

CARACTERIZACIÓN GEOMORFOLÓGICA DE CANALES MAYORES,
EN EL SECTOR DE KASEI VALLES (MARTE),
MEDIANTE LA INTEGRACIÓN DE INFORMACIÓN OBTENIDA POR LAS
MISIONES ESPACIALES MARS GLOBAL SURVEYOR, MARS
RECONNAISSANCE ORBITER, MARS ODYSSEY Y MARS EXPRESS

JORGE ALBERTO HERNÁNDEZ RESTREPO

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE MANIZALES
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
MAESTRÍA EN TELEDETECCIÓN
MANIZALES
2016

CARACTERIZACIÓN GEOMORFOLÓGICA DE CANALES MAYORES,
EN EL SECTOR DE KASEI VALLES DEL PLANETA MARTE,
MEDIANTE LA INTEGRACIÓN DE INFORMACIÓN OBTENIDA POR LAS
MISIONES ESPACIALES MARS GLOBAL SURVEYOR, MARS
RECONNAISSANCE ORBITER, MARS ODYSSEY Y MARS EXPRESS

JORGE ALBERTO HERNÁNDEZ RESTREPO

Trabajo de Grado para optar al título de Magister en Teledetección

DIRECTORES:

JESÚS MARTÍNEZ FRÍAS. GEÓLOGO
Doctor en Ciencias Geológicas. Instituto de Geociencias, IGEO
CSIC - Universidad Complutense de Madrid, España

PEDRO KARIN SERRATO ÁLVAREZ. AGRÓLOGO
Máster en Geografía. Docente Investigador
Instituto CIAF – IGAC, Colombia

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE MANIZALES
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
MAESTRÍA EN TELEDETECCIÓN
MANIZALES

2016

Nota de Aceptación

Presidente del Jurado

Jurado

Jurado

Manizales 18-10-2016

Dedico este Trabajo de Grado a Dios por su luz poderosa que me nutre y alienta en la adversidad, a mis padres por su gran ejemplo y sabios consejos, a mi compañera por su incondicional apoyo y amorosos cuidados, a mi hijo por la esperanza que representa.

AGRADECIMIENTOS

La realización de esta investigación fue posible, gracias a una serie de personas quienes con su motivación, orientación y precisos consejos, promovieron que esta iniciativa tomara forma y se concretara como un Trabajo de Grado bien estructurado y con importantes resultados. Agradezco inicialmente a la Doctora Adriana Ocampo Uría PhD, de la División de Ciencias Planetarias de la NASA, quien con su amistad, orientación y el ejemplo de su trasegar científico, ha inspirado mi interés por la Geología Planetaria.

De igual manera agradezco al Profesor Jesús Martínez Frías, respetado científico y experto Geólogo Español, condecorado del Planeta Marte, Director de la Red Española de Planetología y Astrobiología (REDESPA), quien con sus acertadas apreciaciones ha corregido el rumbo de esta investigación. Mis agradecimientos se extienden además al Profesor Pedro Karín Serrato Álvarez, recorrido docente del CIAF del Instituto Agustín Codazzi de Colombia, cuyas respetuosas y valoradas sugerencias enriquecieron la presente Tesis.

Quero efectuar un gran reconocimiento al equipo científico de la Universidad Estatal de Arizona-ASU, la Universidad de Berlín, la Agencia Espacial Europea - ESA y la Agencia Espacial de los Estados Unidos de América -NASA, quienes con su excelente labor profesional, han permitido que las imágenes utilizadas para los propósitos de la presente investigación, hayan estado siempre disponibles de manera libre e irrestricta. Así mismo, mi profunda gratitud para CORPOCALDAS, entidad gubernamental que ha permitido brindarle mis servicios profesionales y ha hecho posible que dispusiera de parte de mi tiempo laboral, para la culminación de mi Maestría.

A todas las personas a quienes sin intención he pasado por alto, pero que de una u otra manera han hecho parte del proceso que he adelantado, para obtener este satisfactorio resultado. A todos, mil gracias.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	17
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	19
2. JUSTIFICACIÓN	22
3. OBJETIVOS	23
3.1. OBJETIVO GENERAL	
3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	
4. MARCO TEÓRICO	24
5. MATERIALES Y MÉTODOS	32
5.1 MATERIALES	
5.2 METODOLOGÍA	33
6. CONTEXTO FISIAGRÁFICO DE KASEI VALLES	38
7. GEOMORFOLOGÍA	47
7.1 GEOFORMAS PRESENTES EN KASEI VALLES	54
8. MORFOMETRÍA	81
8.1 SECCIONES TRANSVERSALES DE LOS CANALES DE KASEI VALLES	
8.2 PERFILES LONGITUDINALES DE LOS CANALES DE KASEI VALLES	93
8.3 ANÁLISIS DEL TRAZADO DE LOS CANALES MAYORES DE KASEI VALLES	97

