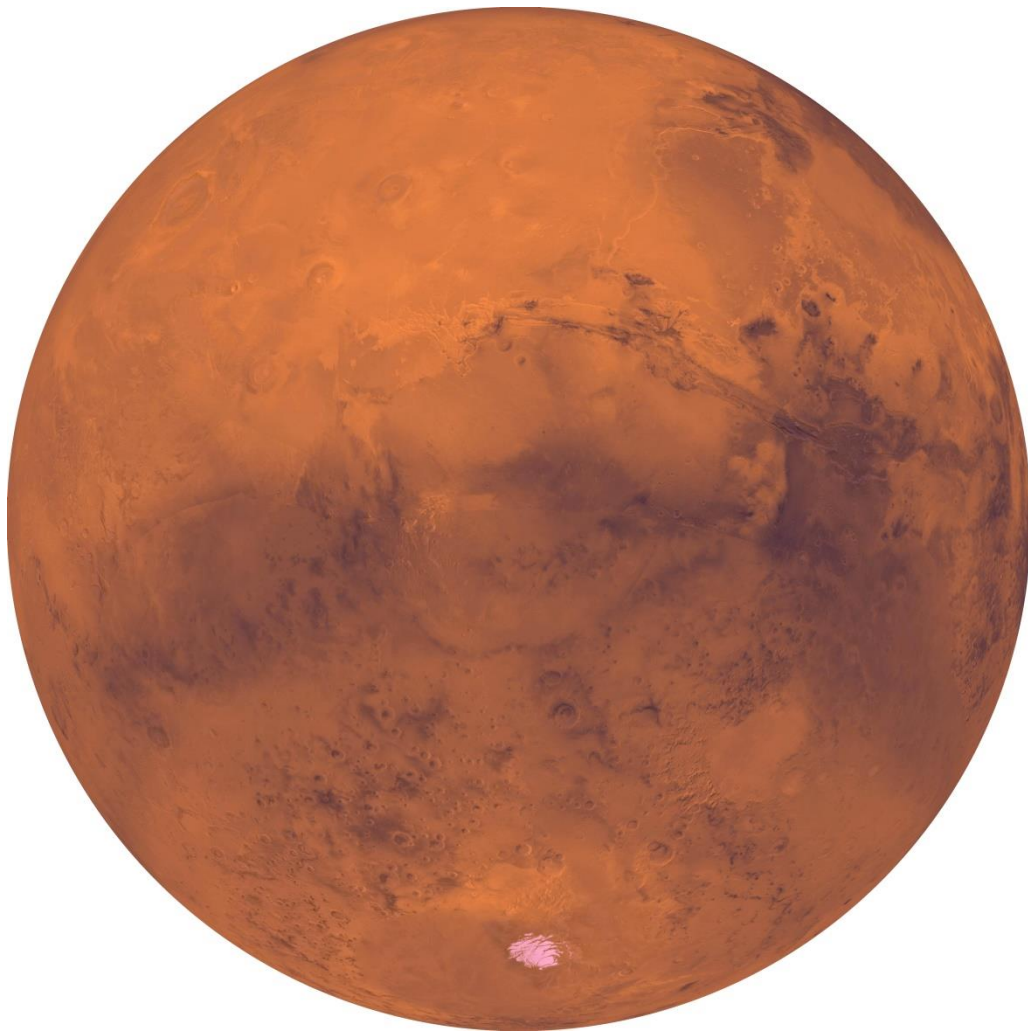


Facultad de Ciencias
2018

ESTRUCTURA DE LAS THAUMASIA HIGHLANDS (MARTE)



Autora: Iris Pérez Casalé
Director: Antonio Casas Sainz



1542

Universidad
Zaragoza

1. Abstract	2
2. Introducción	3
3. Objetivos	3
4. Metodología	4
4.1. <i>Búsqueda de bibliografía</i>	4
4.2. <i>Trabajo de gabinete</i>	4
5. Tectónica de Marte y de la zona. Contexto geológico	5
6. Resultados	7
6.1. <i>Fracturas</i>	7
6.2. <i>Estructuras asociadas al relieve</i>	9
6.2.1. <i>Asociadas a cambios en el relieve</i>	9
6.2.3. <i>Cráteres de impacto</i>	9
6.3. <i>Cronología</i>	10
6.4. <i>Análisis de orientaciones</i>	11
7. Interpretaciones	14
8. Comparaciones entre la Tierra y Marte	20
8.1. <i>Basin and Range</i>	20
8.2. <i>Cordillera Cantábrica</i>	21
8.3. <i>Cordillera Ibérica</i>	21
8.4. <i>Sistemas de rift en la tierra</i>	23
9. Conclusions	24
10. Bibliografía	25
Anexo I: Imagen procedente de la sonda Viking	26
Anexo II: Imagen procedente del MOLA	27

1. Abstract

The exploration of Mars has been on the rise since the launch of the first space probes in 1965 to the present. Planetary geology is rising and the researchers that are focusing their studies in this field are increasingly. One of the reasons for the realization of this work is to be able to see that there are possibilities to study the different planets of the Solar System, just as it is done with Earth. Thus it is tried to make see that although Mars and the Earth seem different planets, the geology of both can be studied in the same way and it is possible to find a resemble between them.

In this report, we studied the structures of the Thaumasia Highlands and later we made a comparison of these structures with terrestrial places. Essentially the exhibition area was focused on Claritas Fossae and Valles Warrego. The main objectives are to perform an interpretation of the tectonic structures and compare them with terrestrial structures.

For the realization of this work we have worked in two ways. The first thing was to carry out a descriptive study, for which the images of the MOLA and the Viking probe were used. From the study of these images it has been able to interpret two types of structures: fractures and structures associated with the relief. From the first one, it can be seen a long fracture that runs through the area of Claritas Fossae and smaller fractures of which three different families have differentiated from their directions: NE-SW, NW-SE y W-E. The structures associated with relief are of two types: associated with changes in relief and impact craters.

Subsequently, a quantitative study was carried out in which a population of 587 structures located mainly in Claritas and collected from Google Earth was used. The realization of this quantitative analysis has been from two different programs: ImageJ y Surfer. From this way, we obtained information about the frequency of the data of the degrees and the density of the fractures.

The interpretation of the elements has been made from the data of descriptive and interpretative studies and with different images obtained by HiRISE. We have been able to interpret compressive structures (thrusts and folds) and extensive structures (normal faults and grabens). Besides, in the area of Warrego Valles, a drainage system has been interpreted.

The comparisons between the Earth and Mars have been made with four different terrestrial places: the Basin and Range of the United States, the Cantabrian Mountains and the Iberian Chain, both in Spain, and the terrestrial rift systems, such as the Rift of Kenya (Africa).

2. Introducción

Marte, el cuarto planeta del sistema solar, es un lugar del que todavía queda mucho por explorar. Durante años, Marte fue un punto de color rojizo en el cielo del cual poco se sabía. Posteriormente, con el paso de los años la tecnología fue progresando y pudo empezar a conocerse un poco más. La historia de la exploración de Marte comenzó en el año 1965 con las primeras fotografías provenientes de la sonda *Mariner 4* y de diversos datos provenientes de otras sondas planetarias. Actualmente, la exploración continúa de forma exitosa debido a las numerosas misiones que han sido enviadas, ya sea en forma de sondas o vehículos, como el *Mars Rover* o el *Curiosity*. El último vehículo lanzado con dirección al planeta rojo es el *InSight*. Esta misión va a ser la más importante con respecto al campo de estudios que le atañe a la geología ya que va a contar con un módulo fijo centrado en el estudio del subsuelo y del interior de Marte para poder llegar a comprender cómo fue la formación del planeta.

El estudio de la geología planetaria es una parte significativa de la geología que actualmente está en crecimiento. El conocimiento de la actividad geológica actual de los diversos cuerpos planetarios y otros cuerpos rocosos, como cometas, es fundamental para conocer su formación y poder hacer extrapolaciones con las situaciones geológicas que pueden presentarse en la Tierra. Una de las razones de la realización de este trabajo es la promoción esta rama de estudio dentro de los estudiantes de Geología. Lo que se pretende conseguir con la elaboración del presente estudio es un conocimiento y una interpretación de la tectónica de una zona elegida de Marte y como puede ser comparada con diversas estructuras geológicas que se presentan en la Tierra.

3. Objetivos

A continuación, se pasan a describir los objetivos pactados para la realización del presente trabajo:

1. Conocimiento inicial de la tectónica marciana en base a los trabajos realizados por diferentes autores.
2. Realización de una cartografía tectónica con la pretensión de una delimitación y un reconocimiento previo para un posterior estudio en profundidad.
3. Interpretación y estudio de las diversas estructuras y las relaciones que puedan encontrarse.
4. Relación y comparación de la zona con lugares terrestres los cuales puedan tener similitudes o ser semejantes.

4. Metodología

Atendiendo a un punto de vista metodológico, el presente trabajo se ha realizado utilizando diferentes procesos:

4.1. Búsqueda de bibliografía

Previamente a la redacción de este texto, se ha efectuado una búsqueda intensiva de trabajos bibliográficos relacionados con la infografía de Marte. Encontrar bibliografía ha sido complicado debido a que los trabajos publicados no son muy abundantes, son bastante antiguos o muchos de ellos tratan o sobre lugares muy específicos de la superficie del planeta o, por el contrario, hablan muy en general. Aun así, la zona de estudio ha sido planteada en diversos trabajos que han servido de gran ayuda a la hora de conocer los aspectos geológicos.

4.2. Trabajo de gabinete

Una parte fundamental de esta memoria se ha basado en este punto. El trabajo de gabinete ha sido realizado principalmente con programas informáticos. El primer programa utilizado ha sido Google Mars (<https://www.google.es/intl/es/earth/index.html>), herramienta localizada dentro del programa Google Earth. Con este él se ha procedido a realizar una cartografía de reconocimiento, dibujando en ella diferentes elementos tectónicos para su posterior estudio. Las observaciones e interpretaciones de la zona han sido estudiadas con mapas y con fotos realizadas por diferentes satélites. Las fotos que se han utilizado para exponer los elementos se han obtenido de la página web de la USGS (United States Geological Survey). A través de su servicio “Map a Planet 2” (<https://astrogeology.usgs.gov/tools/map-a-planet-2>) se ha realizado un recorte en gran calidad de dos fotos globales de Marte: la primera corresponde a la imagen MDIM Image 2.1 tomada por la sonda Viking y, posteriormente, coloreada por AMES de la NASA (Anexo I); y la segunda corresponde a una imagen realizada a través de los datos obtenidos por el Mars Orbiter Altimeter (MOLA) situado en el satélite Mars Global Surveyor de la NASA (Anexo II). La imagen proveniente de la sonda Viking tiene una resolución de 231 m/pixel mientras que la imagen de MOLA tiene una escala de 463 m/pixel. Los mapas que han servido se ayuda para la realización de interpretaciones son el Mapa Geológico de la Región de Thaumasia (Dohm *et al.*, 2001) y el Mapa Paleotectónico de la Región de Thaumasia (Dohm *et al.*, 2001).

