



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

UNAM

POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

INSTITUTO DE GEOLOGÍA

GEOMORFOLOGÍA Y MORFOMETRÍA DEL CONO VOLCÁNICO CERRO DEL CAJETE Y
SUS ESTRUCTURAS GEOLÓGICAS ASOCIADAS, ESTADO VERACRUZ DE IGNACIO DE
LA LLAVE, MÉXICO

TESIS QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS DE LA TIERRA
(GEOLOGÍA)

ING. ALAIN FONSECA MONTERO

ASESOR: DR. RAFAEL ANTONIO LÓPEZ MARTÍNEZ

POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

CIUDAD DE MÉXICO, MAYO DE 2022



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

CÓDIGO DE ÉTICA

“Declaro conocer el Código de Ética de la Universidad Nacional Autónoma de México, plasmado en la Legislación Universitaria. Con base en las definiciones de integridad y honestidad ahí especificadas, aseguro mediante mi firma al calce que el presente trabajo es original y enteramente de mi autoría. Todas las citas de, o referencias a, las obras de otros autores aparecen debida y adecuadamente señaladas, así como acreditadas mediante los recursos editoriales convencionales”.

Alain Fonseca Montero

AGRADECIMIENTO

A mi tutor y amigo el profesor Dr. Rafael Antonio López Martínez quien me acogió y guio durante toda la investigación, brindándome sus conocimientos.

A mi comité tutor integrado por los prestigiosos profesores doctores José Luis Arce Saldaña y Dr. Ramón Espinasa Pereña por sus aportes y señalamientos durante la investigación.

A los eminentes sinodales Dr. Ramón Espinasa Pereña, Dr. Sergio Raúl Rodríguez Elizarrarás, Dr. Miguel Castillo Rodríguez y la Dra. Ana Lillian Martín del Pozzo por la realización de las críticas científicas a mi ponencia y por los conocimientos transmitidos.

A Lorena Bárcenas Guerrero por todo el tiempo que compartimos juntos, su ayuda y comprensión.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT).

A la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), a su Posgrado en Ciencias de la Tierra, en especial a su coordinadora Dra. Christina Desirée Siebe Grabach y la asistente Araceli Chamán, por su amable atención en todo momento.

Al proyecto Papiit IA103518

A los profesores que me impartieron clases, en especial a la profesora Dra. Adela Margarita Reyes Salas y al Dr. Fernando Núñez Useche.

A mis compañeros de estudio, en especial, en orden alfabético: Ana Acosta Finalé, Julio Cesar Batista García, Karla Perdomo Velázquez, Lilian Linares Valdés, Yasmani Lima Vera.

A la Dra. Raquel Daza Brunet, a la Maestra Wendy Vanesa Morales Barrera y al Maestro Hugo Enrique Salgado Garrido por su apoyo, ayuda y asesoramiento.

Al director del Instituto de Geología, profesor Dr. Ricardo Barragán Manzo, para el periodo 2018-2022, por sus sabios consejos.

A mis antiguos colegas de la facultad de Ingeniería Civil y en especial a los del departamento de Geociencias de la Universidad Tecnológica de La Habana (CUJAE), los que contribuyeron en parte de mi formación profesional actual; en especial al profesor Dr. Guillermo Miró Pages, Dr. Ramón González Caraballo (†), Dr. Carlos Sacasas León, Dr. José Pérez Lazo,

Dr. José Antonio Díaz Duque, Dr. Rolando García Sánchez y al Maestro Ramón (Mónico) Pérez Vázquez.

A mis profesores y compañeros de estudios de mi alma mater, Universidad de Pinar del Río "Hermanos Saíz Montes de Oca" (UPR).

En especial a mi padre, profesor Dr. Lázaro S. Fonseca Valdivia, por ser mi más grande crítico en la elaboración metodológica de esta investigación.

En primer lugar, a mi madre Dora Rafaela Montero Lafita por su perseverancia y valentía.

Por último, a todas las personas que de una u otra forma colaboraron y me acompañaron en el desarrollo de este trabajo de grado y me faltó mencionar, que de alguna manera me acompañaron durante un periodo corto o largo durante este proceso, gracias por haber compartido su tiempo conmigo.

DEDICATORIA

A mis amigos y amigas, que son mis hermanos y hermanas... apoyo en todo momento.

A mi hermano (Tabo) y mi cuñada que me han ayudado siempre. Los quiere el Puyulli.

A mi mamá y mi papá, siempre los he amado y los amaré, han cuidado de mí y de mi hija... ¿qué más puedo pedir?

A mi dragoncita de agua: gracias por tanto y perdón por tan poco, todo este sacrificio es por ti y para ti, no he podido estar en el día a día de parte de tus mejores años, pero quiero que seas feliz:

“Cuando vivo solo sueño un horizonte, falto de palabras.

En la sombra y entre luces todo es negro para mi mirada;

Sí tu no estas junto a mí, aquí.

Tú en tu mundo

Separado del mío por un abismo;

Oye llámame,

Yo volare a tu mundo lejano.

Por ti, volaré

Espera, que llegaré

Mi fin de trayecto eres tú

Para vivirlo los dos

Por ti, volaré

Por cielos y mares, hasta tu amor

Abriendo los ojos por fin

Contigo viviré.”

(Volaré por ti)

ÍNDICE

RESUMEN	1
ABSTRACT	3
INTRODUCCIÓN	5
1. CAPÍTULO I. CARACTERIZACIÓN DE LA REGIÓN DE ESTUDIO.....	7
1.1. Características y ubicación geográfica	7
1.2. Grado de estudio geológico regional y local	8
1.2.1. Estudio geológico regional	8
1.2.2. Estudio geológico local.....	8
1.3. Tectónica regional y local	10
1.4. Geología estructural regional y local.....	11
1.5. Geoquímica, mineralogía y petrografía del área de estudio	11
1.6. Estructuras e indicios asociados a riesgos geológicos regional y local	12
2. CAPÍTULO II. MORFOMETRÍA	20
2.1. Altimetría.....	20
2.2. Inclinación del terreno	21
2.3. Densidad de drenaje y orden de los cauces	23
2.4. Disección vertical del paisaje.....	25
2.5. Energía del Relieve.....	29
3. CAPÍTULO III. GEOMORFOLOGÍA.....	31
3.1. Mapa geomorfológico del cono de ceniza Cerro del cajete y sus estructuras asociadas	31
RELIEVE ENDÓGENO	32
1. Volcánico explosivo	32
1.1. Cono de ceniza con cráter.....	32
a) Labio.....	36
b) Atrio	36
c) Fondo	36
1.2. “Cúpulas”	37
2. Derrame de lava asociada a Cerro del Cajete	39
3. Estructuras asociadas al derrame de lava	43
3.1. Levées.....	43
3.2. Frente de lava	43
3.3. Sistema de tubos de lava, Cueva Chica de Rancho Chico	43
3.4. Depresiones semicirculares	59
4. Relieve tectónico.....	71
4.1. Lineamientos geológicos.....	71
RELIEVE ENDÓGENO MODELADO	77
5. Disección vertical por el tipo de roca	80

RELIEVE EXÓGENO	83
6. Zonas de reptación	83
a) Relación entre la zona de reptación y Cueva Chica de Rancho Chico.....	90
SÍMBOLOS COMPLEMENTARIOS	96
CONCLUSIONES:	97
RECOMENDACIONES:	99
REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA	100
ANEXO 1: Mapa Geomorfológico del Cerro del Cajete y sus estructuras asociadas	108

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de ubicación del área de estudio.	7
Figura 2. Modelo de distribución de derrames de lava en el área de estudio. Modificado de Siebert y Carrasco-Núñez (2002).....	9
Figura 3. Mapa topográfico de Cueva Chica de Rancho Chico; vista en planta. Zona en anaranjado corresponden a mineralización de óxi – hidróxidos de Fe, posiblemente; y las zonas en amarillo corresponden a mineralización de alofana. Elaborado por el Mtro. Hugo Enrique Salgado Garrido, inédito.	10
Figura 4. Mapa geológico donde se encuentra el área de estudio (en línea punteada negra). Modificado del Servicio Geológico Mexicano (2007a, 2007b).....	12
Figura 5. Imagen de satélite donde se indican las áreas de licuefacción (zona de licuefacción en amarillo); área de estudio enmarcado en línea blanca. Modificado del CENAPRED (2019)	14
Figura 6. Imagen de satélite donde se indican las áreas de hundimiento (zona de hundimiento en carmelita); área de estudio enmarcado en línea blanca. Modificado del CENAPRED (2019) ...	15
Figura 7. Imagen de satélite donde se indican las áreas de deslizamiento; área de estudio enmarcado en línea negra. Modificado del CENAPRED (2019).....	16
Figura 8. Imagen de satélite donde se indican las áreas de peligro de inestabilidad de laderas; área de estudio enmarcado en línea negra. Modificado del CENAPRED (2019)	17
Figura 9. Imagen de satélite donde se indican las áreas de susceptibilidad por inestabilidad de laderas, área de estudio enmarcado en línea negra. Modificado del CENAPRED (2019).....	18
Figura 10. Epicentros más cercanos al área de estudio hasta el año 2022. Área de estudio enmarcado en línea azul. Modificado de UNAM et al. (2021).	19
Figura 11. Mapa altimétrico del área de estudio.	22
Figura 12. Mapa de pendientes del área de estudio.	24
Figura 13. Mapa de densidad de drenaje y órdenes de los ríos del área de estudio.	26
Figura 14. Mapa de disección vertical del paisaje del área de estudio.	28
Figura 15. Mapa energía del relieve del área de estudio.	30
Figura 16. Conos de ceniza (símbolo de triángulos de color amarillo, área de estudio enmarcada en línea blanca) propuestos por Carrasco-Núñez et al. (2005) y el CENAPRED (2019). Modificado de CENAPRED (2019)	33
Figura 17. Cono de ceniza Cerro del Cajete y la estructura La Joya 06 a) Mapa sombreado; b) Mapa de pendientes. En ambos se señalan las estructuras que conforman el Cerro del Cajete.	34
Figura 18. Estructuras La Joya 06 y La Joya 07 a) Mapa sombreado, b) Mapa de pendientes y c) Mapa topográfico de curvas de nivel. Obsérvese en línea puntada, en ambas estructuras, formas semicirculares con relieve ligeramente positivo.	38

Figura 19. Mapa de flujos de lava en el área de estudio.....	40
Figura 20. Mapa del derrame de lava del cerro del cajete, coincide con el área de estudio, delimitada en línea negra.....	41
Figura 21. Mapa topográfico de Cueva Chica de Rancho Chico actualizado, vista en planta; tubo de lava maestro en rojo y tubo anastomosado en azul. Modificado con permiso del Mtro. Hugo Enrique Salgado Garrido.....	47
Figura 22. Esquema del origen y evolución del Sistema Rancho Chico de tubos de lava, en especial Cueva Chica de Rancho Chico; a) Formación del canal que originó el tubo maestro del sistema; b) origen del tubo maestro y tubo anastomosado de Cueva Chica de Rancho Chico y origen de Cueva Grande de Rancho Chico; c) evolución del sistema.	48
Figura 23. Estafilitos cónicos en el techo del tubo de lava anastomosado al final de las estructuras de lavas pahohoe y principio de las lavas aa. Obsérvese en el centro inferior de la imagen el encuentro de dichas lavas y, en las paredes del tubo de lava, al menos 6 estrías.....	51
Figura 24. Al comienzo del tubo maestro: a) estructuras de flujos de lava de pahohoe; b) primera caída; c) zona de mineralización de alofana a1 formada por goteo.....	51
Figura 25. Interrupciones del flujo de lava en el tubo anastomosado; 6 estrías en líneas rojas; estafilitos cónicos; a) a menos de un metro de la caída de 4 m, estructuras de flujo de lava pahohoe; b) zona de encuentro de las estructuras de flujo de lava pahohoe y aa; foto en miniatura, estructuras de flujo de lava aa más cerca a la pared.	52
Figura 26. Salón con estafilitos cónicos y estructuras de flujos de lava pahohoe en el piso del tubo de lava anastomosado en su zona más ancha.	53
Figura 27. Cornisa tapada, en gran medida por bloques caídos de hasta 0.7 m de diámetro. Formación de un nuevo tubo de lava dentro del tubo maestro, antes de la zona de mineralización de alofana a2.	53
Figura 28. Lavaball a) que clausuró la entrada de lava al tubo maestro; b) a 2 m del primero..	54
Figura 29. Caída de 4 m y bloques caídos del derrumbe parcial entre el tubo anastomosado y el tubo maestro.	55
Figura 30. Estalagmitas a) en la zona de mineralización f1, tubo maestro; b) en la zona de mineralización f4, formada por goteo, tubo anastomosado.....	56
Figura 31. Entrada de Cueva Chica de Rancho Chico en la cuneta de la carretera Puebla – Xalapa, obsérvese suelo en la entrada.	56
Figura 32. Sedimentos dentro de Cueva Chica de Rancho Chico. Obsérvese como penetra el agua en el momento de la toma de la foto; la lluvia era de fuertes a muy fuertes.	57
Figura 33. Primera caída en el tubo maestro (1.30 m).....	57
Figura 34. Repisa y estafilitos en el tubo de lava anastomosado, frente a la zona de alofana a4.	58

Figura 35. Rootsicles incipiente y estafilitos cónicos en el tubo de lava anastomosado en la zona de mineralización de oxihidróxidos f4, cerca de la grieta.	58
Figura 36. Depresión semicircular CR02 cubierta por vegetación. Obsérvese la depresión a menos de 5 m de la carretera Puebla – Xalapa. Imagen tomada con un dron DJI Mavic 2 Pro.	61
Figura 37. Perfil topográfico realizado en Google Earth Pro a la depresión CP01. La flecha roja muestra un área, en el terreno y en el perfil, con las características morfológicas y de vegetación circundante parecida a la CP01, en cambio, el perfil topográfico demuestra la no existencia de una depresión en la misma. Fecha de la imagen: 12 de diciembre de 2020.	61
Figura 38. Perfil topográfico realizado a la depresión CP01 con dirección NE – SO a) en Google Earth Pro, fecha de la imagen: 12 de diciembre de 2020 b) al MDE del LIDAR del INEGI (2009), en el centro de la depresión aparece un relieve positivo que no corresponde al relieve original.	62
Figura 39. Mapa de ubicación de las depresiones semicirculares visitadas y posibles.	66
Figura 40. Acercamiento del mapa de ubicación de las depresiones semicirculares; área 1. ...	67
Figura 41. Acercamiento del mapa de ubicación de las depresiones semicirculares; área 2. ...	67
Figura 42. Acercamiento del mapa de ubicación de las depresiones semicirculares; área 3. Modelo sombreado MDE del LIDAR de la carta E14B27D1 (2009); posición de la fuente de luz horizontal 45°.	68
Figura 43. Acercamiento del mapa de ubicación de las depresiones semicirculares; área 4. Modelo sombreado MDE del LIDAR de la carta E14B27D1 (2009); posición de la fuente de luz horizontal 45°.	68
Figura 44. Acercamiento del mapa de ubicación de las depresiones semicirculares; área 5. Modelo sombreado MDE del LIDAR de la carta E14B27D1 (2009); posición de la fuente de luz horizontal 45°.	69
Figura 45. Vehículos de alto tonelaje (camión remolque y tipo bitrén largo) circulando en la carretera Puebla – Xalapa cerca de la depresión CR01 y CR02, durante el trabajo de campo. Las imágenes inferiores fueron tomadas por un dron DJI Mavic 2 Pro.	70
Figura 46. Grieta que corta transversalmente al tubo de lava anastomosado en Cueva Chica de Rancho Chico, orientación E – O. Cercana, en superficie, con una zona de reptación y encima de una zona de mineralización de oxihidróxidos de Fe.	72
Figura 47. Compuesto en falso color de las bandas de Landsat 8 (R, G, B) = (7, 4 y 1) con rasgos de lineamientos geológicos del área de estudio.	74
Figura 48. Mapa de lineamientos geológicos del área de estudio.	75
Figura 49. Mapas de relieve sombreado del área de estudio, posición de la luz horizontal de 0° a 90°.	78

Figura 50. Mapas de relieve sombreado del área de estudio, posición de la luz horizontal de 135° a 225°	79
Figura 51. Mapas del relieve sombreado del área de estudio, posición de la luz horizontal de 270° a 315°	80
Figura 52. Mapa de disección vertical por el tipo de roca del área de estudio.....	82
Figura 53. Zona de reptación RR01 que coincide con una zona de bloques caídos del techo dentro de Cueva Chica de Rancho Chico. Obsérvese escalones de la reptación, árboles frondosos y árboles jóvenes curvados en su base o caídos y alineación superficial de bloques de rocas.	84
Figura 54. Zona de reptación RR02. Obsérvese un árbol torcido cerca de su base y las ondulaciones del suelo.....	85
Figura 55. Zona de reptación RR03. Obsérvese árboles torcidos en la derecha de la imagen y las ondulaciones del suelo en el centro.	85
Figura 56. Mapa de ubicación de las zonas de reptaciones, subdividido en tres áreas.....	86
Figura 57. Mapa de riesgo por deslizamiento del área de estudio, realizado a partir de la clasificación de Lugo-Hubp (1988); superpuesto las zonas de reptación.	87
Figura 58. Zona de reptación RP01 limitada en color amarillo, en la ladera norte del cono de ceniza Cerro del Cajete. Obsérvese en la base de la zona de reptación una vivienda y la línea del ferrocarril y, en la esquina superior derecha de la figura, la localidad La Joya. Imagen satelital descargada de Google Earth Pro. Fecha de la imagen: 12 de diciembre de 2020	88
Figura 59. Acercamiento del mapa de ubicación de las zonas de reptación; área 1.	88
Figura 60. Acercamiento del mapa de ubicación de las zonas de reptación; área 2.	89
Figura 61. Acercamiento del mapa de ubicación de las zonas de reptación; área 3.	89
Figura 62. Zonas de reptación observadas en el terreno en color rojo y superpuesta a la topografía de Cueva Chica de Rancho Chico en amarillo. La vegetación más oscura dentro de la zona de reptación son árboles altos. Obsérvese como la parte sur del tubo anastomosado se encuentra por debajo de la carretera Puebla – Xalapa. Imagen satelital descargada de Google Earth Pro. Fecha de la imagen: 12 de diciembre de 2020	92
Figura 63. Mapa topográfico de Cueva Chica de Rancho Chico donde se sobrepone las zonas de reptación que se observan en superficie. En rojo el tubo maestro y en azul el tubo anastomosado.	93
Figura 64. Mapa de franjas de mineralización de oxihidróxido y alofana en Cueva Chica de Rancho Chico.	93
Figura 65. Esquema de un proceso de reptación. Modificado de Suarez-Díaz (1998, p. 15); Suárez-Díaz (2009, p. 13).....	94
Figura 66. Esquema de relación entre las zonas de mineralización en Cueva Chica de Rancho Chico y la zona de reptación en superficie: a) acumulación de minerales, b) grieta en la roca, c)	

goteo de agua mineralizada, d₁) zona de mineralización de oxihidróxidos y; d₂) zona de mineralización de alofana. 95

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación de la red de drenaje. según Delgadillo y Páez (2008).....	25
Tabla 2. Clasificación para la densidad de disección (Priego-Santander et al., 2003, p. 79).....	27
Tabla 3. Parámetros morfométricos comúnmente medidos en edificios monogenéticos. (Rodríguez-Gonzalez y Fernández-Turiel, 2015, p. 46).....	35
Tabla 4. Datos morfométricos del cono de ceniza Cerro del Cajete.	36
Tabla 5. Datos morfométricos de las estructuras La Joya 06 y La Joya 07.	37
Tabla 6. Parámetros morfométricos comúnmente medidos en derrames de lava. (Rodríguez-Gonzalez y Fernández-Turiel, 2015, p. 46).....	42
Tabla 7. Datos morfométricos del derrame de lava perteneciente al cono de ceniza Cerro del Cajete.....	42
Tabla 8. Conteo y características de las estructuras primarias y secundarias de Cueva Chica de Rancho Chico.	46
Tabla 9. Datos morfométricos de las depresiones semicirculares del área de estudio. Las depresiones nombradas por CR## son las visitadas en el terreno y las CP## las determinadas en la interpretación de las imágenes satelitales.....	64
Tabla 10. Lineamientos geológicos obtenidos con sus respectivos azimuts y grupos en los que fueron divididas las tendencias principales de los mismos.	76
Tabla 11. Posición de la luz en la posición vertical y horizontal para la elaboración de los mapas de relieve sombreado.....	77
Tabla 12. Propuesta de unificación de distintos tipos litológicos según sus propiedades químico-mineralógicas y la expresión resultante en el relieve para el área de estudio. Modificado de Priego-Santander et al. (2003, p. 86).....	81
Tabla 13. Datos morfométricos de las zonas de reptación. Las zonas de reptación nombradas por RR## son las visitadas en el terreno y las RP## las determinadas en la interpretación de las imágenes satelitales.	91

RESUMEN

El Cerro del Cajete es un cono de ceniza ubicado en el Campo Volcánico Monogenético de Xalapa en el estado de Veracruz de Ignacio de la Llave, México, con una edad mayor a 2 Ma. En el flujo de lava emitido por este cono se encuentran diferentes vías de comunicación y grupos poblacionales que se asentaron o construyeron sobre las estructuras del mismo. Para un mejor aprovechamiento hidrogeológico, geoturístico y de estudio de peligros geológicos se requiere un mejor conocimiento científico de las características geomorfológicas y morfométricas del cono y sus estructuras asociadas.

Esta investigación tiene como objetivo general caracterizar geomorfológicamente el cono de ceniza Cerro del Cajete y las estructuras geológicas asociadas, en el estado Veracruz de Ignacio de la Llave, México.

Mediante el empleo de métodos geológicos, geomáticos, geomorfológicos y morfométricos los resultados obtenidos demostraron que el Cerro del Cajete es el único cono de ceniza en el área de estudio. Los criterios utilizados para la elaboración de la cartografía morfométrica y geomorfológica detallada del cono de ceniza Cerro del Cajete y las estructuras geológicas asociadas están basadas en una clasificación genética del relieve (endógeno, endógeno modelado y exógeno).

Al caracterizar geomorfológica y morfométricamente el cono de ceniza Cerro del Cajete y las estructuras geológicas asociadas, se pudo establecer que: 1) Las regiones geomorfológicas de zona de lomerío y planicie volcánica mantienen una concordancia con la litología y tienen una génesis en común. 2) El promedio de los valores altimétricos es de 1 811 msnm. 3) La densidad de drenaje en la región es de 1.49 km/km². 4) La disección vertical del paisaje no sobrepasa los valores de 80 m/km². 5) Predomina una energía del relieve menor a 10 m. 6) La existencia de un solo cono de ceniza. 7) Nuevas morfologías asociadas al cono de ceniza no habían sido descritas antes (labio, atrio y fondo).

Se cartografió: 1) Catorce lineamientos, orientados entre el OSO – ENE y ONO – ESE. 2) La presencia de dos estructuras en forma de “cúpulas” cercanas al cono de ceniza, nombradas en esta investigación como La Joya 06 (mencionado en estudios previos como cono volcánico) y La Joya 07. 3) Un derrame de lava proveniente del cono de ceniza con una dirección preferencial del O – E y nuevas estructuras asociadas al derrame (*levées* y frente de lava). 4) Veinte depresiones semicirculares a circulares concentradas en cinco áreas; seis de las depresiones son colapsos de tubos de lava o explosiones freáticas, no se pudo determinar el tipo

de estructura que eran las otras por su morfología. 5) Trece zonas de reptación agrupadas en tres áreas, doce constituyen un peligro geológico para las vías de comunicación y asentamientos, cuatro de estas zonas están ubicadas sobre Cueva Chica de Rancho Chico y guardan relación con las zonas de mineralización dentro de la cueva.

Se actualizó la cartografía topográfica de Cueva Chica de Rancho Chico en el área de estudio con nuevas estructuras.

La Cueva Chica de Rancho Chico forma parte de un sistema de tubo de lava originada por el derrame de lava, de edad menor a 42 000 años AP, proveniente del Cerro del Cajete. Está compuesta por un tubo maestro y uno anastomosado, tiene una sola entrada, se encuentran dos tipos de lava, dos *lavaball*, una cornisa, estructuras que denotan la interrupción de al menos 8 veces el flujo de lava en el tubo anastomosado, zonas de mineralización, la presencia de una *rootsicles* incipiente y derrumbes parciales del techo posiblemente causados por eventos lo suficientemente fuertes para originarlos.

Cuando el canal principal que dio origen al tubo maestro de esta cueva comenzó a rebosarse, se originó el tubo anastomosado. Los *levées* de ambos canales fueron cerrándose y formando el techo de los tubos. Un *lavaball* entró al sistema y un segundo lo selló, clausurando la entrada de más lava. Sigue drenándose la lava que queda y se clausura el tubo maestro a unos 246 m de la entrada de lava. Con la construcción de la carretera Puebla – Xalapa, se abre una entrada artificial por el tubo anastomosado a la cueva. Uno de los ramales de este tubo pasa por debajo de la carretera y presenta derrumbes en esa área; la causa de este derrumbe puede ser los sismos o la vibración ocasionado por los camiones de alto tonelaje, convirtiéndose en una amenaza de formación de un hundimiento.

El estudio de estas estructuras asociadas al Cerro del Cajete sirvió para obtener el mapa geomorfológico del área permitiendo su aplicabilidad inmediata en estudios de ordenamiento territorial, aprovechamiento y protección de recursos; además de constituir un elemento enfocado al entendimiento de la evolución volcánica de dicho territorio.

Palabras clave:

Cono de ceniza Cerro del Cajete, geomorfología, morfometría, cono de ceniza

ABSTRACT

Cerro del Cajete is a cinder cone located in the Xalapa Monogenetic Volcanic Field in the state of Veracruz de Ignacio de la Llave, Mexico, with an age greater than 2 My. In the lava flow emitted by this cone there are different communication routes and population groups that settled or built on its structures. For a better use of hydrogeology, geotourism and the study of geological hazards, a better scientific knowledge of the geomorphological and morphometric characteristics of the cone and its associated structures is required.

The main goal of this research is to geomorphologically characterize the Cerro del Cajete cinder cone and associated geological structures, in the state of Veracruz de Ignacio de la Llave, Mexico.

Using of geological, geomatic, geomorphological and morphometric methods, the results obtained showed that Cerro del Cajete is the only cinder cone in the study area. The criteria used for the elaboration of the detailed morphometric and geomorphological cartography of the Cerro del Cajete cinder cone and the associated geological structures are based on a genetic classification of the relief (endogenous, modeled endogenous and exogenous).

By geomorphologically and morphometrically characterizing the Cerro del Cajete cinder cone and associated geological structures, it was possible to establish that: 1) The geomorphological regions of the hills zone and the volcanic plain maintain a concordance with the lithology and have a common genesis. 2) The average of the altimetry values is 1,811 meters above sea level. 3) The drainage density in the region is 1.49 km/km². 4) The vertical dissection of the landscape does not exceed values of 80 m/km². 5) A relief energy of less than 10 m predominates. 6) The existence of a single cinder cone. 7) New morphologies associated with the cinder cone had not been described before (lip, atrium and bottom).

It was mapped: 1) Fourteen lineaments, oriented between the OSO – ENE and WNW – ESE. 2) The presence of two structures in the form of "domes" near the cinder cone, named in this investigation as La Joya 06 (mentioned in previous studies as a volcanic cone) and La Joya 07. 3) A lava flow coming from the cinder cone with a preferential direction from W – E and new structures associated with the lava flow (levées and lava front). 4) Twenty semicircular to circular depressions concentrated in five areas; six of the depressions are lava tube collapses or phreatic explosions, the type of structure the others were could not be determined from their morphology. 5) Thirteen creeping zones grouped into three areas, twelve constitute a geological hazard for

communication routes and settlements, four of these zones are located on Cueva Chica de Rancho Chico and are related to the mineralization zones inside the cave.

The topographic cartography of Cueva Chica de Rancho Chico in the study area was updated with new structures.

The Cueva Chica of Rancho Chico is part of a lava tube system originated by the lava flow, less than 42,000 years BP, coming from Cerro del Cajete. It is composed of a master tube and an anastomosed tube, it has a single entrance, there are two types of lava, two lavaballs, a cornice, structures that denote the interruption of at least 8 times the flow of lava in the anastomosed tube, mineralization zones, the presence of incipient rootsicles and partial collapses of the roof possibly caused by events strong enough to originate them.

When the main channel that gave rise to the main tube of this cave began to overflow, the anastomosed tube was created. The levees of both channels were closing and forming the roof of the tubes. One lavaball entered the system and a second sealed it, shutting off more lava. The remaining lava continues to drain and the main tube is closed about 246 m from the lava entrance. With the construction of the Puebla – Xalapa highway, an artificial entrance was opened through the tube anastomosed to the cave. One of the branches of this tube passes under the road and has landslides in that area; The cause of this landslide may be earthquakes or the vibration caused by high-tonnage trucks, becoming a threat of sinking formation.

The study of these structures associated with Cerro del Cajete served to obtain the geomorphological map of the area allowing its immediate applicability in studies of land use, use and protection of resources; in addition to constituting an element focused on the understanding of the volcanic evolution of said territory.

Keywords:

Cerro del Cajete cinder cone, geomorphology, morphometry, cinder cone

INTRODUCCIÓN

El cono de ceniza Cerro del Cajete y sus estructuras geológicas asociadas se encuentran ubicados en el estado Veracruz de Ignacio de la Llave dentro del Campo Volcánico Monogenético Xalapa (CVMX). Autores como Rodríguez et al. (2010a) tomando en cuenta estudios previos de Siebert y Carrasco-Núñez (2002) han estudiado el CVMX y dataron alrededor de 12 conos de escoria a partir del método $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$. Se determinaron tres grupos de edades: mayores a 2.0 Ma, entre 0.40 y 0.25 Ma y menores a 0.1 Ma para determinar tres flujos de lavas diferentes en su área de estudio. El Cerro del Cajete se encuentra ubicado en el grupo de edades mayores.

A su vez, el CVMX se encuentra en la Faja Volcánica Transmexicana (FVTM), un conjunto de elevaciones volcánicas, con orientación este – oeste, que se extienden a lo largo de aproximadamente 1 000 km, y con aproximadamente 8 000 estructuras volcánicas junto con algunos cuerpos intrusivos (Gómez-Tuena et al., 2005; Gómez-Tuena et al., 2007). Asimismo, cuenta con varios sistemas subterráneos de origen volcánico, como los tubos de lava (Luis-Vargas, 2018).

En la bibliografía consultada sobre Cerro del Cajete y sus estructuras geológicas asociadas en cuanto al campo de la hidrología y los peligros geológicos, solo se cuenta con los mapas elaborados por el INEGI (2010a, 2010b) y el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED, 2019), de riesgos geológicos por agentes perturbadores geológicos, de licuefacción, hundimiento, de deslizamiento, de peligro de inestabilidad de laderas y de susceptibilidad por inestabilidad de laderas; y que el área se encuentra ubicada en la “subcuenca hidrográfica RH28Bj R. Cedeño [sic]” (INEGI, 2010c). No se encontraron evidencias sobre investigaciones pasadas acerca del uso del área para la actividad económica del turismo.

Se reconoce que no existen documentos escritos o cartográficos que expliquen y presenten de forma puntual las características de emplazamiento, evolución, modelado y dinámica de las diversas unidades que constituyen el territorio en cuestión. Es así, que el interés por desarrollar este trabajo surge ante la necesidad de contar con un estudio de carácter morfométrico y geomorfológico en el que se analice, caracterice y cartografíe elementos y formas que integran el relieve del Cerro del Cajete y sus estructuras geológicas asociadas. Otro incentivo para el desarrollo de esta investigación, responde a la necesidad en la elaboración del mapa geomorfológico de esta zona, documento que es reconocido por su aplicabilidad inmediata en estudios de ordenamiento territorial, aprovechamiento y protección de recursos, en si este tipo de cartografía constituye un elemento enfocado al entendimiento de la evolución volcánica de dicho territorio.

Para el desarrollo de esta investigación se planteó como objetivo general, caracterizar geomorfológicamente el cono de ceniza Cerro del Cajete y las estructuras geológicas asociadas en el estado Veracruz de Ignacio de la Llave, México.

Los criterios utilizados para la elaboración de la cartografía morfométrica y geomorfológica detallada del cono de ceniza Cerro del Cajete y las estructuras geológicas asociadas fueron las de Simonov (1985) y Lugo-Hubp (1988) los cuales están basados en una clasificación genética del relieve (endógeno, endógeno modelado y exógeno). Este método se podría clasificar como la Escuela Mexicana, la cual combina aspectos de la Geomorfología Francesa y Rusa (Quesada-Román, 2016).

Esta tesis estuvo basada en observaciones de trabajo de campo, interpretación y cartografía, debido a que la incidencia de la pandemia de COVID-19, limitó la salida al campo a una ocasión por lo que no se pudieron hacer mediciones de todas las estructuras y tomar muestras suficientes para su procesamiento en laboratorios. En el campo se realizaron mediciones a algunas estructuras, se compararon estas mediciones con las hechas a imágenes satelitales y el modelo digital de elevación, se verificó la coincidencia o aproximación de las mediciones y se procedió a medir cartográficamente aquellas que no pudieron ser medidas en el terreno. La incidencia de la pandemia conllevó a la reorientación de la tesis más de una vez, así como los métodos y herramientas a utilizar, basándose fundamentalmente en trabajos precedentes y el empleo de imágenes satelitales y Sistemas de Información Geográfica (SIG).

La tesis consta de tres capítulos: en el primer capítulo, Caracterización de la Región de Estudio, se describe el objeto de estudio: el grado de estudio geológico, tectónico, geoquímico, geólogo estructural, petrográfico y de peligros geológicos de la región donde se encuentra enmarcado el área de estudio.

En el segundo capítulo, Morfometría, se cuantifican las características del relieve mediante las variables de altimetría, inclinación del terreno, densidad de drenaje, disección vertical y energía del relieve.

En el tercer capítulo, Geomorfología, analiza la interpretación de fotografías, cartografías y estructuras geológicas que dieron como resultado un mapa geomorfológico teniendo en cuenta el relieve endógeno, el relieve endógeno modelado y el relieve exógeno.

Se presentan las conclusiones y se ofrecen recomendaciones para futuras investigaciones.

1. CAPÍTULO I. CARACTERIZACIÓN DE LA REGIÓN DE ESTUDIO

Este capítulo tiene como objetivo realizar una breve caracterización geológica, geomorfológica y de peligros geológicos de la región de estudio, comenzando desde una región más amplia hasta los aspectos particulares.

1.1. Características y ubicación geográfica

El área de estudio se encuentra ubicada en el estado de Veracruz de Ignacio de la Llave. Está delimitada por las coordenadas geográficas $97^{\circ}0'51.86''\text{O} - 96^{\circ}55'22.81''\text{O} / 19^{\circ}37'16.89''\text{N} - 19^{\circ}34'22.70''\text{N}$. Está limitado al norte con la localidad El Fresno, al sur con la localidad Plan Sedeño, al este con la localidad La Concepción y al oeste con la localidad Aguasuelas. (Figura 1)

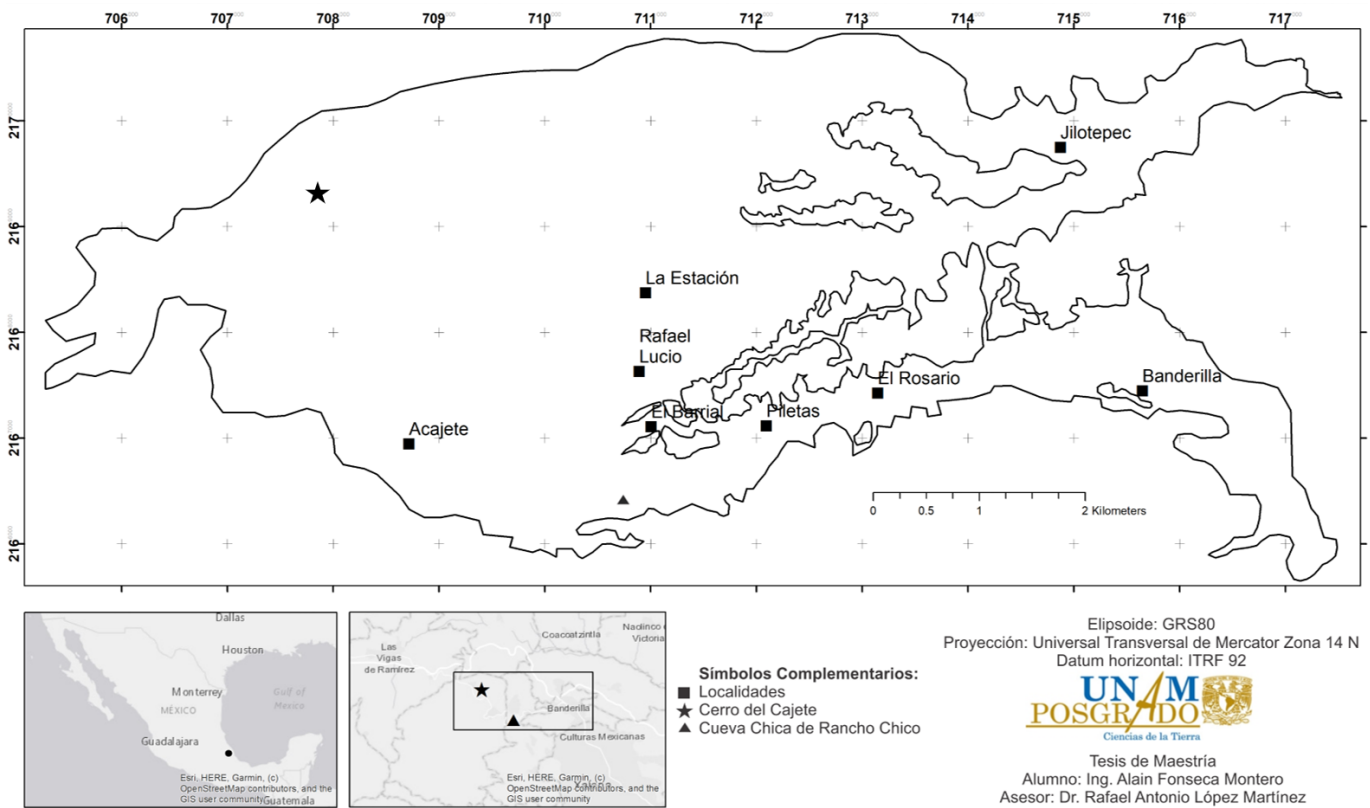


Figura 1. Mapa de ubicación del área de estudio.

Abarca aproximadamente un área de 67.02 km^2 y queda comprendida dentro de las cartas topográficas publicadas por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) (2010a); INEGI (2010b) escala 1:20 000: E14B26f y E14B27d.

Según el mapa de Red Hidrográfica Escala 1:50 000 Edición: 2.0, elaborado por el INEGI (2010c), el área se encuentra mayormente ubicada en la “subcuenca hidrográfica RH28Bj R.

Cedeño [sic]”; cuenca hidrográfica principal Río Actopan (Mora-González et al., 2015); perteneciente a la región hidrográfica Papaloapan (INEGI, 2010c). En esta área se encuentra el arroyo Teapan y el río Sedeño que es uno de los ríos que tributa al río Actopan.

1.2. Grado de estudio geológico regional y local

El análisis de la información geológica parte desde una perspectiva regional para luego abordar el área de estudio.

1.2.1. Estudio geológico regional

El área de estudio es parte de la FVTM de edad Plioceno al Cuaternario y se localiza en el sector oriental, específicamente en el CVMX.

Estudios específicos sobre las rocas del CVMX se han concentrado en la coexistencia de magmatismo máfico alcalino y calcialcalino en la zona (Ferrari et al., 2018; Robin, 2013). Mediante criterios geomorfológicos y estratigráficos, apoyados en algunas edades radiométricas, Siebert y Carrasco-Núñez (2002) separan a los conos de este campo monogenético en tres grupos de acuerdo a sus edades relativas. Los conos más viejos, representados por el volcán La Joya, tendrían edades de < 42 000 años AP. El Grupo de Conos Centrales sería un ejemplo de los volcanes de edad intermedia (Pleistoceno Tardío a Holoceno). Los volcanes más jóvenes incluyen al Cerro Colorado y El Volcancillo. Cerro Colorado, al oeste del área, generó un derrame fechado en 2980 años AP en Rincón de Chapultepec (Campo Volcánico de Naolinco), de basalto tipo pahoehoe de afinidad calcialcalina, emplazado mediante tubos de lava y alcanzó la excepcional longitud de 50 km. El Volcancillo, generó hace 870 años AP el derrame Toxtlacoaya, del tipo aa y de 12 km de largo, que consiste en un hawaiano alcalino, así como el derrame de lava Naolinco. (Carrasco-Núñez et al., 2005)

El CENAPRED (2019) y Siebert y Carrasco-Núñez (2002) mencionan la presencia de dos conos de ceniza en el área de estudio. Estos corresponden a 2 de los 24 conos más viejos, representados por el volcán La Joya (Siebert y Carrasco-Núñez, 2002). Uno de ellos es conocido geográficamente como Cerro del Cajete (INEGI, 2010a).

1.2.2. Estudio geológico local

Según Siebert y Carrasco-Núñez (2002) el área de estudio está constituida por basaltos de edad posterior a $40\,060^{+2590}_{-1960}$ y $43\,450^{+4160}_{-2730}$ años AP, según muestras datadas por radiocarbono en suelos debajo de estas rocas, CP – 65 y CP – 141 respectivamente. En el área

de estudio se encuentran dos derrames de lava (Figura 2). Uno corresponde a flujos de edad intermedia, Dos Veredas; y flujos antiguos, La Joya. La dirección preferencial regional es de oeste a este, siguiendo la dirección de la pendiente.

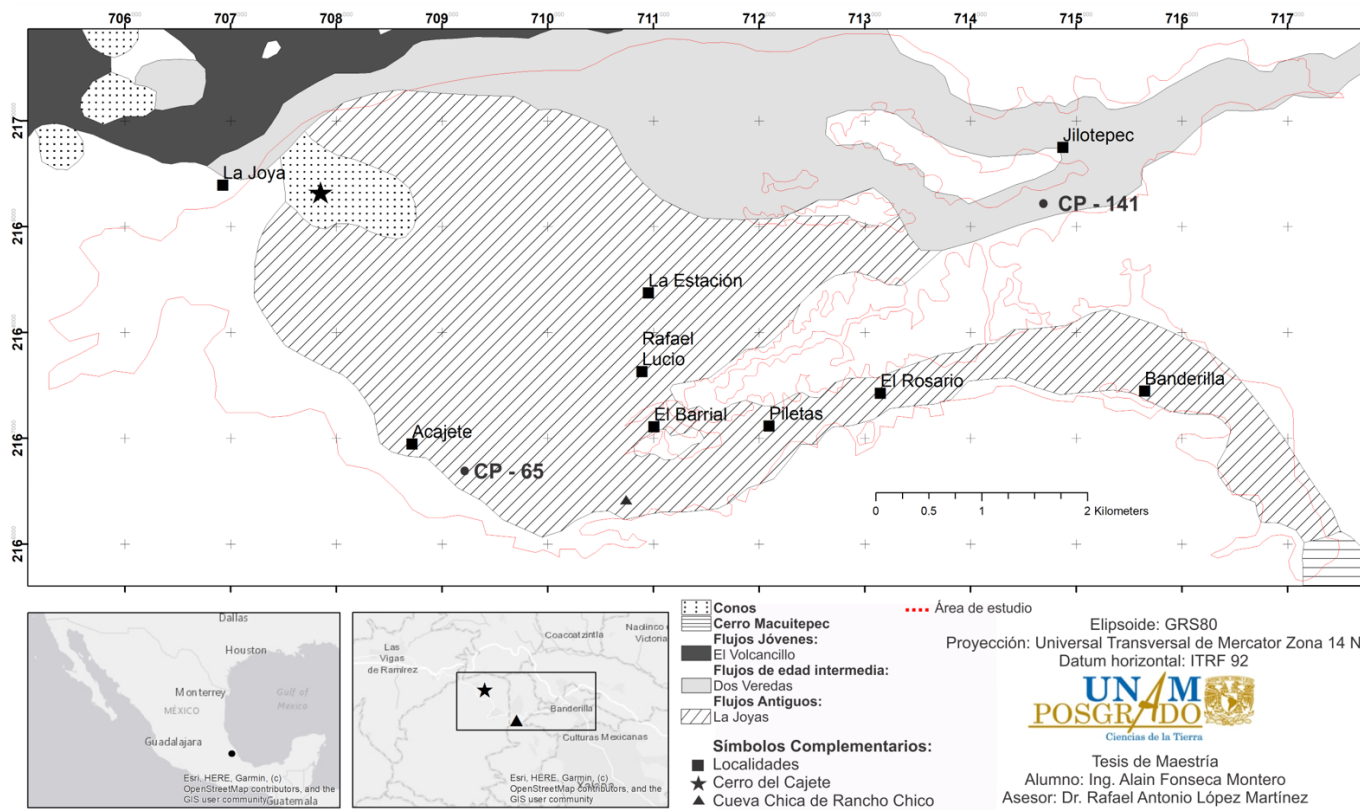


Figura 2. Modelo de distribución de derrames de lava en el área de estudio. Modificado de Siebert y Carrasco-Núñez (2002)

Gassós y Espinasa-Pereña (2006) estudian por primera vez los tubos de lava, a unos 11 km ENE del área de estudio, proveniente de El Volcancillo. En la bibliografía consultada no se encuentra referencia de sistemas de tubos de lava presentes en el área de estudio.

En el área de estudio se encuentra el Sistema Rancho Chico de tubos de lava, constituido por Cueva Chica de Rancho Chico (Figura 3) que fue estudiada en el terreno y Cueva Grande de Rancho Chico, según conversación personal con el Dr. Ramón Espinasa Pereña. La ubicación de Cueva Chica de Rancho Chico está en la zona centro sur del área de estudio (Figura 1 y Figura 2). La génesis y evolución del Sistema Rancho Chico de tubos de lava aún no ha sido totalmente estudiada.

