



BUAP

**BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE PUEBLA.**

**FACULTAD DE INGENIERÍA.
COLEGIO DE INGENIERÍA
TOPOGRÁFICA Y GEODÉSICA.**

**TOPOGRAFÍA APLICADA EN EL ESTUDIO DE LA GEOFORMA
DEL COLAPSO ESTRUCTURAL EN EL MUNICIPIO DE SANTA
MARÍA ZACATEPEC, PUEBLA.**

TESIS.

**PARA OBTENER EL GRADO DE LICENCIATURA EN
INGENIERÍA TOPOGRÁFICA Y GEODÉSICA.**

PRESENTA:

DARIAM ROMERO CRUZ.

DIRECTOR:

DR. ROGELIO RAMOS AGUILAR.

CODIRECTORA:

M.I. PATRICIA MÁXIMO ROMERO

PUEBLA, PUE.

NOVIEMBRE 2024



BUAP

Oficio No. SAC/1797/2024

**C. Dariam Romero Cruz -201836289-
Pasante de la Licenciatura en Ingeniería
Topográfica y Geodésica
Presente.**

En atención al Tema de Tesis que puso Usted a consideración de la Coordinación de Área y de esta Secretaría Académica en coordinación con la Dirección de ésta Facultad de Ingeniería, dentro del marco de Titulación por Examen Profesional, como medio de Titulación se dio revisión y se ha autorizado el tema denominado:

"TOPOGRAFÍA APLICADA EN EL ESTUDIO DE LA GEOFORMA DEL COLAPSO ESTRUCTURAL EN EL MUNICIPIO DE SANTA MARÍA ZACATEPEC, PUEBLA"

Por lo anterior hago de su conocimiento que se asigna como Director de Tema al Dr. Rogelio Ramos Aguilar y como Co Directora a la Mtra. Patricia Máximo Romero.

Sin más por el momento, le envío la seguridad de mi consideración más distinguida.

Atentamente

"Pensar bien para vivir mejor"
H. Puebla de Zaragoza 16 de octubre de 2024

M. I. Angel Cecilio Guerrero
Director



M'ACGZ/M'VGL/barv
C.c.p. Archivo

M. I. Angel Cecilio Guerrero Zamora
Director de la Facultad de Ingeniería
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
P r e s e n t e.

El que suscribe: Dr. Rogelio Ramos Aguilar, director del tema de tesis:

“TOPOGRAFÍA APLICADA EN EL ESTUDIO DE LA GEOFORMA DEL COLAPSO ESTRUCTURAL EN EL MUNICIPIO DE SANTA MARÍA ZACATEPEC, PUEBLA”

Presentada por la C. Dariam Romero Cruz -201836289-, pasante del Colegio de Ingeniería Topográfica y Geodésica, y en atención al oficio No. SAC/1797/2024 con fecha de emisión 16 de octubre de 2024, me permito informar a Usted que después de haber revisado cuidadosamente el contenido temático, metodología, redacción y ortografía de la tesis correspondiente, no tengo inconveniente en autorizar la impresión del mismo.

Sin otro particular, le reitero la seguridad de mi más atenta y distinguida consideración.

A t e n t a m e n t e
“Pensar bien, para vivir mejor”
H. Puebla de Z. a de 18 de octubre de 2024



Dr. Rogelio Ramos Aguilar
Director de Tema

D'RRR/BARV
C.c.p. Archivo

ÍNDICE

1.INTRODUCCIÓN.....	5
1.1 Introduction	6
2.JUSTIFICACIÓN.....	7
3.OBJETIVOS	7
3.1 Objetivos generales.	7
3.2 Objetivos particulares.	7
4.HIPÓTESIS.....	8
5.METODOLOGÍA DEL ESTUDIO.....	9
6.TECNOLOGÍA APLICADA	10
7.PROCEDIMIENTOS.....	11
7.1 Procesamiento de imágenes satelitales.....	12
7.2 Vuelo fotogramétrico.	20
7.3 Datos de la georreferencia de la zona.	24
7.4 Estudio de la geoforma de la zona	25
7.5 Cálculo de la pendiente de la zona de estudio.....	28
7.6 Obtención de datos gravimetricos	30
7.7 Obtención del aforo.....	33
7.8 Desarrollo geoestadístico.....	35
8.RESULTADOS.....	38
9.CONCLUSION.....	40
10.REFERENCIAS	41

1. INTRODUCCIÓN.

Topografía aplicada en el estudio técnico, del hundimiento ocurrido el 29 de mayo del 2021, en las zonas agrícolas ubicados en santa maría Zacatepec, del municipio de Puebla, correspondiente a la cuenca hidrológica del Río Alto Atoyac.

También llamado colapso estructural o conocido como “socavón”, se llevó a cabo un estudio de campo, cuyo objetivo es recabar datos generales de la topografía, geomorfología, geología, geohidrología, cartografía y percepción remota del sitio donde se encuentra el colapso estructural y así de este modo descifrar los orígenes y alcance de esta dicha deformación. Los estudios para el levantamiento topográfico se llevaron a cabo con una estación total y vuelo fotogramétrico, con telemetría se realizaron los geológicos y geomorfológicos de la zona, así como también se implementaron los sustentos de la tecnología satelital. Se utilizó programas geoespaciales dirigidos a la aplicación de la geodesia, softwares propios en topografía, para adquirir los modelos en 2d y 3d de la zona estudiada del “socavón”. Para el estudio de campo se adicionó la percepción remota, ya que, por medio de las imágenes procesadas de dicha zona, se pudo conocer e interpretar la combinación de bandas y canales para establecer la cartografía y geología del lugar de estudio. Así mismo para llevar a cabo el estudio fue necesario contar con el conocimiento de datos geoestadísticos, para poder realizar el modelo y simular el gasto hidrológico. Se exhiben propiedades del “socavón” geológicas y geomorfológicas, también modelos cartográficos para la comprender el alcance de lo ocurrido en mencionada locación. La investigación percibe análisis satelitales y exploraciones para comparar los resultados obtenidos.

El “socavón”, depresión del terreno, hundimiento o colapso, es un riesgo para los habitantes y poblaciones de los alrededores que se encuentran colindando, por medio de los estudios es factible que exista un progreso lento de mutación estructural, sobre todo porque se han creado grietas pequeñas superficiales alrededor de la estructura colapsada que apunta a que este fenómeno continuara.

1.1 INTRODUCTION.

Applied topography in the technical study of the collapse that occurred on May 29, 2021, in agricultural areas located in Santa María Zacatepec, in the municipality of Puebla, corresponding to the hydrological basin of the Alto Atoyac River.

Also called structural collapse or known as "sinkhole", a field study was carried out, the objective of which is to collect general data on the topography, geomorphology, geology, geohydrology, cartography and remote sensing of the site where the structural collapse is located and thus decipher the origins and scope of this deformation. The studies for the topographic survey were carried out with a total station and photogrammetric flight, with telemetry the geological and geomorphological studies of the area were carried out, as well as the supports of satellite technology were implemented. Geospatial programs, proprietary topography software, were used to acquire 2D and 3D models of the "sinkhole" area studied. For the field study, remote sensing was added, since, through the processed images of said area, it was possible to know and interpret the combination of bands and channels to establish the cartography and geology of the study site. Likewise, to carry out the study, it was necessary to have knowledge of geostatistical data, in order to create the model and simulate the hydrological flow. Geological and geomorphological properties of the "sinkhole" are exhibited, as well as cartographic models to understand the scope of what happened in said location. The research perceives satellite analysis and explorations to compare the results obtained.

The "sinkhole", depression in the ground, subsidence or collapse, is a risk for the inhabitants and populations of the surrounding areas that are adjacent; through the studies it is feasible that there is a slow progress of structural mutation, especially because small superficial cracks have been created around the collapsed structure that indicates that this phenomenon will continue.

2. JUSTIFICACIÓN.

El presente estudio topográfico y geoespacial del colapso estructural en Santa María, en mayo del 2021, es necesario para contextualizar los factores geológicos y geomorfológicos que causaron y continúan afectando el agujero. Dado que se encuentra localizado en un sistema hídrico y en tierras de cultivos, es imprescindible aprovechar herramientas sofisticadas como estaciones totales, drones y la percepción remota para recopilar datos fiables y simular el comportamiento y cambios del agua y tierra en la zona afectada. No solo la metodología técnica permitirá comprender mejor el desarrollo de este fenómeno, si no también reducir la exposición a riesgos para las comunidades de la región y tomar medidas responsables.

3. OBJETIVOS.

3.1 Objetivos generales.

- Determinar las causas, orígenes y características del colapso estructural en Santa María Zacatepec, utilizando técnicas topográficas, geomorfológicas y geohidrológicas para comprender su principio y evolución.
- Evaluar el impacto y los riesgos geológicos que representa el socavón para las comunidades cercanas, con el fin de identificar posibles avances futuros y medidas de mitigación.

3.2 Objetivos particulares.

- Desarrollar modelos geoespaciales en 2D y 3D mediante el uso de tecnologías avanzadas como fotogrametría, percepción remota, para simular y analizar la dinámica del socavón.
- Estudiar la evolución geomorfológica y geohidrológica del socavón a través de imágenes satelitales y la combinación de bandas, identificando los procesos responsables de la deformación del terreno.

- Realizar modelos matemáticos para la obtención del AFORO, datos gravimétricos y geoestadísticos, que permitan analizar los cambios presentados a lo largo del tiempo.