Los datos recogidos en Google Mars han sido procesados con el programa ImageJ (<https://imagej.nih.gov/ij/>). El reporte que se obtiene es la información sobre el área, los ejes mayores y menores de las elipses de deformación, los ángulos de direcciones de los elementos tectónicos y las direcciones de los lineamientos. Posteriormente, esta información será la utilizada para realizar las interpretaciones pertinentes.

Otro de los programas que ha sido utilizado es el ArcMap. Este ha permitido representar los datos obtenidos en forma de mapa, donde quedan representados de una forma más visual los elementos tectónicos acopiados.

A partir de la información obtenida por el ImageJ ha sido posible crear el mapa de contornos de densidad que va a ser estudiado posteriormente. Este mapa ha sido creado gracias al programa Surfer.

Las imágenes de detalle de la superficie del planeta se han obtenido de la HiRISE (High Resolution Imaging Science Experiment), que es una cámara de gran potencia enviada dentro del Mars Reconnaissance Orbiter. La resolución de estas fotos es de 30 centímetros por pixel.

5. Tectónica de Marte y de la zona. Contexto geológico

El planeta Marte tiene una edad de 4600 Ma, presenta un diámetro de unos 6.800 km en la zona del ecuador, aproximadamente la mitad del de la Tierra, y su densidad ($3,9 \text{ g/cm}^3$) es ligeramente inferior a la de nuestro planeta ($5,5 \text{ g/cm}^3$). Por otro lado, la aceleración de la gravedad es de $3,7 \text{ m/s}^2$.

Presenta dos regiones visiblemente diferenciadas: las denominadas Tierras Altas (Highlands) y las Tierras Bajas (Lowlands), que como su propio nombre indica hacen referencia a las zonas topográficamente más elevadas y a las más deprimidas respectivamente. Ambas regiones se encuentran separadas por el denominado “Límite 1/3-2/3” o dicotomía, que en muchos lugares es un escarpe de varios miles de metros de altura, mientras que en otros es una región de transición donde la altitud varía de forma paulatina. Estas dos regiones se han interpretado como lo que correspondería a las tierras emergidas de un continente antiguo (las Tierras Altas) y el lecho de un antiguo océano (las Tierras Bajas) (Hernández, 2015).

En Marte se han podido diferenciar 3 edades geológicas (Fig. 1) denominadas Noeico, Hespérico y Amazónico (Hernández, 2015). El Noeico comprende de 4.600 a hace aproximadamente 3700 Ma y representa el período más antiguo, momento en el que se formaron las grandes llanuras fuertemente craterizadas de las Tierras Altas. También es el período en el que se excavaron los canales de tipo valle que drenaron el océano que ocupaba las Tierras Bajas y comenzaron a formarse los complejos volcánicos como el de Tharsis. El Hespérico comprende de hace 3.700 a 3.000 Ma y es el período en el que hay una mayor variedad de eventos geológicos. Durante este período se comenzó a abrir el sistema tectónico de Valles Marineris y las fracturas radiales de Tharsis. Finalmente, el Amazónico, es el período geológico más reciente y comprende desde hace unos 3.000 Ma hasta la actualidad. Aquí se vislumbran las formas más recientes como edificios y llanuras volcánicas.



Figura 1: Representación de las edades geológicas de Marte.

Centrándose en el tema de este trabajo, se procede a describir la geología y tectónica de la zona a estudiar que se localiza en la provincia de Tharsis, más concretamente en la región de Thaumasia.

La región de Thaumasia (Fig. 2) se sitúa al sur del conocido Valles Marineris y es el mayor complejo volcanotectónico de la provincia de Tharsis (Grott *et al.*, 2006). Esta provincia fue formada durante un extenso período de tiempo abarcando la mayor parte de la historia del planeta, aunque hay ciertas líneas de estudio que podrían indicar evidencias en la cuales las

zonas topográficamente más elevadas estarían ya emplazadas durante el Noeico. Thaumasia se encuentra delimitada por antiguas tierras elevadas: Claritas, Thaumasia, Coracis, Melas y Nectaris Fossae.

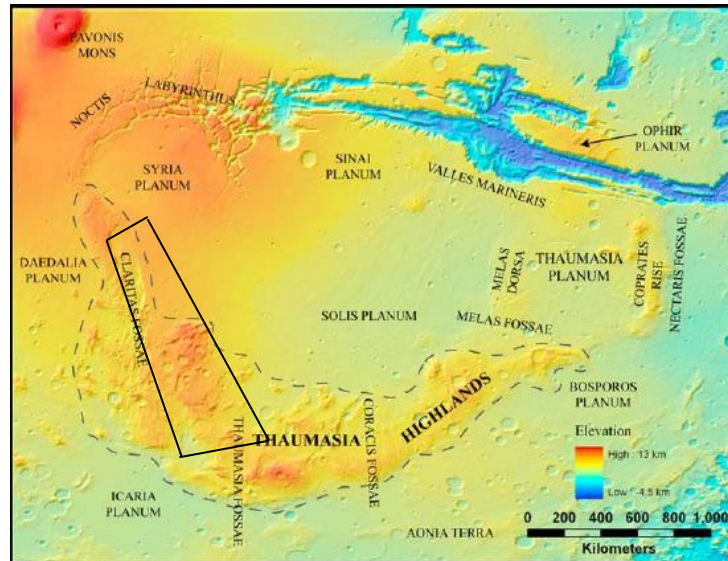


Figura 2: Localización de Thaumasia dentro de la región de Tharsis. En ella puede se diferenciar las tierras elevadas que delimitan esta región. También queda delimitada la zona de Thaumasia Highlands y la zona de estudio (recuadrada). Tomada de Nahm y Schultz (2010).

Por otro lado, se localiza Thaumasia Plateau que consiste en una gran zona de elementos elevados, principalmente, formada por planicies interiores rodeadas de sistemas topográficamente elevados. Dentro de estas zonas se encuentran numerosos cráteres de impacto, sistemas de rift, grabens, sistemas montañosos, wrinkle ridges, pliegues y fallas (Dohm y Tanaka, 1999). Thaumasia Plateau quedó emplazada durante el período de tiempo comprendido entre el Noeico tardío y el Hespérico temprano y su estilo estructural podría ser semejable a ciertas mesetas intracontinentales que pueden encontrarse dentro del planeta Tierra.

La historia estructural de Thaumasia puede quedar dividida dentro de cinco etapas diferentes (Fig. 3), las cuales quedan definidas por períodos de intensa actividad geológica (Dohm *et al.*, 2001). El Noeico temprano y tardío forman parte de la primera etapa. Durante este período se emplazaron las rocas de la corteza más antiguas y se formaron las grandes cuencas de impacto. Thaumasia Plateau y las Thaumasia Highlands comenzaron a formarse. El final del Noeico está conformado por el final de la etapa 1 y el comienzo de la etapa 2. Comienza a disminuir el número de impactos y continúa la formación de la región de Thaumasia, incluyendo la formación de fallas y grabens asociados a un magmatismo local. El Hespérico temprano va a comprender el final de la etapa 2 y la integridad de la etapa 3. Durante este período continuó el desarrollo de Claritas y Thaumasia Fossae al igual que el resto de las diferentes áreas que componen la región de Thaumasia. La etapa 4 queda situada en el Hespérico tardío y durante la misma se sitúan extensas llanuras volcánicas y centros volcanotectónicos como el de Tharsis y Syria Planum. Finalmente, la última etapa transcurre durante el Amazónico en la cual continúan emplazándose algunas coladas de lava pero ya están finalizadas las principales estructuras y fossaes que componen la región.

Este trabajo está centrado en la investigación de las estructuras tectónicas que pueden verse en la región de Claritas Fossae y Warrego Valles.

Claritas Fossae es un área fuertemente deformada localizada en el límite oeste de Thaumasia (Vaz *et al.*, 2014) y se compone principalmente de sistemas complejos de segmentos de fallas, grabens y semi-grabens cortando materiales de edad Noeica. Hay algunos autores que han reconocido que las fuertes anomalías genéticas de este lugar podrían indicar una corteza formada anteriormente a la provincia de Tharsis o podrían corresponder a una asociación volcánica del Noeico temprano que guarda relación con el uplift de Tharsis (Vaz *et al.*, 2014). Su formación se prolongó hasta la cuarta etapa de la formación de Thaumasia.

Warrego Valles es una región que comprende dos tipos de estructuras: estructuras compresivas y estructuras extensionales. (Anguita *et al.*, 2006). Las estructuras compresivas incluyen escarpes lobulados y wrinkle ridges, mientras que las extensionales comprenden fallas normales y grabens. Warrego Valles es la red de valles más madura que incide al sur de las Thaumasia Highland y la cual se desarrolló sobre una cuenca de drenaje de forma rectangular (Ansan y Mangold, 2006).

6. Resultados

El estudio de la zona va a comprender la observación de las estructuras dando información sobre sus características más visibles para, posteriormente, ser interpretadas. Para ello, lo primero que se realiza es un estudio de las imágenes del MOLA y de la sonda Viking. El área de estudio se centra en las zonas elevadas de Thaumasia, en las Thaumasia Highlands, y principalmente en la zona de Claritas Fossae y Warrego Valles. La zona comprende principalmente dos tipos de estructuras: fracturas y estructuras asociadas al relieve.

6.1. Fracturas

A partir de la imagen del MOLA queda en manifiesto que dentro de las Thaumasia Highlands se encuentran una gran cantidad de estructuras que se han denominado como fracturas. Estas fracturas recorren todo el área elevada pero no de forma homogénea. En la zona superior de Claritas Fossae las fracturas son menores y aumentan en número en su zona inferior, conforme se acercan a Warrego Valles. De esta manera, las fracturas forman una estructura semejante a la forma de abanico abriéndose en la parte inferior. Con ayuda de la imagen de la Viking puede conseguirse una visión más clara de las fracturas. Lo primero y más destacable de la imagen es una larga fractura (Fig. 4) de cientos de kilómetros (~950 km) y de dirección aproximada N-S que recorre la mayoría de Claritas Fossae. Esta fractura no es totalmente recta si no que posee cierta curvatura que hace que en algunos tramos la dirección varíe entre N-S, NE-SW y NW-SW. También muestra un

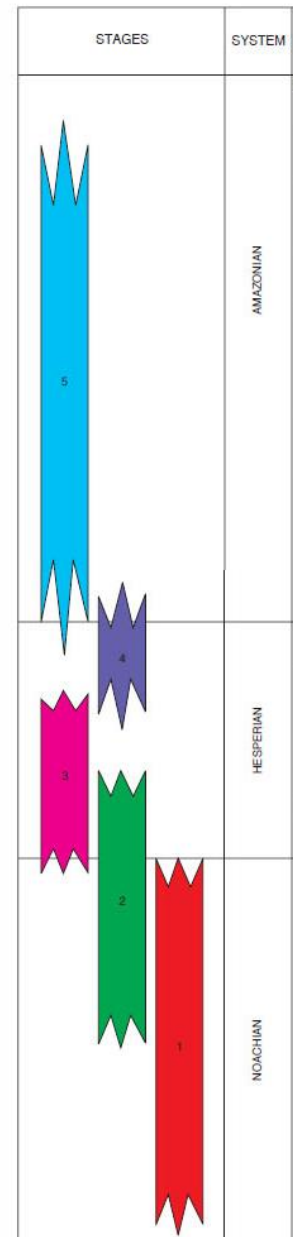


Figura 3: Etapas de formación estructural de la región de Thaumasia. Modificado de Dohm *et al.*, (2001).

