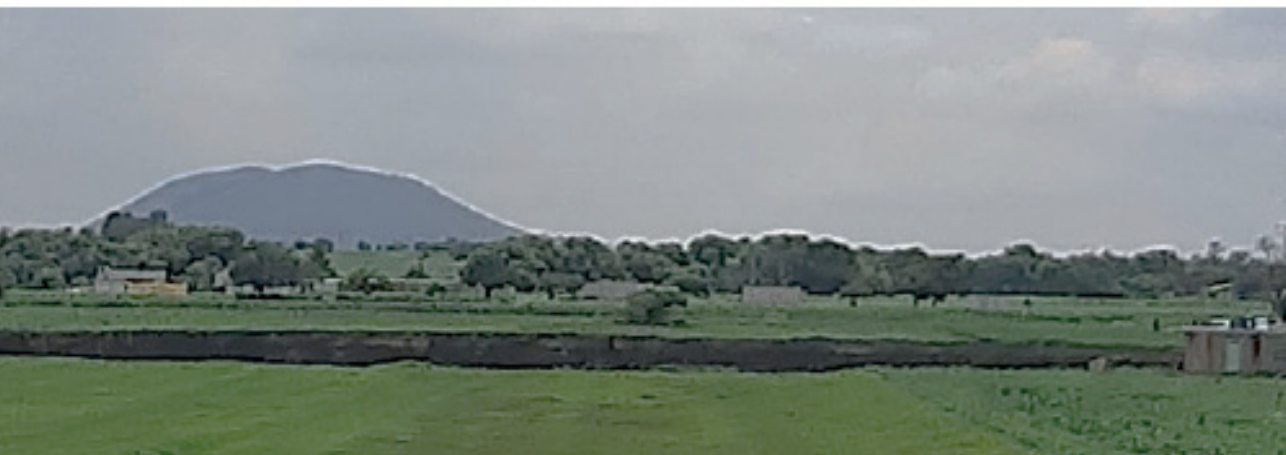


ESTUDIO INGENIERIL TÉCNICO-CIENTÍFICO

DEL SOCAVÓN EN EL MUNICIPIO
DE JUAN C. BONILLA EN EL ESTADO DE PUEBLA



Rogelio Ramos Aguilar



ESTUDIO INGENIERIL TÉCNICO-CIENTÍFICO

DEL SOCAVÓN EN EL MUNICIPIO
DE JUAN C. BONILLA EN EL ESTADO DE PUEBLA

Rogelio Ramos Aguilar

Sergio Salomón Céspedes Peregrina

Gobernador Constitucional del Estado de Puebla

Javier Aquino Limón

Secretario de Gobernación del Estado de Puebla

Gabriela Bonilla Parada

Presidenta del Sistema Estatal para el
Desarrollo Integral de la Familia

María Isabel Merlo Talavera

Secretaria de Educación del Estado de Puebla

Eduardo Castillo López

Presidente de la Junta de Gobierno y Coordinación Política del
H. Congreso del Estado Libre y Soberano de Puebla

María Belinda Aguilar Díaz

Presidenta del Tribunal Superior de Justicia del Estado de Puebla

Victoriano Gabriel Covarrubias Salvatori

Director General del Consejo de Ciencia y Tecnología
del Estado de Puebla

Luis Gerardo Aguirre Rodríguez

Responsable del Área de Publicaciones

Frida Tenorio Espinosa

Aranza Damaris Ortega Contreras

Corrección de estilo

Cinthia Paola Muñoz Jiménez

Diseño editorial y de portada

Primera edición, México, 2023

Publicado por el Consejo de Ciencia y Tecnología de Puebla
(CONCYTEP) B Poniente de La 16 de Sept. 4511,
Col. Huexotitla, 72534. Puebla, Pue.

ISBN: 978-607-8963-05-8

CÓDIGO IDENTIFICADOR CONCYTEP: C-R-2023-12-3

La información contenida en este documento puede ser reproducida total o
parcialmente por cualquier medio, indicando los créditos
y las fuentes de origen respectivas.

Rogelio Ramo Aguilar

Coordinador

Patricia Máximo Romero

Máximo Ávila Cruz

María de los Dolores Ramírez Álvarez

Víctor Galindo López

Lorena Cárdenas López

Argenis Eduardo Morales González

Victoriano Gabriel Covarrubias Salvatori

María de la Cruz Vázquez García

Autores

ESTUDIO INGENIERIL TÉCNICO-CIENTÍFICO

DEL SOCAVÓN EN EL MUNICIPIO
DE JUAN C. BONILLA EN EL ESTADO DE PUEBLA

Rogelio Ramos Aguilar

Las opiniones vertidas en el presente documento son responsabilidad única de las y los autores, y no representa la postura de la institución que edita.

ESTUDIO INGENIERIL TÉCNICO-CIENTÍFICO DEL SOCAVÓN EN EL MUNICIPIO DE JUAN C. BONILLA EN EL ESTADO DE PUEBLA

Rogelio Ramos Aguilar¹, Patricia Máximo Romero², Máximo Ávila Cruz³, María de los Dolores Ramírez Álvarez⁴, Víctor Galindo López⁵, Lorena Cárdenas López⁶, Argenis Eduardo Morales González⁷, Victoriano Covarrubias Salvatori⁸, María de la Cruz Vázquez García⁹



Referencia: Imagen SkySat.

¹ Rogelio Ramos Aguilar, Profesor Investigador, Facultad de Ingeniería, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Puebla, México, rogelio.ramos@correo.buap.mx (autor corresponsal)

² Patricia Máximo, Profesora Investigadora, Facultad de Ingeniería, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Puebla, México, patricia.maximo@correo.buap.mx

³ Máximo Ávila Cruz, Profesor Investigador, Facultad de Ingeniería, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Puebla, México, máximo.avila@correo.buap.mx

⁴ María de los Dolores Ramírez Álvarez, Profesora, Facultad de Ingeniería, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Puebla, México, dolores.ramirez@correo.buap.mx

⁵ Víctor Galindo López, Profesor Investigador, Facultad de Ingeniería, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Puebla, México, victor.galindo@correo.buap.mx

⁶ Lorena Cárdenas López, Becaria del Colegio de ingeniería Topográfica y Geodesia, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Puebla, México, lorena.cardenas@alumno.buap.mx

⁷ Argenis Eduardo Morales González, Becario del Colegio de ingeniería Topográfica y Geodesia, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Puebla, México, argenis.morales@alumno.buap.mx

⁸ Victoriano Covarrubias Salvatori, director del Consejo de Ciencia y Tecnología del Estado de Puebla, Puebla, México, victoriano.covarrubias@puebla.gob.mx

⁹ María de la Cruz Vázquez García, Imágenes Geográficas S.A. de C.V., Guadalajara, México, mayanegui@icloud.com

CONTENIDO

Resumen	i
Abstract	iii
Introducción	1
Desarrollo técnico-científico	3
Procedimientos	4
Cálculo de las anomalías del aire, reducida y de Bouguer	4
Cálculo de la presión atmosférica	8
Modelo global de geopotencial EIGEN-6C4	8
Cartografía geométrica satelital'	10
Análisis e interpretación de imágenes satelitales	15
Estudio geológico y geomorfológico	27
Cálculo del gasto y cartografía	32
Cálculo de la aceleración de la gravedad	36
Cálculo de la fuerza del agua y cartografía	39
Cálculo de la pendiente	41
Análisis geoestadístico	42
Herramientas y equipos utilizados	45
Resultados	47
Conclusiones	50
Referencias	53
Bibliografía	53

RESUMEN

Trabajo apoyado por el Consejo de Ciencia y Tecnología del estado de Puebla.

El estudio se basa en el análisis técnico geomorfológico, geohidrológico, geoestadístico y de percepción remota del colapso estructural, hundimiento o socavón ocurrido en los campos de cultivo ubicado en Santa María Zacatepec, del municipio de Juan C. Bonilla, perteneciente a la cuenca hidrológica del Río Alto Atoyac (región hidrológica RH18).

Se presentan características geológicas y geomorfológicas de la **estructura** y de sus alrededores, además de modelos cartográficos para comprender el proceso dinámico de lo ocurrido.

Los estudios de campo se realizaron a 100 y 200 metros del colapso estructural y se complementaron con técnicas telemétricas, es decir, la Percepción Remota; ya que las imágenes procesadas de la zona, permitieron interpretar la combinación de bandas y canales para determinar la geometría del lugar, geología, geomorfología y cartografía.

Para realizar el estudio fue necesario contar con datos geoestadísticos que permitieron modelar y simular el gasto hidrológico y la aceleración del agua en las pendientes identificadas en su zona de escurrimiento, datos que sirvieron para la modelación gráfica en general.

El levantamiento topográfico, geológico y geomorfológico de la zona se realizó con una estación total y con telemetría, además se contó con el apoyo de tecnología satelital.

En el estudio se utilizó *software* especializado en topografía y programas geoespacial aplicados a la geodesia para obtener los modelos de la zona analizada en 2D y 3D. Así mismo, se realizaron visitas de campo con el objetivo de identificar físicamente la geoforma y determinar posibles zonas de riesgo como lo marca la Organización de

las Naciones Unidas (ONU), dentro de su programa de Reducción del Riesgo de Desastres.

El análisis de los resultados del estudio geohidrológico enfocado a la relación del cálculo de la aceleración gravitatoria, la pendiente por distancia-elevación, la altura-gravedad, la fuerza de un líquido y el gasto de los ríos mencionados, permitió concluir que existe un riesgo en un radio de 1000 metros.

Palabras clave: socavón, imágenes, geoestadístico, gasto, gravedad, fuerza, pendiente.

ABSTRACT

Technical-scientific engineering study of the sinkhole in the municipality of Juan C. Bonilla in the state of Puebla.

The study is based on the technical geomorphological, geohydrological, geostatistical and remote sensing analysis of the structural collapse, subsidence or sinkhole that occurred in the fields located in Santa María Zacatepec, municipality of Juan C. Bonilla, belonging to the hydrological basin of the Alto Atoyac River (hydrological region RH18).

Geological and geomorphological characteristics of the structure and its surroundings are presented, as well as cartographic models to understand the dynamic process of what happened.

The field studies were carried out at 100 and 200 meters from the structural collapse and were complemented with telemetric techniques, i.e., Remote Sensing; since the processed images of the area, allowed interpreting the combination of bands and channels to determine the geometry of the site, geology, geomorphology and cartography.

To carry out the study it was necessary to have geostatistical data that allowed modeling and simulating the hydrological flow and water acceleration in the slopes identified in the runoff zone, data that served for the graphic modeling in general.

The topographic, geological and geomorphological survey of the area was carried out with a total station and telemetry, and was supported by satellite technology.

The study used specialized *software geospatial* in topography applied to geodesy to obtain the models of the analyzed area 2D and 3D.

Field visits were also made in order to physically identify the geoform and determine possible risk zones as established by the United Nations (UN), within its Disaster Risk Reduction program.

The analysis of the results of the geohydrological study focused on the relationship of the calculation of the gravitational acceleration, the slope by distance-elevation, the height-gravity, the force of a liquid and the expense of the mentioned rivers, allowed to conclude that there is a risk in a radius of 1000 meters.

Key words: sinkhole, images, geostatistical, spending, gravity, force, slope.

INTRODUCCIÓN

El 29 de mayo de 2021, se dio a conocer la formación de un socavón, ubicado en los campos de cultivo pertenecientes a Santa María Zacatepec, del municipio de Juan C. Bonilla, zona que pertenece a la cuenca hidrológica del Río Alto Atoyac (región hidrológica RH18).

Por lo expuesto anteriormente, se realizó un estudio ingenieril, cuya importancia radica en contar con datos generales de la topografía, geología, geomorfología, geohidrología, cartografía y percepción remota del lugar donde se formó esta estructura para tratar de entender las causas que lo originaron y el proceso de deformación.

Según la geología, un socavón se define como el hundimiento, oquedad o colapso que se produce en el suelo, generalmente por haber una corriente subterránea o algún espacio hueco bajo la tierra.

Este estudio comprende un análisis satelital y prospecciones para co-tejar los resultados telemétricos obtenidos. Es importante indicar que se hizo la comparación de la información adquirida de las plataformas satelitales utilizadas con los datos del equipo de campo.

Debido a la estación de lluvias, el análisis de algunas imágenes satelitales se volvió desafiante debido a la cobertura de nubes que superaba el 30%, lo que impedía un seguimiento efectivo. Se llevaron a cabo análisis y comparaciones de datos telemétricos, como la precipitación, con el objetivo de identificar posibles variables que pudieran haber contribuido al colapso.

Este **hundimiento** pone en riesgo a la población de las colonias cercanas a su estructura, ya que es muy probable que exista un desarrollo lento de cambio estructural, además de que se han generado pequeñas grietas superficiales alrededor de la estructura colapsada que indican que el proceso continúa.

El conocimiento de la zona de estudio relacionado con la geodinámica terrestre y atmosférica, se considera de vital importancia para el área de prevención de desastres naturales. El trabajo realizado es una aportación al conocimiento multi, inter y transdisciplinario de las áreas de Ciencias de la Tierra, puesto que la diversidad del perfil de los especialistas y las numerosas técnicas aplicadas permitieron realizar este estudio.

La cuenca del Río Alto Atoyac es un cuerpo de agua que constituye un recurso vital, vulnerable y finito, con valor económico, social y ambiental, cuyo deterioro en las últimas décadas está asociado a una expansión demográfica sostenida y a un proceso irreversible de urbanización e industrialización en la zona. La cuenca cuenta con su río más importante (Atoyac) y ramificaciones en su trayecto, el río nace en la Sierra Nevada, en el estado de Puebla, penetra en el territorio del estado de Tlaxcala, de donde regresa al territorio poblano para regar el extenso valle de Puebla-Tlaxcala.

DESARROLLO TÉCNICO-CIENTÍFICO

Para el estudio se utilizaron datos telemétricos de plataformas satelitales como *SkySat*, *Landsat* y *RapidEye* para comparar las mejores imágenes con los canales y bandas procesadas, también se contó con equipo como estación total y *software* especializado para el procesamiento de la información y modelados en 2D y 3D.

Las coordenadas obtenidas para el estudio son geográficas y UTM (**Universal Transverse Mercator**, es un **sistema de proyección en cuadrícula con unidades en metros o kilómetros**), las lecturas principales se generaron con 18 puntos de referencia para el análisis gravimétrico, de gasto y geoestadístico.

La latitud, longitud y altura elipsoidal utilizadas, se transformaron a una altura ortométrica (distancia vertical entre la superficie física de la Tierra y del geoide), el equipo utilizado en campo permitió determinar las distancias medidas a lo largo de la línea con una plomada láser. La curva tangente a la dirección de la gravedad en cualquier punto se obtuvo con el *software* libre especializado del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), aplicando de este modo los modelos matemáticos propuestos.

Para calcular la aceleración de la gravedad normal y obtener la observada sobre los puntos, se usó el modelo EIGEN-6C4, los valores que se utilizan están basados en la cuarta versión del mismo modelo, siendo la más actual, por lo que en versiones posteriores los valores pueden presentar una variación mínima. Posteriormente, se calcularon las reducciones de aire libre y Bouguer (consiste en eliminar la masa entre el punto y el geoide y luego realizar una disminución del aire-libre) para calcular sus respectivas gravedades y las anomalías.

En este estudio se programaron hojas de cálculo para obtener, de una manera práctica, los resultados, utilizando la base de datos del modelo IEGEN-6C4 para el cálculo automático de cada punto. El cálculo de la fuerza del agua se hizo con 6 puntos en el perímetro de la **estructura**, tomando como modelo ideal una corriente intermitente dentro del mismo.

Con el procesamiento de las imágenes de satélite se combinaron las bandas y canales de los sensores de los diversos satélites, cuya información fue usada para describir algunas características de la zona; en el análisis geológico, geomorfológico y de uso del suelo, se emplearon datos multitemporales de las plataformas SkySat, Landsat y RapidEye.

El procesamiento de imágenes arrojó algunas características que rodean al socavón, por ejemplo, que es una zona amplia de cultivos, con condiciones de suelo blando y geología de roca volcánica.

Procedimientos

Para generar el estudio que se presenta en este trabajo, fue importante relacionar el modelo del geoide terrestre con el elipsoide terrestre; así como la determinación de datos geoestadísticos y modelos de riesgo geohidrológicos y geomorfológicos en 2D y 3D para su graficación e interpretación de resultados.