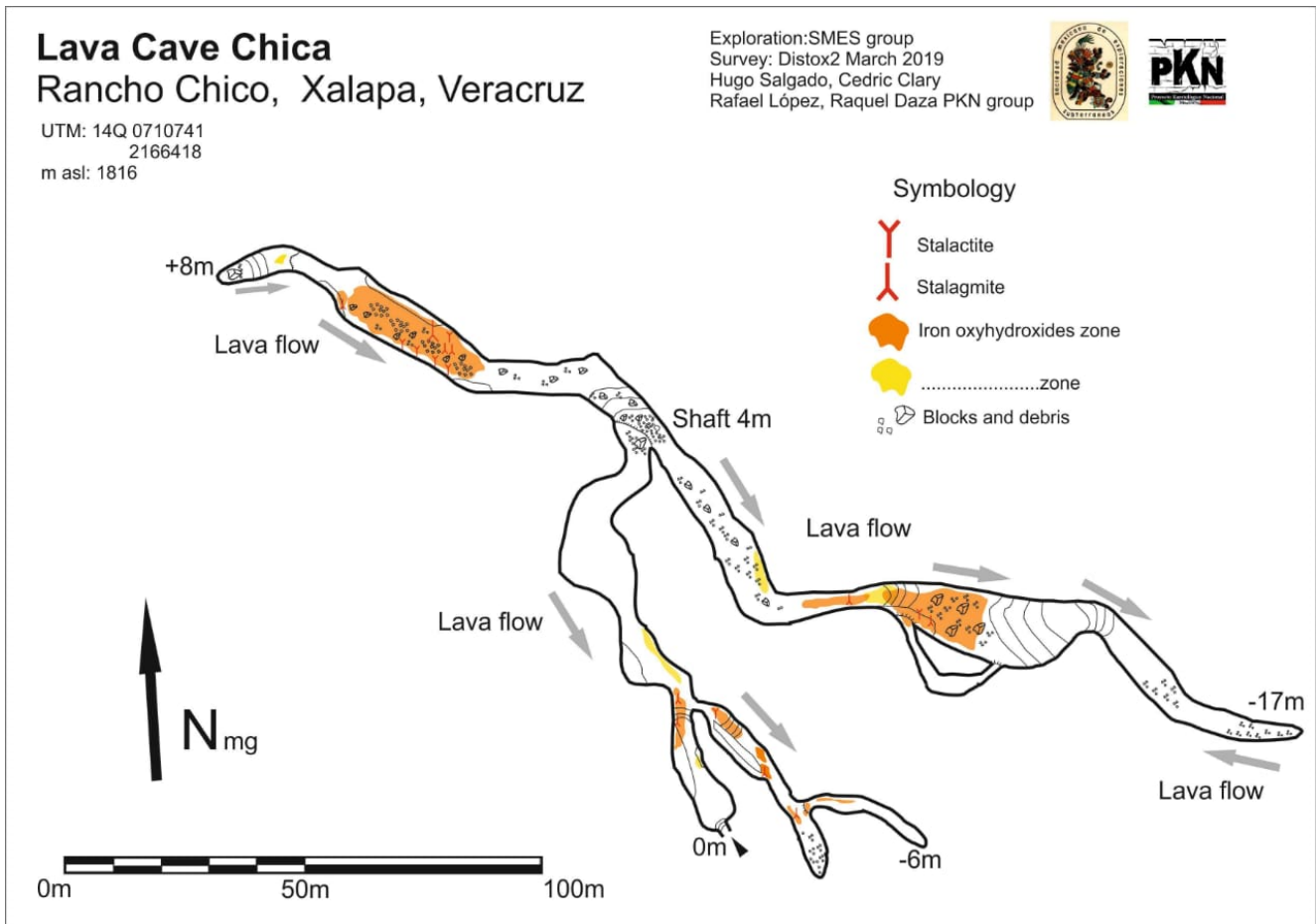


Figura 3. Mapa topográfico de Cueva Chica de Rancho Chico; vista en planta. Zona en anaranjado corresponden a mineralización de óxi – hidróxidos de Fe, posiblemente; y las zonas en amarillo corresponden a mineralización de alofana. Elaborado por el Mtro. Hugo Enrique Salgado Garrido, inédito.

Según el mapa topográfico de Cueva Chica de Rancho Chico, posee una sola entrada, el sentido predominante en el flujo de lava que le dio origen a esta cueva es NO – SE, excepto al final del tubo más largo en el que se observa un retroceso del flujo. Se identifican 7 estalactitas y 9 estalagmitas; así como 9 zonas de derrumbes o bloques caídos; 11 posibles zonas de mineralización de oxihidróxidos de Fe y 5 zonas de mineralización de alofana.

1.3. Tectónica regional y local

Los estudios específicos recientes sobre las rocas del CVMX se han concentrado en la coexistencia de magmatismo máfico alcalino y calciocalino en la zona (Ferrari et al., 2018; Robin, 2013). Esta coexistencia se explica a través de un proceso de metasomatismo parcial de la cuña del manto, dentro del ambiente tectónico de subducción que involucró a las Placas de Cocos y Norteamérica. En este escenario, los magmas calci-alcalinos se generaron como producto de la mezcla entre fluidos liberados por la placa subducida y los líquidos de la fusión parcial de la cuña

del manto. A partir de este tipo de magma padre evolucionaron la mayoría de los volcanes del CVMX (Gonzalez-Mercado, 2005).

Las condiciones estructurales de la cobertura mesozoica y terciaria, representados por fallas y fracturas orientadas NE – SO, permitieron el ascenso de este tipo de magma de forma lo suficientemente rápida como para inhibir su estancamiento, pero permitiendo la cristalización fraccionada durante su ascenso a la superficie, formando así volcanes con lavas de composición basáltica y basáltico-andesítica de naturaleza calci-alcalina (Gonzalez-Mercado, 2005).

1.4. Geología estructural regional y local

De la región de Xalapa, Viniegra (1966) considera que las rocas sedimentarias mesozoicas fueron fuertemente plegadas y falladas durante la orogenia Larámide post-Cretácica, generando grandes pliegues y numerosas cabalgaduras en dirección NO – SE. Sin embargo, reconoce “sobrecorrimientos y fallas menores de empuje, e intrusiones de lajones graníticos, y fallas de gravedad con fajas transversales de perturbación con rumbo general NE – SO”. Mossman y Viniegra (1976) de manera similar concluyen que existen en la zona numerosas fallas de cabalgadura y transcurrentes, pero sin indicar su posición o localización.

Morales-Barrera (2009) y Rodríguez et al. (2010b) identifican dos sistemas de fallas en la región de Xalapa. El más antiguo es de dirección NO – SE, y consiste en fallas largas y fracturas paralelas en orientaciones que varían entre N40°O y N60°O e inclinaciones de 60° al NE y en menor proporción al SO; representan el 68.47%. El sistema más joven, de orientación NE – SO, reconocido por Carrasco-Núñez et al. (2005) y por Ferrari (2016), está formado por fallas cortas y fracturas en echelon en orientaciones que varían entre N35°E y N65°E y una inclinación de 80°, con una componente lateral izquierda con fallas normales secundarias; representan el 31.53%.

1.5. Geoquímica, mineralogía y petrografía del área de estudio

Las rocas que conforman el área de estudio son flujos de lava y depósitos de caída de escoria, de composición química que varía entre basaltos, andesitas-basálticas y andesitas (Morales-Barrera, 2009; Siebert y Carrasco-Núñez, 2002). Se presentan en afloramientos masivos, en general las lavas muestran una textura afanítica, aunque en algunas partes se observan fenocristales de piroxenos, en ocasiones reemplazados por óxidos de hierro y plagioclasas embebidos en una matriz vítrea (Morales-Barrera, 2009) y algunos olivinos, con algunas excepciones que contienen nefelina normativa y pertenecen a la serie alcalina, la

mayoría de las rocas basálticas tienen un comportamiento típicamente calcalcalino (Siebert y Carrasco-Núñez, 2002).

En general son rocas duras y densas, aunque eventualmente están vesiculadas. En algunos afloramientos se observan diaclasas hexagonales. Los espesores de lava varían desde 5 m hasta 90 m; mientras que los depósitos de escoria varían desde 20 a 60 m de espesor. (Morales-Barrera, 2009)

En las cartas geológico – mineras, E14-B26 y E14-B27, elaborada por el Servicio Geológico Mexicano (2007a, 2007b) se observan rocas de composición basáltica del Cuaternario en el área de estudio. (Figura 4)

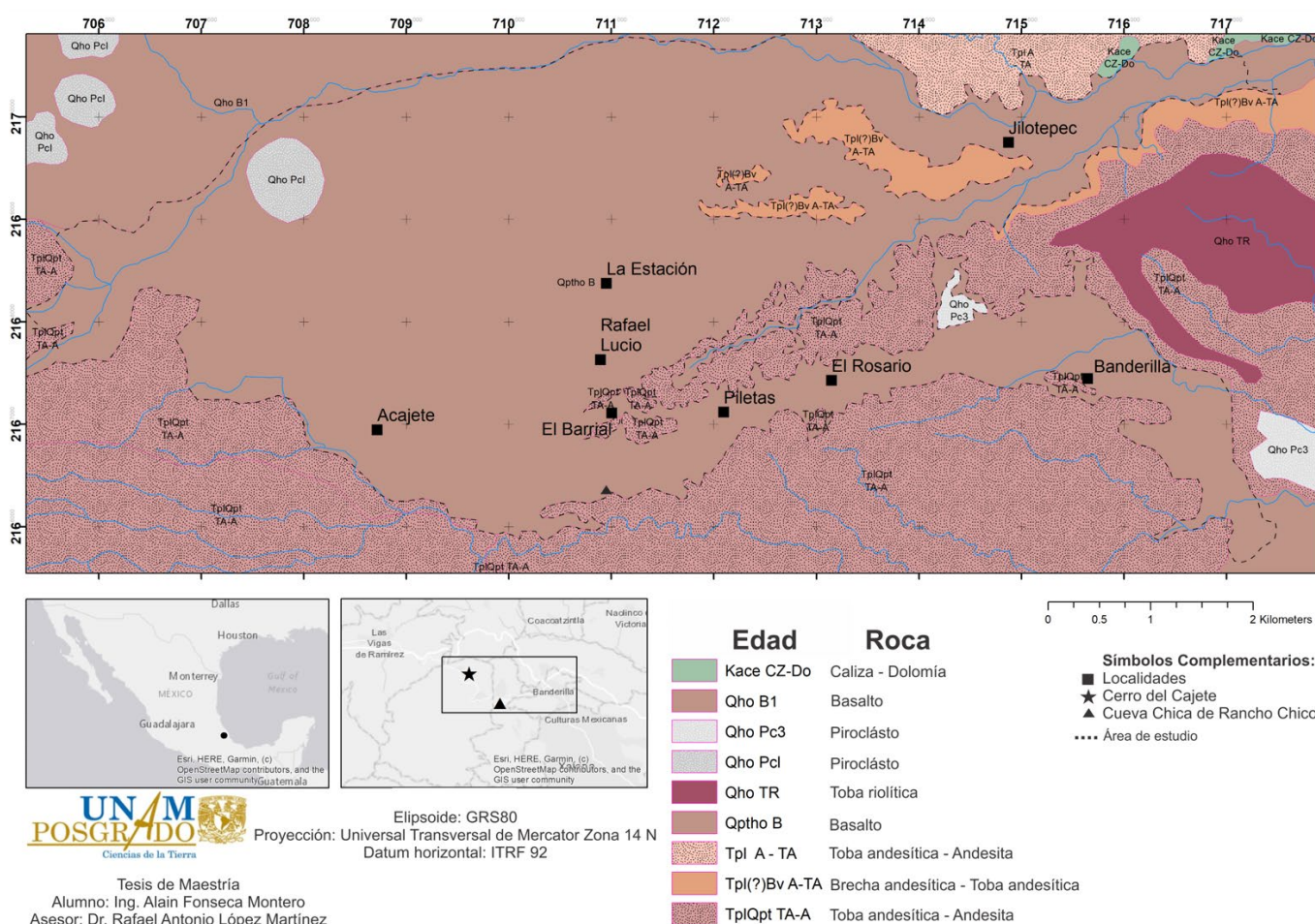


Figura 4. Mapa geológico donde se encuentra el área de estudio. Modificado del Servicio Geológico Mexicano (2007a, 2007b).

1.6. Estructuras e indicios asociados a riesgos geológicos regional y local

A la calamidad que tiene como causa las acciones y movimientos violentos de la corteza terrestre se le denomina agente perturbador de origen geológico. A esta categoría pertenecen

los sismos, las erupciones volcánicas, los tsunamis y la inestabilidad de suelos, también conocida como movimientos de tierra, los que pueden adoptar diferentes formas: arrastre lento o reptación, deslizamiento, flujo o corriente, avalancha o alud, derrumbe y hundimiento, según Secretaría de Bienestar de México (SEDESOL, 2011a).

Según Mora-González et al. (2015); Rodríguez-Elizarrarás et al. (2011) los peligros geológicos superficiales más recurrentes en el estado de Veracruz son: deslizamientos de tierra o procesos de remoción en masa, los hundimientos de terreno y los flujos de detritos o “barrancadas”. Sin embargo, el Atlas Nacional de Riesgos publicado por el CENAPRED (2019) en la *web* muestra para el área de estudio: licuefacción, hundimientos, deslizamientos, inestabilidad de laderas y actividad sísmica. (Figura 5, Figura 6, Figura 7, Figura 8, Figura 9 y Figura 10)

Los deslizamientos de laderas son los más frecuentes en México y su tasa de mayor ocurrencia es en la temporada de lluvias. Aunque también pueden ocurrir durante sismos intensos, erupciones volcánicas y por actividades humanas como cortes, colocación de sobrecargas (viviendas, edificios, materiales de construcción, etc.), escurrimientos, filtraciones de agua y excavaciones. Debido a que el agua juega el papel más importante en la inestabilidad de una ladera, las medidas de prevención y mitigación deben ser orientadas a reducir al mínimo su ingreso al interior de las laderas (CENAPRED, 2021).

Según el mapa de deslizamiento, elaborado por el CENAPRED (2019), en el área de estudio, se prevé la ocurrencia de deslizamientos medios y solo en algunas zonas de la región norte y sur se considera que pueda ser alto (Figura 7).

Los epicentros de los sismos más cercanos ocurridos, que se tenga registro hasta la fecha, se encuentran en un radio aproximado de 17 km, según el Servicio Sismológico Nacional, adscrito al Instituto de Geofísica de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM et al., 2021). (Figura 10)

A estos peligros geológicos se encuentran asociados diferentes tipos de estructuras o geoformas en el terreno, durante o posterior a su ocurrencia que no han sido cartografiados y constituyen un tipo de relieve exógeno en el área. En la bibliografía consultada no se encontró evidencia de estudios previos de reptación de suelos en el área de estudio, solo deslizamiento de forma general, sin embargo, se pudo observar indicios de reptación de suelos, que serán descritos posteriormente. Algunas de las estructuras formadas por estos fenómenos se consideran relieves exógenos y forman parte de la geomorfología del área.

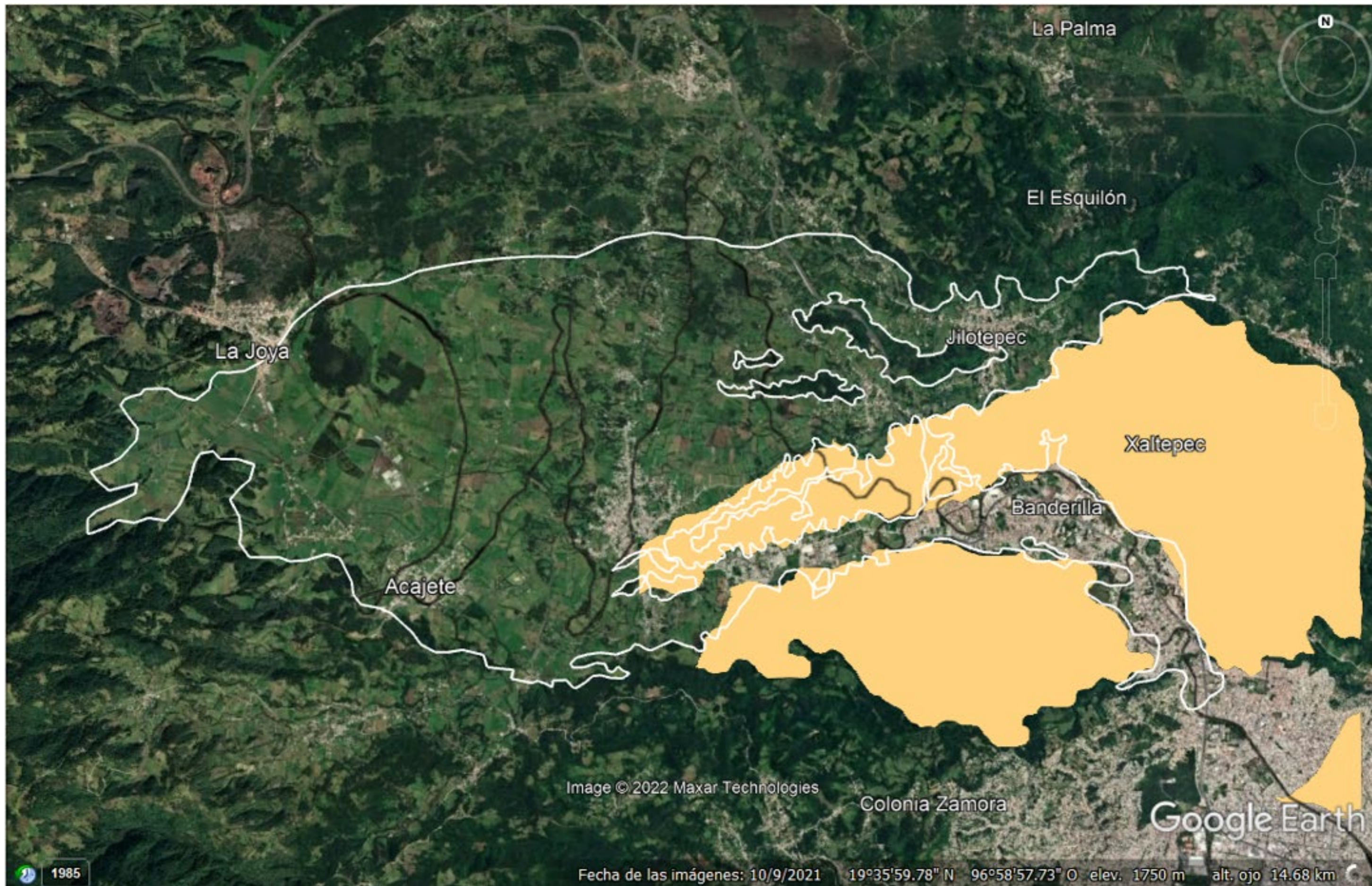


Figura 5. Imagen de satélite donde se indican las áreas de licuefacción (zona de licuefacción en amarillo); área de estudio enmarcado en línea blanca. Modificado del CENAPRED (2019)

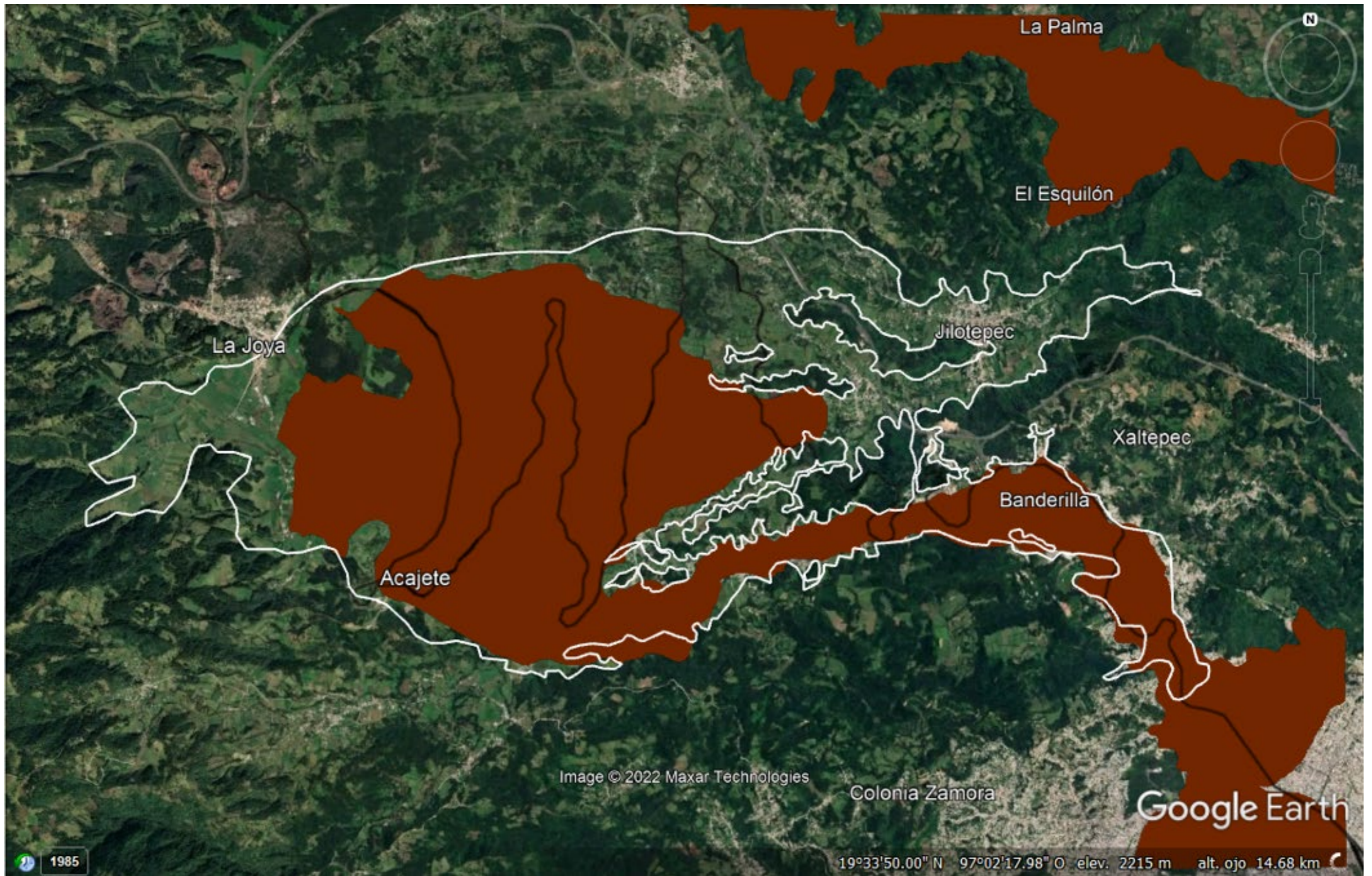


Figura 6. Imagen de satélite donde se indican las áreas de hundimiento (zona de hundimiento en carmelita); área de estudio enmarcado en línea blanca. Modificado del CENAPRED (2019)

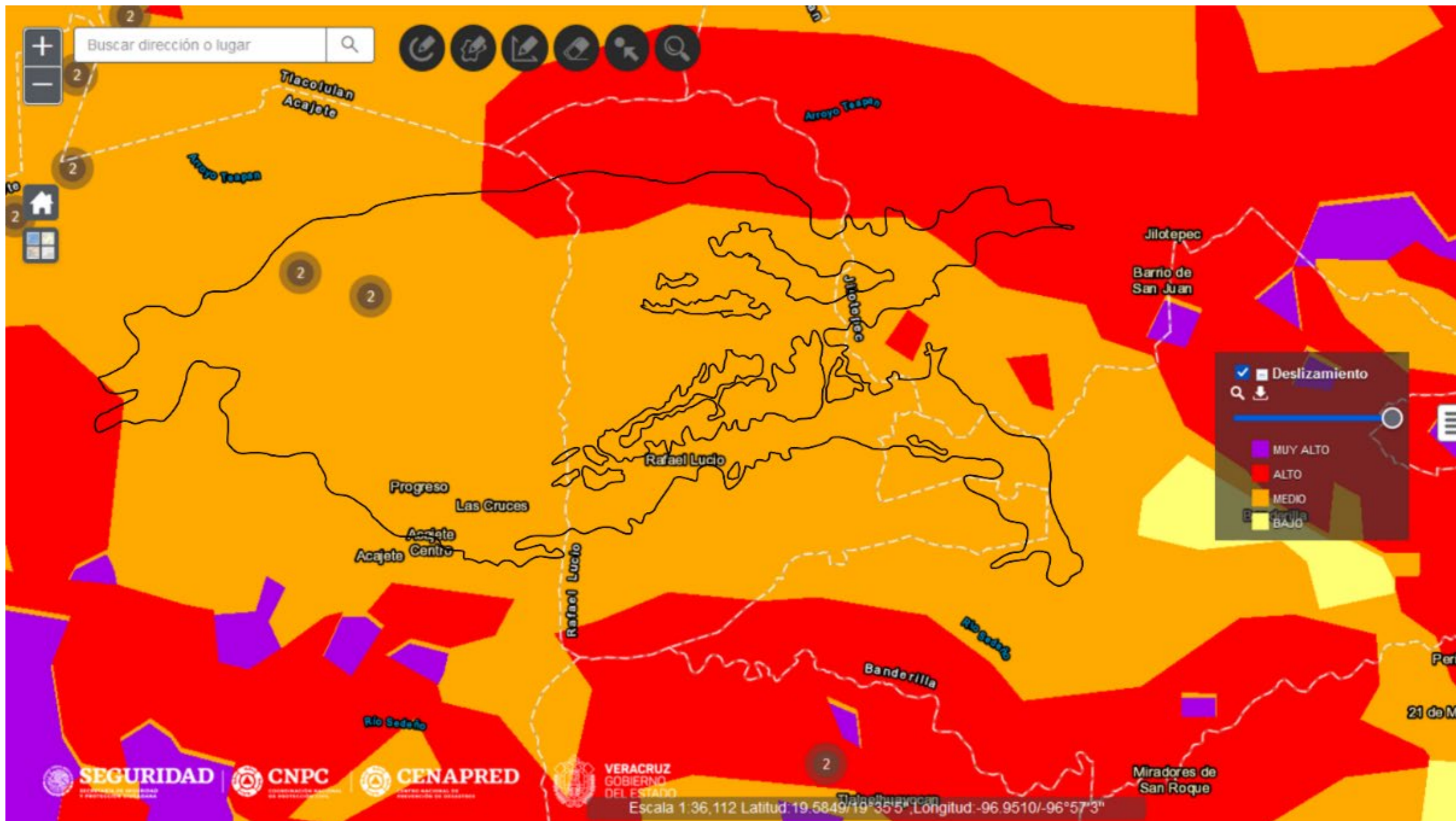


Figura 7. Imagen de satélite donde se indican las áreas de deslizamiento; área de estudio enmarcado en línea negra. Modificado del CENAPRED (2019)

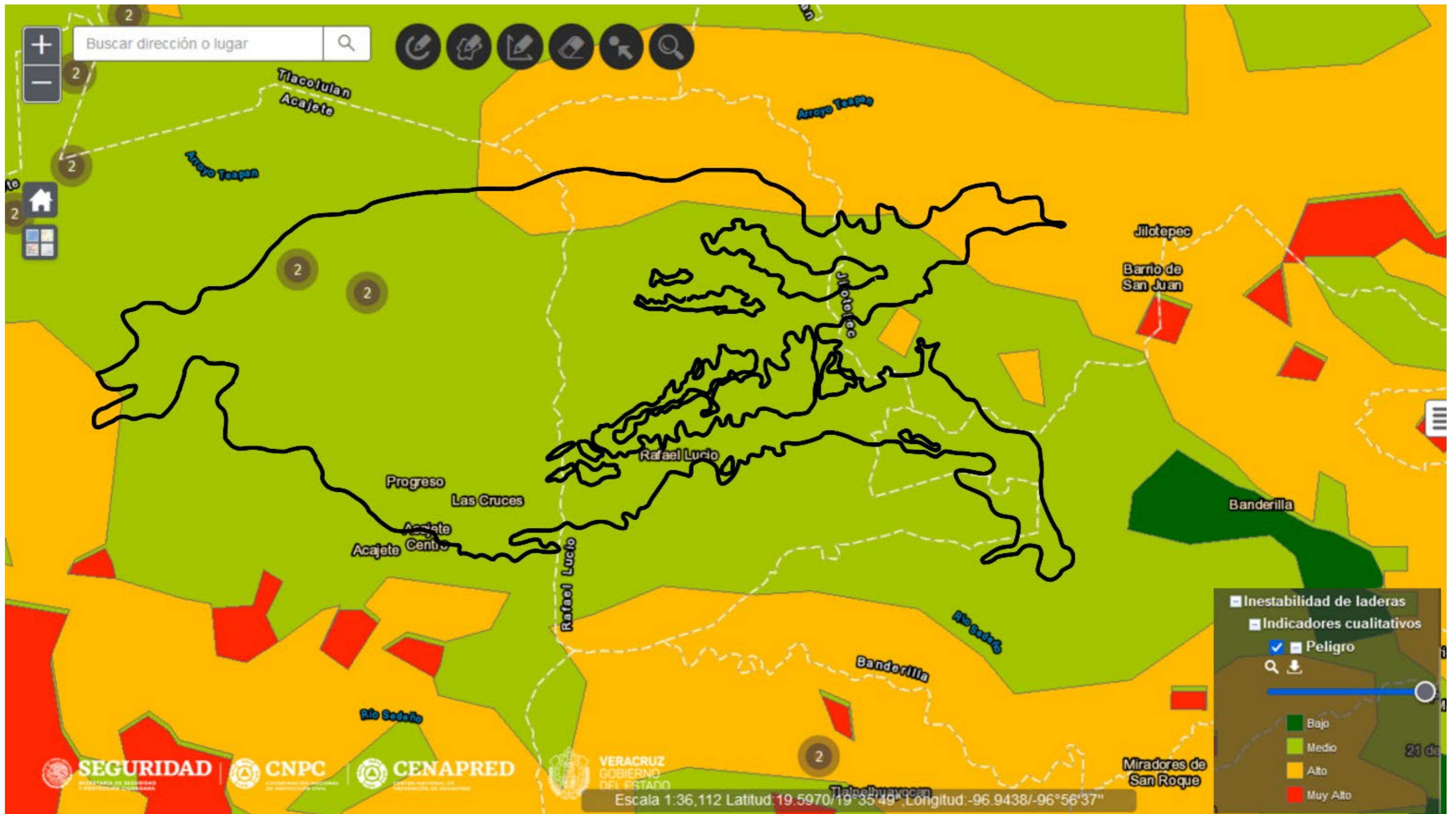


Figura 8. Imagen de satélite donde se indican las áreas de peligro de inestabilidad de laderas; área de estudio enmarcado en línea negra. Modificado del CENAPRED (2019)

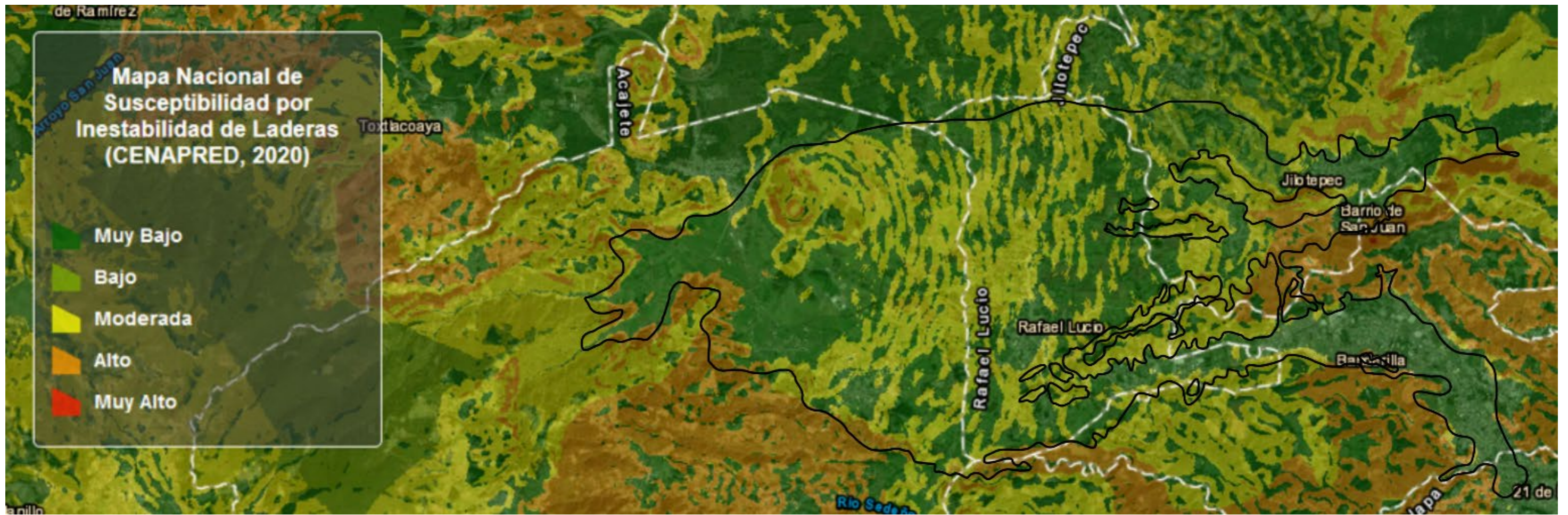


Figura 9. Imagen de satélite donde se indican las áreas de susceptibilidad por inestabilidad de laderas, área de estudio enmarcado en línea negra. Modificado del CENAPRED (2019)

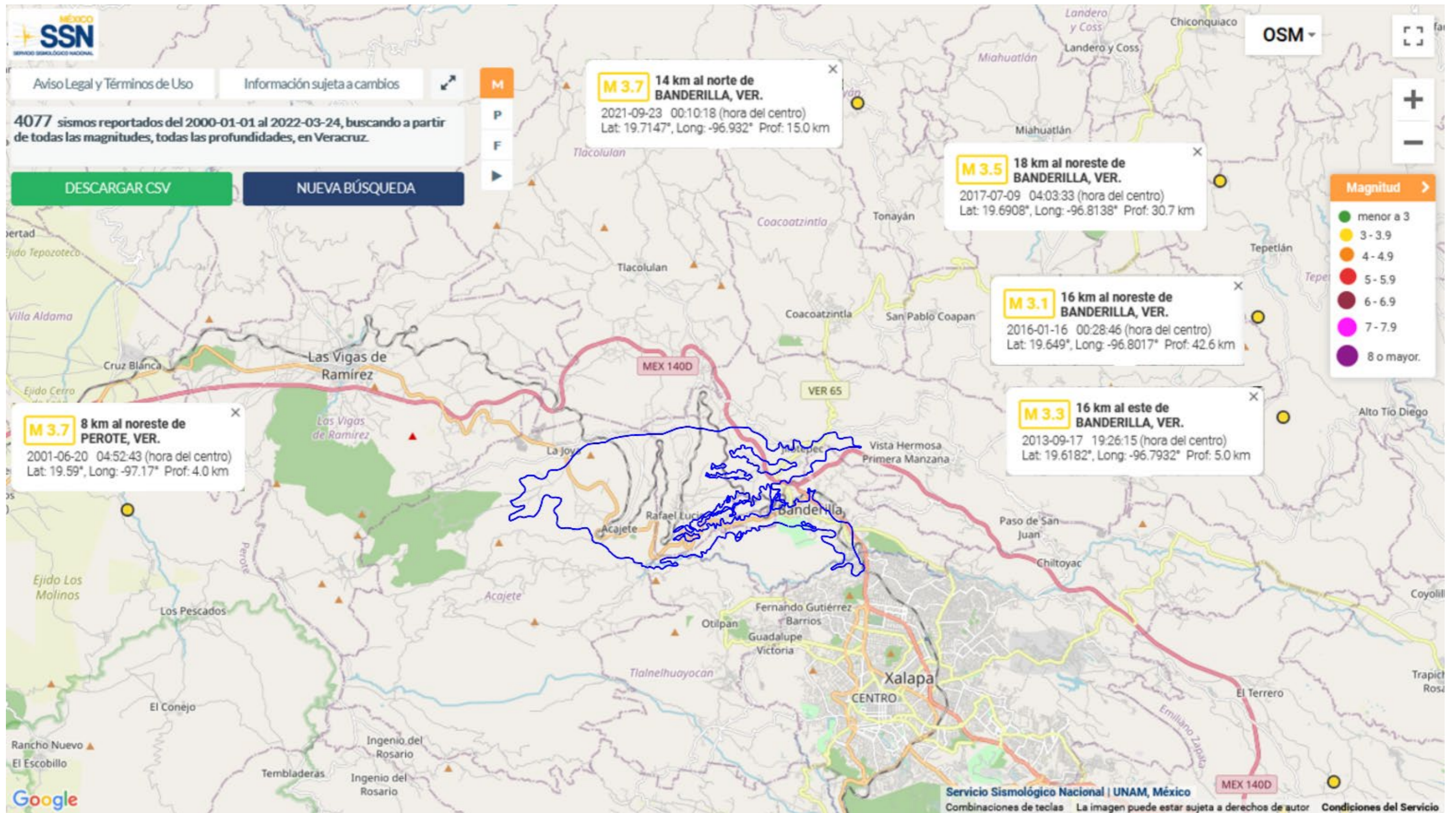


Figura 10. Epicentros más cercanos al área de estudio hasta el año 2022. Área de estudio enmarcado en línea azul. Modificado de UNAM et al. (2021).

2. CAPÍTULO II. MORFOMETRÍA

En Sánchez-García (2018, p. 59), el análisis morfométrico es la caracterización cuantitativa de las formas del relieve a partir de la medición sistemática de distintas variables, en este caso, altitud, inclinación del terreno, alturas relativas, densidad y profundidad de la disección. En este sentido, la morfometría permite establecer la relación entre la litología y los procesos exógenos. Los resultados que se obtienen se expresan a partir de una cartografía especializada; si bien es un método indirecto, los mapas permiten estimar la susceptibilidad del terreno a la erosión o depositación.

Los productos que resultan de este tipo de análisis son mapas, cada uno de ellos refleja la espacialidad de la medición realizada en las formas de relieve analizadas. Este tipo de documentos son necesarios sobre todo para entender la evolución de las laderas, la susceptibilidad del terreno a ser erosionado, así como detectar terrenos susceptibles a presentar dinámicas que pueden ser de peligro. (Peña-Monné, 1997)

Los métodos morfométricos que se aplicaron, siguen los criterios de Simonov (1985) y Lugo-Hubp (1988). Se decidió tomar en cuenta: altimetría, inclinación del terreno, densidad de drenaje, disección vertical del paisaje y energía del relieve. La interpretación por separado de cada uno de los mapas y su posterior análisis integral, permitieron establecer el vínculo entre el relieve y los procesos que lo transforman o rigen su evolución.

2.1. Altimetría

El análisis morfométrico comienza con la elaboración del mapa altimétrico, el cual simplifica los valores de un mapa topográfico, cuyos intervalos de altitudes se fijan a partir de las alturas máximas y mínimas del mapa topográfico original y, por consiguiente, sintetizar el mapa topográfico en diferentes pisos; de esta manera, se hacen evidentes los contrastes en la vertical y la continuidad espacial de las estructuras mayores que integran el relieve; teniendo en cuenta este criterio, es posible reconocer y establecer límites precisos de regiones geomorfológicas que integran el área (Morales-Barrera, 2009, p. 29; Sánchez-García, 2018, p. 59).

En la elaboración del mapa altimétrico se utilizaron los datos del Continuo de Elevación Mexicana 3.0 (CEM 3.0), de las cartas E14B26 (2013a) y E14B27 (2013b). Se elaboraron siete mapas altimétricos con diferentes rangos (5, 7, 10, 15, 20, 25 y 30) cada uno con distintas configuraciones en la espacialidad altimétrica. Se analizaron bajo un criterio geomorfológico; es decir, que reflejaran con nitidez el mayor número de formas individuales del relieve. También fue

revisada la distribución de los datos en los siete histogramas obtenidos. La cartografía seleccionada agrupa los valores entre 1 216 – 2 361 msnm (Figura 11) en 25 intervalos, una vez identificado se obtuvo el mapa altimétrico de la región de estudio.

El punto de partida en la delimitación de unidades mayores del relieve en el área de estudio, fue el mapa altimétrico y su análisis se acompañó de un modelo de elevación del terreno y la consulta repetida del mapa de pendientes. A partir de esta interacción se logró definir y entender la distribución de las siguientes regiones: I) Zona de lomerío (Cerro del Cajete) y II) Piedemonte volcánico (Figura 11).

La **zona de lomerío** (Figura 11) ocupa la región noroeste del área de estudio y se presenta de los 2 182 msnm hasta los 2 361 msnm. Constituido por 3 estructuras volcánicas; Cerro del Cajete y dos estructuras más; una de ellas denominada por Siebert y Carrasco-Núñez (2002) y el CENAPRED (2019) como otro cono volcánico.

La **planicie volcánica** (Figura 11) es una región que se extiende en un área bastante amplia, con morfologías subhorizontales que se intercalan con rampas de inclinación homogénea. El adjetivo de volcánico hace alusión a su origen vinculado con Cerro del Cajete y a la actividad volcánica efusiva (derrames de lava) y explosiva (flujos y caídas piroclásticas). Los límites altitudinales aproximados están definidos por los valores de 1 261 a 2 182 msnm. En esta unidad predominan los depósitos volcánicos (flujos de lava y volcanoclasticos) dispuestos alrededor del foco de emisión, donde definen una morfología similar al de una planicie.

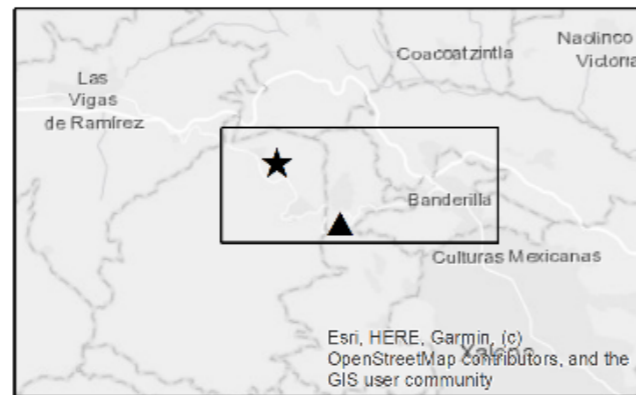
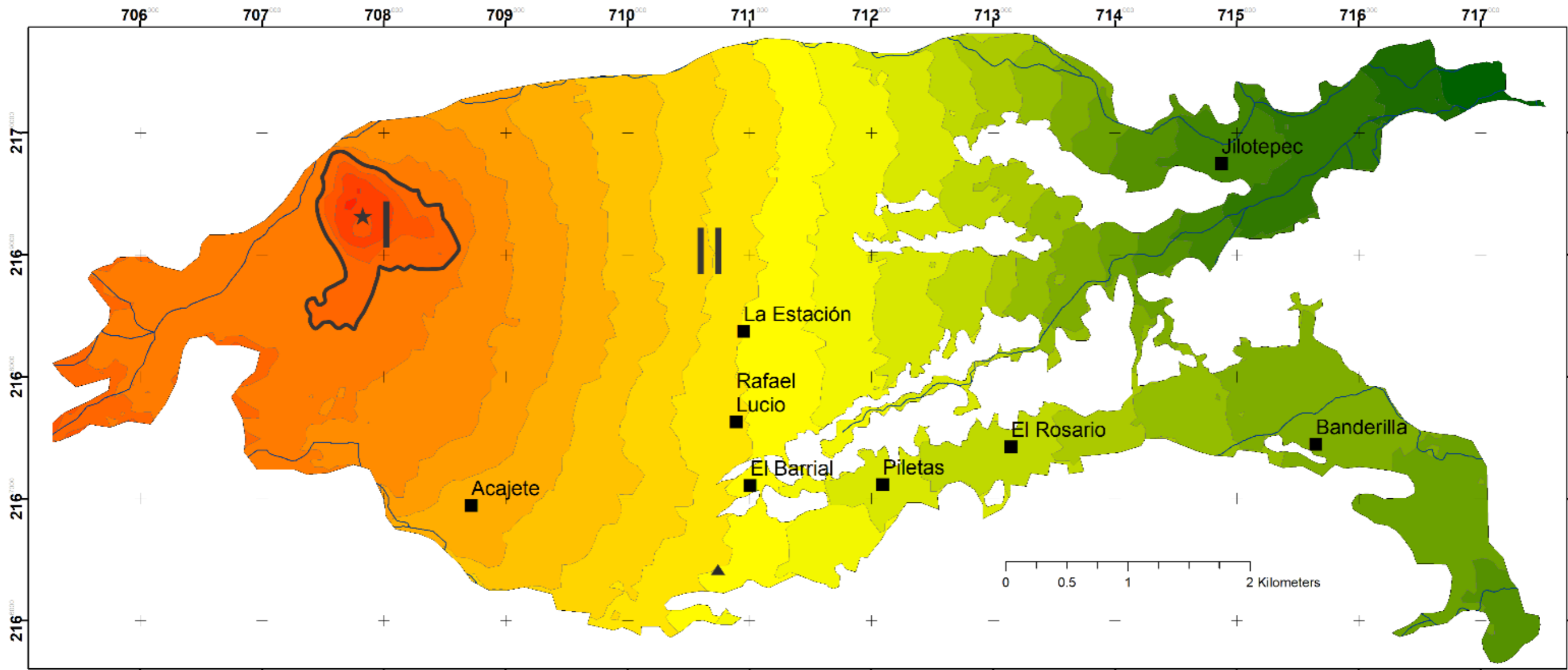
2.2. Inclinación del terreno

El mapa de pendientes tiene como fin representar y clasificar las laderas en grados de inclinación (rangos), con el objetivo de establecer la relación entre la dinámica de la ladera, morfología y su arreglo (estructura geológica). (Quesada-Román, 2016)

Para la elaboración de este mapa se transforma la distancia que existe entre curvas de nivel a valores de pendiente, ya sea en grados o porcentaje teniendo en cuenta la siguiente función:

$$\text{Pendiente} = (\text{distancia vertical} \div \text{distancia horizontal}) \text{ tangente}^{-1}$$

En esta investigación los datos fueron procesados mediante el SIG *ArcGIS 10.3.1*, se obtuvieron 5 cartografías, cada una con diferentes rangos de inclinación. Estos documentos fueron comparados de manera individual con la topografía, altimetría y las regiones morfológicas.



- Símbolos Complementarios:**
- Localidades
 - ★ Cerro del Cajete
 - ▲ Cueva Chica de Rancho Chico

Escala: 1: 31 000
 Elipsoide: GRS80
 Proyección: Universal Transversal de Mercator Zona 14 N
 Datum horizontal: ITRF 92

UNAM
POSGRADO

Ciencias de la Tierra
 Tesis de Maestría
 Alumno: Ing. Alain Fonseca Montero
 Asesor: Dr. Rafael Antonio López Martínez

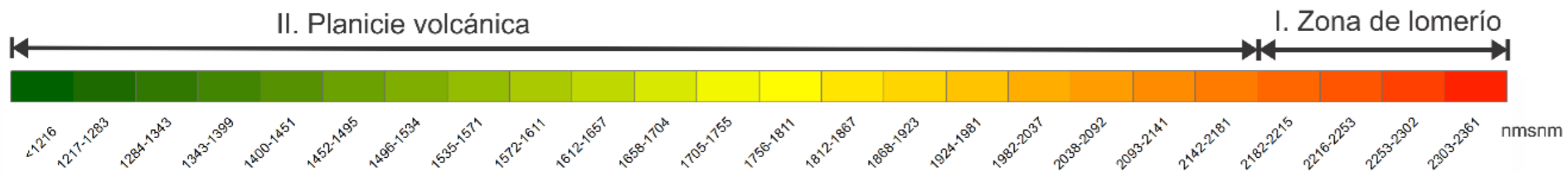


Figura 11. Mapa altimétrico del área de estudio.

El mapa elegido es aquel donde las unidades mayores del relieve, quedarán representadas de la mejor manera y al mismo tiempo fuera posible reconocer al interior de cada una de ellas y formas menores como rupturas de pendiente (escarpes). Con base en lo anterior se eligieron nueve rangos de inclinación del relieve en grados (Figura 12).

Para la interpretación y análisis, los índices de inclinación del terreno se dividieron en tres grupos y en este proceso se tomaron en cuenta las regiones morfológicas (Figura 11), se obtuvo el siguiente resultado: Bajos < 16°, Medios de 17° – 22° y Altos > 23°.

