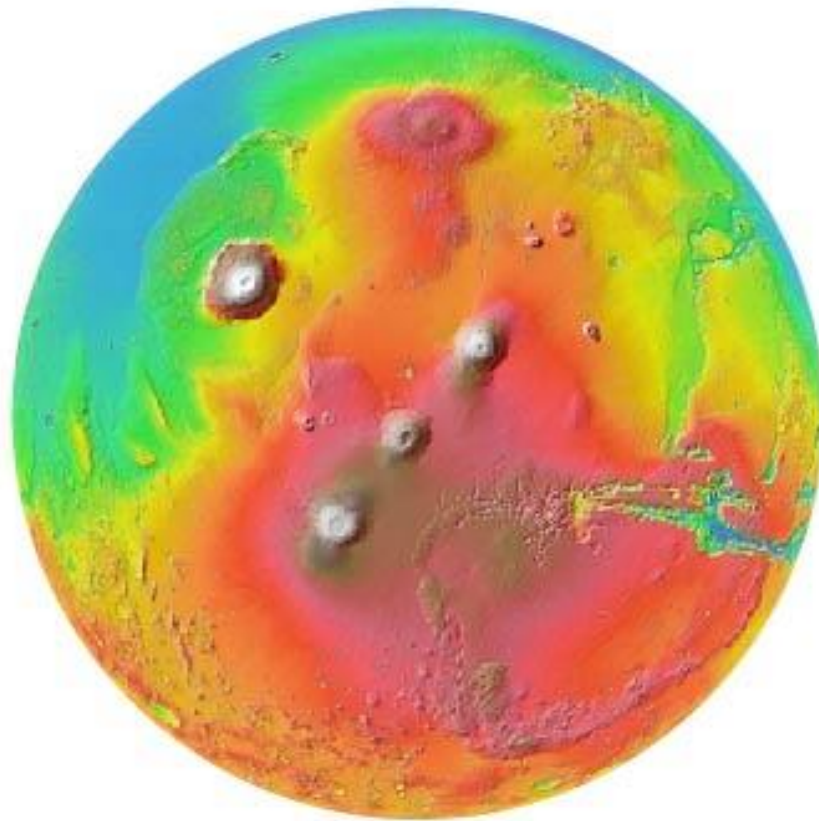


Facultad de Ciencias
2020

Comparación de estructuras tectónicas entre la Tierra y Marte



Autora: Catalina García-Jove Contreras

Directores: Antonio Casas

Luis Arlegui



Universidad
Zaragoza

Índice

1. Abstract	2
2. Introducción	3
3. Objetivos	3
4. Metodología de trabajo	3
<i>4.1 Trabajo de gabinete</i>	3
5. Contexto geológico de Marte y el área de estudio	4
6. Cartografía y clasificación de estructuras	7
7. Resultados	9
<i>7.1 Análisis de estructuras</i>	9
<i>7.2 Diagramas Rosa</i>	16
<i>7.3 Perfiles topográficos</i>	19
8. Interpretaciones	20
9. Comparaciones entre Marte y la Tierra.....	22
10. Conclusions	24
11. Bibliografía	25
12. Anexos	26
<i>12.1 Base de mapeo</i>	26
<i>12.2 Perfiles topográficos</i>	27

1. Abstract

This investigation focuses on an area of the northern hemisphere of the planet Mars, corresponding to the north of the Tharsis region, more specifically the Alba Patera volcano and the Tempe Terra lands. The geological evolution of the study area is summarized in 5 main scenarios, where the structures of Tempe Terra are the first to be formed during the Noeico and early Hesperico, following the formation of Alba Patera, with a structural dominance during the late Hesperic and early Amazonian.

The main goals of this investigation are to understand the structural relationships of this area, and to achieve this, a detailed mapping of a total of 3,371 structures has been performed in the entire study area, characterizing 5 families of main faults, NE faults, Curves, NS, NW and Collapse, where their initial differentiation aims to study these families separately and see if they relate to each other, and then put them into groups if they become correlated. The study area has also been divided into 4 sub-zones, making this study even more detailed, since the land to be studied is about 8,750,000 km², a little less than the United States area.

Structural analyses were carried out in the different zones, observing extension preferential directions, especially for the NE faults that show to be the most systematic, and therefore those that remain in time. Evidence have also been found of more specific structures such as triple-point structures, indicating local radial extension, and stair structures, which in this case are produced by a difference in isostasis between the Alba Patera volcano and the ancient river channels. Topographic profiles were carried out throughout the entire study area, where morphologies of Horst and Graben systems have been observed, associated with regional extensions that have occurred on this area over time. And finally directional Rose Diagrams were made, which show the preferential directions of the structures in the different zones, being important the addresses of the structures NE, since these are the ones that indicate the direction of regional extension, where in turn has had directional variations throughout its evolution.

The radial structures that surround the volcano Alba Patera are the first things it can be observed from the area, where its origin is due to an overlap of stress generated by the magmatic ascent of a volcanic center. Where the directions that follow the radial structures and their extensions correspond to the directions of forces of sigma 2 and 3, since sigma 1 is located to the vertical above the volcano. Sigma 2 would follow the same path of the fault families NS, Curves and part of NE, while sigma 3 could follow the directions of the NW structures, which tend to have a behavior perpendicular to the other families.

Generally speaking, there are two tectonic causes that generate the structures in this study area. The first corresponds to a regional extension, orientation (0, 330 and 340), where its tectonic activity deforms the entire area, being the main cause of the general deformation. The second cause is the magmatic ascent that formed the volcano Alba Patera, affecting the terrain locally but not regionally as the previous one, being these the concentric structures that surround the volcano and their respective extensions.

2. Introducción

Marte y la Tierra se formaron hace unos 4.500 millones de años. Ambos partieron de condiciones geológicas adecuadas para que surgiera la vida, pero sus evoluciones fueron muy distintas, el planeta rojo perdió su motor geológico y la mayor parte de su atmósfera y agua, siendo hoy en día planetas muy diferentes.

El estudio de la superficie marciana sigue siendo una parte de la geología muy reciente, con pocas publicaciones en comparación con el resto de nuestro planeta, sin embargo, su estudio es muy importante, ya que entender los procesos geológicos que ocurren en otros planetas ayuda a comprender mejor los procesos que ocurren en el nuestro, o incluso los que no ocurren, y cuáles son los factores que generan esas diferencias a escala planetaria.

Marte es un excelente planeta para comenzar la exploración de la geología planetaria, ya que este es su planeta hermano, en donde a pesar de sus diferencias actuales como las condiciones ambientales, y su tectónica relativamente muerta, tiene estructuras homologas reconocibles en la Tierra, y son estas en donde enfocaremos el centro de la investigación, dándole un énfasis al contexto estructural del área marciana a estudiar y ver si es correlacionable con estructuras terrestres.

3. Objetivos

1. Comprender la tectónica regional del área de estudio y de Marte mediante trabajos previos.
2. Realizar un mapeo detallado de las estructuras del área y su respectivo análisis estructural.
3. Recolectar datos direccionales de las fracturas, relaciones de corte, cronología, cinemática, morfología, y en el mejor de los casos análisis dinámicos.
4. Obtener resultados concretos y fiables.
5. Comparar las estructuras marcianas con las terrestres, encontrar algún ejemplo homólogo con las estructuras de la Tierra.

4. Metodología de trabajo

Primero que todo, al ser un terreno de estudio en el planeta Marte, no se pueden hacer mediciones de campo (de momento), por ende, la investigación se limita al trabajo de gabinete desde el ordenador.

4.1 Trabajo de gabinete

→ El primer paso fue hacer un mapeo preliminar del área de interés a través del programa Google Earth Pro, un programa informático que muestra un globo virtual que permite visualizar múltiples cartografías, con base en la fotografía satelital. Esto más bien para tener una idea previa del área de interés.

→ Una vez enfocada el área que se va a investigar, se delimita la zona de estudio marciana a través del programa ruso SASPlanet, descargando una imagen satelital georreferenciada de alta resolución (Anexo 1). Esta imagen sirve como base de mapeo oficial, y se trabaja a través del programa ArcMap, donde se mapean las estructuras del área.

→ Se clasifican las diferentes familias de fallas, las cuales se definen con un color cada una, y también se les asigna un nombre a cada familia (Fallas NE, NS, NW, Curvas y de Colapso), con la finalidad de estudiarlas inicialmente por separado para luego ver si son correlacionables o no.

→ El área marciana también se divide en 4 subzonas (zonas 1, 2, 3, 4.1 y 4.2), esto con el propósito de realizar un estudio más detallado de las estructuras, debido a que el área marciana escogida es de muy grandes dimensiones, unos 8.750.000 Km².

→ Luego se descarga la imagen DEM (Anexo 2) por medio de la página web USGS (United States Geological Survey), a través del servicio “Map a Planet 2”. Este producto es una mezcla de datos del modelo de elevación digital (DEM) derivados del Mars Orbiter Laser Altimeter (MOLA), un instrumento a bordo de la nave espacial Mars Global Surveyor (MGS) de la NASA y la cámara estéreo de alta resolución (HRSC), un instrumento a bordo de la nave espacial Mars Express (MEX) de la Agencia Espacial Europea. Esto fue creado en apoyo de los estudios de modelado térmico y la creación de productos para Marte (Ferguson et al., 2017). La resolución es de 200 metros por píxel (m) y sirve para conocer el relieve del área de estudio.

→ Utilizando de herramienta la imagen DEM, también se crea una imagen 3D del área de estudio, a través del programa ArcScene (extensión del programa ArcMap) (Anexo 3).

→ Se genera una base de mapeo que se trabaja en el programa ArcMap, utilizando de herramientas la imagen de alta resolución del SASPlanet y la imagen DEM del USGS.

→ Se realiza un análisis estructural de todas las familias clasificadas en sus respectivas zonas, obteniendo datos cinemáticos e incluso dinámicos.

→ Se generan múltiples perfiles, los cuales sirven para comprender de forma más detallada el comportamiento del relieve y qué relación tiene este con las estructuras que lo atraviesan.

→ También se realizan diagramas rosas direccionales a través del programa Stereonet, donde se observan las direcciones preferenciales de las familias de estructuras respectivas por cada zona.

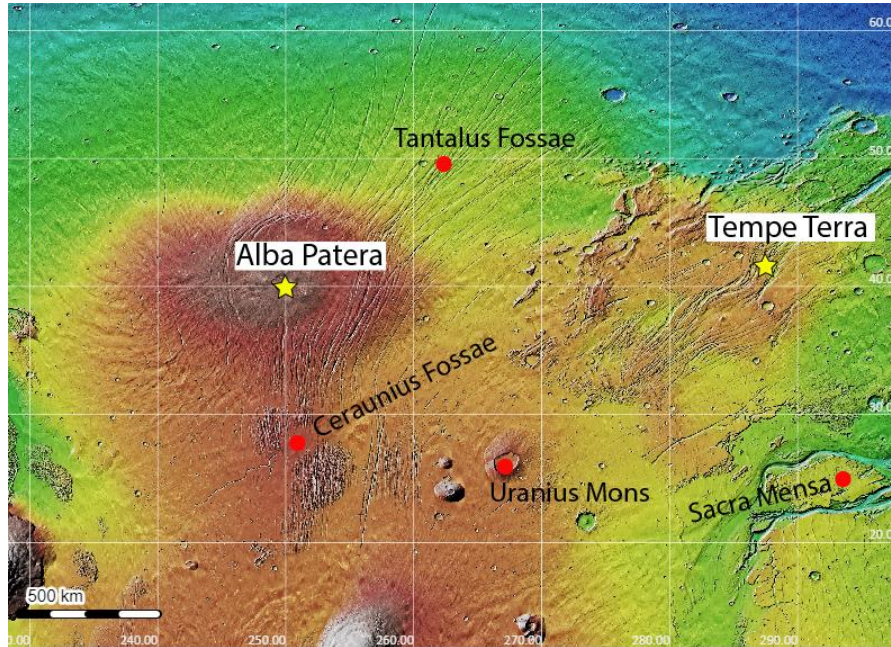
→ Las imágenes en general son retocadas con el programa Illustrator.

5. Contexto geológico de Marte y el área de estudio.

Marte es el último de los planetas rocosos e interiores del sistema solar. Es el segundo planeta más cercano a la Tierra y comparte con nuestro mundo diversas características. Ambos planetas poseen

diferentes tiempos geológicos, en el caso de Marte existen 4 eras temporales, siendo de la más antigua a la más nueva la era Pre-Noeica, Noeica, Hespérica y la Amazónica (AAVV, 2019).

Centrándose en el tema de este trabajo, se procede a describir la geología y tectónica general de la zona a estudiar, que se localiza en la parte Norte de la región de Tharsis en el planeta Marte, más concretamente en el



volcán Alba Patera, y al Este de este mismo volcán los terrenos de Tempe Terra.

Figura 1. Mapa de ubicación de la zona de estudio marciana. Imagen obtenida de la página web USGS, editada por el autor.

Según Anderson et al. (2001), propone 5 escenarios principales de estructuras concéntricas y radiales formadas en los alrededores de Tharsis, en donde se ven involucradas también las zonas del volcán Alba Patera y Tempe Terra.

→ (Stage 1) En el primer escenario se generaron estructuras en los terrenos de Tempe Terra durante el Noeico.

→ (Stage 2) El segundo escenario no afecta al área de estudio, cese de la actividad tectónica.

→ (Stage 3) La tercera etapa se caracteriza por la formación de estructuras extensionales durante el Hespérico temprano, esto en las zonas de Tempe Terra y al norte de Alba Patera.

→ (Stage 4) El cuarto episodio sucede durante el Hespérico tardío y Amazónico temprano, donde se generan estructuras extensionales en los alrededores de Alba Patera. Este volcán dominó la actividad tectónica durante ese período.

→ (Stage 5) El quinto período se conoce por ser los últimos pulsos de la actividad tectónica en Marte, desde el Amazónico medio a tardío. Se caracteriza por las construcciones de grandes columnas volcánicas, las más grandes del sistema solar, entrando las regiones de Tharsis Montes y Olympus Mons.

Las estructuras radiales se han formado en todas las etapas, relacionadas a centros magmáticos locales, formadas en diferentes momentos y lugares de la evolución tectónica general de Tharsis (Anderson et al., 2001).



	Condiciones geológicas y ambientales de Marte	Formación del área de estudio según Anderson et al. (2001)
Presente		
Amazónico	Ambiente seco y frío Presión atmosférica muy baja La mayor parte del agua está congelada o se ha evaporado Predominio del óxido de hierro	Stage 5  Se conoce por ser los últimos pulsos de actividad tectónica en el planeta. Se caracteriza por las construcciones de grandes columnas volcánicas, las más grandes del sistema solar, entrando en las regiones de Tharsis Montes y Olympus Mons
		Stage 4 El volcán Alba Patera dominó la actividad tectónica durante este período, formando estructuras extensionales a sus alrededores
Hespérico	Se forman gran cantidad de volcanes pérdida del agua en la superficie pérdida acusada de la atmósfera Las condiciones en el cráter Gale son adecuadas para mantener vida bacteriana	Stage 3 Formación de estructuras extensionales en las zonas de Tempe Terra y al norte del volcán Alba Patera
		Stage 2 Cese de la actividad tectónica en el área de estudio
Noeica	Abundancia de agua ph neutro La atmósfera comienza a desaparecer Bombardeo meteorítico  Campo magnético comienza a desaparecer	Stage 1 Se generan estructuras en los terrenos de Tempe Terra. Correspondientes a las zonas más antiguas del área
Pre Noeica	Comienza a formarse la corteza Presencia de agua Atmósfera densa Presencia de campo magnético Formación del planeta	

Figura 2. Tabla geológica de tiempo, donde se escriben las principales condiciones ambientales y geológicas de cada era, junto con las interpretaciones de Anderson et al. (2001). Imagen confeccionada por el autor.

6. Cartografía y clasificación de estructuras

En la zona de estudio, se han cartografiado las estructuras con la finalidad de poder agruparlas en diferentes familias. Los criterios de clasificación fueron las orientaciones de las fracturas (1), geometría de propagación (2), y el contexto geológico de donde se encuentran ubicadas (3); Cada familia es clasificada por al menos 1 de estos criterios.