importante escarpe y se encuentra atravesada por fracturas de dimensiones menores en casi la totalidad de su extensión. Estas fracturas menores se extienden por toda el área con diferentes direcciones: NE-SW, NW-SE y W-E, diferenciándose de esta forma tres familias de fracturas. De estas tres familias, las que más predominan son las primeras, NE-SW, (Fig. 5.a) y son estas las que atraviesan la fractura mayor de la que se ha hablado anteriormente. Aunque la mayoría de estas fracturas son lineales muchas de ellas tienen una cierta curvatura. El espaciado entre ellas es variable ya que en algunos sitios es relativamente pequeño (~1 km) y en otras zonas la distancia es mayor (~10 km). Poseen escarpes que también son muy variables comprendiendo fracturas cuyos escarpes alcanzan los 700 metros y otras en las cuales el escarpe es de unos 20 metros. Se distribuyen en la zona central de Claritas y en el margen izquierdo de gran fractura que recorre la zona. La siguiente familia (Figura 5.b), las de dirección NW-SE, son más abundantes en la zona inferior de Claritas y quedan predominantemente localizadas en el margen izquierdo de la gran fractura. Aunque algunas de estas poseen una linealidad, predominan las que poseen curvatura y que en algunos casos llega a ser importante. El espaciado entre los elementos esta familia es inferior, variando entre 2 y 10 km. En este caso, los escarpes que se encuentran en las fracturas no superan los 50 metros de desnivel. Finalmente la tercera familia de fracturas, W-E, (Fig. 5.c) no llega a ser muy abundantes y se encuentra mucho más repartida por toda el área. En este caso, el espaciado entre ellas es difícil de concretar pero, por el contrario, sí que puede indicarse que los desniveles que producen estas fracturas son totalmente variables, pudiéndose encontrar lugares en los cuales el escarpe que producen es de tan solo 20 metros y otras zonas donde se producen escarpes de hasta 500 metros. Hay una pequeña zona al norte de Claritas donde este tipo de fracturas destacan por su magnitud y concentración.

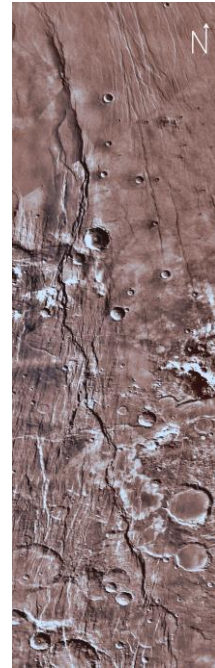


Figura 4: Visualización de la gran fractura que recorre Claritas Fossae. Modificado de la imagen procedente de la sonda Viking.

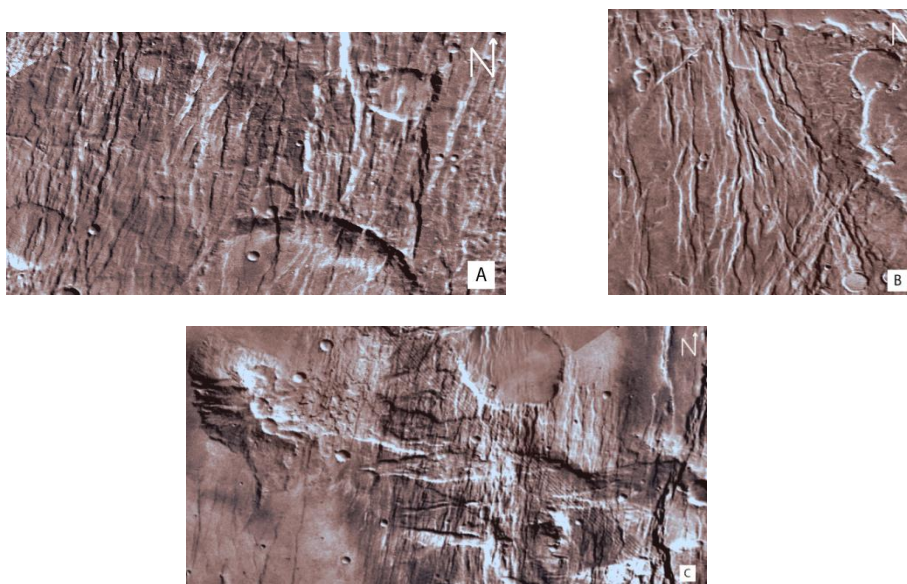


Figura 5: Representaciones de las diferentes familias de fracturas. La imagen 5.a representa las fracturas de dirección NE-SW y en ella pueden verse las características de las mismas. En la imagen 5.b. quedan representadas las de dirección NW-SW. Mientras que las de la imagen 5.c son las de dirección W-E. Modificado de la imagen procedente de la sonda Viking.

6.2. Estructuras asociadas al relieve

Dentro de este apartado se diferencian dos tipos de estructuras diferentes: las primeras van a estar asociadas a lugares donde el relieve cambia, ya sea de manera positiva o negativa, y las segundas son los cráteres formados por los impactos meteoríticos.

6.2.1. Asociadas a cambios en el relieve

Por un lado, a partir de la imagen del MOLA pueden observarse cambios en el relieve entre las zonas elevadas de Claritas Fossae y Warrego Valles y las zonas más llanas del interior (Solis y Syria Planum) y del exterior (Icarium y Dedalia Planum) de Thaumasia. Estos cambios son principalmente bruscos formando escarpes muy pronunciados, como por ejemplo en la zona entre Warrego Valles e Icarium Planum, pero también pueden ser más suaves y con una pendiente mínima como la zona norte de Claritas Fossae con Syria Planum.

Con esta imagen también se llega a inferir otra característica de la zona, que son lugares donde la altura cambia dando unos relieves positivos que destacan sobre el resto. La primera de estas estructuras (Fig. 6.a) se localiza al oeste de Thaumasia Highlands, en el este de Claritas Fossae. Mientras que las siguientes (Fig. 6.b) se sitúan al sur de Claritas, cerca de la zona de Warrego Valles.

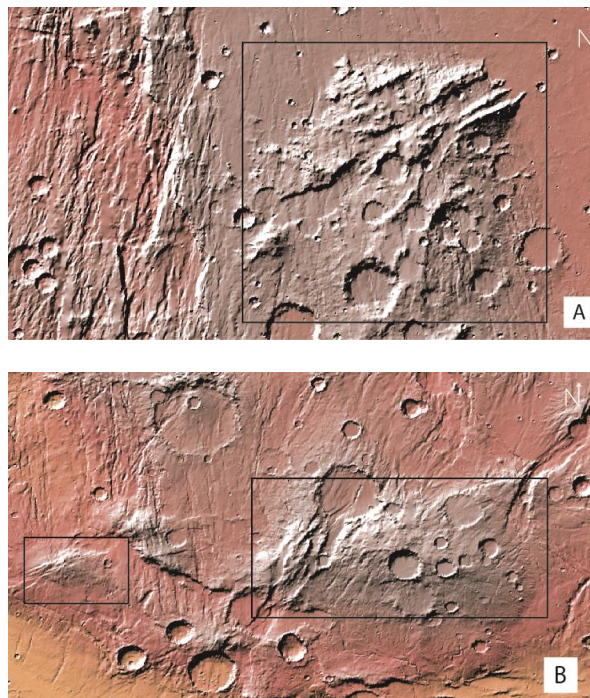


Figura 6: Localización de las estructuras con relieves positivos en las Thaumasia Highlands. Modificada de la imagen procedente del MOLA.

6.2.3. Cráteres de impacto

Finalmente, pueden verse numerosos cráteres de impacto (Fig. 7) distribuidos por toda la zona. Estos cráteres poseen tamaños muy diferentes, pudiendo encontrar cráteres con diámetros de unos pocos kilómetros (~10 Km) a algunos con un número considerable de kilómetros (~55

Km). La gran mayoría de ellos están afectados por la fracturación que recorre la zona e incluso algunos afectados por impactos posteriores. Aunque destacan los primeros también pueden verse algunos más modernos sin alteración alguna.

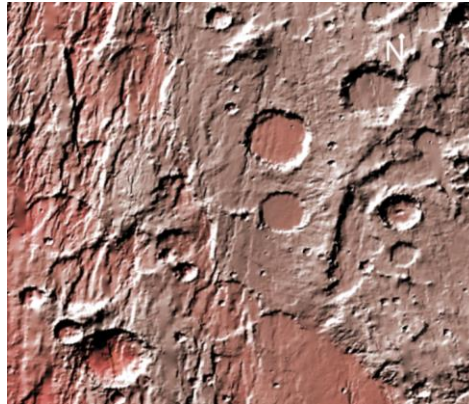


Figura 7: Cráteres de impacto en la zona de Claritas Fossae. En la imagen pueden observarse varios cráteres, de diversos tamaños, afectados por la fracturación. También puede observarse en la parte superior derecha un impacto reciente. Modificada de la imagen procedente del MOLA.

6.3. Cronología

A partir de lo expuesto anteriormente, se puede estudiar la cronología de las diferentes estructuras. En relación con las fracturas, las primeras en formarse serían las que tuvieran una dirección NW-SE. Posteriormente, se formarían las de dirección NW-SE que se encuentran cortando y desplazando a los anteriores (Fig. 8). Y, finalmente, las últimas serían las de dirección W-E, cortando a todos los anteriores, pero en este caso sin que se produzca desplazamientos. Los relieves positivos se encuentran atravesados por las fracturas, situándolos en una edad anterior. Finalmente, la gran mayoría de los cráteres generados por los impactos están afectados por la fracturación que recorre la zona e incluso, algunos, afectados por impactos posteriores. También se encuentran impactos modernos que no están alterados por ninguna de las anteriores estructuras.

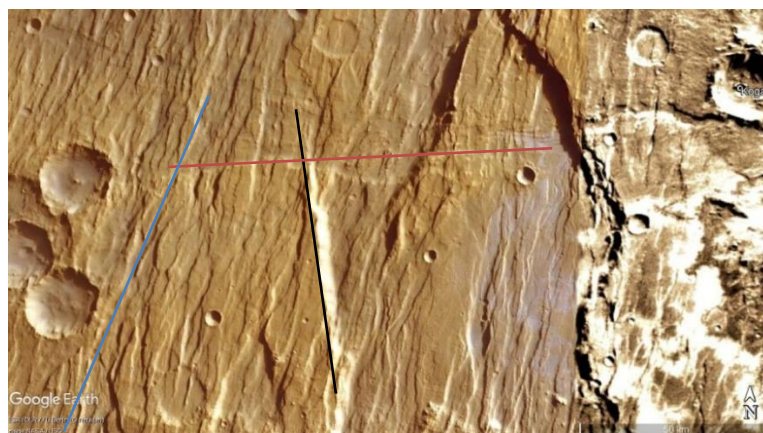


Figura 8: En la imagen se aprecia las diferentes direcciones de las fracturas. En color azul se localizan fracturas de dirección NE-SW, en color negro fracturas de dirección NW-SE y en color rojo las de W-E. También puede observarse como las fracturas de dirección NW-SE desplazan a las de dirección NE-SE y como las W-E cortan a todas las anteriores. Tomada de Google Earth.