Los **valores bajos (< 16°)** caracterizan los terrenos subhorizontales y con inclinación homogénea y gradual. Su presencia y arreglo en la zona de estudio, se puede interpretar con la existencia de superficies de erosión del derrame originado por el cono de ceniza y con morfología subhorizontal, que afloran en superficie por la acción de los procesos exógenos. También se encuentra el labio y fondo del cráter.

Los **valores medios (< 17° – 22°)** se relacionan fundamentalmente con los relictos de escarpes de lava producidos por el derrame.

Los **valores altos (> 23°)** Este grupo está integrado el resto de los rangos. Constituido por las laderas que conforman el cono volcánico y frente de lava; tienen como característica principal, la homogeneidad litológica, morfológica (geometrías, rupturas de pendientes, desniveles) y morfométrica (alturas absolutas o relativas, orientación, longitud, aéreas).

2.3. Densidad de drenaje y orden de los cauces

En Camino et al. (2018, p. 7); Urdiain y Sanjulián (1983, p. 7), la densidad de drenaje puede definirse como la relación entre la longitud total de los cauces de una cuenca y el área de ésta.

$$Dd = \frac{\sum Lu}{S}$$

Donde Dd es la densidad de drenaje (en km/km²), $\sum Lu$ es la longitud total de cauces (en Km) y S es el área total de la cuenca en km².

Para el caso del área de estudio la longitud total de los cauces es de 100.5 km, el área total es de 67.02 km² y la densidad de drenaje es de 1.49 km/km², según la clasificación de la red de drenaje de Delgadillo y Páez (2008) (Tabla 1) es una densidad de drenaje moderada.

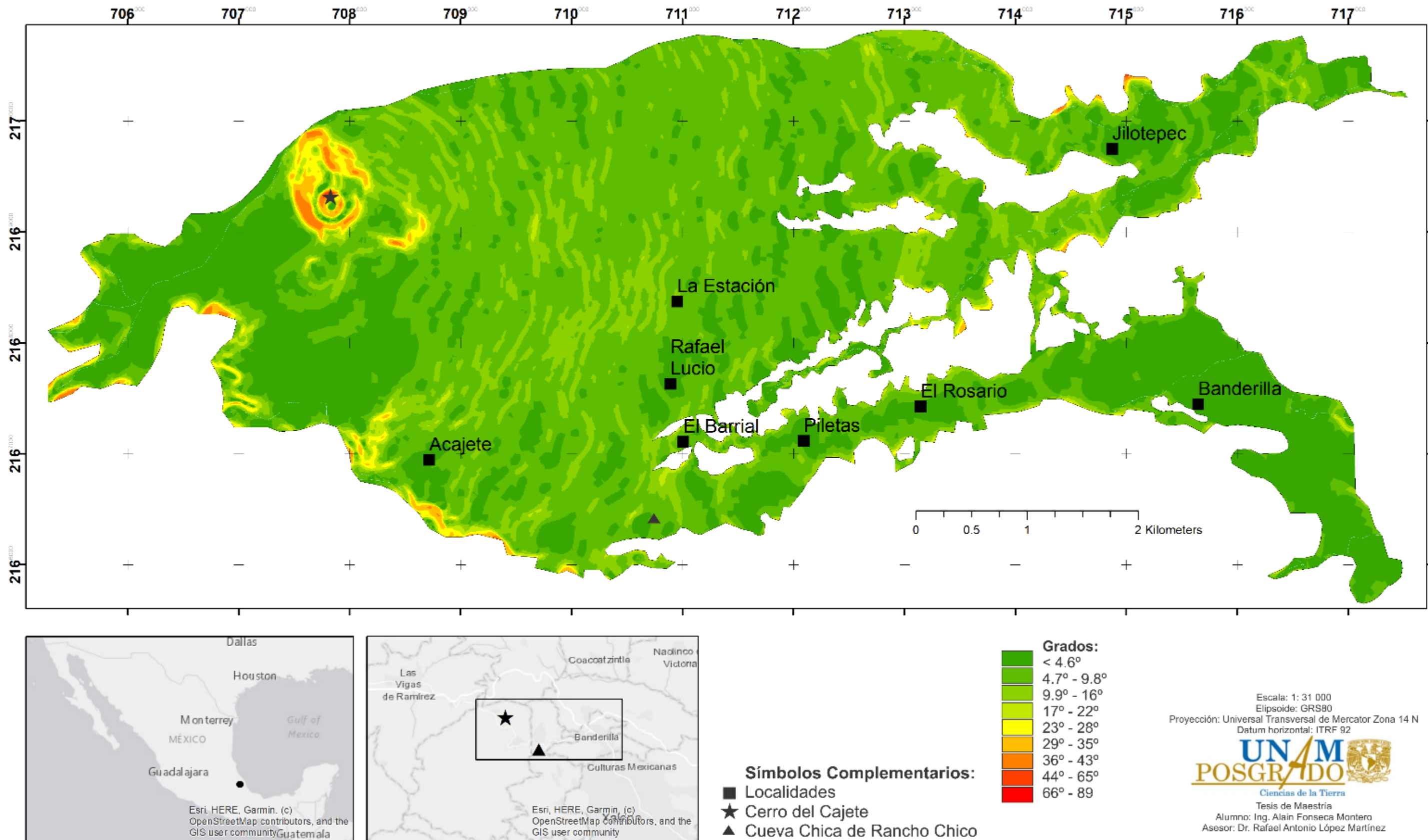


Figura 12. Mapa de pendientes del área de estudio.

Tabla 1. Clasificación de la red de drenaje. según Delgadillo y Páez (2008)

Rangos km/km ²	Clases
< 1	Baja
1 – 2	Moderada
2 – 3	Alta
> 3	Muy alta

El mapa de densidad de drenaje del área de estudio (Figura 13) muestra que la mayor densidad, densidades entre 3 y 4 km/km², se encuentra en la porción NE coincidiendo con la zona de pie de monte volcánico; y la de baja densidad de drenaje (< 1 km/km²) es la que mayor área ocupa, representada también por la zona de pie de monte volcánico y parte del Cerro del Cajete. La región NO de Cerro del Cajete está representada por valores de densidad moderado (1 – 2 km/km²) y alta (2 – 3 km/km²).

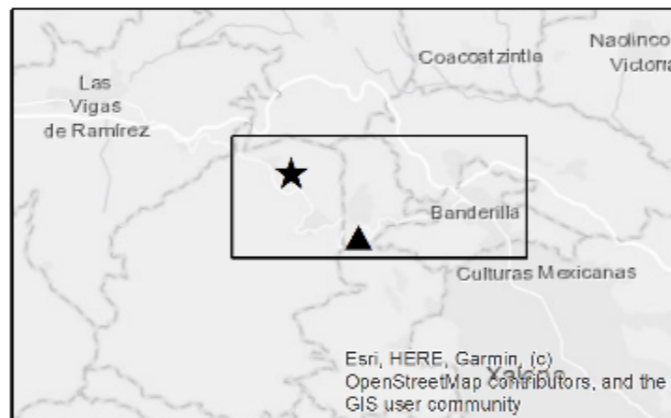
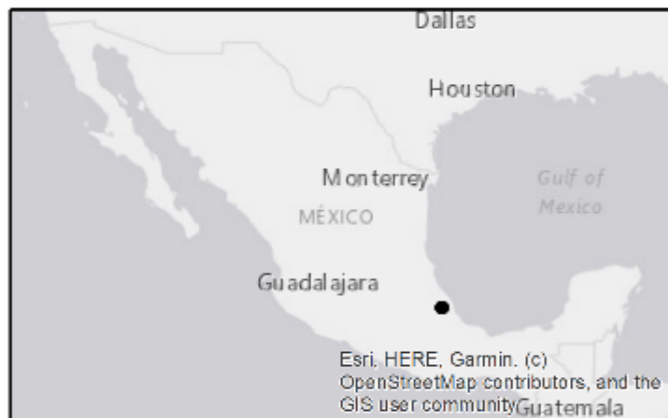
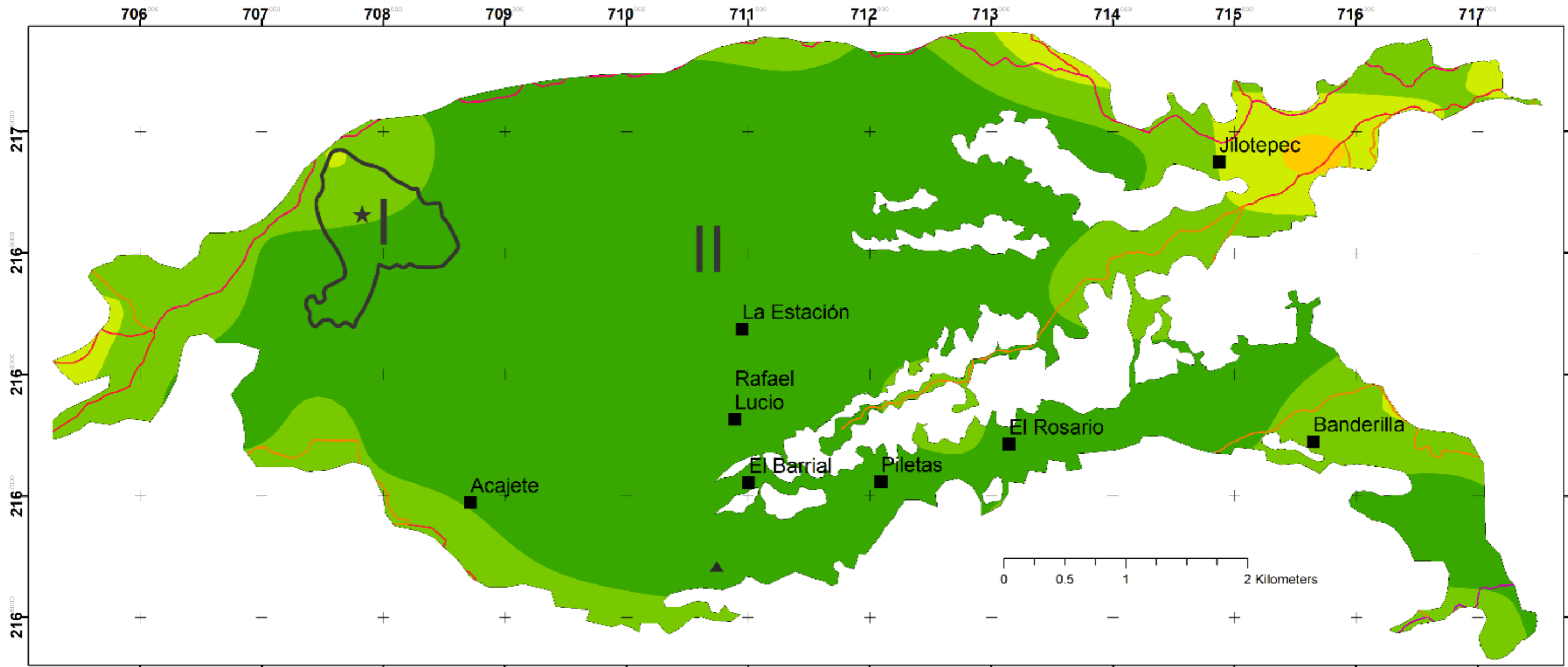
Para la elaboración del mapa de densidad de drenaje se tuvo en cuenta el mapa hidrográfico de INEGI (2010c) de la región de estudio y se utilizó el SIG *ArcGIS 10.3.1*. El tratamiento de los datos consistió en medir la longitud de los cauces en áreas de 1 km² y a los índices obtenidos, se les realizó la interpolación.

Los datos del mapa hidrográfico del INEGI (2010c) viene ya con el orden de los ríos y solo se procedió a verificar que estuvieran correctos.

2.4. Disección vertical del paisaje

La disección vertical es un parámetro morfométrico que representa la amplitud del relieve (altura relativa) por unidad de área y se expresa en m/km². Sirve principalmente para definir algunos tipos de relieve (montañas, lomeríos, planicies acolinadas, planicies onduladas y planicies subhorizontales), y ofrece información sobre la energía del relieve. (Priego-Santander et al., 2003, p. 73)

La existencia de valores altos de disección vertical señala eventos tectónicos de mayor o menor envergadura, incluso de neotectónica (encajonamiento de la red fluvial y formación de cañones). Generalmente su tendencia coincide con la tendencia general del relieve. (Díaz-Rivero et al., 2009)



Escala: 1: 31 000
 Elipsoide: GRS80
 Proyección: Universal Transversal de Mercator Zona 14 N
 Datum horizontal: ITRF 92

UNAM
POSGRADO
 Ciencias de la Tierra
 Tesis de Maestría
 Alumno: Ing. Alain Fonseca Montero
 Asesor: Dr. Rafael Antonio López Martínez

Figura 13. Mapa de densidad de drenaje y órdenes de los ríos del área de estudio.

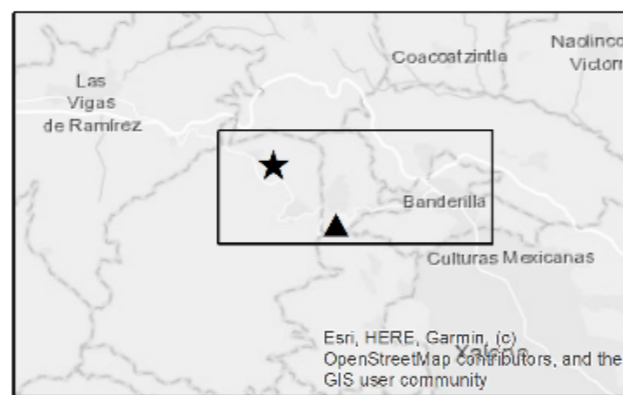
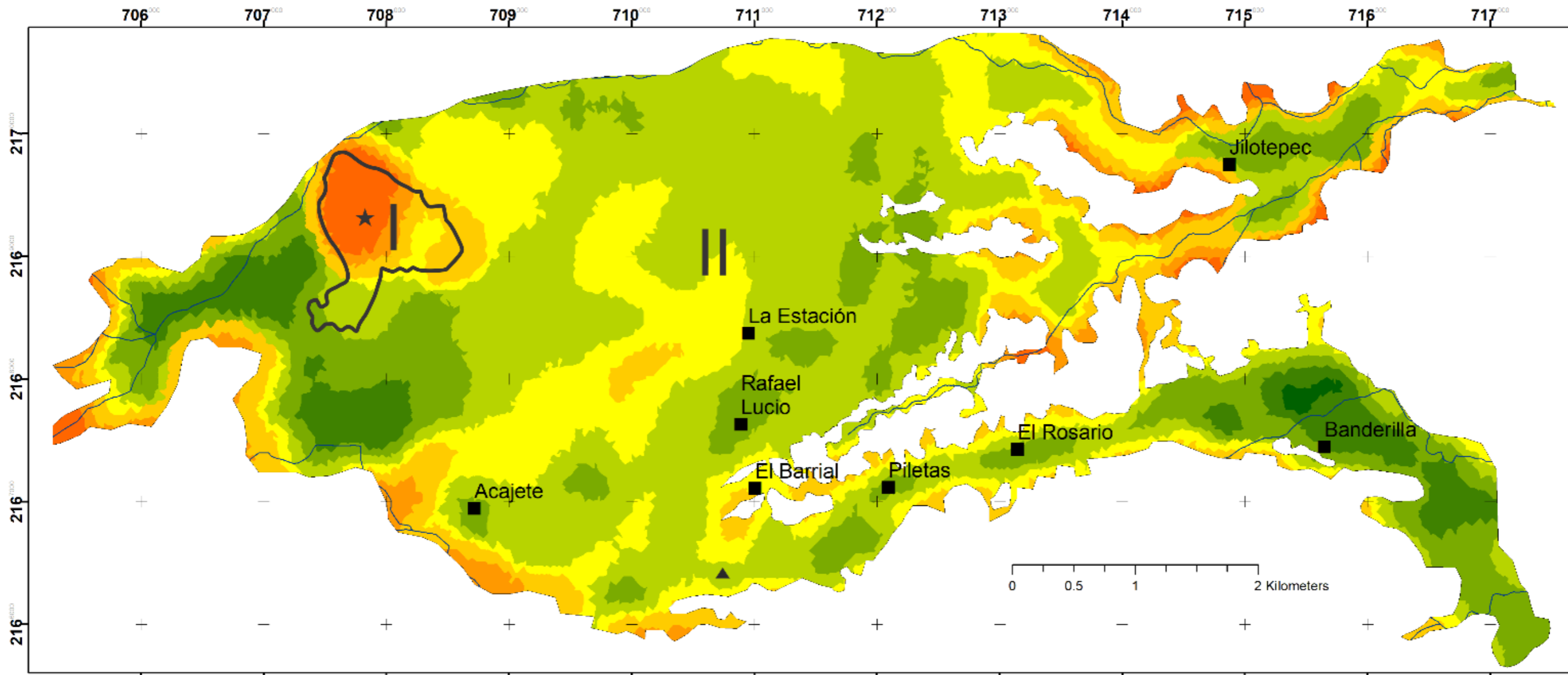
La disección vertical se obtiene mediante la confección de una malla que a la escala de trabajo represente 1 km², y sobrepuesta a la carta topográfica se contabiliza la diferencia de altura para cada cuadrícula, es decir, se cuenta la altura absoluta de la curva de nivel de mayor valor que corresponda a la cuadrícula y se le resta la altura absoluta de la curva de nivel de menor valor en la misma cuadrícula. Una vez obtenido los datos para toda el área del mapa se suavizan los contornos. Para dicha generalización se elaboran contornos que se ajusten a la morfografía de los diferentes tipos de relieve obtenidos; esto es posible mediante la observación de la disposición y densidad de las curvas de nivel. (Priego-Santander et al., 2003, p. 73)

Para la elaboración del mapa de disección vertical del paisaje (Figura 14) se tuvo en cuenta los parámetros descritos, utilizando el SIG ArcGIS 10.3.1 y la clasificación propuesta por Priego-Santander et al. (2003, p. 79). (Tabla 2)

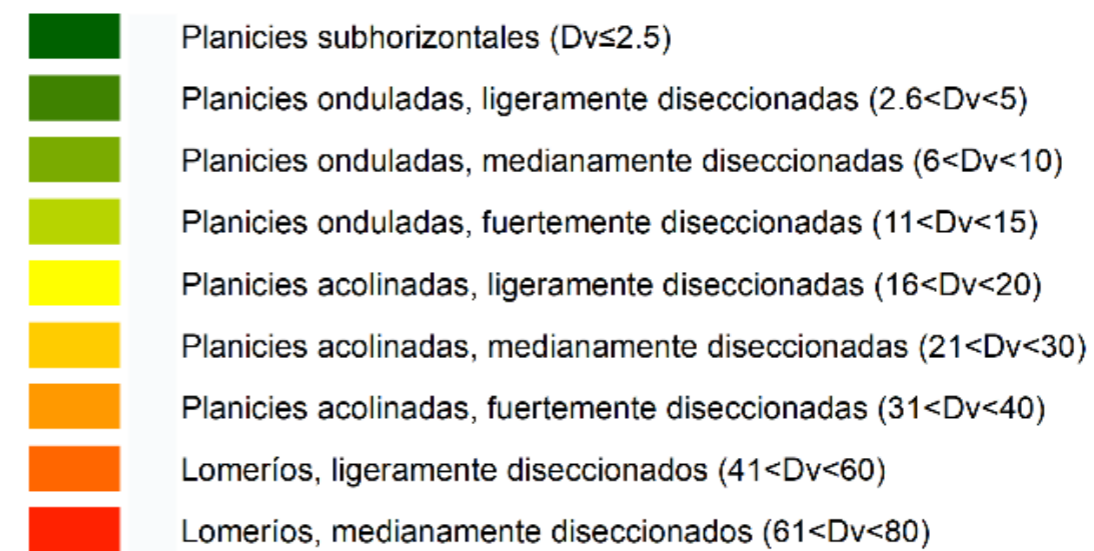
Tabla 2. Clasificación para la densidad de disección (Priego-Santander et al., 2003, p. 79)

Clase	Rango (m/km ²)
Planicies subhorizontales	$Dv \leq 2.5$
Planicies onduladas, ligeramente diseccionadas	$2.6 < Dv < 5$
Planicies onduladas, medianamente diseccionadas	$6 < Dv < 10$
Planicies onduladas, fuertemente diseccionadas	$11 < Dv < 15$
Planicies acolinadas, ligeramente diseccionadas	$16 < Dv < 20$
Planicies acolinadas, medianamente diseccionadas	$21 < Dv < 30$
Planicies acolinadas, fuertemente diseccionadas	$31 < Dv < 40$
Lomeríos, ligeramente diseccionados	$41 < Dv < 60$
Lomeríos, medianamente diseccionados	$61 < Dv < 80$
Lomeríos, fuertemente diseccionados	$81 < Dv < 100$
Montañas, ligeramente diseccionadas	$101 < Dv < 250$
Montañas, medianamente diseccionadas	$251 < Dv < 500$
Montañas, fuertemente diseccionadas	$Dv \geq 501$

Los valores de disección vertical del paisaje en el área de estudio van desde valores inferiores a los 2.5 m/km² hasta valores menores a 80 m/km², donde se encuentran relieves desde planicies subhorizontales hasta lomeríos medianamente diseccionados (Figura 14).



Disección Vertical (m/km^2):



Escala: 1: 31 000
 Elipsoide: GRS80
 Proyección: Universal Transversal de Mercator Zona 14 N
 Datum horizontal: ITRF 92



Tesis de Maestría
 Alumno: Ing. Alain Fonseca Montero
 Asesor: Dr. Rafael Antonio López Martínez

I. Zona de lomerío
 II. Planicie volcánica

Símbolos Complementarios:

- Localidades
- Cerro del Cajete
- Cueva Chica de Rancho Chico

Figura 14. Mapa de disección vertical del paisaje del área de estudio.

2.5. Energía del Relieve

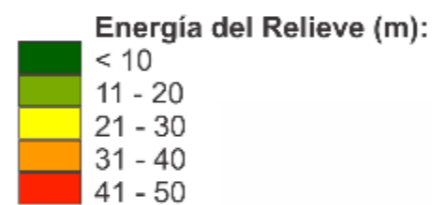
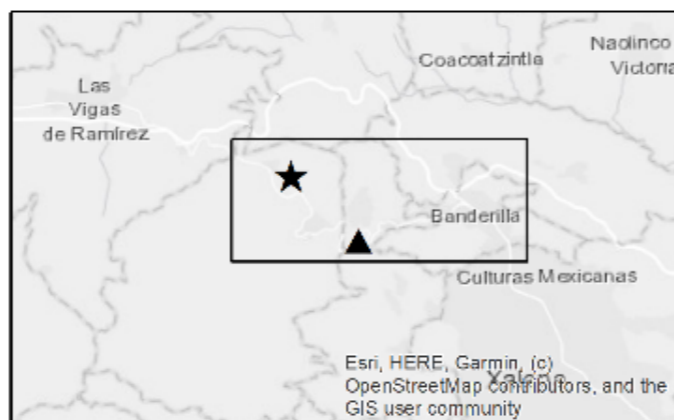
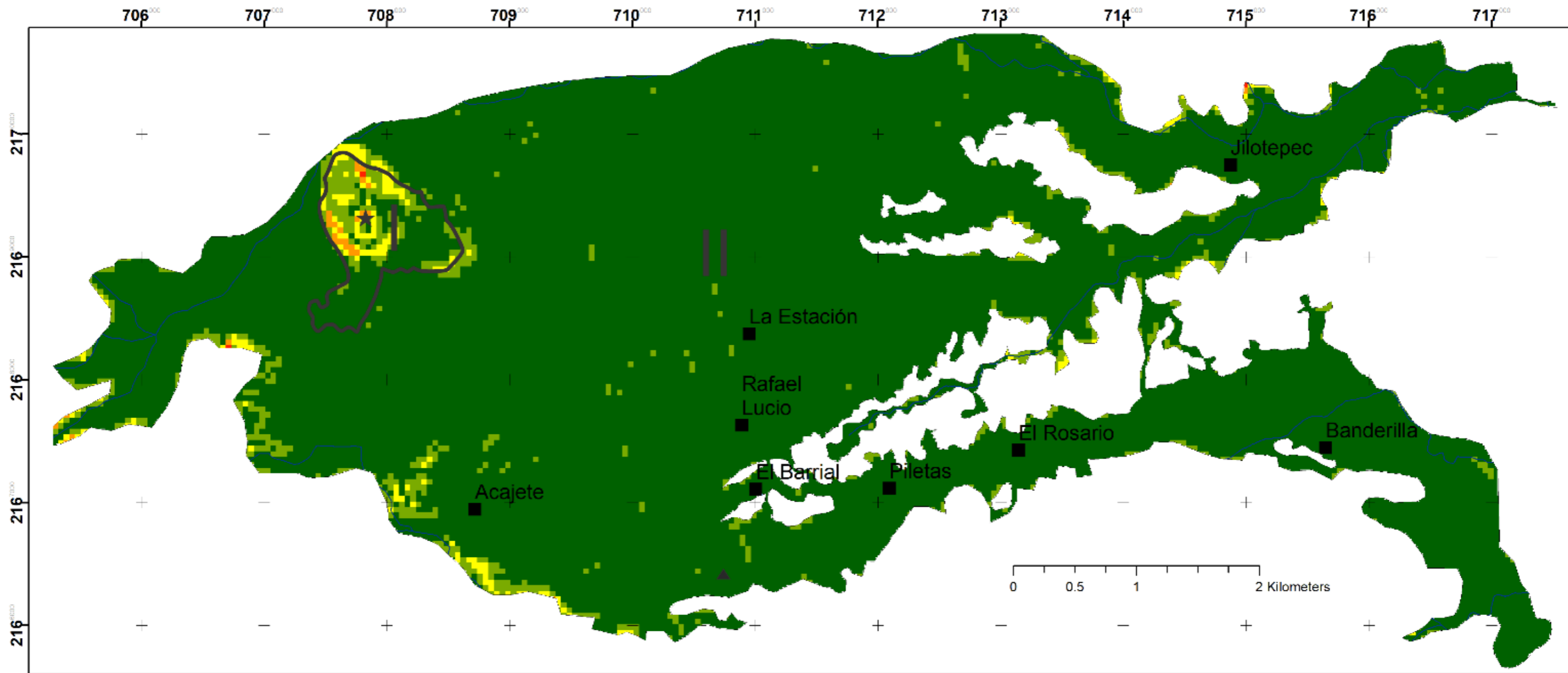
La energía del relieve determina la diferencia máxima de la altura relativa en metros en un área específica y representa la energía potencial que se desprende del relieve. Para su medición se ubican los valores de mayor y menor altitud (por unidad espacial mínima de análisis) y se obtiene la diferencia entre éstos. (Quesada-Román, 2016; Quesada Román y Barrantes Castillo, 2017)

La información para la elaboración del mapa de energía del relieve del área de estudio (Figura 15) se obtuvo de los datos del CEM 3.0, de las cartas E14B26 (2013a) y E14B27 (2013b), en donde el área de muestreo fue respetada (1 km²). El proceso consiste en restar el valor altitudinal mínimo al máximo de esta manera se elaboró una matriz de puntos que fue interpolada en el SIG. De este modo se obtuvo un mapa de isólinas que muestran los desniveles que existen en el terreno. El arreglo espacial de los datos tiene una clara relación con las regiones morfológicas los valores se agruparon en los siguientes rangos: < 10 m, 11 – 20 m, 21 – 30 m, 31 – 40 m y de 41 a 50 m.

Los valores menores a 10 m ocupan la mayor parte del área de estudio y comprende casi en su totalidad la planicie volcánica.

El rango de 11 – 20 m que se encuentra en la planicie volcánica coincide con relictos de escarpes de lava o frentes de lava.

Los rangos de 21 m en adelante corresponden casi en su totalidad a la zona de lomerío donde se encuentra el Cerro del Cajete.



I. Zona de lomerío
 II. Planicie volcánica

Símbolos Complementarios:

- Localidades
- ★ Cerro del Cajete
- ▲ Cueva Chica de Rancho Chico

Escala: 1: 31 000
 Elipsoide: GRS80
 Proyección: Universal Transversal de Mercator Zona 14 N
 Datum horizontal: ITRF 92



Tesis de Maestría
 Alumno: Ing. Alain Fonseca Montero
 Asesor: Dr. Rafael Antonio López Martínez

Figura 15. Mapa de energía del relieve del área de estudio.

3. CAPÍTULO III. GEOMORFOLOGÍA

La geomorfología es la ciencia que estudia la superficie terrestre con base en su morfología, génesis, dinámica y edad. Los resultados de este análisis se presentan en mapas especializados, los cuales determinarán la espacialidad de las formas del relieve y los procesos que definen su aspecto, elementos que tienen un fuerte vínculo con la litología y el arreglo estructural, la cual permite clasificar cada una de las estructuras que componen a la superficie terrestre en tres grandes rubros: endógeno, exógeno y endógeno modelado. (Lugo-Hubp, 1988; Simonov, 1985)

3.1. Mapa geomorfológico del cono de ceniza Cerro del Cajete y sus estructuras asociadas

Bajo un aspecto general la cartografía geomorfológica, puede considerarse como un inventario de formas de relieve, procesos modeladores y dinámica (Mendoza-Margáin, 2010). En el Anexo 1 se encuentra el mapa geomorfológico del Cerro del Cajete y sus estructuras geológicas asociadas. Este documento incorpora una leyenda que ordena y clasifica el relieve de forma jerárquica al tomar en cuenta su origen y morfología, el cual se desglosa a continuación:

RELIEVE ENDÓGENO

1. Volcánico explosivo
 - 1.1. Cono de ceniza con cráter
 - a) Labio
 - b) Atrio
 - c) Fondo
 - 1.2. "Cúpulas"
2. Derrame de lava asociada al cono de ceniza
3. Estructuras geológicas asociadas al derrame de lava
 - 3.1. Levées
 - 3.2. Frente de lava
 - 3.3. Sistema de tubos de lava, Cueva Chica de Rancho Chico
 - 3.4. Depresiones semicirculares
4. Relieve tectónico
 - 4.1. Lineamientos geológicos

RELIEVE ENDÓGENO MODELADO

5. Disección vertical por el tipo de roca

RELIEVE EXÓGENO

6. Zonas de reptación

SÍMBOLOS COMPLEMENTARIOS

7. Cerro del Cajete
8. Cueva Chica de Rancho Chico
9. Localidades

RELIEVE ENDÓGENO

Las formas volcánicas que se observan es el resultado de diferentes etapas evolutivas que ha experimentado el área de estudio.

1. Volcánico explosivo

En este epígrafe se agrupa la forma del relieve que se crea a partir de la acumulación de materiales provenientes de la actividad explosiva.

1.1. Cono de ceniza con cráter

Los conos de ceniza se encuentran entre los edificios monogénicos más abundantes, están constituidos predominantemente por material basáltico. Son edificios pequeños, con una altura que no sobrepasa los 300 m sobre su entorno porque el volumen del magma de la erupción es reducido y su estructura es demasiado inestable como para formar edificios de grandes dimensiones. Sus erupciones dan lugar a la construcción de edificios troncocónicos de planta con tendencia a la circularidad, con flancos regulares de pendiente media en torno a los 26° a 33°. Y un diámetro de base que varía entre 300 m y 2 km. Su origen se debe a manifestaciones efusivas y explosivas en las cuales se intercalaron lavas, piroclastos, cenizas y escorias. Debido a su reciente edad, es posible observar sus rasgos primarios en la mayoría de ellos. (Rodríguez-Gonzalez y Fernández-Turiel, 2015, p. 41; Sánchez-García, 2018; Toselli, 2020, p. 75)

Según Carrasco-Núñez et al. (2005) en el área de estudio se encuentran dos conos de ceniza, el CENAPRED (2019) los denomina aparatos volcánicos. (Figura 16)

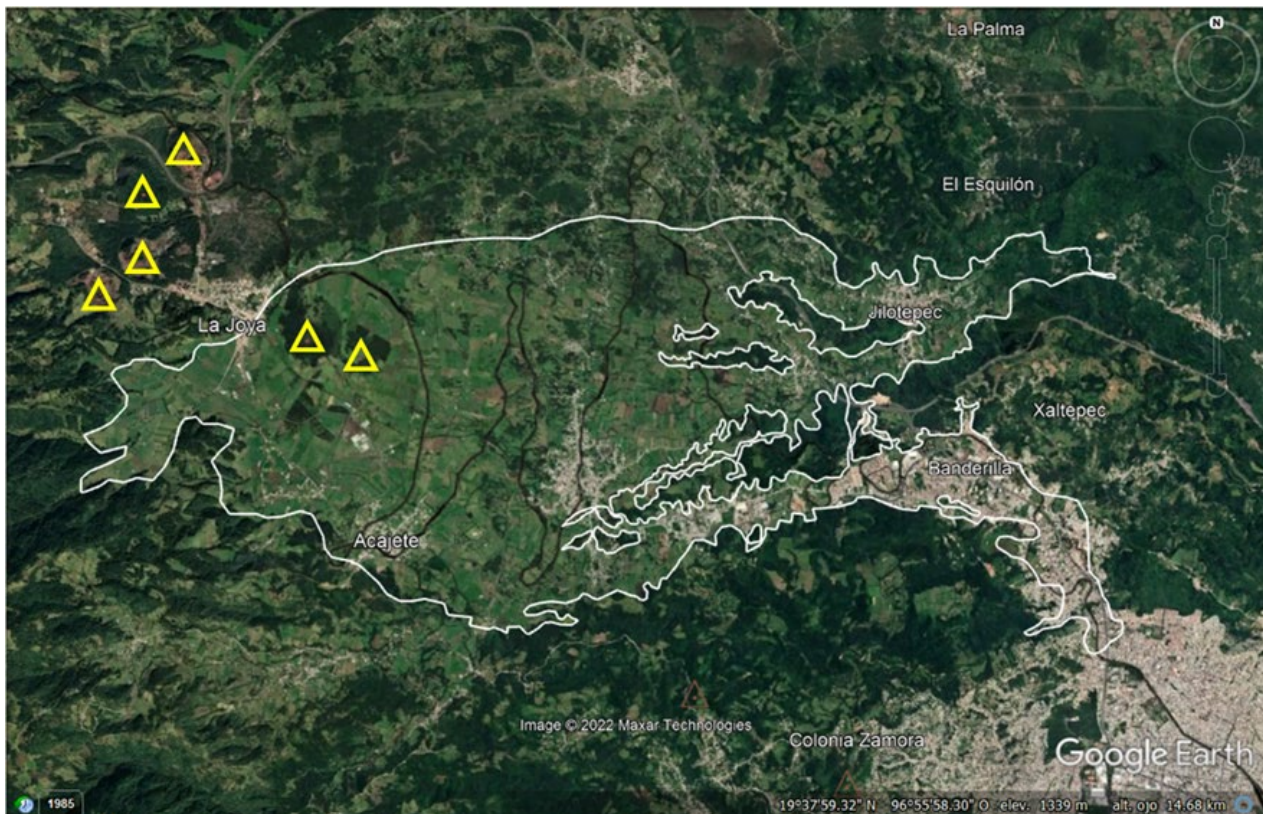


Figura 16. Conos de ceniza (símbolo de triángulos de color amarillo, área de estudio enmarcada en línea blanca) propuestos por Carrasco-Núñez et al. (2005) y el CENAPRED (2019). Modificado de CENAPRED (2019)

Dóniz-Páez (2011) plantea que en los volcanes basálticos monogenéticos pueden ser subdivididos en cuatro categorías morfológicamente: edificios anulares cerrados, volcanes en herradura, aparatos múltiples y montañas de piroclastos. En el caso específico de los edificios anulares cerrados, describe que estos presentan el carácter más o menos circular en su planta y la existencia de cráteres cerrados.

El primer cono de ceniza corresponde al Cerro del Cajete (Figura 17), según su denominación geográfica (INEGI, 2010a) y se encuentra en las coordenadas geográficas latitud $19^{\circ}36'26.93''\text{N}$ y longitud $97^{\circ}1'7.06''\text{O}$ y corresponde, según la clasificación de (Dóniz-Páez, 2011), a un edificio anular cerrado.

El segundo cono propuesto por Carrasco-Núñez et al. (2005) y el CENAPRED (2019) es nombrado en esta investigación como La Joya 06 (Figura 17) se encuentra en las coordenadas geográficas latitud $19^{\circ}36'22.81''\text{N}$ y longitud $97^{\circ}0'47.90''\text{O}$ a unos 503 m al oeste del cono de ceniza Cerro del Cajete. Esta estructura no cumple con las características morfológicas propuesta por los autores Dóniz-Páez y Coello de la Plaza (2007); Dóniz-Páez (2011); Rodríguez-Gonzalez y Fernández-Turiel (2015, p. 46); Toselli (2020, p. 75), no se evidencia claramente una estructura troncocónica donde se pueda delimitar sus partes; por tanto, no se puede considerar como tal en s.s.

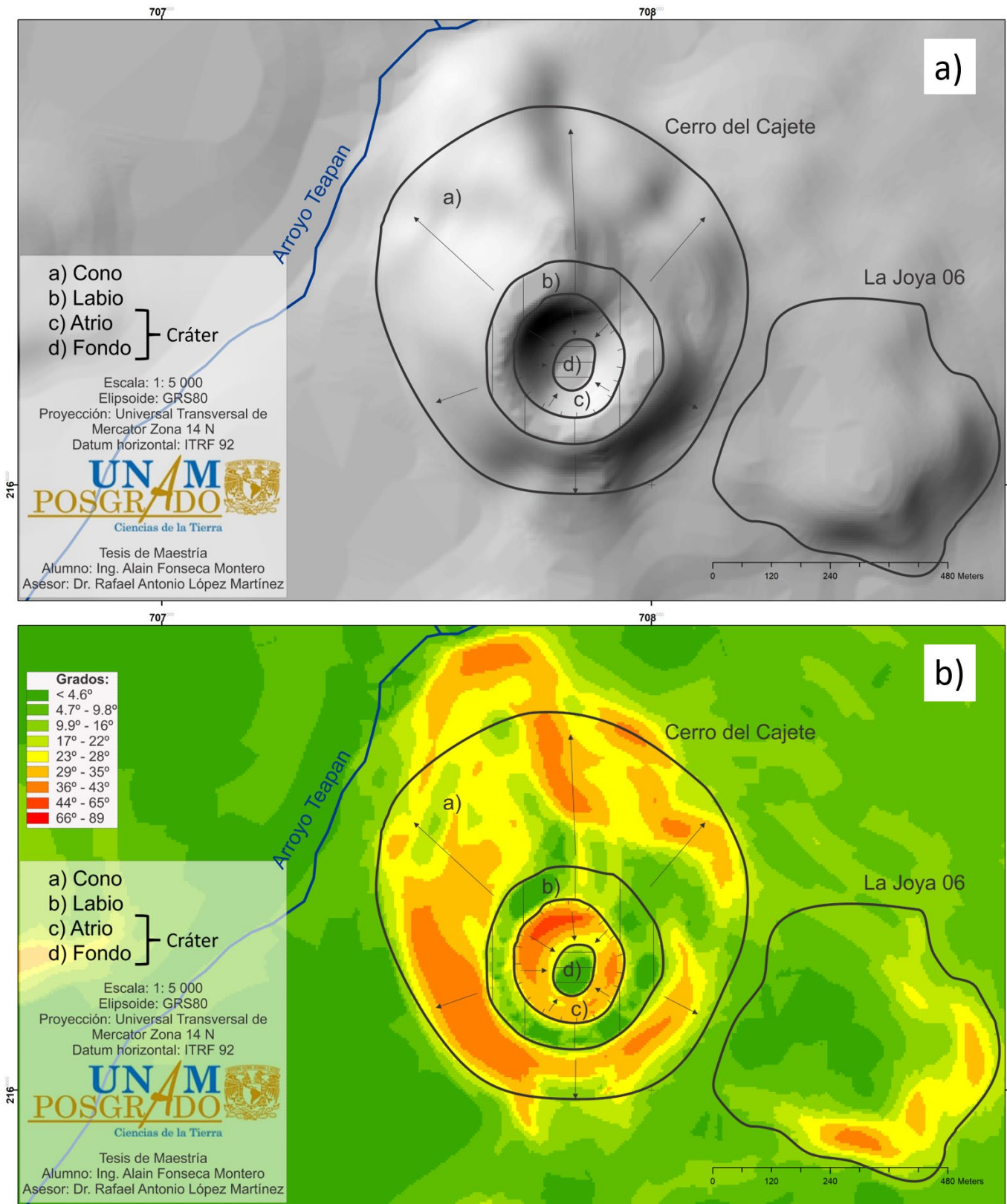


Figura 17. Cono de ceniza Cerro del Cajete y la estructura La Joya 06 a) Mapa sombreado; b) Mapa de pendientes. En ambos se señalan las estructuras que conforman el Cerro del Cajete.

Según Rodríguez-Gonzalez y Fernandez-Turiel (2015, p. 46) los parámetros morfométricos comúnmente medidos en edificios monogénéticos son 13 (Tabla 3).

Tabla 3. Parámetros morfométricos comúnmente medidos en edificios monogénéticos. (Rodríguez-Gonzalez y Fernández-Turiel, 2015, p. 46)

Cono	Unidad	
Eje mayor del cráter (a_{cr})	m	
Eje menor del cráter (b_{cr})	m	
Excentricidad del cráter (e_{cr})	0 (circular) a 1 (elipsoidal)	
Dirección eje mayor del cráter (q)	Grados	
Profundidad del cráter (h_{cr})	m	
Eje mayor del cono (a_{co})	m	
Eje menor del cono (b_{co})	m	
Excentricidad del cono (e_{co})	0 (circular) a 1 (elipsoidal)	
Dirección eje mayor del cono (q)	grados	
Altura del cono (h)	m	
Volumen del cono (V)	m^3	
Pendiente del cono (a)	grados	
Pendiente de la base del cono (relieve antes de la erupción) (b)	grados	

Donde la excentricidad del cono corresponde a la excentricidad de una elipse (e) y es un valor que determina la forma de la elipse.

$$e = \frac{c}{a} = \frac{\sqrt{(a^2 - b^2)}}{a}$$

Donde: c es la semidistancia focal; a el semieje mayor y b el semieje menor de la elipse.

El volumen del cono de ceniza se haya a partir de la fórmula del volumen del cono truncado (V_t):

$$V_t = h \cdot \text{Media heroniana} = \frac{h}{3} \cdot (A_1 + A_2 + \sqrt{A_1 \cdot A_2})$$

Donde h es la altura del cono, A_1 es el área de la base superior del cono y A_2 es el área de la base inferior.

Teniendo en cuenta los parámetros morfométricos propuesto por Rodríguez-Gonzalez y Fernández-Turiel (2015, p. 46) y teniendo como apoyo los mapas de modelo sombreados y el mapa de pendientes, se obtuvo los parámetros del cono de ceniza Cerro del Cajete. (Tabla 4)

Tabla 4. Datos morfométricos del cono de ceniza Cerro del Cajete.

Cono	Cerro del Cajete
Eje mayor del cráter	394 m
Eje menor del cráter	256 m
Excentricidad del cráter	0.76
Dirección eje mayor del cráter	36.92°
Profundidad del cráter	20 m
Eje mayor del cono	1290 m
Eje menor del cono	874 m
Excentricidad del cono	0.74
Dirección eje mayor del cono	34.75°
Altura del cono	169 m
Volumen del cono	43858922.28 m ³
Pendiente del cono	27.92°
Pendiente de la base del cono	7.66°

a) Labio

En Sánchez-García (2018) el labio es una superficie con una morfología convexa ligeramente inclinada que se dispone alrededor del cráter, puede presentarse de manera continua o discontinua y con una amplitud variable en unidades o decenas de metros. Representa el límite entre las laderas interiores del cráter y las exteriores de los edificios volcánicos. La existencia de esta forma del relieve indica que los volcanes son recientes. (Figura 17)

b) Atrio

En Alvarado-Gonzalez (2003) el atrio son formas cóncavas de laderas abruptas que convergen hacia el fondo del cráter y que definen las laderas interiores de este. Presentan una inclinación, longitud y forma variable; pueden ser cónicas, semicónicas o irregulares; estos aspectos dependen de la intensidad del último evento eruptivo. Por lo general se observan en edificios recientes; sin embargo, es posible encontrarlos en otros que ya han sido modelados o parcialmente sepultados. (Figura 17)

c) Fondo

En Sánchez-García (2018) el fondo es una superficie que representa la porción más deprimida del cráter, tiene una morfología subhorizontal ligeramente ondulada y en ocasiones

inclinada; en planta presenta una geometría circular y en la mayoría de los casos esta bordeada por laderas abruptas (atrio). (Figura 17)

1.2. “Cúpulas”

Durante la interpretación de los datos procesados se determinó la presencia de una tercera elevación con características y geomorfología similares a la estructura La Joya 06. La nueva estructura que se propone, La Joya 07, se encuentra al sur del cono de ceniza Cerro del Cajete a una distancia de 566 m y al suroeste de la estructura La Joya 06 a una distancia de 820 m. En las coordenadas geográficas latitud 19°36'26.93"N y longitud 97°1'7.06"O. Presenta una similitud geomorfológica a la estructura La Joya 06 pero de menor altura; ambas tienen forma de cúpula y presentan en su cima una semi planicie de menos de 3° de pendiente. (Figura 18)

Al no poderse determinar el tipo de estructura volcánica que son La Joya 06 y La Joya 07, teniendo en cuenta su morfología, se determinó los parámetros observables. (Tabla 5)

Tabla 5. Datos morfométricos de las estructuras La Joya 06 y La Joya 07.

Datos	La Joya 06	La Joya 07
Coordenadas geográficas	19°36'22.81"N 97°0'47.90"O	19°36'26.93"N 97°1'7.06"O
Altura	21 m	49 m
Eje mayor de la estructura	524 m	784 m
Eje menor de la estructura	443 m	571 m
Pendiente	35	24
Perímetro	1 790 m	1610 m
Área	210 m ²	190 m ²

Las estructuras La Joya 06 y La Joya 07 pueden ser montículos cubiertos por piroclastos, o restos de antiguos edificios cubiertos de lava y/o material piroclástico, como los casos descritos por Mikkan (2017, p. 95). En el supuesto que estas estructuras correspondan a antiguos cráteres cubiertos deben tener una edad anterior al cono de ceniza Cerro del Cajete y debe de existir, mínimo, la presencia de tres derrames de lava con edades diferentes. Se recomienda el trabajo de campo, la toma de muestras y el estudio geofísico con algún método que permita determinar las características geomorfológicas de estas estructuras.