Los datos del estudio abarcan del 17 mayo al 26 de junio de 2021. Se calculó el área superficial del hundimiento para realizar el cálculo del gasto del agua que corre en el mismo, se utilizaron modelos geométricos y topográficos, y se obtuvo la media del área, cuyo resultado fue de 11,281.46 m², este dato sirvió para calcular el área interna del socavón en su modelo 3D, cuyo resultado promedio fue de 32,100.79 m².

Cálculo de las anomalías del aire, reducida y de Bouguer

En el desarrollo hidrológico y gravitacional se ejecutó un análisis de los datos obtenidos para determinar la diferencia entre el campo real y el campo normal de gravedad terrestre de la zona de estudio, siendo el potencial anómalo o potencial perturbador (T) la diferencia, entre el potencial de gravedad real (W) y el potencial de gravedad normal (U).

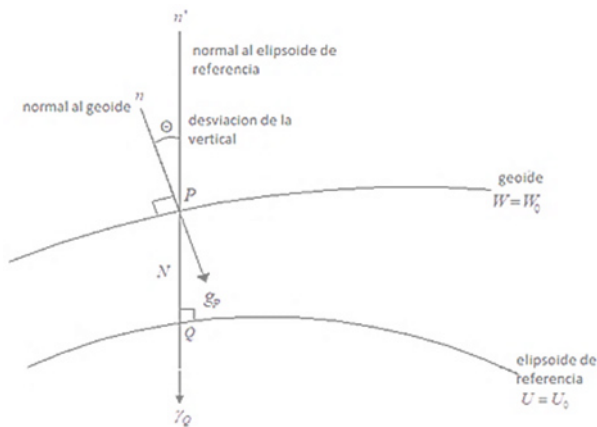
El modelo matemático general se expresa como sigue, modelo (1).

$$T(x, y, z) = W(x, y, z) - U(x, y, z). \quad (1)$$

Considerando la **Figura 1**, el vector de la gravedad real (\underline{g}_p) en el punto P y el vector de la gravedad normal ($\underline{\gamma}_Q$) en el punto Q, entonces, la diferencia entre ambos vectores de gravedad se conoce como Anomalía de gravedad (Δg), modelo matemático (2).

$$(\Delta g) = \underline{g}_p - \underline{\gamma}_Q. \quad (2)$$

Figura 1. Vectores de gravedad normal y real



Para el estudio y obtención de todos los cálculos se tomó como referencia el modelo geodésico GRS80, que es un sistema de referencia compuesto por un elipsoide de referencia global y un modelo de campo de gravedad (geode).

Hay que señalar que, para aplicaciones prácticas, los elipsoides de referencia GRS80 y WGS84 son idénticos, ya que se considera el elipsoide de revolución como una aproximación de la gravedad, siendo para el GRS80 la fórmula de gravedad normal internacional adoptada por la Asociación Internacional de Geodesia (IAG), modelo matemático (3).

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

$$\gamma = 9.780318(1 + 0.0053024\text{sen}^2\varphi - 0.0000058\text{sen}^22\varphi). \quad (3)$$

De acuerdo con los conceptos de modelos gravimétricos de riesgo geológico, la gravedad varía principalmente en el sentido vertical, por lo que es necesario llevar el valor medido sobre la superficie terrestre al valor correspondiente en el geoide, siendo en ausencia de masas, considerada la llamada reducción por aire libre, que para efectos prácticos es utilizado el modelo matemático (4), donde H es la altura y F la reducción por aire libre en mgal (milésima de gal, que equivale a 1 cm/s²).

$$F=0.000003086*H. \quad (4)$$

Para obtener la correspondiente anomalía de aire libre (Δg_{AL}), se utiliza el valor de la gravedad observada (g_{obs}) más la respectiva reducción de aire libre (F) menos la gravedad normal (γ), modelo matemático (5).

$$\Delta g_{AL} = g_{obs} + F - \gamma. \quad (5)$$

Para remover el efecto de las masas topográficas en la gravedad, se considera la distribución en una placa de altura constante, denominada Placa de Bouguer, siendo esta, una placa horizontal infinita y con densidad (ρ) constante. En este análisis se utilizó el valor de $\rho=2.67 \text{ gr/cm}^3$, representando a la reducción de Bouguer, modelo matemático (6).

$$A_B=0.1119*H. \quad (6)$$

La correspondiente anomalía de gravedad de Bouguer es representativa de cambios de densidad a nivel cortical y de cambios de grosor en la corteza terrestre, siendo generalmente negativa, modelo matemático (7).

$$\Delta g_B = g_{obs} - \gamma - F + A_B \quad (7)$$

Los modelos matemáticos generales (8, 9, 10, 11, 12, 13) para calcular las anomalías del aire, aire libre y Bouguer de la zona de estudio son los siguientes:

Atracción Gravitatoria de la capa de Bouguer:

$$A_B = 2\pi G\rho h = 0.1119 h \text{ mgales.} \quad (8)$$

Gravedad reducida por Bouguer:

$$g_B = g_{Al} + A_t - A_B. \quad (8)$$

Anomalía de Bouguer:

$$\Delta g_B = \Delta g_{Al} + A_t - A_B. \tag{10}$$

$$\Delta g_B = \Delta g_{Al} + A_t - A_B. \tag{11}$$

$$\Delta g_P = g + \delta g_F + \delta g_P - \gamma. \tag{12}$$

$$\delta g_F + \delta g_P = 0.1967 h. \tag{13}$$

Para realizar los cálculos con los modelos anteriores se utilizaron los datos de la **Tabla 1**, simplificando el desarrollo matemático.

Tabla 1. Datos para calcular y obtener las anomalías del aire, aire libre y Bouguer.

Constantes		Radio	6.37E+6
Corrección F	0.309	Corrección topográfica	0
G (gravitación universal)	6.67E-11 m/s 6.67433E-06 mgal	ρ	2.67 cm ³
	0.005		0.1119 mgal
	0.000		0.1967 mgal
Masa (M)	5.97E+24		

El desarrollo sirve para eliminar en la zona de estudio la masa entre el punto y el Geoide y reducir las anomalías del aire-libre **Tabla 2**.

Tabla 2. La aceleración de la gravedad relacionado con el agua (m/s² y en mgal)

Vértice	Elevación	Gravedad (g) m/s ²	Gravedad Reducida por Aire-Libre (mgal)	Módulo de la Gravedad Normal en el Elipsoide (m/s ²)	Anomalía Aire-Libre (mgal)	Atracción Gravitatoria a la capa de Bouguer (mgal)	Gravedad Reducida por Bouguer (mgal)	Anomalía de Bouguer (mgal)
1	2224	9.779	978586.321	9.785	131.870	248.866	978337.456	-116.996
2	2224	9.779	978586.315	9.785	131.876	248.866	978337.450	116.990
3	2224	9.779	978586.310	9.785	131.880	248.866	978337.445	-116.985
4	2224	9.779	978586.302	9.785	131.888	248.866	978337.437	116.978
5	2224	9.779	978586.285	9.785	131.906	248.866	978337.420	116.960
6	2224	9.779	978586.279	9.785	131.911	248.866	978337.414	116.954
7	2223	9.779	978586.286	9.785	131.596	248.754	978337.532	117.158
8	2223	9.779	978586.307	9.785	131.575	248.754	978337.553	117.178
9	2223	9.779	978586.322	9.785	131.560	248.754	978337.568	117.193
10	2223	9.779	978586.326	9.785	131.556	248.754	978337.572	117.198
11	2223	9.779	978586.320	9.785	131.562	248.754	978337.566	117.191
12	2223	9.779	978586.283	9.785	131.599	248.754	978337.529	117.154

Vértice	Elevación	Gravedad (g) m/s ²	Gravedad Reducida por Aire-Libre (mgal)	Módulo de la Gravedad Normal en el Elipsoide (m/s ²)	Anomalía Aire-Libre (mgal)	Atracción Gravitatoria a la capa de Bouguer (mgal)	Gravedad Reducida por Bouguer (mgal)	Anomalía de Bouguer (mgal)
13	2223	9.779	978586.288	9.785	131.595	248.754	978337.534	117.159
14	2223	9.779	978586.296	9.785	131.586	248.754	978337.542	117.167
15	2223	9.779	978586.306	9.785	131.576	248.754	978337.552	117.177
16	2223	9.779	978586.281	9.785	131.601	248.754	978337.527	117.153
17	2223	9.779	978586.305	9.785	131.577	248.754	978337.551	117.177
18	2223	9.779	978586.295	9.785	131.587	248.754	978337.541	117.167

Nota. Resultados y anomalías de aire-libre y Bouguer, las dos últimas columnas los resultados del incremento de la gravedad con modelos de observación y simplificado muestran un desarrollo correcto al coincidir los datos.

Cálculo de la presión atmosférica

Es importante el cálculo de la presión atmosférica en los puntos de la zona de colapso estructural, los datos que se utilizan son las altitudes; como el desnivel de la zona de estudio es de un metro se toman las lecturas de la altitud (H) de 2224 y 2223 metros; las unidades en hPa (hectopascasles) y mbar (milibares) son equivalentes.

El modelo matemático (14) sirve para calcular la presión.

$$P(\text{mbar}) = 1013.25 \times (1 - 0.0000225577 \times H)^{5.2559} \quad (14)$$

Para la altitud o altura de 2224 el resultado es 773.089 hPa o mbar.

Para la altitud o altura de 2223 el resultado es 773.186 hPa o mbar.

Modelo global de geopotencial EIGEN-6C4

Para este estudio se aplicaron los criterios del Centro Internacional de Modelos Globales Terrestres (ICGEM, por sus siglas en inglés), alojado en el Centro de Investigación Alemán para las Geociencias (GFZ, por sus siglas en alemán)¹, coordinado por el Servicio Internacional de Campo de Gravedad

¹ Centro Internacional de Modelos Globales Terrestres disponible en: <http://icgem.gfz-potsdam.de/home>

(IGFS) de la Asociación Internacional de Geodesia (IAG), tiene por objetivo proporcionar información respecto a modelos de gravedad terrestre. Tal es el caso del modelo europeo de gravedad mejorada de la Tierra mediante nuevas técnicas, en su cuarta versión EIGEN-6C4, el cual es un modelo combinado de campo de gravedad de LAGEOS, GRACE y la misión GOCE², el cual es una de las mejores aproximaciones del campo de gravedad real, dada la combinación de misiones satelitales, mediciones terrestres y medición altimétrica derivadas del campo de gravedad.

Los datos geográficos o geodésicos utilizados para el desarrollo general de los estudios presentados en la Tabla 3:

Tabla 3. Análisis geográfico

Projection: Universal Transverse Mercator (UTM)	Scale: 1.00000000 (Meters)
Central Scale Factor (k0): 0.99960000	Central Longitude: -99.00000000
Central Latitude: 0.00000000	Projection in Southern Hemisphere: False
Datum: World Geodetic System 1984	
Conversion Method: None	Conversion Target: WGS 84
Elipsoid: WGS 84	Semimajor Axis: 6378137.0000 m
Semiminor Axis: 6356752.3142 m	Inverse Flattening (1/f): 298.25722356
Prime Meridian Shift: 0.00000000 (Greenwich)	
Warp: None	

Nota. Datos geográficos para la zona de estudio necesarios para su georreferenciación y desarrollo matemático y geoestadístico

Para la delimitación del área establecida en este estudio, se seccionó la zona utilizando instrumentos de medición de campo y telemétricos, para el levantamiento de información fue necesario tender una línea base y puntos de referencia, con el objetivo de procesar correctamente las imágenes satelitales y su posterior modelación en 2D y 3D.

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

² EIGEN-6C4 disponible en: <http://icgem.gfz-potsdam.de/>

Cartografía geométrica satelital*

Fue importante generar cartografía (mapas) e identificar comportamientos de todas las variables analizadas, se aplicaron técnicas geométricas de medición con apoyo de imágenes satelitales, los resultados son producto de la aplicación de dichos modelos y más acordes a las mediciones en modelos ideales en geoformas con dinámica caótica. Se utilizaron imágenes y datos multitemporales de las plataformas *Landsat*, *RapidEye* y *SkySat*.

Los resultados geométricos se obtuvieron con el *software* Math, sustituyendo las lecturas obtenidas de las imágenes de telemetría terrestre y satelital, para así obtener los resultados de las dimensiones de la **estructura**.

En la **Figura 2** (16 de junio de 2021) se muestra una combinación de bandas 4,3,2 (RGB) a una resolución de 50 cm interpoladas y extrapoladas con las imágenes *RapidEye* y *SkySat* para poder realizar procesos idénticos y descartar combinaciones que no coincidan, se ajustaron bandas y canales para interpretar las combinaciones de la zona de estudio; esto sirve para identificar procesos geodinámicos terrestres y atmosféricos. Los datos obtenidos en el proceso tanto geométrico como de la imagen arrojaron un área promedio de 8096.51 m², 328.09 m de perímetro y 107.94 m de diagonal mayor.

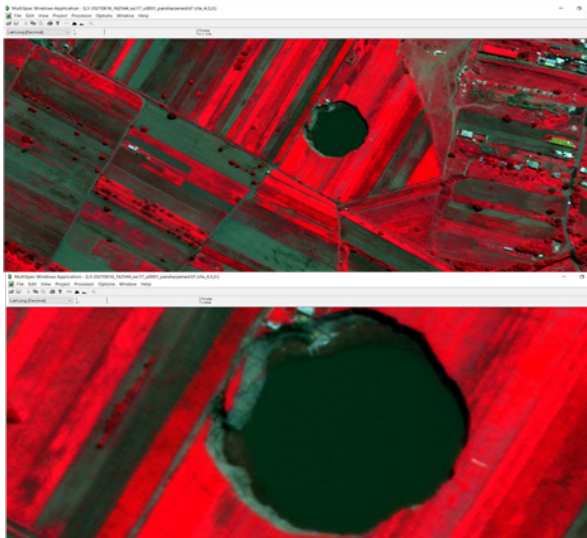


Figura 2. Combinación de bandas 4, 3, 2 (RGB) con *MultiSpec*, excelente sensibilidad a la vegetación verde, en color rojo se aprecia la parte de cultivos y dentro del socavón el agua se ve de color oscuro debido a sus características de absorción

La **Figura 3** (16 de junio de 2021) muestra una combinación de bandas 3, 2, 1 (RGB), es una imagen de color natural, en fotogrametría se define como el objeto visto por el ojo humano en una fotografía aérea a color.

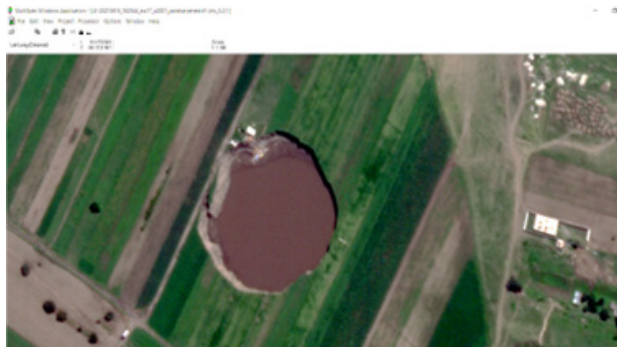


Figura 3. La combinación de bandas 3, 2, 1 con MultiSpec, nos sirve para el análisis geohidrológico y geomorfológico de la zona. Los datos son combinados con modelos geométricos matemáticos para obtener los resultados finales

En el seguimiento del histórico de las imágenes satelitales de las plataformas analizadas, los sensores remotos identificaron datos que fueron promediados con los cálculos geométricos de modelos matemáticos ideales para la geología del lugar, los datos obtenidos se presentan en la Tabla 4.