9.	HIPÓTESIS DE LA GEOMORFOGÉNESIS DE KASEI VALLES	103
9.1	MODELO DE GEODINÁMICA COMPLEJA	109
10.	CONCLUSIONES	136
11.	RECOMENDACIONES	139
12.	BIBLIOGRAFÍA	149

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Proceso metodológico de la Colmena e interacción de sus componentes	33
Figura 2. Contexto del sector de Kasei Valles	38
Figura 3. Principales lugares que enmarcan el área	39
Figura 4. Delimitación de Kasei Valles	40
Figura 5. Tharsis Montes, Echus Chasma y Kasei Valles	41
Figura 6. Esquema de las condiciones climáticas época Early Mars	42
Figura 7. Esquema de las condiciones climáticas época Post Noaquiiana	43
Figura 8. Esquema condiciones climáticas actuales de Marte	44
Figura 9. Zonas Climáticas de Marte	45
Figura 10. Detalle del mapa Geológico de Marte 20M	46
Figura 11. Imagen en perspectiva de Kasei Valles	48
Figura 12. Mapa contextual de Channeled Scablands	49
Figura 13. Perspectiva del potencial lugar de nacimiento de Kasei Valles	50
Figura 14. Sección del Cuadrángulo MC-10 “Lunae Palus”	51
Figura 15. Composición de imágenes MOLA con imágenes TES	52

	Pág.
Figura 16. Detalle del sector de inflexión de los canales de Kasei Valles	53
Figura 17. Imagen del sector de Sacra Mensa en Kasei Valles	53
Figura 18. Zona de Sacra Mensa, ilustrada mediante una imagen MOLA	55
Figura 19. Imagen en perspectiva de la Isla Fluvial de Sacra Mensa	56
Figura 20. Imagen CTX Ejecta de un Cráter de Impacto. Sacra Mensa	57
Figura 21. Composición de imágenes THEMIS Day IR. Lunae Mensa	58
Figura 22. Imagen CTX Cráter de Impacto en una Terraza Erosional	58
Figura 23. Isla del Cráter de Impacto Sharonov	59
Figura 24. Imagen del sector norte de la Isla Fluvial de Sharonov	60
Figura 25. Detalle de las Islas Fluviales Sacra Mensa y Lunae Mensa	60
Figura 26. Conjunto de Islas Fluviales Rongxar – Chryse Planitia	61
Figura 27. Composición de imágenes MOLA imágenes TES. Lunae Palus	62
Figura 28. Esquema simplificado etapas de formación de un Cráter de Impacto	64
Figura 29. Cráteres de Impacto. Confluencia Kasei Valles y Chryse Planitia	65

	Pág.
Figura 30. Imagen CTX Cráter de Impacto transformado en una Isla Fluvial	66
Figura 31. Cráter de Impacto al este de Lunae Mensa	67
Figura 32. Complejos de Cataratas en el área de Lunae Mensa	68
Figura 33. Catarata al inicio de Kasei Valles Sur	69
Figura 34. Imágenes CTX ejemplos de Valles Colgantes en Kasei Valles Sur	70
Figura 35. Vista 3D en perspectiva de Kasei Valles. composición THEMIS	72
Figura 36. Composición 3D perspectiva de Kasei Valles. imágenes THEMIS	73
Figura 37. Pequeño canal al interior de Kasei Valles Sur	74
Figura 38. Cráteres de Impacto, afectados por flujos de origen volcánico	75
Figura 39. Flujos de origen Volcánico, de la provincia volcánica de Tharsis	76
Figura 40. Modelo de extensión de drenajes mediante el proceso de Sapping	77
Figura 41. Valles de Socavación en el área de Nilus Mensae	78
Figura 42. Imagen 3D en perspectiva, zona de Nilus Chaos - Nilus Dorsa	79
Figura 43. Detalle de un sector de Nilus Chaos	80
Figura 44. Imagen THEMIS Day IR zona de Echus Chaos	80