6.4. Análisis de orientaciones

Seguidamente, se estudian los datos conseguidos a partir de los resultados de los programas informáticos. Para la realización de un análisis cuantitativo se han registrado en un mapa (Fig. 9) los datos de 1167 estructuras. El tipo de estructuras que se han reconocido son las que han anteriormente se han denominado como fracturas.



Figura 9: Visualización de las estructuras reconocidas en la zona. A la izquierda se sitúa el mapa de las mismas sobre la imagen obtenida por la sonda Viking.

A la hora de realizar un estudio basado en la distribución de ángulos de esos elementos sólo se han interpretado 587. Esto es debido a que algunas de estas estructuras se encuentran demasiado juntas y tienen una extensión muy pequeña y por ese motivo el programa utilizado las ha considerado unidas. El programa proporciona de esta forma una imagen de las elipses (Fig. 10) que mejor se ajustan a la medida de los objetos que describen.



Figura 10: Representación de las elipses obtenidas a partir del ImageJ. Esta imagen da una idea de cuáles son los datos que ha analizado finalmente.

Para su análisis el programa ha proporcionado los datos del área, de los ejes mayores y menores de las elipses de deformación y los ángulos de las direcciones de las trazas de las fracturas. Los datos que principalmente se han usado son los de los ángulos. A partir de los datos de los últimos se han obtenido dos histogramas (Fig. 11) de distribución: el primero está basado en divisiones cada 5 grados y segundo está basado en divisiones cada 10 grados. Los ángulos son leídos desde la horizontal (0°) continuando en sentido antihorario (hasta 180°).

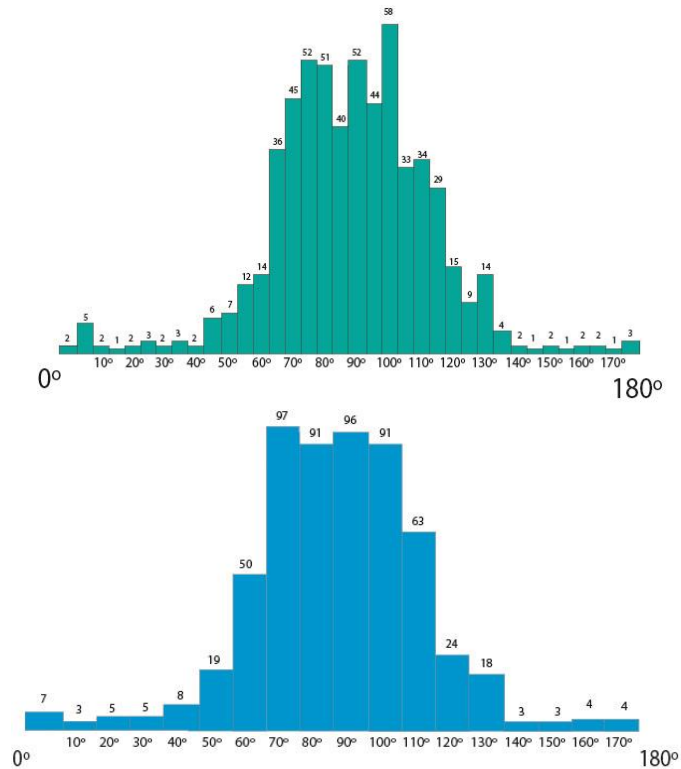


Figura 11: Histogramas obtenidos a partir de programa ImageJ. En la parte superior, el histograma realizado con divisiones cada 5 grados. En la parte inferior, el histograma con las divisiones cada 10 grados. Se muestra la frecuencia de cada elemento en la parte superior de cada gráfico.

El primer histograma muestra que la dirección principal se sitúa en los 100-105° (NE-SW), con máximos relativos en direcciones 90-95° y 75-80°. Mientras que en el segundo histograma la dirección principal es de 70-80° (NW-SE) con un máximo relativo la dirección 90-100°. Estos datos de direcciones concuerdan con las direcciones de las fracturaciones obtenidas a partir de las imágenes.

Además, también se estudia la densidad de los elementos estructurales representados. Para ello, se ha dibujado en un mapa de contornos (Fig. 12), en el cual se aplica la densidad de las coordenadas de los elementos obtenidas por el programa ImageJ. Hay que recordar que los datos aportados por este programa no representan la totalidad de los recabados si no que son inferiores.

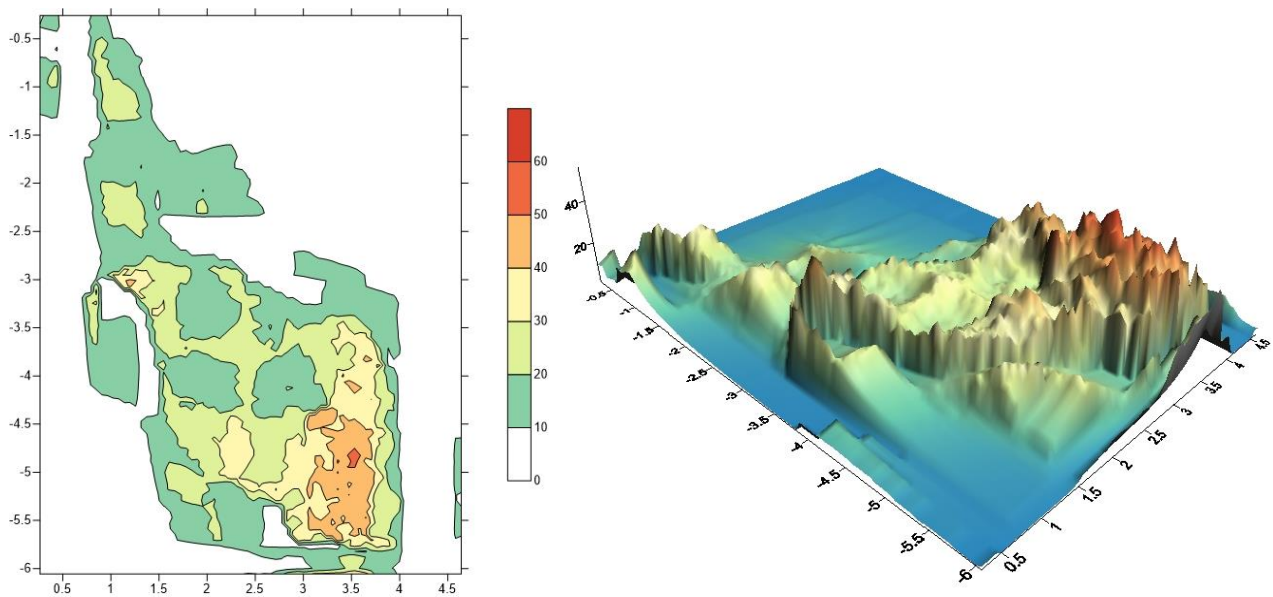


Figura 12: Mapa de contornos de densidad. Este mapa muestra las zonas donde hay una mayor densidad (color rojo) de las fallas representadas. En el mapa de la derecha queda representado el mapa de contornos en tres dimensiones. Este último muestra de una manera más visual donde quedan que las mayores concentraciones.

La interpretación que se realiza sobre este mapa es la de que hay una zona con una mayor concentración de elementos en el margen inferior derecho de la imagen. Aunque es en este lugar donde quedan concentradas la mayoría de las fracturas, hay otra zona con una concentración relativamente elevada en la parte central izquierda. En el resto del área la distribución de las fracturas es menor y equitativa.

7. Interpretaciones

Las observaciones e interpretaciones son estudiadas a partir de los resultados obtenidos en el apartado anterior. Para comenzar se procede a interpretar la diferencia de altura entre unas zonas y otras. Con ayuda del mapa geológico se intuye que las áreas elevadas se han formado debido a los diversos cabalgamientos que rodean a Thaumasia Highlands. Cuando se habla en tectónica planetaria de este tipo de escarpes, con una pendiente tan acusada, se les denomina escarpes lobulados.

Lo siguiente en ser estudiado han sido las numerosas fracturas que recorren la zona. Como se ha dicho anteriormente, estas estructuras tienen direcciones diferentes y poseen un espaciado entre las mismas. A partir de diversas imágenes quedan definidas como un gran sistema de grabens, siendo las fracturas fallas de tipo normal. Con esta información puede asociarse la gran fractura central que recorre a Claritas Fossae a una estructura de tipo rift. Para hacer esta afirmación se observan dos características esenciales que se asocian a los rifts: un gran graben asociado a esta fractura y un patrón de fallas a ambos lados del mismo

Para el estudio estructural de los elementos se han utilizado las imágenes que se encuentran en la página de la HIRISE. Estas imágenes son de gran calidad y en ellas se aprecian muy buenos detalles de la superficie de Marte.

Una de las primeras imágenes (Fig. 13) que se interpretan se encuentra localizada en la zona del rift de Claritas Fossae. En esta primera imagen puede verse diferentes fallas con dirección NE-SW. Hay una falla que destaca más sobre las anteriores y que forman un importante escarpe. El resto de las fallas no forman escarpes tan destacados y parece que acaban contra la falla principal. También puede observarse una pequeña falla de dirección NW-SE que corta a las fallas anteriores.



Figura 13: Fallas normales localizadas cerca del rift. Imagen tomada del HiRISE.

En otra imagen (Fig. 14), obtenida de un sitio cercano al anterior, pueden observarse igualmente fallas normales e igualmente con dirección NE-SW. Se vuelve a notar que estas estructuras forman escarpes importantes. También puede observarse que las fallas son bastantes extensas ocurriendo durante varios kilómetros.

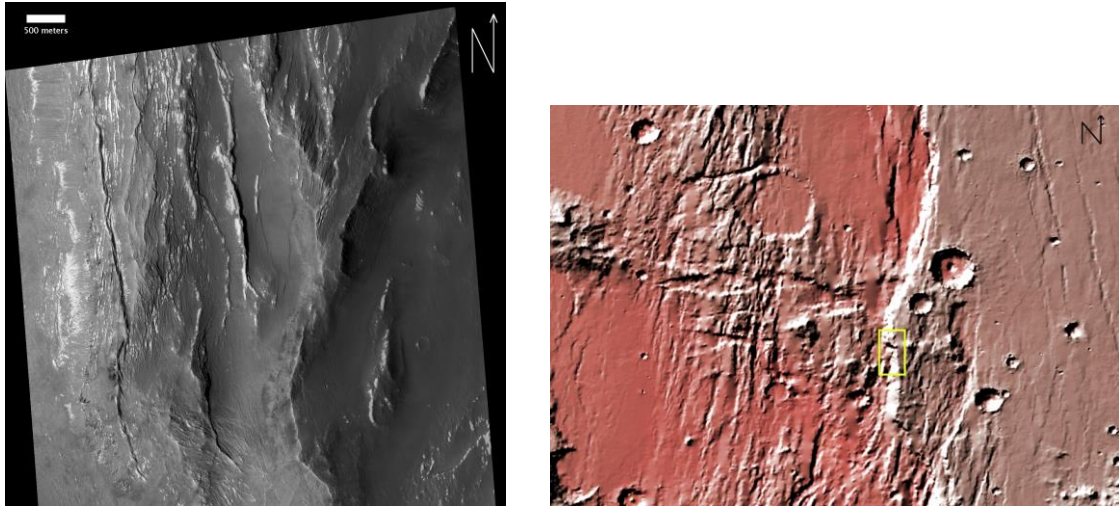


Figura 14: Fallas normales de dirección NE-SW situadas también cerca del rift (tomada del HiRISE). A la derecha mapa de situación de la zona (modificada de la imagen procedente del MOLA).