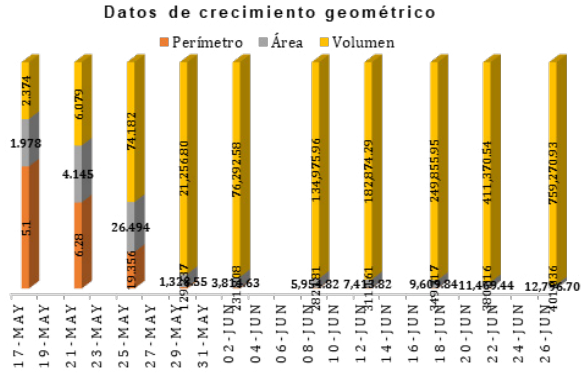
Tabla 4. Observaciones geométricas

Fecha (2021)	Diámetro mayor (m)	Diámetro menor (m)	Profundidad (m)	Área (m ²)	Perímetro (m)	Volumen (m ³)
17-May	1.8	1.4	0.9	1.978	5.1	2.374
21-May	2.4	2.2	1.5	4.145	6.28	6.079
25-May	7.5	4.5	2.1	26.494	19.356	74.182
29-May	42.1	40.2	12	1,328.55	129.237	21,256.80
2-Jun	89	54.6	15	3,814.63	231.808	76,292.58
8-Jun	104.2	72.8	17	5,954.82	282.181	134,975.96
12-Jun	111.9	84.4	17.5	7,413.82	311.161	182,874.29
17-Jun	119.2	102.7	19.5	9,609.84	349.317	249,855.95
21-Jun	126.5	115.5	26.9	11,469.44	380.316	411,370.54
26-Jun	130.1	125.3	44.5	12,796.70	401.036	759,270.93

Nota. Se procesaron 10 observaciones geométricas significativas para desarrollar los diferentes cálculos en cuanto al proceso de evolución geomorfológica de la zona de estudio.

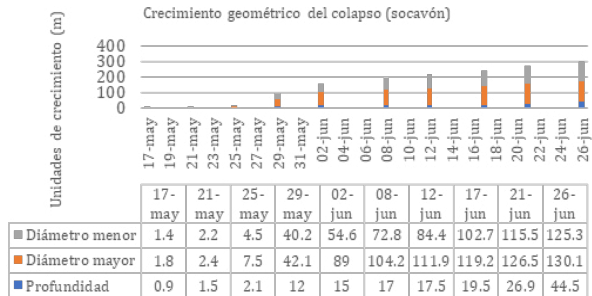
En la **Figura 4** se muestra que el crecimiento exponencial del perímetro, área y volumen es proporcional al colapso que se presenta con el tiempo transcurrido, es importante considerar el desarrollo volumétrico porque es el que determina el riesgo por la cantidad de material geohidrológico acumulado. Por otro lado.

Figura 4. Muestra el crecimiento exponencial (ver Tabla 3).



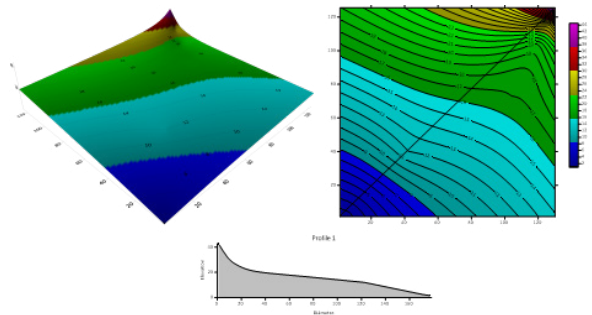
La **Figura 5** presenta la relación entre los datos geométricos y su crecimiento.

Figura 5. Descripción del proceso o desarrollo numérico de la estructura.



La **Figura 6** muestra el modelo 2D y 3D de la relación entre profundidad y diámetros del colapso.

Figura 6. Modelo 2D y 3D de la relación entre profundidad y diámetros

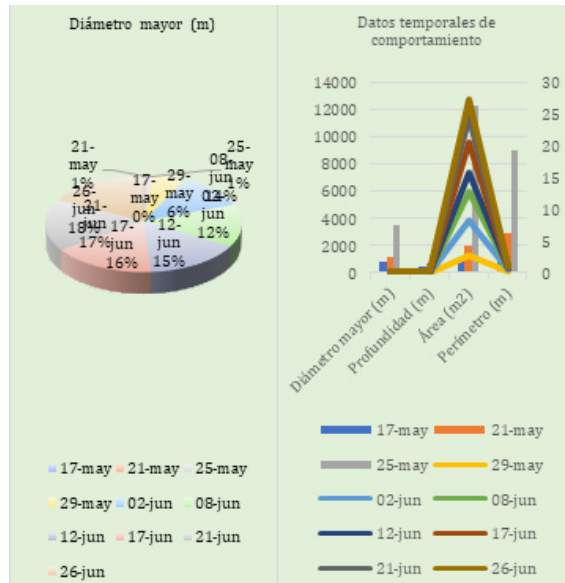


Nota. El modelo en *Surfer* muestra que a mayor profundidad del colapso los diámetros crecen con el tiempo.

En la **Figura 7** se puede observar la modificación de datos geométricos en el espacio temporal (porcentaje dinámico).

Figura 7. Modificación de datos geométricos en el espacio temporal (porcentaje dinámico)

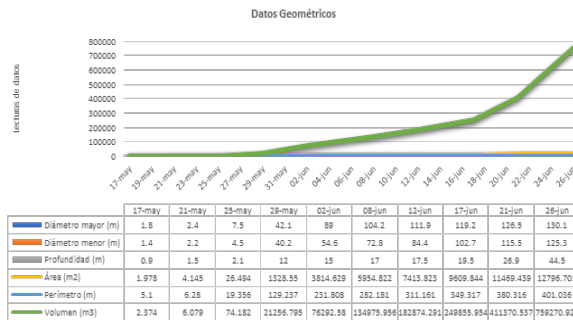
Nota. El porcentaje de crecimiento va en aumento con el pasar de los días, también se observa el comportamiento temporal de los datos geométricos de la zona de colapso, se presenta en gama de colores las fechas y su evolución en los diámetros mayor y menor, profundidad, área, perímetro y volumen, para el día 26 de junio de 2021 el porcentaje de crecimiento geométrico fue 18% respecto al 17 de mayo de 2021.



En la **Figura 8** se observa la distribución de los datos de las 10 observaciones y análisis de la zona de estudio.

Figura 8. Distribución de los datos de las 10 observaciones y análisis de la zona

Nota. Distribución espacial de los datos obtenidos, se observa que a medida que avanza el tiempo su comportamiento dinámico tiende a crecer.



En telemetría, el proceso de datos numéricos debe realizarse con software específico, para este caso se utilizó el Surfer, Global Mapper, MultiSpec y LEOWorks, así como el QGis, se descartaron las aberraciones atmosféricas y se calculó el área y perímetro con cada programa para descartar las anomalías atmosféricas que existen.

Las escenas y coberturas se manipularon a menos de 10% de nubosidad, como lo marcan los estándares internacionales de procesamiento de imágenes satelitales.

Todas las imágenes se encuentran en el rango de las 11 a las 15 horas local (México), para que la luz de los sensores remotos satelitales tenga mayor nitidez, y se descarten sombras o anomalías que pudieran generar ruido ambiental en el procesamiento de las imágenes.

La **Figura 9** muestra a detalle el procesamiento con *software* especial para identificar la cartografía de la zona, geoformas, geohidrología, entre otros elementos de estudio.

Figura 9. Identificación general de la zona de estudio con *Global Mapper*



El procesamiento arroja 6 metros de profundidad a partir del límite promedio del nivel del agua, como se muestra en la **Figura 10**, más la altura de la estructura. En la simulación con el *Global Mapper* y *Surfer* aplicada a la topografía o geoforma del terreno, se utiliza modelo fotogramétrico terrestre.

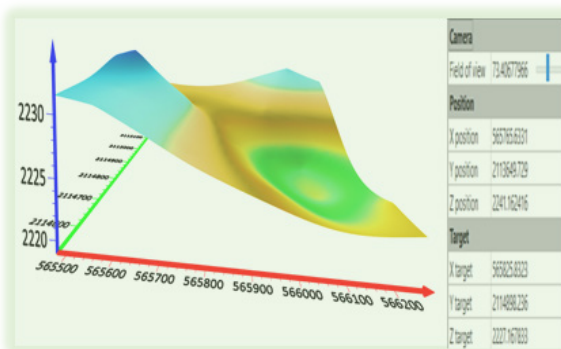


Figura 10. Profundidad respecto al nivel promedio del agua

Nota. Límite base en color azul que muestra una profundidad de 6 metros respecto al nivel promedio del agua. Proceso realizado por *MultiSpec* con modelo fotogramétrico terrestre

Análisis e interpretación de imágenes satelitales

Para el estudio se utilizaron imágenes con resolución a 50 cm sin nubes y en algunos casos coberturas al 10%, lo que permitió generar cartografía satelital y de modelación estructural. Se usaron imágenes y datos multitemporales de las plataformas *Landsat*, *RapidEye* y *SkySat*.

Los metadatos de cada imagen son importantes porque al ser procesadas nos permite orto georeferenciar y ortorectificar, obtener las coordenadas geográficas de la cobertura, fecha y hora de captura, azimut, inclinación, cobertura atmosférica, entre otros datos, como se muestra a continuación (metadatos del 10 de junio de 2021):

```
{ "id": "20210610_165257_ssc2_u0001", "type": "Feature", "geometry": { "coordinates": [[ [-98.36538971062444, 19.046983470295114], [-98.3652897400333, 19.040276821466637], [-98.38532121099895, 19.04002396091757], [-98.3854793631514, 19.047928931140362], [-98.3853653733688, 19.047930443494284], [-98.38549202564695, 19.05464691602734], [-98.3853800058794, 19.054648365789078], [-98.38553855619327, 19.061362433864637], [-98.38543395191499, 19.061363708180014], [-98.38553152415659, 19.065250723051847], [-98.40354465378022, 19.065078765105227], [-98.40364742782286, 19.073004289752365], [-98.40357092135321, 19.073005095341], [-98.40359978450267, 19.079731048134633], [-98.40352063918394, 19.079731862875168], [-98.40357522536964, 19.086442995447005], [-98.4035162028663, 19.086443598916272], [-98.40357810338823, 19.09313692472363], [-98.40353512410411, 19.0931373720785], [-98.40363440002724, 19.09980830761777], [-98.40357491777078, 19.099808942797072], [-98.40366148005118, 19.106514752866786], [-98.40358827905288, 19.106515474326617], [-98.40366994922546, 19.113242317636384], [-98.40361262351031, 19.11324283644803], [-98.40369034278616, 19.119983765607873], [-98.40360451517819, 19.11998448409703], [-98.40366268988785, 19.126742191756968], [-98.40362449687237, 19.126742450506473], [-98.4037182108828, 19.1334743056859], [-98.40359677495805, 19.133475097091637], [-98.40366644552839, 19.14022122697171], [-98.40357614759992, 19.140221805981056], [-98.40364275747929, 19.14696715142039], [-98.40354672959101, 19.146967779998285], [-98.4036105000669, 19.15372454655618], [-98.40352316479064, 19.153725166554654], [-98.40358700360827, 19.16048766394559], [-98.40350572738576, 19.160488188832854], [-98.40357259160167, 19.167248310244787], [-98.40348857069156, 19.16724882680867], [-98.40355614714169, 19.174010705518246], [-98.40347528583506, 19.174011152623187], [-98.4035378598082, 19.180768956332077], [-98.4034596449907, 19.180769336212798], [-98.4035217551531, 19.18752376244966], [-98.40342572988045, 19.18752412511429], [-98.40347872874433, 19.19430894174453], [-98.40334121251725, 19.194309285922532], [-98.40336431780332, 19.201105729579286], [-98.38345953256311, 19.201151449998257], [-98.38336457980436, 19.193201200484], [-98.38351380448728, 19.193200936122185], [-98.38344689484367, 19.186409200139657], [-98.38353999018449, 19.18640895187906], [-98.38349153296112, 19.1796636273786], [-98.38356262050277, 19.179663331212627], [-98.38352435323593, 19.175880071186782], [-98.36819943470653, 19.17593323927472], [-98.36824886880781, 19.180125975342136], [-98.36814504619677, 19.18012654539168], [-98.36824878036718, 19.186854405187827], [-98.36812447623998, 19.18685505818343], [-98.36823967268862, 19.19361666977793], [-98.36807780719973, 19.193617354443152], [-98.36818811727115, 19.20043861917357], [-98.34814148207822, 19.200496397721192], [-
```

98.34799291028149,19.192544693649968],[-98.34817734729293,19.192543973501284],[-98.34807589199465,19.185756827594574],[-98.34820139580943,19.18575620650987],[-98.34810083878871,19.17901978206607],[-98.34819928079595,19.179019193754836],[-98.34809420861342,19.17227709034707],[-98.34819555730641,19.172276404493715],[-98.3480999921231,19.165540723144954],[-98.34821340030908,19.165539939644],[-98.34811768928628,19.158813701135458],[-98.34821461170625,19.15881301257562],[-98.3481089965851,19.15207243198534],[-98.34822182583764,19.152071621162868],[-98.34811868386112,19.145351185250757],[-98.34823244932213,19.14535024386148],[-98.34812318961524,19.138607076740687],[-98.34824687244986,19.138606050692832],[-98.34815626097368,19.13187895377494],[-98.34825558406413,19.13187805649975],[-98.34816418572161,19.1251368626749],[-98.34824218586988,19.125136147232098],[-98.34815723-2087,19.11843853291411],[-98.34822329239631,19.11843791898348],[-98.34811511222891,19.11733974285038],[-98.34819554002887,19.1117331870996],[-98.34810727522661,19.105033862842827],[-98.3481834967085,19.105033091532594],[-98.34807625547548,19.09833411182942],[-98.3481435966439,19.098333385209617],[-98.34803344369712,19.09166048382796],[-98.34809475059231,19.091659754732994],[-98.3479850253728,19.08498804029339],[-98.34809243203694,19.0849866906202],[-98.34818591434684,19.07832822297535],[-98.34823612132188,19.07832748623994],[-98.34814485004891,19.071634655722896],[-98.34821913692356,19.071633555578913],[-98.34801879414984,19.06492024868824],[-98.36541500466171,19.0646677994213],[-98.36534170892423,19.060379582917747],[-98.36542264999724,19.06037867161534],[-98.36531173777654,19.053686195451263],[-98.36540180564285,19.053685105008206],[-98.3652947946719,19.04698464927791],[-98.36538971062444,19.046983470295114]]], "type": "Polygon"}, "properties": {"acquired": "2021-06-10T16:52:57.687Z", "clear_confidence_percent": 75, "clear_percent": 77, "cloud_cover": 0, "cloud_percent": 0, "ground_control_ratio": 0.95, "gsd": 0.66, "heavy_haze_percent": 0, "item_type": "SkySatCollect", "light_haze_percent": 18, "pixel_resolution": 0.5, "provider": "skysat", "published": "2021-06-10T20:46:07Z", "publishing_stage": "finalized", "quality_category": "standard", "satellite_azimuth": 282.4, "satellite_id": "SSC2", "shadow_percent": 0, "snow_ice_percent": 0, "strip_id": "s4_20210610T165257Z", "sun_azimuth": 76, "sun_elevation": 66.4, "updated": "2021-06-11T06:21:34Z", "view_angle": 7.9, "visible_confidence_percent": 70, "visible_percent": 95}}.

El estudio de la zona se realizó por medio de percepción remota procesando imágenes satelitales principalmente de la plataforma SkySat, a partir del uso del software Arcgis, Global Mapper, Surfer y MultiSpec se calcularon sus dimensiones, desde su colapso hasta su actual estructura, así como las características del terreno mediante la combinación de bandas.

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 in situ (Centro de Investigación de Ciencias de Información Geoespacial, 2021).

Los elementos básicos que componen la percepción remota son: la fuente de iluminación, el paisaje, la escena, el sensor remoto, la plataforma y el sistema de procesamiento; en su conjunto se procesan cualitativa o cuantitativamente

los datos proporcionados por el sensor remoto acerca de la escena los cuales producen información en relación con el paisaje y la información de campo la cual consiste en la inspección directa en varios puntos seleccionados de la escena, de diferentes atributos de los objetos que se encuentran en el terreno con la finalidad de evaluar los datos obtenidos previamente a distancia.

Cerca de la zona se encontraba una vivienda la cual al inicio del colapso no se vio afectada, sin embargo, con el paso de los días el diámetro de la **estructura** fue incrementando y abarcando el terreno de la propiedad, finalmente el 12 de junio de 2021 se registró el desplome de la estructura civil, las dimensiones de la geoforma eran de un diámetro de 126 metros y 45 metros de profundidad aproximadamente.

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

En este estudio se muestra el análisis antes y después del hundimiento en la zona afectada, realizado a partir del procesamiento de imágenes satelitales de los días 7 de febrero, 19 de marzo, 26 de abril, 31 de mayo y 10 de junio, con la finalidad de ilustrar el incremento de su área, perímetro y diámetro, así como el análisis de las características del suelo antes del hundimiento a partir de la combinación de bandas.