4. HIPÓTESIS.

El hundimiento ocurrido en santa maría Zacatepec fue presuntamente causado por una combinación de factores geológicos y humanos, específicamente la infiltración de agua subterránea, el debilitamiento de la capa del subsuelo debido a micro fallas tectónicas, la sobreexplotación de un suelo agrícola continuo, junto con las lluvias torrenciales de temporada.

Además, es importante destacar que el mismo fenómeno continúe evolucionando y ampliándose o creando nuevos hundimientos con el tiempo, debido a la naturaleza inestable del terreno y al déficit hídrico en la zona.

El estudio busca demostrar que la interacción entre la actividad humana y los procesos naturales, fueron clave en la formación del “socavón”.

5. METODOLOGÍA DEL ESTUDIO.

En el estudio realizado, se emplearon plataformas satelitales con datos telemétricos como fueron Sentinel -2 L2A y Landsat, para la comparación de las imágenes procesadas, además del manejo de equipo estación total y software para el modelado en 2d y 3d, y para el procesamiento de la información recabada.

Las coordenadas utilizadas en el estudio son de naturaleza geográfica y UTM. Se realizaron mediciones principales empleando un total de 4 puntos de referencia, con el fin de facilitar el análisis gravimétrico, hidrogeológico y geoestadístico.

Durante las actividades de campo, se empleó un equipo que permitió definir las distancias medidas a lo largo de la línea utilizando una plomada láser. Para obtener la curva tangente a la dirección de la gravedad en cada punto, se utilizó un software especializado de INEGI, aplicando así los modelos matemáticos propuestos.

Mediante este estudio, se procedió a calcular las reducciones de aire libre y Bouguer para determinar sus concernientes gravedades y anomalías. Además, se llevó a cabo el cálculo de la fuerza del agua mediante la evaluación de 4 puntos ubicados en el perímetro del "socavón", utilizando como modelo ideal una corriente intermitente dentro del mismo.

El procesamiento de imágenes satelitales reveló diversas características en los alrededores del "socavón". Se fusionaron las bandas y canales de los sensores de diferentes satélites, cuyos datos se emplearon para describir algunas particularidades de la región, como, por ejemplo, su condición como una zona extensa de cultivos, con suelos blandos y una geología predominante de roca volcánica. Para el análisis geológico, geomorfológico y del uso del suelo, se utilizaron datos multitemporales recopilados por las plataformas satelitales y estudio de campo.

6. TECNOLOGÍA APLICADA.

Se usaron varios equipos y herramientas especializadas para realizar el estudio tanto en el campo como en gabinete. Se empleó equipo topográfico y geohidrológico en el campo para recopilar datos. Después, se usaron diferentes programas de software para modelado, análisis geoestadístico y matemático en el gabinete. Se utilizan los programas Global Mapper, Snap y MultiSpec. El procesamiento y observación de los datos reunidos se basaron en gran medida en estas herramientas, las cuales también agilizaron la creación de modelos y visualizaciones para una interpretación precisa de los resultados. Se utilizaron imágenes satelitales de diferentes constelaciones, como Landsat, para adquirir datos y procesarlos. Observando cambios en la superficie terrestre a diferentes escalas espaciales y temporales, estas imágenes brindaron información crucial para el estudio. La combinación de datos de estas constelaciones permitió una cobertura más completa y una comprensión mejorada de las características del área de estudio.

En las visitas a la zona de estudio se utilizó una estación total LEICA TS10, con prisma y plomada láser, precisión de 5 segundos, medición de hasta 500 metros de alcance sin prisma, distanciómetro con prisma de hasta 3,500 metros, (figura 1).

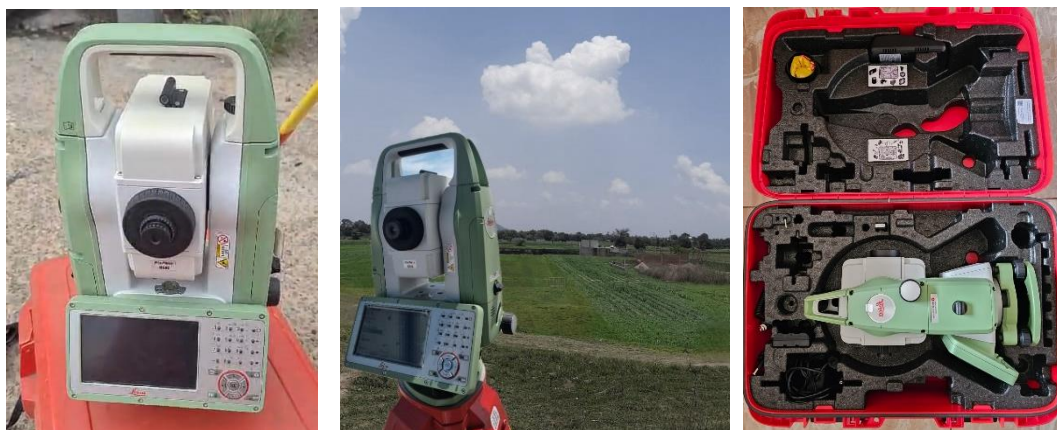


Figura 1. Estación Leica TS10.

También se utilizó GPS GARMIN 65S multi-band con capacidad de conectarse a cinco sistemas GNSS simultáneamente sensores (GPS, GLONASS, Galileo, QZSS e IRNSS), al contar con tecnología de multibanda, el dispositivo no está limitado a la cantidad de “canales de navegación”, permitiendo la conexión a múltiples constelaciones satelitales, (ver figura 2).



Figura 2. GPS GARMIN 65S multi-band.

7. PROCEDIMIENTOS.

Se procedió al cálculo del área superficial del colapso estructural o hundimiento para determinar el gasto del agua que fluye dentro del mismo. Para llevar a cabo este estudio, se utilizaron modelos geométricos y topográficos, obteniendo así la media del área, la cual resultó ser de 11,281.46 m².

Además, se realizó la relación entre el modelo del geoide terrestre y el elipsoide terrestre, y se llevaron a cabo la interpretación de datos geoestadísticos, así como modelos de riesgo geomorfológicos en dos y tres dimensiones (2D y 3D) para su posterior representación gráfica e interpretación de resultados.

7.1 PROCESAMIENTO DE IMÁGENES SATELITALES.

La percepción remota es una disciplina basada en ciencia y tecnología que permite desarrollar, capturar, procesar y analizar imágenes, junto con otros datos físicos de la Tierra, obtenidos desde sensores en el espacio, aerotransportados y que capturan datos de mediciones (Centro de Investigación de Ciencias de Información Geoespacial, 2021).

Se realizó la investigación de la región mediante el uso de técnicas de percepción remota, las cuales involucran el análisis de imágenes satelitales, obtenidas principalmente a través del servicio COPERNICUS Y USGS. Mediante el empleo de software especializado como SNAP, Global Mapper, Surfer y MultiSpec se aplicaron para calcular las dimensiones del área en estudio desde su colapso hasta su configuración actual. También se analizaron las propiedades del suelo utilizando la combinación y examen de distintas bandas de las imágenes.

Los componentes básicos de la percepción remota incluyen: la fuente de iluminación, el entorno geográfico, la escena observada, el sensor remoto, la plataforma de observación y el sistema de procesamiento. colaboran tanto cualitativa como cuantitativa los datos brindados por el sensor remoto acerca de la escena observada. Esta información abarca detalles del paisaje y datos de campo, obtenidos mediante inspección directa en varios puntos específicos de la escena. El propósito de esta evaluación es comparar y confirmar la precisión de los datos recopilados previamente a distancia.

Al inicio el colapso no afectó viviendas alrededor, incluso cerca del colapso se encontraba una casa, no obstante, al pasar de los días se registró el colapso de parte de dicha vivienda ya que el diámetro del “socavón” fue incrementando día con día hasta abarcar la estructura colindada, en sus inicios el “socavón” tenía unas dimensiones de la geoforma de diámetro de 126 metros y 45 metros de profundidad. Hasta la actualidad este hundimiento sigue creciendo y causando daños, presentando múltiples grietas en los alrededores de la zona.

La zona se encuentra a 2 220 metros sobre el nivel del mar, (figura 3).

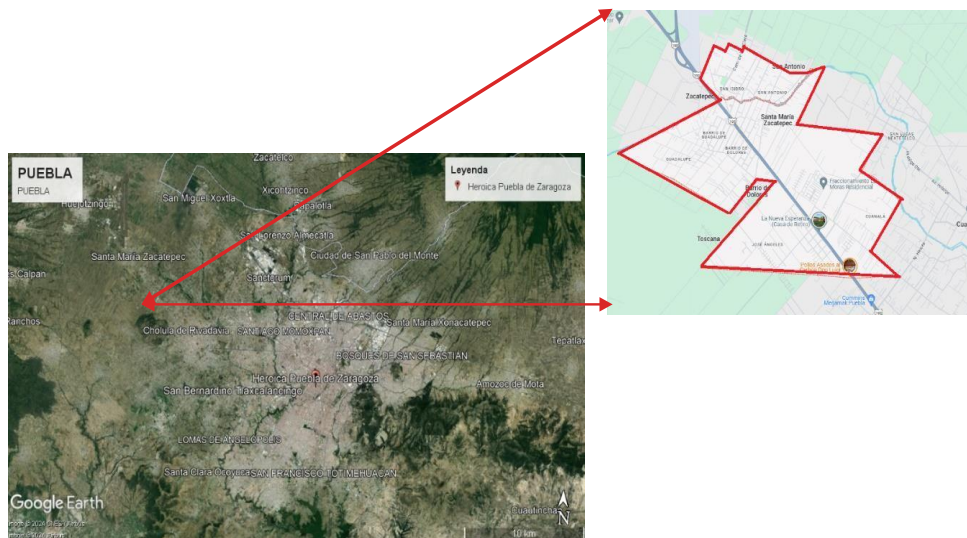


Figura 3. Santa maría Zacatepec, Puebla, Google Earth.