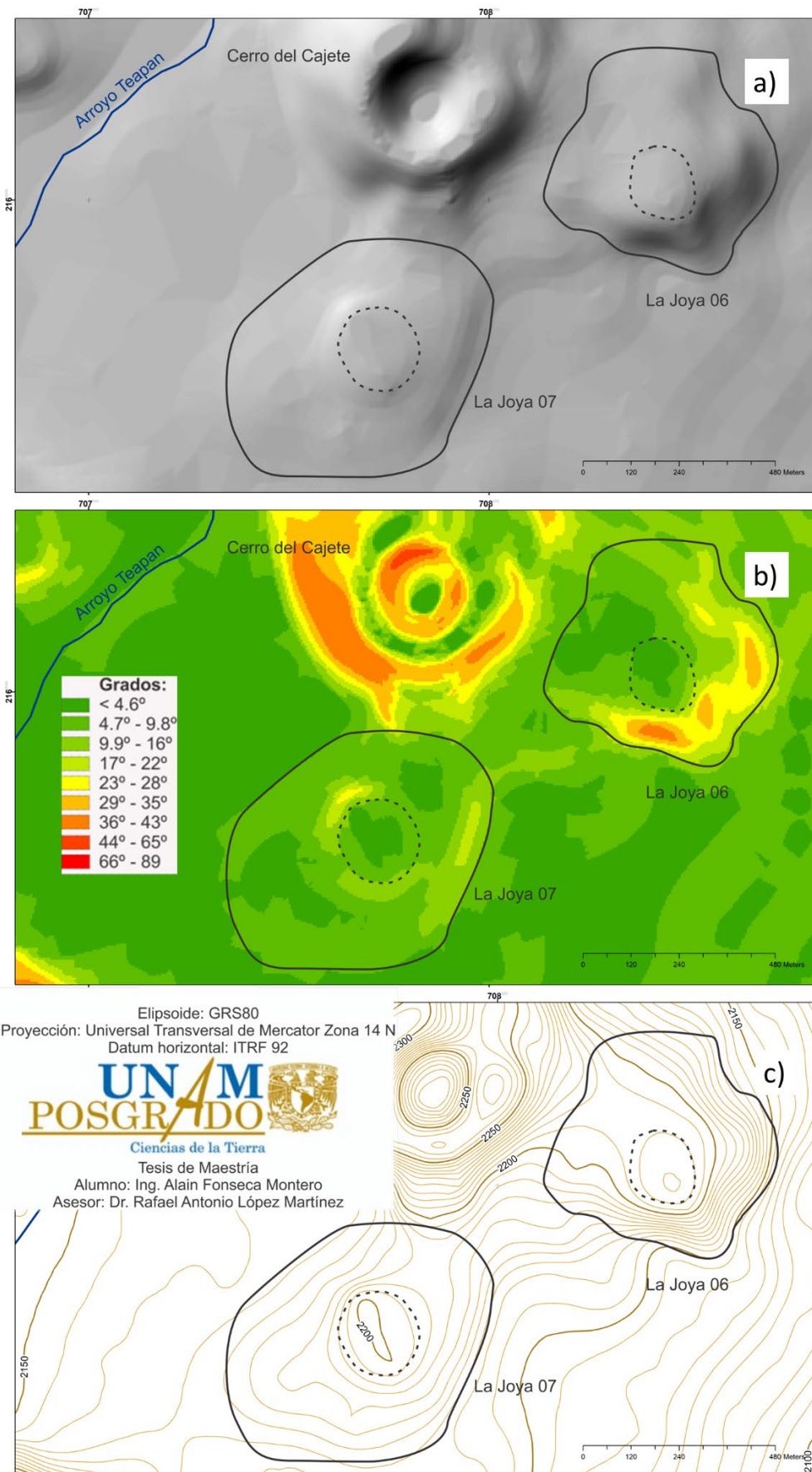


Figura 18. Estructuras La Joya 06 y La Joya 07 a) Mapa sombreado, b) Mapa de pendientes y c) Mapa topográfico de curvas de nivel. Obsérvese en línea puntada, en ambas estructuras, formas semicirculares con relieve ligeramente positivo.

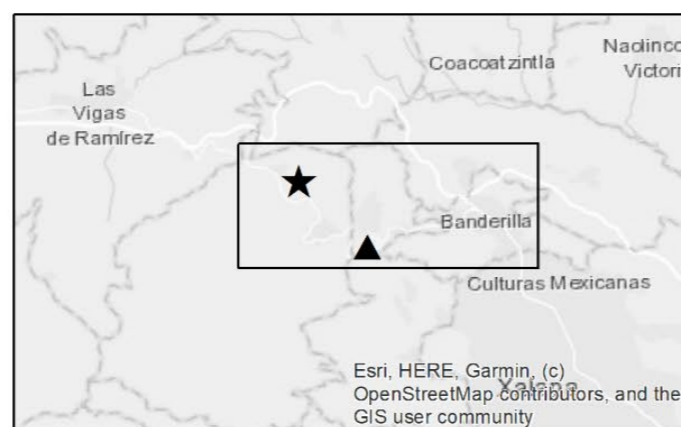
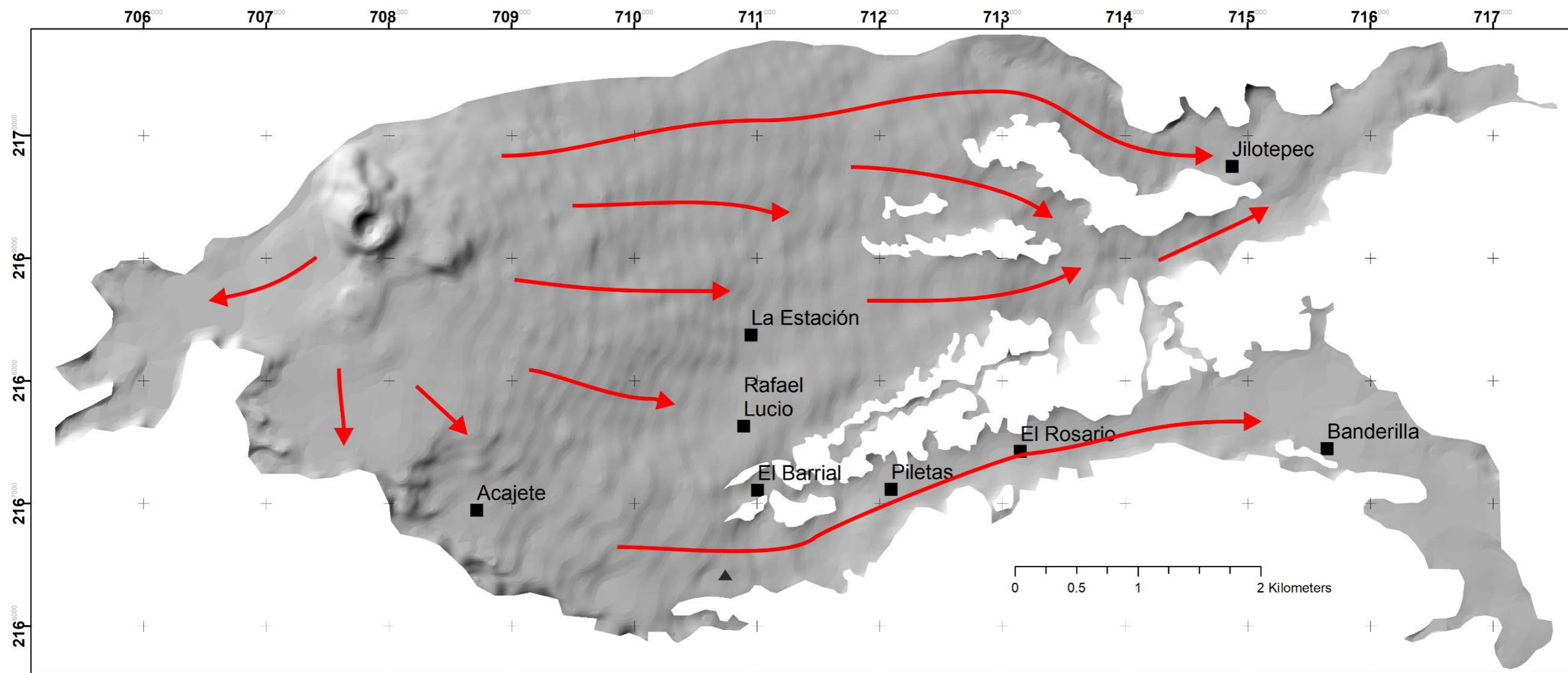
2. Derrame de lava asociada a Cerro del Cajete

El emplazamiento de un derrame de lava (características de la superficie, espesor, longitud, márgenes) está controlado por una interacción compleja entre la tasa de efusión, la topografía subyacente, las propiedades físicas de la lava (densidad, reología, incluyendo su temperatura original y enfriamiento, desgasificación), procesos de enfriamiento, morfología, dinámica de propagación, la geometría del conducto eruptivo, y si su efusión ocurre en forma subaérea, subacuática o subglaciar, siendo la reología una de las más difíciles de cuantificar; debido a esto el derrame de lava es capaz de propagarse lateralmente, llenar depresiones y superar obstáculos morfológicos. En general, las lavas muy fluidas tienden a ocupar grandes extensiones con poco espesor mientras que las lavas más viscosas son de mayor altura y recorren distancias menores (Acocella et al., 2015; Cisneros y Avellán, 2018, pp. 64-65; Guillermo y Vega, 2013, p. 103; Harris y Rowland, 2001; Proietti et al., 2009). Muchos de estos parámetros a menudo no están disponibles o están mal limitados para un flujo de lava específico y varían entre erupciones (Cisneros y Avellán, 2018, p. 65; Damiani et al., 2006).

En el área de estudio, el derrame de lava fue emitida desde el cono de ceniza Cerro del Cajete y se dirigió en abanico, mayormente, hacia el este del área de estudio, siguiendo la dirección de la máxima pendiente (Figura 19). Una vez alcanzadas las rocas más antiguas en la región se disponen a bordear los resaltes topográficos de estas para continuar en dicha dirección.

La mayoría de los límites de este derrame de lava está dada por el paleorrelieve que ella bordeó. En una zona sur del área de estudio está limitado por el río Sedeño, por una longitud de 3 km, y en parte de la región norte está limitada por el arroyo Teapan. No es apreciable el frente de lava distal del derrame quedando cubierto, en la región sureste del área de estudio, por el derrame del Cerro Macuitempec (cono de ceniza) y, en la región noreste del área de estudio, por el derrame proveniente de El Volcancillo.

El derrame perteneciente al cono Cerro del Cajete, se extiende aproximadamente por unos 11.7 km. Mantiene rasgos primarios, como algunos relictos de escarpes al interior de ella que se encuentran más aglutinados, con pendientes entre 10° y 22° que los más distantes del cono con pendientes menores a 10° . En la región sur, cercana al Cerro del Cajete, también se encuentra un área, perteneciente al derrame, con pendiente inferior a 10° . (Figura 20)



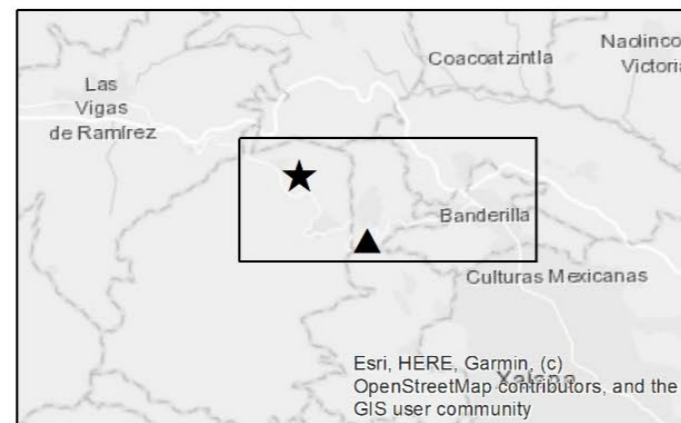
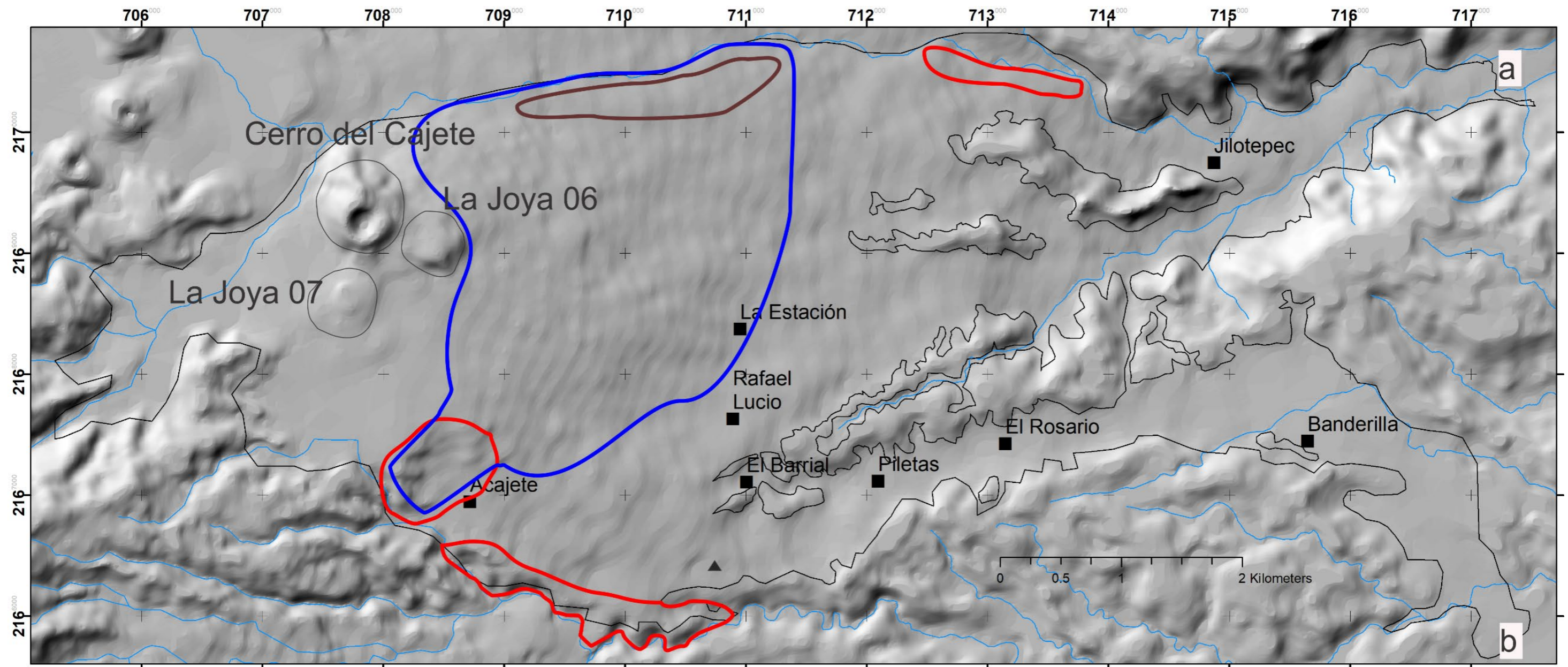
- Símbolos Complementarios:**
- Localidades
 - ★ Cerro del Cajete
 - ▲ Cueva Chica de Rancho Chico
 - ↘ Dirección del flujo de lava

Escala: 1: 31 000
 Elipsoide: GRS80
 Proyección: Universal Transversal de Mercator Zona 14 N
 Datum horizontal: ITRF 92

UNAM
POSGRADO

Ciencias de la Tierra
 Tesis de Maestría
 Alumno: Ing. Alain Fonseca Montero
 Asesor: Dr. Rafael Antonio López Martínez

Figura 19. Mapa de flujos de lava en el área de estudio.



- a Contacto con el derrame de El Volcancillo
- b Contacto con el derrame del cono Cerro Macuitepec
- Fronte de lava
- Escarpes de lava aglutinados
- Levées

Símbolos Complementarios:

- Localidades
- ★ Cerro del Cajete
- ▲ Cueva Chica de Rancho Chico

Escala: 1: 31 000
 Elipsoide: GRS80
 Proyección: Universal Transversal de Mercator Zona 14 N
 Datum horizontal: ITRF 92

UNAM
POSGRADO

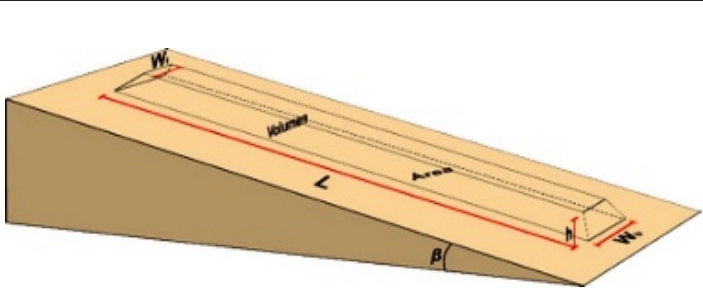
Ciencias de la Tierra
 Tesis de Maestría
 Alumno: Ing. Alain Fonseca Montero
 Asesor: Dr. Rafael Antonio López Martínez

Figura 20. Mapa del derrame de lava del Cerro del Cajete, coincide con el área de estudio, delimitada en línea negra.

Según Rodríguez-Gonzalez y Fernández-Turiel (2015, p. 46) los parámetros morfométricos comúnmente medidos en derrames de lava son 7 (Tabla 6).

Tabla 6. Parámetros morfométricos comúnmente medidos en derrames de lava. (Rodríguez-Gonzalez y Fernández-Turiel, 2015, p. 46)

Derrame de lava	Unidad
Longitud (L)	m
Ancho de la lava Parte superior (w_t)	m
Ancho de la lava Parte inferior (w_b)	m
Área (A)	m^2
Espesor (h)	m
Volumen (V)	m^3
Pendiente de la base de la lava (relieve antes de la erupción) (β)	grados



El volumen del derrame de lava se haya a partir de la fórmula del volumen de un tronco de pirámide (V_l):

$$V_l = h \cdot \text{Media heroniana} = \frac{h}{3} \cdot (A_1 + A_2 + \sqrt{A_1 \cdot A_2})$$

Donde h es el espesor del derrame, A_1 es el área de la base superior del derrame y A_2 es el área de la base inferior.

Teniendo en cuenta los parámetros morfométricos propuesto por Rodríguez-Gonzalez y Fernández-Turiel (2015, p. 46) y teniendo como apoyo el mapa de sombras y el de pendientes, se obtuvo los parámetros del derrame de lava perteneciente al cono de ceniza Cerro del Cajete. (Tabla 7)

Tabla 7. Datos morfométricos del derrame de lava perteneciente al cono de ceniza Cerro del Cajete.

Derrame de lava	Datos
Longitud	11713 m
Ancho de la lava, parte superior	5 300 m
Ancho de la lava, parte inferior	5 500 m
Área	31 440 378.04 m^2
Espesor	230 m
Volumen	4 609 145 784 m^3
Pendiente de la base de la lava	18°

3. Estructuras asociadas al derrame de lava

Estas estructuras pueden cubrir áreas o presentarse como elementos lineales, que se vinculan con los rasgos primarios de este relieve; en la zona de estudio se reconocieron *levées*, frentes de lava y un sistema de tubos de lava.

3.1. Levées

En Sánchez-García (2018, p. 128) los *levées* son cordones en forma alargada y estrecha que se disponen en los bordes laterales de un flujo de lava. Su origen se debe a un enfriamiento diferencial entre los flancos y el cuerpo de la lava; los primeros pierden temperatura de manera repentina, ocasionando que funcionen como barreras, lo que provoca el encauzamiento del derrame. En el área de estudio se encuentran en la porción norte del derrame de lava. (Figura 20)

3.2. Frente de lava

En Gordillo-Reyna (2018, p. 99) se define como laderas con cambios abruptos en la inclinación, mayor a 45°; representan los límites frontales y laterales de los flujos de lava. Su origen se vincula con el enfriamiento que tienen los derrames al momento de detenerse; en otros casos, se asocia a los cambios de velocidad generados por los desniveles en la topografía. En el área de estudio se encontraron frentes de lava correspondientes a los formados en los laterales ya que los frontales están ocultos por derrames más jóvenes (derrame de El Volcancillo y derrame del cono Cerro Macuhtepec). (Figura 20)

3.3. Sistema de tubos de lava, Cueva Chica de Rancho Chico

Los tubos de lava son túneles naturales a través de los cuales viaja la lava debajo de la superficie de un flujo de lava basáltica característico de erupciones de baja viscosidad de lavas de basalto. La lava que fluye se enfría desde su superficie por radiación y convección térmica del aire, y se forma una corteza rígida. Una vez que se forma la corteza rígida, proporciona aislamiento debido a su pequeña conductividad térmica, y la lava fundida interna puede fluir sin enfriarse. Cuando el suministro de lava cesa al final de una erupción la lava en el tubo fluye y deja un túnel parcialmente vacío debajo del suelo, llamado cueva de lava. Como la composición de la lava de las paredes y el piso del tubo es la misma que la que fluye caliente por él, puede derretir la pared rocosa y profundizar el canal. Para entender el proceso de propagación de la lava es importante conocer las dimensiones, características y la estructura interna de los tubos de lava, los cuales se esconden en el espesor del campo de lava. La obtención de estos datos

solo se logra después de la erupción y enfriamiento del mismo. (Harris et al., 2009; Huff y Owen, 2013; Selley et al., 2005; Белоусов y Белоусова, 2019, p. 36)

Según Nieto-Torres y Espinasa-Pereña (2016) los estudios en tubos de lava inactivos han mostrado que es frecuente encontrar sistemas de tubos superficiales con patrones anastomosados en uno o más niveles, sobreyaciendo en ocasiones a tubos de dimensiones mayores, más lineales, y frecuentemente dispuestos en forma de una serie de tubos sobrepuestos, denominados tubos maestros.

En el área de estudio se encuentra el Sistema Rancho Chico de tubos de lava, formado por las cuevas Cueva Chica de Rancho Chico y Cueva Grande de Rancho Chico. La génesis y evolución del sistema aún no han sido estudiado en su totalidad. La Cueva Chica de Rancho Chico, con un desnivel de 25 m, son dos tubos de lava, uno maestro y el otro anastomosado que se orientan, predominantemente, en la dirección NO – SE. La dirección del flujo de lava solidificado en su interior sigue la dirección de la pendiente, 5.83° , del paleorrelieve y el sentido predominante de la cueva, excepto al final del tubo maestro en el que se observa un retroceso del flujo (Figura 21). La Cueva Grande de Rancho Chico, se cree que sea la continuidad del tubo maestro de Cueva Chica de Rancho Chico, por razones logísticas antes explicadas, no fue estudiada en el terreno, por tanto, los resultados expresados corresponden a Cueva Chica de Rancho Chico.

En la Cueva Chica de Rancho Chico, se efectuó una sola jornada de trabajo de campo para actualizar las investigaciones previas e identificar, localizar, clasificar y describir las nuevas y diferentes estructuras geológicas encontradas y ubicarlas espacialmente. La interpretación y obtención de nuevos datos permitió la actualización del mapa topográfico inédito de Cueva Chica de Rancho Chico realizado por el Mtro. Hugo Enrique Salgado Garrido (Figura 21). En él se puede realizar el conteo y caracterización de diferentes estructuras primarias y secundarias (Tabla 8).

El origen y evolución del sistema donde se ubica Cueva Chica de Rancho Chico se realiza teniendo en cuenta las características de sus estructuras y aplicando los principios básicos del fechado relativo de relación de corte y de inclusión.

Durante la emisión del derrame de lava proveniente del cono de ceniza Cerro del Cajete, en la porción centro sur, se originó el canal de lava que originó el tubo maestro de Cueva Chica de Rancho Chico (Figura 22 a). En ocasiones, en estos canales ocurren rebosamientos, estos al ser de menor caudal se mueven más lentamente y tienden a anastomosarse, siendo el caso del

otro tubo que conforma la cueva (Figura 22 b). Con el tiempo, los *levées* de ambos tubos se fueron cerrando y formando el techo. Fluctuaciones o interrupciones posteriores fueron creando *levée* en el tubo maestro que clausuraron la conexión de este con el tubo anastomosado.

Dentro de la cueva se encontró dos tipos de derrames de lava, existe una mayor cantidad de estructuras de flujos de lava *pahoehoe* que de estructuras de flujos de lava *aa*. La clasificación de tipos de lava que se utilizó es la propuesta en Selley et al. (2005). (Figura 23, Figura 24, Figura 25 y Figura 26)

Luego de la formación del techo del tubo anastomosado, se formó un salón (Figura 26), que corresponde a una zona amplia de la cueva donde el techo está abovedado. Puede ocurrir donde la lava bajo presión provoca el derretimiento hacia arriba en un techo endurecido (Bunnell, 2008, p. 32). El penúltimo flujo de lava en entrar desde el tubo maestro al tubo anastomosado era un flujo *aa* y el último era *pahoehoe*. Las lavas *pahoehoe* tienen una morfología diferente a las lavas *aa*, lo cual se debe a que se desplazan con menor velocidad que las lavas *aa*; las lavas *pahoehoe* y *aa* pueden coexistir en una misma colada, donde el movimiento de la lava tiene distintas modalidades debido a diferencias en la velocidad y en el caudal (tasa de emisión de la lava) (Llambías, 2003).

En la intersección de los dos tubos, exactamente en el tubo anastomosado, se determinaron 7 interrupciones del flujo de lava con el conteo de las estrías y el flujo de lava *pahoehoe* (Figura 25 a). En la zona de encuentro de las estructuras de flujo de lava *pahoehoe* y *aa* se determinaron 8 interrupciones del flujo de lava con el conteo de las estrías, las estructuras de flujo de lava *pahoehoe* y las estructuras de flujo de lava *aa* (Figura 23 y Figura 25 b).

Como resultado de la erosión térmica, el tubo maestro crece por refusión del techo, paredes y principalmente el piso, ocasionando que en la actualidad el piso del tubo maestro se encuentre 4 metros por debajo del piso del tubo anastomosado. Esta refusión del piso también ocasionó la formación de un tubo sobrepuesto por la solidificación de la lava que corría en su interior. La evidencia de la presencia de esta estructura es una única cornisa en el tubo maestro (Figura 21 y Figura 27), que es un tipo de *levée* en forma de dique que se arquea hacia dentro para formar un tubo de lava construido gradualmente por desbordamientos sucesivos o salpicaduras; la superficie exterior suele ser áspera y en bloques, la superficie interna es más lisa pero generalmente acanalada, estriada y marcada con líneas de flujo, y el borde superior a veces está almenado (Larson, 1991, p. 241).

Tabla 8. Conteo y características de las estructuras primarias y secundarias de Cueva Chica de Rancho Chico.

Estructura	Ubicación / cantidad		Total	L (m)	A (m ²)	Observaciones
	TM	TA				
Tubo maestro	1	-	1	246*	2141	La morfología del tubo a lo largo del pasaje varía de circular a semicircular. El ancho varía entre 3 y 15 m. La altura varía entre 2 y 10 m, predominando el techo alto y posee una pendiente de 5.83°.
Tubo anastomosado	-	1	1	100*	1031	La morfología del tubo a lo largo del pasaje varía de circular a semicircular. El ancho varía entre 0.5 y 4 m, en el salón es de 10 m. La altura varía entre 0.5 y 3 m, predominando el techo bajo.
Salón	-	1	1	-	205	Altura de 2.30 m y diámetro aproximado de 10 m.
Flujos de lava <i>pahoehoe</i>	2	1	3	-	-	Tubo maestro: el primero tiene una longitud de 12 m y un área de 73 m ² , el segundo tiene una longitud de 16 m y un área de 48.2 m ² . Tubo anastomosado: longitud de 25 m y un área de 376 m ² .
Flujos de lava <i>aa</i>	-	1	1	20	147	-
Grieta	-	1	1	-	-	De 2 a 24 cm de ancho y corta transversalmente al tubo de lava
Sedimento	-	1	1	-	55	Es acarreado desde la entrada de la cueva por el agua de lluvia
Cornisa	1	-	-	-	-	Termina en la formación de un nuevo tubo de lava sellado por bloques caídos, solo es observable 1.70 m de altura de la misma
Entrada de la cueva	-	1	1	-	0.5	Origen antropogénico, fue cortado durante la construcción del flanco norte de la carretera Puebla – Xalapa
<i>Lavaball</i>	2	-	2	-	-	El primer <i>lavaball</i> obstruyó la entrada de lava al sistema, Se observa gran parte de él. El segundo <i>lavaball</i> se encuentra a menos de 2 m de distancia del primero, tiene forma elipsoidal con dos ejes menores de 1.5 m y un eje mayor de 2m
<i>Rootsicles</i> incipiente	-	1	1	-	-	Longitud de 6 cm
Estafilitos	-	-	-	-	-	Generalmente se observan en todo el techo de la cueva donde no ha ocurrido derrumbe, tienen una longitud entre 1 y 3.5 cm
Estalactitas	6	1	7	**	-	Se ubican en las zonas de mineralización
Estalagmitas	6	4	10	0.22 a 0.6	-	
Zonas de derrumbes o bloques caídos	9	2	11	-	-	Los bloques caídos llegan alcanzar los 1.5 m de diámetro. Su posible origen es resultado de los movimientos sísmicos que afectaron el área
Zonas de mineralización de oxihidróxidos de Fe	4	7	11	-	-	El área de las zonas de mineralización varía entre 2 y 241 m ²
Zonas de mineralización de alofana	3	2	5	-	-	El área de las zonas de mineralización varía entre 2 y 34 m ²
Balcones / repisas	4	3	7	10 a 20	-	La altura desde el suelo varía de 0.2 a 1.5 m
Escalones	5	3	8	-	-	Los escalones y caídas no superan la altura de 1.5 m, excepto la caída que conecta el tubo maestro con el tubo anastomosado que tiene una altura de 4 m.
Caídas	3	2	5	-	-	

TM: tubo maestro; TA: tubo anastomosado; L: longitud; A: área; * Entre sus puntos más extremos; ** no se pudieron medir todas por la altura

Cueva Chica de Rancho Chico Xalapa, Veracruz

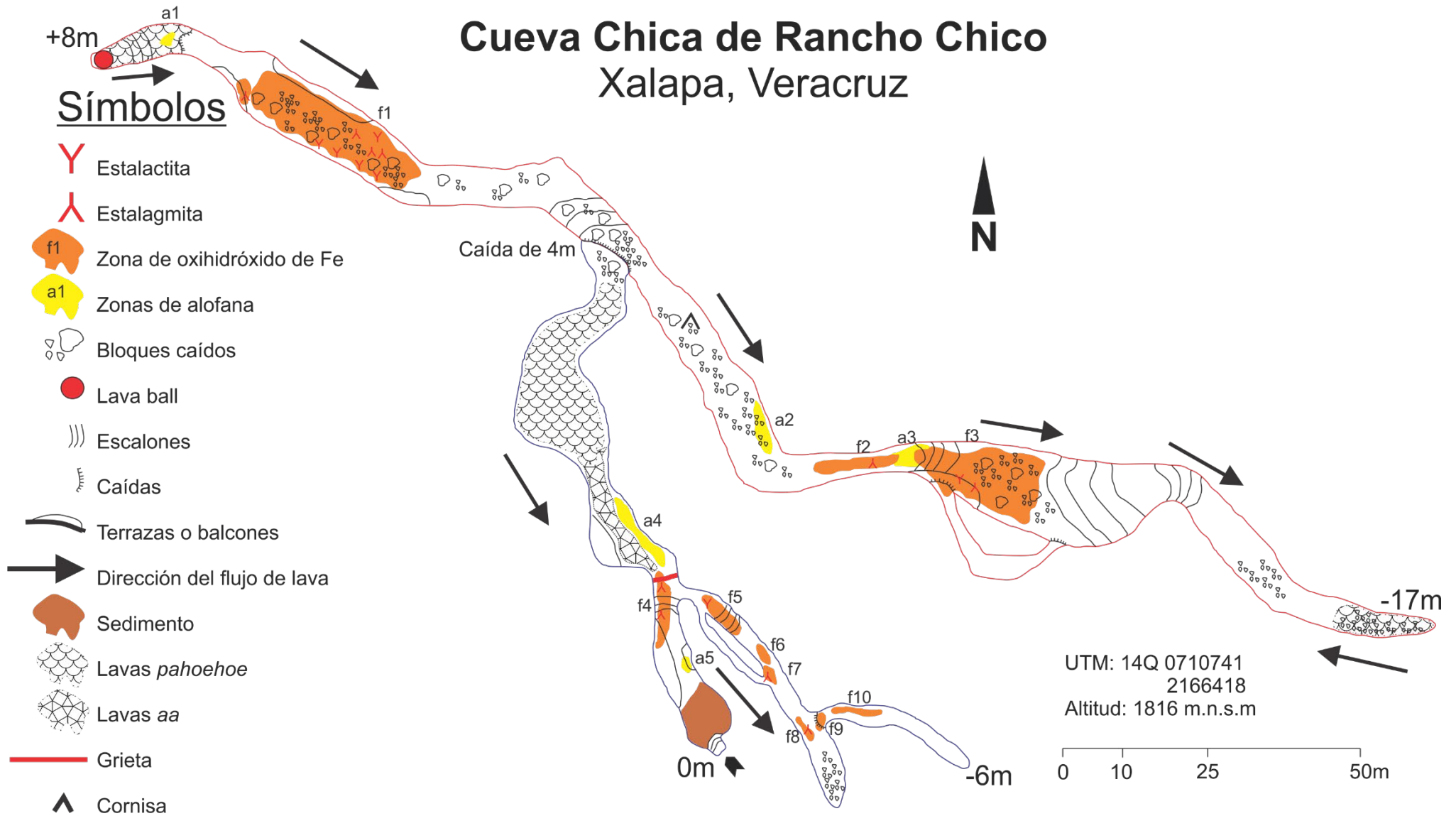


Figura 21. Mapa topográfico de Cueva Chica de Rancho Chico actualizado, vista en planta; tubo de lava maestro en rojo y tubo anastomosado en azul. Modificado con permiso del Mtro. Hugo Enrique Salgado Garrido

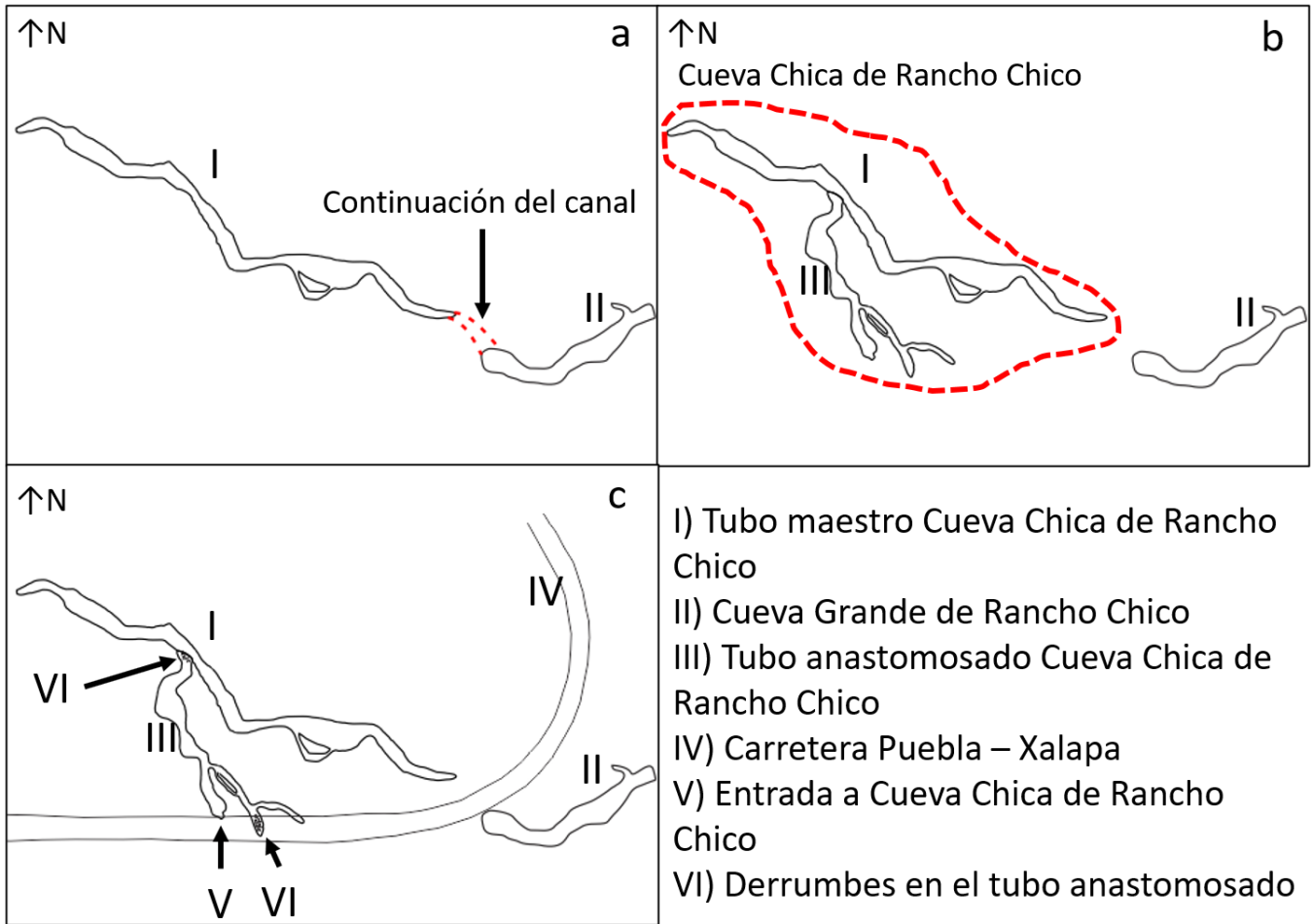


Figura 22. Esquema del origen y evolución del Sistema Rancho Chico de tubos de lava, en especial Cueva Chica de Rancho Chico; a) Formación del canal que originó el tubo maestro del sistema; b) Origen del tubo maestro y tubo anastomosado de Cueva Chica de Rancho Chico y origen de Cueva Grande de Rancho Chico; c) Evolución del sistema.

Durante la formación de este nuevo tubo, entra un *lavaball* al tubo maestro, un segundo *lavaball* taponea la entrada de lava al tubo maestro quedando a escasos metros el primer *lavaball* (Figura 28). Las *lavasballs*, son producto del rodamiento y fricción de bloques pastosos de lava, por lo que ocasionalmente pueden mostrar una estructura espiral y en capas (Guillermo y Vega, 2013, p. 106).

Sigue drenándose la lava que quedó dentro del tubo maestro, se rellena y solidifica la lava en el nuevo tubo en formación. Posteriormente, se clausura la conexión del tubo maestro con el tubo de lava que está formado actualmente por Cueva Grande de Rancho Chico. La lava *pahoehoe* que queda bloqueada al final del tubo maestro retrocede y se solidifica. Hasta ese momento ambos tubos (maestro y anastomosado) están desconectados entre ellos y aislados del exterior.

Durante la evolución de la cueva, ocurren uno o varios fenómenos geológicos; posiblemente sismos tectónicos y/o volcánicos u otros eventos de gran envergadura, que

provocan derrumbes parciales del techo de la cueva y la reconexión del tubo maestro y el tubo anastomosado (Figura 22 c y Figura 29). Debido a estos fenómenos geológicos de gran envergadura, se forma una grieta en el tubo anastomosado que lo corta transversalmente, de la cual no se observó continuidad en el tubo maestro.

Comienza, hasta la actualidad, la infiltración y goteo de agua cargada químicamente dentro de la cueva que da origen a las zonas de mineralización, las estalactitas y estalagmitas.

Las estalactitas se encuentran fundamentalmente en las zonas de mineralización de la cueva; son espeleotemas asociados al goteo de agua con la particularidad que cuelgan del techo de la cueva. Poseen un agujero central que permite el paso del agua y donde se produce la desgasificación; crecen en el sentido de la gravedad.

Las estalagmitas (Figura 30), al igual que las estalactitas, se encuentran fundamentalmente en las zonas de mineralización de la cueva; son depósitos de suelo convexos contruidos por la precipitación de sustancias disueltas o arrastradas por el agua que cae de las estalactitas s.s. Estos espeleotemas no son frecuentes en cavidades de rocas ígneas (Vidal-Romani et al., 2010). Las estalagmitas a veces presentan un hueco central cuya génesis puede tener un origen diverso dependiendo de la composición de las mismas (Hill y Forti, 1997).

Durante la construcción de la carretera Puebla – Xalapa fue destruido y rellenado, parcialmente, el tubo anastomosado, creándose en el flanco norte de la carretera la entrada artificial a la cueva (Figura 21, Figura 22 c y Figura 31). Por dicha entrada, el agua de lluvia acarrea sedimentos del exterior y se depositan en el interior de la misma (Figura 32). Parte sur de este tubo se encuentra por debajo de dicha carretera y en uno de sus ramales, que se encuentra a menos de 5 metros de profundidad de la carretera, se observa un derrumbe (Figura 22 c) el cual se desconoce si su origen es antrópico (por el paso de los vehículos o la construcción de la carretera) o propio de fenómenos geológicos.

El área de estudio se encuentra ubicada en una zona de hundimientos (Figura 6) por eso la amenaza de colapsos de techos de tubos de lava por las vibraciones asociados al paso de vehículos de alto tonelaje, construcción de infraestructuras sin un estudio previo del suelo o por sismos es posible.

A continuación, se describen y definen algunas de las otras estructuras observadas:

Las caídas (Figura 24, Figura 29 y Figura 33) son considerables desniveles en el piso dentro de la cueva. Pueden ser formadas por el paleorrelieve, conexión entre oquedades o tubos de lava dentro de la cueva y derrumbes parciales.

Durante la investigación, la lluvia era de fuerte a muy fuerte, dentro de la cueva la infiltración era escasa, el mayor goteo se detectó en la grieta descrita en el tubo anastomosado. No ocurre encharcamiento ni grandes acumulaciones de agua, lo cual presupone la presencia de otras estructuras u oquedades no descubiertas dentro del tubo de lava que posibilitan la continuidad del agua por debajo del tubo hacia otras zonas de mayor o igual permeabilidad. Se destaca una zona de sedimentos (Figura 32) adyacente a la entrada de la cueva.

Los balcones (terrazas) y repisas (Figura 34) se ubican en toda la cueva, se caracterizan por ser abultamientos longitudinales en la pared formados a partir de la estabilización del nivel de lava, compuestas por diversas capas que se van añadiendo en cada oscilación. Dependiendo del tiempo de estabilización se construyen balcones, repisas o simples estrías (Larson, 1991, p. 234).

Los escalones son estructuras con forma de escalones formadas por el paleorrelieve o pequeños frentes de lava y se ubican en toda la cueva.

Se ubicó un solo *rootsicle* incipiente (Figura 35), espeleotemas que crecen sobre las raíces (Daza-Brunet, 2015; Gunn, 2004; Hill et al., 1997), en toda la cueva, específicamente en el tubo anastomosado.

Los estafilitos (estalactitas de lava o *lavacicle*) (Figura 23, Figura 25, Figura 26, Figura 34 y Figura 35) se ubican en todo el techo de la cueva donde no hay derrumbes; estos se forman en los tubos de lava mientras que la lava todavía está activa en el interior (Baird et al., 1985). El mecanismo de formación es la deposición de material en los techos de las cuevas. La formación de los estafilitos ocurre muy rápidamente en cuestión de horas, días o semanas. Una vez que la lava ha dejado de fluir, los estafilitos también dejarán de crecer (Larson, 1993). En Dóniz-Páez y Coello de la Plaza (2007) mencionan que, la presencia de los estafilitos en los tubos de lava es resultado de *churretones* de lava producidos por la refusión del techo de la cueva, a partir del calor que aporta una corriente de lava secundaria.

En epígrafes posteriores se explica el origen de las zonas de mineralización de oxihidróxidos de Fe y de alofana dentro de la cueva (Figura 24 y Figura 30) y de la grieta que corta transversalmente el tubo anastomosado.



Figura 23. Estafilitos cónicos en el techo del tubo de lava anastomosado al final de las estructuras de lavas pahohoe y principio de las lavas aa. Obsérvese en el centro inferior de la imagen el encuentro de dichas lavas y, en las paredes del tubo de lava, al menos 6 estrías.



Figura 24. Al comienzo del tubo maestro: a) estructuras de flujos de lava de pahohoe; b) primera caída; c) zona de mineralización de alofana a1 formada por goteo.



Figura 25. Interrupciones del flujo de lava en el tubo anastomosado; 6 estrías en líneas rojas; estafilitos cónicos; a) a menos de un metro de la caída de 4 m, estructuras de flujo de lava pahoehoe; b) zona de encuentro de las estructuras de flujo de lava pahoehoe y aa; foto en miniatura, estructuras de flujo de lava aa más cerca a la pared.



Figura 26. Salón con estafilitos cónicos y estructuras de flujos de lava pahoehoe en el piso del tubo de lava anastomosado en su zona más ancha.



Figura 27. Cornisa tapada, en gran medida por bloques caídos de hasta 0.7 m de diámetro. Formación de un nuevo tubo de lava dentro del tubo maestro, antes de la zona de mineralización de alofana a2.



Figura 28. Lavaball a) que clausuró la entrada de lava al tubo maestro; b) a 2 m del primero.

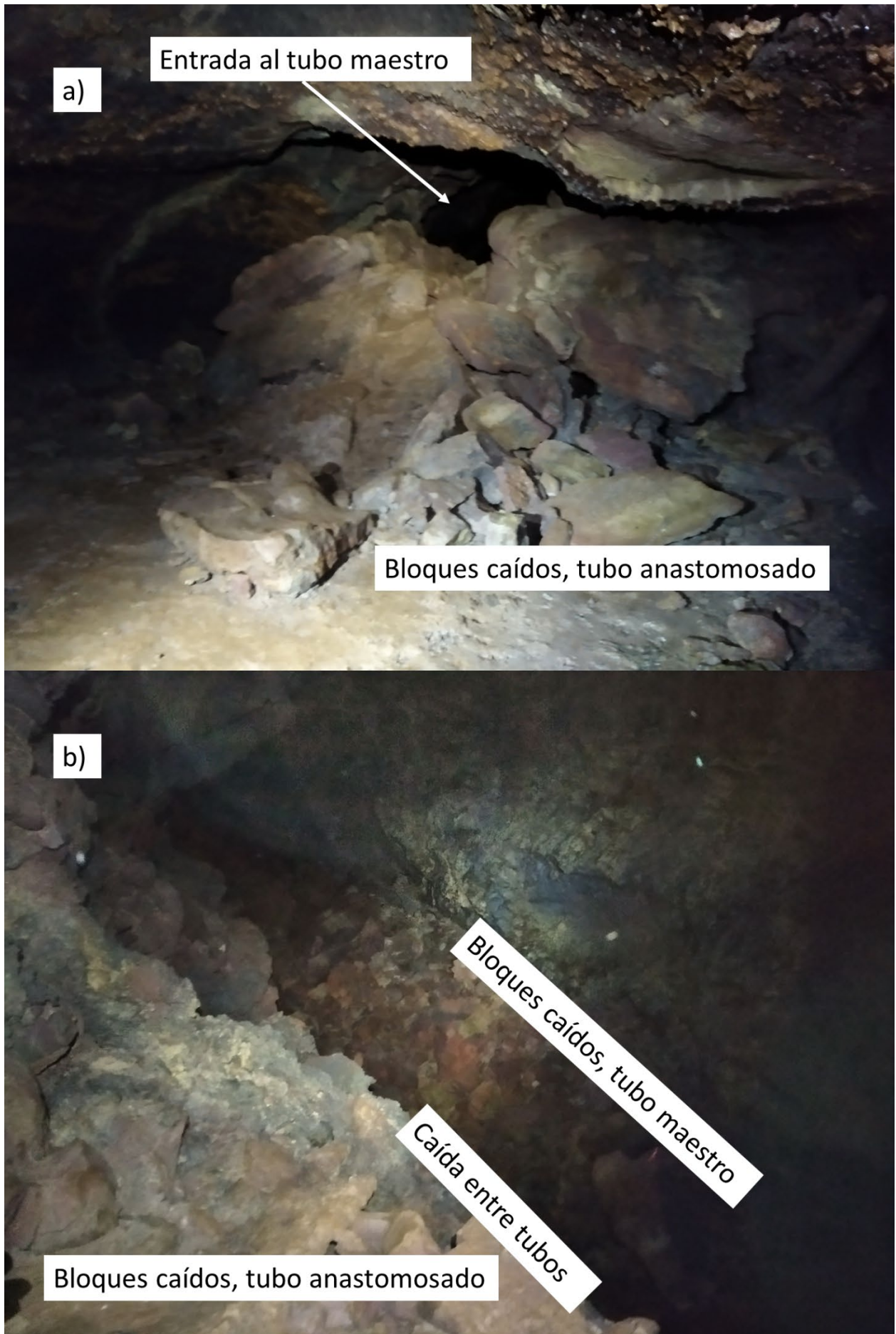


Figura 29. Caída de 4 m y bloques caídos del derrumbe parcial entre el tubo anastomosado y el tubo maestro.