La localidad de Santa María Zacatepec se ubica en el municipio de Juan C. Bonilla en el estado de Puebla, el cual se localiza en la parte centro-oeste del estado. Sus coordenadas geográficas son los paralelos $19^{\circ} 05' 30''$ y $19^{\circ} 08' 36''$ de latitud norte y los meridianos $98^{\circ} 18' 24''$ y $98^{\circ} 25' 36''$ de longitud occidental. Colinda al Norte con los municipios de Tlaltenango y San Miguel Xoxtla, al Sur con el municipio de San Pedro Cholula, al Este con el municipio de Coronango y al Oeste con los municipios de Huejotzingo y Calpan (**Figura 11**).

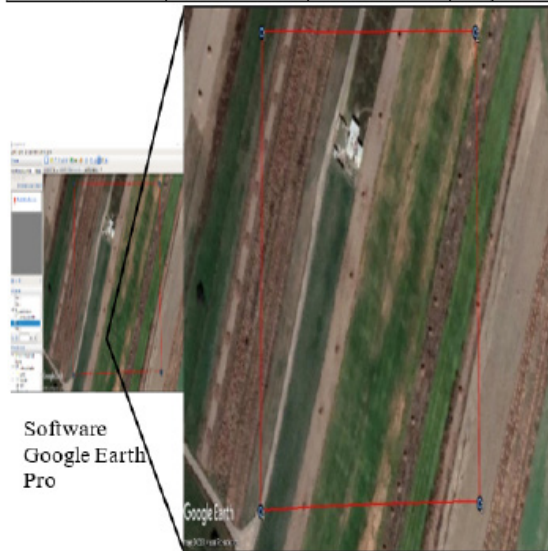
Figura 11. Municipio de Juan C. Bonilla, Puebla



La orografía de la zona es plana, con ascenso en dirección Este a Oeste; su altura promedio es de 2200 metros sobre el nivel del mar. Se delimitó el perímetro de la zona de estudio con ayuda del *software* Google Earth, obteniendo cuatro puntos de control con sus respectivas coordenadas (**Figura 12**).

Figura 12. Coordenadas UTM y delimitación de la zona de estudio en Google Earth Pro

Punto de control	Coordenada X	Coordenada Y	
1	565780.42 E	2114947.23 N	Esquina superior izquierda
2	565940.12 E	2114948.50 N	Esquina superior derecha
3	565949.70 E	2114812.18 N	Esquina inferior derecha
4	565780.19 E	2114809.72 N	Esquina inferior izquierda

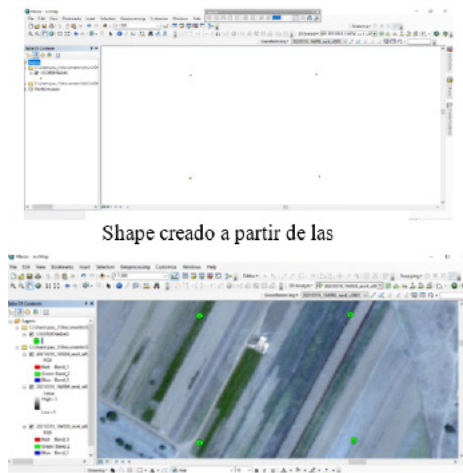


Para el procesamiento de las imágenes satelitales se ingresó al *software* Arcgis y *Global Mapper* y se georreferenció a un sistema de proyección UTM zona 14, para posteriormente añadir las proporcionadas por SkySat; para la combinación de bandas se utilizó la técnica conocida como pansharping o refinado pancromático la cual permite utilizar como referencia una imagen pancromática de mayor resolución fusionándola con una imagen multibanda de baja resolución, la imagen resultante presenta la misma composición multibanda (RGB) mostrando los elementos a mayor resolución.

Con el *software* Arcgis se crearon modelos digitales de superficie de la zona para cada mes y analizar el comportamiento del terreno antes y después del colapso. Para su modelado se generaron curvas de nivel a partir de las imágenes satelitales. Posteriormente se realizó una digitalización para conocer sus dimensiones (altura real del terreno sobre las cotas promedio).

Para la obtención de las coordenadas de la zona de estudio se creó una base de datos, esto con la finalidad de exportar los puntos de control en Arcgis y generar un archivo shape (.shp) e identificarla rápidamente en la imagen satelital, **Figura 13**.

Figura 13. Identificación de la zona de estudio a partir del shape generado

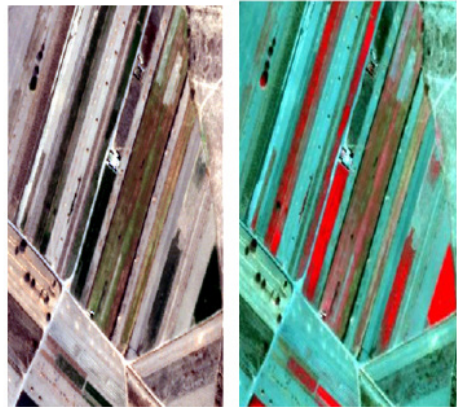


Shape creado a partir de las

Se realizó la combinación de bandas color natural y falso color infrarrojo para analizar la zona, las combinaciones se realizaron para los meses de febrero, marzo y abril antes del hundimiento.

Como se muestra en la **Figura 14** no se presenta ninguna anomalía en la zona en ambas composiciones, los tonos marrones o crema y verde azulado corresponden a tierras aradas y suelos descubiertos con menor contenido de humedad, los tonos verdes y rojos intensos presentan la vegetación más densa, mientras que los tonos rosados y verde claro la vegetación menos densa, durante este mes se presentaba sequía.

Figura 14. Combinaciones de bandas en color natural y falso color infrarrojo, 7 de febrero de 2021

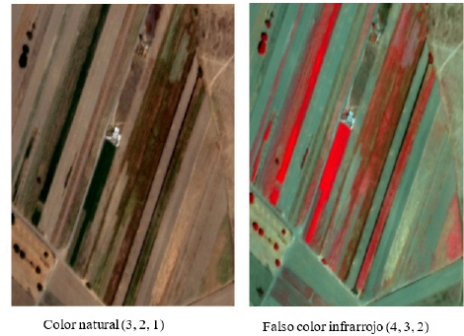


Color natural (3, 2, 1)

Falso color infrarrojo (4, 3, 2)

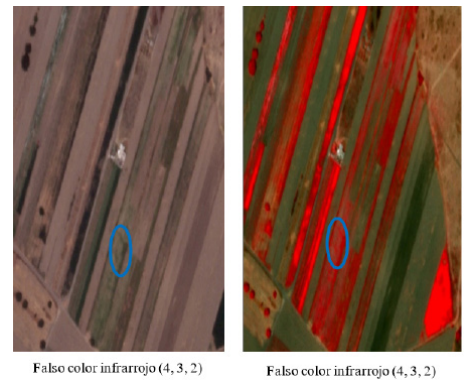
En la **Figura 15** no existe ninguna anomalía de la zona en las imágenes, se puede ver vegetación en crecimiento representada en tonos rosados, la cantidad de tierras aradas comienza a disminuir debido al aumento en la humedad del suelo.

Figura 15. Combinaciones color natural y falso color infrarrojo, 19 de marzo de 2021



En la **Figura 16** se muestra un cambio en la vegetación, en el mes de marzo algunas zonas presentaban una vegetación más densa y en ese mes disminuyó, se pasó de un tono verde azulado a rosados y verdes claros.

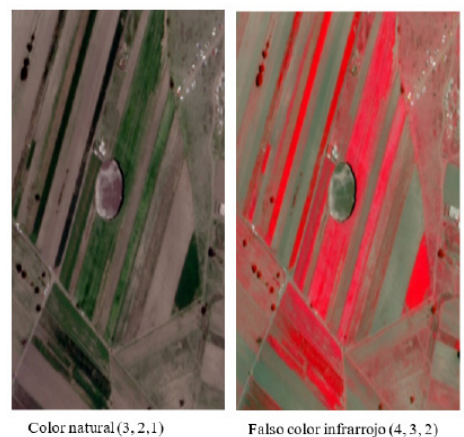
Figura 16. Combinaciones color natural y falso color infrarrojo, 26 de abril de 2021



También se puede apreciar una grieta en la zona marcada en la imagen, se intuye fue debido a escasas de lluvia y actividad agrícola que provocaron un agrietamiento en el suelo.

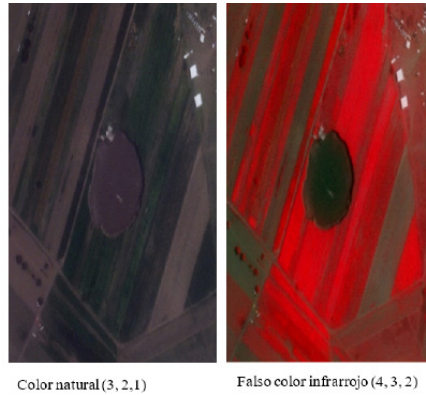
En la **Figura 17** se muestra el colapso de la zona de estudio haciendo presencia el denominado socavón, durante este mes se presentaron precipitaciones considerables lo cual pudo ocasionar una infiltración y alteración en la grieta provocando el colapso del suelo. En sus alrededores se presenta mayor humedad por lo que la vegetación es más densa, el colapso muestra tonos grisáceos y marrón lo que indica que la arena y el barro suspendido es denso, los tonos verdes muestran que los sedimentos comienzan a dispersarse.

Figura 17. Combinaciones color natural y falso color infrarrojo, 29 de mayo de 2021



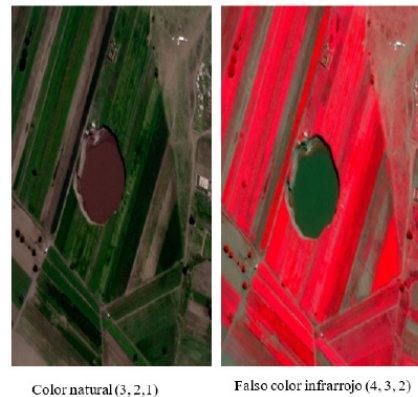
En la **Figura 18** se muestra en ambas combinaciones de bandas el aumento de vegetación, ya que a principios del mes se presentaron precipitaciones en la zona provocando un incremento en las dimensiones de la **estructura**, el colapso presenta en la superficie un tono verde lo cual indica que los sedimentos se han dispersado casi en su totalidad.

Figura 18. Combinaciones color natural y falso color infrarrojo, 10 de junio de 2021



En la **Figura 19** se muestra en ambas combinaciones de bandas un aumento en las dimensiones del socavón, abarcando en un 50% la propiedad que se encuentra en la zona, la propiedad colapsó en la madrugada del 12 de junio. En la parte izquierda se puede apreciar la aparición de una nueva grieta generada por el aumento de lluvias desgastando la superficie.

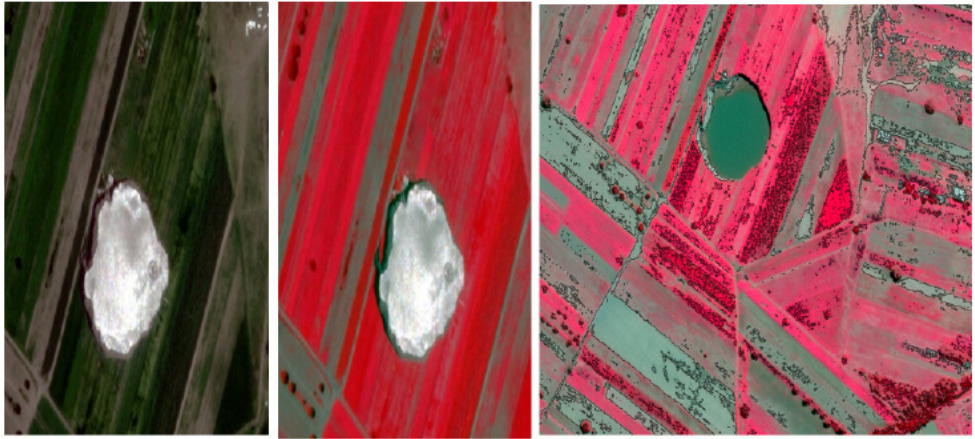
Figura 19. Combinaciones color natural y falso color infrarrojo, 16 de junio de 2021



En la **Figura 20** se muestra en ambas combinaciones el aumento en las dimensiones de la **estructura** y una fractura que aparece el día 15 de junio que sigue creciendo hasta la fecha, en la parte derecha se puede observar una deformación lo que permite percibir mejor su aumento a causa de las lluvias intensas durante los últimos días. En sus alrededores la vegetación es más densa representada por los tonos rojos y verdes intensos que se presentan.

Figura 20. Combinaciones color natural y falso color infrarrojo, 22 de junio de 2021
Las Figuras 21, 22 y 23 muestran la zona de estudio antes del colapso y su proceso de evolución durante los meses de febrero, marzo y abril.

Figura 21. Modelación en 2D (planimetría-izquierda) y 3D (altimetría-derecha) del proceso de evolución durante el mes de febrero de 2021



Color natural (3, 2, 1)

Falso color infrarrojo (4, 3, 2)

Figura 22. Modelación en 2D (planimetría-izquierda) y 3D (altimetría-derecha) del proceso de evolución durante el mes de marzo de 2021

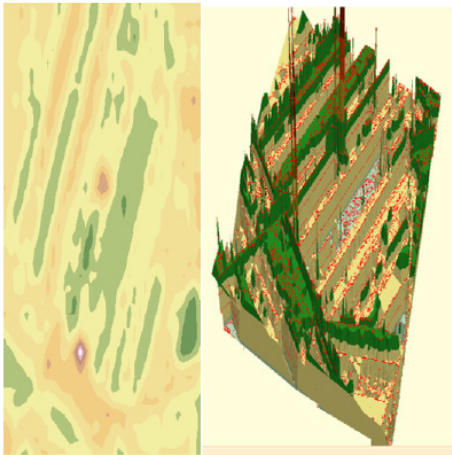
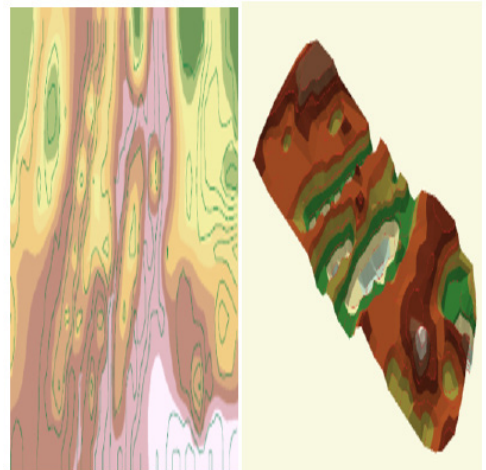
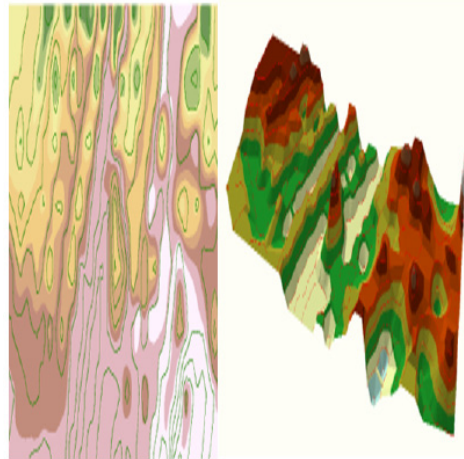


Figura 23. Modelación en 2D (planimetría-izquierda) y 3D (altimetría-derecha) del proceso de evolución durante el mes de abril de 2021



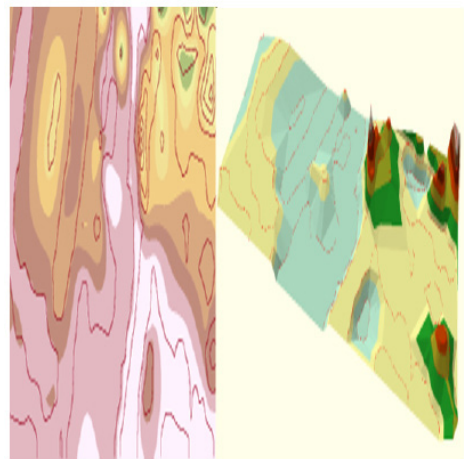
En la Figura 24 se presenta el modelo digital del terreno en 2D y 3D del día 29 de mayo, día en que se originó el socavón, la geoforma contaba con un perímetro de 196.0294 m y un área de 2368.3131 m².