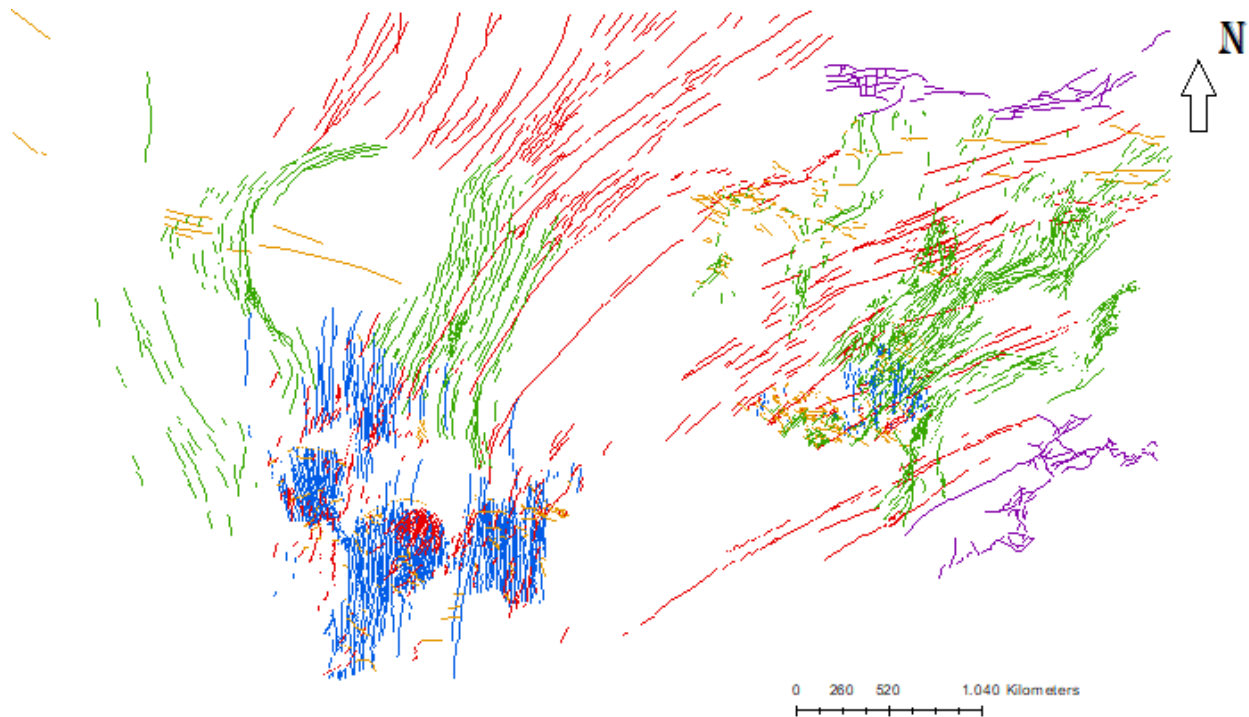


Figura 3. Mapeo de diferentes familias de estructuras ubicadas en el área de estudio marciana, las familias corresponden a las Fallas NE, Fallas NS, Fallas NW, Fallas Curvas y Fallas de Colapso. Imagen confeccionada por el autor.

En la Figura 3, se pueden observar 5 familias de fallas distintas clasificadas por el autor, donde a cada familia se le ha asignado un nombre y un color para facilitar su diferenciación. La primera familia corresponde a las “Fallas NE” (a), destacadas por un color rojo. Como su nombre lo indica, tienen una orientación preferencial NE, éstas y otras familias también se nombran en base a su orientación como criterio principal (1). Las Fallas NE se propagan a través de toda el área y de longitudes kilométricas, son las fallas que alcanzan las mayores extensiones, algunas superiores a los 1.000 Km. Se suelen crear cavidades o hundimientos de la superficie a lo largo de estas estructuras, una característica importante a analizar, esta familia tiene un total de 849 fallas cartografiadas. Luego está la familia de “Fallas NS” (b), de color azul, esta familia tiene una mayor densidad de fallas con respecto al área en comparación a las otras, observable en la parte SW del mapa, al sur del Volcán Alba Patera y también se encuentran en el sector de Tempe Terra, pero con una considerable disminución en su número, esta familia se ha clasificado en base al criterio de orientación (1), y tiene un total de 924 fallas cartografiadas. Las estructuras de color verde se clasificaron como “Fallas Curvas” (c), esto producto de que las fallas tienen naturaleza concéntrica,

es decir que su clasificación es en base a la geometría de propagación de las fracturas (2), dando una forma curiosamente circular, que a simple vista se interpreta que las fracturas se han propagado rodeando algún cuerpo o masa en la corteza, en este caso al volcán Alba Patera, y tienen un total de 1179 fallas cartografiadas. La siguiente familia se llama “Fallas NW” (d), de color naranja, donde su abundancia es poca en comparación a las otras familias y también carecen de extensas longitudes. El criterio de clasificación para esta familia ha sido principalmente el de la orientación predominante NW de las estructuras (1), este conjunto de fallas corresponden a un total de 447 fracturas mapeadas en el área. Finalmente, existe una última familia llamadas “Fallas de Colapso” (e), de color morado, estas estructuras parecen haberse formado en un contexto geológico distinto (3), las cuales bordean grandes cuencas y parecen ser fracturas formadas por colapso debido a la falta de material en las cuencas adyacentes. Estas fracturas tienen un total de 119 fallas mapeadas.

Cuento de fallas mapeadas	
NE	855
NS	774
Curvas	1.179
NW	444
Colapso	119
TOTAL	3.371

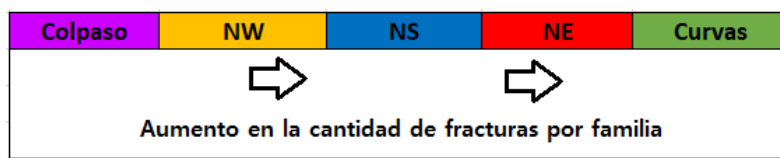
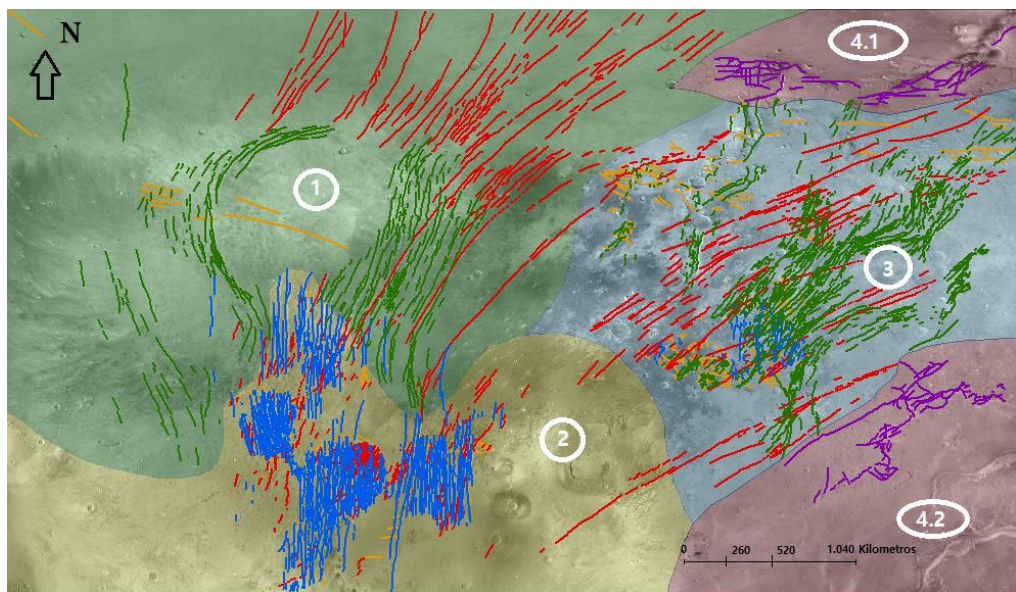


Tabla 1. Cuento de las diferentes familias de estructuras, con un total de 3.371 fallas; Imagen didáctica que representa el aumento de números de estructuras por familia. Tablas confeccionadas por el autor.

Una vez clasificadas las familias, el área total de estudio se divide en 4 zonas de interés estructural (Figura 4.), donde cada zona agrupa distintas familias y se hace un estudio individual en cada una. Esto con la finalidad de encontrar algún tipo de relación entre las diferentes zonas de estudio y ver si las familias de fallas están o no relacionadas unas con las otras, de esta forma se logra un estudio más detallado del área total y a su vez se podría llegar a explicar el contexto estructural a nivel regional.

Figura 4. Mapa del área de estudio con sus zonas diferenciadas, correspondientes a las zonas 1, 2, 3, 4.1 y 4.2. Imagen confeccionada por el autor.



7. Resultados

7.1 Análisis de estructuras

Zona 1

En la Figura 5, se observa que las fracturas NW tienden a ser perpendiculares a las fallas Curvas, patrón que también se repite en la zona 3 (Figura 16).

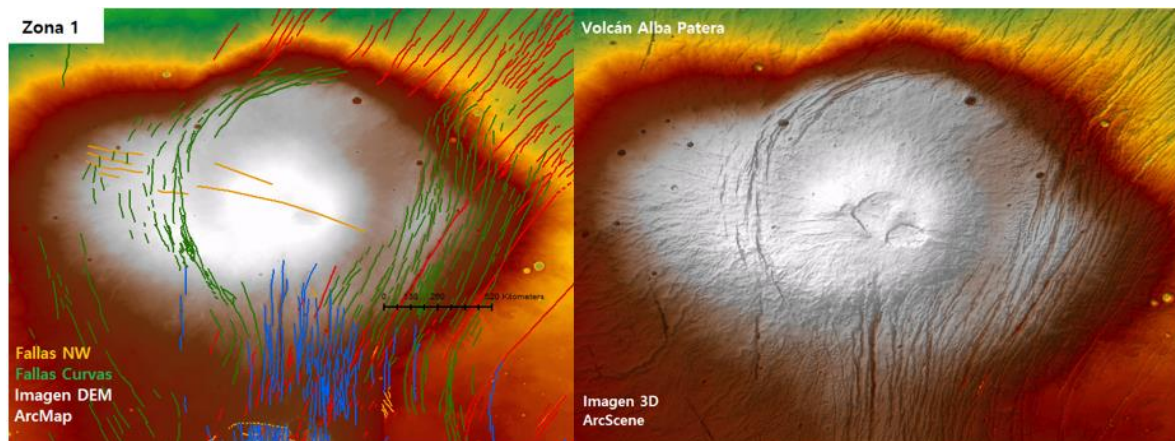


Figura 5. Estructuras NW en el volcán Alba Patera, las cuales se encuentran perpendiculares a las Fallas Curvas. Imagen confeccionada por el autor.

En la Figura 6, se observan formas circulares a lo largo de las estructuras NE, correspondientes a depresiones producto de extensión en dirección NW-SE, generando así fallas normales.

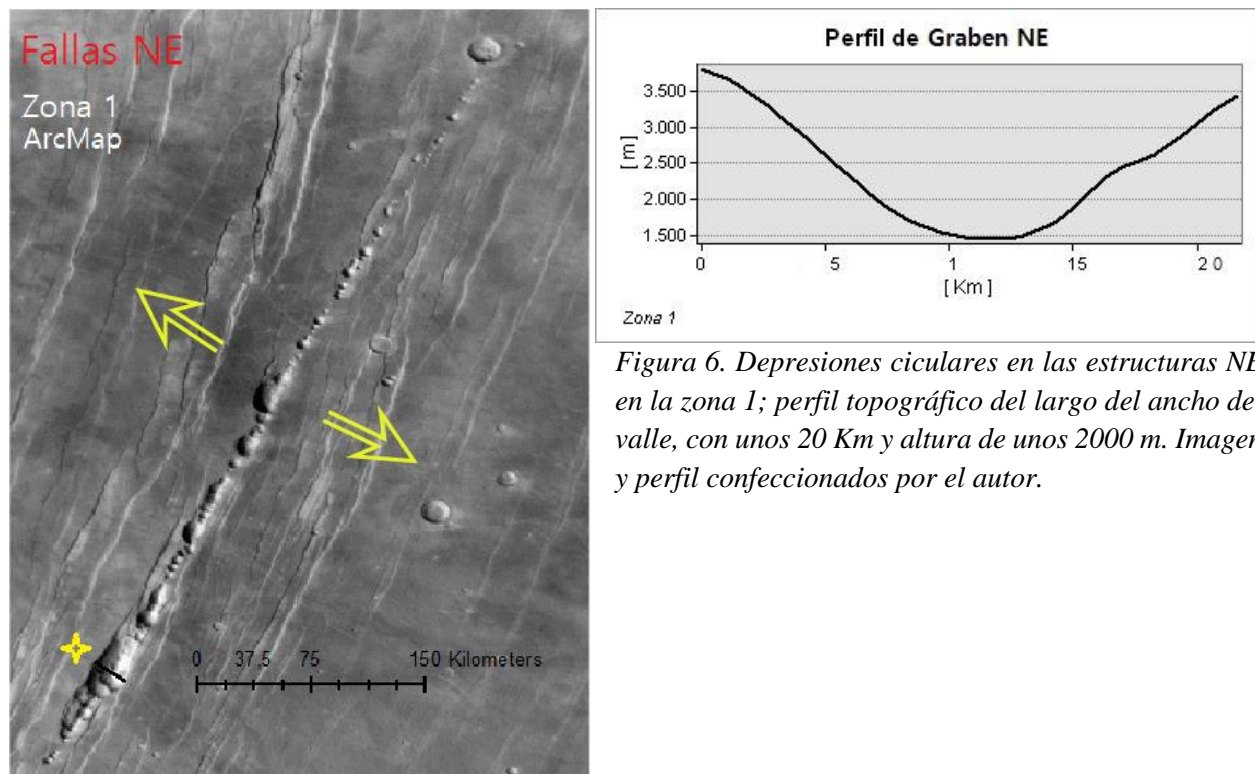


Figura 6. Depresiones ciculares en las estructuras NE en la zona 1; perfil topográfico del largo del ancho del valle, con unos 20 Km y altura de unos 2000 m. Imagen y perfil confeccionados por el autor.

Zona 2

En la Figura 7, se observa propagación longitudinal de las estructuras NS, correspondiente a una zona de relevo. Estas estructuras secundarias se forman producto de una extensión en dirección EW, generando así fallas normales.

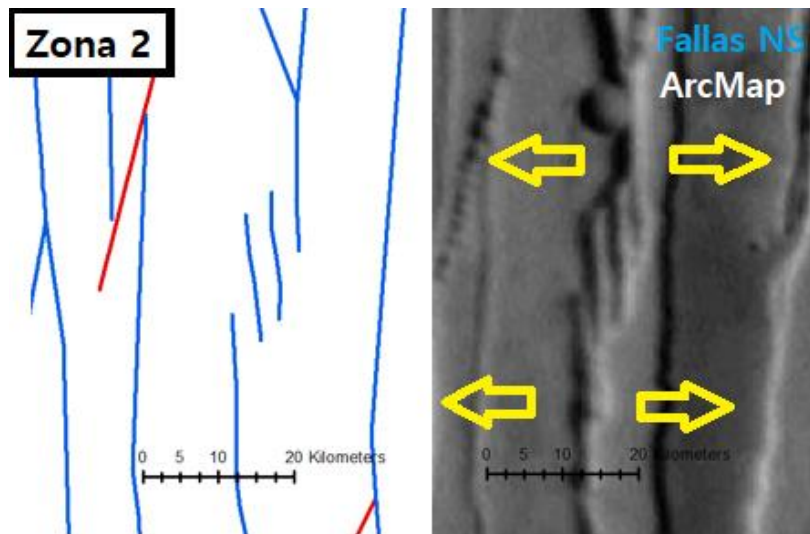


Figura 7. Extensión EW genera una propagación longitudinal de las estructuras NS. Imagen confeccionada por el autor.

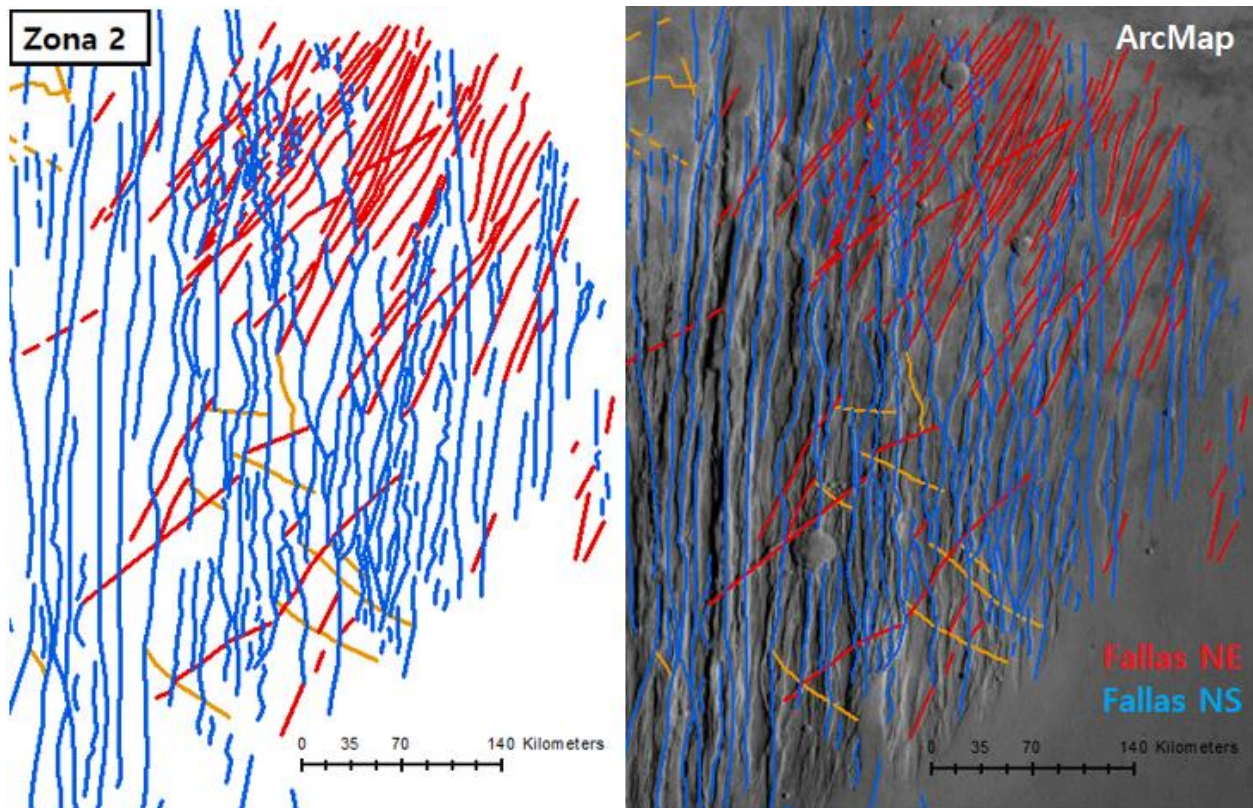


Figura 8. Las Fallas NE deforman de forma local a las Fallas NS en la zona 2, mostrando reactivación tardía de las fallas NE. Las Fallas NE son posteriores a las NS. Imagen confeccionada por el autor.