Con Google Earth se delimito la zona de estudio requerida para la búsqueda de las imágenes satelitales con mayor precisión, realizando un polígono de 4 puntos con el área de interés, (figura 4).

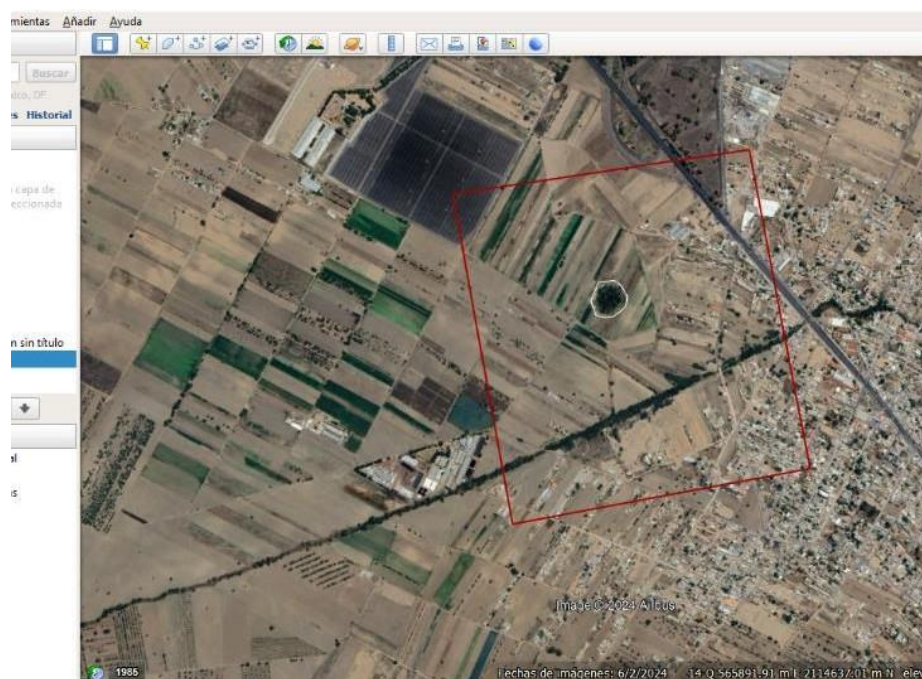


Figura 4. Delimitantes del polígono y coordenadas UTM de la zona de estudio.

PUNTOS	COORDENADA X	COORDENADA Y
1	565346.57 m E	2115219.53 m N
2	565555.58 m E	2114131.12 m N
3	566535.25 m E	2114315.82 m N
4	566336.94m E	2115371.50 m N

Tabla 1. coordenadas UTM de la zona de estudio.

Las imágenes satelitales fueron procesadas utilizando los softwares Global Mapper y SNAP. Las imágenes que se adquirieron por Sentinel-2 L2A, con georreferencia al sistema de proyección UTM, zona 14; se integraron para llevar a cabo la combinación de bandas se empleó la técnica de pansharpening, también conocida como refinamiento pancromático. Esta técnica permite fusionar una imagen pancromática de alta resolución con una imagen multibanda de baja resolución. El resultado es una imagen compuesta que conserva los datos multibanda (RGB), pero con mayor resolución en los detalles visuales.

Posteriormente se realizó el procesamiento de las imágenes y combinación de bandas desde el software SNAP (Sentinel Application Platform), para esto se llevó a cabo una serie de pasos que permiten procesar y visualizar imágenes satelitales con diferentes combinaciones espectrales. Por este medio también se llevó a cabo el recorte de las imágenes para un resultado con mayor exactitud, (figura 5).

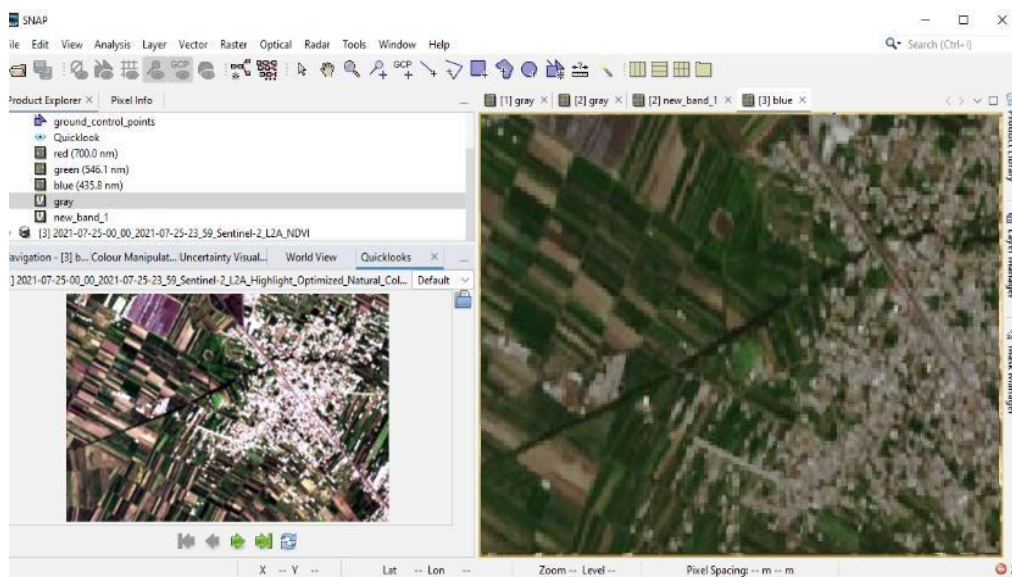


Figura 5. Procesamiento de imágenes en SNAP (Sentinel Application Platform).

En la figura 6, muestra el color natural, se puede observar el socavón a solo 2 meses del colapso, durante el periodo próximo al colapso se presentaron múltiples precipitaciones que pudieran generar diversas filtraciones y variaciones en el terreno del hundimiento provocando esto una rapidez en sus alteraciones, aunque a simple vista en la fotografía no se contempla ninguna anomalía a sus alrededores.



Figura 6. Color natural, R = Banda 4, G = Banda 3, B = Banda 2, 25 de julio de 2021.

En la figura 7, se realizó la combinación de bandas color natural y falso color infrarrojo, se muestra un aumento de vegetación a los alrededores debido a las precipitaciones en la zona, originando esto el acrecentamiento de dimensión sobre el colapso.



Figura 7. Combinación de color natural e Infrarrojo falso color, R = Banda 8, G = Banda 4, B = Banda 3. 25 de julio de 2021.

En la figura 8, se muestra el color natural, a un año del hallazgo de el “socavón”, el cual creció hasta consumir por completo la vivienda que se encontraba a un extremo de la zona afectada, dicha propiedad colapso a pocos meses del hundimiento.



Figura 8. Color natural, R = Banda 4, G = Banda 3, B = Banda 2, 10 de julio de 2022.

En la figura 9, mediante las combinaciones de bandas se expone un aumento de dimensión del socavón, causado por el incremento de las lluvias en la zona que ha erosionado la superficie. En el lado derecho de la superficie se puede observar la formación de una nueva hendedura.



Figura 9. Combinación de color natural e Infrarrojo falso color, R = Banda 8, G = Banda 4, B = Banda 3. 10 de julio de 2022.

En la figura 10, se presenta una imagen en color natural tomada dos años después del colapso, en la cual se observa el aumento considerable en la superficie afectada con el paso del tiempo. La deformación en la parte derecha creció significativamente, probablemente debido a las intensas lluvias que se presentan en la zona.



figura 10. Color natural, R = Banda 4, G = Banda 3, B = Banda 2, 15 de julio de 2023.

La figura 11, muestra una vegetación densa, representada en tonos rojos, mediante la combinación de bandas en Infrarrojo falso color. Esto se debe a que la zona de estudio se encuentra en una región con altos índices de precipitación y escorrentías.

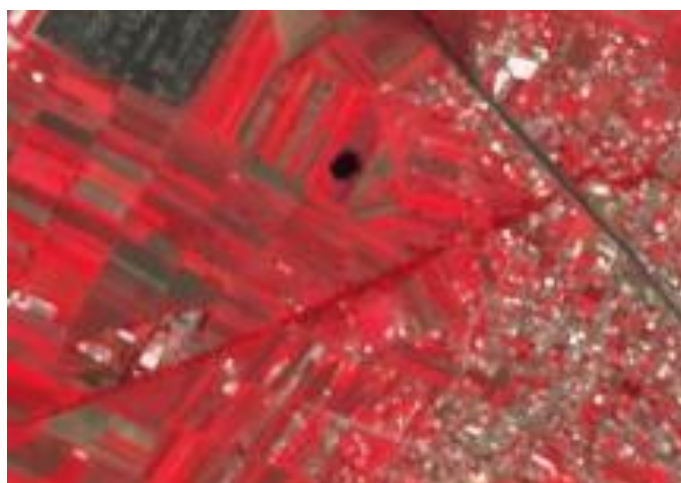


Figura 11. Combinación de color natural e Infrarrojo falso color, R = Banda 8, G = Banda 4, B = Banda 3. 15 de julio de 2023.