Figura 24. Modelación en 2D (planimetría-izquierda) y 3D (altimetría-derecha) del proceso de evolución del día 29 de mayo de 2021.



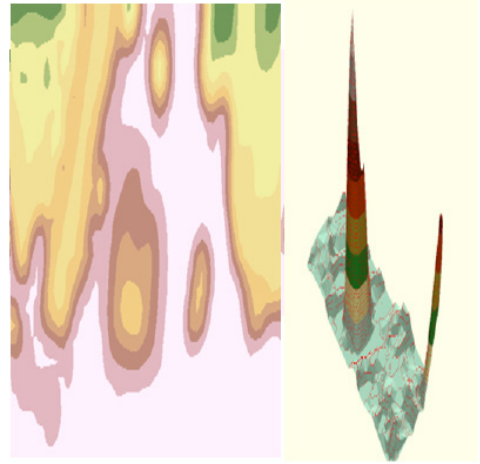
En la Figura 25 se presenta el modelo digital del terreno del día 10 de junio, la **estructura** contaba con un perímetro de 333.0104 m y un área de 6441.8968 m².

Figura 25. Modelación en 2D (planimetría-izquierda) y 3D (altimetría-derecha) del proceso de evolución del día 10 de junio de 2021.



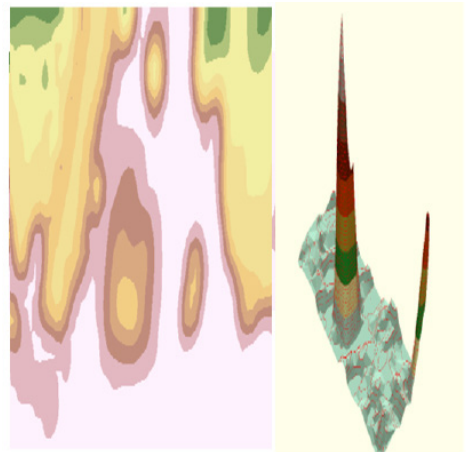
En la Figura 26 se presenta el modelo digital del terreno del día 16 de junio, el socavón contaba con un perímetro de 465.7197 m y un área de 8129.9533 m².

Figura 26. Modelación en 2D (planimetría-izquierda) y 3D (altimetría-derecha) del proceso de evolución del día 16 de junio de 2021.



En la Figura 27 se presenta el modelo digital del terreno del día 22 de junio, la **estructura** contaba con un perímetro de 375.1953 m y un área de 8246.8473 m².

Figura 27. Modelación en 2D (planimetría-izquierda) y 3D (altimetría-derecha) del proceso de evolución del día 22 de junio de 2021.



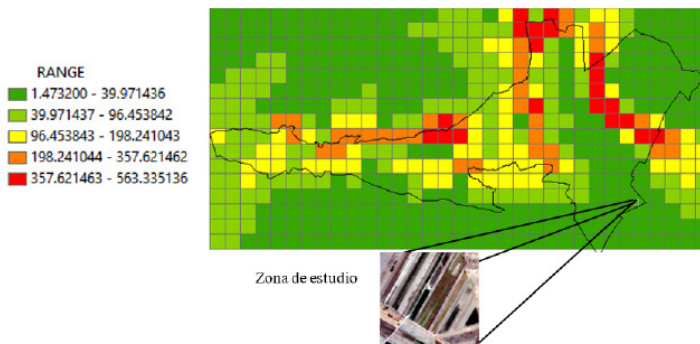
El análisis de la profundidad de erosión del suelo se define como el desgaste que se produce en la superficie del suelo provocada por la acción de agentes externos como el viento, el agua y la acción del hombre (INEGI, 2019).

Para ello se realizó un estudio de profundidad de erosión de la zona, se trabajó con un archivo de banda intercalada por línea (BIL), para la obtención de curvas de nivel procesadas se aplicó el software Arcgis, Global Mapper, Surfer y MultiSpec, en las que se crearon capas vectoriales para sectorizar el territorio en cuadrículas creando una malla que representa datos de abundancia enmascarando las coordenadas originales.

En este caso el valor de ancho para cada celda es de 1000, dividiendo la cuadrícula en 262 filas y 413 columnas, a partir de los valores obtenidos por cada celda se realizaron cálculos estadísticos determinando los valores de media, alta y baja profundidad de erosión.

Finalmente, se obtuvo un mapa de profundidad de erosión, los tonos rojos representan las zonas en donde existe mayor profundidad de erosión y los tonos verdes las zonas con menor profundidad. La zona de estudio se encuentra en una zona con menor profundidad de erosión en un rango de 1.473200 m y 39.971436 m (**Figura 28**).

Figura 28. Mapa de profundidad de erosión.



Debido a las recientes apariciones de pequeños hundimientos en los alrededores del socavón, se realizó un análisis mensual de la acumulación de flujo, que consiste en representar las zonas en donde se concentra, con la finalidad de poder identificar si antes del hundimiento existía o existe una mayor acumulación de agua en el área, lo que pudiera ser una de las causas del colapso.

Cada celda con acumulación alta representa áreas de flujo concentrado y pueden ayudar a identificar canales de arroyos; las áreas con acumulación de flujo 0 representan alturas topográficas locales y son muy útiles para identificar crestas.

En las Figuras 29 a la 35 se presentan tres imágenes en cada una, la primera representa las direcciones en que el agua fluirá usando la pendiente de las celdas vecinas en una celda de una cuadrícula dada, el agua puede fluir a una o más de sus ocho celdas adyacentes, en este caso la pendiente es el factor final de cómo fluye el agua en este modelo. Al ejecutar el algoritmo de dirección de flujo los valores resultantes oscilan en un rango de 1 a 255 permitiendo comprender en qué flujo se desplaza el agua; la segunda imagen representa un ráster de salida, la acumulación de flujo calcula el peso acumulado de todas las celdas que fluyen a cada una con pendiente descendente, si no se indica ningún peso, se aplica un peso de 1 a cada celda y el valor en el ráster de salida es el número de celdas que fluyen hacia cada una, y la tercera imagen representa la zona de estudio la cual nos permitirá analizar en qué parte podría estar la corriente.

Figura 29. Acumulación de flujo en la zona de estudio, 7 de febrero de 2021

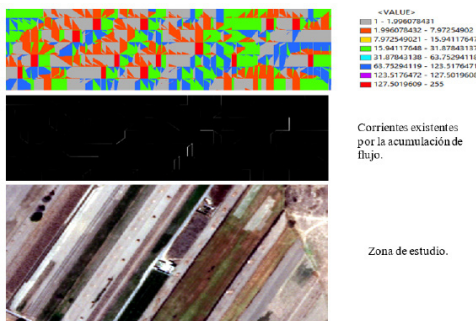


Figura 30. Acumulación de flujo en la zona de estudio, 19 de marzo de 2021

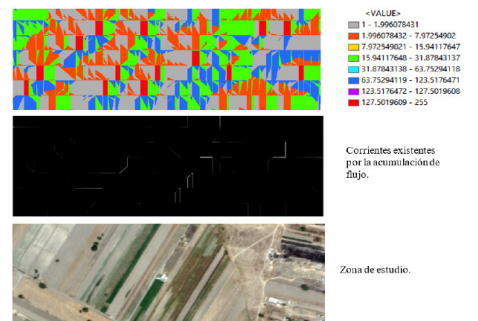


Figura 31. Acumulación de flujo en la zona de estudio, 26 de abril de 2021

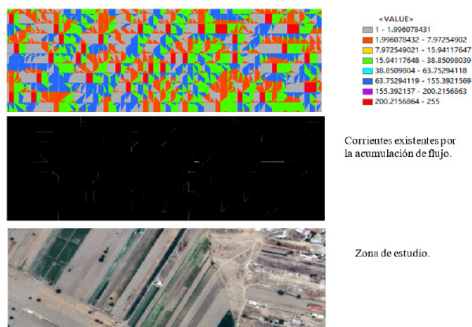


Figura 32. Acumulación de flujo en la zona de estudio, 29 de mayo de 2021

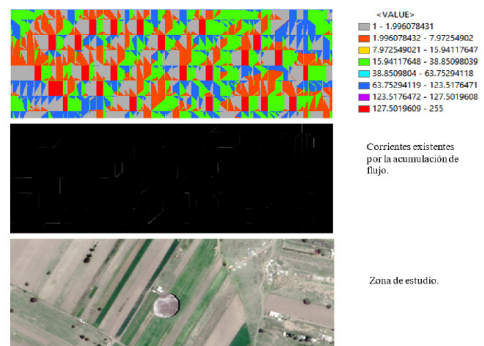


Figura 33. Acumulación de flujo en la zona de estudio, 10 de junio de 2021

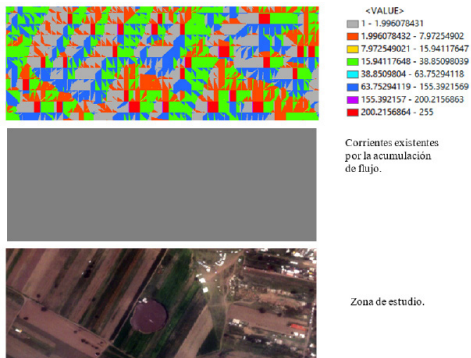


Figura 34. Acumulación de flujo en la zona de estudio, 16 de junio de 2021

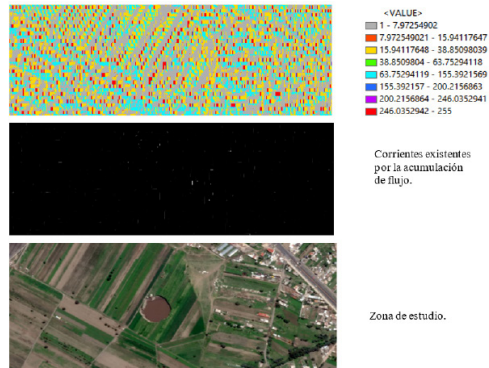
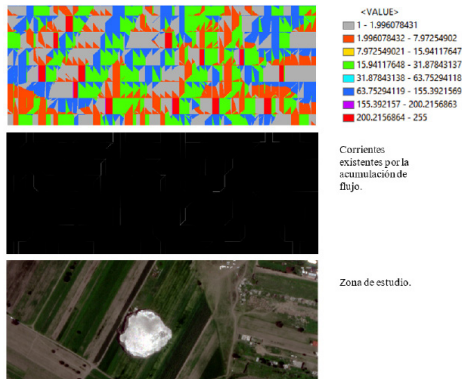


Figura 35. Acumulación de flujo en la zona de estudio, 22 de junio de 2021



El procesamiento de imágenes satelitales a partir de *software* utilizado durante el presente estudio, permitió analizar características, procesos de combinación de bandas, análisis de erosión, modelación del terreno y análisis de flujos de agua, para comprender su comportamiento.

Estudio geológico y geomorfológico

La geomorfología es el estudio de las formas de la tierra (relieves, topografía y geoformas) que indican el proceso o grado de evolución que se genera, procesos naturales o producto del hombre (antropogénico).

La zona ha sido explotada para el desarrollo agrícola, extracción de material y de agua, lo que se ha realizado en los últimos 100 años con mayor frecuencia el relieve identificado en la zona de estudio, muestra en general un paisaje plano, con características propias de la intemperie como el viento, la lluvia y la radiación solar, factores que lo generan. La geoforma observada es propia de la zona, se presentan pliegues anticlinales y sinclinales que han originado

tipos de fallas de una zona volcánica; estos pliegues se originan por contacto dinámico de la misma corteza terrestre dentro de su mecanismo dinámico de formación de relieves. Se identifica al sur el río Actiopa, cuya distancia en línea recta del socavón en la zona central del colapso es de 442.44 metros.

El colapso generó solo alteraciones en la zona, el proceso geomorfológico a sus alrededores sigue siendo igual (**Figura 36**).

Figura 36.



Descripción: 1.- Efecto de compresión de la roca. Elevación más alta observable al sur de la zona de estudio, 2.- Se presenta una mayor cantidad material metamórfico altamente intemperizado, tal es el caso del esquisto, 3.- Posible desprendimiento de tierras por flujo, específicamente presentando un golpe de arena (normalmente se producen por colapso estructural por efecto de una sacudida sísmica o al iniciar la ruptura de suelo por deslizamiento).

La zona al ser campos de cultivos presenta corriente de derrubios, en donde los movimientos rápidos de material y el contenido de agua elevados pueden llegar a constituir el 80% en peso de la masa en movimiento, 4.- La acumulación de sedimentos finos representan parte de la edafología agrícola, 5.- En este paisaje se agrupan geoformas y planicies originadas por procesos fluviales (río Actiopa).

Se realizó en los campos de cultivo de Santa María Zacatepec un estudio estratigráfico, con horizontes y perfiles del tectonismo de la zona por actividad volcánica, el proceso de termoclastia (rompimiento de roca por variación de temperatura) se encontró como mecanismo dinámico de los campos de cultivo, sus facies (diferentes tipos de roca) indican el proceso volcánico en el pasado (**Figura 37**).

Figura 37. Horizontes y estratos de un metro de profundidad, el intemperismo presentado es la termoclastia que con el tiempo fractura la roca por variación térmica.



Durante la prospección se encontró material suelto en los caminos de terracería, el tipo de suelo identificado, entre otros, es de origen aluvial, es decir, material no consolidado (depósitos recientes, del Cenozoico Cuaternario) (**Figura 38**).

Figura 38. Material suelto en los caminos que llevan al colapso estructural.



Delante del colapso en dirección oeste se identificó una pequeña barranca de 2 metros de profundidad y un ángulo de 45° de inclinación (Figura 39).

Figura 39. 45° de inclinación de la pendiente, lo que propicia un adecuado deslizamiento o escurrimiento de agua (lluvia) cuya escorrentía filtra en las zonas bajas.



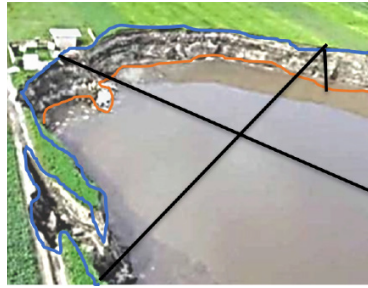
Dentro de las características geológicas, los recientes estudios y análisis de la zona, indican presencia de roca caliza o travertino, de color café claro obscuro (dentro del ángulo de 45° , con espesores que van de 10 centímetros a 50 metros, dicha roca se encuentra alterada (porosa y fracturada), lo que hace suponer que pudo ser parte del origen del colapso; la otra causa sería la resistencia a la compresión sencilla de más de 130 kg/cm^2 que con el tiempo y la sobreexplotación geohidrológica y agrícola dio origen a la zona de colapso, generando un sistema de ductos o cavernas por disolución de la roca.

Otra hipótesis hace suponer que el hundimiento o colapso pudo originarse por la presencia de roca calcárea, que es porosa y blanda, con peso volumétrico de hasta $100 \text{ toneladas/m}^2$ y una resistencia a la compresión de hasta 5 toneladas/m^2 , lo que contribuyó a que la arcilla existente en la zona (color gris a gris oscuro), con contenido natural de agua de hasta 50% y absorción de hasta 80% sufriera un colapso o hundimiento, lo que confirma a esta zona como altamente concentradora de agua subterránea.

La geología de la zona es totalmente de origen volcánico con rocas de tipo andesita, basalto y riolita.

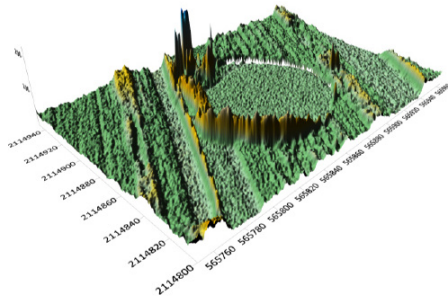
El área colapsada del perímetro con los siguientes datos: diámetro mayor (130.1 metros, diámetro menor 125.3 metros y profundidad de 44.5 metros, se muestra en la **Figura 40**.

Figura 40. Dimensiones al día 26 de junio de 2021.



La imagen satelital de la **Figura 41** fue procesada con *Surfer* y *LEOWorks* para identificar la geometría de profundidad de la **estructura** en 3D (16 de junio de 2021).