En la zona 2 también se observan cambios direccionales de las fallas NS, como se observa en la Figura 9, donde las estructuras no obedecen su orientación principal NS. Esto puede deberse a que las estructuras se formaron por medio de un “abombamiento” en el ascenso magmático, formando estructuras de la familia NS irregulares y locales. En la misma imagen también se puede observar una estructura de tipo punto triple, indicando extensión radial, mismo proceso que desorienta las estructuras NS y misma ubicación, rectificando la hipótesis del área local.

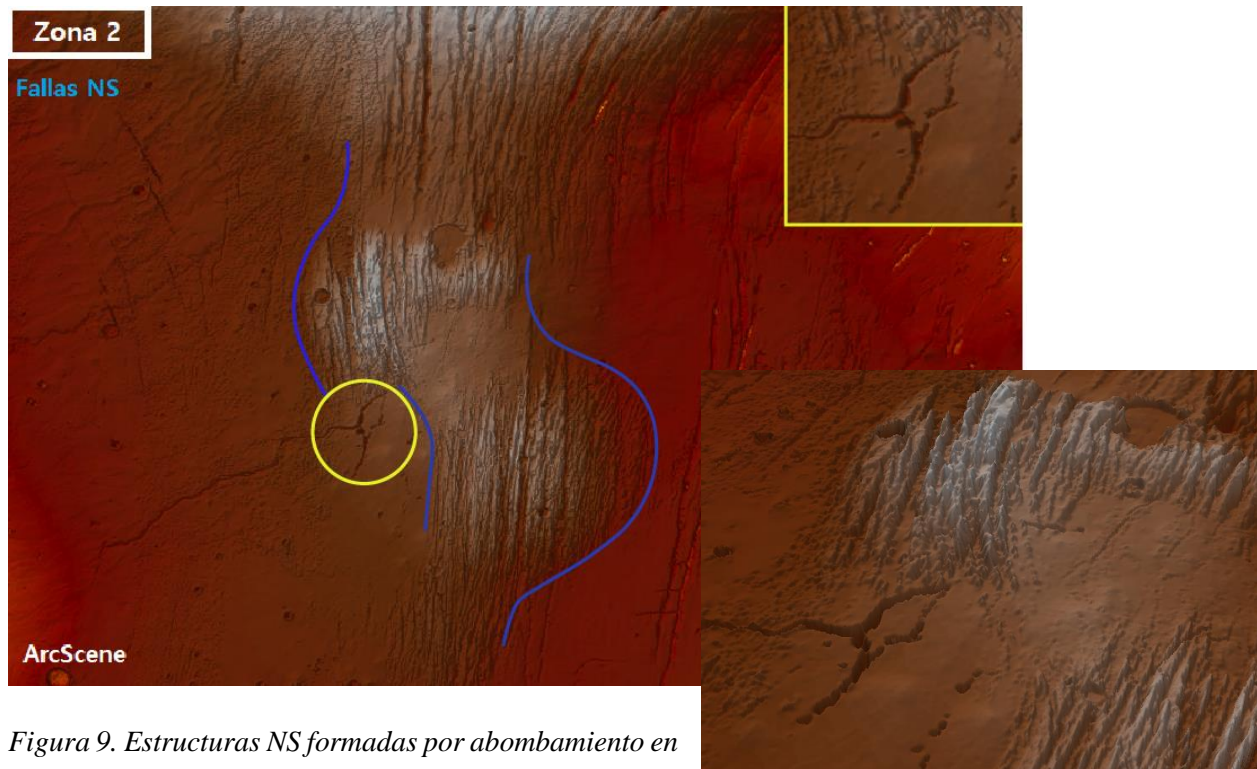


Figura 9. Estructuras NS formadas por abombamiento en el ascenso magmático. En el recuadro amarillo se puede ver estructuras tipo punto triple, típico de extensión radial. Imágenes confeccionadas por el autor.

Al igual que la zona 1, en la zona 2 se observan depresiones circulares a lo largo de las fracturas, indicando la presencia de extensión y en consecuencia fallas normales para las familias NE y NS (Figuras 6 y 7). Para esta zona las direcciones de extensión son NW-SE y EW para las familias de fallas NE y NS respectivamente.

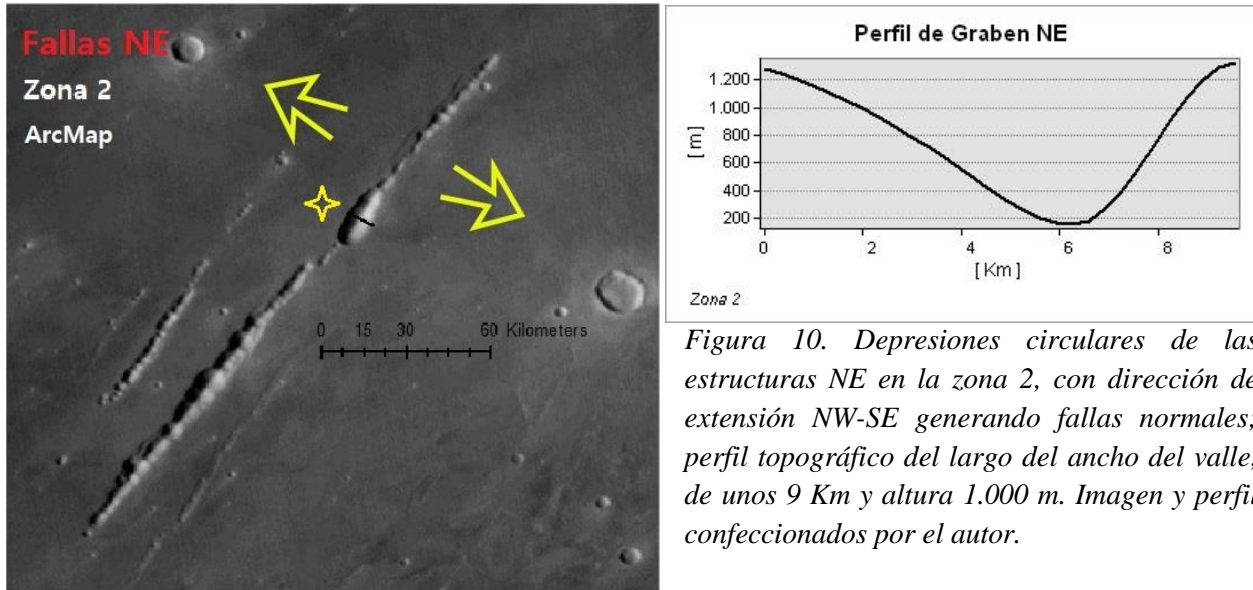


Figura 10. Depresiones circulares de las estructuras NE en la zona 2, con dirección de extensión NW-SE generando fallas normales; perfil topográfico del largo del ancho del valle, de unos 9 Km y altura 1.000 m. Imagen y perfil confeccionados por el autor.

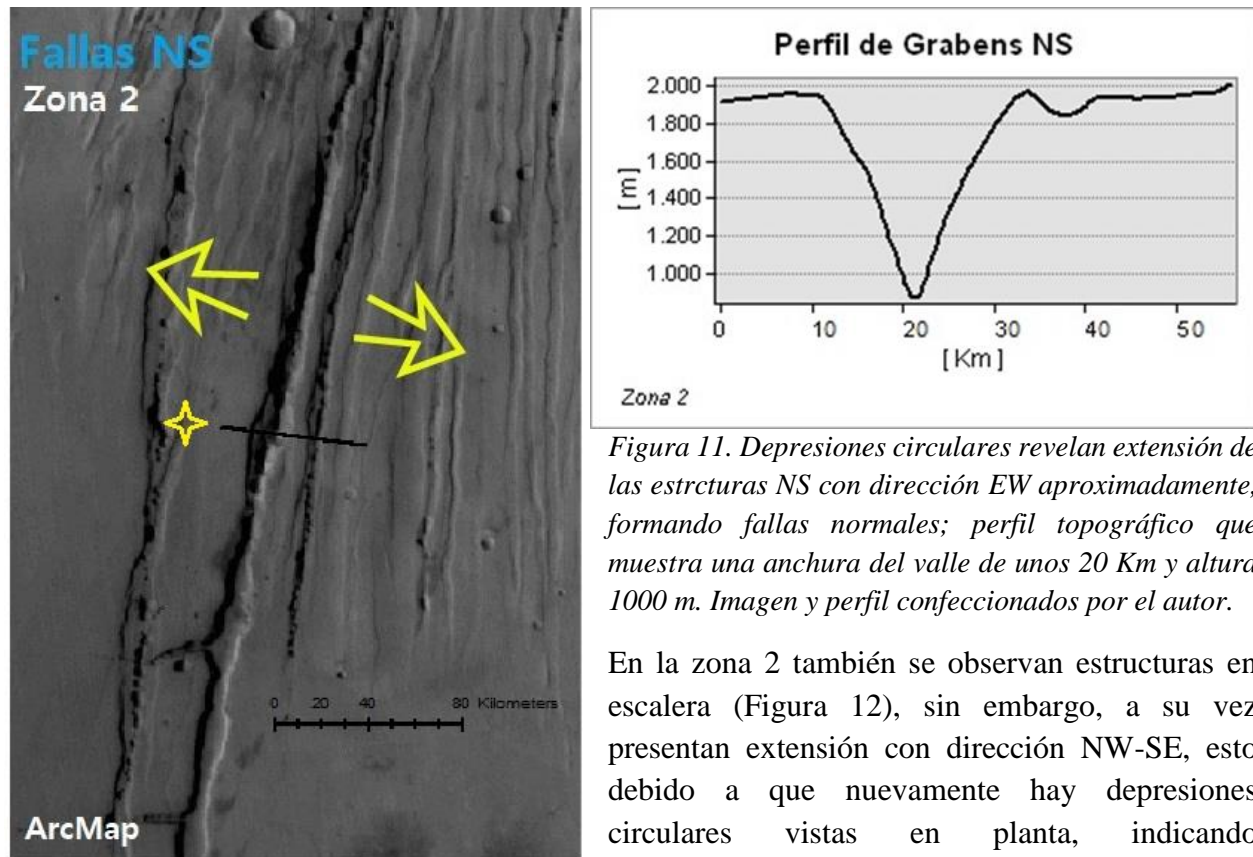


Figura 11. Depresiones circulares revelan extensión de las estructuras NS con dirección EW aproximadamente, formando fallas normales; perfil topográfico que muestra una anchura del valle de unos 20 Km y altura 1000 m. Imagen y perfil confeccionados por el autor.

En la zona 2 también se observan estructuras en escalera (Figura 12), sin embargo, a su vez presentan extensión con dirección NW-SE, esto debido a que nuevamente hay depresiones circulares vistas en planta, indicando profundización a lo largo de la estructura. El hecho de haber extensión descarta la posibilidad de ser una zona de cizalla, forma en la cual tienden a presentarse estas estructuras. Su respectivo perfil muestra como hay mayor diferencia de altura en la sección por donde atraviesan las fallas NE, depresiones en donde sus flancos corresponden a posibles planos de fallas normales.

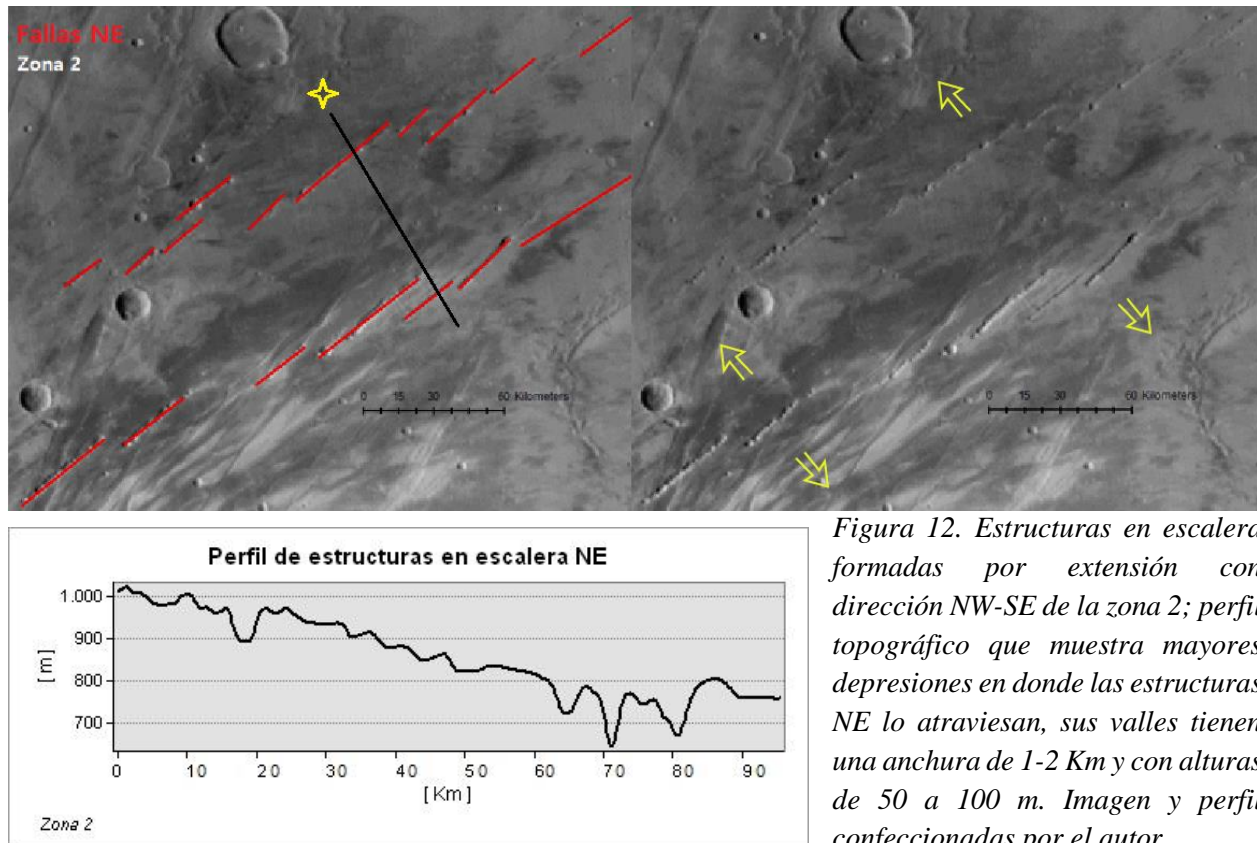


Figura 12. Estructuras en escalera formadas por extensión con dirección NW-SE de la zona 2; perfil topográfico que muestra mayores depresiones en donde las estructuras NE lo atraviesan, sus valles tienen una anchura de 1-2 Km y con alturas de 50 a 100 m. Imagen y perfil confeccionadas por el autor.

Zona 3

En la zona 3 se vuelven a observar registros extensionales, en esta zona están desde los valles más pequeños hasta los de mayores dimensiones. En la Figura 13, las fallas NE presentan extensión NW-SE, donde la anchura del valle generado tiene 8 Km de ancho y 200 m de alto, correspondiente al posible valle de menores dimensiones en el área de estudio. En la misma zona, con la misma familia de fallas NE, están las mayores dimensiones de valles registradas del área, con anchuras desde los 20 hasta los 40 Km y alturas desde los 1.000 a 2.000 m. La única estructura comparable está en la zona 1 (Figura 6), con un valle de 20 Km de ancho y 2000 m de alto, sin embargo, su morfología con laderas de pendientes bajas, no presentan una evolución tan desarrollada como las estructuras de la zona 3, donde se observan laderas más rectas con pendientes más acusadas (Figuras 14 y 15).