En la figura 12, se observa un cambio significativo en la vegetación, causado por la escasez de lluvia que se registró en los primeros meses de 2024. La falta de precipitación provocó la formación diversas grietas en los alrededores de la zona de estudio. Además, se pueden ver sedimentos en el interior, lo que indica que el socavón continúa expandiéndose hasta la fecha.

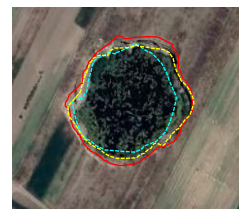


Figura 12. Color natural, R = Banda 4, G = Banda 3, B = Banda 2. 25 de mayo de 2024.

En la figura 13, se puede apreciar el cambio en la vegetación, pasando de un rojo intenso, que representaba una mayor densidad, a un tono rosado, indicando una vegetación menos densa. Este cambio ocurrió durante los meses en los que se presentó la sequía.



Figura 13. Combinación de color natural e Infrarrojo falso color, R = Banda 8, G = Banda 4, B = Banda 3. 25 de mayo de 2024.

Las figuras 14,15,16 y 17 muestran la zona de estudio en color natural a lo largo de los años, desde el momento en que se presentó la anomalía geológica o hundimiento. El estudio, basado en imágenes satelitales, abarca desde julio de 2021, hasta mayo de 2024. Se puede apreciar como la región ha sido impactada por el cambio climático y las sequias recurrentes, lo que ha provocado una reducción progresiva en la vegetación. Esta región, conocida por su abundante vegetación y escorrentías del rio Actiopa, muestra en el 2024 una mayor afectación en sus alrededores.



Figura 14. 25 de julio de 2021.



Figura 15. 10 de julio de 2022.



Figura 16. 15 de julio de 2023.



Figura 17. 25 de mayo de 2024.

7.2 VUELO FOTOGRAMÉTRICO.

Se realizó un vuelo fotogramétrico con un dron Dron DJI Phantom 3 Pro, en la zona de estudio para conocer a detalle las actualizaciones que ha tenido el “socavón”. Se trazo un Plan de vuelo fotogramétrico que consistió en 6 líneas de vuelo, que cubrieron 216m x 362m a una altura de 60m y una velocidad de 5.8 m/s, (ver figura 18).



Figura 18. Trazo de vuelo fotogramétrico.

Los datos e imágenes conseguidos mediante el vuelo fotogramétrico fueron procesadas por la aplicación pix4dcapture, que permite generar la ortofoto requerida para el estudio, como primer lugar se lleva a cabo la descargar de las 146 imágenes obtenidas, delimitando así el área de interés, como el centro del colapso estructural, (ver figura 19).

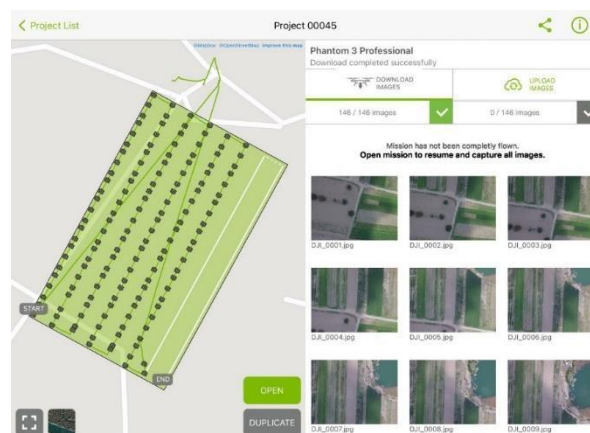


Figura 19. Mosaico de fotos obtenidas.

Al ingresar las 146 imágenes en la aplicación, comienza el procesamiento de nube de puntos y la malla, para generar el mosaico de fotos y de esta manera generar la ortofoto, como se muestra en la figura 20 y 21.

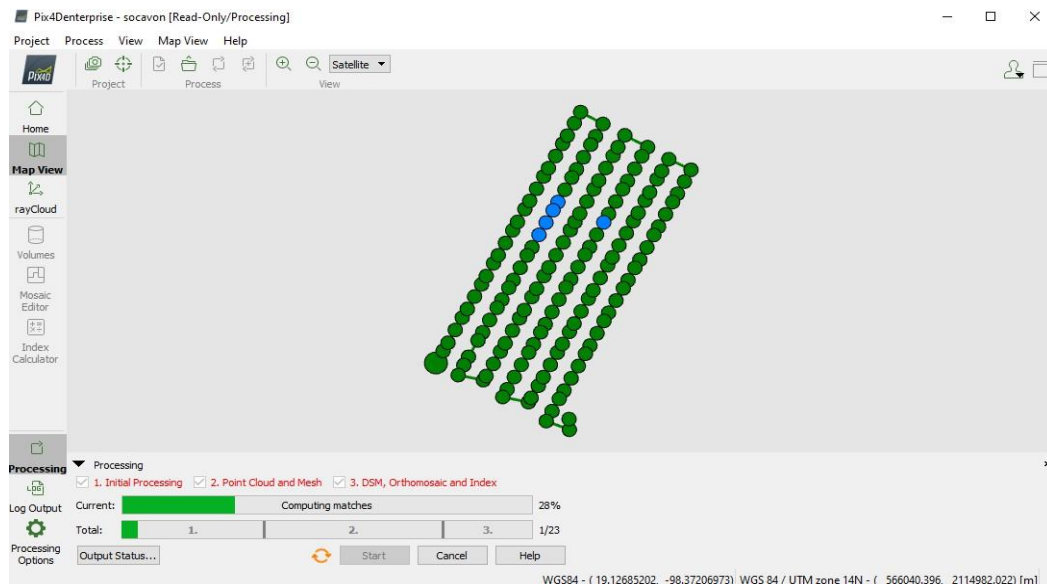


Figura 20. Procesamiento de nube de puntos en pix4dcapture.

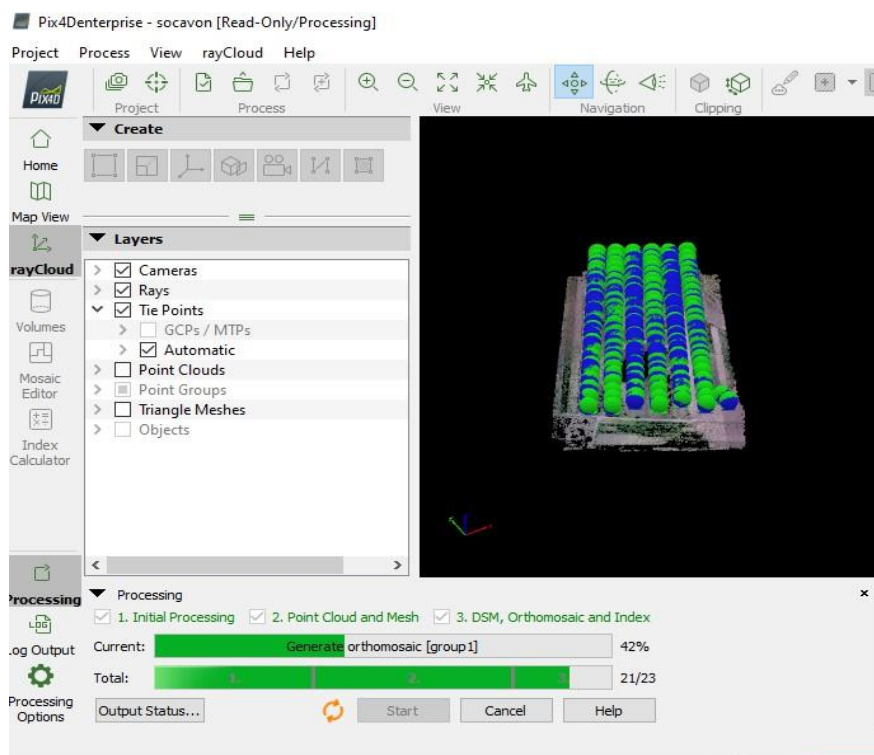


Figura 21. Procesamiento de orto mosaico en pix4dcapture.

En las figuras 22 y 23, se puede observar la creación de la orto imagen a partir del proceso y finalización de la nube de puntos.

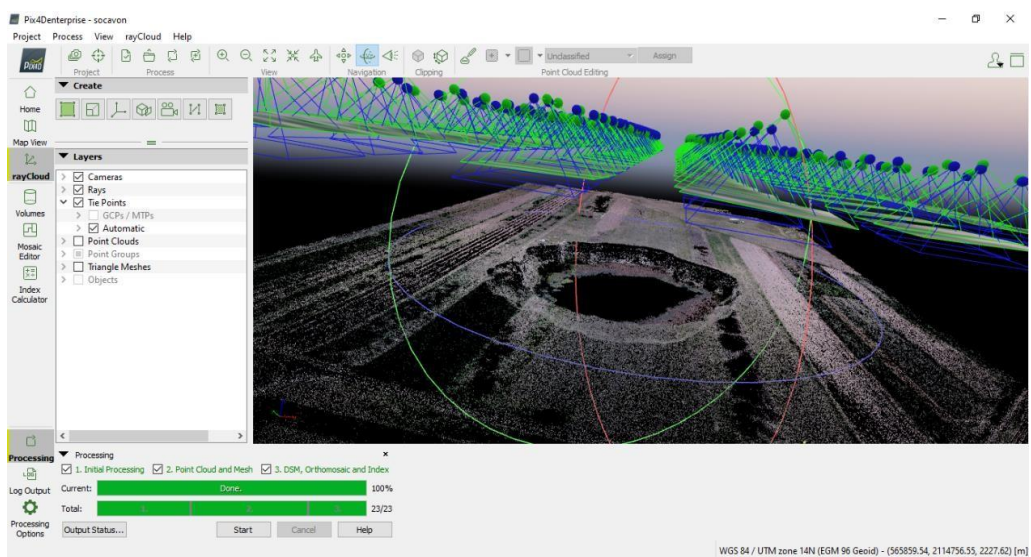


Figura 22. Creación de imagen del socavón, mediante nube de puntos.