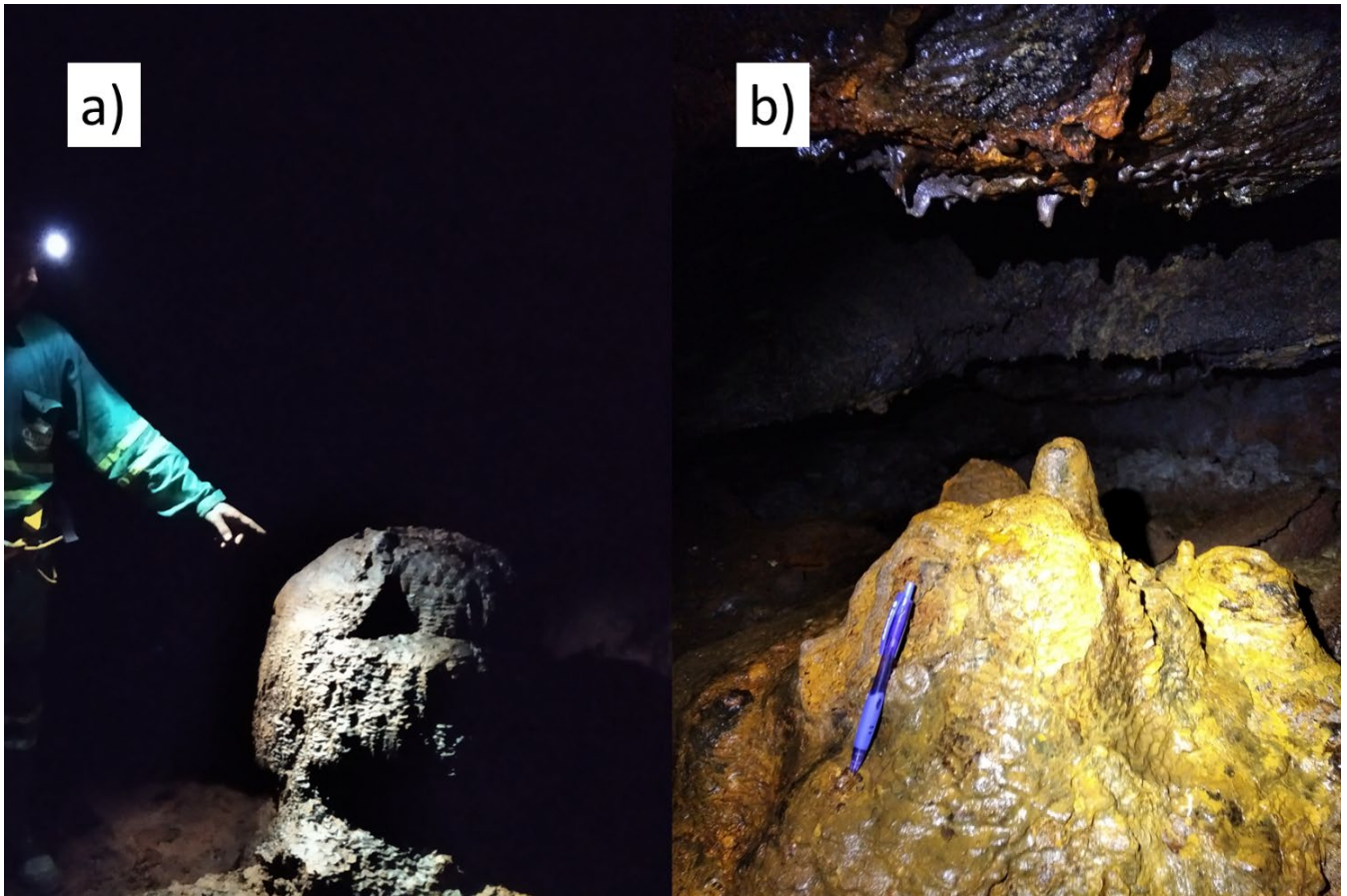


Figura 30. Estalagmitas a) en la zona de mineralización f1, tubo maestro; b) en la zona de mineralización f4, formada por goteo, tubo anastomosado.



Figura 31. Entrada de Cueva Chica de Rancho Chico en la cuneta de la carretera Puebla – Xalapa, obsérvese suelo en la entrada.



Figura 32. Sedimentos dentro de Cueva Chica de Rancho Chico. Obsérvese como penetra el agua en el momento de la toma de la foto; la lluvia era de fuertes a muy fuertes.



Figura 33. Primera caída en el tubo maestro (1.30 m).



Figura 34. Repisa y estafilitos en el tubo de lava anastomosado, frente a la zona de alofana a4.



Figura 35. Rootsicles incipiente y estafilitos cónicos en el tubo de lava anastomosado en la zona de mineralización de oxihidróxidos f4, cerca de la grieta.

Teniendo en cuenta lo descrito anteriormente, desde el punto de vista geoturístico, Cueva Chica de Rancho Chico, por las características y tamaño de la entrada de la cueva, las estructuras morfológicas que se encuentran y la caída de 4 metros que une el tubo maestro con el tubo anastomosado se recomienda que se permita solamente el turismo especializado.

3.4. Depresiones semicirculares

En el área de estudio, una serie de depresiones circulares a semicirculares de diferentes tamaños se observan en las imágenes satelitales, los mapas del relieve sombreado y en el terreno; y cuya génesis no han sido totalmente estudiadas. Estas depresiones semicirculares posiblemente sean cráteres de explosión freáticas, cráteres asociados con la actividad fisural, estructuras de colapso de túneles de lava como los *skylight* o hundimientos.

Algunas de estas estructuras se pueden formar cuando las *lavaballs*, cuyo diámetro oscila entre 0,5 y 5 m, ruedan en el flujo de lava aumentando gradualmente su tamaño y se traban en el estrechamiento del tubo. Más arriba del flujo de lava, del tramo bloqueado comienza una rápida acumulación de lava con una densidad de cerca de 2700 kg/m^3 , por eso, al llenarse de lava, incluso en las tuberías con pendientes suaves, la presión alcanza altos valores. Los saltos bruscos de presión conducen a la destrucción de las paredes de los tubos. Después de la ruptura del tubo la presión de la lava disminuye bruscamente y las protuberancias se transforman en hundimientos del campo de lava y en el lugar de las protuberancias se forman huecos desde los cuales se ve la entrada al tubo de lava. (Белоусов y Белоусова, 2019, p. 37)

Otras pueden formarse por erupciones hidromagmáticas o erupción freatomagmática una forma altamente explosiva en un ambiente terrestre donde el nivel freático del agua subterránea es poco profundo y el magma se encuentra con ella. Se caracterizan por presentar morfología de circular a semicircular, con diámetro de entre 60 a 160 m. (Mendoza-Margáin, 2010, p. 82; Rodriguez-Gonzalez y Fernandez-Turiel, 2015, p. 42; Walker, 1971)

Los *skylight* (Claraboya o tragaluz) son aberturas en el techo de un tubo de lava. Normalmente, estos agujeros son causados por el colapso parcial del techo del tubo. (Haruyama et al., 2009; Pfeiffer, 2004)

Un hundimiento es un movimiento vertical descendente de roca, suelo o material no consolidado, por acción y efecto de la gravedad. Representa aquellas zonas en donde ha ocurrido colapso por gravedad, disolución y derrumbes de techos de cavernas naturales o hechas por el ser humano, como por ejemplo las minas subterráneas en terrenos poco consolidados

(SEDATU, 2011; SEDESOL, 2011a, 2011b, 2011c). Los hundimientos no son estructuras de origen endógeno y en ocasiones ni geológico, pero se decidió incluir como posibles depresiones semicirculares porque adoptan esta morfología. En el Atlas de Riesgo del Estado de Veracruz (2019), el área de estudio se encuentra en una zona de hundimientos (Figura 6).

En el área de estudio se detectaron 20 depresiones semicirculares, de las cuales se visitaron dos, el resto se determinaron mediante inspección visual de las imágenes satelitales de *Google Earth Pro* y/o con los mapas de sombra ya que para la detección de bordes no lineales estos mapas permiten el realce de los bordes tanto de estructuras semicirculares como las estructuras formadas por los derrames de lavas y lineamientos.

Hubo depresiones que fueron determinadas exclusivamente con la interpretación de las imágenes obtenidas con *Google Earth Pro*, se observó en las depresiones visitadas que los campesinos, agricultores y población en general no eliminan, en ocasiones, la vegetación que crece alrededor y/o dentro de la depresión (Figura 36, Figura 37 y Figura 38). En otros casos, las depresiones están cubiertas por suelo y no crece vegetación circundante, solo la depresión en forma circular y convexa permite determinar su ubicación. Para la verificación a todas, se realizaron perfiles topográficos en varias direcciones con el software *Google Earth Pro* (Figura 37). Las depresiones visitadas en el terreno fueron ubicadas con *Google Earth Pro* y a partir de la forma que ellas tenían en las imágenes satelitales descargadas por este software, se pudo comparar con las depresiones no visitadas que se determinaron en los mapas del relieve sombreado. En los mapas del relieve sombreado o en las imágenes satelitales se detectaron posibles depresiones semicirculares, que luego de realizar perfiles topográficos, se determinaron que no lo eran. (Figura 37)

Aunque en esta investigación se decide publicar los datos topográficos obtenidos del INEGI (2009, 2013a, 2013b), se decidió optar por los de *Google Earth Pro*, en la práctica demostró que los datos de este último se acercaban más a la realidad (Figura 38 y Tabla 9). En perfil topográfico realizado en *Google Earth Pro* a la depresión CP01 con dirección NE – SO (Figura 38 a) se evidencia la presencia de una depresión. En el perfil topográfico obtenido a partir del MDE del *LIDAR* de la carta E14B27D1 del INEGI (2009) de la misma depresión (Figura 38 b) aparece un relieve positivo dentro de la depresión, posiblemente corresponde a la vegetación dentro de la misma. Es la misma línea de perfil para ambos casos.

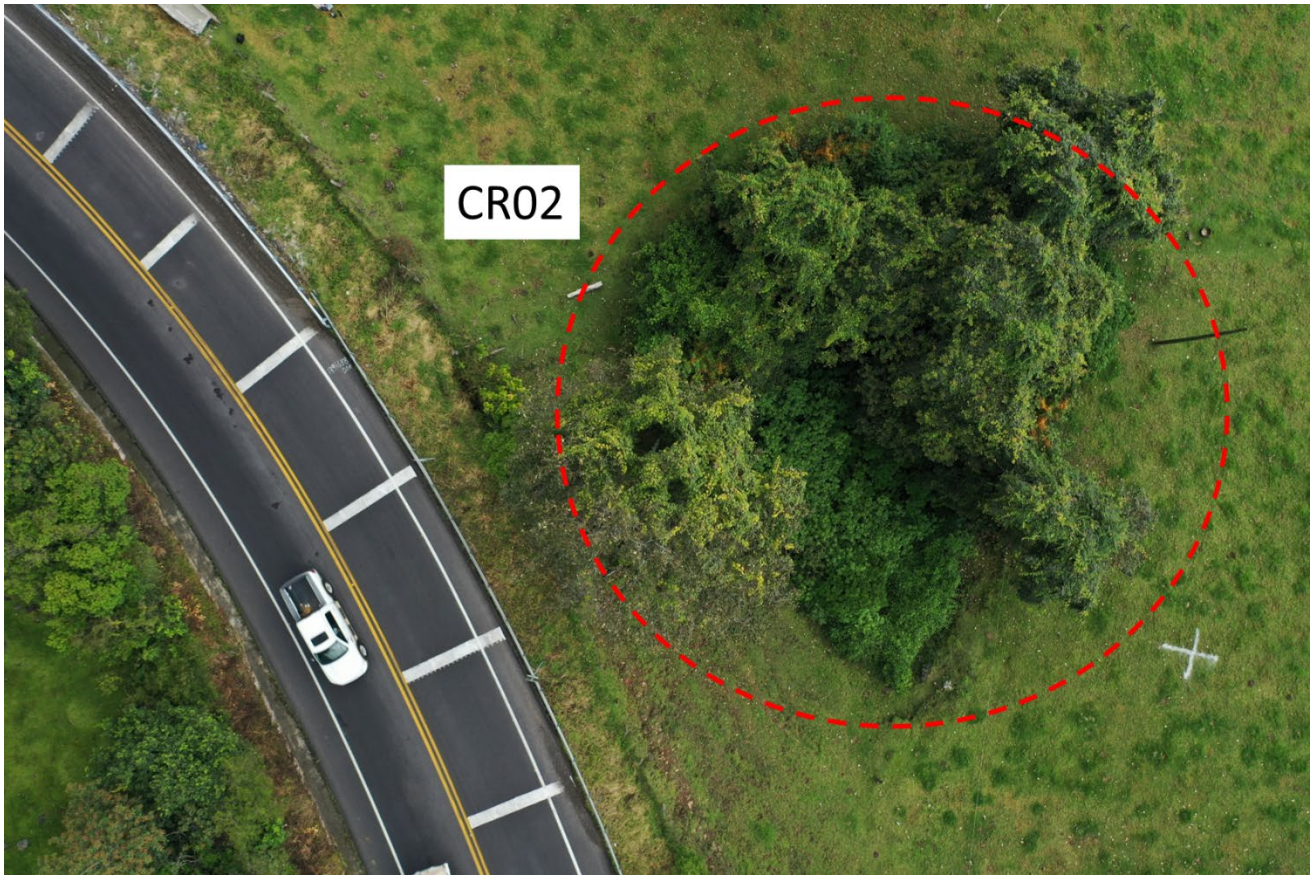


Figura 36. Depresión semicircular CR02 cubierta por vegetación. Obsérvese la depresión a menos de 5 m de la carretera Puebla – Xalapa. Imagen tomada con un dron DJI Mavic 2 Pro.

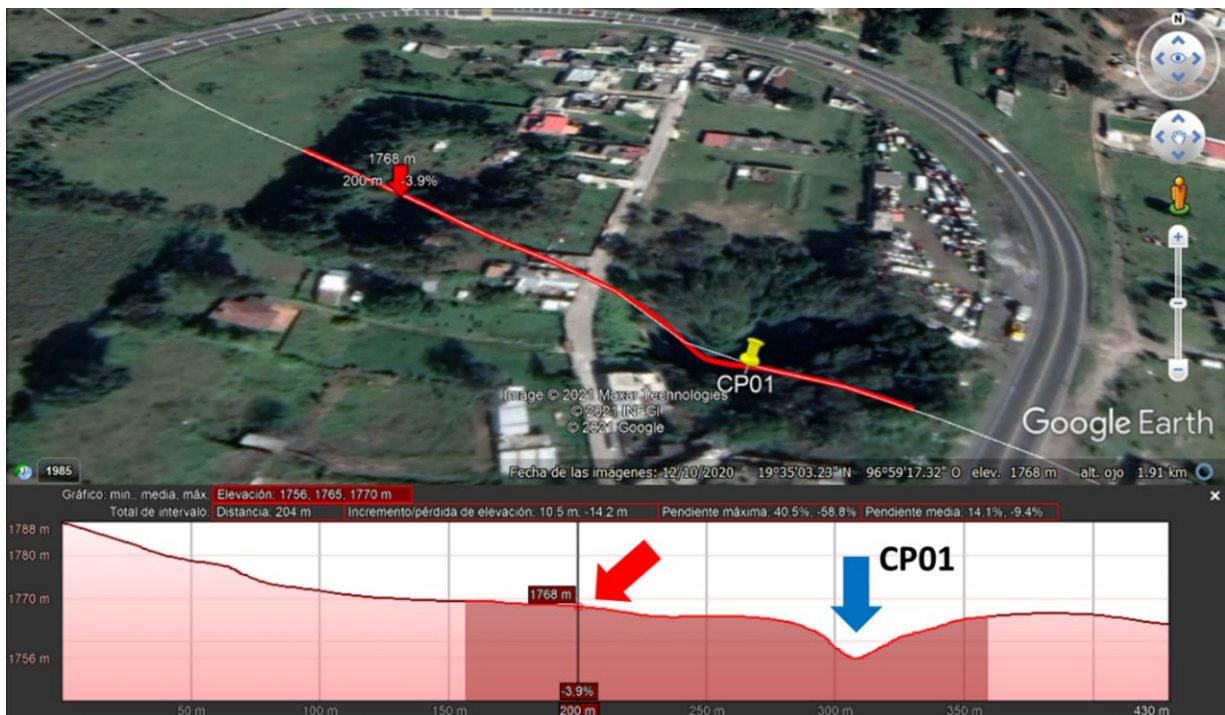


Figura 37. Perfil topográfico realizado en Google Earth Pro a la depresión CP01. La flecha roja muestra un área, en el terreno y en el perfil, con las características morfológicas y de vegetación circundante parecida a la CP01, en cambio, el perfil topográfico demuestra la no existencia de una depresión en la misma. Fecha de la imagen: 12 de diciembre de 2020.

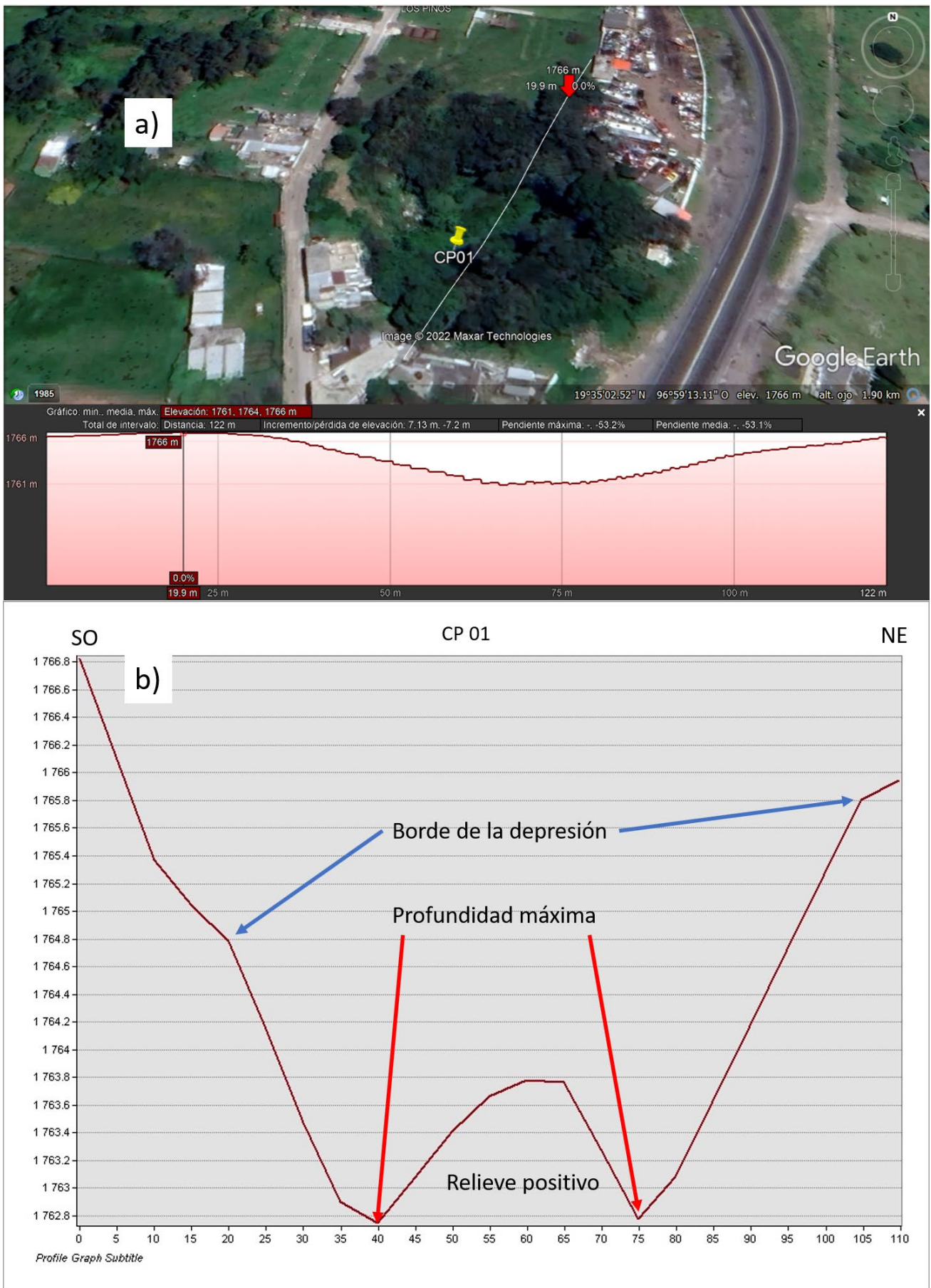


Figura 38. Perfil topográfico realizado a la depresión CP01 con dirección NE – SO a) en Google Earth Pro, fecha de la imagen: 12 de diciembre de 2020 b) al MDE del LIDAR del INEGI (2009), en el centro de la depresión aparece un relieve positivo que no corresponde al relieve original.

En un rango entre 0 y 999 m del centro de Cerro del Cajete se observa 1 depresión, entre 1000 y 1999 m se observan 2 depresiones, entre 2000 y 2999 m se observa 1 depresión, entre 3000 y 3999 m se observan 4 depresiones, entre 4000 y 4999 m se observan 11 depresiones y mayor a 5000 m solo 1 depresión, para un promedio de distancia de 3718.2 m. De las 20 depresiones se pudo determinar que 4 son cráteres de explosión freáticas y 2 son *skylight*. Solo una depresión no está cercana a una infraestructura en un radio menor a 400 m. (Tabla 9)

Las depresiones semicirculares CP06, CP10, CP11, CP12 y CP16 se encuentran ubicadas en dirección este del cono de ceniza Cerro del Cajete y la estructura La Joya 06, siguiendo la dirección del flujo de lava. Las depresiones CP06, CP10, CP12 y CP16 presentan una distribución casi radial; esta linealidad tiene una dirección preferencial O – E. Estas depresiones se encuentran en las áreas 1, 3 y 4 (Figura 39).

Las depresiones CP03, CP04, CP05, CP15 y CP18 se encuentran ubicadas en la dirección ESE del cono de ceniza Cerro del Cajete y la estructura La Joya 06, siguiendo la dirección del flujo de lava, todas ellas presentan una distribución casi radial. Estas depresiones se encuentran en las áreas 1 y 4 (Figura 39).

Para un estudio más detallado de las depresiones semicirculares se decide concentrarlas en 5 áreas. (Figura 40, Figura 41, Figura 42, Figura 43 y Figura 44)

Al SE de la estructura La Joya 07 se encuentra el área 5 en la que se encuentra la entrada a Cueva Chica de Rancho Chico y las depresiones CR01, CR02, CP01, CP09, CP13, CP14 y CP17. (Figura 44)

Al oeste del área 5 se encuentra el área 2 con las depresiones CP07 y CP08 las que presentan una distribución casi radial a la estructura La Joya 07, siguiendo la dirección del flujo de lava, con una dirección NNO – SSE. (Figura 41)

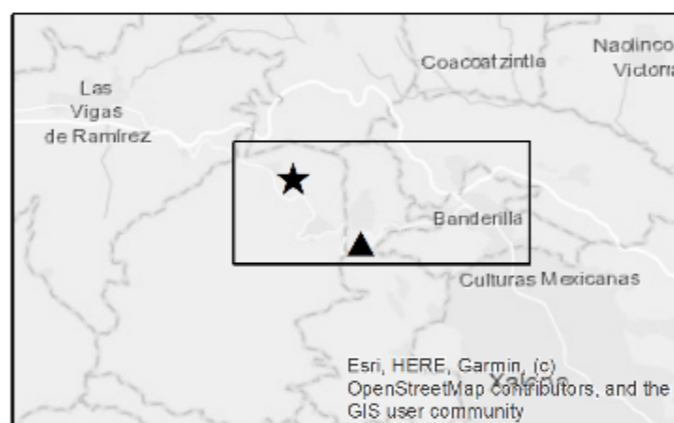
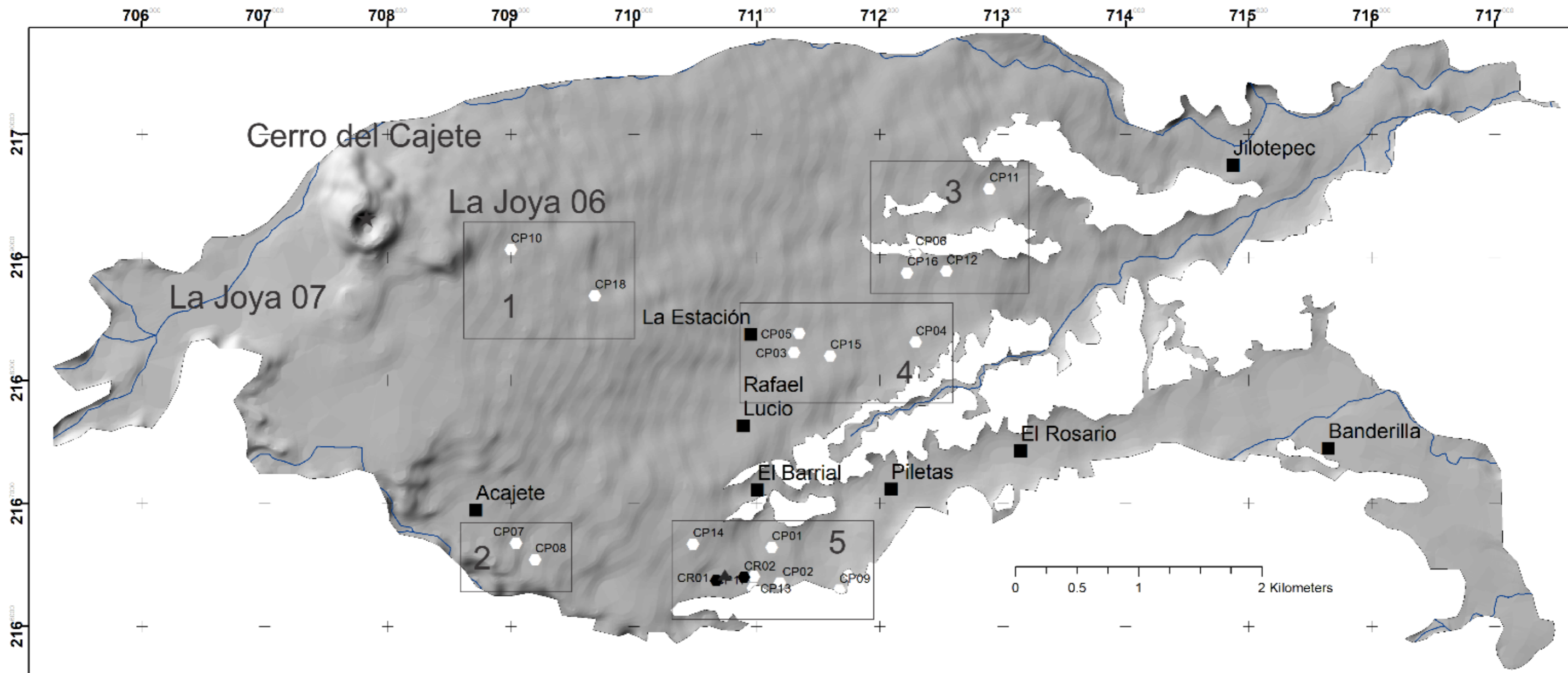
Es importante destacar que los flujos de lava, lineamientos y corrientes de agua siguen una dirección preferencial O – E en la mitad superior del área de estudio.

Tabla 9. Datos morfométricos de las depresiones semicirculares del área de estudio. Las depresiones nombradas por CR## son las visitadas en el terreno y las CP## las determinadas en la interpretación de las imágenes satelitales.

Área	Ds	Coordenadas UTM		En terreno		Google Earth Pro			MDE			Cercanía a infraestructuras	TECMG	Observaciones
		X	Y	∅ (m)	h (m)	∅ (m)	h (m)	S (m)	∅ (m)	h (m)	S (m)			
1	CP10	19°36'20.03" N	97°00'25.05" O	-	-	25	1	1 191	50*	0.2*	1178	OSO 54 m asentamiento y al E 87 m vía férrea	-	Perímetro con vegetación
	CP18	19°36'0787" N	97°00'0287" O	-	-	28	1	1 971	40	0.5	1933	O 124 m y NE 13 m vía de comunicación	-	Cubierta por vegetación. Siguiendo la dirección del flujo de lava, parece no estar relacionada con la depresión CP10
2	CP07	19°35'02.27" N	97°00'25.58" O	-	-	68	2	2 844	35*	0.4*	2859	NO 92 m vía de comunicación y al E 117 m asentamiento	-	Cubierta por vegetación
	CP08	19°34'57.50" N	97°00'20.55" O	-	-	69	1	3 049	20*	0.1*	325	N 86 m asentamiento	-	Cubierta por vegetación. Siguiendo la dirección del flujo de lava, parece estar relacionada con la depresión CP07
3	CP06	19°36'17.90" N	96°58'33.33" O	-	-	136	14	4 501	185	25.5	4454	Adyacente a vía férrea	-	Perímetro con vegetación. Elongada en dirección a CP12
	CP11	19°36'31.55" N	96°58'12.08" O	-	-	141	20	5 145	110	18	5078	Adyacente a un asentamiento y al NE 71 m vía de comunicación	Cráter de explosión freática	Perímetro con vegetación
	CP12	19°36'13.41" N	96°58'25.19" O	-	-	75	4	4 781	68	46	4716	O 113 m vía férrea	Cráter de explosión freática	Cubierta por vegetación. Siguiendo la dirección del flujo de lava, puede estar relacionada con la depresión CP16
	CP16	19°36'13.33" N	96°58'35.40" O	-	-	68	4	4 452	70	4.5	4384	Adyacente a asentamiento y E 200 m vía férrea	-	Perímetro con vegetación
4	CP03	19°35'52.21" N	96°59'07.34" O	-	-	121	10	3 663	101	8	3560	Adyacente a asentamiento y E 88 m vía de comunicación	-	Perímetro con vegetación
	CP04	19°35'54.16" N	96°58'33.27" O	-	-	75	13	4 622	70	15	4567	NNO 77 m vía de comunicación	Cráter de explosión freática**	Cubierta por vegetación. Siguiendo la dirección del flujo de lava, puede estar relacionada con la depresión CP05
	CP05	19°35'57.42" N	96°59'05.31" O	-	-	26	4	3 695	40	3	3624	E 144 m vía de comunicación	-	Perímetro con vegetación

	CP15	19°35'51.55" N	96°58'56.10" O	-	-	35	4	3 973	ND	ND	3913	S 35 m y O 163 m vía de comunicación	-	Suelo. Siguiendo la dirección del flujo de lava, puede estar relacionada con la depresión CP03
5	CR01	19°34'51.92" N	96°59'29.28" O	67	7	73	5	4 070	53	13	4066	Adyacente a asentamientos y vía de comunicación	Cráter de explosión freática**	Cubierta por vegetación
	CR02	19°35'52.97" N	96°59'22.03" O	18	1.8	21	2	4 146	50	1.8	4129	Adyacente a vía de comunicación	Skylight	Cubierta por vegetación. Forma parte de Cueva Grande de Rancho Chico
	CP01	19°35'00.85" N	96°59'14.20" O	-	-	74	8	4 231	45	0.2	4133	Adyacente a asentamientos y vía de comunicación	-	Cubierta por vegetación
	CP02	19°34'51.58" N	96°59'12.05" O	-	-	68	4	4 475	50	1.5	4419	Adyacente a vía de comunicación y al NNO 101 m asentamientos	-	Cubierta por vegetación. Siguiendo la dirección del flujo de lava, puede estar relacionada con CR02 y CP17
	CP09	19°34'49.83" N	96°58'55.60" O	-	-	93	11	4 863	68	11	4827	-	-	Cubierta por vegetación
	CP13	19°34'50.11" N	96°59'19.65" O	-	-	7	1	4 326	ND	ND	4275	NNO 140 m vía de comunicación	-	Cubierta por suelo
	CP14	19°35'01.82" N	96°59'36.12" O	-	-	60	4	3 723	64	3	3700	Adyacente y al SE 93 m vía de comunicación	-	Cubierta por vegetación. Siguiendo la dirección del flujo de lava, puede estar relacionada con el tubo maestro de Cueva Chica de Rancho Chico
	CP17	19°34'53.47" N	96°59'19.15" O	-	-	25	1	4 288	ND	ND	4224	NO 66 m y E 103 m vía de comunicación	Skylight	Cubierta por suelo. Forma parte de Cueva Grande de Rancho Chico

Ds: Depresión semicircular; ø: diámetro de la depresión; h: profundidad de la depresión; S: distancia entre la depresión y Cerro de Cajete; TECMG: tipo de estructura por sus características morfológicas y geomorfológicas; * datos tomados del CEM porque no existe los datos *LIDAR* del área donde se encuentra la depresión; ND: no se detecta; ** conversación personal con el Dr. Ramón Espinasa Pereña.



- Depresiones:**
- Cartografiadas en imagen satelital
 - Visitadas
- Símbolos Complementarios:**
- Localidades
 - ★ Cerro del Cajete
 - ▲ Cueva Chica de Rancho Chico

Escala: 1: 31 000
 Elipsoide: GRS80
 Proyección: Universal Transversal de Mercator Zona 14 N
 Datum horizontal: ITRF 92

UNAM
POSGRADO
 Ciencias de la Tierra

Tesis de Maestría
 Alumno: Ing. Alain Fonseca Montero
 Asesor: Dr. Rafael Antonio López Martínez

Figura 39. Mapa de ubicación de las depresiones semicirculares.

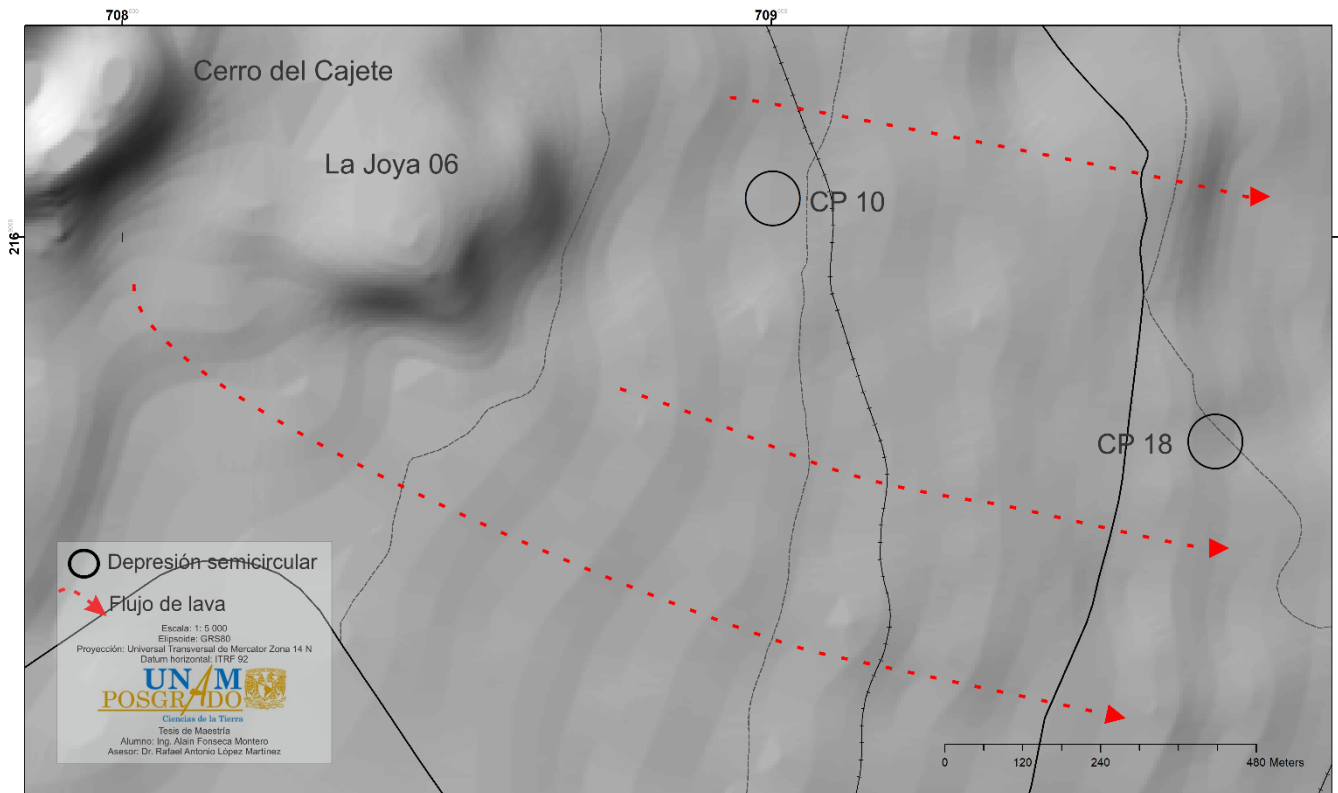


Figura 40. Acercamiento del mapa de ubicación de las depresiones semicirculares; área 1.

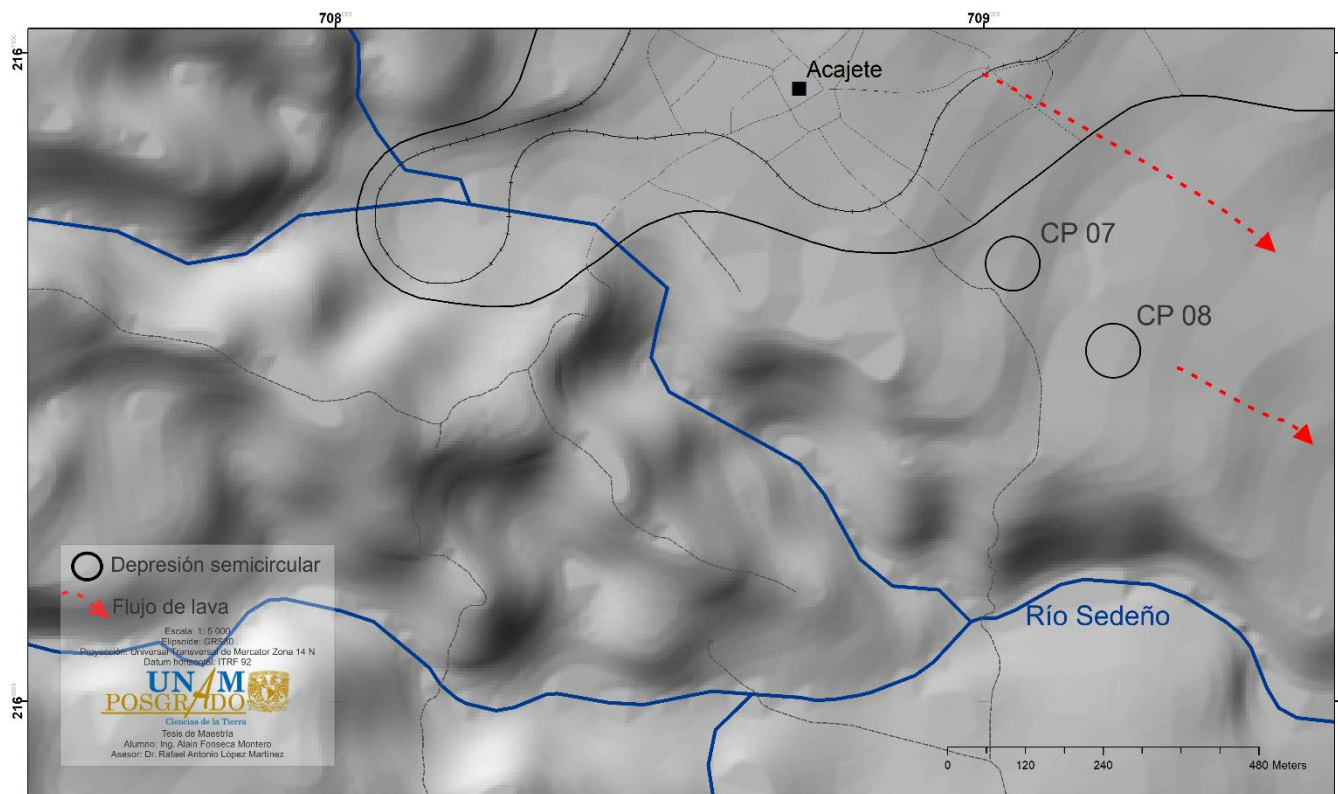


Figura 41. Acercamiento del mapa de ubicación de las depresiones semicirculares; área 2.

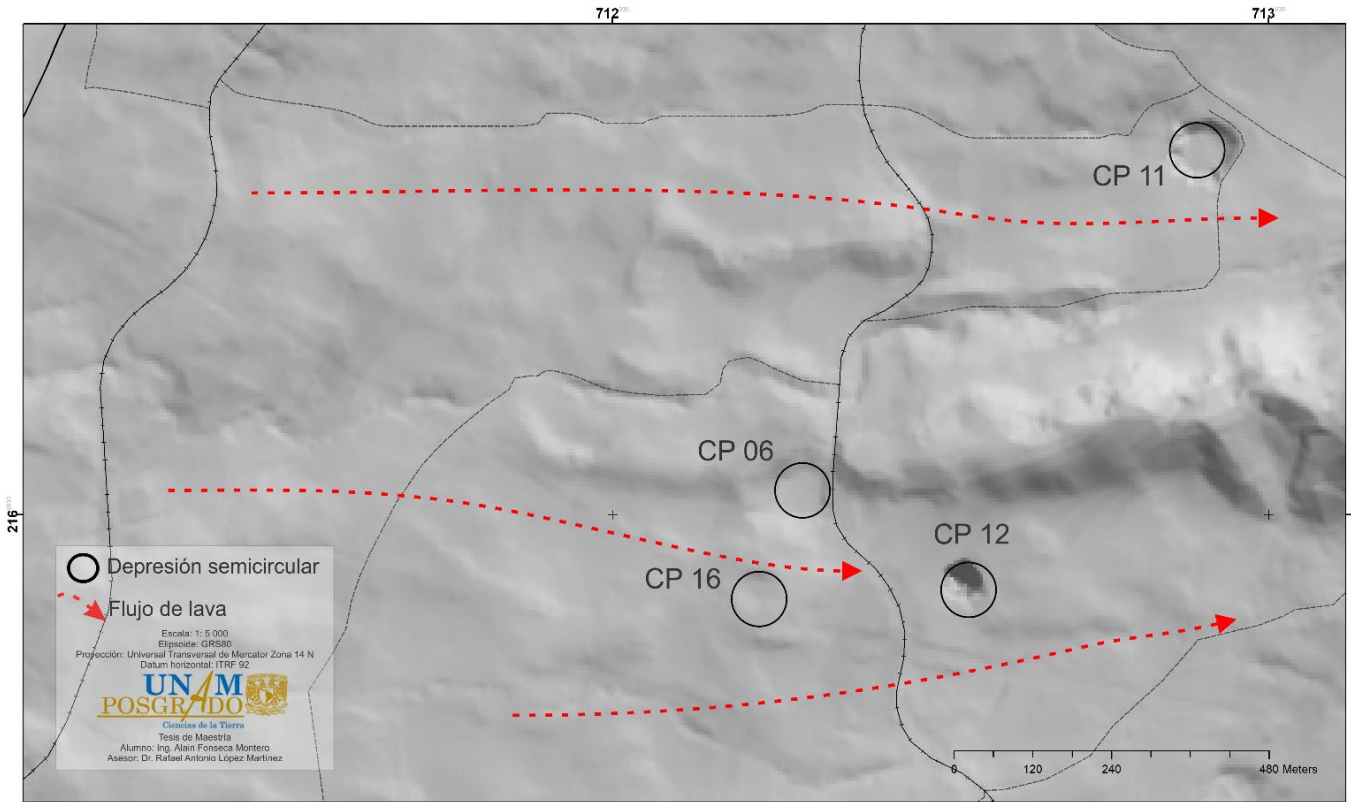


Figura 42. Acercamiento del mapa de ubicación de las depresiones semicirculares; área 3. Modelo sombreado MDE del LIDAR de la carta E14B27D1 (2009); posición de la fuente de luz horizontal 45°.

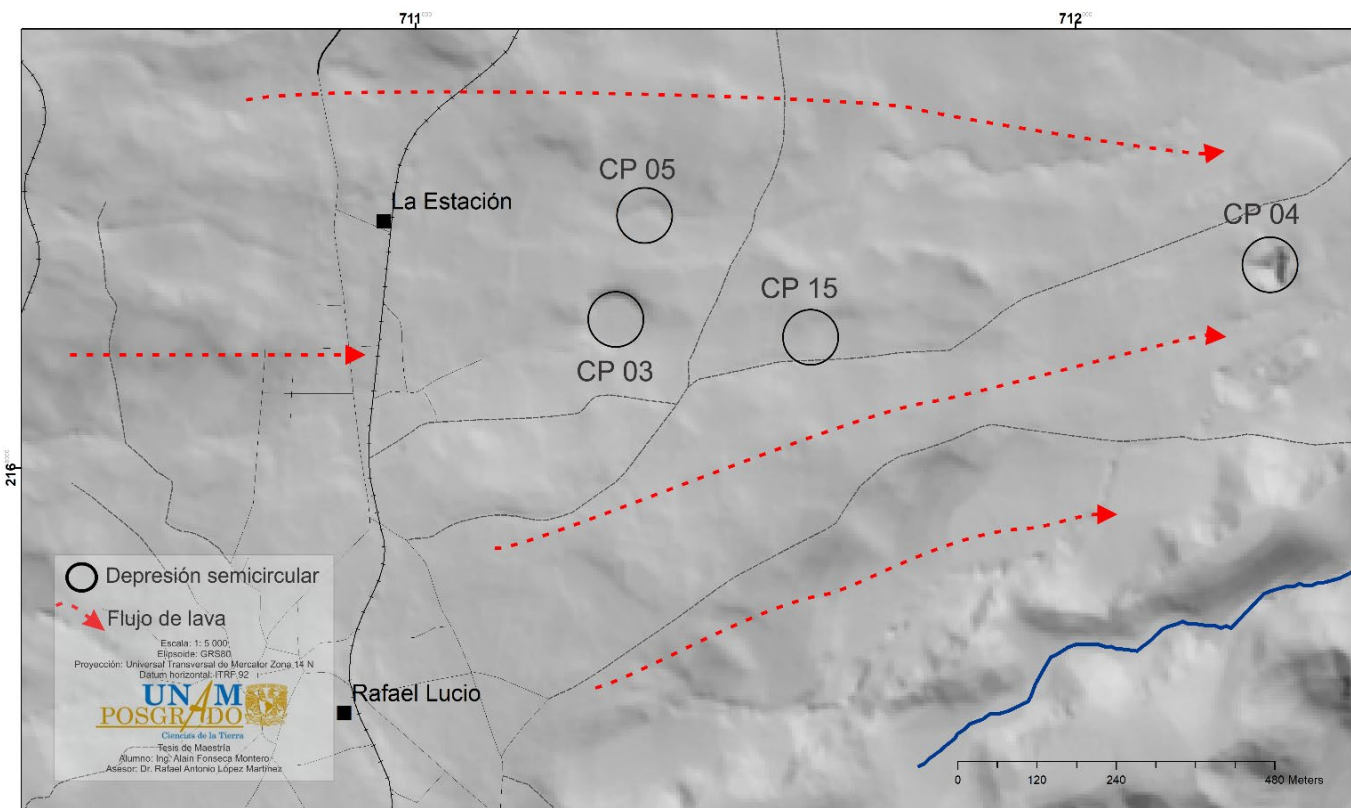


Figura 43. Acercamiento del mapa de ubicación de las depresiones semicirculares; área 4. Modelo sombreado MDE del LIDAR de la carta E14B27D1 (2009); posición de la fuente de luz horizontal 45°.