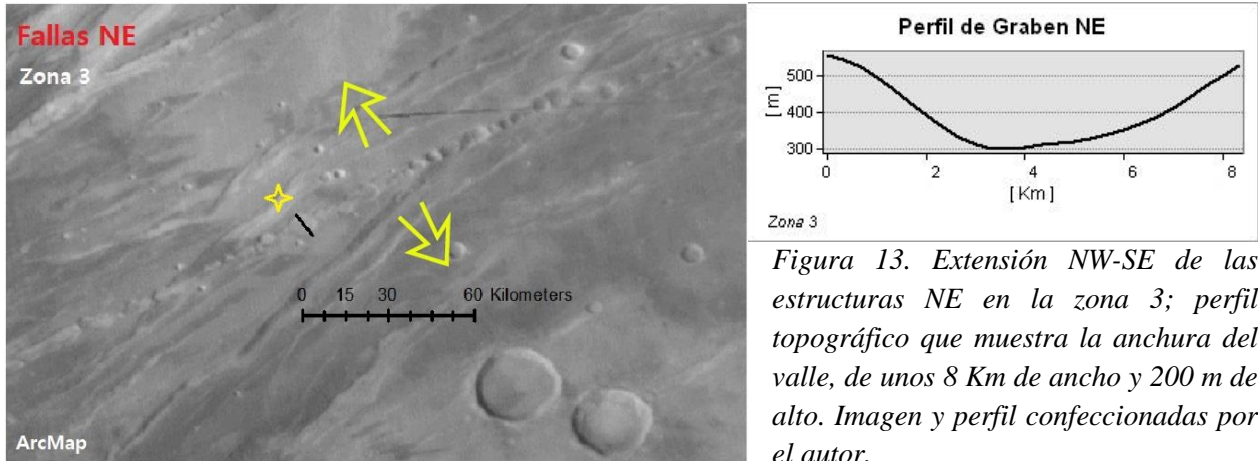


Figura 13. Extensión NW-SE de las estructuras NE en la zona 3; perfil topográfico que muestra la anchura del valle, de unos 8 Km de ancho y 200 m de alto. Imagen y perfil confeccionadas por el autor.

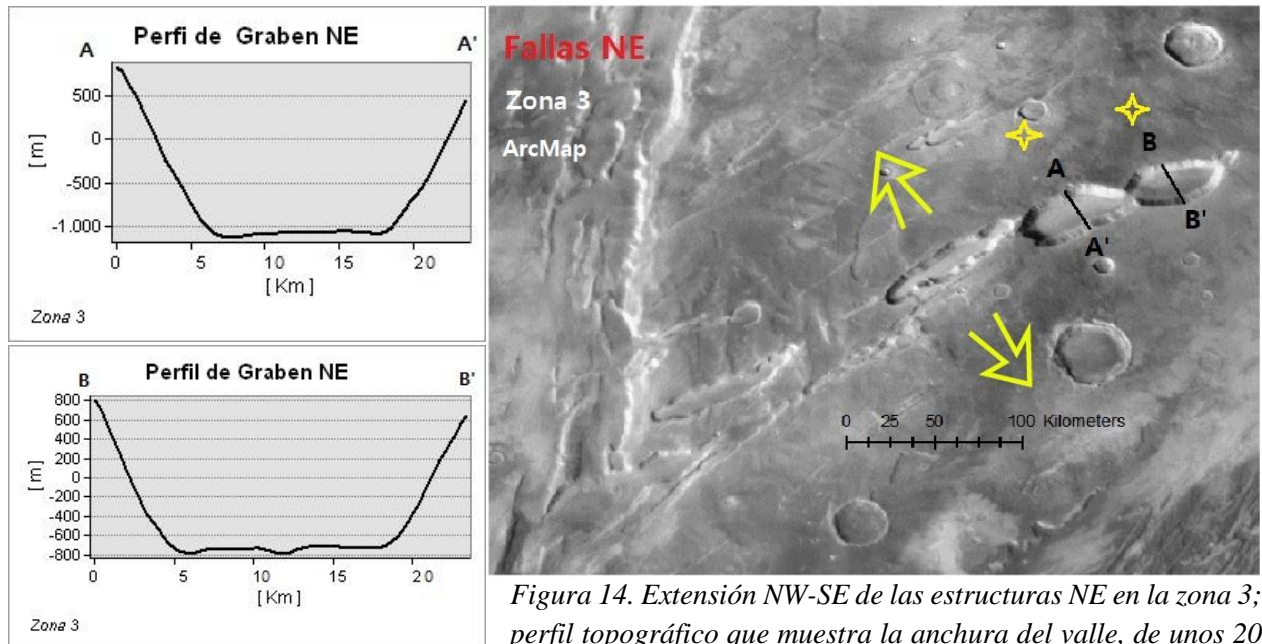


Figura 14. Extensión NW-SE de las estructuras NE en la zona 3; perfil topográfico que muestra la anchura del valle, de unos 20 Km de ancho y de 1800 a 2000 m de alto. Imagen y perfiles confeccionadas por el autor.

En la Figura 15, se observan valles y montes de grandes dimensiones, con alto desarrollo de laderas rectas y altas pendientes. Los anchos de los valles alcanzan los 40 Km y las mayores diferencias de altura alcanzan unos 1500 m.

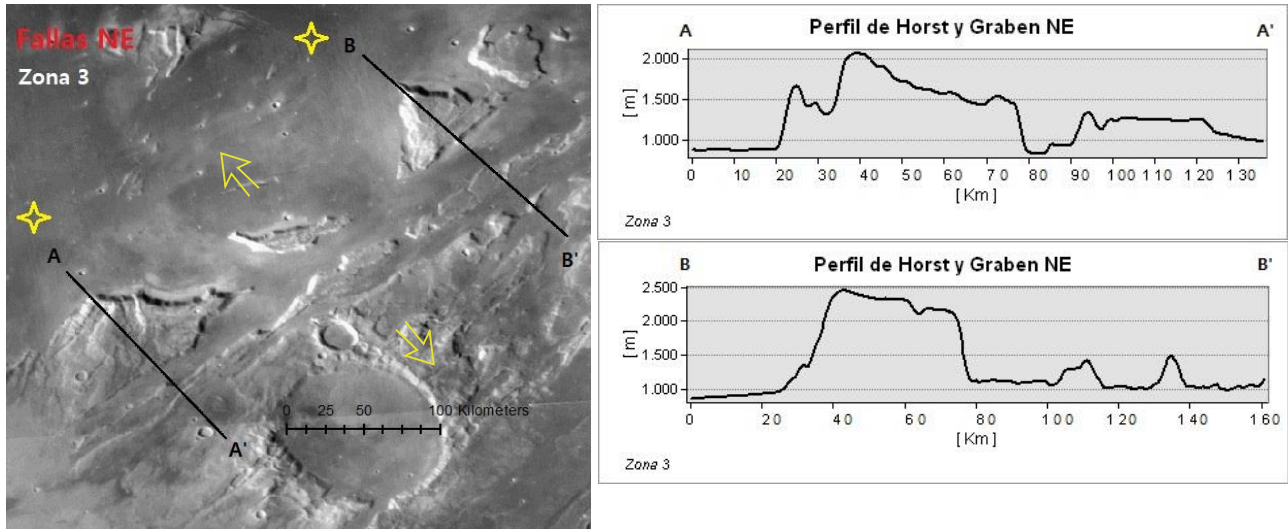


Figura 15. Sistemas de Horst y Graben de mayores dimensiones del área de estudio, ubicados en la zona 3; los perfiles A-A' y B-B' muestran las morfologías de las laderas desarrolladas de los sistemas de Horst y Graben. Imagen y perfiles confeccionadas por el autor.

En la zona 3, se vuelve a observar que las estructuras NW tienden a ser perpendiculares a las fallas Curvas, como en la zona 1, solo que en esta área también tienden a ser perpendiculares a la familia de fallas NE (Figura 6.2.12.).

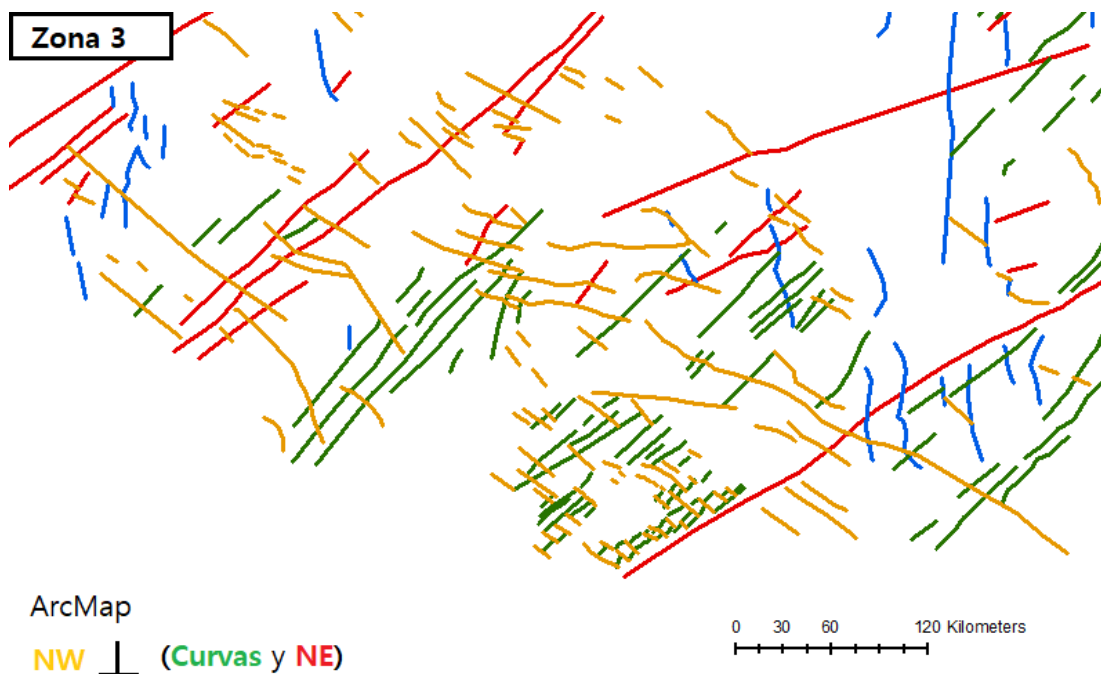


Figura 16. Estructuras NW tienden a ser perpendiculares a las familias NE y Curvas en la zona 3. Imagen confeccionada por el autor.

7.2 Diagramas Rosa

Se han confeccionado diagramas rosas para cada zona del área de estudio marciana, donde sus colores representan a cada familia clasificada anteriormente, y muestran las direcciones preferenciales por familia, así como su frecuencia en rangos de 10° a 20° con respecto a las direcciones de fracturas.

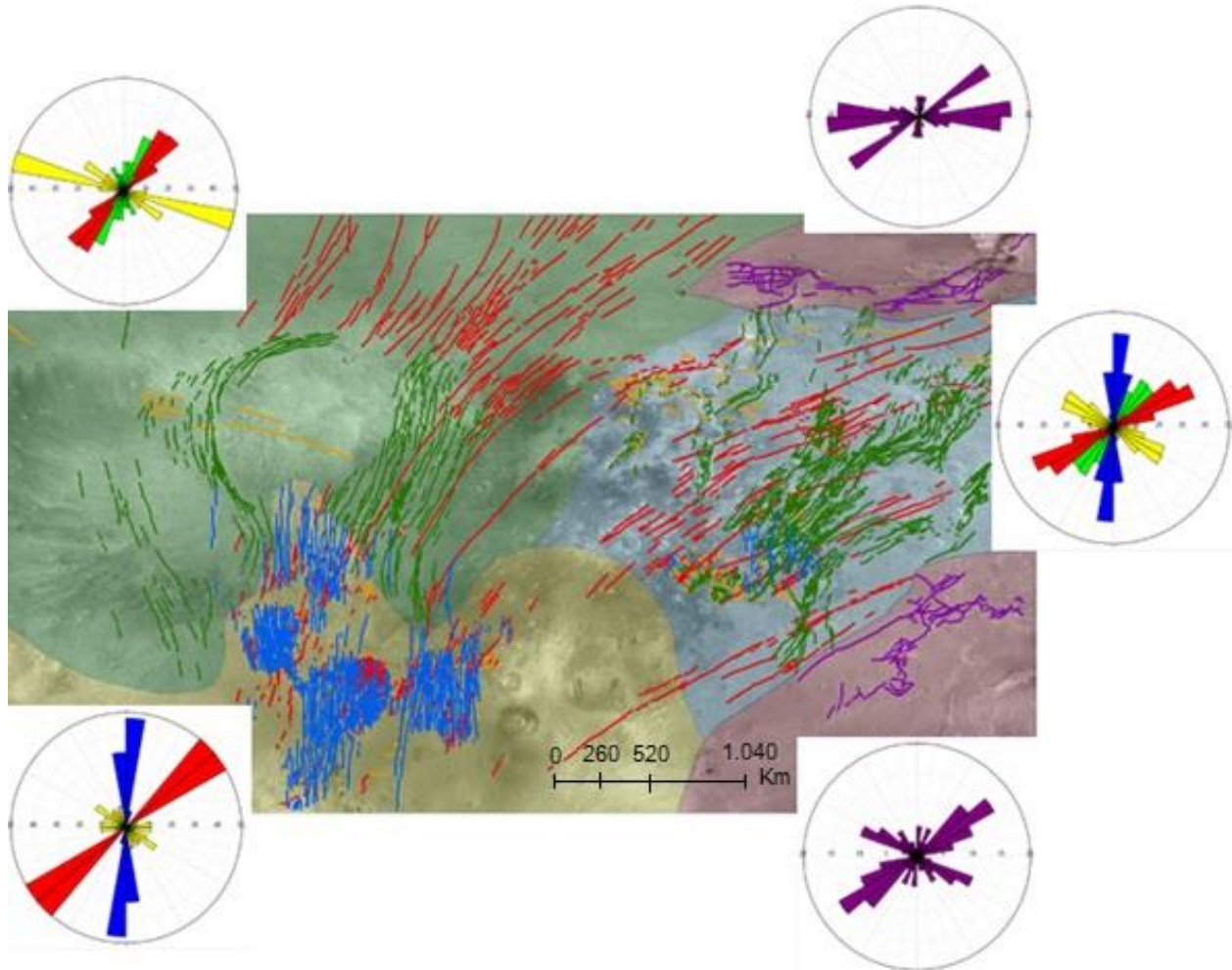
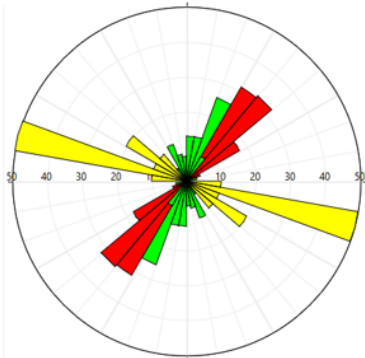


Figura 17. Mapa del área de estudio marciana, diferenciada por sus diferentes zonas (1, 2, 3, 4.1 y 4.2) y con sus respectivas rosas direccionales. Imagen confeccionada por el autor.

A continuación, se muestran los diagramas en rosa de cada zona y la representación de sus datos en tablas, dando a conocer las direcciones preferenciales de cada familia de fracturas junto con sus frecuencias, donde esta última corresponde al porcentaje de fracturas que siguen una dirección preferencial. En las siguientes tablas los datos colocados representan a los valores de más alta frecuencia encontrada por familia y por zona.

Zona 1



Zona 1	Frecuencia (0%-100%)	Dirección (0°-360°)
NW	50	100 - 110
NE	30	30 - 50
Curvas	25	20 - 30

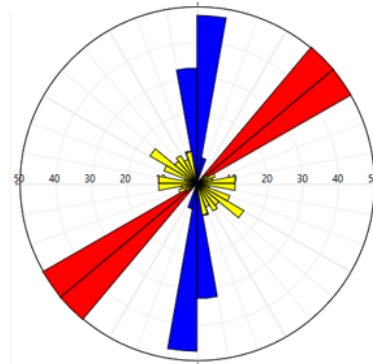
Figura 18. Diagrama rosa de la zona 1 con sus respectivas familias; tabla que muestra la mayor frecuencia en porcentaje con respecto a una dirección preferencial de las estructuras. Diagrama confeccionado por el autor.

La Figura 18, corresponde al diagrama rosa de la zona 1, se observa que las Fallas NW tienen una menor dispersión de datos, más precisas, sin embargo son las que presentan menor número de estructuras en dirección NW, no comparable con las NE y Curvas en

donde hay mayor abundancia. Las Fallas Curvas tienen muy alta dispersión en sus direcciones, mostrando solo una media del 25% en coincidencia direccional, esto producto de que estas estructuras tienen naturaleza concéntrica, por lo tanto mayor variedad direccional y por ende mayor dispersión de sus datos. Las Fallas NE ocupan una posición intermedia entre las familias NW y las Curvas, pero con una dispersión muy similar a las de las Fallas Curvas, con una diferencia del 5 % en su frecuencia, aunque con diferentes rangos de ángulos. En resumen las familias de menor a mayor dispersión para la zona 1 son: NW<NE<Curvas.

Zona 2

Figura 19. Diagrama rosa de la zona 2 con sus respectivas familias; tabla que muestra la mayor frecuencia en porcentaje con respecto a una dirección preferencial de las estructuras. Diagrama confeccionado por el autor.