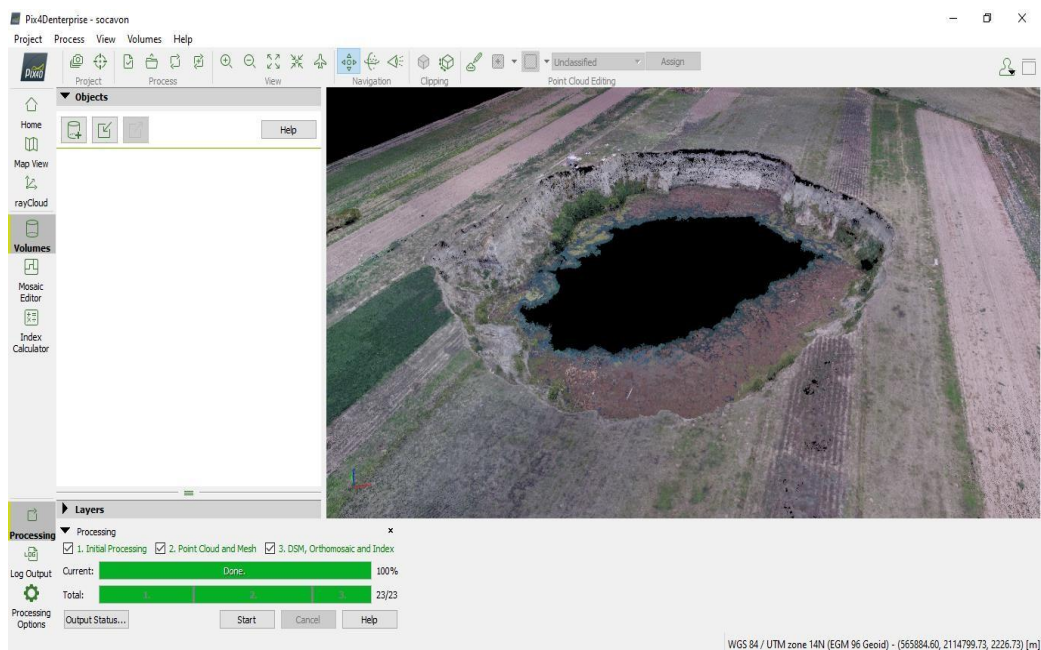


Figura 23. Obtención de la ortofoto del socavón en pix4dcapture.

En la figura 24, se muestra la digitalización terminada del socavón para conocer sus dimensiones, con un área interna promedio de 34 118.94 m², obtenida mediante el vuelo de dron realizado previamente.



Figura 24. Imagen del socavón obtenida mediante el vuelo de dron y procesamiento en pix4dcapture.

Los datos que obtuvimos del procesamiento fue un mapa de profundidad, donde podemos observar el cambio que se ha presentado, alcanzando un aproximado de 45 a 50 metros de profundidad, (figura 25).

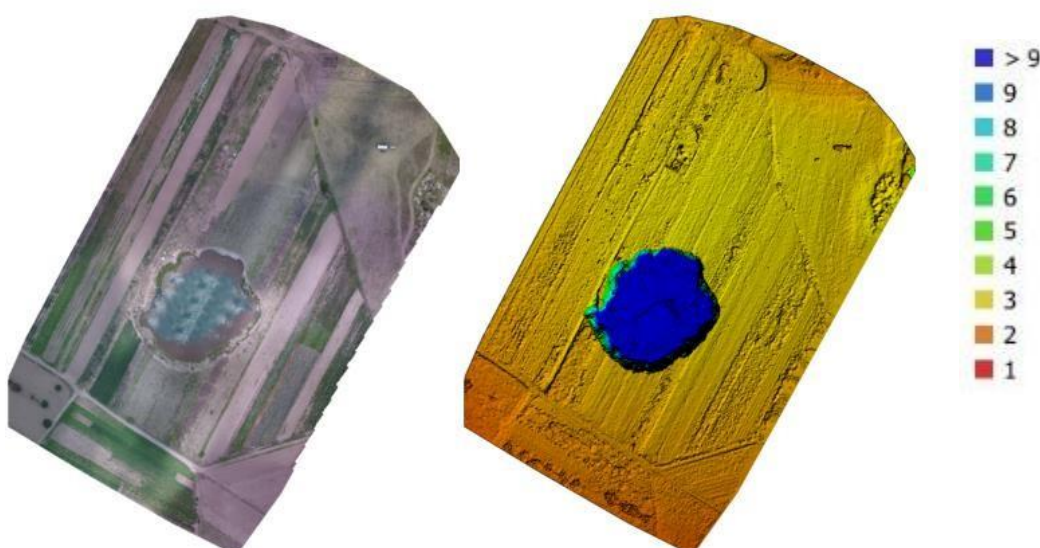


Figura 25. Mapa de profundidad realizado por pix4dcapture.

7.3 DATOS DE LA GEORREFERENCIA DE LA ZONA.

Se usó la metodología del Centro Internacional de Modelos Globales Terrestres (ICGEM) para este estudio, con el fin de obtener información sobre modelos de gravedad terrestre. El IGFS de la IAG coordina este centro.

Se empleó especialmente el modelo EIGEN-6C4 europeo mejorado de la gravedad terrestre, que es conocido como la cuarta versión de este modelo. La combinación de datos de los satélites LAGEOS, GRACE y GOCE en este modelo proporciona una de las aproximaciones más precisas del campo real de gravedad. Su alta precisión se debe a la combinación de mediciones satelitales, terrestres y altimétricas derivadas del campo gravitatorio.

El análisis gravimétrico y la comprensión del comportamiento del terreno en el área de estudio se basaron fundamentalmente en este modelo,(tabla 2).

Scale:	1.00000000 (Meters)
Projection:	Universal Transverse Mercator (UTM)
Datum:	World Geodetic System 1984
Conversion Target:	WGS84
Ellipsoid:	WGS 84
Central Latitude:	0.00000000
Central Longitude:	-99.00000000
Central Scale Factor (K0):	0.99960000
Semiminor Axis:	6356752.3142m
Semimajor Axis:	6378137.0000m
Inverse Flattening(1/f):	298.25722356
Prime Meridian Shift:	0.00000000 (Greenwich)
Conversion Method:	None
Warp:	None
Projection in Southern Hemisphere:	False

Tabla 2. Datos geográficos aplicados en la zona estudiada para desarrollos matemáticos y geoestadísticos.

En este estudio, se realizó la delimitación precisa del área que abarca el "socavón" y la zona de riesgo mediante la combinación de instrumentos de medición de campo y telemétricos. Gracias a este enfoque, pudimos recopilar información detallada y fiable sobre la amplitud de la zona de interés. En el proceso de recopilación de información, fue crucial definir una línea base y puntos estratégicos de referencia. Estos elementos sirvieron como una base sólida para recopilar datos y garantizar la consistencia en las mediciones realizadas.

Los números promedio obtenidos del hundimiento son: diámetro mayor 130.1 metros, diámetro menor 125.3 metros y profundidad 44.5 metros.

La disposición de la línea base y los puntos de referencia también permitieron el procesamiento adecuado de las imágenes satelitales, así como su modelación posterior tanto en 2D como en 3D.

7.4 ESTUDIO DE LA GEOFORMA DE LA ZONA.

La geomorfología se centra en la investigación de las distintas configuraciones terrestres, incluyendo relieves, topografía y geoformas, las cuales nos brindan evidencia sobre los procesos naturales o antrópicos y el grado de crecimiento que ha experimentado una determinada área, en este caso el colapso estructural "socavón". En el área de estudio, se observa de primer lugar un relieve plano, que muestra características distintivas del intemperismo, como el acto del viento, la lluvia y la radiación solar, factores que han favorecido a su formación y configuración.

En la zona, la geoforma se distingue por tener pliegues anticlinales y sinclinales que han generado múltiples fallas en una región de naturaleza volcánica. La formación de relieves o pliegues se originan debido a la interacción dinámica de la corteza terrestre. El río Actiopa, se ubica al sur, a una distancia de 442.44 metros en línea recta desde el punto central del colapso conocido como "socavón", (figura 26).

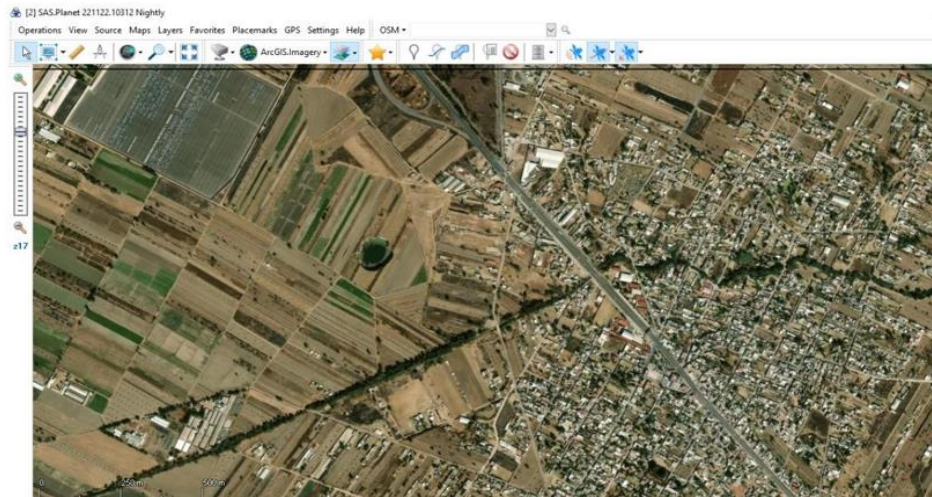


Figura 26. cause del rio Actiopa. SAS planet.