	Pág.
Figura 45. Sección Transversal Nilus Dorsa	81
Figura 46. Sección Transversal Uranius Dorsum	82
Figura 47. Sección Transversal KVS-Inicio	82
Figura 48. Sección Transversal KVS- Nilus Mensae	83
Figura 49. Sección Transversal 1 KVS-Sacra Mensa	83
Figura 50. Sección Transversal 2 KVS-Sacra Mensa	83
Figura 51. Sección Transversal 3 KVS-Sacra Mensa	83
Figura 52. Sección Transversal 4 KVS-Sacra Mensa	84
Figura 53. Sección Transversal KVS A y B	84
Figura 54. Sección Transversal KVS A y B – Luna Mensae	84
Figura 55. Sección Transversal 2 KVS A y B – Luna Mensae	84
Figura 56. Sección Transversal 1 KVS– Sharonov	85
Figura 57. Sección Transversal 2 KVS– Sharonov	85
Figura 58. Sección Transversal 3 KVS– Sharonov	85
Figura 59. Sección Transversal 4 KVS– Sharonov	85
Figura 60. Sección Transversal KVN– Inicio	86
Figura 61. Sección Transversal KVN– Nilus Mensae	87
Figura 62. Sección Transversal KVN– Labeatis Mensae	87
Figura 63. Sección Transversal 1 KVN– Sacra Mensa	87

	Pág.
Figura 64. Sección Transversal 2 KVN– Sacra Mensa	87
Figura 65. Sección Transversal 3 KVN– Sacra Mensa	88
Figura 66. Sección Transversal 4 KVN– Sacra Mensa	88
Figura 67. Sección Transversal 5 KVN– Sacra Mensa	88
Figura 68. Sección Transversal 6 KVN– Sacra Mensa	88
Figura 69. Sección Transversal 1 KVN– Sharonov	89
Figura 70. Sección Transversal 2 KVN– Sharonov	89
Figura 71. Sección Transversal 3 KVN– Sharonov	89
Figura 72. Sección Transversal 4 KVN– Sharonov	89
Figura 73. Sección Transversal 5 KVN– Sharonov	90
Figura 74. Sección Transversal Inicial KVS- KVN	91
Figura 75. Sección Transversal KVS- KVN Sacra Mensa	91
Figura 76. Sección Transversal KVS- KVN Intermedio	91
Figura 77. Sección Transversal KVS- KVN Sharonov	92
Figura 78. Sección Transversal KVS- KVN Nilokeras Mensa	92
Figura 79. Sección Transversal Chryse Planitia	92
Figura 80. Perfil Longitudinal Canal Principal	94
Figura 81. Perfil Longitudinal Total KVS	95
Figura 82. Perfil Longitudinal Total KVN	96

	Pág.
Figura 83. Longitud del Thalweg canal principal más canal KVN	98
Figura 84. Longitud del Thalweg canal principal más canal KVS	99
Figura 85. Composición Hillshade DEM de Kasei Valles e imágenes THEMIS	100
Figura 86. Hillshade de datos MOLA polígono de Echus Chasma	101
Figura 87. Perfil desde Echus Chasma hasta Hebes Chasma	102
Figura 88. Análogo en Alice Springs, Australia.	103
Figura 89. Análogo en Tenerife e Islas Canarias, España	105
Figura 90. Mars Desert Research Station, en el Desierto de Utah Estados Unidos	106
Figura 91. Vistas del Grupo Basáltico del Río Columbia Estados Unidos	107
Figura 92. Imagen 3D Provincia de Tharsis, Valles Marineris y Kasei Valles	110
Figura 93. Discontinuidades geológicas que se irradian desde Tharsis	111
Figura 94. Vista regional de las áreas de Tharsis, Kasei Valles y Tempe Terra	112
Figura 95. Líneas discontinuas indican rumbo de crestas en Lunae Planum	113
Figura 96. Fosas en el sector de Tempe Terra con rumbo 70° Noreste	114

	Pág.
Figura 97. Inflexión de discontinuidades en la Provincia de Tempe Terra	114
Figura 98. Mapas de Anomalías Gravimétricas y Espesor Corteza de Marte	115
Figura 99. Dique en fisura depósitos Amazonianos en Echus Chasma	116
Figura 100. Caldera Volcánica en el Canal Principal de Kasei Valles	117
Figura 101. Columna de Lava en el borde del Cráter Volcánico La Olleta	118
Figura 102. Esquema generalizado continente africano zonas de Rift	119
Figura 103. Ciclos de oblicuidad del Planeta Marte	120
Figura 104. Imagen MOLA sector de Echus Montes y Echus Chaos	121
Figura 105. Lóbulos de flujos volcánicos en la zona Norte de Echus Chaos	122
Figura 106. Fosa tectónica heredada en Echus Montes y flujos de lodo	122
Figura 107. Canal exhumado depósitos de Lahar rodeando Cráter de Impacto	123
Figura 108. Depósitos de Lahar al llegar a Kasei Valles en Echus Chasma	124
Figura 109. Bordes en herradura por la acción hidrodinámica de Lahares	125