Figura 41. Modelo de la geoforma del socavón en 3D



A continuación se muestra la fotogrametría terrestre de las visitas a campo realizadas para el estudio los días 9, 12, 21 y 26 de junio de 2021 (**Figura 42**).

Figura 42. Fotogrametría terrestre





Nota. Las prospecciones a la zona de estudio fueron necesarias para corroborar los datos arrojados por los procesamientos de todos los estudios realizados (fotogrametría terrestre de las visitas a campo realizadas para el estudio los días 9, 12, 21 y 26 de junio de 2021)

Cálculo del gasto y cartografía

El gasto (caudal) es la cantidad o volumen de agua que pasa por la sección transversal de un conducto, cauce o canal en una unidad de tiempo, se mide en metros cúbicos por segundo (m^3/s).

Para el estudio, se determinaron diversos modelos geométricos terrestres y matemáticos, considerando el escenario, con un límite de agua en la superficie y otro a nivel bajo, lo que arrojó los siguientes datos del **socavón**:

Área promedio superficial: 11,281.46 m^2 .

Área promedio interna del modelo 3D fue de 32,100.79 m^2 .

Para determinar el gasto del agua se utilizó el modelo matemático (15).

$$Q = \frac{CIA}{360} \quad (15)$$

Q = gasto en metros cúbicos por segundo

I = intensidad de la lluvia en milímetros por hora

A = superficie de la cuenca en metros cuadrados

C = es el coeficiente de escorrentía sin dimensiones

Los datos de la intensidad de la lluvia, la superficie de la cuenca y el coeficiente de escorrentía se obtuvieron con ayuda del simulador de flujos de agua SIATL, posteriormente se procesaron esos datos, que son fijos en la zona de estudio, como lo indican los parámetros hidrológicos para una planicie perteneciente a una cuenca.

El procesamiento de los datos se realizó en mm/hr y posteriormente se multiplicaron por 24 horas y después por 30 días en un escenario catastrófico; en condiciones normales se toma el promedio marcado por instancias oficiales como el Servicio Meteorológico Nacional y la Comisión Nacional del Agua.

El río Actiopa se encuentra al sur del socavón, en línea recta a 442.44 metros, los estudios indican que el agua de la estructura proviene del norte y sale al río mencionado (se sugiere ejecutar estudios cartográficos de espeleología en la zona).

La observación de los datos superficiales muestra que el gasto para una intensidad de lluvia baja es $9.87 \text{ m}^3/\text{s}$ y para una intensidad de lluvia fuerte es $37.60 \text{ m}^3/\text{s}$, resultados que se muestran en la Tabla 5 y Tabla 6.

Tabla 5. Cálculo promedio superficial por mes de intensidad de lluvia baja y escorrentía con factor fijo de 0.30 y gasto de $9.87 \text{ m}^3/\text{s}$.

Gasto	
Intensidad lluvia	1.05 (mm/h)
Área socavón	11,281.46
Coefficiente escorrentía	0.3
longitud cauce	126 (m)
Gasto	9.87

Tabla 6. Cálculo promedio superficial por mes de intensidad de lluvia alta y escorrentía con factor fijo de 0.30 y gasto de $37.60 \text{ m}^3/\text{s}$.

Gasto	
Intensidad lluvia	4 (mm/h)
Área socavón	11,281.46
Coefficiente escorrentía	0.3
longitud cauce	126 (m)
Gasto	37.6

Los resultados obtenidos al aplicar el modelo interno y una intensidad de lluvia baja y una fuerte, fueron $28.09 \text{ m}^3/\text{s}$ y $107.00 \text{ m}^3/\text{s}$, respectivamente, estos resultados se muestran en las Tablas 7 y Tabla 8.

Tabla 7. Cálculo promedio interno por mes de intensidad de lluvia baja y escorrentía con factor fijo de 0.30 y gasto de $28.09 \text{ m}^3/\text{s}$.

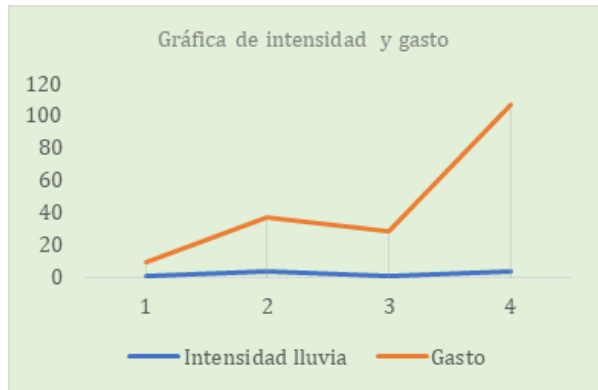
Gasto	
Intensidad lluvia	1.05 (mm/h)
Área socavón	32,100.79
Coefficiente escorrentía	0.3
longitud cauce	126 (m)
Gasto	28.09

Tabla 8. Cálculo promedio interno por mes de intensidad de lluvia alta y escorrentía con factor fijo de 0.30 y gasto de $107.0 \text{ m}^3/\text{s}$.

Gasto	
Intensidad lluvia	4 (mm/h)
Área socavón	32,100.79
Coefficiente escorrentía	0.3
longitud cauce	126 (m)
Gasto	107

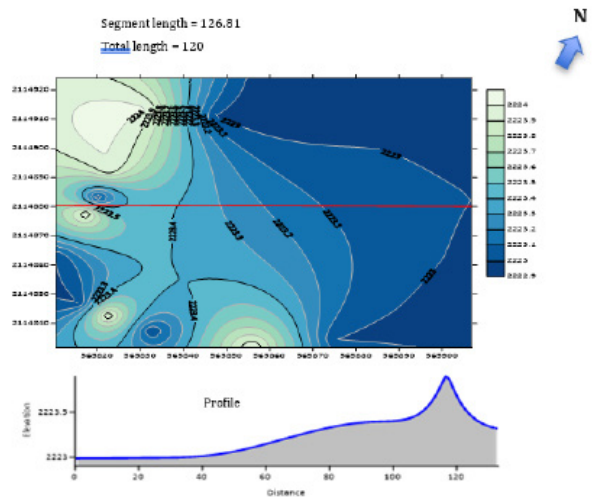
La Figura 43 muestra el comportamiento del gasto con respecto a la intensidad de lluvia, se toma un modelo ideal mensual con las áreas descritas en las **Tablas** anteriores.

Figura 43. El modelo calculado y proyectado es mensual, cuando la intensidad de lluvia llega a los 4 mm/hr, el gasto se calcula que llegue a 107.0 m³/s.



La escorrentía para cualquier modelo del agua en la **estructura**, tiene una dirección de norte a sur si se toma como referencia la dirección del agua (pendiente y aguas abajo) como se muestra en la Figura 44 procesado con *Surfer*.

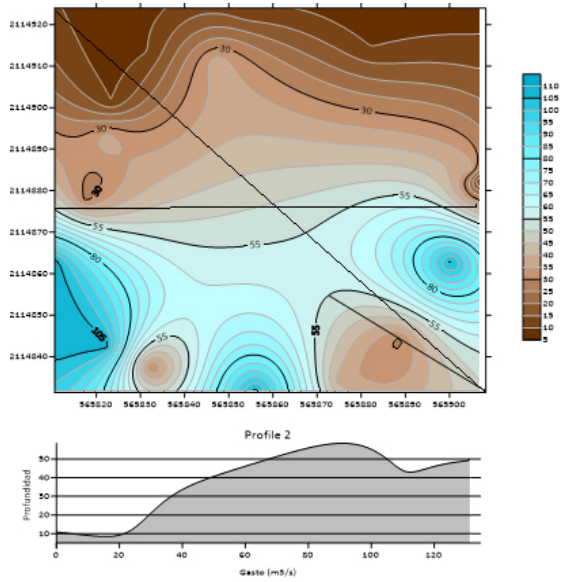
Figura 44. El modelo general de dirección del agua



Nota. El modelo general de dirección del agua es sobre una longitud de 126 metros, es decir el perímetro superior e inferior son descartados por la estructura geomorfológica del lugar, siendo la dirección del agua de norte a sur.

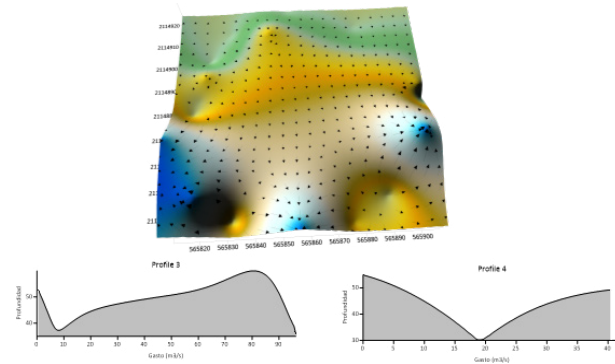
En la Figura 45 con el *Surfer* se muestra la cartografía del gasto con datos interpolados y extrapolados para su modelación en 2D. Mientras que en la Figura 46 muestra dos perfiles del comportamiento del gasto en forma laminar.

Figura 45. Perfil de la zona de estudio del gasto y su comportamiento



Nota. Perfil de la zona de estudio del gasto y su comportamiento a una profundidad de 55 metros, el gasto es menor a una profundidad de entre 10 y 20 metros, a una profundidad de 55 metros el gasto oscila entre los 80 y 100 m³/s. El gasto promedio es de 45.64 m³/s.

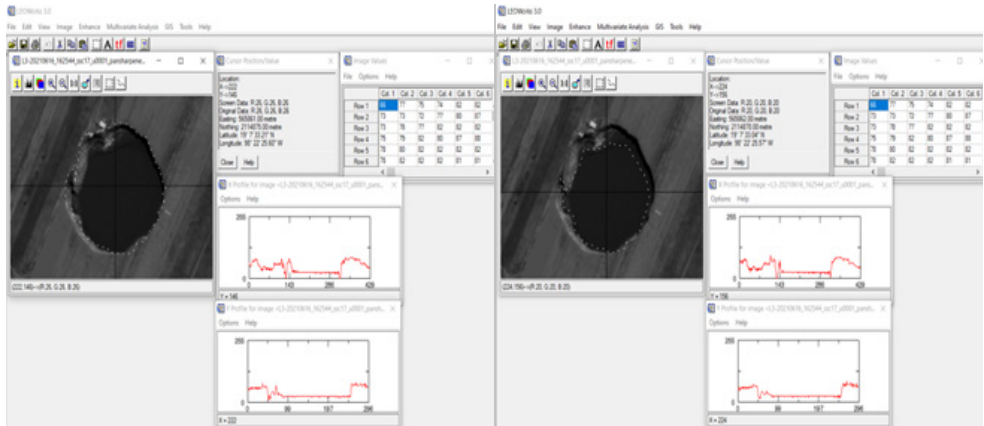
Figura 46. Perfil de la zona de estudio del gasto y su comportamiento



A una profundidad de 55 metros, el gasto alcanza los 95 m³/s (perfil izquierdo), a una profundidad de 55 metros a la mitad del colapso el agua se distribuye con un gasto de 20 m³/s (perfil derecho).

La Figura 47 muestra una combinación de banda pancromática y de falso color para identificar la geometría superficial y la base del colapso.

Figura 47. Combinación de banda pancromática y de falso color



Nota. La imagen se procesó con LeoWorks y se aplicó para medir el gasto, fuerza y aceleración del agua, además de medir sus características de la geoforma del terreno.

Cálculo de la aceleración de la gravedad

La aceleración de la gravedad local, en la zona de colapso o hundimiento, se calculó de acuerdo con la Organización Internacional de Metrología Legal publicado en el boletín OIML 127 (Thulin, A. 1992), con una exactitud de 0.01%, modelo matemático (16).

Esta ecuación utiliza los coeficientes adoptados por la Asociación Internacional de Geodesia (AIG) en el GRS80 (Geodetic Reference System of 1980), dichos coeficientes representan el tamaño, forma y campos gravitacionales de la Tierra, (MetAS, 2002).

$$g_l = g_e \cdot (1 + f' \cdot \text{sen}^2 \varphi - f_4 \cdot \text{sen}^2 2\varphi) - (3.086 \cdot 10^{-6} \cdot h) \quad (16)$$

Donde:

g_l = Aceleración de la gravedad local (m/s²)

g_e = 9.780318 m/s², aceleración de la gravedad en el ecuador ($\Phi = 0$)

f' = 0.0053024 (aplastamiento gravitacional)

Φ = Latitud, en grados, minutos, segundos (00°00'00")

h = Altitud sobre el nivel medio del mar (m)

f_4 = 0.0000058

Los datos que se utilizaron en todo el desarrollo, para calcular el hundimiento o colapso se presentan en la **Tabla 9**. Asimismo, en la Tabla 10 se muestran resultados de los 18 puntos analizados en el socavón.

Tabla 9. Coordenadas geográficas y en UTM para el desarrollo técnico del estudio

Vértice	Latitud (N)	Longitud (W)	Latitud Decimales	Longitud Decimales	Coordenadas UTM (X)	Coordenadas UTM (Y)	Altitud (Z)
1	19°07'31.99779"	98°22'25.71220"	19.126	98.374	565831.49	2114913.73	2224
2	19°07'31.60799"	98°22'25.99228"	19.125	98.374	565823.35	2114901.72	2224
3	19°07'31.30778"	98°22'26.02216"	19.125	98.374	565822.51	2114892.49	2224
4	19°07'30.82780"	98°22'26.19236"	19.125	98.374	565817.59	2114877.72	2224
5	19°07'29.68784"	98°22'26.03235"	19.125	98.374	565822.39	2114842.7	2224
6	19°07'29.32766"	98°22'24.88230"	19.125	98.374	565856.03	2114831.75	2224
7	19°07'29.72762"	98°22'23.76225"	19.125	98.373	565888.71	2114844.16	2223
8	19°07'31.06786"	98°22'23.21232"	19.125	98.373	565904.63	2114885.41	2223
9	19°07'32.02799"	98°22'23.97232"	19.126	98.373	565882.32	2114914.84	2223
10	19°07'32.32795"	98°22'24.92236"	19.126	98.374	565854.53	2114923.96	2223
11	19°07'31.90778"	98°22'25.17243"	19.126	98.374	565847.27	2114911.02	2223
12	19°07'29.51783"	98°22'25.69243"	19.125	98.374	565832.34	2114837.51	2223
13	19°07'29.82785"	98°22'26.25224"	19.125	98.374	565815.95	2114846.98	2223
14	19°07'30.34774"	98°22'26.43238"	19.125	98.374	565810.63	2114862.94	2223
15	19°07'30.99802"	98°22'26.11231"	19.125	98.374	565819.91	2114882.96	2223
16	19°07'29.40777"	98°22'24.23237"	19.125	98.373	565875.01	2114834.28	2223
17	19°07'30.95798"	98°22'23.14222"	19.125	98.373	565906.69	2114882.04	2223
18	19°07'30.32785"	98°22'23.36228"	19.125	98.373	565900.33	2114862.65	2223

Tabla 10. Análisis de resultados de los 18 puntos del socavón

Vértice	Coor- denada X	Coordenada Y	Elevación (m)	Latitud (N)	Decimal	Distan- cia (m)	Pen- diente (m)	Aceleración de la gravedad (m/s ²)	Densidad (kg/m ³)	Fuerzas (N/m ²)
1	565831.49	2114913.73	2224	19°07'31.99779"	19.126	1	0	9.779	1000	97.779
2	565823.35	2114901.72	2224	19°07'31.60799"	19.125	1	0	9.779	1000	97.790
3	565822.51	2114892.49	2224	19°07'31.30778"	19.125	0.1	0	9.779	1000	97.790
4	565817.59	2114877.72	2224	19°07'30.82780"	19.125	0.1	0	9.779	1000	97.790
5	565822.39	2114842.7	2224	19°07'29.68784"	19.125	0.1	0	9.779	1000	97.790
6	565856.03	2114831.75	2224	19°07'29.32766"	19.125	0.1	0	9.779	1000	97.790
7	565888.71	2114844.16	2223	19°07'29.72762"	19.125	1	-1	9.779	1000	97.775
8	565904.63	2114885.41	2223	19°07'31.06786"	19.125	1	0	9.779	1000	97.790
9	565882.32	2114914.84	2223	19°07'32.02799"	19.126	0.1	0	9.779	1000	97.790
10	565854.53	2114923.96	2223	19°07'32.32795"	19.126	0.1	0	9.779	1000	97.790
11	565847.27	2114911.02	2223	19°07'31.90778"	19.126	0.1	0	9.779	1000	97.790
12	565832.34	2114837.51	2223	19°07'29.51783"	19.125	0.1	0	9.779	1000	97.790
13	565815.95	2114846.98	2223	19°07'29.82785"	19.125	0.1	0	9.779	1000	97.790
14	565810.63	2114862.94	2223	19°07'30.34774"	19.125	0.1	0	9.779	1000	97.790
15	565819.91	2114882.96	2223	19°07'30.99802"	19.125	0.1	0	9.779	1000	97.790
16	565875.01	2114834.28	2223	19°07'29.40777"	19.125	0.1	0	9.779	1000	97.790
17	565906.69	2114882.04	2223	19°07'30.95798"	19.125	0.1	0	9.779	1000	97.790
18	565900.33	2114862.65	2223	19°07'30.32785"	19.125	0.1	0	9.779	1000	97.790

Nota. Resultados de cada punto base tomados como referencia en el área de estudio, se presentan resultados de la pendiente, aceleración de la gravedad, densidad y fuerza del agua

En la Figura 48 se muestra la aceleración de la gravedad de la zona de estudio con respecto a las alturas.