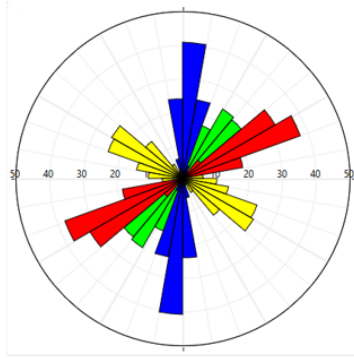


Zona 2	Frecuencia (0%-100%)	Dirección (0°-360°)
NS	48	0 - 10
NE	50	40 - 60
NW	15	120 - 130

La Figura 19. representa al diagrama rosa de la zona 2, donde las Fallas NE de frecuencia 50% muestran la menor dispersión, aunque por poco le siguen las Fallas NS con un variación mínima del 2%, y finalmente las Fallas NW presentan la mayor dispersión de datos,

con valores de frecuencia de solo el 15% de coincidencia direccional. En resumen las familias de menor a mayor dispersión para la zona 2 son: NE<NS<NW.

Zona 3



Zona 3	Frecuencia (0%-100%)	Dirección (0°-360°)
NS	40	0 - 10
NE	35	50 - 70
NW	25	110 - 130
Curvas	25	30 - 50

Figura 20. Diagrama rosa de la zona 3 con sus respectivas familias; tabla que muestra la mayor frecuencia porcentual con respecto a una dirección preferencial de las estructuras. Diagrama confeccionado por el autor.

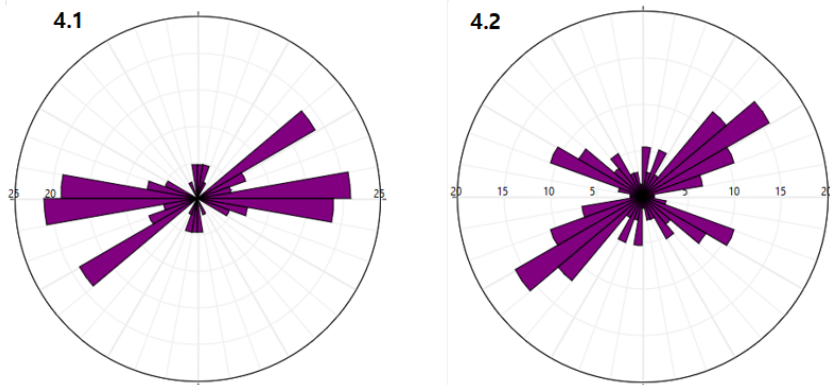
La Figura 20, representa al diagrama rosa de la zona 3, correspondiente a la zona que abarca el mayor número de familias de fallas, las NS, NE, NW y Curvas. Las fallas NS son las que presentan menor dispersión de datos, con una frecuencia del 40%, le siguen las estructuras NE, con un 35% en una dirección preferencial entre los 50°-

70°. Finalmente le siguen las estructuras Curvas y NW, con coincidencia direccional de solo un 25%, entonces el orden de menor a mayor a dispersión entre las familias es la siguiente es la siguiente:

NS<NE<(NW=Curvas).

Zona 4

Figura 21. Diagrama rosa de las zonas 4.1 y 4.2 con su respectiva familia de Colapso; tabla que muestra la mayor frecuencia porcentual con respecto a una dirección preferencial de las estructuras. Diagrama confeccionado por el autor.



Zonas 4.1 y 4.2	Frecuencia (0%-100%)	Dirección (0°-360°)
Colapso 4.1	22	80 - 90
Colapso 4.2	16	50 - 60

La Figura 21, corresponde a los diagramas rosa de las zonas 4.1 y 4.2, donde se observa una dirección preferencial de las fracturas entre los 80° y 90° para la zona 4.1, pero con solo un 22% de frecuencia

lo que indica más bien alta dispersión de los datos. En la zona 4.2 las direcciones preferenciales son distintas, entre los 50° y 60° con una frecuencia del 16%, representando aun mayor dispersión que la zona 4.1.

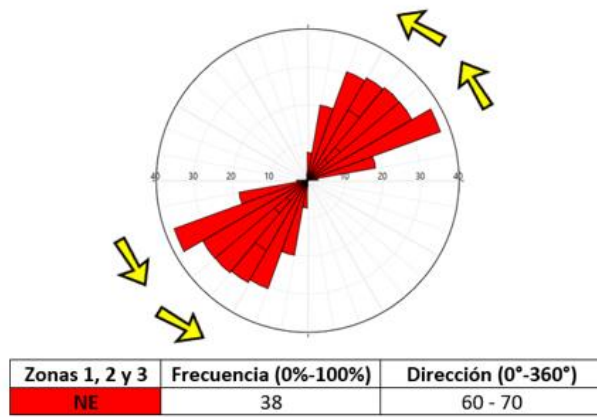


Figura 22. Diagrama rosa de las zonas 1, 2 y 3 de las fallas NE; tabla que muestra la mayor frecuencia porcentual con respecto a una dirección preferencial de las estructuras. Diagrama confeccionado por el autor.

Al ser las estructuras NE las únicas que se distribuyen a lo largo de toda el área, se les ha realizado un diagrama rosa direccional solo para su familia en el área de estudio general, correspondiente a las zonas 1, 2 y 3. Donde se observa una dirección preferencial de las

fracturas en el rango de 60° y 70° con frecuencia de un 38%, datos correspondientes a la zona 3. En el mapa cartográfico del área de estudio (Figura 3), se observa una transición de las estructuras NE desde los terrenos de Tempe Terra hasta el volcán Alba Patera en cambiar de dirección con sentido anti-horario.

7.3 Perfiles topográficos

Se confeccionaron 20 perfiles topográficos a lo largo de toda el área de estudio, con la finalidad de poder visualizar mejor el relieve, y así comprender mejor la naturaleza de las estructuras. Los perfiles van desde la letra A a la S y se encuentran en el apartado de “Anexos”.

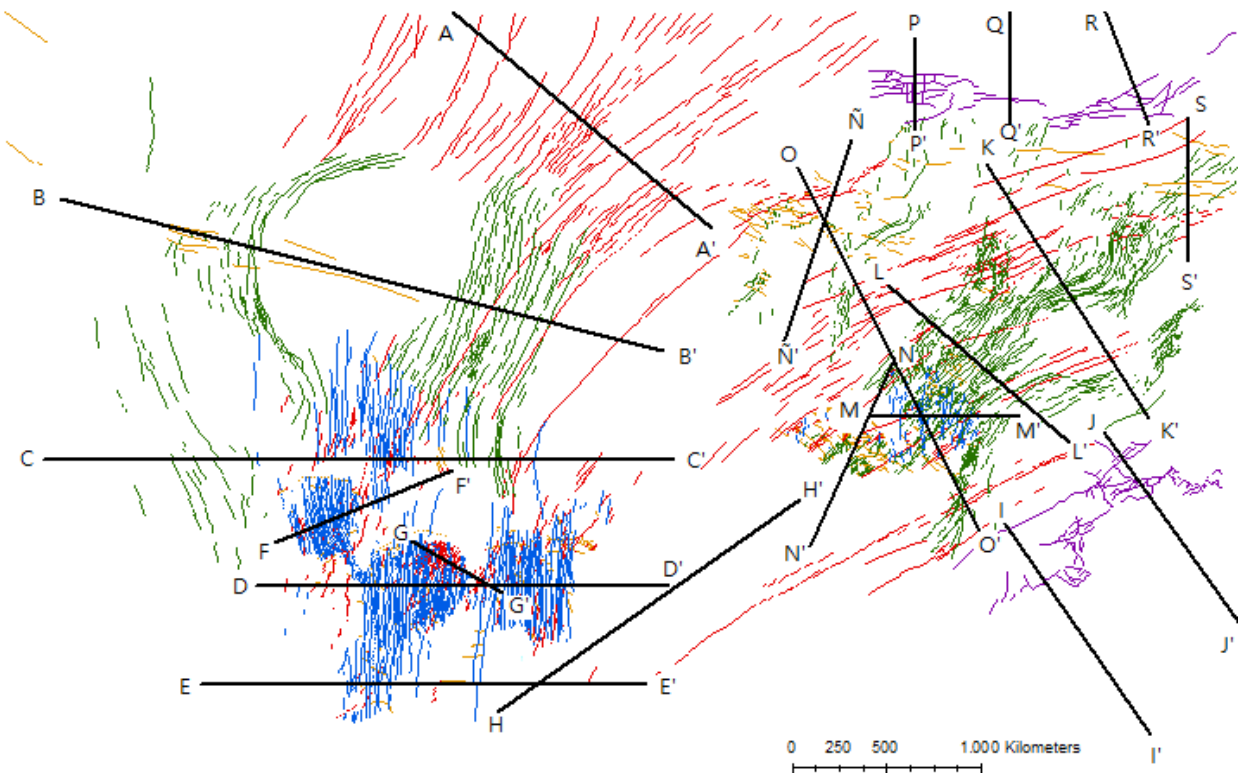


Figura 23. Mapa que muestra los perfiles topográficos a lo largo de toda el área de estudio (Anexos desde el 4 al 23), desde la letra A hasta la S, con un total de 20 perfiles.

7. Interpretaciones

Las estructuras radiales que rodean el volcán Alba Patera, son comparables con lo que sugirió Odé (1.957), “superposición de una distribución radial de esfuerzos alrededor del centro volcánico sobre un campo regional”, el autor explica que las estructuras se forman a partir de una superposición en los campos de esfuerzos en el momento del emplazamiento del volcán (Figura 24) (Ramsay, J., 1977).

Para el caso del área de estudio, se observan estructuras de puntos triples y cambios direccionales de las fallas NS en la zona 2, indicando posible extensión radial o abombamiento de la corteza producto del ascenso magmático del volcán, rectificando la idea de Odé. Si este fuera el caso, las trayecciones de las estructuras reflejarían la distribución de los esfuerzos, donde las estructuras NE, Curvas y NS corresponderían a las trayectorias de esfuerzo sigma 2. Sigma 3 tiene una dirección perpendicular a sigma 2, esto podría reflejarse en las estructuras NW, que tienden a ser perpendiculares a las familias NE y Curvas, mostrando posiblemente de forma visual las direcciones de trayectoria de sigma 3 sobre el terreno. Y sigma 1, el mayor esfuerzo, estaría de forma vertical posicionado en el centro de la columna volcánica.

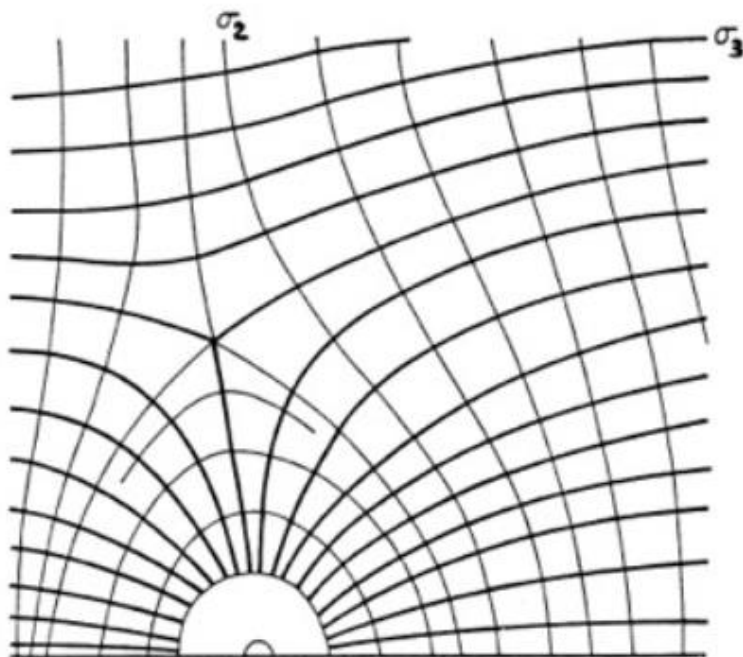


Figura 24. Trayectorias del esfuerzo resultantes de la superposición de un sistema de esfuerzos alrededor de un centro volcánico sobre un campo regional (Odé, 1957).

Entonces las familias de fallas NS, Curvas, y parte de las NE, tienen un origen común, formadas por el ascenso de un cuerpo magmático, es decir que el origen del volcán representaría también el origen de estas 3 familias de fallas, que al final terminan siendo una sola.

Las fallas de Colapso, en las zonas 4.1 y 4.2, se ubican rodeando las zonas más profundas del área de estudio, antiguas cuencas fluviales

y océanos, en comparación con las tierras elevadas de Alba Patera y Tempe Terra. Estas estructuras parecen haberse desprendido del bloque general por la ausencia de material en las cuencas, sin embargo, sus orientaciones parecen seguir a las familias de estructuras NE en la zona 4.2, probablemente las fallas de Colapso estén condicionadas a estas estructuras previas, aunque en la zona 4.1 no se observan tales coincidencias direccionales. En general, son estructuras aisladas al

resto de las otras familias, donde no parecen perturbarse unas a las otras. Por ende, suponen una formación independiente a los otros grupos, con sus propios factores de formación.

Las fallas NE muestran registros de extensión con dirección NW-SE en el área de estudio, correspondientes a fallas normales, formando sistemas de Horst y Graben como se observa en la Figura 15. Esto producto de una extensión regional, donde las estructuras NE son las que mejor indican su propagación, siendo estas las que se distribuyen por toda el área y las que tienen los más grandes valles, mostrando un mayor desarrollo en su extensión. Además, se observa un desarrollo morfológico en sus laderas, las cuales evolucionan a ser más rectas con pendientes más acusadas a lo largo del tiempo y desarrollo tectónico (Figuras 14 y 15).

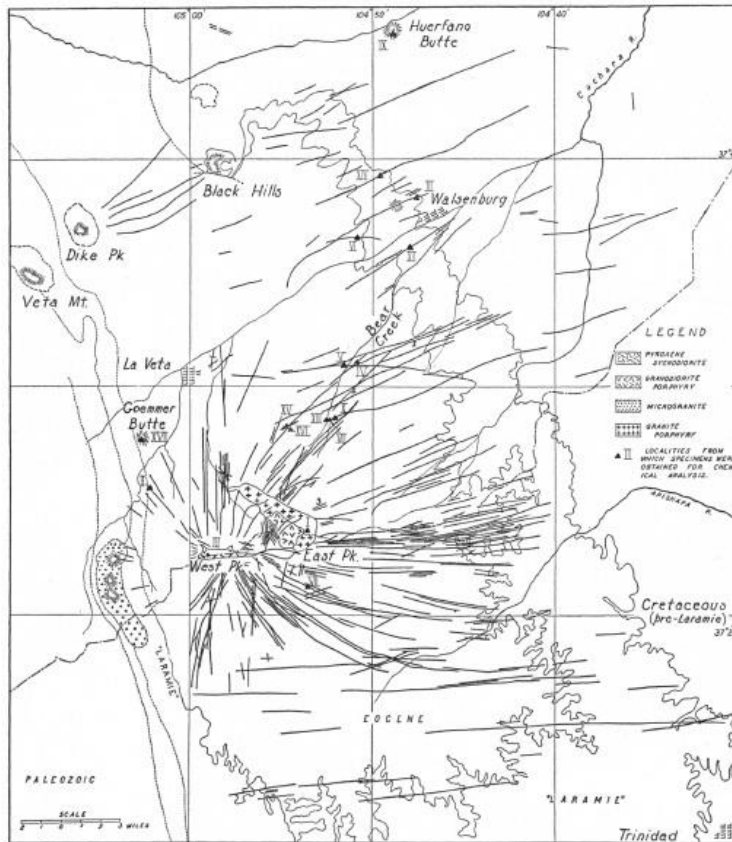
En el diagrama rosa de la Figura 22, se observa un amplio abanico de direcciones preferenciales para las estructuras NE, datos recolectados de las zonas 1, 2 y 3, donde las direcciones de extensión de la zona 3 son las que alcanzan la mayor frecuencia porcentual con un 38% en coincidencia direccional. Luego le siguen en sentido anti-horario las direcciones NE de las zonas 1 y 2 (en ese orden). Por lo tanto, la dispersión de los datos NE con respecto a sus diferentes zonas, podrían respaldar el hecho de que la dirección de extensión regional ha variado durante su evolución tectónica. Donde primeramente dominó la extensión con dirección (0, 330°-340°), estructuras cartografiadas en los terrenos más antiguos (zona 3), luego la extensión regional fue migrando direccionalmente en sentido anti-horario, llegando a unas direcciones de extensión de (0, 300°-320°) registradas en la zona 1, y finalmente con datos de la zona 2, registros de dirección extensional de unos (0, 290°-300°).

Por lo tanto, no solo el volcán Alba Patera es el causante de la formación de todas las estructuras del área de estudio, existe otro condicionante, correspondiente a una extensión general NW-SE que genera estructuras NE-SW, vistas en las zonas 1, 2 y 3. Esta extensión que se registra en la mayor parte del área, puede deberse a un alzamiento regional de la corteza, siendo las tierras de Alba Patera y Tempe Terra las zonas más elevadas.