A pesar del colapso ocurrido, las alteraciones generadas en la zona son muy pocas y el proceso geomorfológico en sus alrededores continúa desarrollándose de la misma manera, (ver figura 27 y 28).



Figura 27. 1. **Entorno General:** Se muestra un paisaje rural con poca vegetación, típica de campos abiertos. Se observan una extensión considerable de terreno llano. **Pendiente e Inclinación:** El terreno parece ser bastante plano, sin inclinaciones. Esto indica que la pendiente del área es baja. **Uso del suelo y Vegetación:** dado a la baja y dispersa vegetación del área, se puede suponer que los cultivos agrícolas o pastizales es el uso principal del suelo. **Montañas en el Fondo:** al horizonte, se puede observar que está conformado por las montañas de la sierra nevada y se logra apreciar el volcán Popocatepetl. 2. **Características Geomorfológicas:** **Superficie Plana:** la principal característica geomorfológica es la planicie. Posiblemente sea un área de acumulación de sedimentos o poca erosión. **Formaciones Montañosas:** las montañas apuntan a presencia de actividad tectónica y volcánica en la región.



Figura 28.1. **Entorno general:** se muestra una extensión de terreno predominante plano y vegetación baja, se puede observar que el área es utilizada para la agricultura. **Pendiente o inclinación:** la zona es bastante plana, con una baja inclinación y pendiente visible, lo cual es muy común en las llanuras. **uso del suelo y vegetación:** la vegetación baja y dispersa, indican que el área se utiliza para cultivos generalmente de cereales o pastos. **2. Características geomorfológicas: superficie plana:** su geomorfología más destacable es la planicie de la zona, por su falta de grandes elevaciones o depresión. **Entorno vegetal y estructuras:** al fondo se puede observar arbustos y arboles más grandes que pueden indicar los límites de campos agrícolas o corrientes hidrológicas.

La edafología de la zona de estudio muestra unos suelos fértiles y óptimos para la agricultura, (ver figura 29). La textura del suelo se presenta entre franco arcillosa y franco arenoso, lo que podría proporcionar un buen recuento entre el drenaje y la capacidad de retención de nutrientes. La vegetación existente y prácticas agrícolas parece indicar la aun fertilidad del suelo.



Figura 29. **1. Tipo de suelo:** la agricultura en la zona apunta a suelos con buena capacidad de cultivo, los colores del suelo marrones y marrón oscuro usualmente se presentan debido a la

materia orgánica presente, que sugiere tierras fértiles en su uso agrícola. **2. Estructura del suelo:** los suelos de esta área muestran una compactación debido al uso de maquinaria agrícola. **3. Fertilidad del suelo:** mediante la fertilización esta región suele ser enriquecida con nutrientes, para mantener el constante rendimiento de los cultivos. **4. Condiciones ambientales:** el clima en la región favorece a la formación del suelo agrícola por sus temperaturas moderadas y templadas.

7.5 CÁLCULO DE LA PENDIENTE DE LA ZONA DE ESTUDIO.

En la zona de estudio fue utilizada la siguiente fórmula matemática:

$$\text{Pendiente} = \frac{\text{DIFERENCIA DE ALTURAS}}{\text{DISTANCIA HORIZONTAL}}$$

Fue crucial calcular la pendiente para determinar la inclinación media de la estructura geohidrológica y geomorfológica del colapso. Para ello, se dividió el área en cuatro partes orientados al norte, sur, este y oeste. Por consiguiente, se realizaron lecturas satelitales para calcular la pendiente media de la estructura analizada, lo cual permitió evaluar si la pendiente se consideraba un riesgo, (figura 30).

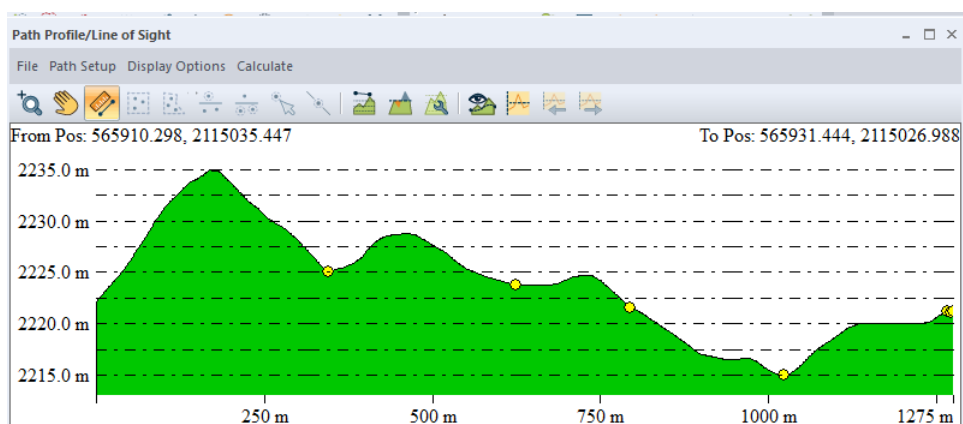
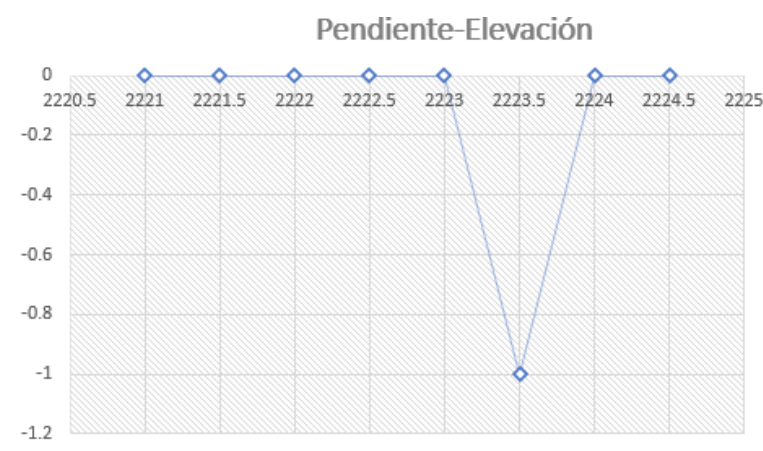


Figura 30. Cálculo de pendiente realizado con Global Mapper.

En la gráfica 1, se puede observar la elevación y la pendiente, de esta manera identificar los cambios que ha presentado el colapso “socavón”.



Grafica 1. Estudio de elevación y pendiente a partir de la cota 2220, presentando la primera anomalía en la cota 2223. Entre la cota 2223 y la 2224, la zona de estudio consta de un desnivel de un metro.

Con una imagen extraída de Google Earth se determinaron en Global Mapper, las curvas de nivel en la zona de estudio para conocer la estimación de pendiente y elevación. Se realizaron la observación de las curvas de nivel a 5 y 2 metros, en la zona estudiada, (ver figura 31 y 32).

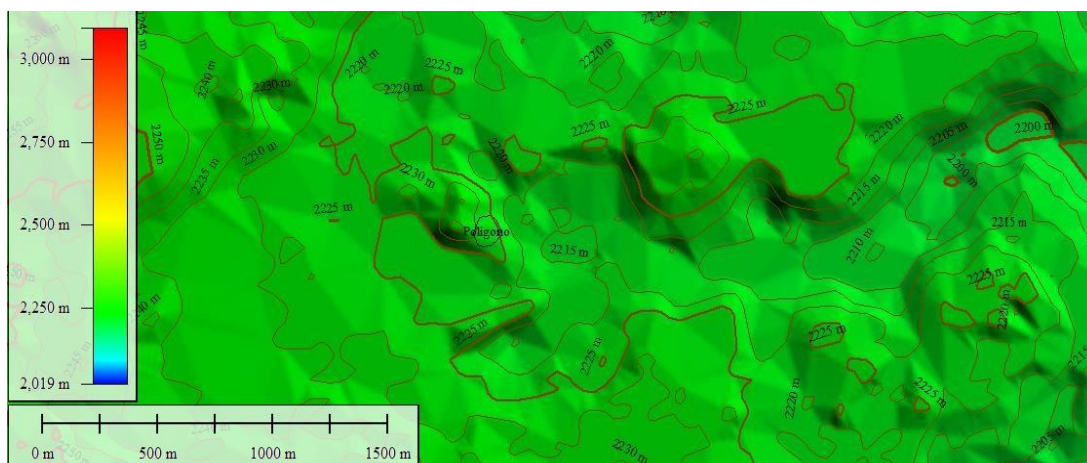


Figura 31. Imagen de Google Earth (06/02/2024), se realizaron las curvas de nivel a 5 metros en la zona de estudio, por medio de Global Mapper.

