÃ¡s%20superficiales.

- [2] Atlas Nacional de Riesgos. s.f. <http://www.atlasnacionalderiesgos.gob.mx/archivo/inestabilidad-laderas.html>.
- [3] CENAPRED. 2024. Reporte del monitoreo del Cenapred. CENAPRED.
- [4] CONAPO. 2010. "Zona Metropolitana 34." [http://conapo.gob.mx/work/models/CONAPO/zonas\\_metropolitanas\\_2010/mapas/ZM34.pdf](http://conapo.gob.mx/work/models/CONAPO/zonas_metropolitanas_2010/mapas/ZM34.pdf).
- [5] GEOEAS (Geographic and Environmental Analysis System). 1992. Versión 3.0. Departamento de Geografía de la Universidad de California.
- [6] Golden Software. 2023. Surfer. Versión 22.0. Golden Software.
- [7] Mapa Digital de México en línea. s.f. <https://gaia.inegi.org.mx/mdm6/?v=bGF00jIzLjMyMDA4LGxvbjotMTAxLjUwMDAwLHo6MSxsOmMxMTFzZXJ2aWNpb3N8dGMxMTFzZXJ2aWNpb3M=>.
- [8] Ramos Aguilar, R., Máximo Romero, P., Vázquez García, M. de la C., Martínez Ortiz, A. G., Hernández Andrade, D., y Benítez Ramírez, D. M. (2020). Estudio cartográfico del volcán Popocatepetl, Puebla, México: volumen edificio volcánico, aceleración de la gravidad y zonas de riesgo para la población. *Contactos, Revista De Educación En Ciencias E Ingeniería*, (115), 37 - 52.

- [9] 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*.
- [10] Ramos Aguilar, R., Máximo Romero, P., Narciso Hernández, J., Mirón Morales, M. y 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 Popocatépetl volcano, *Atmospheric and Climate Sciences*, (31), 65-84.
- [11] Ramos Aguilar, R., Máximo Romero, P., Soto Cruz, B., Alcántara Iniesta, S. y 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.