Las estructuras en escalera de la Figura 12, podrían representar de cierta forma el alzamiento cortical, donde el peso de la columna volcánica o de las tierras altas hacen una diferencia isostática con respecto a las depresiones al SE del mapa, donde se encuentran los antiguos cauces fluviales. Además, las estructuras NE deforman de forma local a las fallas NS en la zona 2, indicando posible reactivación por parte de las estructuras NE, donde probablemente el causante de esa reactivación ya no es el volcán Alba Patera, sino más bien la extensión regional que presenta la zona debido al alzamiento cortical.

9. Comparaciones entre la Tierra y Marte

9.1 Spanish Peaks, Colorado



Las estructuras que rodean al volcán Alba Patera, tienen su comparable terrestre, correspondiente al trabajo de Odé (1957). Este estudio fue realizado sobre el complejo sistema de diques alrededor de un macizo volcánico central de la zona Spanish Peaks, Colorado (Figura 25). Los diques irradian a partir del centro volcánico. Los del lado Este tienden a ser más largos que los del lado Oeste, además tienden a curvarse hacia el Este. A distancias de más de 12 Km a partir del centro, los diques tienen una disposición más regular y lineal.

Figura 25. Sistema de diques de los Spanish Peaks, zona de Colorado (Knopf, 1936).

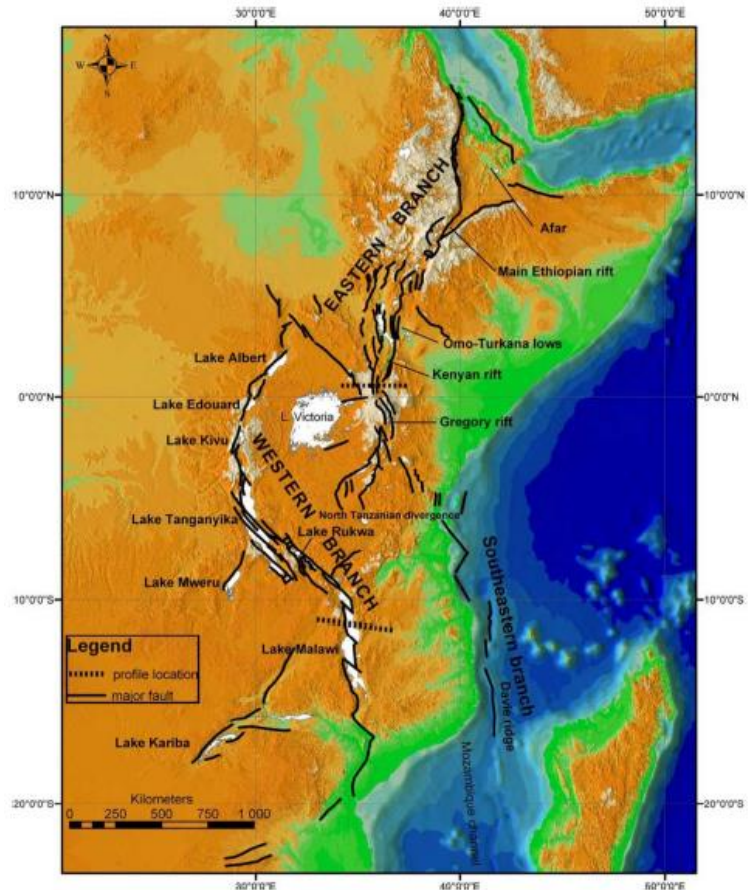
Algunos modelos de distribución de diques en otras regiones volcánicas del mundo muestran formas bastante similares y pueden ser también el resultado de la superposición de campos locales de esfuerzos de intensidad variable alrededor de centros volcánicos sobre campos más uniformes de esfuerzos regionales (Ramsay, 1977).

9.2 Eastern rift, África

Los sistemas de Horst y Graben en el área de estudio marciana, son comparables con otros sistemas extensionales terrestres que dan origen a las mismas estructuras, como es el caso del Valle de Rift en África.

Figura 26. DEM hipsográfica de las OREJAS. Líneas negras, fallas principales; superficies blancas, lagos; niveles de gris desde oscuro (elevaciones bajas) a claro (elevaciones altas). El EARS es una serie de sucesiones alineadas de varios miles de kilómetros de cuencas tectónicas individuales adyacentes (valles de rift). Puede considerarse como un sistema de cresta intracontinental que comprende una grieta axial (Chorowicz, 2005).

El modelo ampliamente aceptado de la formación de las OREJAS en el Valle de Rift, se basa en la suposición de que existe calor elevado en el flujo del manto superior causando un par de protuberancias térmicas en el centro de Kenia y la Región lejana del centro norte de Etiopía. Las protuberancias pueden verse fácilmente como elevadas tierras altas en cualquier mapa topográfico de la zona. A medida que se forman estas protuberancias, se estiran y fracturan la corteza frágil externa en una serie de fallas normales que forman los clásicos sistemas de Horst y Graben del valle de rift. (Kandie, 2015).



10. Conclusions

There are two tectonic causes that generate the structures of the area. The first one corresponds to a regional extension, main orientation (0, 330, - 340,) where its tectonic activity deforms the whole area, being the main cause of the general deformation in the zone. The second cause is the magmatic ascent that formed the volcano Alba Patera, these being the radial structures that surround the volcano and their respective extensions.

The regional extension of the study area according to Anderson (2001), begins in the Noeico, and ends in the early Hesperic, generating during that period Horst and Graben system along most of the area. It's possible that regional extensión direction has varied during its tectonic evolution, where the older NE structures (zone 3), reveal an extension direction (0, 330, - 340), and in zones 1 and 2 their extension directions change progressively in an anti-clockwise direction, reaching possible extension directions of (0, 290° – 300°) in zone 2.

During the late Hesperic and early Amazonian, the magmatic ascent of the Alba Patera volcano generated an overlap of radial distribution stress fields around the volcanic building. Where the directions of fractures follow the trajectories of the stress fields sigma 2 and sigma 3 as seen in Figure 24, where the fault families NS, Curves and part of NE are grouped into a single family, which illustrate in the field the directions of sigma 2. For the case of sigma 3, the faults NW tend to propagate perpendicularly to the other structures, being the best example for the representation of the paths of sigma 3.

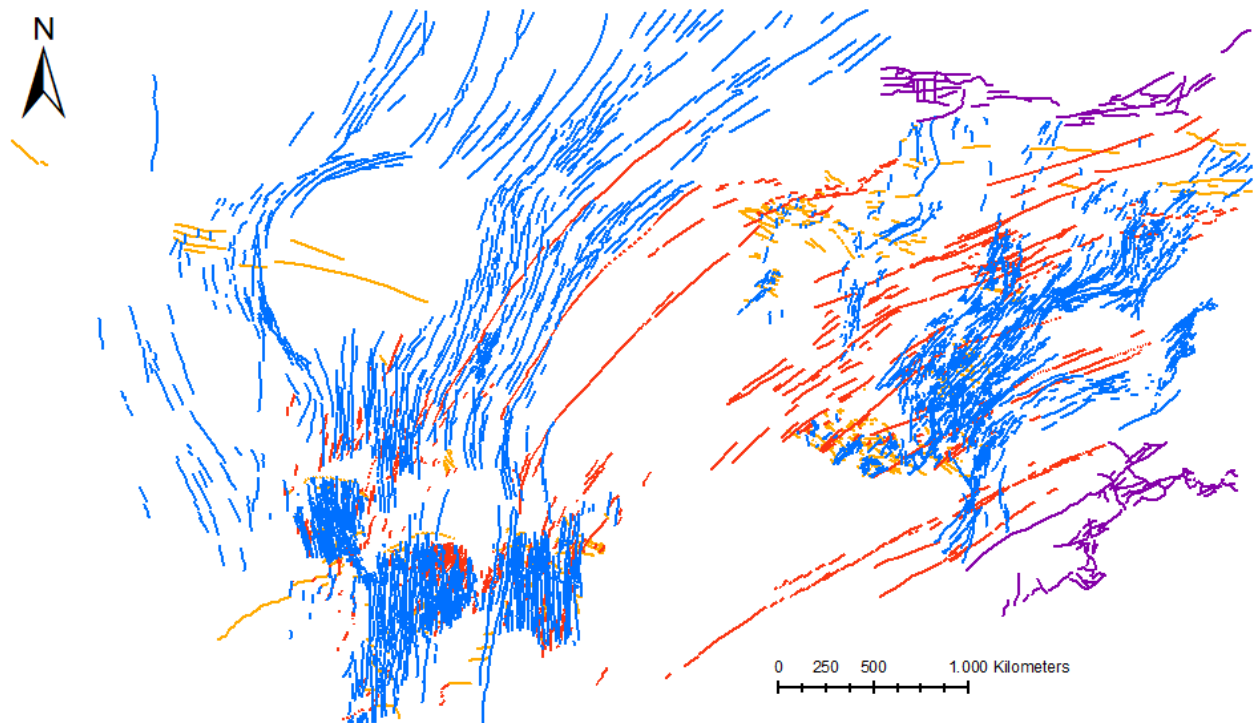


Figura 10.1. Mapa de estructuras final, donde las familias de fallas NS, Curvas y parte de las NE se agrupan en una sola. Imagen editada por el autor.

11. Bibliografía

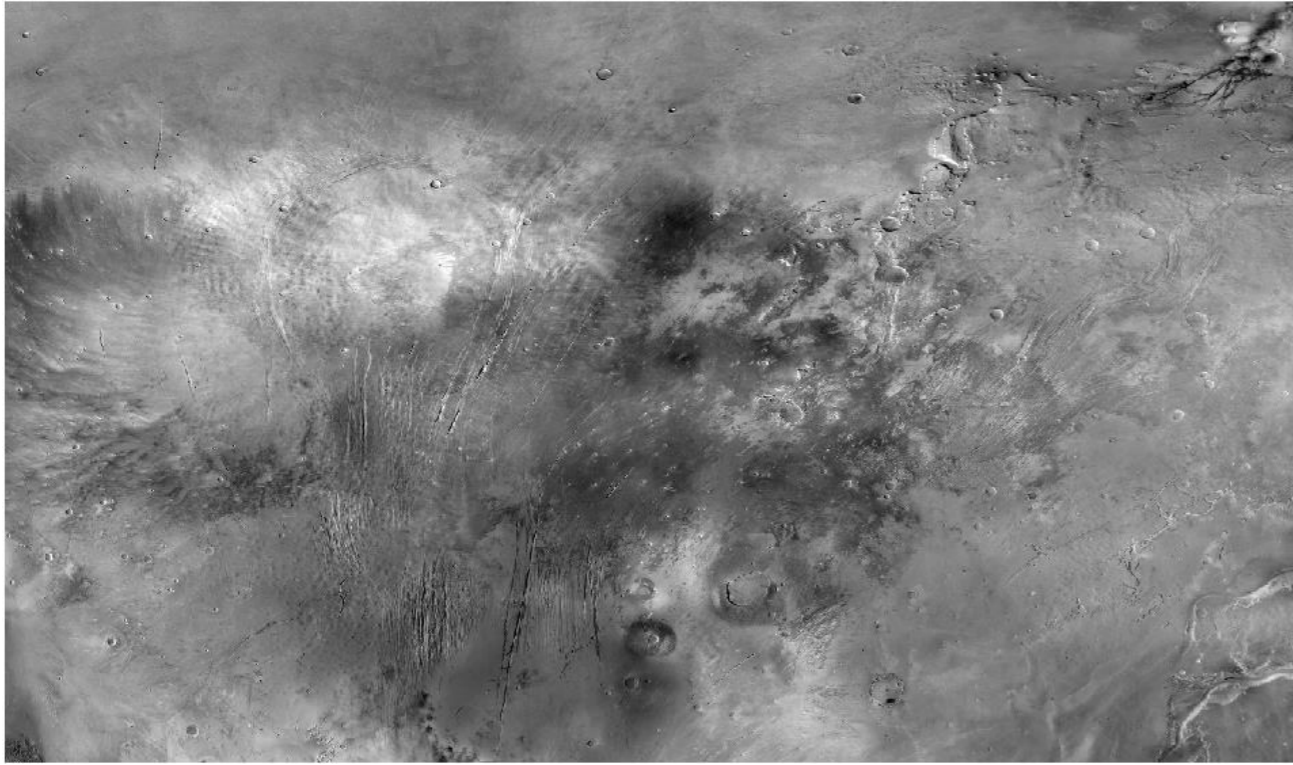
- AA.VV. (2019): *Marte*. National Geographic, México, 95 p.
- Anderson, R., Dhom, J.M., Golombek, M.P., Haldemann, A.F.C., Franklin, B.J., Tanaka, K.L., Lias, J. y Peer, B. (2001): Primary centers and secondary concentrations of tectonic activity through time in the western hemisphere of Mars. *Journal of Geophysical Research*, 106: 20,563 – 20,585.
- Chorowicz, J. (2005): The East African rift system. *Journal of African Earth Sciences*, 43, 379 – 410.
- Fergason, R. L., Laura, J. R. y Hare, T. M. (2017): THEMIS-Derived Thermal Inertia on Mars: Improved and Flexible Algorithm. En: *Lunar and Planetary Science Conference*. Comunicaciones, vol. 48.
- Knopf, A. (1936): Igneous geology of the Spanish Peaks región, Colorado. *Bulletin of the Geological Society of America*, 47: 1727 - 1784.
- Odé, H. (1957): Mechanical analysis of the dike pattern of the Spanish Peaks area, Colorado. *Bulletin of the Geological Society of America*, 68: 567 - 578.
- Ramsay, J. (1977): *Folding and Fracturing of Rocks*. Hermann Blume Ediciones, Madrid, 583 p.
- Kandie, R. J. (2015). Eastern rift structural geology–tectonics, volcanology and geothermal. En: *Short Course X on Exploration for Geothermal Resources, Kenya*. Comunicaciones.

Páginas Web

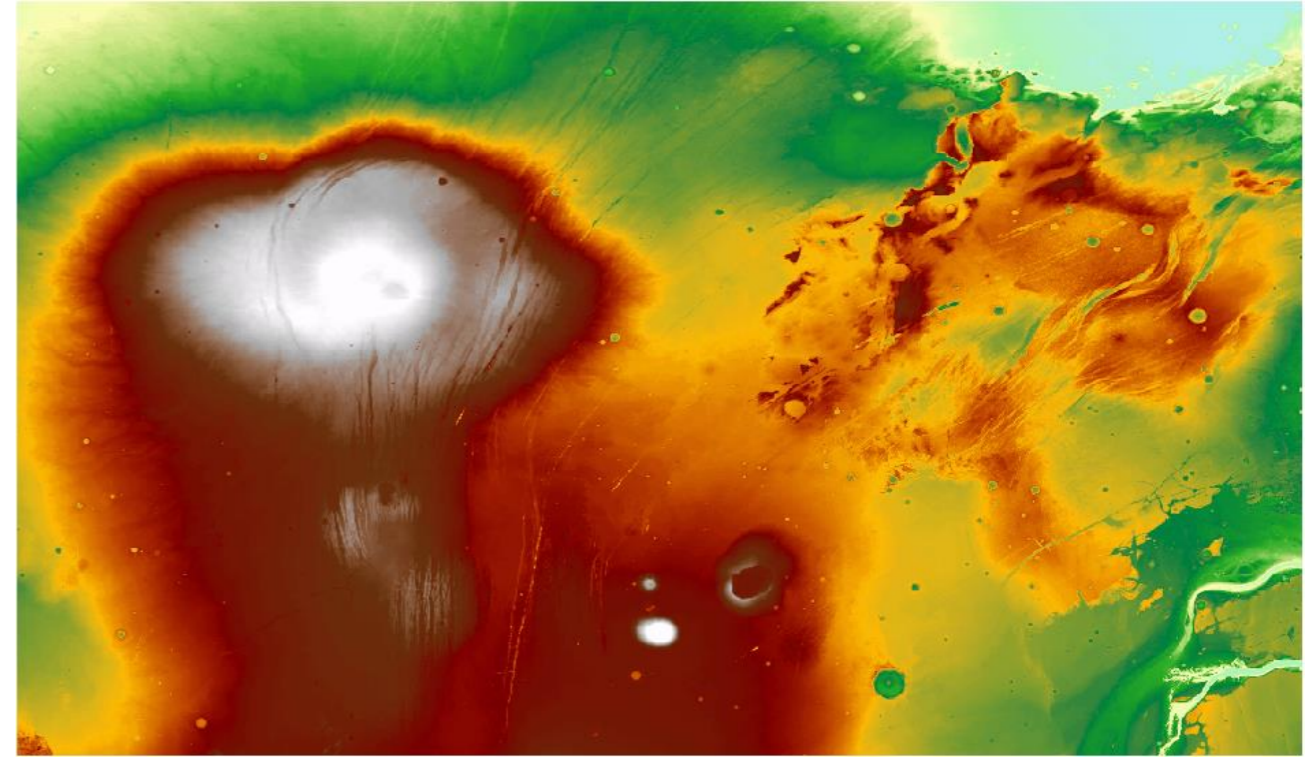
- Astrogeology Science Center, versión en inglés (en línea). Mars MGS MOLA-MEX HRSC Blended DEM Global 200m v2. USGS (Unites States Geological Survey) (fecha de consulta: 12/09/2019). Disponible en: <<https://astrogeology.usgs.gov/tools/map-a-planet-2>>.