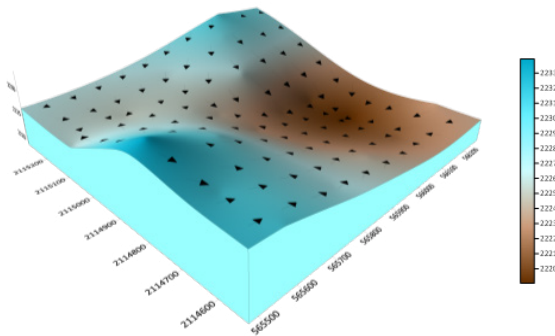
Figura 48. aceleración de la gravedad de la zona de estudio

Nota. Los datos procesados son correctos al graficar ya que cuando la altura es mayor la aceleración de la gravedad debe ser menor, y cuando la altura disminuye (al nivel del mar) la aceleración de la gravedad aumenta

Cálculo de la fuerza del agua y cartografía

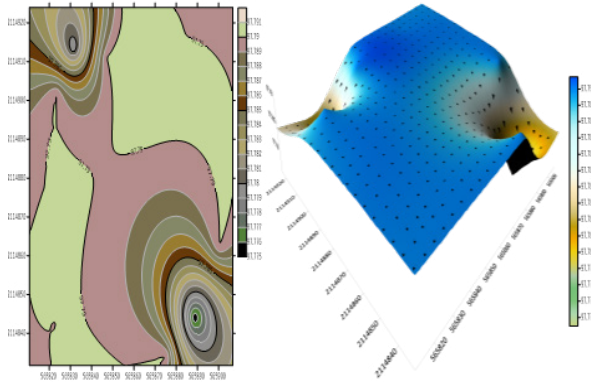
Con el *Surfer* se determinó la fuerza del líquido en la **estructura**, corriente aguas abajo (pendiente y cantidad de empuje que ejerce este líquido en dirección de la pendiente) como se muestra en la **Figura 49**.

Figura 49. Modelado en 3D del escurrimiento de agua



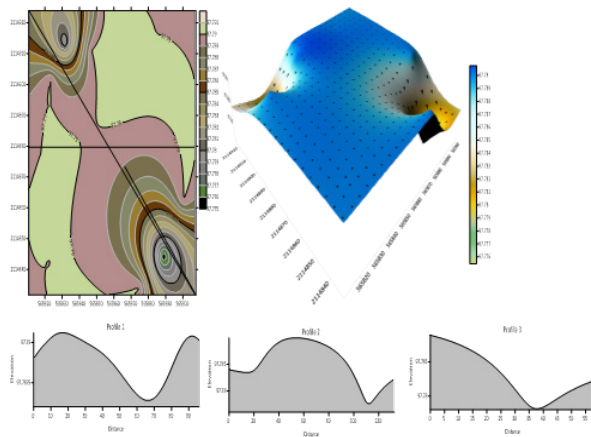
Nota. Modelado en 3D que muestra el escurrimiento del agua a la zona más baja, la escala de color café la más baja y azul la más alta.

Figura 50. modelo en 2D y 3D de la fuerza del agua en la zona de estudio



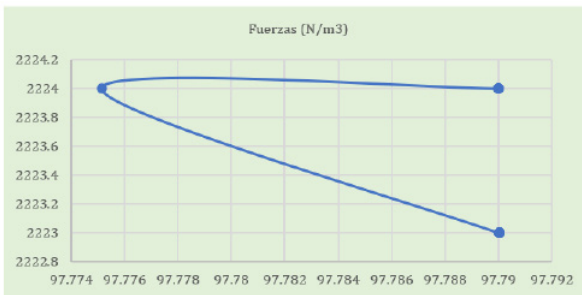
Nota. El área de estudio se cartografía y se presenta un modelo de la fuerza del agua, valor mínimo 97.77899811 y valor máximo de 97.79002773 N/m³, las flechas indican hacia dónde se dirige la fuerza del agua

Figura 51. Perfiles de comportamiento de la fuerza del agua



Nota. El primer perfil muestra un valor mínimo de 97.79 y los siguientes perfiles de 97.785 N/m³, con respecto a la pendiente promedio

Figura 52. comportamiento de la fuerza del agua.



Nota. La fuerza se concentra en la menor altura, y fuerza de retorno en la mayor altitud.

Para realizar el cálculo de la fuerza del líquido se aplicó el modelo matemático (17), $F_1 = d \cdot \cos m \cdot gl$, (17), el cual permitió obtener los resultados, donde d es la densidad del agua (1000 kg/m^3), m es la pendiente entre dos puntos y gl la gravedad local, la cual puede calcularse mediante la corrección de aire libre y la aceleración de la gravedad normal, siendo el modelo matemático (18) aplicado,

$$gl = \gamma - F. \tag{18}$$

Cálculo de la pendiente

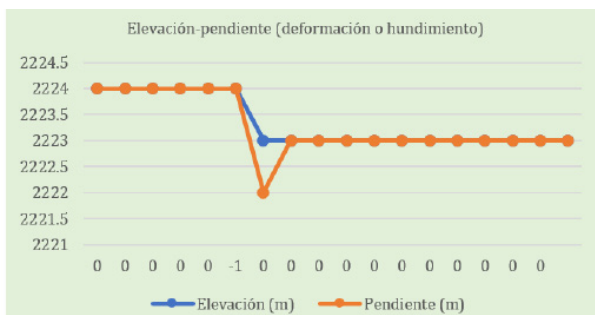
Fue importante calcular la pendiente (inclinación que tiene la superficie con respecto al suelo), para calcular la inclinación media de la estructura geohidrológica y geomorfológica del socavón, seccionando en cuatro cuadrantes orientados al norte, sur, este y oeste, posteriormente para calcular la pendiente media de la estructura analizada, se realizaron lecturas satelitales con las que se determinó si la pendiente representaba un riesgo.

La relación matemática (19) utilizada para calcular la pendiente en la zona de estudio es:

$$\text{Pendiente} = \frac{\text{Diferencia de alturas (elevación)}}{\text{Distancia horizontal}}. \tag{19}$$

En la Figura 53 se observa la elevación y la pendiente, para determinar qué tanto se ha deformado (hundimiento) el área de estudio.

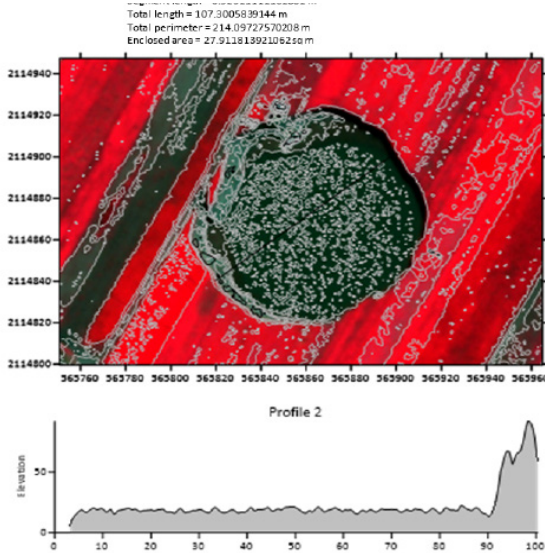
Figura 53. Elevación y la pendiente de deformación



Nota. La geoforma colapsada tiene un hundimiento o desnivel de un metro, es decir entre la cota 2223 y 2224

Con imagen satelital se determina la fuerza del agua y su batimetría de la **estructura**, la pendiente y forma estructural de la misma, se utilizó *MultiSpec* y *Surfer* (Figura 54).

Figura 54. Análisis en infrarrojo de la imagen satelital



Nota. El análisis (16 de junio de 2021), sirve para identificar la batimetría y profundidad de la estructura, los datos obtenidos son 44.5 m. de profundidad del socavón y 50 m del límite del nivel freático

Como se puede observar en los resultados, el terreno de colapso, presenta, en general, un relieve plano, después del colapso existe una diferencia de 1 metro, lo que hace suponer que el terreno presentó una deformación previa pequeña, ya que el hundimiento o colapso volumétrico fue un desplazamiento casi perfecto.

Los resultados generales son:

Pendiente promedio: -0.052631579 m.

Aceleración de la gravedad promedio: 9.77900181 m/s².

Fuerza promedio del agua 97.78857950 N/m³.

Gasto promedio: 45.64 m³/s.

Análisis geoestadístico

El estudio detallado de la zona exige realizar un análisis geoestadístico, con el cual se podrán comparar las variables analizadas. En los estudios de variables relacionadas con suelos, se define la geoestadística como la rama de la estadística especializada en el análisis y la modelación de la variabilidad espacial de fenómenos naturales que tienen un componente espacial, es decir, de los cuales pueden obtenerse datos referidos a localizaciones específicas mediante coordenadas.

Comparando la elevación de cada vértice, respecto a su gravedad, y aplicando variables estadísticas, se obtienen los coeficientes de correlación, siendo necesario calcular la desviación estándar (σ) y la covarianza (S_{xy}), cuyos modelos matemáticos se muestran a continuación.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2}{N-1}} \quad (20)$$

$$S_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{N} \quad (21)$$

El coeficiente de correlación (ρ) se obtiene mediante la ecuación siguiente:

$$\rho = \frac{S_{xy}}{S_x S_y} \quad (22)$$

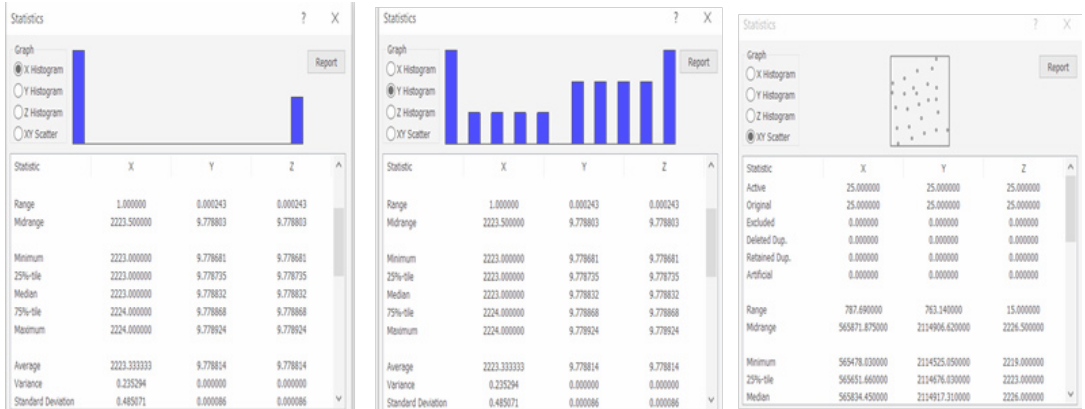
El coeficiente de correlación se interpreta mediante desigualdades en el intervalo $[-1, +1]$. Donde Si $r = 1$ indica que la correlación es positiva perfecta, si $0 < r < 1$ la correlación es positiva, si $r = 0$, no existe relación lineal, si $-1 < r < 0$, la correlación es negativa y si $r = -1$, la correlación es negativa perfecta. En la **Tabla 11** se presenta el desarrollo completo del análisis geoestadístico.

Tabla 11. Resultados geoestadísticos

Vértice	Elevación (m)	$X_i - \bar{X}$	$(X_i - \bar{X})^2$	Gravedad	$Y_i - \bar{Y}$	$(Y_i - \bar{Y})^2$	Covarianza
2	2224	0.667	0.444	9.779	-0.000	0.000	-0.000
3	2224	0.667	0.444	9.779	-0.000	0.000	-0.000
4	2224	0.667	0.444	9.779	-0.000	0.000	-0.000
5	2224	0.667	0.444	9.779	-0.000	0.000	-0.000
6	2224	0.667	0.444	9.779	-0.000	0.000	-0.000
7	2223	-0.333	0.111	9.779	-0.000	0.000	0.000
8	2223	-0.333	0.111	9.779	0.000	0.0	-0.000
9	2223	-0.333	0.111	9.779	0.000	0.0	-0.000
10	2223	-0.333	0.111	9.779	0.000	0.000	-0.000
11	2223	-0.333	0.111	9.779	0.000	0.000	-0.000
12	2223	-0.333	0.111	9.779	0.000	0.000	-0.000
13	2223	-0.333	0.111	9.779	0.000	0.000	-0.000
14	2223	-0.333	0.111	9.779	0.000	0.000	-0.000
15	2223	-0.333	0.111	9.779	0.000	0.000	-0.000
16	2223	-0.333	0.111	9.779	0.000	0.000	-0.000
17	2223	-0.333	0.111	9.779	0.000	0.000	-0.000
18	2223	-0.333	0.111	9.779	0.000	0.000	-0.000
Promedio	2223.333		0.222	9.779		0.000	-0.000
	Desviación estándar		0.471	Desviación estándar		0.000	
	Coefficiente de correlación		-0.878				
	Coefficiente de variación		0.000				

Nota. El coeficiente de correlación indica un valor de negativo, $-1 < r < 0$, lo que significa que la relación entre la aceleración de la gravedad del líquido y la elevación muestra que una variable disminuye conforme la otra aumenta.

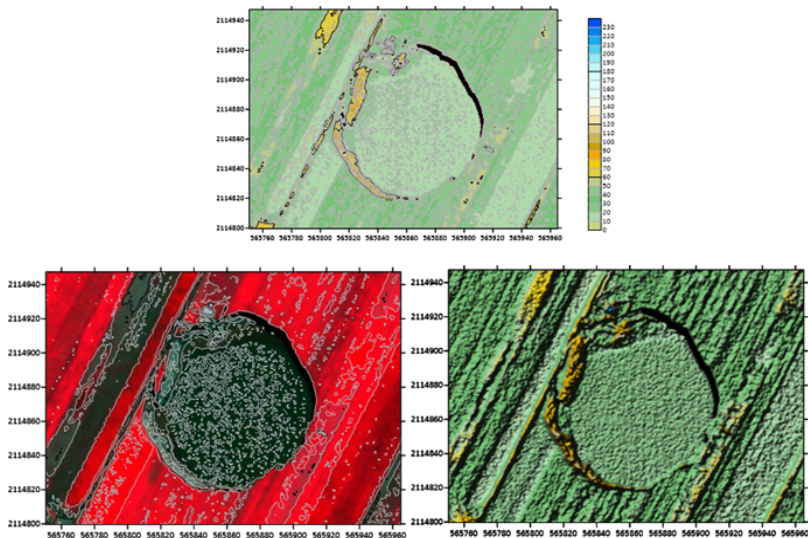
Figura 55. Correlación gráfica entre la pendiente y aceleración



Nota. Correlación gráfica entre la pendiente (X), la aceleración de la gravedad del agua (Y) y la dispersión general en el socavón del agua (puntos). Análisis gráfico de la pendiente con respecto a la aceleración de un líquido, al existir solo un metro de deformación el comportamiento es tendiente a ser laminar.

Se realizó un análisis multiespectral de los datos geostatísticos de las variables analizadas como la fuerza de aceleración, pendiente, profundidad y geometría de la zona de estudio (**Figura 56**).