Una magnífica foto para ver los grabens que se observan a lo largo de toda la zona es la que se muestra a continuación (Fig. 15). En ella, se vislumbra un graben de una anchura considerable entre dos fallas normales de poco escarpe.

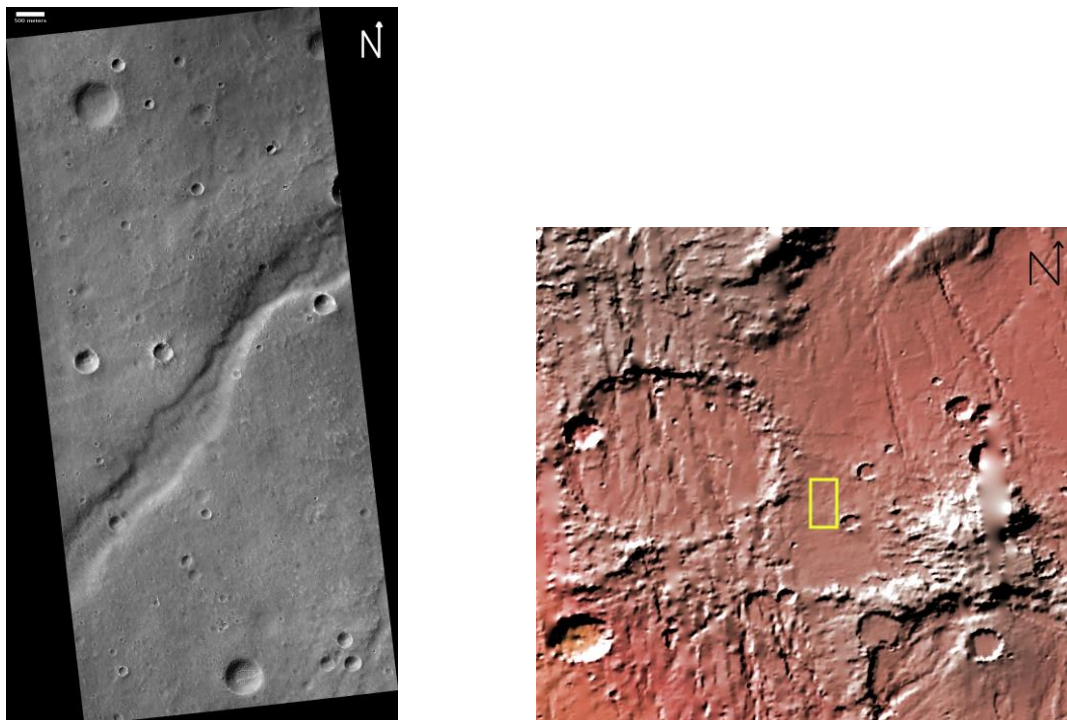


Figura 15: Graben cercano a un cráter en la zona de Claritas Fossae (tomada del HiRISE). A la derecha mapa de situación de la zona (modificada de la imagen procedente del MOLA).

A continuación, pueden verse fallas de dirección NE-SW (Fig. 16) que están cortadas por una falla de dirección W-E. De esta forma, se confirma lo interpretado anteriormente de que estas últimas serían más antiguas que las primeras. También se aprecia cierta curvatura en las fallas NE-SW en la zona inferior de la imagen.

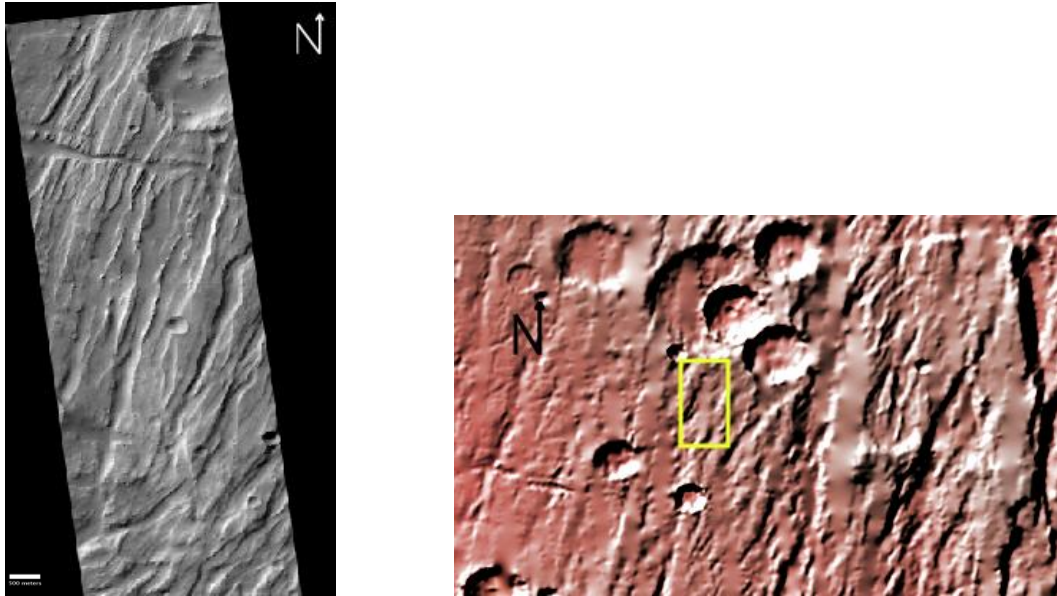


Figura 16: Fallas normales cortando entre si (tomada del HiRISE). A la derecha, localización de la zona dentro de Claritas Fossae (modificada de la imagen procedente del MOLA).

En la última imagen (Fig. 17) pueden verse las fallas de dirección NW- SE formando grabens. Parecen tener un escarpe no muy marcado. En la parte superior de la imagen puede verse una falla de dirección NE-SW atravesada por las de dirección NW-SE.

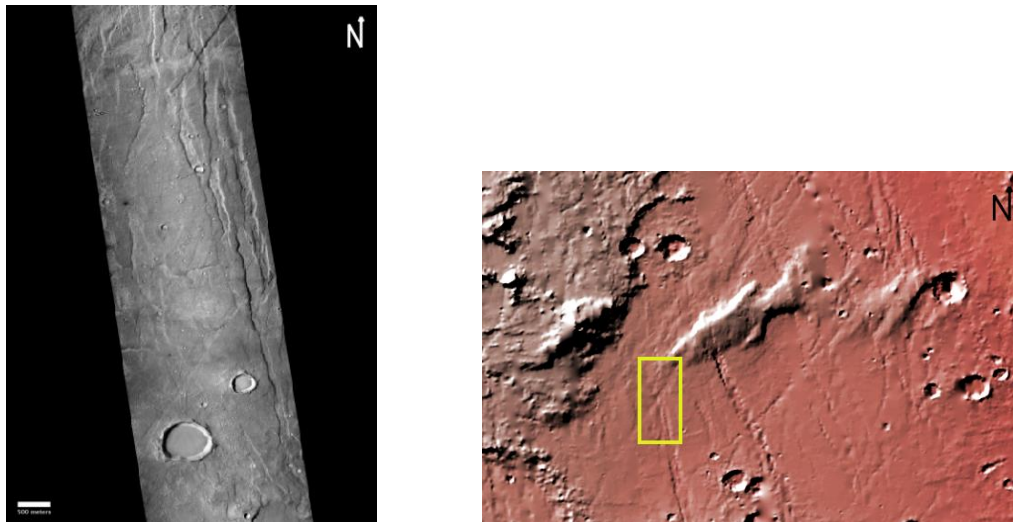


Figura 17: Fallas normales de dirección NW-SE (tomada del HiRISE). A la derecha, localización de la zona dentro de Claritas Fossae (modificada de la imagen procedente del MOLA).

A continuación se describen las estructuras asociadas al relieve que poseen un relieve positivo. Estas estructuras quedan interpretadas como pliegues relacionados con los cabalgamientos que formaron la zona. Para confirmar esta interpretación se pasa a explicar cada pliegue de forma individual con ayuda del mapa geológico.

El primer pliegue (Fig. 6.a) tiene una forma de antiforame de gran envergadura. Posee una dirección del eje W-E. Observando la dirección del eje parece que se formó en un estado de deformación diferente a las fallas que recorren a zona. Los esfuerzos necesarios para formar los mismos difieren de las fallas tratándose, en este caso, de esfuerzos compresionales. El mapa

geológico (Fig. 18) permite poder observar la forma de antiforime entre los materiales de Nb y HNF, y cubriendo a estos materiales de secuencia de plataforma Npl₂ que representan finas capas de flujos de lava y depósitos eólicos. De esta manera quedan en la zona central los materiales más antiguos, Nb, y en la zona externa los más modernos, Nf. Las fallas que transcurren por toda la zona del pliegue modifican su estructura haciendo que sea complicado observar más datos sobre su morfología.

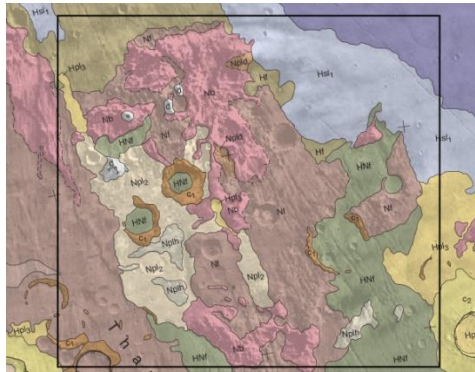


Figura 18: Mapa geológico de la zona correspondiente a la situación del pliegue antiforime. Modificado de Dohm et al. (2001).

Los siguientes pliegues (Fig. 6.b) son pliegues relacionados con los distintos cabalgamientos que delimitan la zona, por tanto serán pliegues de propagación de falla. Ambos pliegues tienen una dirección del eje de E-W y se encuentran atravesados por numerosas estructuras de fracturación e impactos meteoríticos. Al igual que en el pliegue anterior, ambos pliegues se encuentran formados por fuerzas compresionales, las cuales procedieron del norte y del sur. Estas estructuras se encuentran igualmente atravesadas por numerosas fallas normales. Observando el mapa geológico (Fig. 19) puede verse que en el pliegue situado a la derecha los materiales más modernos se sitúan en el centro, HNpld, mientras que los más antiguos, Nb y HNF, se encuentran rodeando a los primeros. Este pliegue tiene una forma muy compleja ya que los materiales del tipo HNF no se encuentran rodeando a todos los del HNpld y, además, dentro de estos últimos aparecen materiales del Nb. El segundo pliegue es más complicado de diferenciar en el mapa geológico y se enmarca la que podría ser su localización. En esa zona los materiales más antiguos, Nb, se encuentran rodeados de materiales más modernos, Nf Nfd y Nfc, dando lugar a una forma de antiforime.