12. ANEXOS

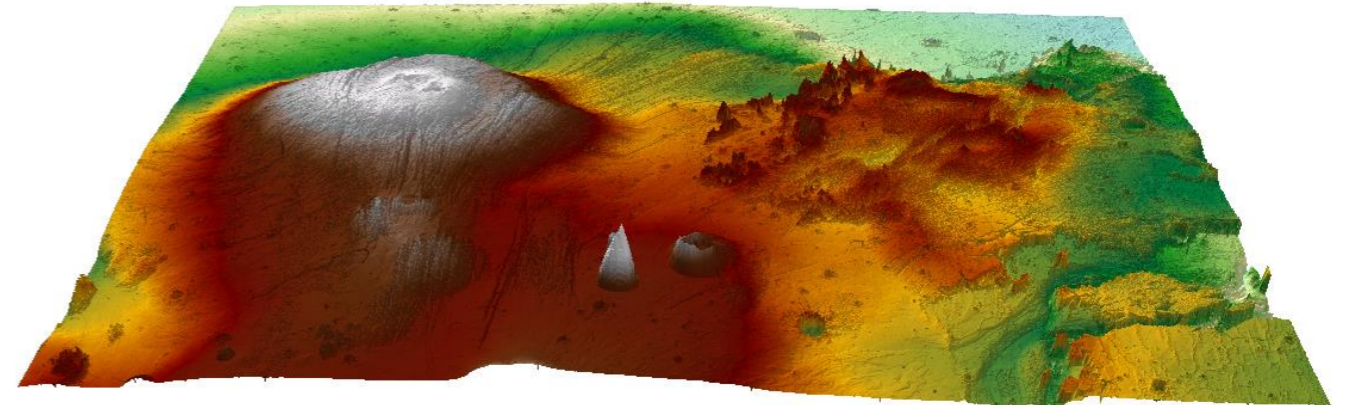
12.1 Base de Mapeo



Anexo 1. Imagen satelital georreferenciada de alta resolución obtenida desde el SASPlanet, se utiliza como base de mapeo en el programa ArcMap.



Anexo 2. Imagen DEM del área de estudio, este producto es una mezcla de datos del modelo de elevación digital (DEM) derivados del Mars Orbiter Laser Altimeter (MOLA), un instrumento a bordo de la nave espacial Mars Global Surveyor (MGS) de la NASA, tiene una resolución de 200 metros por píxel.



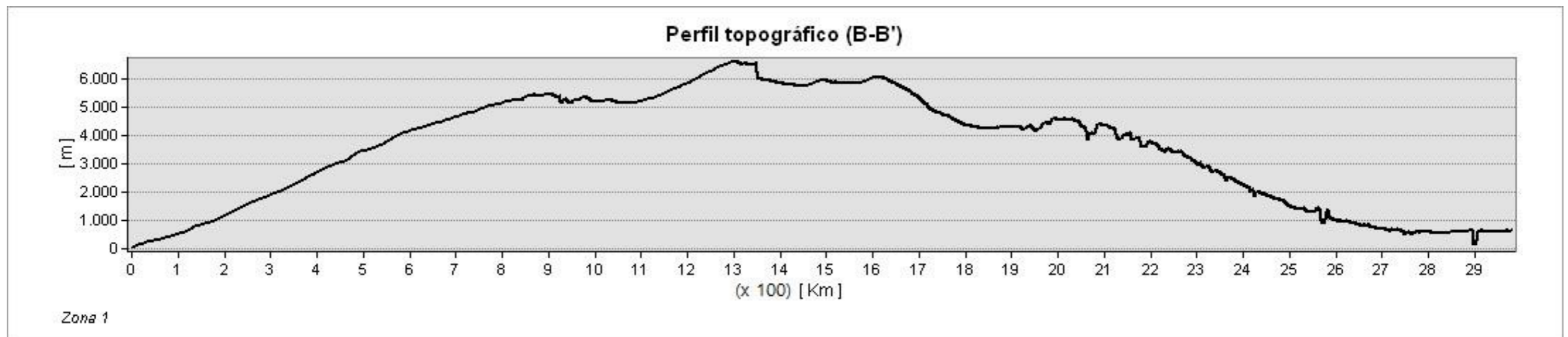
Anexo 3. Imagen 3D del relieve del área de estudio, obtenida a través de la imagen DEM en el programa ArcScene (extensión de ArcMap).

12.2 Perfiles topográficos

Zona 1

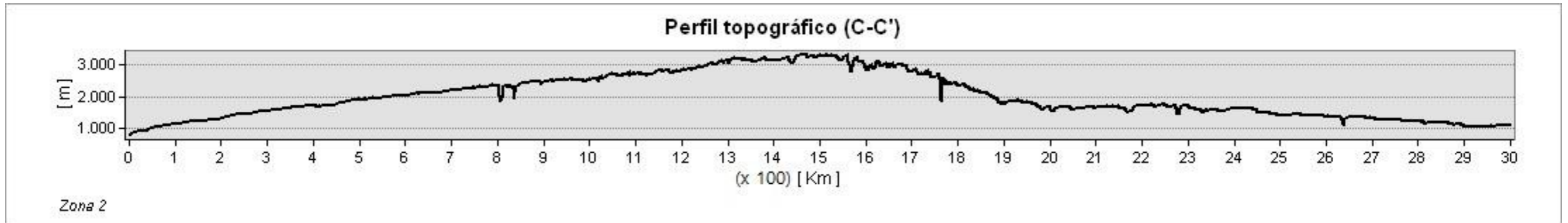


Anexo 4. Perfil topográfico A-A' de la Zona 1, donde los cambios abruptos de relieve representarían la ubicación de las Fallas NE.

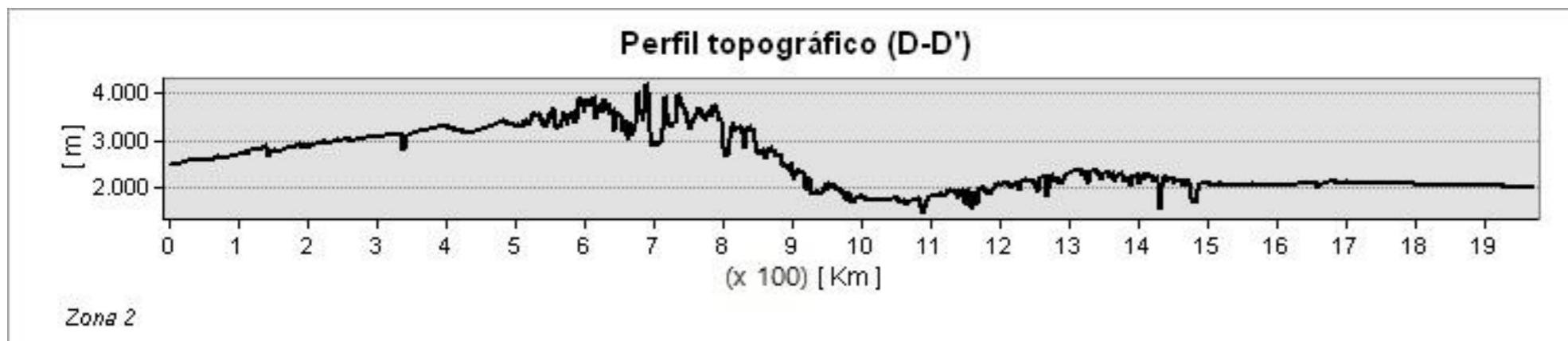


Anexo 5. Perfil topográfico B-B' de la Zona 1, se observa la morfología del volcán Alba Patera, donde los cambios abruptos de relieve observados en las laderas del volcán representarían la posición relativa de las Fallas Curvas.

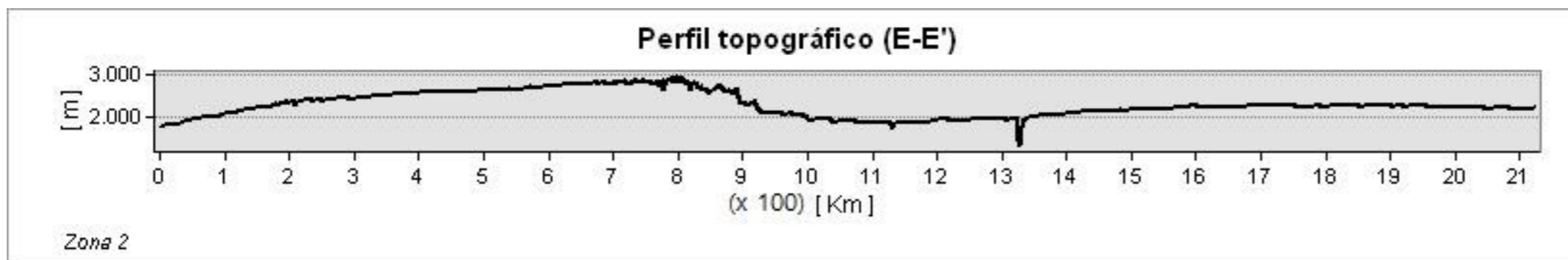
Zona 2



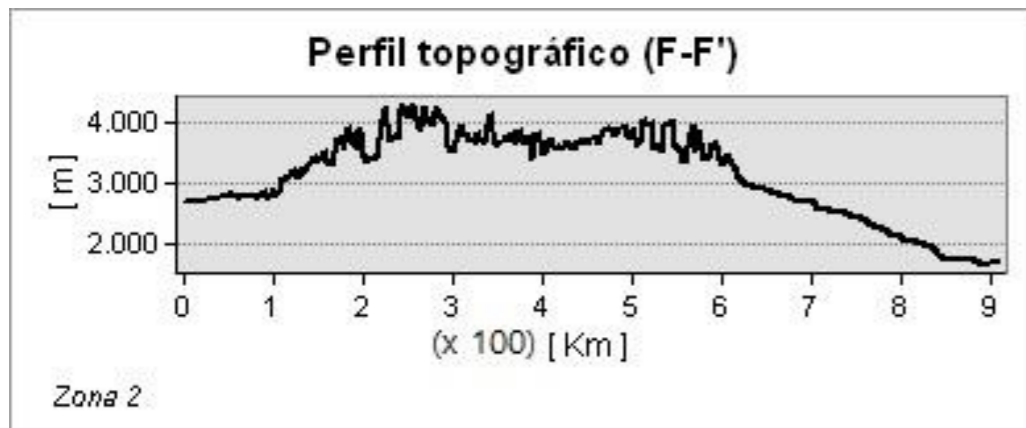
Anexo 6. Perfil topográfico de las Zona 2, se observa la morfología de un sector del volcán Alba Patera, donde los cambios abruptos del relieve representarían la ubicación relativa de las Fallas Curvas y las Fallas NS.



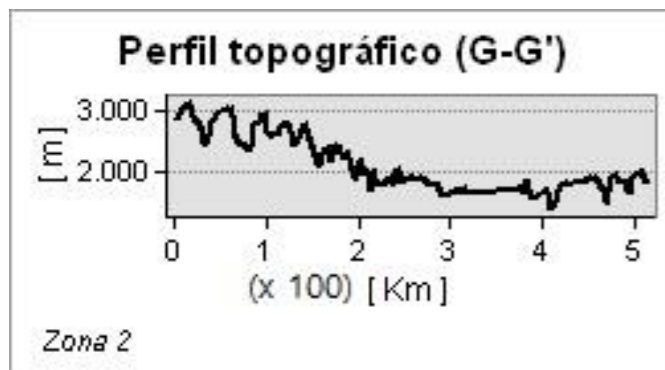
Anexo 7. Perfil topográfico de la Zona 2, ubicado en el área de mayor densidad de Fallas NS, donde los cambios abruptos del relieve representarían la posición relativa de las Fallas NS.



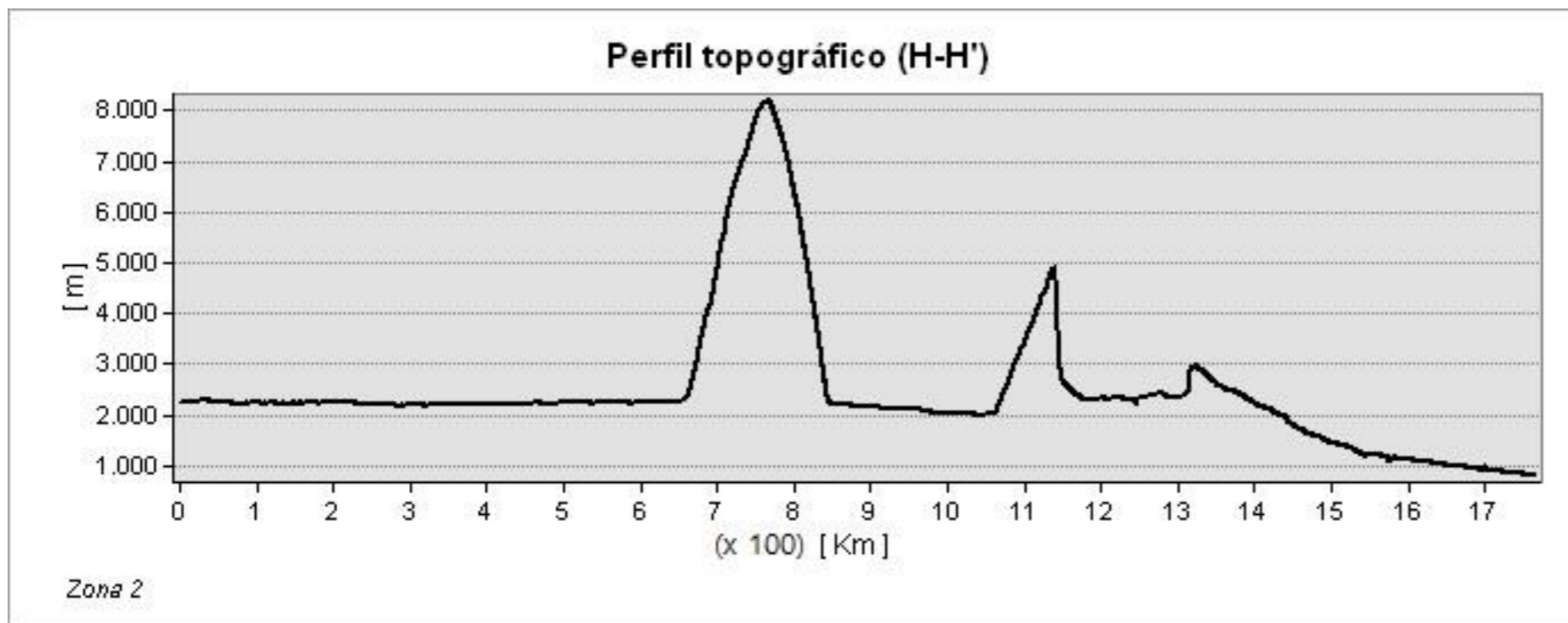
Anexo 8. Perfil topográfico de la Zona 2, donde los cambios abruptos del relieve representarían la ubicación relativa de las Fallas NS.



Anexo 9. Perfil topográfico de la Zona 2, donde los cambios abruptos del relieve representarían la ubicación relativa de las Fallas NS.

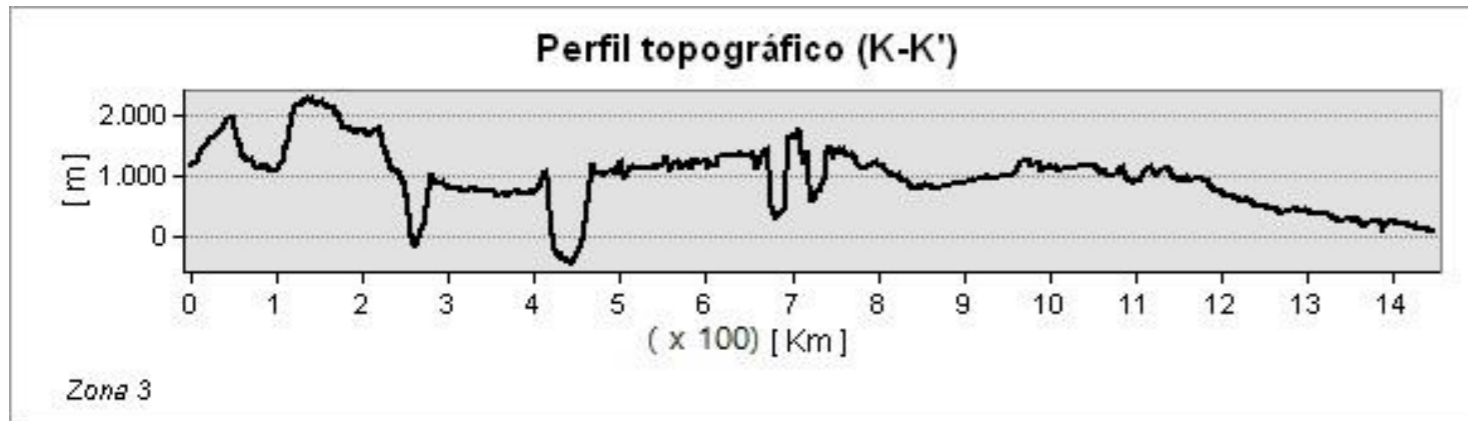


Anexo 10. Perfil topográfico de la Zona 2, donde los cambios abruptos del relieve representarían la ubicación relativa de las Fallas NE.