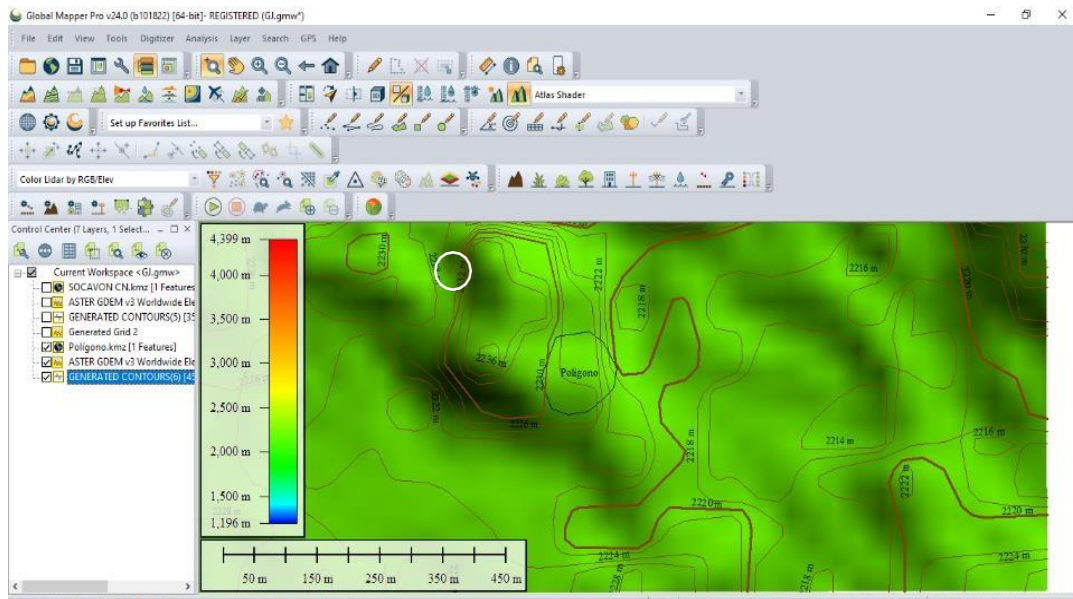


Figura 32. Imagen de Google Earth (06/02/2024), se realizaron las curvas de nivel a 2 metros en la zona de estudio, por medio de Global Mapper.

7.6 OBTENCIÓN DE DATOS GRAVIMETRICOS.

Es importante resaltar que, en términos prácticos, los elipsoides de referencia como el elipsoide singular y el WGS84 son casi iguales. Esto se debe a que se piensa que el elipsoide de revolución es una aproximación aceptable de la forma de la Tierra para calcular la gravedad. La base de esta aproximación es la fórmula de gravedad normal internacional adoptada por la Asociación Internacional de Geodesia (IAG). Siguiendo el modelo matemático.

Aplicando igualmente el modelo de reducción de aire libre de mgal (milésima de gal, que equivale a 1 cm/s^2).

ϕ = latitud y γ la gravedad normal dada en m/s^2 .

$$\gamma = 9.780318(1 + 0.0053024\text{sen}^2\phi - 0.0000058\text{sen}^22\phi).$$

Basado en los principios de los modelos gravimétricos para evaluar el riesgo geológico, es importante tener en cuenta que la gravedad experimenta principalmente variaciones en dirección vertical. Por lo tanto, para obtener un valor de gravedad consistente, es necesario ajustar las mediciones tomadas en la superficie terrestre al valor correspondiente en el geoide. Este ajuste se realiza mediante lo que se conoce como reducción por aire libre, que se calcula utilizando un modelo matemático, donde H es la altura y F la reducción por aire libre en mgal (milésima de gal, que equivale a 1 cm/s^2).

$$F = 0.000003086 * H.$$

modelo matemático.

$$\Delta g_{AL} = g_{obs} + F - \gamma.$$

Posteriormente se aplicó el modelo de reducción de Bouguer, utilizando la densidad ρ cuyo valor es $\rho = 2.67 \text{ gr/cm}^3$.

$$A_B = 0.1119 * H.$$

Igualmente se aplicó el modelo para obtener la anomalía de gravedad de Bouguer, modelo matemático.

$$\Delta g_B = g_{obs} - \gamma - F + A_B.$$

Finalmente, se utilizaron para el desarrollo los modelos matemáticos para calcular las anomalías del aire, aire libre y Bouguer de la zona de estudio los siguientes:

Fuerza gravitatoria de la capa de Bouguer:

$$A_B = 2\pi G\rho h = 0.1119 h \text{ mgals.}$$

Gravedad reducida por Bouguer:

$$g_B = g_{Al} + A_t - A_B.$$

Anomalía de Bouguer:

$$\Delta g_B = \Delta g_{Al} + A_t - A_B.$$

$$\Delta g_P = g + \delta g_F + \delta g_P - \gamma.$$

$$\delta g_F + \delta g_P = 0.1967 \text{ h.}$$

Para el desarrollo de los cálculos, se utilizaron los datos de la tabla 3.

Constantes.	
Masa (M):	5.97E+24
Radio:	6.37E+06
Corrección F:	0.3086
Corrección topográfica:	0
G (gravitación universal)	6.67E-11m/s ²
	6.67433E-06 mgal
	0.0053025
	0.0000058
ρ	2.67cm ³
	0.1119 mgal
	0.1967 mgal

Tabla 3. Datos gravimétricos.

7.7 OBTENCIÓN DEL AFORO.

El caudal o gasto es el volumen de agua que fluye a través de la sección transversal de un cauce en un determinado lapso de tiempo, y se mide en metros cúbicos por segundo (m^3/s).

Para este estudio, se desarrollaron varios modelos geométricos y matemáticos del terreno, considerando una atmosfera con límite de agua en la superficie y un nivel bajo (tabla 4). Para establecer el gasto de la zona de estudio “socavón” se utilizó el siguiente modelo matemático:

$$Q = \frac{CIA}{360} .$$

Q	Gasto en metros cúbicos por segundo.
C = Coeficiente de escorrentía sin dimensiones.	0.30
I = Intensidad de la lluvia en milímetros por hora.	1.12 y 8 (mm/h)
A = Superficie de la cuenca en metros cuadrados.	11,281.46 m^2 (Área promedio superficial del “socavón”) 34 118.94 m^2 (Área promedio interna obtenida del vuelo de dron)

Tabla 4. Datos del gasto.

Los datos recopilados del coeficiente de escorrentía, la intensidad de lluvia y la superficie del cauce se adquirieron por medio del servicio meteorológico nacional (Conagua). Se planteó dos escenarios en uno a niveles catastróficos y en condiciones cotidianas o normales.

En los datos superficiales se observa que el gasto para la intensidad de lluvia baja (normal) es de 10.52 (m^3/s) y para una intensidad catastrófica (alta) es de 75.20 (m^3/s), (tabla 5 y 6).

Estos modelos proporcionaron los siguientes datos:

Gasto (superficial)	
C= Coeficiente escorrentía.	0.30
I= Intensidad lluvia	1.12 (mm/h)
A= Área "socavón"	11,281.46 (m^2)
Q=	10.52 (m^3/s)

Tabla 5. Calculo superficial del mes de junio 2023, de intensidad de lluvia baja.

Gasto (superficial)	
C= Coeficiente escorrentía.	0.30
I= Intensidad lluvia	8 (mm/h)
A= Área "socavón"	11,281.46 (m^2)
Q=	75.20 (m^3/s)

Tabla 6. Calculo superficial del mes de junio 2023, de intensidad de lluvia alta.

En los datos estudiados con función del área interna obtenida mediante un vuelo de dron, se puede observar que el gasto para la intensidad de lluvia baja (normal) es de 31.84 (m^3/s) y para una intensidad catastrófica (alta) es de 227.45 (m^3/s), (tabla 7 y 8).

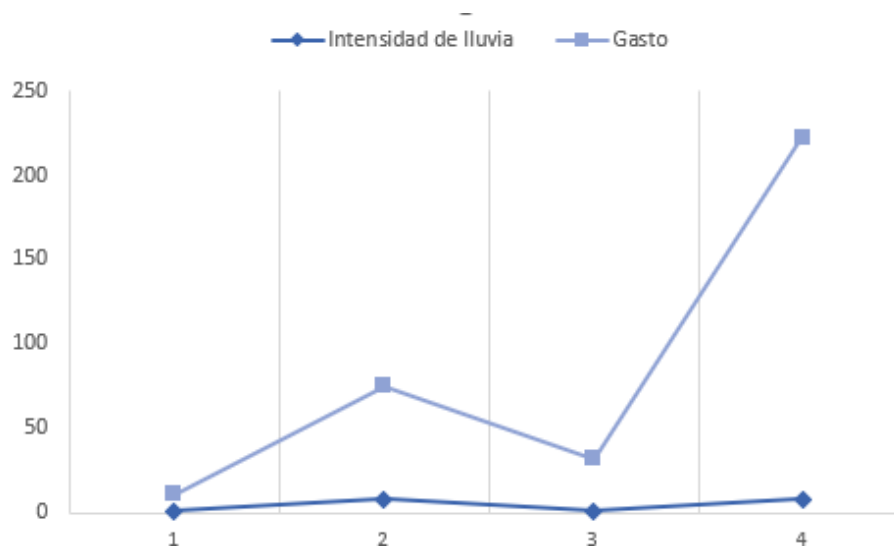
Gasto (interno)	
C= Coeficiente escorrentía.	0.30
I= Intensidad lluvia	1.12 (mm/h)
A= Área "socavón"	34 118.94 (m^2)
Q=	31.84 (m^3/s)

Tabla 7. Calculo interno del mes de junio 2023, de intensidad de lluvia baja.