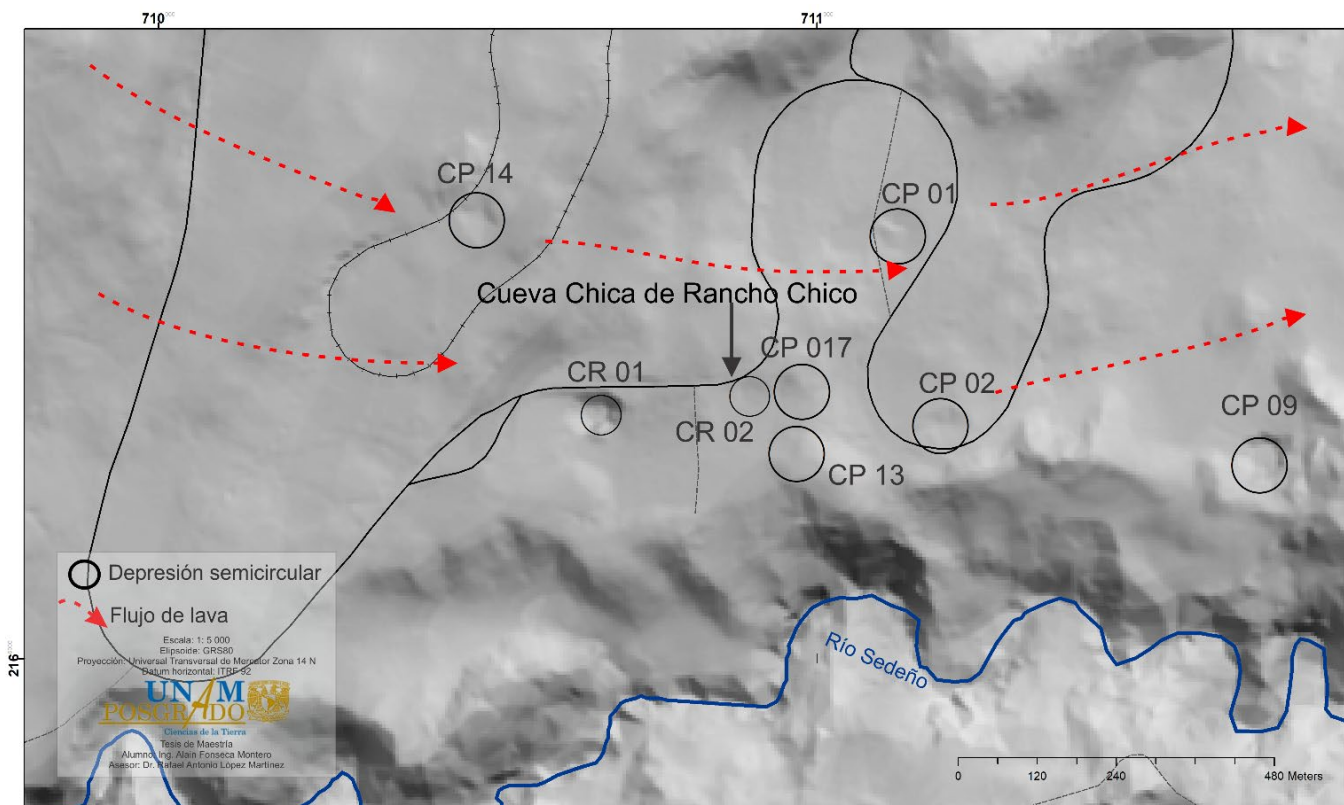


Figura 44. Acercamiento del mapa de ubicación de las depresiones semicirculares; área 5. Modelo sombreado MDE del LIDAR de la carta E14B27D1 (2009); posición de la fuente de luz horizontal 45°

Durante la investigación en campo llovía y en la depresión CR01 se escuchaba la caída de agua y un gran caudal dentro de ella. Esto es un indicio de la presencia de un río subterráneo, esto puede ser posible si forma parte de un tubo de lava (Kempe et al., 2003; Kempe y Werner, 2003; Kiernan y Middleton, 2005; Prouty et al., 2017; Quezadas et al., 2017). De ser cierto, sería de gran importancia para el geoturismo y los estudios hidrológicos en el área de estudio.

Espinasa-Perena y Delgado-Granados (2013) mencionan como peligros relacionados con los eventos que ocurren después de una erupción: la planificación de ciudades y pueblos y sistemas de tuberías, peligros de construcción sobre los tubos de lava, contaminación debida a la liberación de aguas residuales en los sistemas de tubos de lava, con consecuencias para la salud pública y el medio ambiente, en especial a especies que viven en los sistemas volcánicos después de las erupciones.

En conversación personal con los campesinos del área mencionaron que, en la depresión CR02 se vierten las aguas residuales de Rancho Chico desde hace tiempo y no se ha llenado, indicio de la conexión de esta depresión con un tubo de lava.

En ambos casos, el flujo de agua, la no acumulación ni desbordamiento de estas depresiones demuestran un indicio de posible conexión al exterior, posiblemente al río Sedeño que se encuentra a 300 m sur, aproximadamente, de ambas depresiones.

El vertimiento de aguas residuales en las depresiones representa un peligro de contaminación del acuífero al que tributa (Espinasa-Pereña, 2013; Halliday, 2003; Kiernan et al., 2003; Pérez-Quezadas et al., 2017).

Estas depresiones semicirculares no representan un riesgo geológico, pero están asociados, probablemente, a tubos de lava en la región; el hundimiento de los techos de tubos de lava si representa riesgo. En la investigación de campo a Cueva Chica de Rancho Chico, en las viviendas y en la propia carretera Puebla – Xalapa, se detectaban vibraciones fuertes al paso del transporte de alto tonelaje (Figura 45). Se recomienda el estudio con métodos geofísicos en toda el área para determinar la presencia de otros tubos de lava, la profundidad de los mismos y el posible colapso de sus techos.

Díaz et al. (2012) plantea que algunos de los vehículos de alto tonelaje son el camión-remolque y la configuración tipo tracto-semirremolque ambos con 45 t de peso bruto total, las configuraciones de alto tonelaje tipo bitrén corto de 61 t y tipo bitrén largo de 75 t.

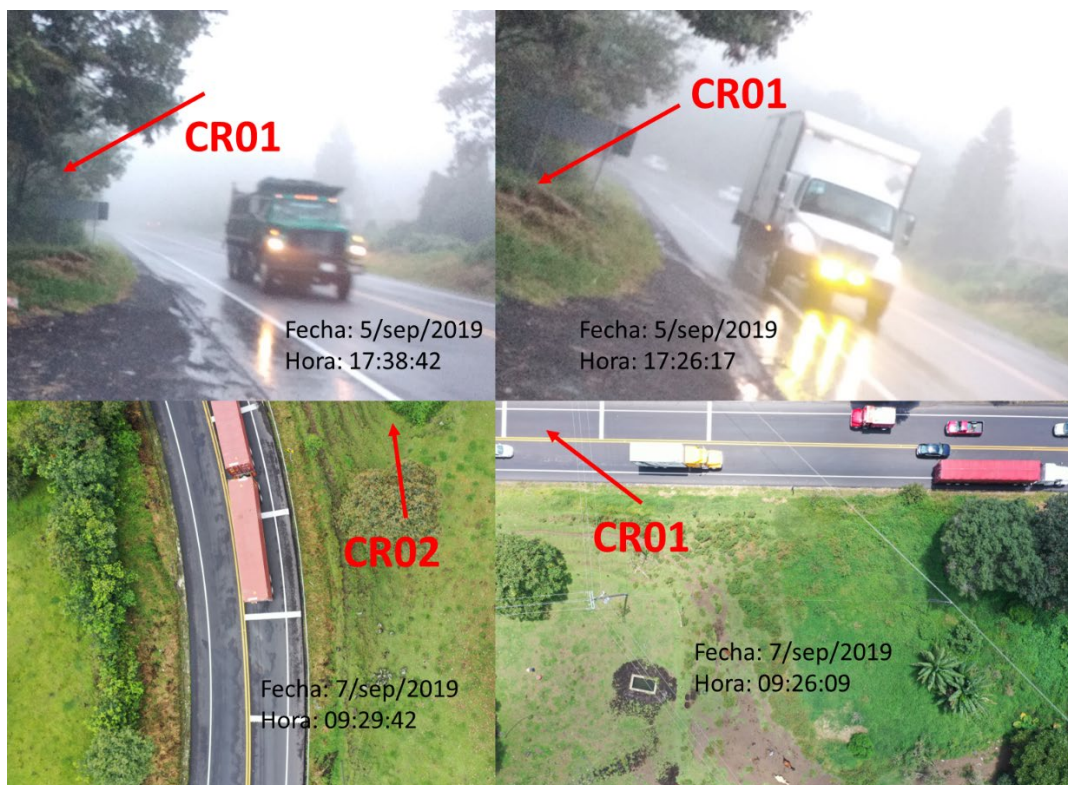


Figura 45. Vehículos de alto tonelaje (camión remolque y tipo bitrén largo) circulando en la carretera Puebla – Xalapa cerca de la depresión CR01 y CR02, durante el trabajo de campo. Las imágenes inferiores fueron tomadas por un dron DJI Mavic 2 Pro.

Los vehículos de alto tonelaje descargan su peso, y todos de forma general, sobre los trenes de rodaje, no es uniforme su carga; por tanto, su carga se encuentra concentrada sobre las ruedas que se están desplazando sobre la carretera y creando vibraciones.

El paso de vehículos de alto tonelaje hace que estructuras artificiales o naturales, como los techos de tubos de lava, pasen de un rango elástico a un rango inelástico, como resultado de la fatiga inducida por el paso de estos vehículos sobre los materiales pétreos rígidos que lo conforman debido a las cargas cíclicas. Mucha vibración en cualquier material puede generar una fatiga acumulada en el material.

Si el grado de rigidez de la estructura es suficiente para soportar las cargas cíclicas, no ocurre dicho evento, pero se desconoce si se realizaron estudios geotécnicos y geofísicos para determinar las características del área y la ubicación de posibles tubos de lava.

Se recomiendan estudios geofísicos, geotécnicos, hidrológicos y espeleológicos para determinar los riesgos geológicos o de contaminación de acuíferos, así como para determinar el uso de estas estructuras con fines geoturísticos.

4. Relieve tectónico

En este apartado se hace referencia a la actividad endógena que rompe y desplaza porciones de la corteza terrestre ya sea en sentido vertical, horizontal o bien en un movimiento conjugado.

4.1. Lineamientos geológicos

En el área de estudio se detectaron 14 lineamientos geológicos, se observó solo uno en el terreno, el resto de los lineamientos se determinaron empleando técnicas de análisis de imagen (realces espaciales que tienen la capacidad de evidenciar rasgos lineales en diferentes direcciones, y radiométricos) a imágenes multiespectrales. Las direcciones dominantes de lineamientos han sido validadas mediante técnicas de análisis de componentes principales.

En el interior de Cueva Chica de Rancho Chico, se observó un lineamiento geológico, lineamiento "n" (Tabla 10, Figura 21 y Figura 46) con azimut de 87° perteneciente al grupo 2, primer orden, correspondiente a una grieta, ya que los bloques que la conforman no presentan desplazamiento. Se ubica a una distancia de 22.50 m de la entrada de la cueva (Figura 46). Corta transversalmente el tubo anastomosado de dicha cueva y no se apreció continuidad en el tubo maestro. El espesor varía entre 2 y 24 cm. Los mayores espesores se encuentran en el techo de

la cueva, presumiblemente como resultado del desprendimiento de las rocas que formaban el techo, aunque no fueron encontrados vestigios del derrumbe.

Su origen puede que sea resultado de los eventos sísmicos con epicentro ocurridos cerca del área de estudio (Figura 10) u otros de mayor magnitud de los que no se tenga registro. Dicha grieta está cercana a una zona de reptación en superficie y encima de la zona de mineralización de oxihidróxidos de Fe f4; más adelante se discutirá. Es evidente que, la edad de dicha grieta es posterior a la formación de Cueva Chica de Rancho Chico.



Figura 46. Grieta que corta transversalmente al tubo de lava anastomosado en Cueva Chica de Rancho Chico, orientación E – O. Cercana, en superficie, con una zona de reptación y encima de una zona de mineralización de oxihidróxidos de Fe.

La identificación de manera automática de lineamientos geológicos presenta un gran interés en los estudios de riesgos naturales, ya que estos lineamientos son factores condicionantes de los procesos de inestabilidad de ladera. Su identificación en áreas a veces inaccesibles o muy extensas es de importancia para la elaboración de mapas de riesgos. La aplicación de técnicas de tratamiento de imagen permite llevar a cabo dicha identificación de manera rápida y automática. (Rodríguez-Mangas, 2013)

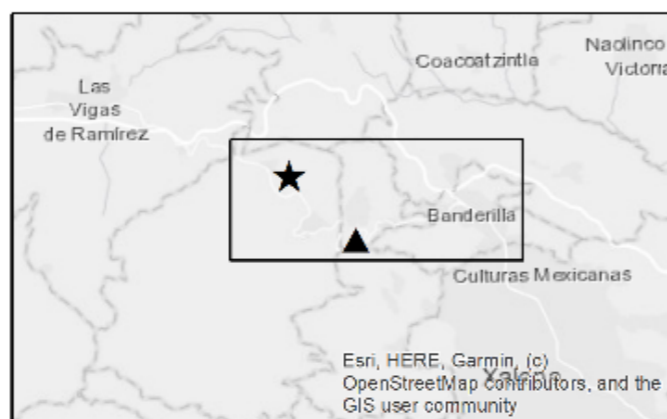
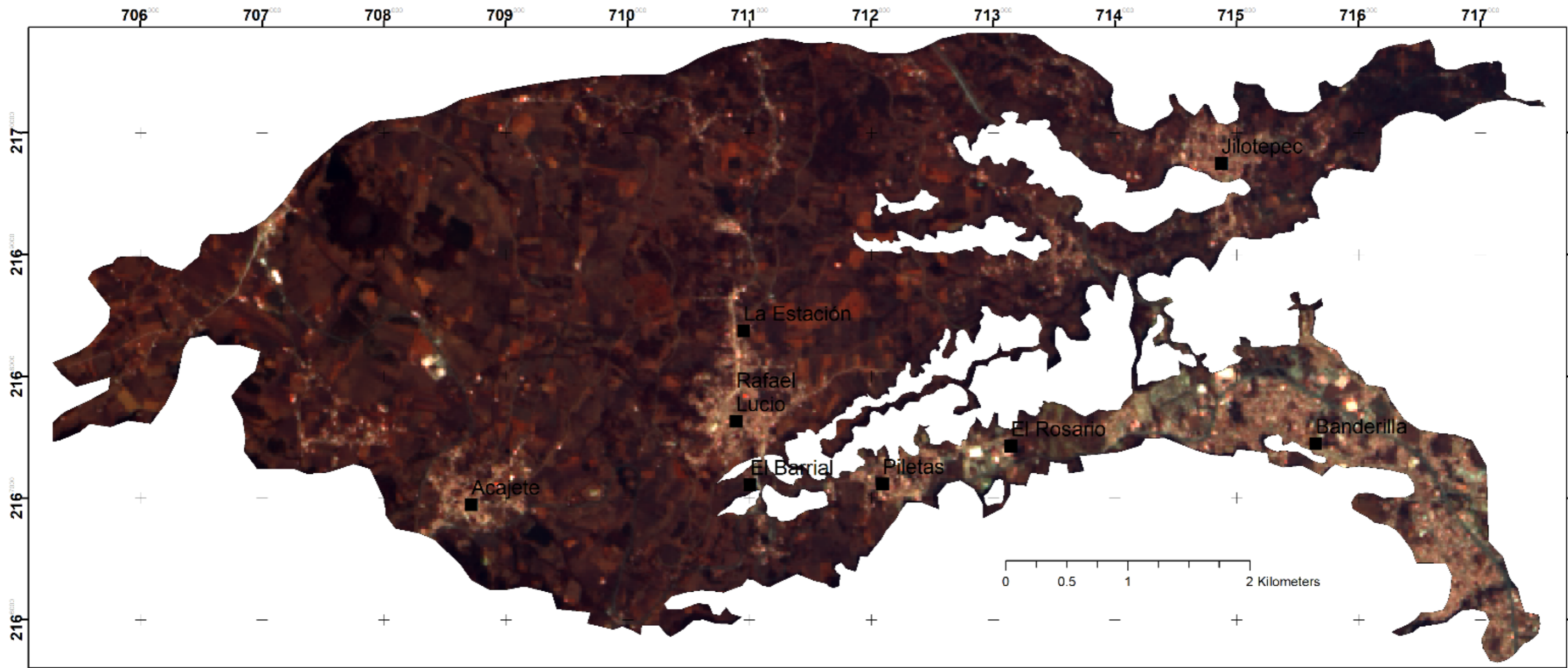
Marchionni y Tessone (2009, p. 2374) proponen que, para la obtención de un mapa de lineamientos geológicos se debe realizar un compuesto en falso color de las bandas de *Landsat* 7, 4 y 1 en RGB (Figura 47), el cual permite la confección de un mapa de lineamientos geológicos (Figura 48).

Para este fin se utilizaron imágenes satelitales de alta resolución *Landsat 8* adquiridas en la página *web* de la Servicio Geológico de Estados Unidos (*USGS*, por sus siglas en inglés) (2020), obtenidas por el sensor OLI y TIRS que constan de nueve bandas espectrales con una resolución espacial de 30 m para las bandas de 1 a 7 y 9. La resolución para la banda 8 (pancromática) es de 15 m. (Ariza, 2013; *USGS*, 2020) . La adquisición de la imagen se realizó el 24 de diciembre de 2019, con una cobertura de nubes de 1.82%. La escala de trabajo para el ingreso de información básica es 1:30 000, para las imágenes satelitales *Landsat 8* (*USGS*, 2020), las cuales son transformadas a la escala 1:15 000 usando el algoritmo *pansharpened* (*USGS*, 2020).

Los lineamientos se clasificaron en tres órdenes. Los lineamientos de primer orden son los más conspicuos de la imagen, normalmente tienen una expresión geomorfológica reconocible en el terreno, corresponden a rasgos de conocida o supuesta significación estructural. Los lineamientos de segundo orden tienen una buena expresión en la imagen, pero no tan clara como los anteriores, suelen ser más cortos, y en muchos casos coinciden con escarpes o cursos de arroyos. Finalmente se consideran como lineamientos de tercer orden aquellos que aparecen de forma muy tenue en la imagen, de interpretación dudosa y desconocido significado geológico, no suelen tener una expresión geomorfológica clara y en muchos casos corresponden a rasgos de vegetación.

En los de primer orden solo se ubica el lineamiento “n” (Tabla 10, Figura 21 y Figura 48), el resto son lineamientos de segundo y tercer orden. Respecto al mapa de lineamientos inicial obtenido, se cartografiaron 19 lineamientos, 14 de ellos reproducibles, entre los que se destacan 4 tendencias principales regionales de direcciones: 62.5°, 93.6°, 105° y 127°. Coincidiendo los grupos 2, 3 y 4 con el sistema NO-SE, el más antiguo de la región.

De los 14 lineamientos descritos, 12 se encuentran en la mitad superior del área de estudio y son los que se encuentran en los grupos de tendencia del 1 al 3. Todo parece indicar que el lineamiento f y g es uno solo (Figura 48).



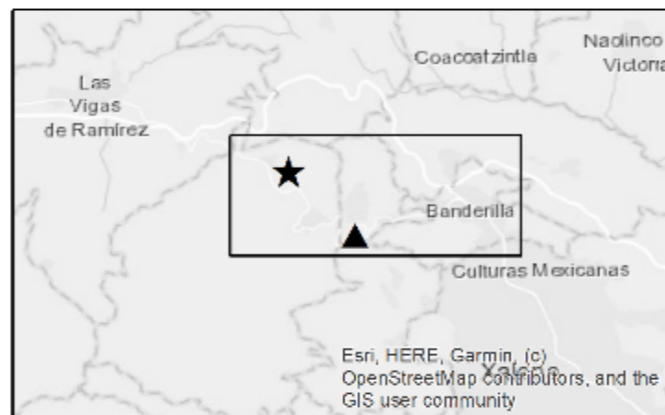
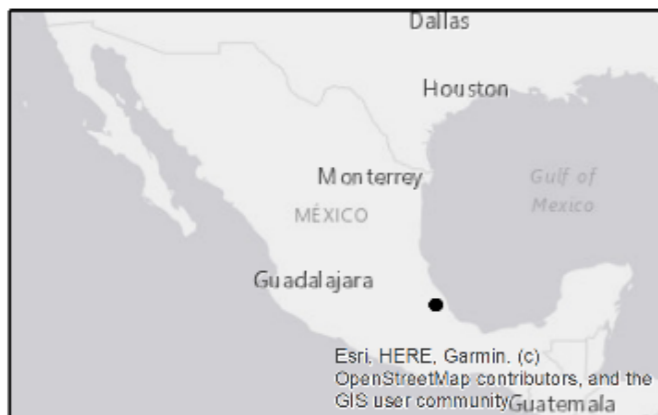
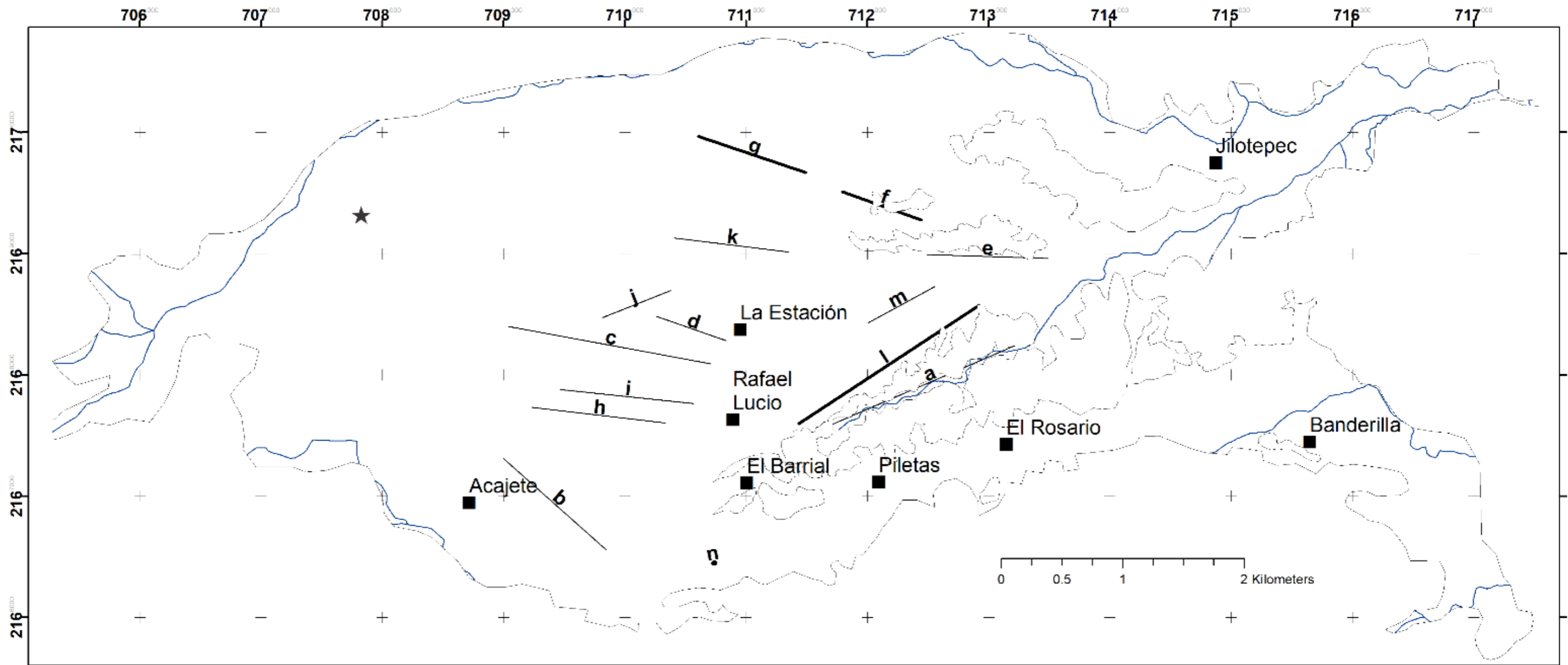
- Símbolos Complementarios:**
- Localidades
 - ★ Cerro del Cajete
 - ▲ Cueva Chica de Rancho Chico

Escala: 1: 31 000
 Elipsoide: GRS80
 Proyección: Universal Transversal de Mercator Zona 14 N
 Datum horizontal: ITRF 92

UNAM
POSGRADO

Ciencias de la Tierra
 Tesis de Maestría
 Alumno: Ing. Alain Fonseca Montero
 Asesor: Dr. Rafael Antonio López Martínez

Figura 47. Compuesto en falso color de las bandas de Landsat 8 (R, G, B) = (7, 4 y 1) con rasgos de lineamientos geológicos del área de estudio.



Lineamientos:
Clasificación:
 — I orden
 — II orden
 — III orden

Símbolos Complementarios:
 ■ Localidades
 ★ Cerro del Cajete
 ▲ Cueva Chica de Rancho Chico

Escala: 1: 31 000
 Elipsoide: GRS80
 Proyección: Universal Transversal de Mercator Zona 14 N
 Datum horizontal: ITRF 92

UNAM
POSGRADO
 Ciencias de la Tierra
 Tesis de Maestría
 Alumno: Ing. Alain Fonseca Montero
 Asesor: Dr. Rafael Antonio López Martínez

Figura 48. Mapa de lineamientos geológicos del área de estudio.

La dirección de los ríos y flujos de agua sigue una dirección preferencial del oeste al este, coincidiendo con otro grupo de lineamientos en esta área, descrito a nivel regional por Mora-González et al. (2015); Morales-Barrera (2009); Rodríguez et al. (2010a).

Morales-Barrera (2009) también propone el empleo de modelos de relieve sombreado para la obtención de lineamientos, en la práctica se identificaron menos lineamientos que con la técnica de análisis de imágenes multiespectrales (Figura 49, Figura 50 y Figura 51). Se observaron *gapfilling* o *gaps*, en ocasiones traducido al español como huecos o ruido digital encontrado en las imágenes satelitales, con orientación diagonal (NON – SES), los cuales influyen de manera negativa en la identificación de lineamientos (Figura 49 b y c; Figura 50 b y c; y Figura 51 a)

Tabla 10. Lineamientos geológicos obtenidos con sus respectivos azimuts y grupos en los que fueron divididas las tendencias principales de los mismos.

Lineamiento	Azimut	Grupo	Clasificación	Grupo	Total de lineamientos	Promedio
a	66°	1	III orden	1	4	62.5°
b	127°	4	III orden	2	5	93.6°
c	101°	3	III orden	3	4	105°
d	101°	3	III orden	4	1	127°
e	91°	2	III orden			
f	110°	3	II orden			
g	108°	3	II orden			
h	97°	2	III orden			
i	96°	2	III orden			
j	67°	1	III orden			
k	97°	2	III orden			
l	57°	1	II orden			
m	60°	1	III orden			
n	87°	2	I orden			
n: lineamiento dentro de Cueva Chica de Rancho Chico						

El vector de iluminación se colocó en 8 posiciones diferentes (Tabla 11), por ejemplo, cuando el vector de iluminación se coloca en posición E – O u O – E, resaltan principalmente los lineamientos N – S y secundariamente los NO y los NE, o cuando la posición es N – S o S – N sobresalen los E – O (Morales-Barrera, 2009). Otro ejemplo, de estructura que resalta mejor en

el área de estudio con el cambio del vector de iluminación son las estructuras formadas por los derrames de lava, en este caso como la dirección de los derrames era dirección O – E, el cambio del vector de iluminación en posición O – E o NO – SE favorece una mejor identificación de dichas estructuras.

Tabla 11. Posición de la luz en la posición vertical y horizontal para la elaboración de los mapas de relieve sombreado.

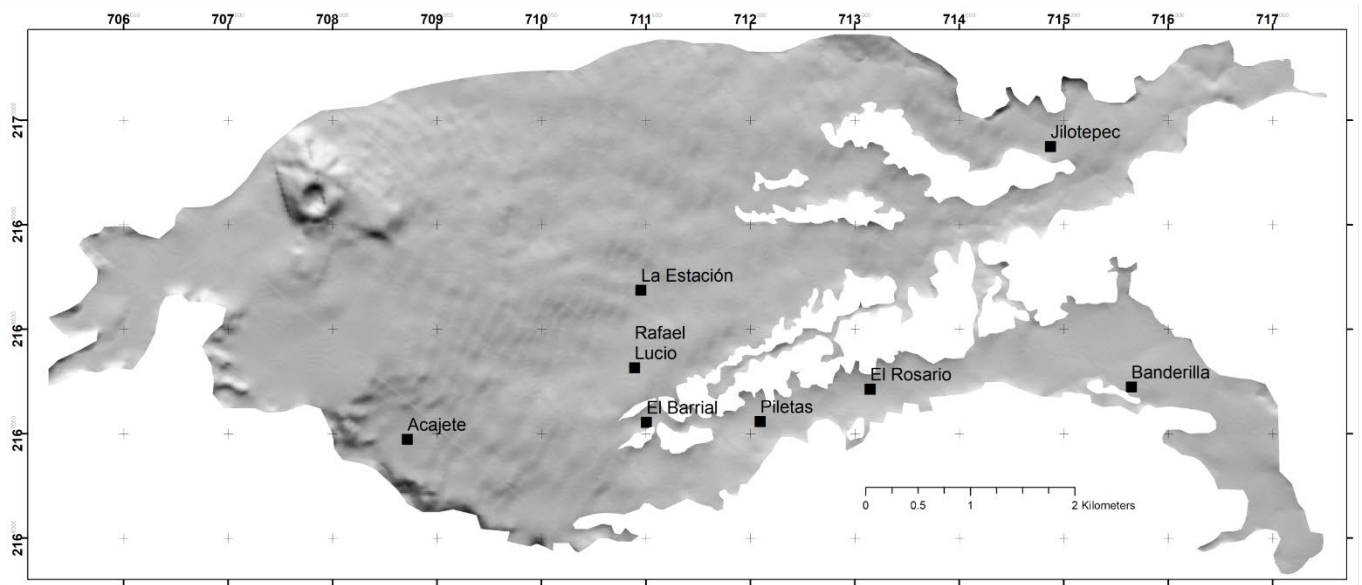
Mapa sombreado	modelo	Posición de la fuente de luz horizontal (azimut solar)	Posición de la fuente de luz vectorial (altitud solar)	Exageración vertical
1		0°	45°	5
2		45°	45°	5
3		90°	45°	5
4		135°	45°	5
5		180°	45°	5
6		225	45°	5
7		270	45°	5
8		315	45°	5

De las diferentes posiciones de dicho vector se determinaron, conjuntamente con la interpretación de criterios geomorfológicos, estructuras correspondientes a los derrames de lava, depresiones semicirculares, geomorfologías asociadas a los conos de lava, escarpes, cambios de pendientes y variaciones altimétricas.

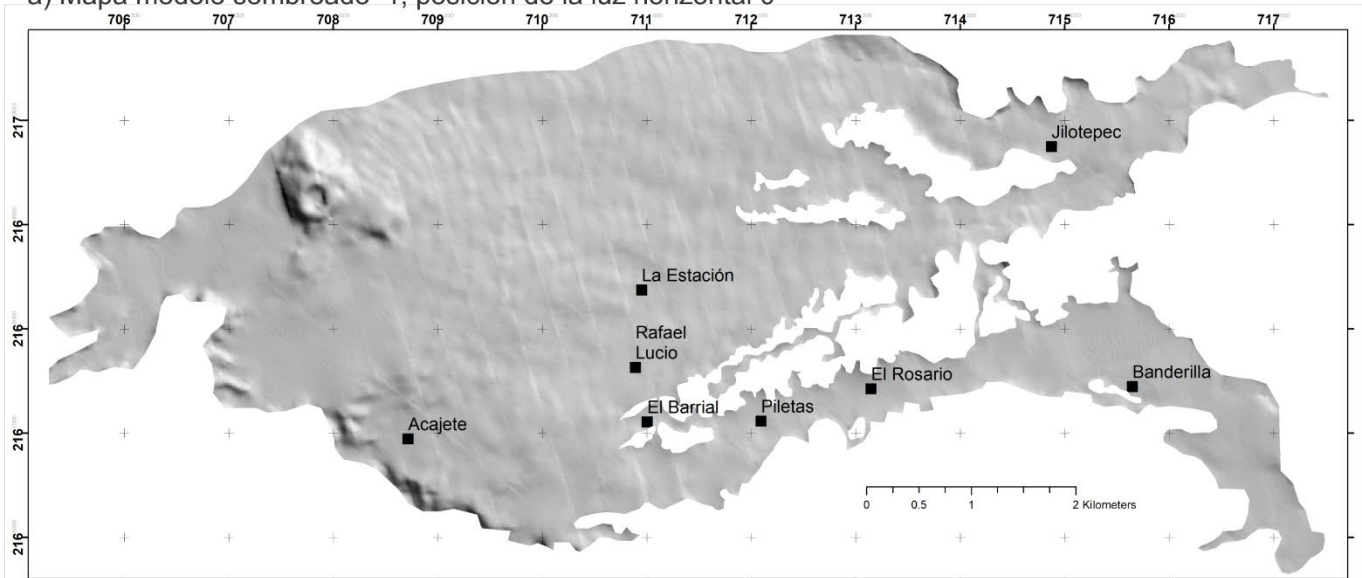
RELIEVE ENDÓGENO MODELADO

Agrupación de formas de relieve de origen endógeno que han perdido sus rasgos primarios por la acción de los procesos exógenos. La morfología que resulta, depende de la susceptibilidad de las rocas al efecto de los distintos agentes de erosión.

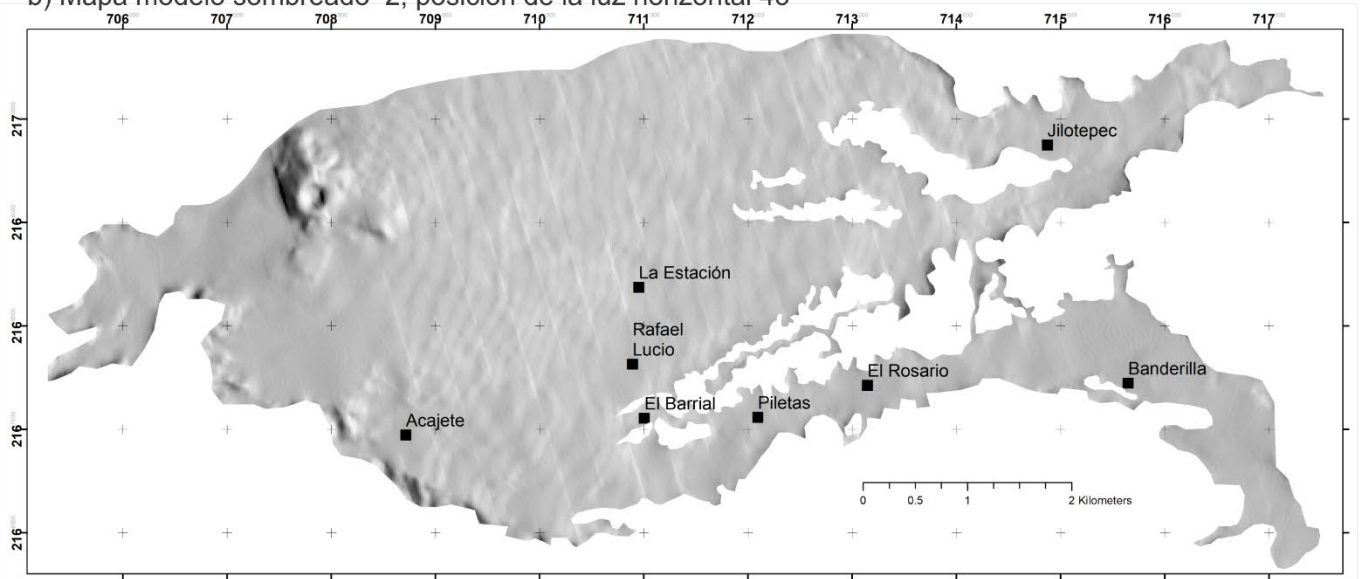
Las unidades que forman parte de este grupo son antiguas estructuras asociadas al Cerro del Cajete y el derrame de lava proveniente de él.



a) Mapa modelo sombreado 1, posición de la luz horizontal 0°

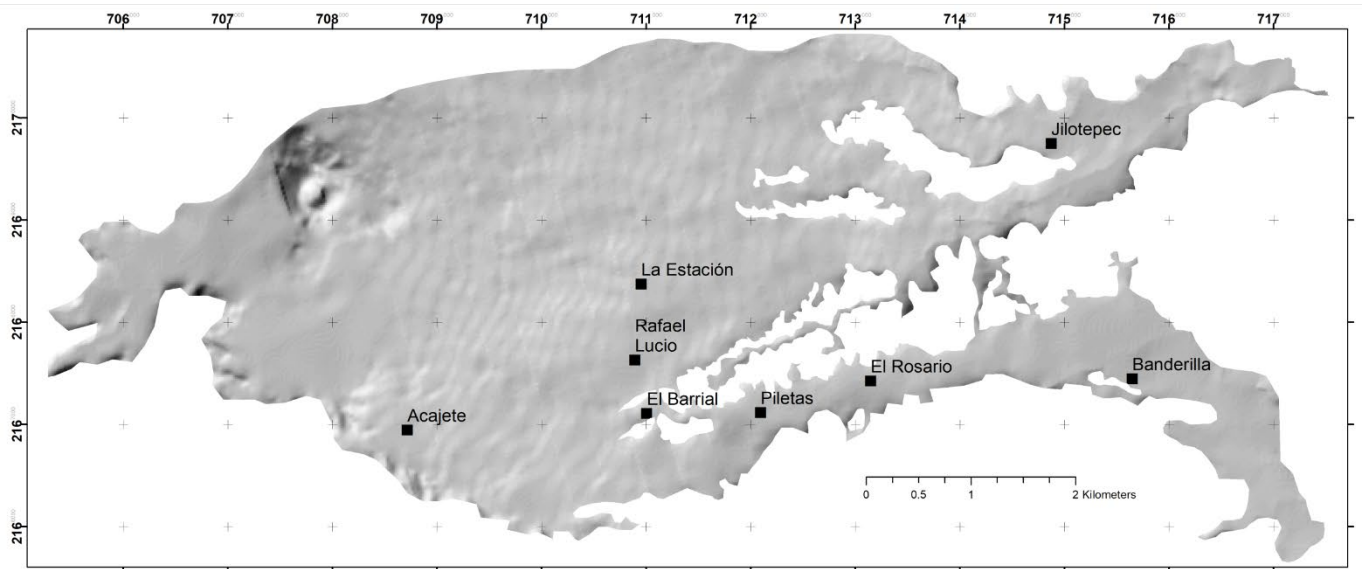


b) Mapa modelo sombreado 2, posición de la luz horizontal 45°

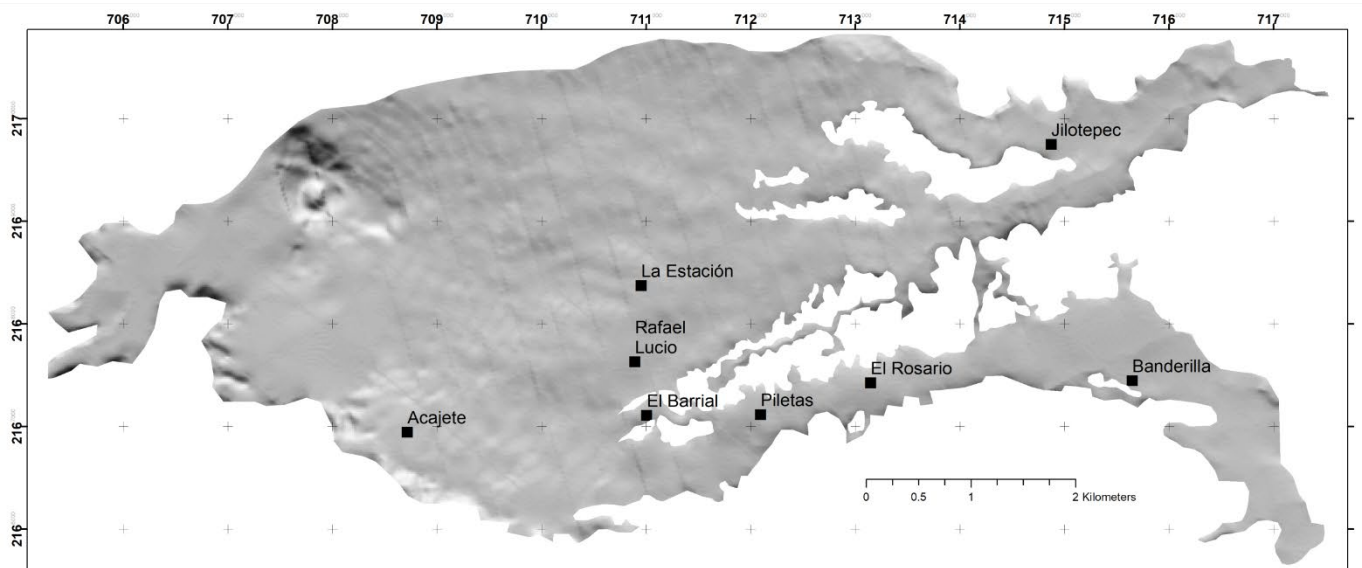


c) Mapa modelo sombreado 3, posición de la luz horizontal 90°

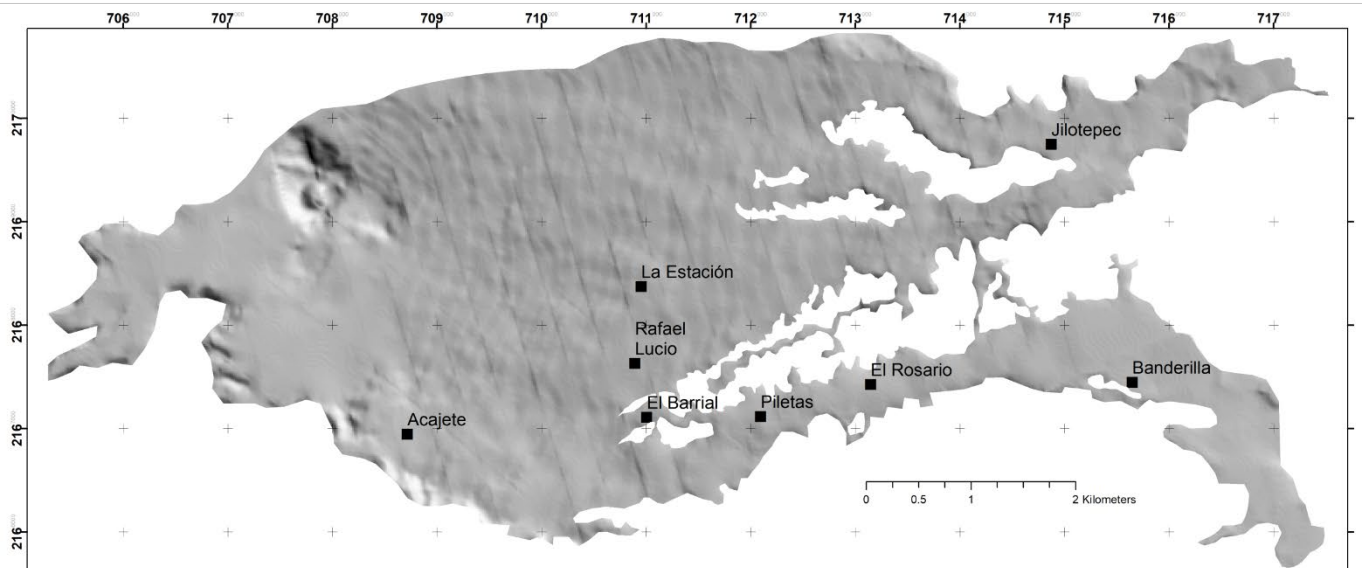
Figura 49. Mapas de relieve sombreado del área de estudio, posición de la luz horizontal de 0° a 90° .



a) Mapa modelo sombreado 4, posición de la luz horizontal 135°

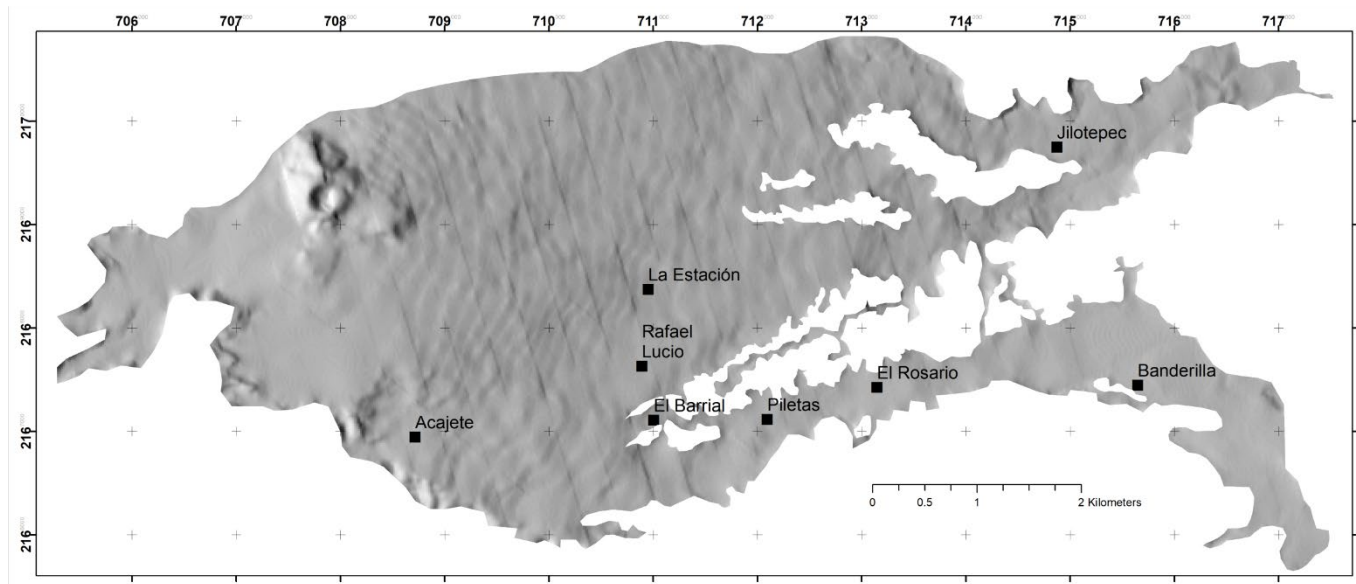


b) Mapa modelo sombreado 5, posición de la luz horizontal 180°

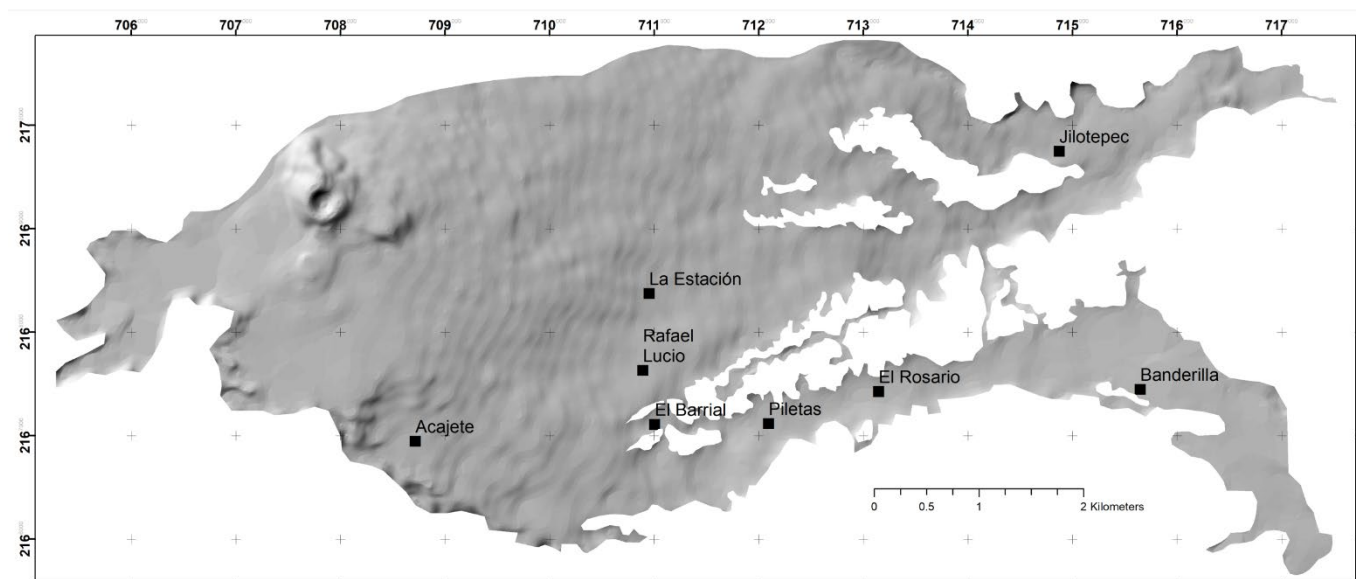


c) Mapa modelo sombreado 6, posición de la luz horizontal 225°

Figura 50. Mapas de relieve sombreado del área de estudio, posición de la luz horizontal de 135° a 225°.



a) Mapa modelo sombreado 7, posición de la luz horizontal 270°



b) Mapa modelo sombreado 8, posición de la luz horizontal 315°

Figura 51. Mapas del relieve sombreado del área de estudio, posición de la luz horizontal de 270° a 315°.