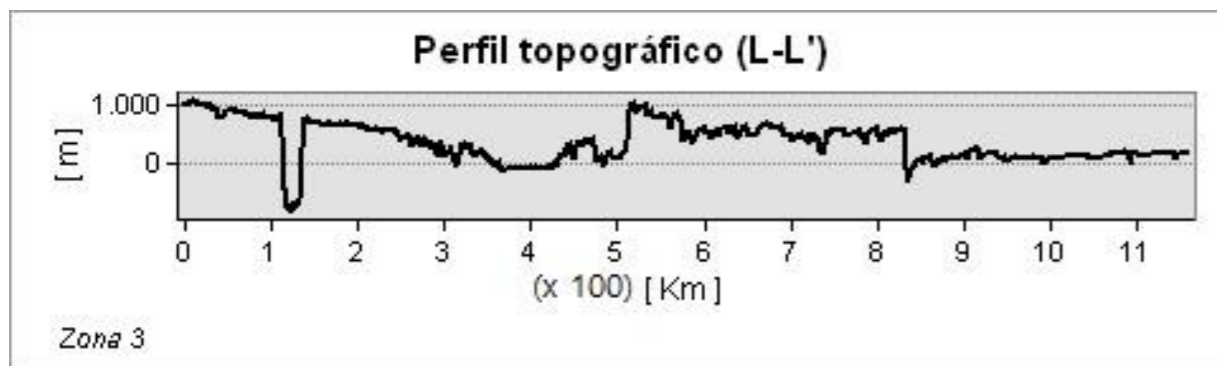


Anexo 11. Perfil topográfico de la Zona 2, el cambio abrupto del relieve podría indicar la presencia de un volcán local de unos 6.000 metros de altura desde su base hasta su techo, sin embargo, estos datos del relieve son cuestionables ya que las variaciones de altura ocurren en un rango de solo 2 Km.

Zona 3



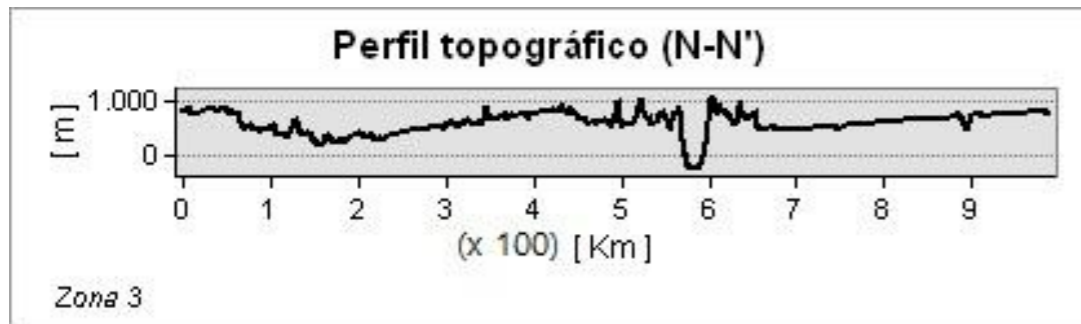
Anexo 12. Perfil topográfico de la Zona 3, donde el cambio abrupto del relieve representaría la ubicación relativa de las Fallas Curvas.



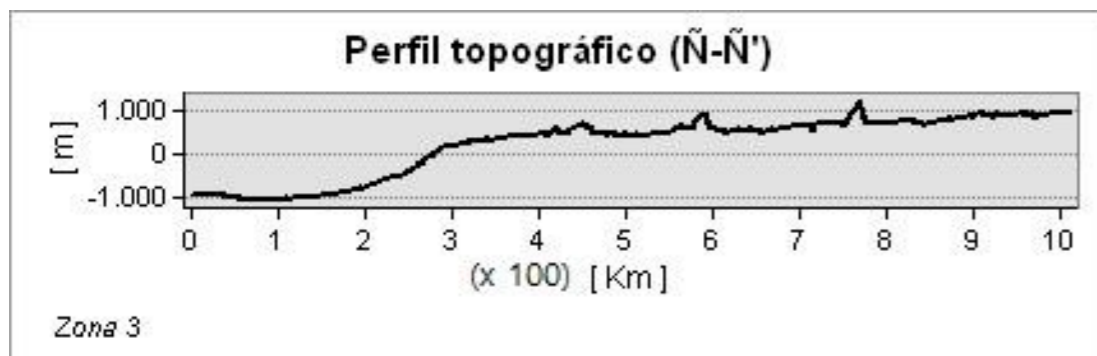
Anexo 13. Perfil topográfico de la Zona 3, donde el cambio abrupto del relieve representaría la ubicación relativa de las Fallas Curvas.



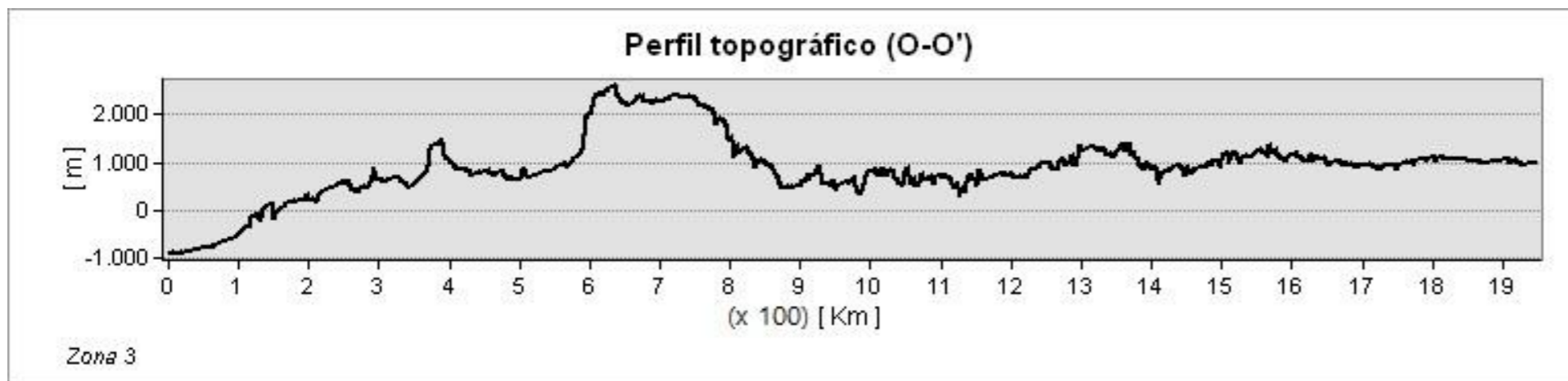
Anexo 14. Perfil topográfico de la Zona 3, donde el cambio abrupto del relieve representaría la ubicación relativa de las Fallas NS.



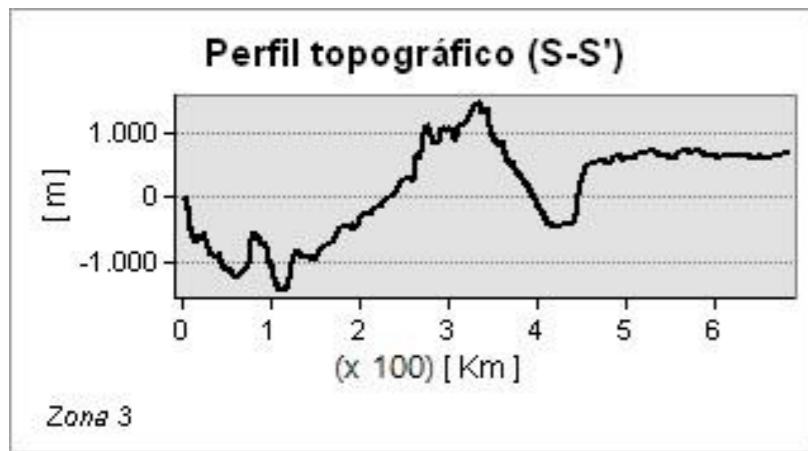
Anexo 15. Perfil topográfico de la Zona 3, donde el cambio abrupto del relieve en la parte central del perfil representaría la ubicación relativa de las Fallas NW, en los extremos del perfil las fallas pertenecen a otras familias, sin embargo la morfología de todas estas fracturas en conjunto son similares a pesar de estar clasificadas de forma distinta.



Anexo 16. Perfil topográfico de la Zona 3, donde las fracturas comienzan a aparecer a partir del Km 3,5 (en la cuenca no hay indicios de fracturas), el cambio abrupto del relieve en el alto topográfico representaría la ubicación relativa de las Fallas NW, las cuales se entrelazan con fracturas de diferentes familias pero con morfologías similares, difíciles de diferenciar en el perfil.



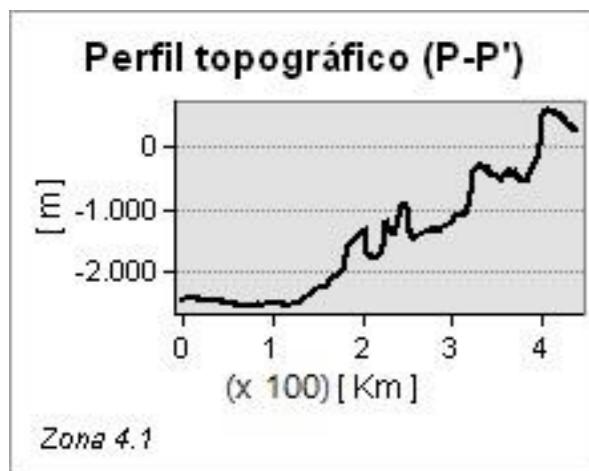
Anexo 17. Perfil topográfico de la Zona 3, donde el cambio abrupto del relieve representaría la ubicación de diferentes familias de fracturas no distinguibles a esta escala, a simple vista parecen tener morfologías similares.



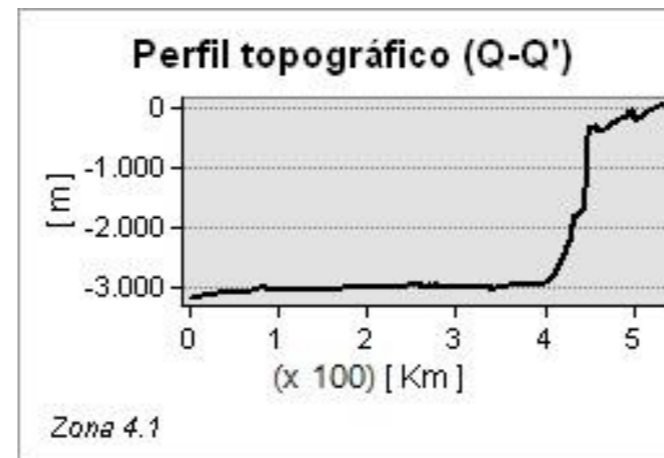
Anexo 18. Perfil topográfico de la Zona 3, donde el cambio abrupto del relieve representaría la ubicación de diferentes familias de fracturas no distinguibles a esta escala, a simple vista parecen tener morfologías similares.

Zona 4

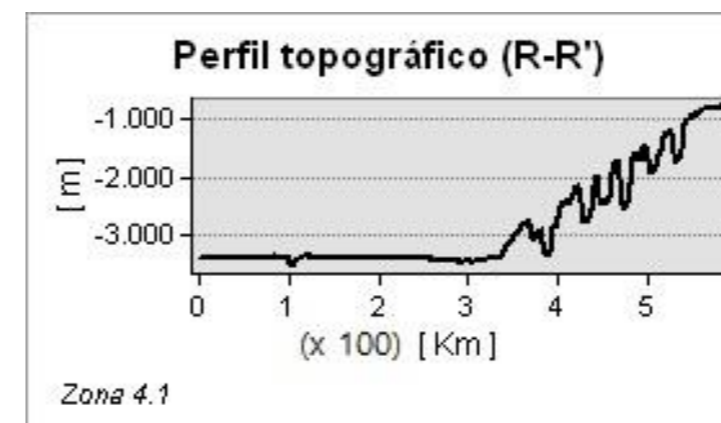
Zona 4.1



Anexo 19. Perfil topográfico de la Zona 4, donde a partir del Km 1,6 se observan cambios abruptos en el relieve indicando la ubicación relativa de las Fallas de Colapso.

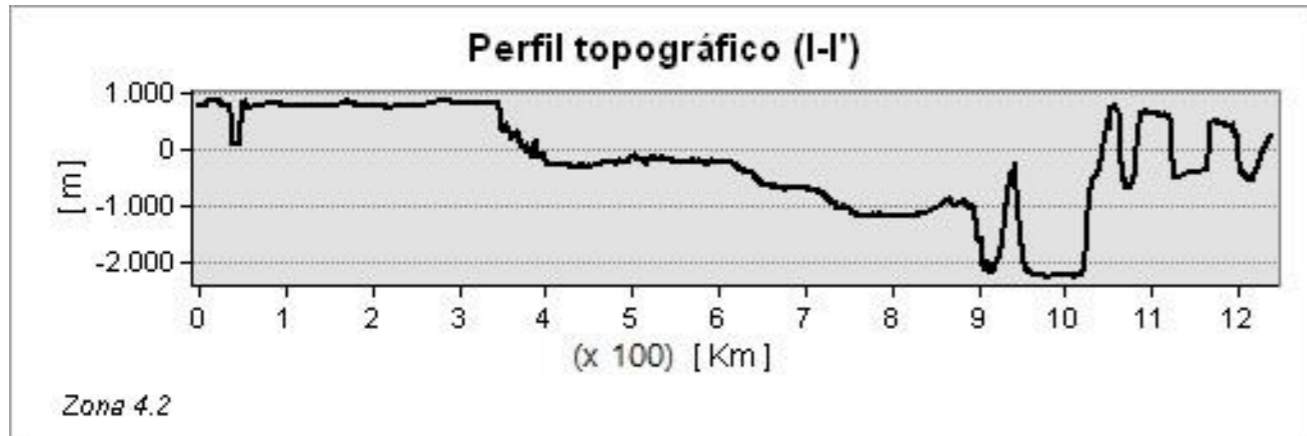


Anexo 20. Perfil topográfico de la Zona 4, donde a partir del Km 4 se observan cambios abruptos del relieve indicando la ubicación relativa de las Fallas de Colapso.

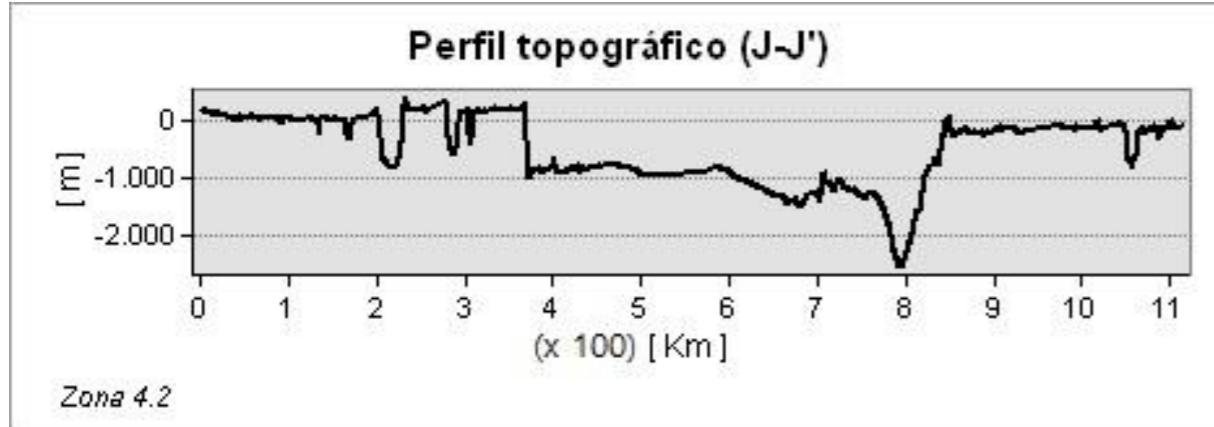


Anexo 21. Perfil topográfico de la Zona 4, donde a partir del Km 3,5 se observan cambios abruptos del relieve indicando la ubicación relativa de las Fallas de Colapso.

Zona 4.2



Anexo 22. Perfil topográfico de la Zona 4, donde el cambio abrupto del relieve representaría la ubicación relativa de las Fallas de Colapso desde el Km 0 hasta el Km 4. A partir del Km 8 se observa un sistema de grandes cañones formados por antiguos cauces fluviales.



Anexo 23. Perfil topográfico de la Zona 4, donde el cambio abrupto del relieve representaría la ubicación relativa de las Fallas de Colapso desde el Km 0 hasta el Km 4. En el Km 8 se observa la morfología de un cañón formado por antiguo cauce fluvial.