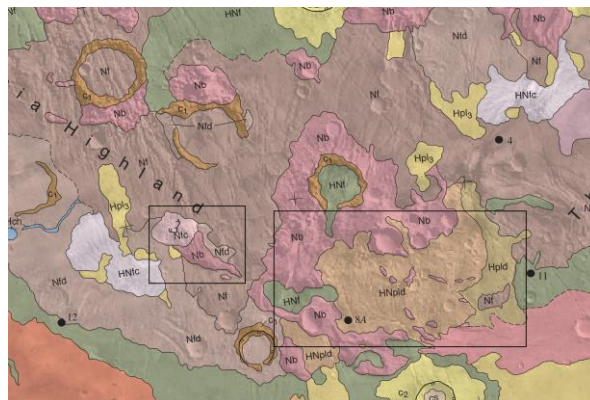


Figura 19: Mapa geológico donde se encuadra el pliegue situado en la zona de Warrego Valles. Se observa que los materiales más modernos (HNpld) se sitúan en el centro y en su alrededor se encuentran materiales más antiguos (Nb). Modificado de Dohm et al. (2001).

Atendiendo a la información recogida a partir de las estructuras reconocidas puede decirse que en la evolución tectónica de la zona de estudio los esfuerzos que han actuado sobre ella no han tenido siempre la misma dirección ni han sido del mismo tipo.

La diferencia en la dirección y tipo de los esfuerzos puede deberse a que estos elementos se formaron en momentos diferentes durante la formación de las Thaumasia Highlands. Observando el mapa geológico (Fig. 20) puede verse que la zona estudiada está formada principalmente por cuatro unidades geológicas diferentes: Nb, Nf, HNF y HNR (Dohm *et al.*, 2001). En la tabla cronoestratigráfica se observa que, aunque principalmente poseen la misma edad (Noeico, e incluso comienzos del Hespérico), no están formados al mismo tiempo. A partir de las descripciones de estas unidades podría confirmarse la hipótesis anterior. Seguidamente se pasa a hacer una breve descripción de estas unidades:

- Nb: se conoce como el basamento complejo: forma nudos, mesas y áreas amplias de relieve prominente similares a la unidad montañosa pero caracterizadas por una estructura altamente complicada de material no diferenciado. La interpretación que se le da es que provienen del ensamblaje de rocas indiferenciadas de diversos orígenes.
- Nf: son materiales más antiguos fracturados, similares a los intermedios, debido a la edad pero más robustos, fallados o con cráteres. En este caso, la deformación ha sido destruida por características morfológicas primarias.
- HNF: son materiales de fractura intermedios. Integran formas de relieve relativamente suaves con fracturas y grabens.
- HNR: son los materiales de ridged antiguos situados en llanuras, similares a los materiales de ridged modernos, pero cortados por grabens y con una mayor densidad de cráteres.

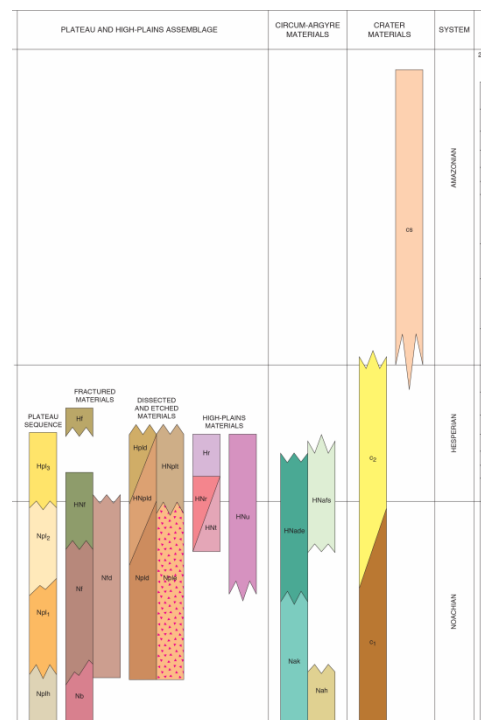
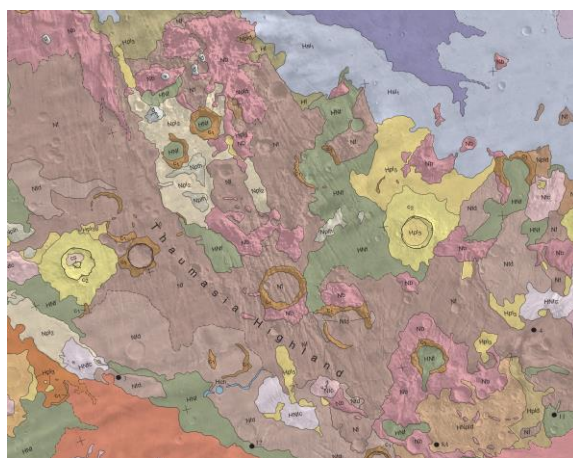


Figura 20: A la izquierda mapa geológico de la Thaumasia Highland remarcando la zona de Claritas Fossae y Warrego Valles. A la derecha se encuentra la columna estratigráfica correspondiente al mapa geológico. Modificado de Dohm *et al.* (2001).

De este modo puede decirse que la zona de las Thaumasia Highlands ha sido formada, como mínimo, por dos estados con esfuerzos contrarios. En el primer estado actuaron fuerzas compresivas y, durante el cual, se formarían los diferentes cabalgamientos y, posteriormente, los pliegues asociados. Esta etapa sería la que daría lugar a la elevación de la zona y sería la primera en el tiempo. Mientras que en el segundo estado sería las fuerzas extensivas las que actuaron. Durante este período se formarían las numerosas fallas normales que recorren la zona cortando los elementos estructurales de la etapa anterior y las que formarían los graben. Dentro del contexto extensivo también habría momentos en los cuales la dirección de los esfuerzos variaría formando así las fallas normales con diferentes direcciones.

El último de los lugares que tienen cabida en este estudio en la zona llamada Warrego Valles. La mejor foto para su estudio y poder observar su estructura es la obtenida por la Viking (Fig.21). A simple vista ya se puede inferir que podría tratarse de un sistema de drenaje. El patrón de ese sistema de drenaje sería de tipo dendrítico y la morfología del mismo es muy similar a los que hay en la Tierra. En la imagen obtenida del HiRISE puede observarse la morfología que poseen los canales.

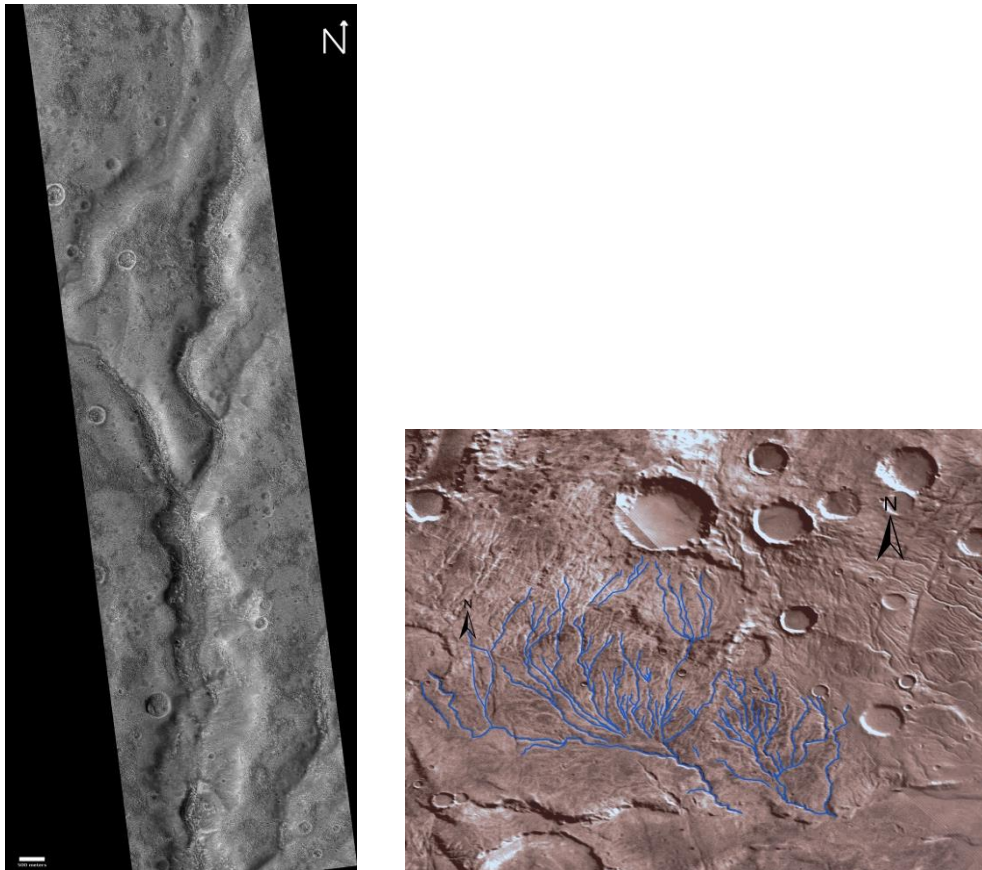


Figura 21: A la izquierda, morfología y vista en detalle de un canal de Warrego Valles (tomada del HiRISE). A la derecha, imagen de la zona donde se encuentra marcado el sistema de drenaje (modificada de la imagen procedente de la sonda Viking).

8. Comparaciones entre la Tierra y Marte

8.1. Basin and Range

El estilo estructural y la evolución de Thaumasia Plateau ha sido objeto de debate durante años. Según Dohm y Tanaka (1999) durante los estados 1 y 2 de la formación de Thaumasia parece que esta se formó por uplift produciendo de esta forma un adelgazamiento cortical y formándose los sistemas de grabens y rifts. Estos autores dicen que es posible comparar este sistema con algunas provincias intracontinentales y cordilleras montañosas de la Tierra. La comparación más fácilmente perceptible es la que puede hacerse con la provincia del Basin and Range (Fig. 22) en EEUU. La provincia del Basin and Range se encuentra caracterizada por cordilleras montañosas paralelas y espaciadas uniformemente y por cuencas desérticas intermedias. Estas cuencas y cordilleras fueron creadas debido a la tensión continua de la región, presionando la región en dirección este-oeste (*IRIS*). La principal teoría de formación del Basin and Range es que está formada por un adelgazamiento cortical y de la parte superior del manto, haciendo de esta forma que se produzca la extensión que dio lugar a la formación de las fallas normales. De esta forma, aunque se encuentran otro tipo de fallas, los principales elementos tectónicos que se encuentran son fallas normales paralelas a la extensión. Por lo tanto, puede compararse la manera de formarse el Basin and Range y Thaumasia Plateau, por uplift, y su estilo estructural, grabens y fallas normales.