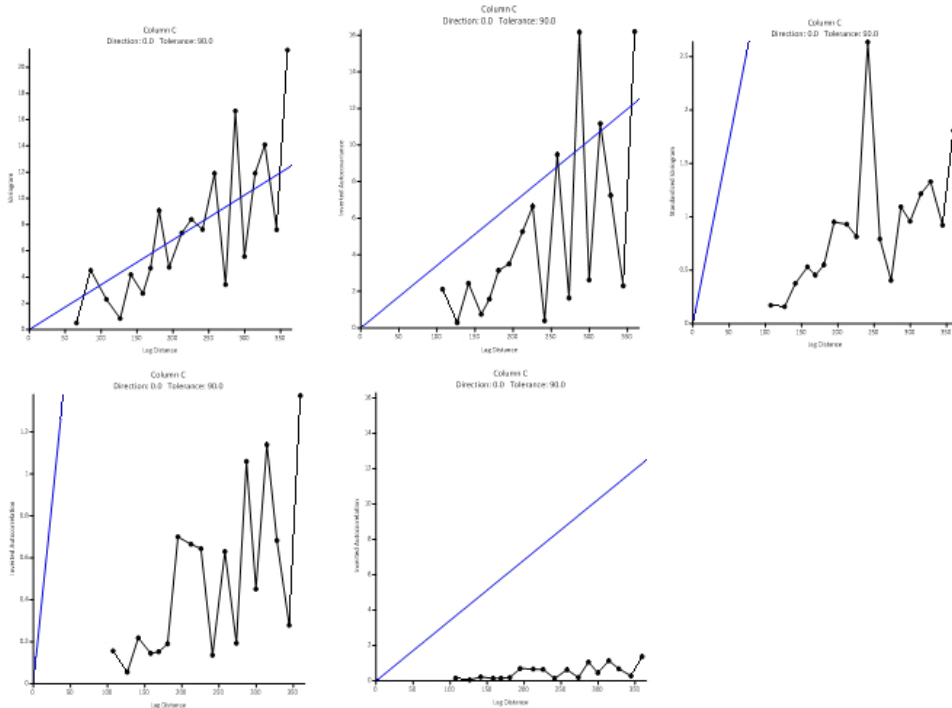
Figura 56. Análisis multiespectral de los datos geostatísticos



Nota. Correlación del proceso de datos con percepción remota, aplicando MultiSepc, Surfer y LeoWorks.

La Figura 57 muestra el variograma o semivariograma del estudio realizado en la zona del colapso estructural, este permite analizar el comportamiento espacial de una variable sobre un área definida; los resultados gráficos reflejan un comportamiento de simulación entre las pendientes, gasto y aceleración del agua.

Figura 57. Variograma



Nota. Muestra el desarrollo general del variograma y sus relaciones de autocorrelación que indica un comportamiento no lineal de los datos.

Para calcular el intervalo de confianza (95%) de la aceleración de la gravedad del agua, se tomó la desviación estándar y se dividió entre la raíz cuadrada del tamaño de la muestra.

Herramientas y equipos utilizados

Para el estudio de campo y gabinete se utilizó equipo topográfico, geohidrológico, además de software de modelación, geoestadístico y matemático (Surfer, Global Mapper, MultiSpec, LeoWorks, QGis, Math, ArcGis y Geoeas).

Para la obtención de datos y el procesamiento de imágenes satelitales de las constelaciones se utilizaron SkySat, Landsat y RapidEye.

En las visitas a campo se utilizó una estación total Geomax, con prisma y plomada láser, precisión de 5 segundos y distancia de hasta 600 metros, nivel y distanciómetro de hasta 250 metros, un sistema GNSS (Sistema Global de Navegación por Satélite-Global Navigation Satellite System), con 220 canales, navegación por trayectos múltiples y 129 canales (GPS-GLONASS-GALILEO). Una estación Davis para obtención de datos atmosféricos y meteorológicos. Sensores infrarrojos Hikvision detectores de señales superficiales. Un multi-metro para medir resistencia de roca y suelo.



El estudio ingenieril técnico-científico del socavón en el Municipio de Juan C. Bonilla en el estado de Puebla que se presenta, tiene un rango de confianza del 95%, debido a los cambios existentes dentro de la dinámica terrestre de la zona.

Este estudio determinó la estratigrafía de la zona colapsada, identificando una planicie de 1000 metros a la redonda (zona de riesgo), asociada con mecanismos dinámicos del subsuelo, con escorrentía de agua y un nivel freático a 50 metros de profundidad en promedio. Además, de la afluencia de agua extra, producto de la temporada de lluvia, lo que originó en el terreno una estructura colapsada por interacción del agua infiltrada, la roca y el suelo blando existente. Estos elementos originaron un proceso de degradación del suelo de la zona, desde hace tiempo, causando el hundimiento.

Como la zona de estudio se encuentra dentro de la cuenca del Río Alto Atoyac, las condiciones hidrológicas tienen un mecanismo de muchas décadas de proceso dinámico del agua subterránea, que con el tiempo y el peso extra generado por ruido ambiental (personas, construcciones, animales, tractores y sobre explotación de agua) contribuyeron para generar un colapso.

El tipo de suelo encontrado principalmente es el phaeozem y el cambisol, el primero por ser una zona plana, que según la clasificación de suelos World Reference Base for Soil Resources (WRB), contiene una marcada acumulación de materia orgánica en el suelo mineral y por estar saturados en su primer metro; el segundo se presenta con una gran acumulación de arcillas y óxidos de hierro, con condiciones favorables de humedad y de aporte de materia orgánica, alcanzando un espesor importante que resulta ser muy fértil. Estos tipos de suelo se encuentran en el primer horizonte con profundidades aproximadas de entre 50 centímetros a 1 metro.

La zona de colapso formó durante más de 90 años un jagüey, al pasar los años y con el crecimiento de la población, la sobreexplotación del agua y agrícola (agricultura de riego y de temporal), junto con los pozos para consumo familiar que se encuentran en la zona, probablemente hayan originado el colapso estructural.

Los resultados hasta el momento del estudio con modelos geométricos, matemáticos y satelitales son los siguientes:

- **Profundidad de 44.5 metros, diámetro mayor de 130.1 metros y diámetro menor de 125.3 metros.**
- **Área superficial de 12,796.701 m² (interna de 32,100.79 m²), perímetro de 401.036 m y volumen de 759,270.929 m³.**
- **Promedio de la aceleración de la gravedad para el agua de 9.77900181 m/s², anomalía al aire libre un promedio de 131.68342959 mgal o 0.00131683 m/s², anomalía de Bouguer un promedio de -117.10757041 mgal o 0.00117108 m/s².**
- **Promedio de la presión atmosférica son de 773.138 hPa o mbar.**
- **Gasto promedio con una intensidad de lluvia de 5.05 (rango de estudio del 17 mayo al 26 de junio de 2021) es de 45.64 m³/s, encontrándose el río Actiopa en línea recta del colapso a 442.44 m.**
- **Fuerza promedio del agua es de 97.78857950 N/m³.**
- **Pendiente en el terreno es de -1 m.**
- **Pendiente promedio de todo el colapso es de -0.052631579 m.**
- **El análisis geoestadístico demuestra un coeficiente de correlación con un valor que va de -1 a 0, lo que significa que la relación entre la aceleración de la gravedad del líquido y la elevación es inversa, es decir, que una variable disminuye conforme la otra aumenta, con una relación existente en el análisis gráfico de la pendiente con un comportamiento laminar del agua.**
- **El porcentaje de crecimiento del colapso, hundimiento o socavón ha sido de 18% (ascendente) desde el día 17 de mayo al 26 de junio de 2021.**

Su constitución geológica es roca volcánica (andesita, basalto y riolita), estratos de roca caliza o travertino, con espesor de hasta 50 metros, roca y suelo permeable y poroso con hasta 80% de absorción del agua. La sobreexplotación del manto acuífero produjo una oquedad interna y al no existir equilibrio colapsó; esto hace suponer que muy probablemente con el tiempo pueda existir otro

colapso en la zona. Este sistema de topografía está constituido por roca ígnea extrusiva (basalto y andesita).

La parte desprendida o fracturada del 15-16 de junio de 2021, tiene dimensiones importantes, con 113.38 metros cuadrados de área y 73.47 metros de perímetro. La zona presenta aguas subterráneas, y que la estructura geológica de la zona ha creado nuevas geoformas como cavernas, las cuales con el paso de los años y la interacción del agua tanto superficial, interna y de precipitación han y seguirán originando destrucción estructural.

Los estudios realizados no son concluyentes, los eventos naturales son caóticos, los resultados y modelos obtenidos contribuyen para tener información en tiempo real, pero no hace suponer que no habrá riesgo a futuro, ya que un evento natural no es igual al que le antecede o al posterior.

El estudio técnico-científico geológico, geomorfológico, hidro-
lógico, cartográfico y geoestadístico de la zona de estudio (co-
lapso, hundimiento o socavón) que se presenta en el municipio de
Juan C. Bonilla en el estado de Puebla, específicamente en los cam-
pos de cultivo de la junta auxiliar de Santa María Zacatepec, se
debe entender como un evento geológico muy importante para la
comunidad científica y particularmente para los especialistas del
área de Ciencias de la Tierra.

Entendiendo la dinámica terrestre de la zona y su correlación con
modelos geoestadísticos obtenidos para determinar las caracterís-
ticas del gasto, aceleración de la gravedad del agua, la geología y el
análisis geomorfológico, se puede concluir que existen en la zona,
procesos endógenos y exógenos.

El análisis geomorfológico demostró que no ha existido un equilibrio
en la zona, la geomorfología presentada es y seguirá siendo inesta-
ble en un periodo de tiempo geológico (semanas, décadas o siglos).
Es importante señalar que la geomorfología del lugar presenta ca-
racterísticas geohidrológicas muy interesantes desde hace cientos
de años, es decir, la constitución del subsuelo se podría relacionar
con un manto freático en toda la región; no hay que olvidar que
la mayor parte de esa zona cuenta con micro fallas tectónicas,
algunas activas y otras inactivas; aunado a la explotación del suelo
por medio de la agricultura que a veces no es la adecuada para ge-
nerar un equilibrio.

Se determinó que la geoforma colapsada tenía una estructura plana,
y que su proceso dinámico interno interactuó con mecanismos de
intemperismo (agentes externos) como el agua, viento, radiación
solar y la precipitación, variables meteorológicas que con el tiempo

geológico contribuyeron para que el proceso interno actuara y se relacionara como un mecanismo que influyó en el desgaste del suelo y roca y por ende posterior colapso.

También, se determinó que la zona es un receptor de agua que se alimenta por el rompimiento del ducto subterráneo natural que contribuyó a la formación del socavón y a un nuevo modelo geomorfológico de pequeñas cavernas y ductos hidrológicos de entrada y salida de agua. Existe la posibilidad de que en un escenario extremo se generen pequeños hundimientos por la percolación o infiltración, lo que pudiera causar un escenario de desastre geológico mayor.

La aplicación de técnicas telemétricas fue útil para dar una idea de lo que sucedió, ya que se identificó el río Atoyac, como fuente de los afluentes que descargan el agua subterránea en la **estructura**. La cartografía generada en 2D y 3D ilustra adecuadamente lo sucedido.

El intervalo de confianza para el desarrollo geoestadístico de las variables (aceleración de la gravedad del agua, fuerza del agua, gasto y pendiente) es del 95%, y se calculó tomando en cuenta las desviaciones estándar dividiéndose entre la raíz cuadrada del tamaño de las muestras.

Cabe señalar que el estado de Puebla presenta una gran dinámica terrestre y atmosférica, es decir, existen sismos, actividad volcánica, deslizamientos de laderas y condiciones meteorológicas y climáticas variadas, entre otros eventos naturales. Esta actividad podría verse relacionada con los cambios climáticos y calentamiento global que empiezan a notarse en el estado de Puebla.

El estudio ingenieril no es concluyente, es parte de una contribución técnica y científica a los estudios realizados por otras instancias involucradas, es importante señalar que la zona seguirá en un proceso dinámico por tiempo desconocido.

Se recomienda que los resultados del estudio se tomen con reserva y continuar monitoreando la zona del socavón (los datos no serán los mismos a los que se presenten en los próximos días).

Se sugiere realizar estudios permanentes, necesarios para ir identificando cambios estructurales en la zona, se podría instrumentar el lugar para dar un seguimiento del comportamiento de la geoforma.

El objetivo del estudio es poder contribuir a la prevención de desastres naturales y a la toma de decisiones gubernamentales. Por ello, es importante que el CONCYTEP cuente con un área de Geociencias y poder estar a la par de ciudades del primer mundo, donde se cuenta con áreas específicas que se coordinan con los estados y a la vez con organismos nacionales, con el objetivo de prevenir desastres ocasionados por fenómenos naturales.

El estado de Tabasco (Villahermosa) cuenta con el Centro del Cambio Global y la Sustentabilidad A.C. que es único en el país. Este es otro motivo que sustenta la propuesta de crear en Puebla, un Centro de Geociencias para realizar estudios generales de diferente índole en zonas de riesgo específicas.

Lo que sucedió en el municipio de Juan C. Bonilla es solo un evento de los muchos que podrían presentarse, por lo que Puebla al contar con un Centro en Geociencias estaría a la vanguardia como la primera área dedicada a estudios de las Ciencias de la Tierra con especialistas que aporten de forma inmediata su experiencia, con el objetivo de contribuir a la prevención de desastres naturales y a la toma de decisiones gubernamentales.

Referencias

Instituto Nacional de Estadística y Geografía, INEGI. (2019). Cálculo de gasto o caudal. http://antares.inegi.org.mx/analisis/red_hidro/PDF/CalculoGasto.pdf

Bibliografía

- Instituto Nacional de Estadística y Geografía, INEGI. (2020). Mapa digital. <http://gaia.inegi.org.mx/mdm6/>
- Máximo-Romero, P., Ramos-Aguilar, R., Martínez-Ortiz, A. y Hernández-Sánchez, A. (2017). Daños estructurales en Ciudad de México, producidos por los sismos del 28 de julio de 1957 y el 19 de septiembre de 1985. *Revista UNIMAR*, 35(2), 161-186. <https://revistas.umariana.edu.co/index.php/unimar/article/view/1533/pdf>
- Ramos-Aguilar, R., Rivera-Domínguez, A. y Mayorga-Raposo, R. (2005). Aplicación de imágenes satelitales para determinar el clima y la radiación solar en el estado de Puebla y la geohidrología de su zona norte. *Ciencia Ergo Sum*, 10(003), 283-294. <https://www.redalyc.org/pdf/104/10410306.pdf>
- Ramos-Aguilar, R., Máximo-Romero, P., Narciso-Hernández, J., Mirón-Morales, M. y Beltrán-Cruz, M. (2012). Estudio geoestadístico para obtener la gravedad local, pendiente y cálculo hidrológico de las barrancas Xaltelulco, Tepeloncoco, Tenepanco, Colorada y Quimichule del volcán Popocatepetl. *Boletín de Ciencias de La Tierra*, (31), 65-84. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/rbct/article/view/31254>
- 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. <https://doi.org/10.4236/acs.2013.34046>
- Ramos-Aguilar, R., Máximo-Romero, P., Galindo-López, V., Ávila-Cruz, M., Yáñez-Pérez, G., Márquez-Máximo, R., y Covarrubias-Salvatori, V. (2021). Análisis técnico geoestadístico de los ríos Atoyac y Alseseca que atraviesan la ciudad de Puebla, México. *Contactos, Revista de Educación en Ciencias e Ingeniería*, (119), 5-22. <https://contactos.izt.uam.mx/index.php/contactos/article/view/99>
- Ramos-Aguilar, R., Máximo-Romero, P., Galindo-López, V., Ávila-Cruz, M., Yáñez-Pérez, G., Márquez-Máximo, R., Hernández-Andrade, D. y Covarrubias-Salvatori, V. (2022). Análisis gravimétrico y cálculo de la fuerza de un líquido en el volcán Malinche, Puebla-Tlaxcala, México. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, (49), 9-14. <https://doi.org/10.15446/rbct.n49.91906>
- SIATL, (2019). Instituto Nacional de Estadística y Geografía. http://antares.inegi.org.mx/analisis/red_hidro/siatl
- Sinem, E., Barthelmes, F., Reißland, S., Elger, K., Förste, C., Flechtner, F. y Schuh, H. (2019). IC-GEM – 15 years of successful collection and distribution of global gravitational models, associated services, and future plans. *Earth System Science Data*, 11(2), 647-674. <https://doi.org/10.5194/essd-11-647-2019>