Gasto (interno)	
C= Coeficiente escorrentía.	0.30
I= Intensidad lluvia	8 (mm/h)
A= Área "socavón"	34 118.94 (m^2)
Q=	227.45 (m^3/s)

Tabla 8. Calculo interno del mes de junio 2023, de intensidad de lluvia alta.

En la gráfica 2, se muestra una representación del gasto y sus cambios debido a la intensidad de lluvia y área.



Grafica 2. Intensidad de lluvia y gasto.

7.8 DESARROLLO GEOESTADÍSTICO.

El estudio de la zona requiere un análisis geoestadístico, el cual permitirá comparar las variables evaluadas. En los estudios de suelos, la geoestadística se define como la rama de la estadística que se especializa en analizar y modelar la variabilidad espacial de fenómenos naturales que tienen una componente geográfica, es decir, aquellos de los que se pueden obtener datos específicos basados en coordenadas.

Para ello, es necesario calcular la desviación estándar (σ) y la covarianza (S_{xy}), cuyos modelos matemáticos se presentan a continuación.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_i^N (X_i - \bar{X})^2}{N - 1}}$$

$$S_{xy} = \frac{\sum (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{N}$$

El coeficiente de correlación (ρ) se calcula utilizando la siguiente ecuación:

$$\rho = \frac{S_{xy}}{S_x S_y}$$

En la tabla 9, se representa el total desarrollo del análisis geoestadístico.

Vértice	Elevación (m)	$X_i - \bar{X}$	$(X_i - \bar{X})^2$
21	2224	0.6667	0.4444
2	2224	0.6667	0.4444
3	2224	0.6667	0.4444
4	2224	0.6667	0.4444
5	2224	0.6667	0.4444
6	2224	0.6667	0.4444
7	2223	-0.3333	0.1111
8	2223	-0.3333	0.1111
9	2223	-0.3333	0.1111
10	2223	-0.3333	0.1111
11	2223	-0.3333	0.1111
12	2223	-0.3333	0.1111
13	2223	-0.3333	0.1111
14	2223	-0.3333	0.1111
15	2223	-0.3333	0.1111
16	2223	-0.3333	0.1111
17	2223	-0.3333	0.1111
18	2223	-0.3333	0.1111
	2223.3333		0.2222

Gravedad	$Y_i - \bar{Y}$	$(Y_i - \bar{Y})^2$	Covarianza
9.7786811086	-0.0001328913	0.0000000176600884102	-0.0000885942
9.7786818133	-0.0001321866	0.0000000174732848268	-0.0000881244
9.7786882187	-0.0001257812	0.0000000158209074487	-0.0000838541
9.7787097032	-0.0001042966	0.0000000108777901276	-0.0000695311
9.7787349615	-0.0000790384	0.0000000062470609785	-0.0000526922
9.7787660317	-0.0000479682	0.0000000023009437995	-0.0000319788
9.7787801882	-0.0000338116	0.0000000011432270800	0.0000112705
9.7788171801	0.0000031802	0.0000000000101135406	-0.0000010601
9.7788167644	0.0000027645	0.0000000000076422767	-0.0000009215
9.7788470371	0.0000330372	0.0000000010914597365	-0.0000110124
9.7788490596	0.0000350597	0.0000000012291806372	-0.0000116866
9.7788681137	0.0000541139	0.0000000029283097110	-0.0000180380
9.7788648640	0.0000508641	0.0000000025871535163	-0.0000169547
9.7788932468	0.0000792469	0.0000000062800695839	-0.0000264156
9.7788984113	0.0000844114	0.0000000071252864807	-0.0000281371
9.7789139294	0.0000999295	0.0000000099859028939	-0.0000333098
9.7789173785	0.0001033786	0.0000000106871356480	-0.0000344595
9.7789239878	0.0001099879	0.0000000120973402116	-0.0000366626
9.778814000		0.0000000069751609393	-0.000034565

Desviación estándar.	0.4714
Coeficiente de correlación.	-0.8779306827
Coeficiente de variación.	0.000008540650
Desviación estándar.	0.0000835174289553383

Tabla 9. resultados geoestadísticos.

8. RESULTADOS.

Dado que la zona de estudio se encuentra en la cuenca del Río Alto Atoyac, esta zona ha soportado un proceso activo de agua subterránea durante décadas, lo que ha influido en sus condiciones hidrológicas. A través de los años, la carga adicional generada por las actividades humanas, así como la sobreexplotación del vital líquido, contribuyeron en gran medida al colapso estructural del terreno.

El estudio permitió determinar la estratigrafía del área afectada, identificando una llanura circundante de aproximadamente 1500 metros como una región de riesgo en tono al “socavón”. Asimismo, el constante flujo de agua, aumentando cada vez más por las fuertes temporadas de lluvias que se dan en la región, sumando el terreno expuesto a cultivos agrícolas formando esto un terreno blando de la zona, lo que sin duda profundizó los daños en la estructura del terreno.

En el estudio se incluyó análisis realizados después del colapso en la zona de Santa María Zacatepec, en el municipio de Puebla, mediante el procesamiento de imágenes satelitales de las fechas 25 de julio de 2021, 10 de julio de 2022, 15 de julio de 2023, y 25 de mayo de 2024. Este análisis permitió detallar el crecimiento de la zona afectada, su perímetro, área y dimensiones, así como observar el cambio en el desarrollo del suelo mediante la combinación de bandas satelitales.

Algunos de los resultados obtenidos hasta el instante del estudio, mediante el uso de imágenes satelitales y modelos matemáticos son los siguientes:

Mediante un proceso de nube de puntos en pix4dcapture se estimó un área interna promedio de 34 118.94 m², también se calculó una profundidad de 45 a 50 metros hasta la fecha.

Los resultados del vuelo de dron, se presentan con fotografías a mayor acercamiento y distinción de la zona estudiada,(ver figura 33 y 34).



Figura 33. Fotografías del “socavón” obtenidas por un vuelo de dron, en ellas se puede observar a mayor detalle los derrumbes, sedimentos y profundidad que presenta el colapso.



Figura 34. Fotografías de los diferentes tipos de suelo que presentan a los alrededores del colapso.

Por medio de estas fotografías se pudo tener un mayor acercamiento a las zonas dañadas, al estudio del suelo, su geomorfología y al cambio notorio que ha presentado el colapso a su alrededor, a través de los años. Se puede detallar los derrumbes que ha presentado el “socavón” que hasta la fecha continúan.

9. CONCLUSION.

La geología en área del colapso demostró ser compleja tras analizar la dinámica terrestre y correlacionarla con modelos geoestadísticos. Tanto fuerzas internas como externas parecen haber influido en su desarrollo a lo largo de los años. Junto a factores como el flujo de agua subterránea, la gravedad y el análisis morfológico, sugieren una historia geohidrológica intrincada bajo la superficie. La morfología de la región muestra características notables durante lo que parece ser mucho tiempo, incluyendo la presencia de una capa freática en la región y la existencia de fallas tectónicas microscópicas, unas activas y otras inactivas. A esto se le suma la explotación agrícola, que con frecuencia no respeta el delicado equilibrio natural del suelo. El terreno muestra signos de haberse transformado gradualmente, moldeado por fuerzas tanto humanas como geológicas a lo largo del tiempo.

El estudio concluye que la zona actúa como receptor de agua subterránea, con la posibilidad de que la ruptura de un acuífero natural haya contribuido a la formación. Por medio de lo sucedido se ha generado un nuevo modelo geomorfológico representado por pequeñas cuevas y conductos hidrológicos que facilitan la entrada y salida del agua en la región. El colapso o “socavón” se debió a un proceso hidrológico de larga duración, es esencial tener en cuenta que el riesgo geológico no se limita únicamente a factores naturales, sino que también es influenciado por las actividades humanas como la extracción de recursos, que contribuyen a la degradación del suelo.

Este estudio, mediante el uso de imágenes satelitales y modelos matemáticos, demostró cómo el colapso ha continuado creciendo y afectando las zonas circundantes con el paso de los años. Es de vital importancia salvaguardar la seguridad del bienestar de las comunidades y comprender los fenómenos geológicos naturales que pueden representar amenazas como en este caso, ese tipo de estudios nos permiten evaluar y mitigar los riesgos asociados.

Actualmente el “socavón” sigue aumentando, presentando nuevas grietas y pequeños hundimientos cerca de la zona afectada.

10. REFERENCIAS.

11. CONAGUA. Servicio Meteorológico Nacional.

<https://smn.conagua.gob.mx/es/>

12. COPERNICUS. EU Space.

<https://dataspace.copernicus.eu/>

13. ICGEM. International Centre for Global Earth Models.

<https://icgem.gfz-potsdam.de/home>

14. INEGI. Cálculo de gasto o caudal.

https://antares.inegi.org.mx/analisis/red_hidro/PDF/CalculoGasto.pdf

15. R Ramos Aguilar, PM Romero, MCV García, AGM Ortiz, Revista de Educación en Ciencias. (2020). Estudio cartográfico del volcán Popocatepetl, Puebla, México: volumen edificio volcánico, aceleración de la gravedad y zonas de riesgo para la población.

[\[PDF\] de uam.mx](#)

16. R Ramos Aguilar, P Máximo Romero, M Ávila Cruz. Revista Geográfica de América Central. (2024). Análisis geocientífico de colapsos estructurales en la ciudad de Juan C. Bonilla, Puebla, México.

https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2215-25632024000100321

17. SIATL. Simulador de flujos de agua de cuencas hidrográficas.

https://antares.inegi.org.mx/analisis/red_hidro/siatl/

18. USGS. Science for a changing world

<https://earthexplorer.usgs.gov/>