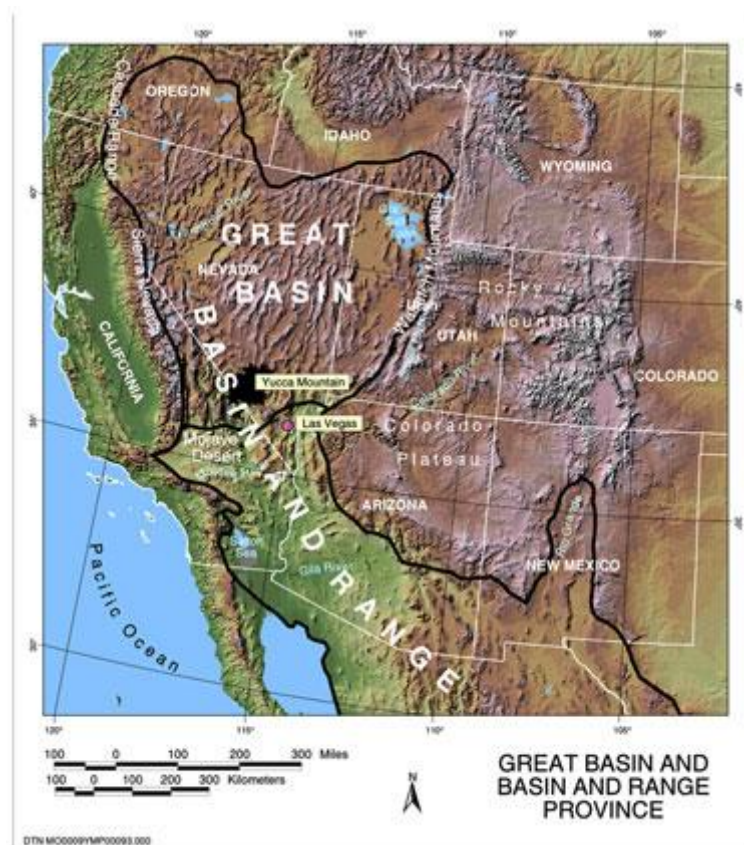


Figura 22: Mapa topográfico de la provincia del Basin and Range. La zona más similar a Claritas Fossae es la que se denomina el Great Basin. Tomada del National Park Service (NPS).

8.2. Cordillera Cantábrica

Según se indica en Nahm y Schultz (2010) una de las hipótesis formuladas para la formación de Thaumasia Highland sugiere una secuencia multietado de deformación compresional. En particular, lo que sugiere es que la compresión de dirección norte-sur causa acortamiento en Thaumasia a lo largo de esa dirección, desencadenando un empuje con dirección sur a lo largo de su margen meridional. Algunos autores (Anguita *et al.*, 2006) compararon directamente las Thaumasia Highlands con los cinturones orogénicos que hay en la Tierra, como por ejemplo la Cordillera Cantábrica Alpina, motivados por la hipótesis de que las Thaumasia Highlands se formaron como un cinturón orogénico de pliegues y fallas.

Debido a que no hay una capa de despegue, los cabalgamientos alpinos de la cordillera Cantábrica cortan a través de la cobertera Mesozoica y Cenozoica, reactivando las estructuras del basamento varisco. Esta estructura puede ser comparable a lo que sucede en la zona de Warrego Valles donde el basamento se moviliza de forma similar (Alonso y Pulgar, 2004). En la Fig. 23 puede observarse como en el corte geológico realizado en el área de Warrego los cabalgamientos atraviesan la zona del basamento y que este corte es similar al corte realizado en la Cordillera Cantábrica.

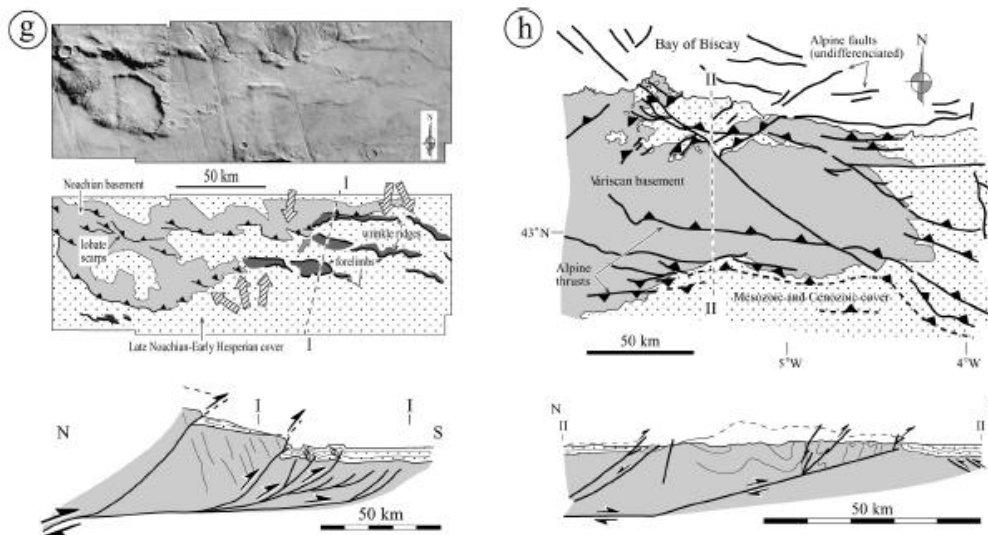


Figura 23: Comparación entre la zona de Warrego Valles y la Cordillera Cantábrica. Visualización de las similitudes entre los cabalgamientos que suceden en ambas zonas. La zona del basamento (color gris) es atravesada por los cabalgamientos que afectan a la zona. Tomada de Anguita *et al.* (2006).

8.3. Cordillera Ibérica

En la zona oeste-central de Claritas Fossae puede observarse un pliegue antiformal con una traza axial de dirección E-W (Anguita *et al.* 2006). Este pliegue ha sido estudiado anteriormente en el apartado 7. La dirección de las capas en esta área es E-W con buzamiento hacia el norte, quedando afectadas por otros pliegues de dirección E-W. También se ha identificado un segundo set de pliegues de dirección NW-SE que van a doblar los planos axiales de los pliegues anteriores.

Realizando un análisis estructural de la zona se observa otro estado de plegamiento que está afectado a las unidades Nf y HNf con pequeños pliegues ondulados, y cuyos extremos se apoyan contra las formas de interferencia (Anguita *et al.* 2006). El resultado que se obtiene es una geometría muy similar a los pliegues “serpenteantes” (Fig. 24) descritos por Simón (2005) y que representan un caso de erosión controlado por estructuras tectónicas. La eliminación de sobrecargar permite al flanco este en los pliegues N-S comportarse como capas independiente y replegarse localmente en pequeños pliegues recordando a una forma de serpiente. Este tipo de pliegues pueden localizarse en Aliaga (Teruel) dentro de la Cordillera Ibérica (España).

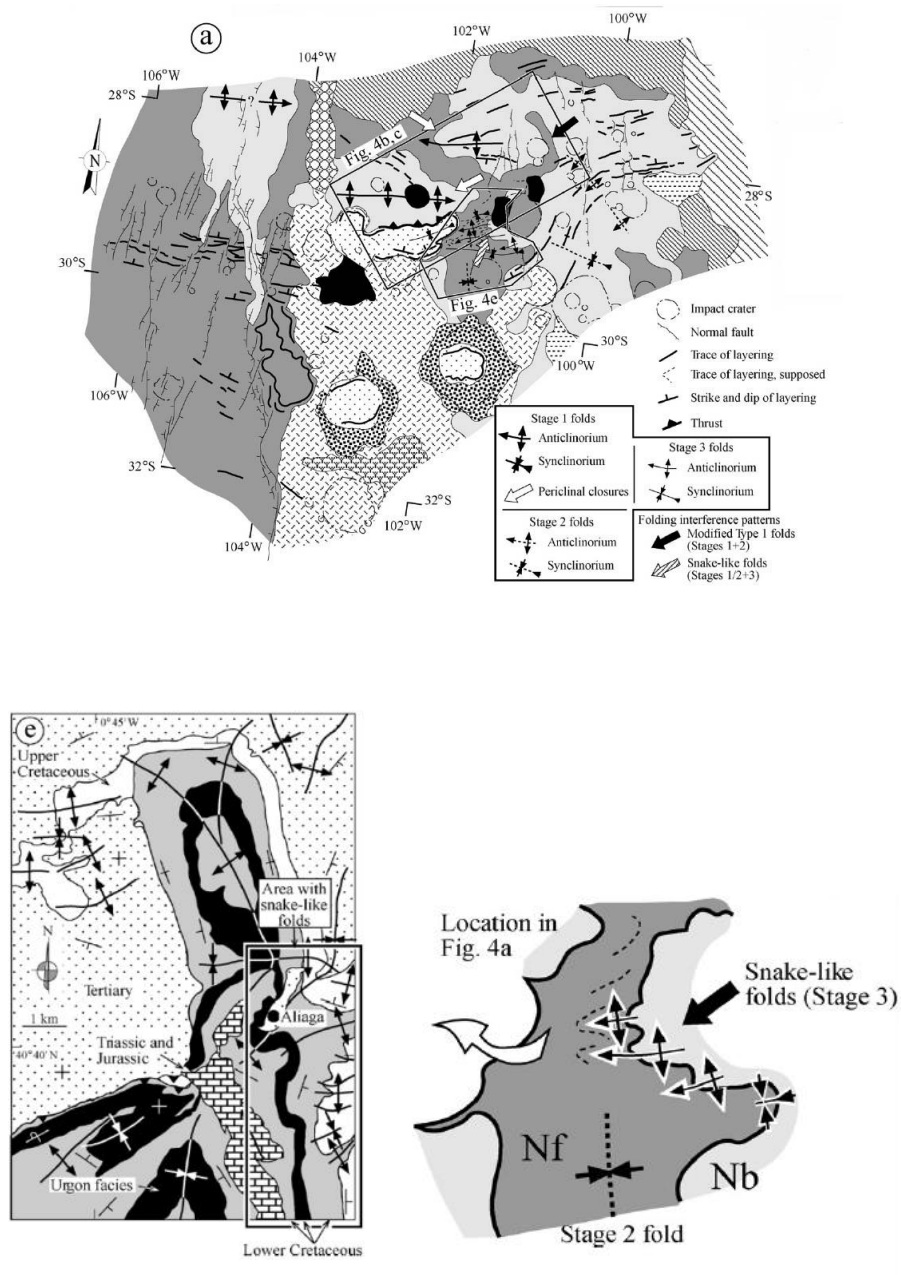


Figura 24: En la parte superior localización de los pliegues estudiados. A la izquierda pliegues serpenteantes descritos en el área de Aliaga (España). A la derecha situación de este tipo de pliegues dentro del antiforme de Claritas Fossae. Tomada de Anguita *et al.* (2006).

8.4. Sistemas de rift en la tierra

En la zona central de Claritas Fossae se encuentra un gran graben conocido como Thaumasia Graben (TG). Este tiene una tendencia aproximada N-S, con más de 1000 km de largo y una media de 100 km de anchura. El Thaumasia Graben tiene ciertas características asociadas a los rifts que pueden asemejarse a los rifts encontrados en la Tierra. Estas características serian una arquitectura de halfgraben o asimétrica y el cambio de polaridad de la asimetría (Hauber y Kronberg, 2005). Otra similitud importante es el patrón de fallas del sistema principal de fallas que puede asemejarse al que puede encontrarse en Thingvellir en el Rift de Islandia o al Rift de Kenia (Fig. 25). Por otro lado, las diferencias de Thaumasia Graben con los graben terrestres se evidencia principalmente en que no existen ciertas fracturas que quedan asociadas a los graben terrestres, como los valles asociados a los rifts, y tampoco hay evidencias de vulcanismo asociado con la formación del rift.