5. Disección vertical por el tipo de roca

Para la obtención de estos rasgos modelados se realizó la intersección de los mapas del área de estudio de disección vertical del paisaje (Figura 14), teniendo en cuenta la clasificación de Priego-Santander et al. (2003, p. 86) (Tabla 2) y el geológico (Figura 4).

Para definir las nuevas capas que se generan se aplican las operaciones de generalización conceptual. La generalización conceptual consiste en otorgar a dos polígonos adyacentes las propiedades y atributos de ambos, eliminando entonces el límite entre ellos y convirtiéndolos en una sola y misma unidad. Esto se puede hacer cuando ambos polígonos comparten características próximas, lo que depende de los objetivos de la investigación y de la

connotación que la generalización tenga en los resultados finales. Implica, por ende, la eliminación del límite entre dos polígonos y la creación de una nueva entidad que conserva las propiedades y atributos de ambos y que es resultado directo de la fusión de ambos polígonos para formar uno nuevo. (Priego-Santander et al., 2003, p. 83)

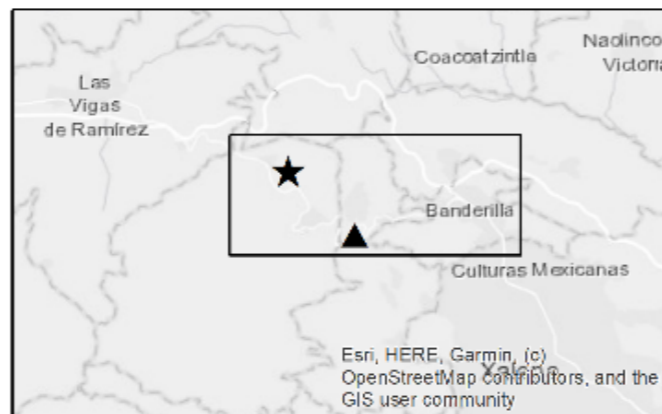
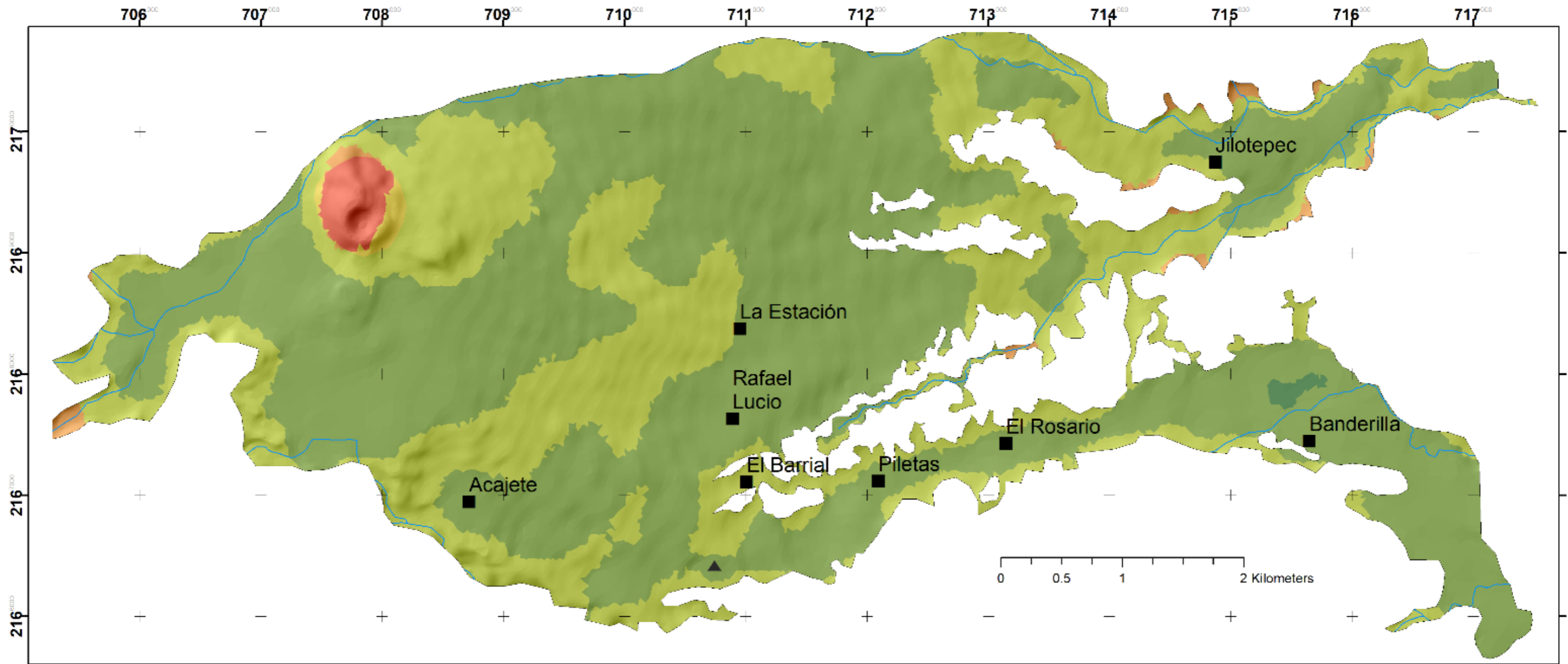
Para completar las operaciones de generalización conceptual se debe utilizar la propuesta de unificación de distintos tipos litológicos según sus propiedades químico-mineralógicas y la expresión resultante en el relieve, en Priego-Santander et al. (2003, p. 86), el cual se simplifica para el área de estudio (Tabla 12)

Tabla 12. Propuesta de unificación de distintos tipos litológicos según sus propiedades químico-mineralógicas y la expresión resultante en el relieve para el área de estudio. Modificado de Priego-Santander et al. (2003, p. 86)

Clase	Grupo	Subgrupo	Nombre	Tipo de roca
Ígneas	Extrusivas	Básicas	Volcánicas básicas	Basalto
				Basalto-Brecha volcánica básica
				Basalto-Toba básica
				Brecha volcánica básica
				Diabasa
				Toba básica
				Toba básica-Brecha volcánica básica
				Arenisca-Toba Básica (CV-S)
				Volcano-Clástico

El resultado final generó las siguientes clases obteniéndose el mapa de disección vertical por el tipo de roca (Figura 52):

- Planicies subhorizontales, constituida por basaltos
- Planicies onduladas de ligera a fuertemente diseccionadas, constituidas por basaltos
- Planicies acolinadas, de ligera a fuertemente diseccionadas, constituidas por basaltos
- Planicies acolinadas, de ligera a fuertemente diseccionadas, constituidas por piroclastos
- Lomeríos, de ligera a medianamente diseccionados, constituidas por basaltos
- Lomeríos, ligeramente diseccionados, constituidos por piroclastos



- Símbolos Complementarios:**
- Localidades
 - ★ Cerro del Cajete
 - ▲ Cueva Chica de Rancho Chico
- Relieve endógeno modelado:**
- Planicies subhorizontales, constituida por basaltos
 - Planicies onduladas de ligera a fuertemente diseccionadas, constituidas por basaltos
 - Planicies acolinadas, de ligera a fuertemente diseccionadas, constituidas por basaltos
 - Planicies acolinadas, de ligera a fuertemente diseccionadas, constituidas por piroclastos
 - Lomeríos, de ligera a medianamente diseccionados, constituidas por basaltos
 - Lomeríos, ligeramente diseccionados, constituidos por piroclastos

Escala: 1: 31 000
 Elipsoide: GRS80
 Proyección: Universal Transversal de Mercator Zona 14 N
 Datum horizontal: ITRF 92

UNAM
POSGRADO

Ciencias de la Tierra
 Tesis de Maestría
 Alumno: Ing. Alain Fonseca Montero
 Asesor: Dr. Rafael Antonio López Martínez

Figura 52. Mapa de disección vertical por el tipo de roca del área de estudio.

RELIEVE EXÓGENO

Esta categoría agrupa formas resultado de la acción de procesos exógenos. Los procesos exógenos en terrenos volcánicos son controlados por la litología, estructura, pendiente y condiciones climáticas locales. Los materiales más susceptibles a la erosión son los depósitos piroclásticos, poco cementados. Un caso contrario sucede con los flujos de lava, en donde la meteorización tiene un mayor desarrollo en las fracturas (de enfriamiento), que inicia a partir de una concentración de humedad e infiltración de agua de lluvia.

El origen de estos relieves se vincula con las fuerzas que se generan en la atmósfera y en las capas superiores de la litósfera, así como los procesos antrópicos.

6. Zonas de reptación

La reptación consiste en movimientos muy lentos a extremadamente lentos del suelo subsuperficial sin una superficie de falla definida. Generalmente, el movimiento es de unos pocos centímetros al año y afecta a grandes áreas de terreno. Se les atribuye a las alteraciones climáticas relacionadas con los procesos de humedecimiento y secado en suelos, usualmente, muy blandos o alterados. La reptación puede preceder a movimientos más rápidos como los flujos o deslizamientos. (SEDESOL, 2011a, 2011b, 2011c; Suarez-Diaz, 1998)

La velocidad con que se mueven las laderas varía mucho dependiendo del tipo de movimiento, de la inclinación del terreno y de la cantidad de agua, además de las actividades humanas. (Alcántara-Ayala et al., 2021, p. 15)

En el área de estudio se observaron evidencias de algunos elementos o partes que identifican la presencia de reptaciones de los suelos, según Villacorta et al. (2013, p. 21) son la flexión de los troncos de los árboles, árboles y postes caídos, alineación de las rocas y ondulaciones del suelo. (Figura 53, Figura 54 y Figura 55)

En total se cartografiaron 13 zonas de reptación (Figura 56), de las cuales se visitaron 6 (RR01, RR02, RR03, RR04, RR05 y RR06), para el resto se procedió a ubicar las zonas visitadas en las imágenes satelitales y determinar la morfología que adoptaba el terreno. Posteriormente, se procedió a una búsqueda visual detallada de morfologías similares en toda el área de estudio teniendo como base las fotografías tomadas, el mapa de riesgo por deslizamiento de área de estudio realizado a partir de la clasificación de Lugo-Hubp (1988) (Figura 57), el mapa de pendiente (Figura 12) y las imágenes satelitales (Figura 58). Para un mejor estudio de la situación adyacente y propia de estas 13 zonas de reptación se agruparon en 3 áreas (Figura 59, Figura

60 y Figura 61). Las zonas de reptación visitadas se encuentran en la región centro sur del área de estudio cerca y sobre Cueva Chica de Rancho Chico.



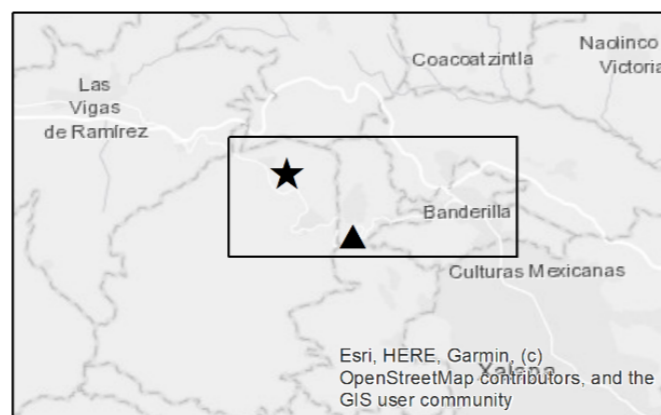
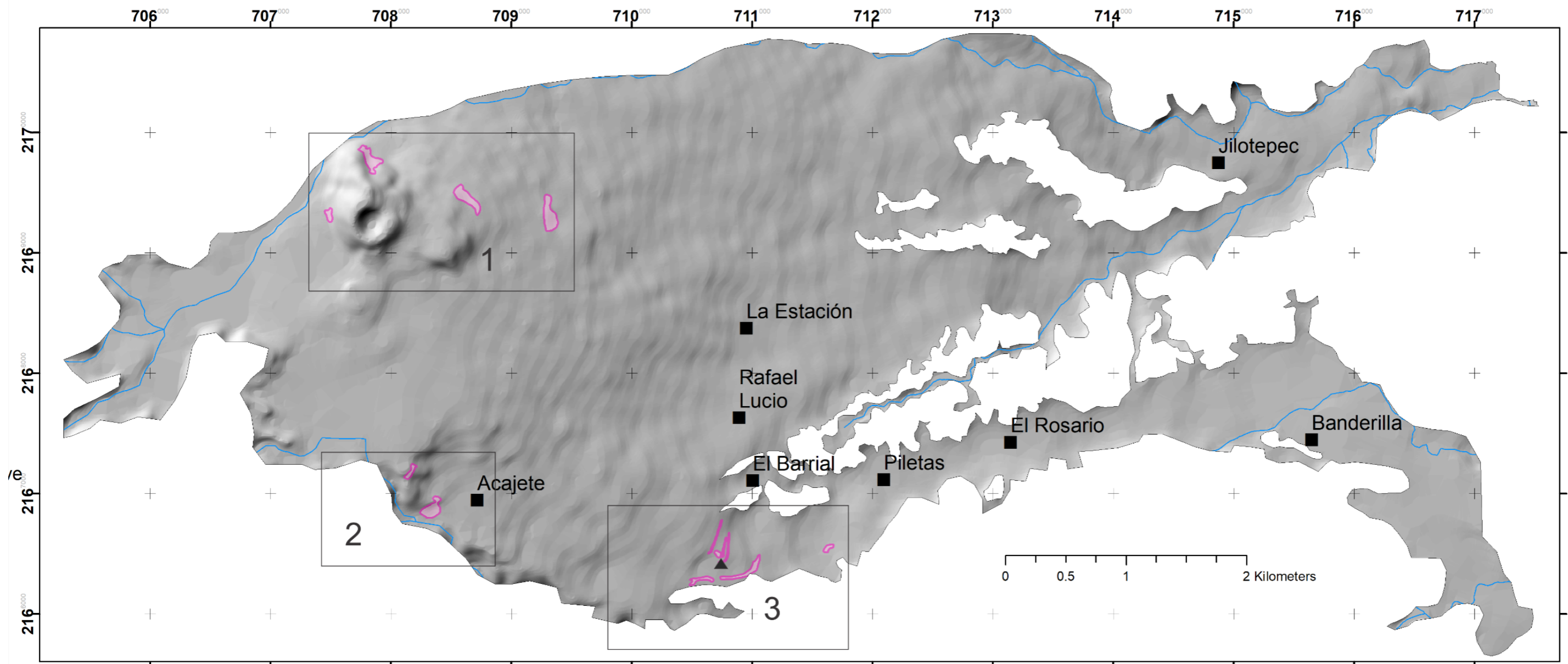
Figura 53. Zona de reptación RR01 que coincide con una zona de bloques caídos del techo dentro de Cueva Chica de Rancho Chico. Obsérvese escalones de la reptación, árboles frondosos y árboles jóvenes curvados en su base o caídos y alineación superficial de bloques de rocas.



Figura 54. Zona de reptación RR02. Obsérvese un árbol torcido cerca de su base y las ondulaciones del suelo.



Figura 55. Zona de reptación RR03. Obsérvese árboles torcidos en la derecha de la imagen y las ondulaciones del suelo en el centro.



- █ Zonas de reptación
Símbolos Complementarios:
 Localidades
 Cerro del Cajete
 Cueva Chica de Rancho Chico

Escala: 1: 31 000
 Elipsoide: GRS80
 Proyección: Universal Transversal de Mercator Zona 14 N
 Datum horizontal: ITRF 92
UNAM
POSGRADO
 Ciencias de la Tierra
 Tesis de Maestría
 Alumno: Ing. Alain Fonseca Montero
 Asesor: Dr. Rafael Antonio López Martínez

Figura 56. Mapa de ubicación de las zonas de reptaciones, subdividido en tres áreas.

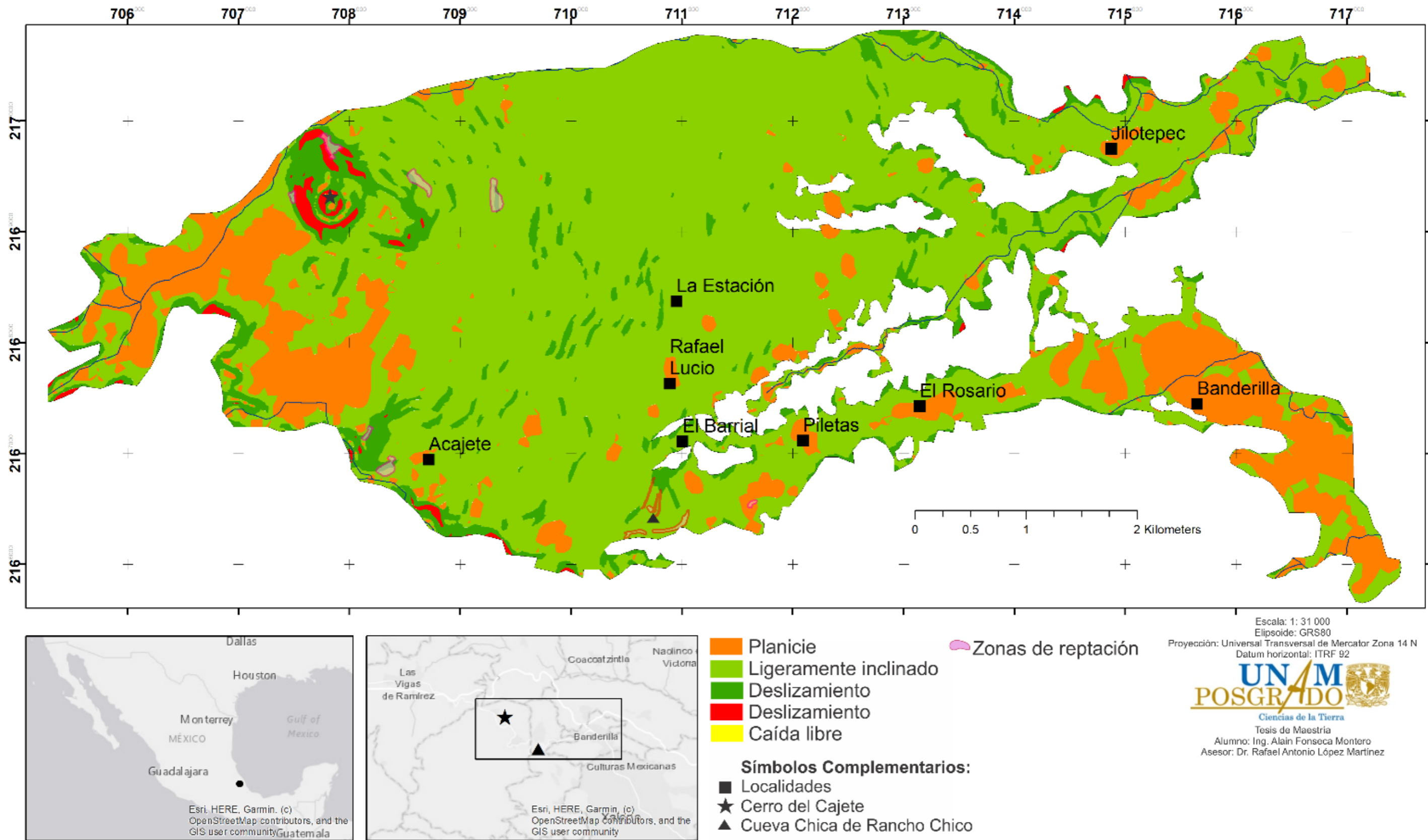


Figura 57. Mapa de riesgo por deslizamiento del área de estudio, realizado a partir de la clasificación de Lugo-Hubp (1988); superpuesto las zonas de reptación.



Figura 58. Zona de reptación RP01 limitada en color amarillo, en la ladera norte del cono de ceniza Cerro del Cajete. Obsérvese en la base de la zona de reptación una vivienda y la línea del ferrocarril y, en la esquina superior derecha de la figura, la localidad La Joya. Imagen satelital descargada de Google Earth Pro. Fecha de la imagen: 12 de diciembre de 2020

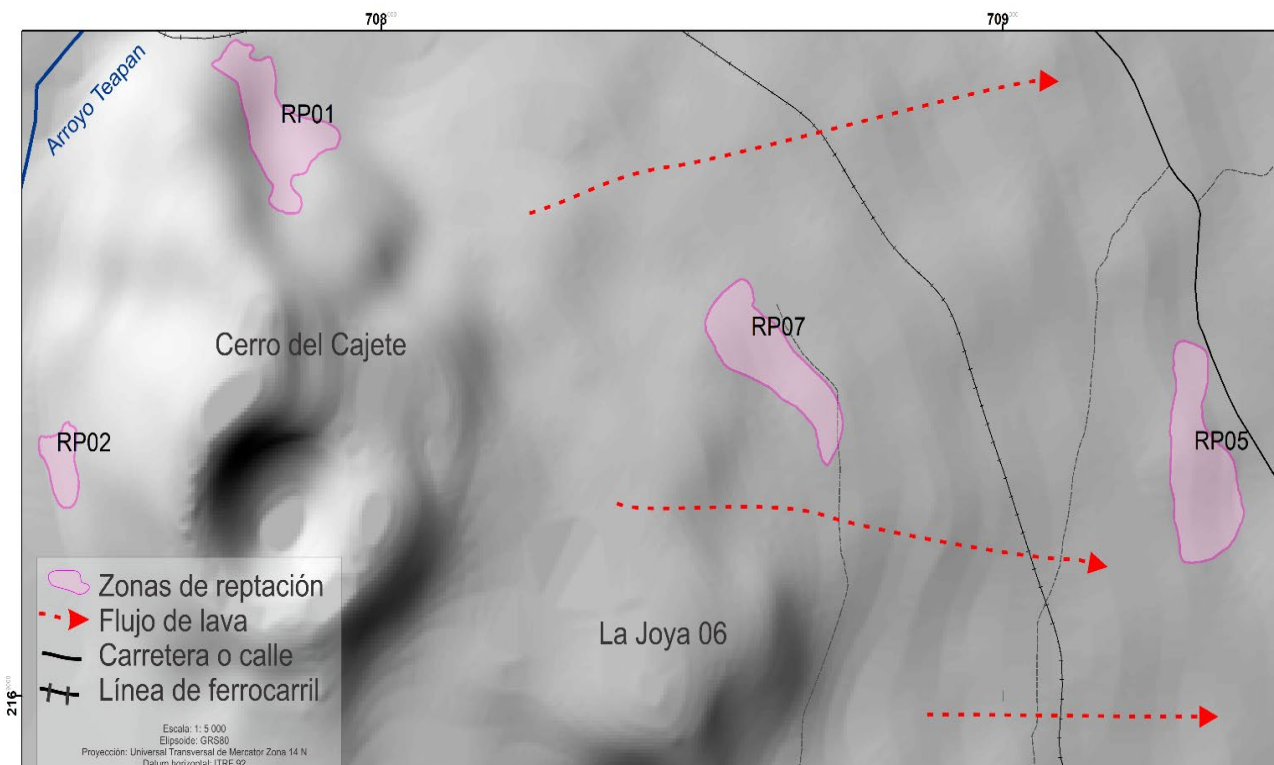


Figura 59. Acercamiento del mapa de ubicación de las zonas de reptación; área 1.

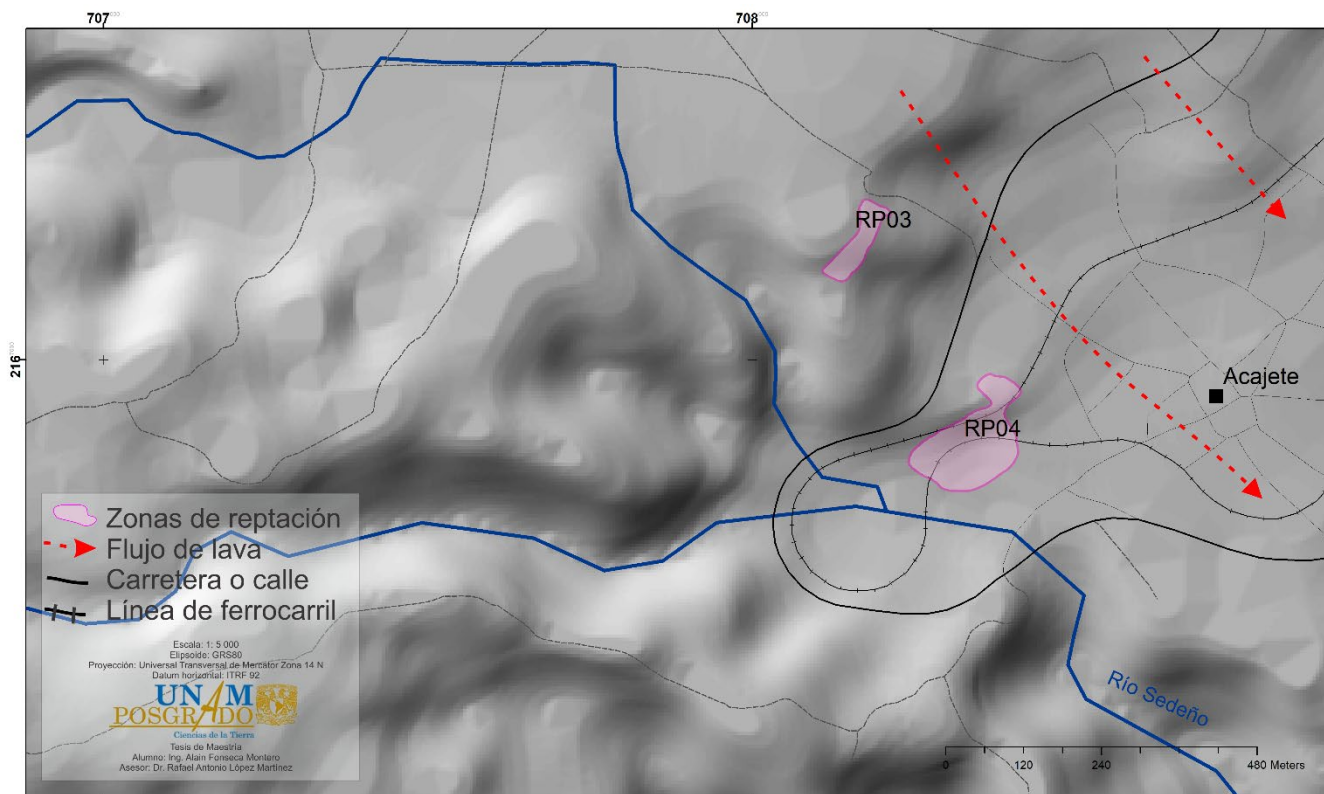


Figura 60. Acercamiento del mapa de ubicación de las zonas de reptación; área 2.

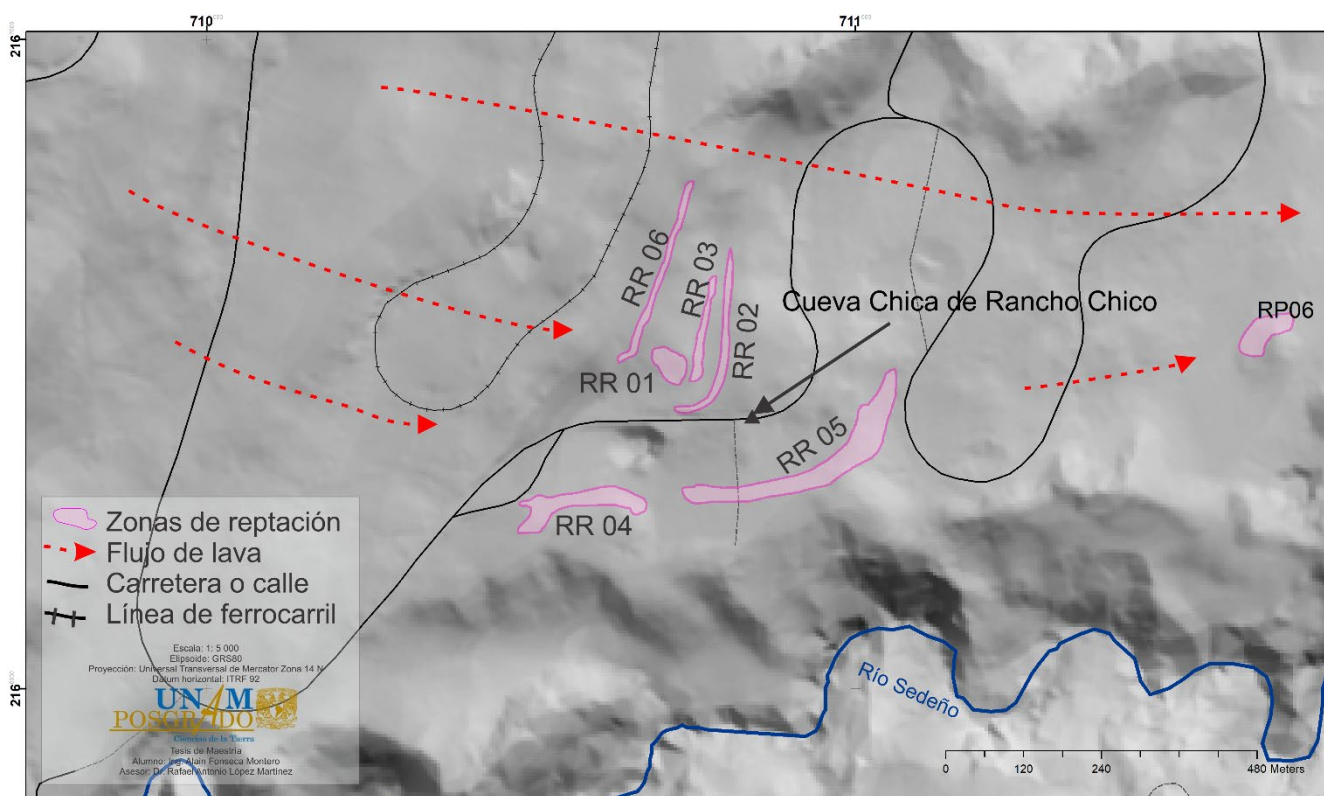


Figura 61. Acercamiento del mapa de ubicación de las zonas de reptación; área 3.

Todos los registros de datos referentes a las zonas de reptación se llevaron a cabo de manera digital en tablas de datos individualizadas para cada conjunto con 4 parámetros morfométricos y fueron determinados a partir de los mapas obtenidos. (Tabla 13)

Se sobrepuso el mapa de ubicación de las zonas de reptación (Figura 56) al mapa de riesgo de deslizamiento del área de estudio, teniendo en cuenta la clasificación de Lugo-Hubp (1988) para determinar si coincidían las zonas de peligro por deslizamiento con las zonas de reptación. (Figura 57)

Existen 5 zonas de reptación que superan los 10 mil m² y corresponden a la zona RR05, RP01, RP04, RP05 y RP08 (Tabla 13). Las tres de mayor área en la región de estudio se encuentran cerca del cono de ceniza Cerro del Cajete: RP05, RP07 y RP01, siendo la más grande la RP05 sucediéndole las otras en el orden dado (Tabla 13). De las 13 zonas de reptación solo una no constituye riesgo.

Entre las causas de formación de zonas de reptación se encuentra la actividad humana y los eventos naturales. Alcántara-Ayala et al. (2021, p. 18) propone como posibles causas por actividad humana las siguientes: 1) Actividades de construcción que involucran cambios en la pendiente natural del terreno y que alteran el régimen natural de escurrimiento del agua superficial y subterránea; 2) Cambios en la pendiente natural del terreno, resultantes de la construcción de terrazas para uso agrícola; 3) Deforestación; y 4) Actividad minera.

Para los casos que se investigan se propone como posible causa antropogénica los cambios en la pendiente natural del terreno para su uso agrícola y la deforestación. Como causas naturales, se propone que sea la saturación del terreno por las lluvias o por cambios volumétricos del terreno o por cualquier otro tipo de fenómeno propio del sitio.

a) Relación entre la zona de reptación y Cueva Chica de Rancho Chico

Al sobreponer las zonas de reptación RR01, RR02, RR03 y RR06 y los límites topográficos de Cueva Chica de Rancho Chico sobre las imágenes satelitales descargadas por *Google Earth Pro*, se observa que Cueva Chica de Rancho Chico se encuentra debajo de estas zonas. Estas zonas de reptación se caracterizan por la presencia de árboles altos como se puede observar en la zona de reptación RR01 (Figura 53) y en las imágenes satelitales del área se observan como la vegetación más oscura (Figura 62).

Tabla 13. Datos morfométricos de las zonas de reptación. Las zonas de reptación nombradas por RR## son las visitadas en el terreno y las RP## las determinadas en la interpretación de las imágenes satelitales.

Área	Zr	Coordenadas UTM		A (m ²)	Rc	α	Cr	Peligro para infraestructuras	Observaciones
		X	Y						
1	RP01	19°36'43.51" N	96°01'05.72" O	17 789	Si	20°	Deslizamiento	Asentamiento en la base y a 8 m una vía férrea.	Son zonas elongadas perpendicularmente a la pendiente y sus movimientos concuerdan con la dirección del flujo de lava
	RP02	19°36'29.07" N	96°01'17.87" O	4 784	No	20°	Deslizamiento	Asentamiento en la base	
	RP05	19°36'28.60" N	96°00'15.44" O	22 781	Si	8°	Deslizamiento	Asentamiento dentro de la zona	
	RP07	19°36'32.74" N	96°00'38.04" O	19 693	Si	8.5°	Deslizamiento	A 17 m de su base un asentamiento y a 210 m una vía férrea	
2	RP03	19°35'19.55" N	96°00'55.35" O	4 691	Si	8°	Deslizamiento	A 156 m de su base una vía de comunicación y a 175 m asentamientos	Son zonas elongadas perpendicularmente a la pendiente y sus movimientos concuerdan con la dirección del flujo de lava
	RP04	19°35'09.55" N	96°00'49.29" O	16 902	Si	12°	Deslizamiento	Vías férreas dentro de la zona y asentamientos a 42 m de su base	
3	RR01	19°34'56.20" N	96°59'28.20" O	2 114	Si	9°	Ligeramente inclinado	Vía de comunicación 62 m	Elongada paralelamente a la pendiente
	RR02	19°34'55.13" N	96°59'25.85" O	3 053	Si	5°	Ligeramente inclinado	Vía de comunicación 14 m	Son zonas elongadas perpendicularmente a la pendiente
	RR03	19°34'57.96" N	96°59'26.54" O	1 838	Si	9°	Ligeramente inclinado	Vía de comunicación 148 m	
	RR04	19°34'49.58" N	96°59'33.16" O	5 636	No	10°	Ligeramente inclinado	Vía de comunicación 90 m	
	RR05	19°34'50.74" N	96°59'20.23" O	12 650	Si	21°	Ligeramente inclinado	Asentamiento a 64 m de su base	
	RR06	19°35'01.19" N	96°59'28.56" O	2 991	Si	9°	Ligeramente inclinado	Asentamiento a 24 m de su base	
	RP06	19°34'57.58" N	96°58'56.99" O	3 082	No	9°	Planicie	-	

Zr: zona de reptación; A: área; Rc: riesgo para vías de comunicación o asentamientos; α: ángulo de la pendiente; Cr: Coincidencia con el mapa de riesgo por deslizamiento.

Al sobreponer el mapa de las zonas de reptación sobre el mapa de Cueva Chica de Rancho Chico (Figura 21) en el que se observan las zonas mineralización (formadas por goteo; Figura 21 y Figura 24), derrumbes y bloques caídos (Figura 63) se observa que: La zona de reptación RR06 y RR01 se encuentran sobre parte de la zona de oxihidróxido f1. La zona de reptación RR03 se encuentra sobre parte de la zona de alofana a2. La zona de reptación RR02 se encuentra sobre la zona de oxihidróxido f3, f6, f7 y la zona de alofana a5. El tubo maestro contiene la mayor cantidad de derrumbes y se encuentran las áreas más grandes de zona de oxihidróxido. (Figura 63)

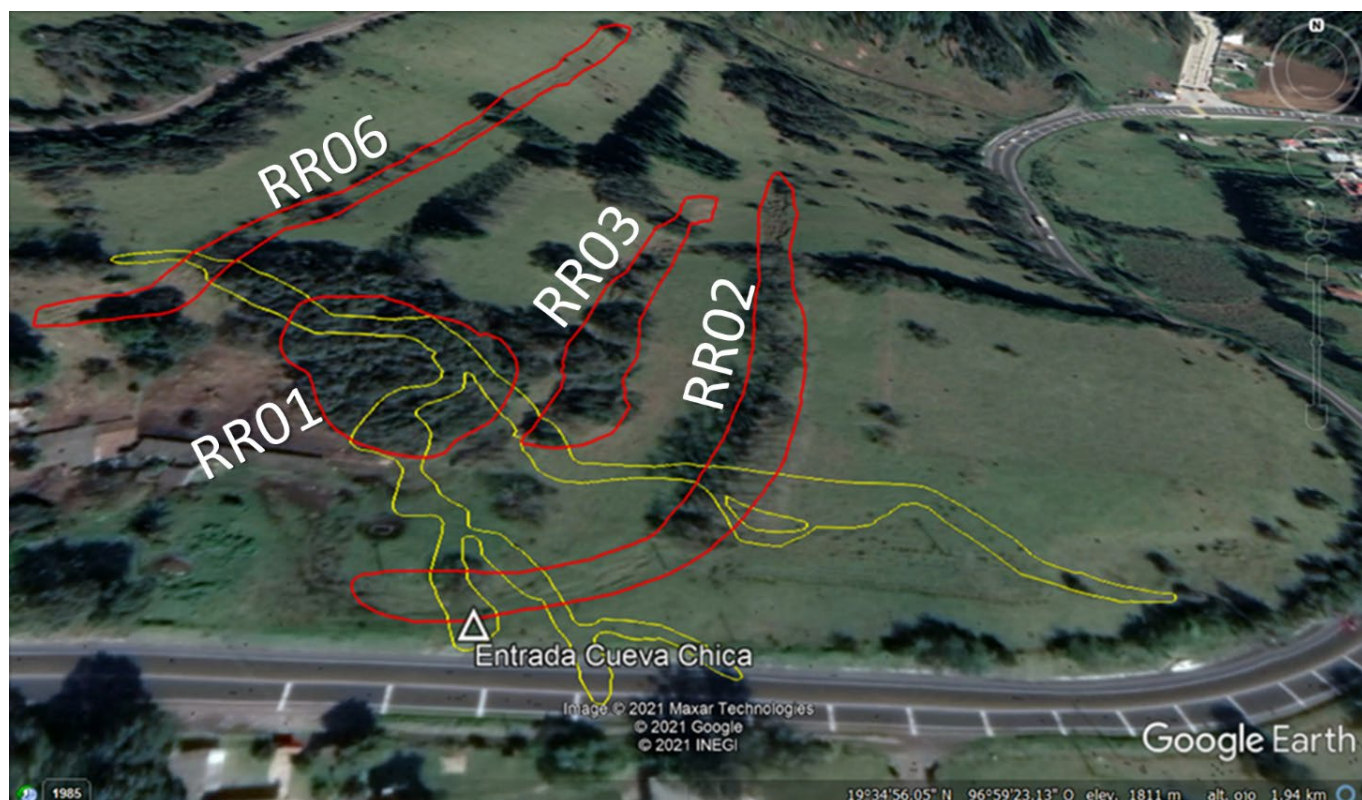


Figura 62. Zonas de reptación observadas en el terreno en color rojo y superpuesta a la topografía de Cueva Chica de Rancho Chico en amarillo. La vegetación más oscura dentro de la zona de reptación son árboles altos. Obsérvese como la parte sur del tubo anastomosado se encuentra por debajo de la carretera Puebla – Xalapa. Imagen satelital descargada de Google Earth Pro. Fecha de la imagen: 12 de diciembre de 2020

En Cueva Chica de Rancho Chico, siguiendo la dirección del flujo de la lava que la originó y el paleorrelieve con una pendiente entre 4° y 9° (Figura 21), se puede identificar que las zonas de mineralización siguen un patrón rítmico. Primero aparece la zona de alofana, luego la zona de oxihidróxido y así sucesivamente por tres veces: se encuentra la zona a1; luego le sigue la zona f1; paralelas y aproximadamente a la misma distancia de f1 se encuentran las zonas a2 y a4; luego f4, f5 y f2; le sigue a5 y a3, aunque entre f5 y f6 y f7 debería de existir una zona de alofana; por último, aparece la zona f3, f6, f7, f8, f9 y f10. (Figura 64)

Estas zonas de mineralización rítmica parecen ser “franjas de mineralización rítmica”. Se subdividen en: FA1 constituido por la zona de mineralización a1; FO1, constituido por f1; FA2, constituido por a2 y a4; FO2, constituido por f2, f4 y f5; FA3, constituido por a3 y a5; y FO3, constituido por f3, f6, f7, f8, f9 y f10. (Figura 64)

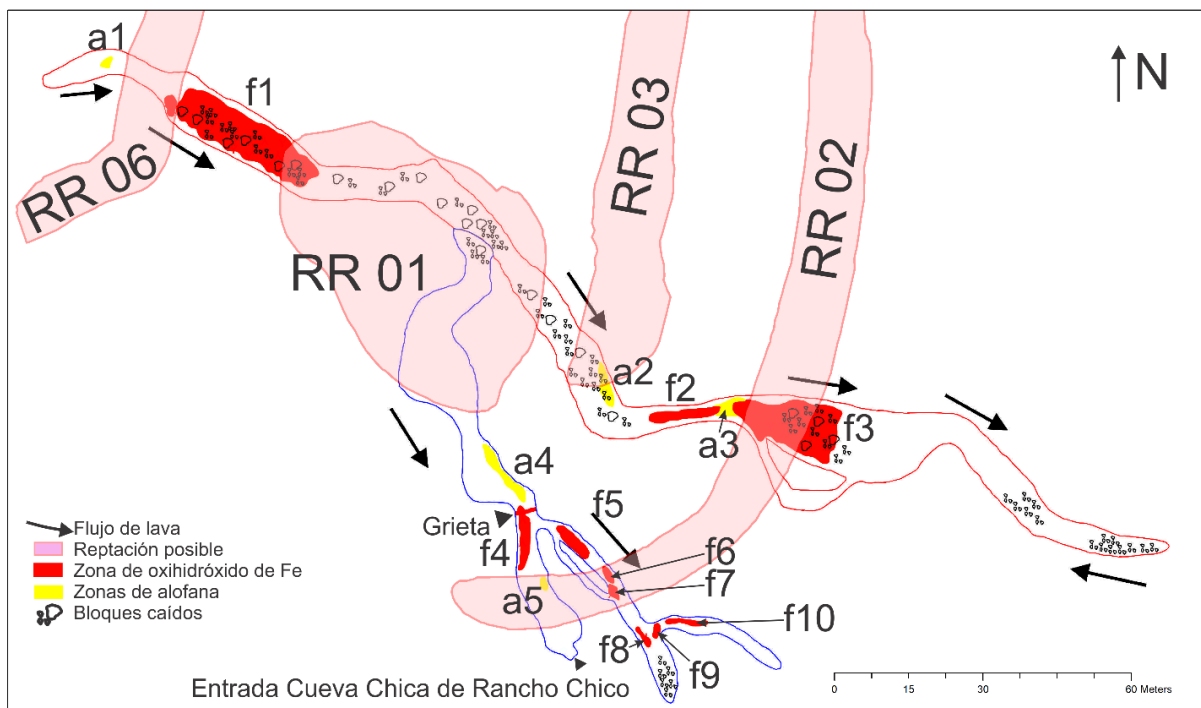


Figura 63. Mapa topográfico de Cueva Chica de Rancho Chico donde se sobrepone las zonas de reptación que se observan en superficie. En rojo el tubo maestro y en azul el tubo anastomosado.