Como conclusión podría decirse que Thaumasia Graben posee ciertas similitudes con los rifts terrestres pero carece de las características que hacen a los mismos tan distinguibles.

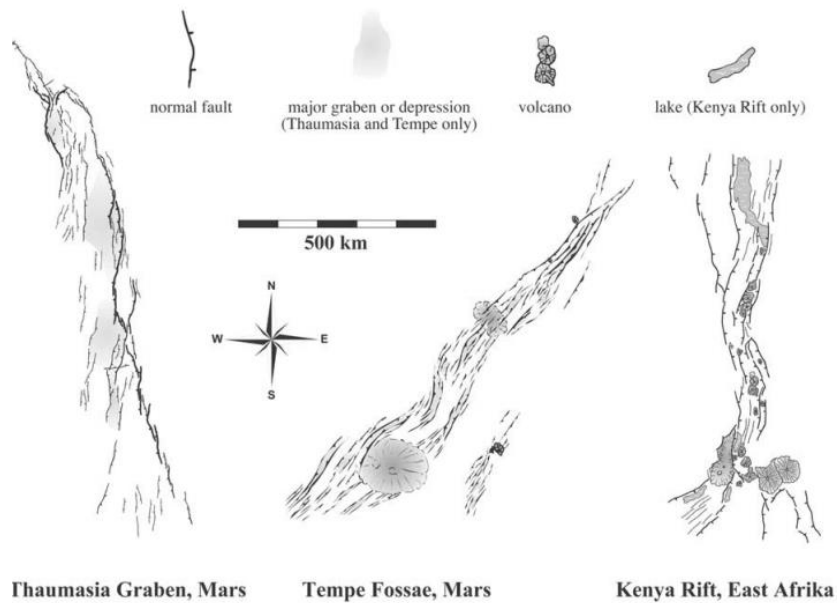


Figura 25: Comparación entre diferentes sistemas de rift de Marte y la Tierra. Tomado de Hauber y Kronberg (2005).

9. Conclusions

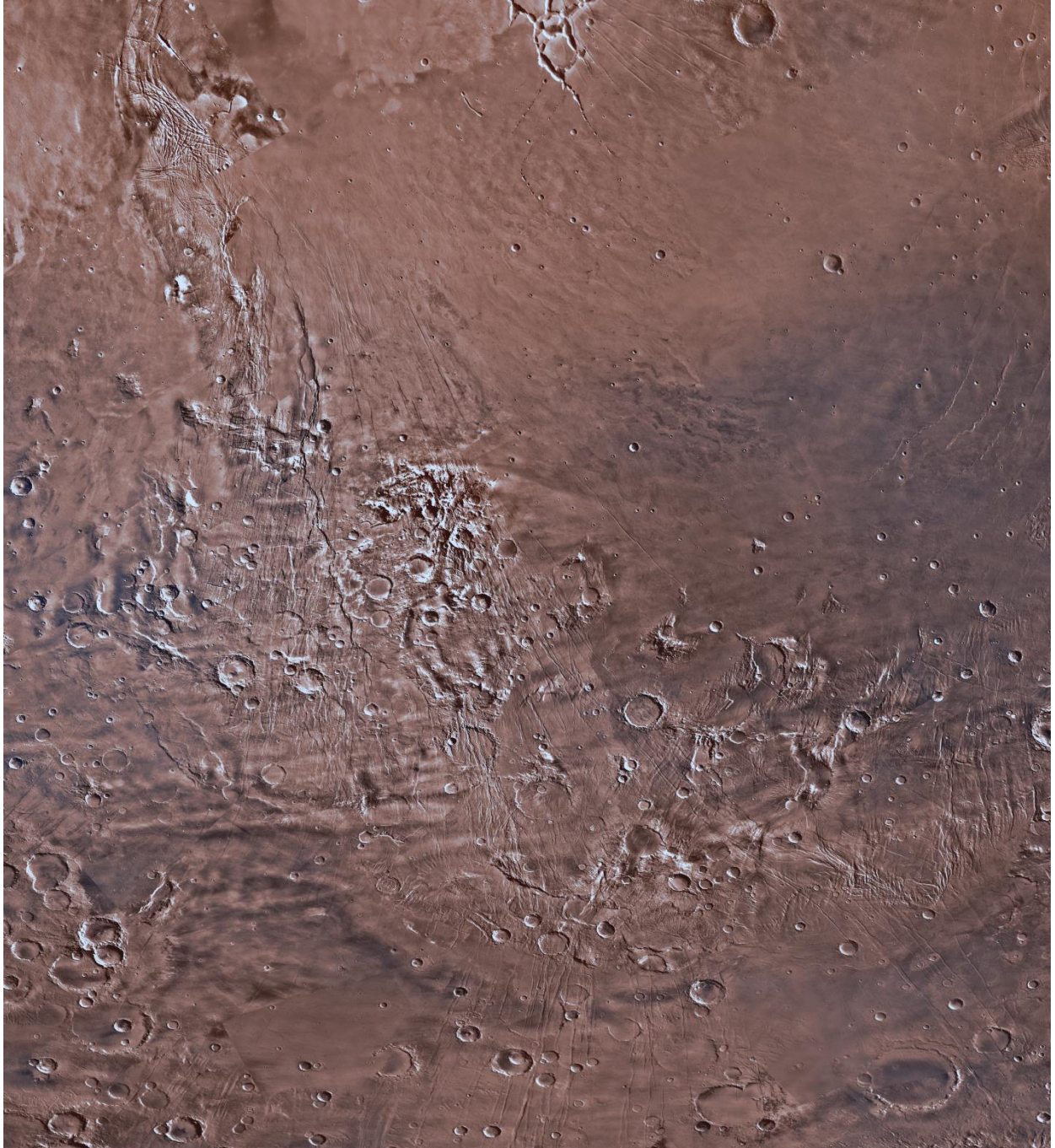
After performing the analysis of the images, the following conclusions can be made:

- The Thaumasia Highlands area is formed by several structures: normal faults, grabens, thrusts, folds and impact craters. Regarding to the faults, it can be seen that there is a major fault crossing the area of Claritas Fossae that is described as a possible rift. There are also other minor faults through the area that can be divided into three families according to their directions: NW-SE, NE-SW and E-W. The thrusts are delimiting the raised areas and they are associated with the folds.
- It is demonstrated, with the previous structures, that a relative chronology can be obtained. As follows the first elements to be formed will have been the thrusts and, later, the folds and to close with the normal faults and grabens. Impact craters have diverse ages since different structures may be affected or not, such as faults.
- From the above, it is clear that in the formation of the study area there have been two different states of stress at least. The first state includes the formation of compression-type structures (thrusts and folds) and in the second state the structures of extensive-type were formed (normal faults and grabens)
- In Warrego Valleys, it is demonstrated that an area is settled where a drainage system extends that it is similar to terrestrial ones.
- The comparisons made between Mars and our planet show different results:
 - The area of the Basin and Range in the USA is characterized, like Thaumasia Highlands, by normal faults and grabens.
 - In the Cantabrian Mountains (Spain) the alpine thrusts go through variscan basement materials. In Warrego Valleys it can be observed that the thrusts that affect the area also cross the basement materials.
 - In the area of Aliaga (Iberian Chain, Spain) they are located snake-like geometry folds, found in the same way in the west-central area of Claritas Fossae.
 - The long fracture that runs through the central zone of Claritas Fossae could be compared with the different rift zones that exist on Earth, but in spite of their similarities it also has particularities that are only found on Mars.

10. Bibliografía

- Alonso, J.L., Pulgar, J.A. (2004): Estructura alpina de la Cordillera Cantábrica: Generalidades. En: *Geología de España* (Vera, J.A., ed.). IGMM-SGE, Madrid, 332-334.
- Anguita, F., Fernández, C., Cordero, G., Carrasquilla, S., Anguita, J., Núñez, A., Rodríguez, S. y García, J. (2006): Evidencies for a Noachian- Hesperian orogeny in Mars. *Icarus*, 185, Issue 2: 331-357.
- Ansan, V. y Mangold, N. (2006): New observations of Warrego Valles, Mars: Evidence for precipitation and surface runoff. *Planetary and Space Science*, 54: 219-242.
- Dohm, J.M. y Tanaka, K.L. (1999): Geology of the Thaumasia region, Mars: plateau development, valley origins, and magmatic evolution. *Planetary and Space Science*, 47: 411-431.
- Dohm, J.M., Tanaka, K.L. y Trent, M.H. (2001): *Paleotectonic Map of the Thaumasia Region, Mars*. U.S. Department of the Interior and U.S. Geological Survey.
- Dohm, J.M., Tanaka, K.L. y Hare, T.M. (2001): *Geologic Map of the Thaumasia Region, Mars*. U.S. Department of the Interior and U.S. Geological Survey.
- Grott, M., Hauber, E., Werner, S.C., Kronberg, P. y Neukum, G. (2007): Mechanical modeling of thrust faults in the Thaumasia region, Mars, and implications for the Noachian heat flux. *Icarus*, 187: 517-526.
- Hauber, E. y Kronberg, P. (2005): The large Thaumasia graben on Mars: Is it a rift?. *J. Geophys. Res.*, 110, E07003, doi: 10.1029/2005JE002407.
- Hernández, P. (2015): Marte; Geología, Evolución planetaria y vida. *I Curso Online e Marte: geología, evolución planetaria y vida*. Ilustre Colegio Oficial de Geólogos.
- HiRISE. Lunar & Planetary Laboratory (en línea) (fecha de consulta: 24/10/2018). Disponible en: <https://www.uahirise.org/>
- Incorporated Research Institutions for Seismologic, *IRIS* (en línea). How do Basin and Range Mountains and valleys form? (fecha de consulta: 04/09/2018). Disponible en: https://www.iris.edu/hq/inclass/animation/basin_range_structural_evolution
- Nahm, L.A y Schultz, A.R. (2010): Evaluation of the orogenic belt hypothesis for the formation of the Thaumasia Highlands, Mars. *Journal of Geophysical Research*, 115: E04008, doi: 10.1029/2009JE003327.
- National Park Service (NPS) (en línea). Mountains (fecha de consulta 19/11/2018). Disponible en: <https://www.nps.gov/grba/learn/nature/mountains.htm>
- Simon, J.L. (2005): Erosion-controlled geometry of buckle fold interference. *Geology*, 33:561-564.
- USGS (en línea). Astrogeology Science Center (fecha de consulta: 15/06/2018). Disponible en: <https://astrogeology.usgs.gov/>
- USGS (en línea). Geologic Provinces of the United States: Basin and Range Province (fecha de consulta: 18/08/2018). Disponible en: <https://geomaps.wr.usgs.gov/parks/province/basinrange.html>
- Vaz, D.A., Spagnuolo, M.G. y Silvestro, S. (2014): Morphometric and geometric characterization of normal faults on Mars. *Earth and Planetary Science Letters*, 401: 83-94.

Anexo I: Imagen procedente de la sonda Viking



Anexo II: Imagen procedente del MOLA