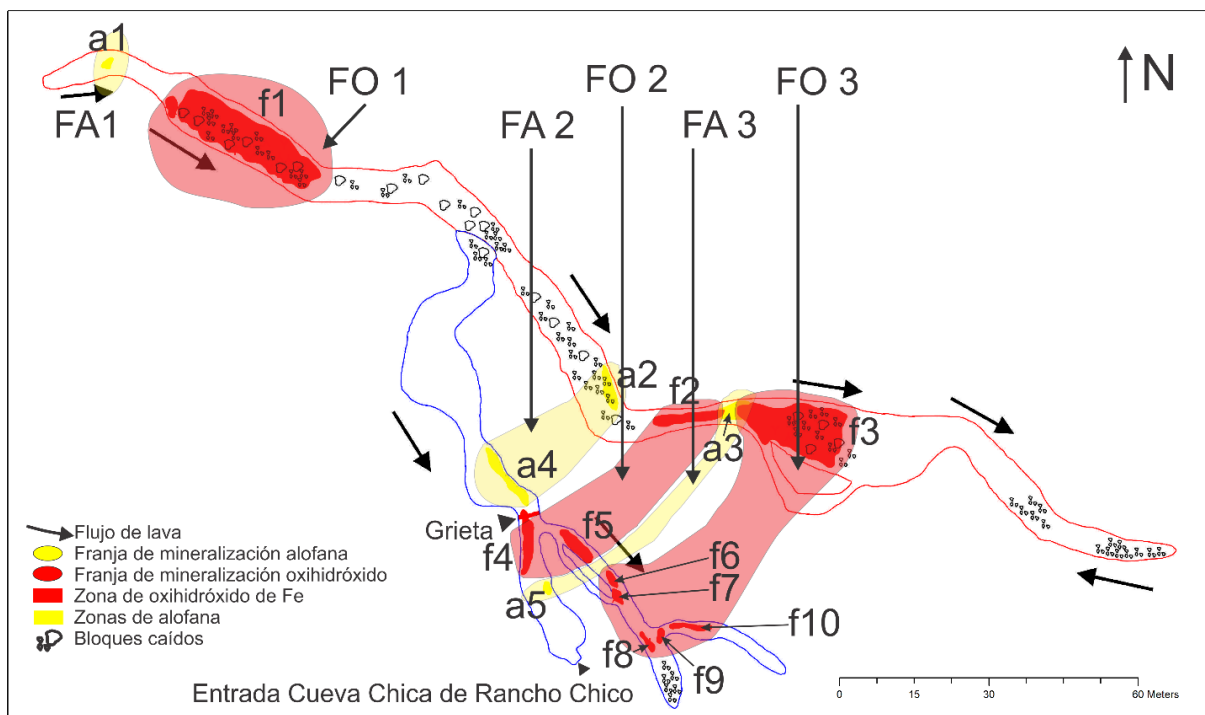


Figura 64. Mapa de franjas de mineralización de oxihidróxido y alofana en Cueva Chica de Rancho Chico.

Hay indicios de que la génesis de estas zonas de mineralización está condicionada, fundamentalmente, por tres factores:

1. El tipo de vegetación que crece sobre las zonas de reptación.
2. La pendiente y forma del horizonte D del suelo.
3. La densidad de los minerales que la componen.

Sobre las zonas de reptación crecen árboles altos, mientras que en el resto solo hay vegetación herbácea (Figura 53, Figura 54 y Figura 55). Autores como Carbone et al. (2016); Daza-Brunet y Bustillo (2015); Miller et al. (2020) han demostrado en sus investigaciones que zonas mineralizadas formadas por goteo en tubos de lava están asociadas a los tipos de plantas que se encuentran en superficie y que sus raíces en ocasiones llegan a penetrar dentro del tubo de lava, como ocurre en Cueva Chica de Rancho Chico (Figura 35). También se debe tener en cuenta que, según Suarez-Diaz (1998, p. 15); Suárez-Díaz (2009, p. 13) y Fuentes (2017, p. 29) en las zonas de reptación de suelo, el movimiento es extremadamente lento del material superficial y se forman las grietas transversales, estas últimas se adelantan en superficie a la prolongación de ellas en profundidad (Figura 65), esto explica las concentraciones de algunos tipos de minerales en ciertas áreas de la cueva que coinciden con algunas áreas de derrumbes o fracturas por las que se filtra el agua mineralizada en el techo de la cueva.

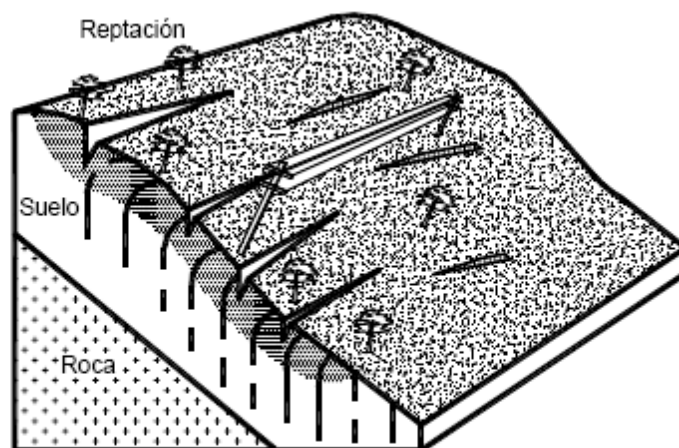


Figura 65. Esquema de un proceso de reptación. Modificado de Suarez-Diaz (1998, p. 15); Suárez-Díaz (2009, p. 13)

Otro indicio de este factor es la coincidencia de la reptación en superficie con los derrumbes y zonas de mineralización en Cueva Chica de Rancho Chico (Figura 63).

En el segundo y tercer factor se debe tener en cuenta que: El agua que lleva la carga mineral que forma estas zonas de mineralización dentro de la cueva se infiltra a través del suelo

o directamente por las grietas de tensión que se forman durante la reptación. Estas grietas pueden estar asociadas directa o indirectamente con las grietas en el techo de la cueva. La densidad de los oxihidróxidos supera los 2.5 g/cm^3 y la densidad de la alofana es de 1.9 g/cm^3 (Dana, 1960), decantando los primeros y luego los segundos en la superficie que forma el horizonte D del suelo. Por tanto, el goteo del agua del techo de la cueva con diferente carga mineral da origen a las zonas de mineralización en las diferentes áreas de la cueva. (Figura 66)

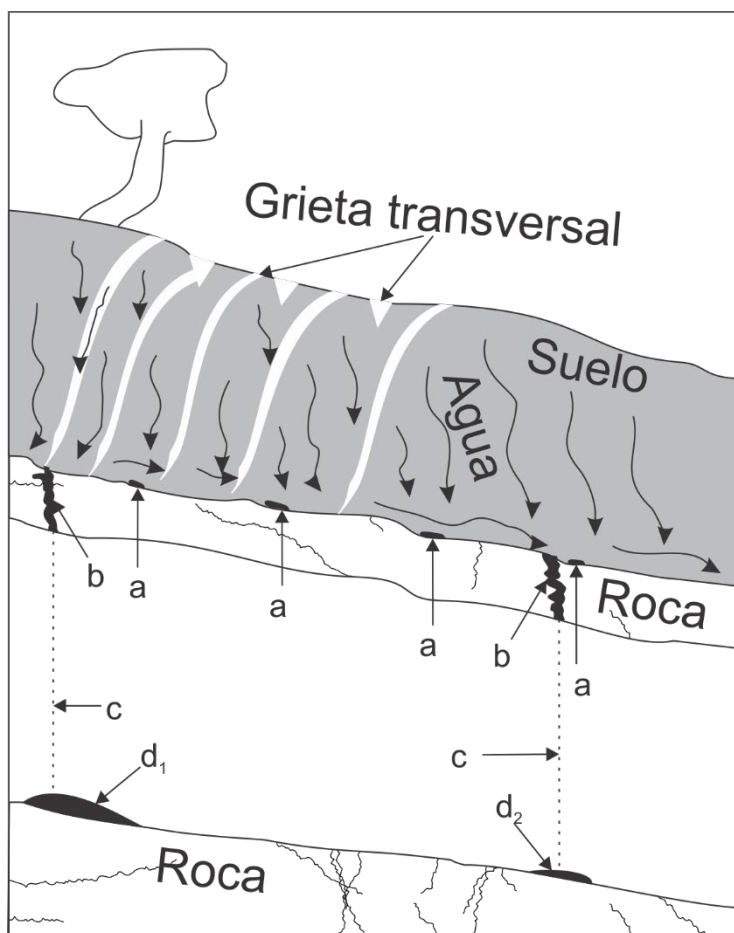


Figura 66. Esquema de relación entre las zonas de mineralización en Cueva Chica de Rancho Chico y la zona de reptación en superficie: a) acumulación de minerales, b) grieta en la roca, c) goteo de agua mineralizada, d₁) zona de mineralización de oxihidróxidos y; d₂) zona de mineralización de alofana.

Se sugiere realizar estudios botánicos y de dendrocronología para determinar la posible relación de los árboles con las zonas mineralizadas y la fecha de reptación del área, siempre que los árboles puedan ser usados con este fin. Es de destacar que tanto los árboles antiguos como los jóvenes se encuentran curvados en su base o cercanos a esta, lo que demuestra que en la actualidad el área de deslizamiento se encuentra activa. También se puede realizar estudios de dendrocronología para determinar si la fecha de comienzo de este proceso está ligado a algún evento sísmico registrado.

SÍMBOLOS COMPLEMENTARIOS

7. Cerro del Cajete: Ubicación del Cerro del Cajete.
8. Cueva Chica de Rancho Chico: Ubicación de la entrada de Cueva Chica de Rancho Chico.
9. Localidades: Ubicación de los principales asentamientos poblacionales del área de estudio.

CONCLUSIONES:

Se caracterizó geomorfológica y morfométricamente el cono de ceniza Cerro del Cajete y las estructuras geológicas asociadas, determinando que: el análisis morfométrico permitió establecer con precisión las regiones geomorfológicas de zona de lomerío y planicie volcánica, donde cada una de ellas mantiene una concordancia con la litología y con una génesis en común y el rango de valores altimétricos va desde los 1 261 msnm hasta los 2 361 msnm, encontrándose su punto más alto en Cerro del Cajete; una densidad de drenaje en la región de 1.49 km/km², encontrándose los mayores valores en la porción NE del área de estudio; la disección vertical del paisaje no sobrepasa los valores de 80 m/km²; y la energía del relieve menor a 10 m es el que predomina.

Los datos geomorfológicos obtenidos permitieron establecer que solo existe un cono de ceniza; la mayoría de los lineamientos se encuentran entre el OSO – ENE y ONO – ESE; la presencia de al menos 2 estructuras cercanas al cono de ceniza nombradas en esta investigación como La Joya 06 y La Joya 07; varias estructuras dentro de Cueva Chica de Rancho Chico; 20 depresiones semicirculares; y 13 zonas de reptación, de las cuales 12 constituyen un peligro geológico para las vías de comunicación y asentamientos. Se estableció nuevas morfologías asociadas al cono de ceniza que no habían sido descritas antes como el labio, atrio y fondo; así como nuevas estructuras asociadas al derrame (*levées* y frente de lava).

La Cueva Chica de Rancho Chico forma parte de un sistema de tubo de lava originada por el derrame de lava, de edad menor a 42 000 años AP, proveniente del Cerro del Cajete. Está compuesta por un tubo maestro y uno anastomosado, tiene una sola entrada, se encuentran dos tipos de lava, dos *lavaball*, una cornisa, estructuras que denotan la interrupción de al menos 8 veces el flujo de lava en el tubo anastomosado, zonas de mineralización, la presencia de una *rootsicles* incipiente y derrumbes parciales del techo posiblemente causados por eventos lo suficientemente fuertes para originarlos.

Cuando el canal principal que dio origen al tubo maestro de esta cueva comenzó a rebosarse, se originó el tubo anastomosado. Los *levées* de ambos canales fueron cerrándose y formando el techo de los tubos. Un *lavaball* entró al sistema y un segundo lo selló, clausurando la entrada de más lava. Sigue drenándose la lava que queda y se clausura el tubo maestro a unos 246 m de la entrada de lava. Con la construcción de la carretera Puebla – Xalapa, se abre una entrada artificial por el tubo anastomosado a la cueva. Uno de los ramales de este tubo pasa por debajo de la carretera y presenta derrumbes en esa área; la causa de este derrumbe puede

ser los sismos o la vibración ocasionado por los camiones de alto tonelaje, convirtiéndose en una amenaza de formación de un hundimiento.

El estudio de estas estructuras asociadas al Cerro del Cajete sirvió para obtener el mapa geomorfológico del área permitiendo su aplicabilidad inmediata en estudios de ordenamiento territorial, aprovechamiento y protección de recursos; además de constituir un elemento enfocado al entendimiento de la evolución volcánica de dicho territorio.

RECOMENDACIONES:

Para continuar profundizando con el campo de acción, el objeto de estudio y con fines socio económicos de la región, se recomienda:

1. Realizar estudios geofísicos para determinar los tipos de estructuras que son La Joya 06 y La Joya 07 y para la búsqueda de otros sistemas de tubos de lava en la región.
2. Continuar el estudio de los sistemas de tubos de lava en la región para su uso en la agricultura, consumo animal y población y su relación con la hidrogeología del área y poder determinar si forman parte de un acuífero de basaltos fracturados o como recarga de acuífero; el uso de estos sistemas de tubo de lava para el geoturismo; y determinar si constituyen riesgos geológicos por colapsos de sus techos.
3. Realizar espeleogénesis reogénica y estudiar la tectónica dentro de los tubos de lava y su implicación en la hidrogeología.
4. Realizar un estudio botánico y de dendrocronología a las especies de árboles, si estas son candidatas, que se encuentran en la zona de reptación sobre las zonas de mineralización de Cueva Chica de Rancho Chico, para determinar la fecha de comienzo de la reptación y su posible relación con estas zonas de mineralización.

REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

- Acocella, V., Andrews, G. D. M., Andrews, B., Angelis, S. D., Arnórsson, S., Aspinall, W., . . . Zimbelman, J. R. (2015). The Encyclopedia of Volcanoes. In H. Sigurdsson (Ed.), *The Encyclopedia of Volcanoes (Second Edition)* (pp. 1456). Academic Press. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385938-9.01002-6>
- Alcántara-Ayala, I., Echavarría-Luna, A., Gutiérrez-Martínez, C., Domínguez-Morales, L., & Noriega-Rioja, I. (2021). *Inestabilidad de Laderas* (V. Ramos Radilla, Ed.). Secretaría de Seguridad y Protección Ciudadana. <http://www.cenapred.gob.mx/es/Publicaciones/archivos/7-FASCICULOINESTABILIDADELADERAS.PDF>
- Alvarado-Gonzalez, R. (2003). *Cartografía geomorfológica del complejo volcánico Sierra de San Juan, Nayarit, México* (Publication Number TES01000315534) Universidad Nacional Autónoma de México]. Ciudad de México. <http://132.248.9.195/ppt2002/0315534/Index.html>
- Ariza, A. (2013). *Descripción y Corrección de Productos Landsat 8* (G. I. d. T. e. P. R. y. A. Geográficas, Ed. Vol. 1). Instituto Geográfico Agustín Codazzi. <https://www.un-spider.org/sites/default/files/LDCM-L8.R1.pdf>
- Baird, A. K., Mohrig, D. C., & Welday, E. E. (1985). Vapor deposition in basaltic stalactites, Kilauea, Hawaii. *Lithos*, 18, 151-160. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0024-4937\(85\)90016-7](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0024-4937(85)90016-7)
- Bunnell, D. (2008). *Caves of Fire: Inside America's Lava Tubes*. National Speleological Society.
- Camino, M. A., Bó, M. J., Cionchi, J. L., Del Río, J. L., de Armentia, A. L., & De Marco, S. G. (2018). Estudio morfométrico de las cuencas de drenaje de la vertiente sur del sudeste de la provincia de Buenos Aires. *Revista Universitaria de Geografía*, 27(1).
- Carbone, C., Dinelli, E., & De Waele, J. (2016). Characterization of minothems at Libiola (NW Italy): morphological, mineralogical, and geochemical study. *International Journal of Speleology*, 45(2), 6.
- Carrasco-Núñez, G., Richter, K., Chesley, J., Siebert, L., & Aranda-Gómez, J. J. (2005). Contemporaneous eruption of calc-alkaline and alkaline lavas in a continental arc (Eastern Mexican Volcanic Belt): chemically heterogeneous but isotopically homogeneous source. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 150(4), 423-440. <https://doi.org/10.1007/s00410-005-0015-x>
- CENAPRED. (2019). *Atlas de Riesgos del Estado Veracruz de Ignacio de la Llave*. Gobierno de México. Retrieved 1 de enero from http://www.atlasmnacionalderiesgos.gob.mx/AtlasEstatales/?&NOM_ENT=Veracruz%20de%20Ignacio%20de%20la%20Llave&CVE_ENT=30
- CENAPRED. (2021, 2021). *Mapa Nacional de Susceptibilidad por Inestabilidad de Laderas*. Coordinación de Estrategia Digital Nacional de la Oficina de la Presidencia de la República
- Centro Nacional de Prevención de Desastres. Retrieved 30 de mayo from <http://www.atlasmnacionalderiesgos.gob.mx/archivo/inestabilidad-laderas.html>
- Cisneros, G., & Avellán, D. (2018). Parícutin el pasado y el presente: Simulación de flujos de lava con Q-LavHa. In (pp. 59-79).
- Damiani, M. L., Gropelli, G., Norini, G., Bertino, E., Gigliuto, A., & Nucita, A. (2006). A lava flow simulation model for the development of volcanic hazard maps for Mount Etna (Italy). *Computers & Geosciences*, 32, 512-526. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2005.08.011>

- Dana, H. (1960). *Manual de Mineralogía* (2da ed.). REVERTÉ S.A.
- Daza-Brunet, R. (2015). *Distribution, composition and genesis (biotic/abiotic) of the speleothems of the volcanic caves in Terceira Island (Azores, Portugal)*
- Daza-Brunet, R., & Bustillo, M. (2015). Allophanic and ferric root-associated stalactites: Biomineralization induced by microbial activity (Galeria da Queimada lava tube, Terceira, Azores). *Geological Magazine*, 152, 504-520. <https://doi.org/10.1017/S0016756814000491>
- Delgadillo, A., & Páez, G. (2008). Aspectos hidrológicos, subcuencas susceptibles a crecidas, escenarios de riesgo. 2008). *Plan de desarrollo urbano del Municipio Antonio Pinto Salinas, bajo el enfoque de gestión del riesgo. Caracterización del riesgo de la cuenca del valle Mocoties. Mérida: FUNDAPRIS.*
- Díaz-Rivero, N., Valdés-Moreira, C. E., & Zubiaur-Chapman, K. (2009). Estudio Geológico-Geomorfológico de un sector de la Provincia de Pinar del Río.
- Díaz, R., Echaveguren, T., & Vargas-Tejeda, S. (2012). Camiones de alto tonelaje y su impacto en ciclo de vida de pavimentos asfálticos. *Revista de la construcción*, 11, 101-118. http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-915X2012000100010&nrm=iso
- Dóniz-Páez, F. J., & Coello de la Plaza, J. E. (2007). Geomorfología del tubo volcánico de Montaña del Castillo (Tenerife, Caraias, España). *Cuaternario y geomorfología: Revista de la Sociedad Española de Geomorfología y Asociación Española para el Estudio del Cuaternario*, 21(3-4), 6. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=2502179>
http://tierra.rediris.es/CuaternarioyGeomorfologia/images/vol21_3_4/21Doniz.pdf
- Dóniz-Páez, J. (2011). Relaciones entre topografía del terreno y morfología de los edificios volcánicos basálticos monogénicos de Tenerife (Islas Canarias, España). *Estudios Geográficos*, LXXII(270), 16. <https://doi.org/10.3989/estgeogr.201103>
- Espinasa-Perena, R., & Delgado-Granados, H. (2013). Hazards related to lava tubes and caves in the Sierra Chichinautzin monogenetic volcanic field (México). In (Vol. 498, pp. 163-176). [https://doi.org/10.1130/2013.2498\(10\)](https://doi.org/10.1130/2013.2498(10))
- Espinasa-Pereña, R. (2013). *Tubos de lava y vulnerabilidad del acuífero en la cuenca alta del río Actopan, Veracruz, México*. Ciudad de México: Centro Nacional de Prevención de Desastres
- Ferrari, L. (2016). Avances en el conocimiento de la Faja Volcánica Transmexicana durante la última década. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 53(1), 8. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.18268/BSGM2000v53n1a5>
- Ferrari, L., Orozco Esquivel, T., Navarro, M., López-Quiroz, P., & Luna, L. (2018). Digital Geologic Cartography and Geochronologic Database of the Trans-Mexican Volcanic Belt and Adjoining Areas. *Terra Digitalis*, 2. <https://doi.org/10.22201/igq.terradigitalis.2018.1.34>
- Fuentes, W. (2017). *Estabilidad de taludes* Estabilidad de taludes, Barranquilla, Colombia. https://www.uninorte.edu.co/documents/567682/13683670/William+Fuentes+-+Modulo_1.pdf/4ce9147b-b3a6-42e0-b7a1-ce4c0ab364c0
- Gassós, G., & Espinasa-Pereña, R. (2006). *Lava Tubes of the Naolinco Lava Flow, El Volcancillo, Veracruz, México* AMCS Bulletin 19, Tepoztlán, Morelos, Mexico.
- Gómez-Tuena, A., Orozco-Esquivel, M. T., & Ferrari, L. (2005). Petrogénesis ígnea de la Faja Volcánica Transmexicana. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 57(3), 56. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.18268/bsgm2005v57n3a2>

- Gómez-Tuena, A., Orozco-Esquivel, T., & Ferrari, L. (2007). Igneous petrogenesis of the Trans-Mexican Volcanic Belt. In (Vol. 422, pp. 129-181). [https://doi.org/10.1130/2007.2422\(05\)](https://doi.org/10.1130/2007.2422(05))
- Gonzalez-Mercado, G. E. (2005). *El vulcanismo monogenetico de la region de Xapala, Veracruz. Geomorfologia, petrologia y genesis* (Publication Number 0347153_A1) Universidad Nacional Autónoma de México]. Ciudad de México.
- Gordillo-Reyna, C. (2018). *Cartografía geomorfológica del complejo volcánico Tláloc-Telapón* (Publication Number TES01000775089) Universidad Nacional Autónoma de México]. Ciudad de México. <http://132.248.9.195/ptd2018/junio/0775089/Index.html>
- Guillermo, A., & Vega, A. (2013). La geomorfología de la colada de Cervantes, Volcán Irazú (Costa Rica): descripción de uno de los campos de lava más grande de América Central. *Revista Geológica de América Central*, 99-118. <https://doi.org/10.15517/rgac.v0i48.12238>
- Gunn, J. (2004). *Encyclopedia of caves and karst science*. Taylor & Francis.
- Halliday, W. R. (2003). Raw sewage and solid waste dumps in lava tube caves of Hawaii island. *Journal of Cave and Karst Studies*, 65(1), 68-75.
- Harris, A., & Rowland, S. K. (2001). FLOWGO: A kinematic thermo-rheological model for lava flowing in a channel. *Bulletin of Volcanology*, 63, 20-44. <https://doi.org/10.1007/s004450000120>
- Harris, A. J., Favalli, M., Mazzarini, F., & Hamilton, C. W. (2009). Construction dynamics of a lava channel. *Bulletin of Volcanology*, 71(4), 459-474.
- Haruyama, J., Hioki, K., Shirao, M., Morota, T., Hiesinger, H., van der Bogert, C., . . . Pieters, C. (2009). Possible lunar lava tube skylight observed by SELENE cameras. *Geophysical Research Letters - GEOPHYS RES LETT*, 36. <https://doi.org/10.1029/2009GL040635>
- Hill, C. A., & Forti, P. (1997). *Cave minerals of the world*. National Speleological Society.
- Hill, C. A., Forti, P., & Society, N. S. (1997). *Cave Minerals of the World*. National Speleological Society. <https://books.google.com.mx/books?id=UCfwAAAAMAAJ>
- Huff, W. D., & Owen, L. A. (2013). Volcanic Landforms and Hazards. *Treatise on Geomorphology*, 5, 148-192. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374739-6.00089-0>
- INEGI. (2009). *Modelo digital de elevación de alta resolución Lidar, Tipo TERRENO E14B27D1_MT* [Lidar]. Aguascalientes, Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- INEGI. (2010a). *Cartas Topográficas E14B26f* [Topografía]. Aguascalientes, Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- INEGI. (2010b). *Cartas Topográficas E14B27d* [Topografía]. Aguascalientes, Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- INEGI. (2010c). *Red Hidrográfica Escala 1:50 000 Edición: 2.0, Subcuenca Hidrográfica RH28Bj R. Cedeño /Cuenca R. Jamapa y otros /R.H. Papaloapan* [Topografía]. Aguascalientes, Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- INEGI. (2013a). *Continuo de Elevación Mexicana, CEM e14b26 a 15m* [CEM]. Aguascalientes, Instituto Nacional de Estadística y Geografía. <https://www.inegi.org.mx/app/geo2/elevacionesmex/>
- INEGI. (2013b). *Continuo de Elevación Mexicana, CEM e14b27 a 15m* [CEM]. Aguascalientes, Instituto Nacional de Estadística y Geografía. <https://www.inegi.org.mx/app/geo2/elevacionesmex/>
- Kempe, S., Bauer, I., & Henschel, H.-V. (2003). Pa'auhau civil defense cave on Mauna Kea, Hawaii—a lava tube modified by water erosion. *Journal of Cave and Karst Studies*, 65(1), 76-85.

- Kempe, S., & Werner, M. S. (2003). The Kuka'iau Cave, Mauna Kea, Hawaii, created by water erosion: A new Hawaiian cave type. *Journal of Cave and Karst Studies*, 65(1), 53-67.
- Kiernan, K., & Middleton, G. (2005). Groundwater movement and management in tube-fed lavas.
- Kiernan, K., Wood, C., & Middleton, G. (2003). Aquifer structure and contamination risk in lava flows: insights from Iceland and Australia. *Environmental Geology*, 43(7), 852-865.
- Larson, C. V. (1991). Nomenclature of lava tube features. 6th international symposium of vulcanospeleology, Hilo, Hawaii,
- Larson, C. V. (1993). *An illustrated glossary of lava tube features*. Charlie & Jo Larson.
- Llambías, E. J. (2003). *Geología de los cuerpos ígneos* (Vol. 27). Asociación Geológica Argentina Buenos Aires.
- Lugo-Hubp, J. I. (1988). Elementos de Geomorfología Aplicada (Métodos Cartográficos): Universidad Nacional Autónoma de México. *Instituto de Geografía, México*.
- Luis-Vargas, M. N. (2018). *Caracterización de la comunidad bacteriana en tapetes microbianos y estromatolitos terrestres del sistema de tubo de lava de Chimalacatepec, Morelos, México* (Publication Number 0783690) Universidad Nacional Autónoma de México]. Ciudad de México.
- Marchionni, D., & Tessone, M. (2009). Cartografía geológica y reconocimiento de áreas de alteración hidrotermal con imágenes LANDSAT-TM en el área de La Manchuria, Macizo del Deseado, Patagonia Argentina. *Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, 3269-3276. https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/36029450/3269-3276-with-cover-page-v2.pdf?Expires=1635036872&Signature=NthDxFp4ynMKhVNtiB8rQoo8ql7ysssdfsw5DiN95vDxCQbAtgRRArY2vcESC3PkKFOb21XEnedf5Vz1951apULxrlhfmWtKM0oQcFdv5BLtRUCkPKoiE5ee88nEe53a19qGNEZtg4o9RO0EJ45CsNYIsJERk3YvqRqKptvIMsaW2XnzIQHDSoyH12ABmLDPO2qFzaPsvS2~9zjshW-0qlZP5xIFH6T3Z~A2ZGCaXFn1KyDCDHQMjaxKoZfQiyyoXBWLvLeCRX3xaR95I34X6WNQyF8WiJbjdbootenmZl22Jdc60ijtI97b9C5aI0qcrBC60leY3tkbiOJI~EXAQ_&Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA
- Mendoza-Margáin, C. E. (2010). *Cartografía geomorfológica del Complejo Volcánico Tacaná, México-Guatemala* (Publication Number TES01000657415) Universidad Nacional Autónoma de México]. Ciudad de México. <http://132.248.9.195/ptb2010/mayo/0657415/Index.html>
- Mexicano, S. G. (2007a). *Carta Geológico-Minera Perote E14-B26 1:50 000*. Hidalgo, Servicio Geológico Mexicano.
- Mexicano, S. G. (2007b). *Carta Geológico-Minera Xalapa E14-B27 1:50 000*. Hidalgo, Servicio Geológico Mexicano.
- Mikkan, R. A. (2017). Morfología compleja y dinámica de los conos monogenéticos Los Morados Sur en el campo volcánico Payún Matrú, Malargüe, Mendoza. *Instituto de Geografía-Facultad de Filosofía y Letras Universidad Nacional de Cuyo*(108), 85. https://bdigital.uncu.edu.ar/objetos_digitales/10265/boletn-108-pdf-estudios-geo-85-101.pdf
- Miller, A. Z., De la Rosa, J. M., Jiménez-Morillo, N. T., Pereira, M. F. C., Gonzalez-Perez, J. A., Knicker, H., & Saiz-Jimenez, C. (2020). Impact of wildfires on subsurface volcanic environments: New insights into speleothem chemistry. *Science of The Total Environment*, 698, 134321. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134321>
- Mora-González, I., Morales-Barrera, W. V., & Rodríguez-Elizarrarás, S. R. (2015). *Atlas peligros geológicos e hidrogeológicos del estado de Veracruz*. Gobierno del estado de Veracruz

de Ignacio de la Llave. http://www.veracruz.gob.mx/proteccioncivil/wp-content/uploads/sites/5/2015/03/Atlas_Veracruz_web.pdf

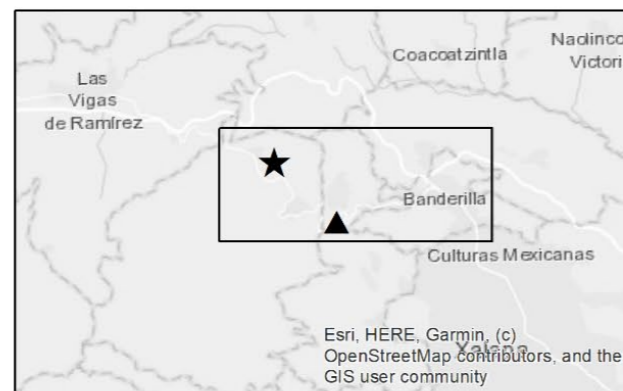
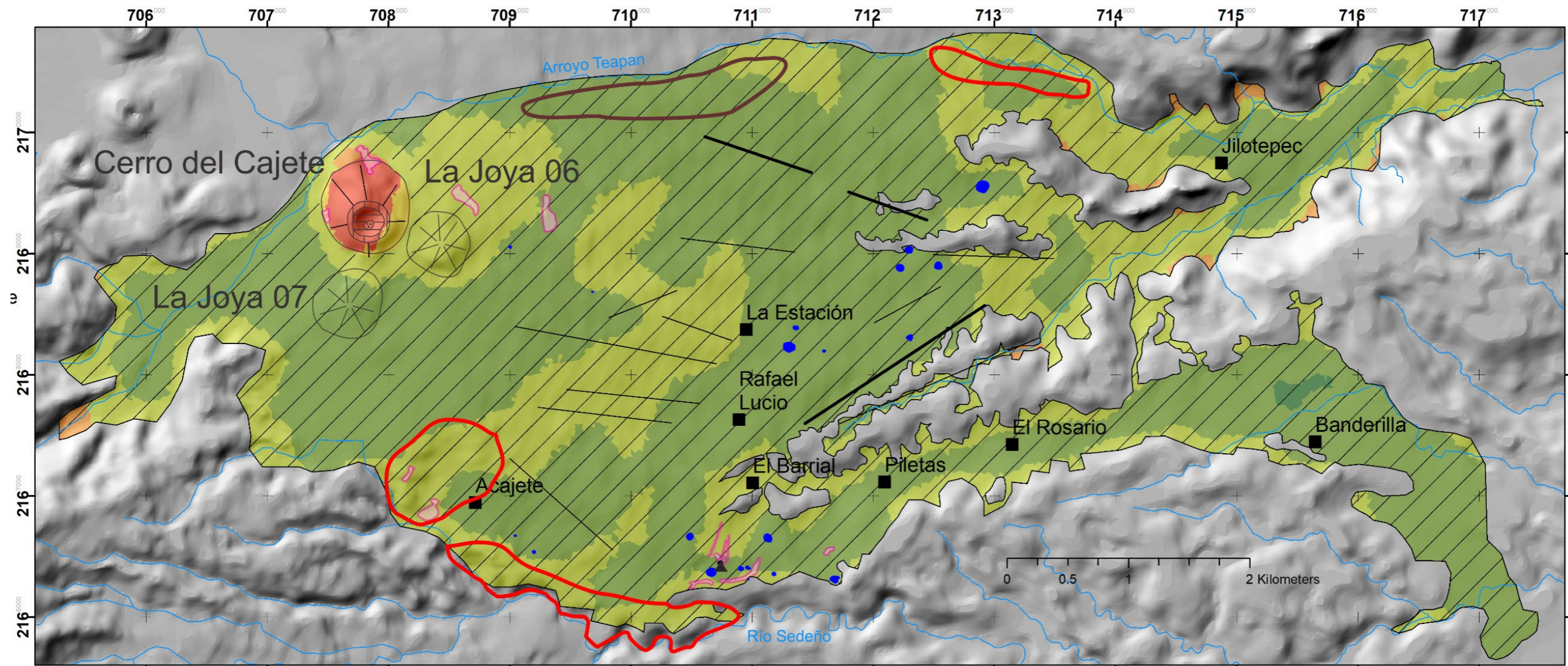
- Morales-Barrera, W. V. (2009). *Estudio geológico de un depósito ignimbrítico en la región de Xalapa, Veracruz : distribución, estratigrafía, petrografía y geoquímica* (Publication Number 000650410) Universidad Nacional Autónoma de México]. Ciudad de México.
- Mossman, R. W., & Viniegra, F. (1976). Complex Fault Structures in Veracruz Province of Mexico. *AAPG Bulletin*, 60(3), 379-388. <https://doi.org/10.1306/83D923C5-16C7-11D7-8645000102C1865D>
- Nieto-Torres, A., & Espinasa-Pereña, R. (2016). *Metodología para la identificación de los peligros asociados al vulcanismo monogenético en México*. Mexico: CENAPRED Retrieved from https://www1.cenapred.unam.mx/COORDINACION_ADMINISTRATIVA/SRM/FRACCION_XLI_A/47.pdf
- Peña-Monné, J. L. (1997). *Cartografía geomorfológica básica y aplicada*. Geoforma.
- Pérez-Quezadas, J., Cortés-Silva, A., Ortega, M., & González, M. (2017). Origen del agua subterránea en Xalapa y sus alrededores. *Mora González, I. (Coordinador), El impacto de las ciencias de la Tierra en la sociedad*, 53-69.
- Pfeiffer, T. (2004). *Illustrated Volcano Glossary: Claraboya*. VolcanoDiscovery. Retrieved 20 de junio from <https://www.volcanodiscovery.com/es/photoglossary/skylight.html>
- Priego-Santander, A. G., Isunza-Vera, E., Luna-González, N., & Pérez-Damián, J. L. (2003). Disección vertical del relieve de México a escala 1: 250 000. Instituto Nacional de Ecología. In.
- Proietti, C., Coltelli, M., Marsella, M., & Fujita, E. (2009). A quantitative approach for evaluating lava flow simulation reliability: LavaSIM code applied to the 2001 Etna eruption. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 10, 9003. <https://doi.org/10.1029/2009GC002426>
- Prouty, N. G., Swarzenski, P. W., Fackrell, J. K., Johannesson, K., & Palmore, C. D. (2017). Groundwater-derived nutrient and trace element transport to a nearshore Kona coral ecosystem: Experimental mixing model results. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 11, 166-177.
- Quesada-Román, A. (2016). Peligros geomorfológicos: inundaciones y procesos de ladera en la cuenca alta del río General, Pérez Zeledón, Costa Rica.
- Quesada Román, A., & Barrantes Castillo, G. (2017). Modelo morfométrico para determinar áreas susceptibles a procesos de ladera. *Investigaciones Geográficas*(94), 0-0.
- Quezadas, J. P., Silva, A. C., Ortega, M., & González, M. (2017). Origen del agua subterránea en Xalapa y sus alrededores. *Mora González, I. (Coordinador), El impacto de las ciencias de la Tierra en la sociedad*, 53-69.
- Robin, C. (2013). Presence simultanee de magmatismes de significations tectoniques opposees dans l'Est du Mexique. *Bulletin de la Societe Geologique de France*, S7-XVIII, 1637-1645. <https://doi.org/10.2113/gssgfbull.S7-XVIII.6.1637>
- Rodríguez-Elizarrarás, S. R., Mora-González, I., Murrieta-Hernández, J. L., & Morales-Barrera, W. V. (2011). *Peligros geológicos más frecuentes en el estado de Veracruz*. Universidad Veracruzana. <http://libros.uv.mx/index.php/UV/catalog/download/BI226/64/318-1?inline=1>
- Rodriguez-Gonzalez, A., & Fernandez-Turiel, J. L. (2015). Las geoformas volcánicas y su modelado morfométrico con Sistemas de Información Geográfica (SIG). *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 23, 40.

- Rodríguez-Mangas, V. (2013). *Identificación y cartografía de lineamientos geológicos mediante técnicas de análisis de imagen* [Máster en Técnicas de Análisis, Evaluación y Gestión Sostenible de Procesos y Riesgos Naturales, Universidad de Cantabria: UCrea]. Cantabria. <http://hdl.handle.net/10902/3871>
- <https://repositorio.unican.es/xmlui/bitstream/handle/10902/3871/Veronica%20Rodriguez%20Mangas.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- <https://repositorio.unican.es/xmlui/handle/10902/3871>
- Rodríguez, S. R., Morales-Barrera, W. V., Layer, P., & González-Mercado, E. (2010a). A quaternary monogenetic volcanic field in the Xalapa region, eastern Trans-Mexican volcanic belt: Geology, distribution and morphology of the volcanic vents. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 197, 149-166. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2009.08.003>
- Rodríguez, S. R., Morales-Barrera, W. V., Layer, P., & González-Mercado, E. (2010b). A quaternary monogenetic volcanic field in the Xalapa region, eastern Trans-Mexican volcanic belt: Geology, distribution and morphology of the volcanic vents. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 197(1), 149-166. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2009.08.003>
- Sánchez-García, K. R. (2018). *Cartografía geomorfológica del volcán de Iztaccíhuatl, México* (Publication Number TES01000775090) [Licenciatura en Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México]. Ciudad de México. <http://132.248.9.195/ptd2018/junio/0775090/Index.html>
- SEDATU. (2011). *Atlas de Riesgos Irapuato*. Guanajuato: Secretaría de Desarrollo Social Retrieved from <http://www.implanirapuato.gob.mx/Atlas/ATLAS%20RIESGOS%20CAP%205%20GEOLOGICO%20ok.pdf>
- SEDESOL. (2011a). *Atlas de peligros naturales y antropogénicos del municipio de Coatzintla, Veracruz*. Veracruz: Secretaría de Desarrollo Social Retrieved from http://rmgir.proyectomesoamerica.org/PDFMunicipales/HABITAT/vr_ATLAS_Coatzintla.pdf
- SEDESOL. (2011b). *Atlas de peligros naturales y antropogénicos del municipio de Minatitlan, Veracruz*. Veracruz: Secretaría de Desarrollo Social Retrieved from http://rmgir.proyectomesoamerica.org/PDFMunicipales/HABITAT/vr_ATLAS_Minatitlan.pdf
- SEDESOL. (2011c). *Atlas de peligros naturales y antropogénicos del municipio de Xico, Veracruz*. Veracruz: Secretaría de Desarrollo Social Retrieved from http://rmgir.proyectomesoamerica.org/PDFMunicipales/2011/vr_30092_AR_XICO.pdf
- Selley, R. C., Cocks, I. R. M., & Plimer, I. R. (2005). Encyclopedia of Geology. In I. R. M. C. Richard C. Selley, Ian R. Plimer (Ed.), *Encyclopedia of Geology* (First edition 2005 ed., pp. 6035). Spain: Elsevier Academic Press.
- Siebert, L., & Carrasco-Núñez, G. (2002). Late-Pleistocene to precolumbian behind-the-arc mafic volcanism in the eastern Mexican Volcanic Belt; implications for future hazards. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 115, 179-205. [https://doi.org/10.1016/S0377-0273\(01\)00316-X](https://doi.org/10.1016/S0377-0273(01)00316-X)
- Simonov, Y. (1985). Análisis morfométrico. *Lomonosov. Moscú, URSS: Universidad Estatal de Moscú*.

- Suarez-Diaz, J. (1998). *Deslizamientos y Estabilidad de Taludes en Zonas Tropicales* (I. d. S. Ltda, Ed.). Instituto de Investigaciones sobre Erosión y Deslizamientos. <http://desastres.usac.edu.gt/documentos/docgt/pdf/spa/doc0101/>
- <http://desastres.usac.edu.gt/documentos/docgt/pdf/spa/doc0101/doc0101-parte01.pdf>
- <http://desastres.usac.edu.gt/documentos/docgt/pdf/spa/doc0101/doc0101-parte02.pdf>
- <http://desastres.usac.edu.gt/documentos/docgt/pdf/spa/doc0101/doc0101-parte03.pdf>
- <http://desastres.usac.edu.gt/documentos/docgt/pdf/spa/doc0101/doc0101-parte04.pdf>
- <http://desastres.usac.edu.gt/documentos/docgt/pdf/spa/doc0101/doc0101-parte05.pdf>
- <http://desastres.usac.edu.gt/documentos/docgt/pdf/spa/doc0101/doc0101-parte06.pdf>
- <http://desastres.usac.edu.gt/documentos/docgt/pdf/spa/doc0101/doc0101-parte07.pdf>
- <http://desastres.usac.edu.gt/documentos/docgt/pdf/spa/doc0101/doc0101-parte08.pdf>
- <http://desastres.usac.edu.gt/documentos/docgt/pdf/spa/doc0101/doc0101-parte09.pdf>
- <http://desastres.usac.edu.gt/documentos/docgt/pdf/spa/doc0101/doc0101-parte10.pdf>
- <http://desastres.usac.edu.gt/documentos/docgt/pdf/spa/doc0101/doc0101-parte11.pdf>
- <http://desastres.usac.edu.gt/documentos/docgt/pdf/spa/doc0101/doc0101-parte12.pdf>
- <http://desastres.usac.edu.gt/documentos/docgt/pdf/spa/doc0101/doc0101-parte13.pdf>
- <http://desastres.usac.edu.gt/documentos/docgt/pdf/spa/doc0101/doc0101-parte14.pdf>
- <http://desastres.usac.edu.gt/documentos/docgt/pdf/spa/doc0101/doc0101.pdf>
- Suárez-Díaz, J. (2009). Nomenclatura y Clasificación de los Movimientos. In U. I. d. Santander (Ed.), *Deslizamientos. Análisis geotécnico* (Vol. 1). Universidad Industrial de Santander. <http://www.erosion.com.co/presentaciones/category/45-tomo-i.html?download=440:librodeslizamientosti-cap1>
- Toselli, A. J. (2020). *Elementos Básicos de Petrología Ígnea*. KS Omniscriptum Publishing. http://www.insugeo.org.ar/libros/misc_18/pdf/toselli_miscelanea_18_elementos_basicos_de_petrologia_ignea.pdf
- http://www.insugeo.org.ar/libros/misc_18/000_indice.htm
- UNAM, Geofísica, I. d., & Nacional, S. S. (2021). *Catálogos de Sismos 2007-01-01 al 2021-05-25*. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geofísica. Retrieved 25 de mayo from <http://www2.ssn.unam.mx:8080/catalogo/>
- Urdiain, P. T., & Sanjulián, J. J. C. (1983). Análisis cuantitativo de la red de drenajes de la cuenca del río Deba. *Lurralde: Investigación y espacio*(6), 95-118.
- USGS. (2020). *EarthExplorer - Home*. USGS. Retrieved 5 de mayo from <https://earthexplorer.usgs.gov/>
- Villacorta, S., Vasquez, E., Valderrama-Murillo, P., & Madueño, M. (2013). *Critical areas due to geological and geo-hydrological hazards in the Apurimac Region. Second Report*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.23845.40163>
- Viniegra, F. (1966). Paleogeografía y tectónica del Mesozoico en la Provincia de la Sierra Madre y Macizo de Teziutlan. *Boletín de la Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros*, 18, 26.
- Walker, G. P. (1971). Grain-size characteristics of pyroclastic deposits. *The Journal of Geology*, 79(6), 696-714.
- Белоусов, А. Б., & Белоусова, М. Г. (2019). Морфология, закономерности формирования и остывания лавовых труб извержения вулкана Толбачик 2012-2013 гг. *Материалы*

XXII региональной научной конференции «Вулканизм и связанные с ним процессы»,
4. <http://repo.kscnet.ru/3800/1/tolb%20caves2019.pdf>

ANEXO 1: Mapa Geomorfológico del Cerro del Cajete y sus estructuras asociadas



- Relieve endógeno modelado**
- 5 Disección vertical por el tipo de roca
 - Planicies subhorizontales, constituida por basaltos
 - Planicies onduladas de ligera a fuertemente diseccionadas, constituidas por basaltos
 - Planicies acolinadas, de ligera a fuertemente diseccionadas, constituidas por basaltos
 - Planicies acolinadas, de ligera a fuertemente diseccionadas, constituidas por piroclastos
 - Lomeríos, de ligera a medianamente diseccionados, constituidas por basaltos
 - Lomeríos, ligeramente diseccionados, constituidos por piroclastos

- Relieve exógeno**
- 6 Zonas de reptación

- Símbolos Complementarios:**
- Localidades
 - ★ Cerro del Cajete
 - ▲ Cueva Chica de Rancho Chico

Escala: 1: 31 000
 Elipsoide: GRS80
 Proyección: Universal Transversal de Mercator Zona 14 N
 Datum horizontal: ITRF 92



Tesis de Maestría
 Alumno: Ing. Alain Fonseca Montero
 Asesor: Dr. Rafael Antonio López Martínez

- Relieve endógeno:**
- ⊗ 1.1 Cono de ceniza
 - ⊕ a) Labio
 - ⊕ b) Atrio
 - ⊕ c) Fondo
 - ⊗ 1.2 Cúpula
 - ▨ 2 Derrame de lava
 - 3 Estructuras asociadas a la colada
 - ▭ 3.1 Levées
 - ▭ 3.2 Frente de lava
 - ▲ 3.3 Cueva Chica de Rancho Chico
 - 3.4 Depresiones semicirculares
 - 4 Relieve tectónico
 - 4.1 Lineamientos geológicos
 - I orden
 - II orden
 - II orden

Anexo 1. Mapa Geomorfológico del Cerro del Cajete y sus estructuras asociadas.