	Pág.
Figura 110. Marcas de fondo orientadas hacia la corriente Uranus Dorsum	126
Figura 111. Marcas de fondo orientadas hacia la corriente. Sharonov	126
Figura 112. Isla Fluvial hacia la dirección de corriente Echus Montes	127
Figura 113. Hundimientos tectónicos complejo Valles Marineris	128
Figura 114. Bandas de estratificación en las paredes de Echus Chasma	129
Figura 115. Imagen CTX Marcas de erosión sector Sur de Echus Chasma	130
Figura 116. Marcas de agua expuestas a orillas del Lago Powell	131
Figura 117. Composición de una imagen TES para Filosilicatos	132
Figura 118. Imagen de Albedo medido de 0.3 a 2.9 micrómetros	133
Figura 119. Esquema de la historia geológica del Planeta Marte	134

RESUMEN

Kasei Valles se muestra como un conjunto de grandes y prominentes canales, que comunican el hemisferio sur de Marte, con las tierras bajas de Chryse Planitia, cuya geomorfología ha sido atribuida por varios autores a inundaciones de origen cataclísmico, aunque en la actualidad no es tan claro su origen y factores que influyeron en su conformación actual.

La gran cantidad de geoformas presentes en Marte, con características físicas similares a aquellas encontradas en el planeta Tierra, sugieren que estas pudieron haber sido originadas por mecanismos evolutivos, en los cuales el agua y otros factores endógenos y exógenos, pudieron hacer parte de su génesis. El sector de Kasei Valles, se presenta no solo como uno de los lugares más interesantes del planeta Marte para la investigación científica, sino además para el potencial establecimiento de colonias humanas y explotación de recursos minerales. No obstante su trascendencia, los autores han tenido poca coherencia al explicar que tipo de eventos fueron los potenciales responsables de modelar este singular paisaje, proponiendo incluso procesos geológicos exóticos y poco convencionales, que no tienen homólogos en el Sistema Solar.

Con el fin de caracterizar la geomorfología de los canales mayores en el sector de Kasei Valles del Planeta Marte y realizar un modelo hipotético de su geomorfogénesis, se presenta una metodología de carácter descriptivo y correlacional, para la integración e interpretación de las imágenes adquiridas por sensores remotos diseñados para la exploración planetaria, a bordo de las diferentes plataformas desplegadas por varias misiones espaciales, cuyo fin es el descubrimiento de los secretos del planeta rojo.

De acuerdo con las evidencias analizadas en las imágenes de sensores remotos, utilizadas para los fines de la presente investigación, se considera que un escenario donde se conjugaron eventos geodinámicos endógenos y exógenos, de manera compleja pero secuencial, es el más acorde para explicar el origen de los canales de Kasei Valles y la indeleble huella que dejaron en la superficie de Marte.

Palabras clave: Marte, Agua, Exploración Espacial, Ríos en Marte, Kasei Valles.

INTRODUCCIÓN

El Planeta Marte, se ha convertido en el preciado objetivo de una cantidad importante de científicos dedicados a la exploración planetaria, quienes han volcado su atención y esfuerzos investigativos, al esclarecimiento de los mecanismos evolutivos, que han llevado a la actual conformación de este enigmático, pero a la vez familiar planeta. Los Análogos Terrestres, ambientes geológicos plenos de similitudes y características compartidas con Marte, recuerdan la importancia de la Planetología Comparativa utilizada durante la presente investigación, como herramienta fundamental para comprender los procesos exógenos y endógenos, responsables de modelar la superficie tanto del Planeta Rojo como de nuestro Planeta Tierra.

El presente trabajo, parte de una carencia evidente de estudios de carácter regional, enfocados en la geomorfología de los Canales Mayores de Kasei Valles, que hayan integrado imágenes adquiridas por los diferentes orbitadores, y ha sido inspirado por dos situaciones coyunturales en la exploración planetaria actual. De un lado, Los importantes logros de esa corriente de personas que han mirado más allá del horizonte conocido, quienes como pioneros o seguidores han contribuido épicamente a la ampliación de la frontera del conocimiento de nuestro sistema solar y del otrora recóndito universo. De otro lado, la gran oportunidad que existe de poder acceder a una vasta fuente de información de sensores remotos enfocados en Marte y que posibilita el ejercicio de una investigación geocientífica metódica y seria.

Al transcurrir el texto, la metodología diseñada para alcanzar los propósitos de investigación, muestra la marcada interacción existente entre sus componentes y la relevancia que posee la ejecución dedicada de cada una de las etapas. No es posible avanzar en el desarrollo de la metodología, sin la obtención de los resultados adecuados en las fases de aprestamiento, procesamiento y caracterización, así como contexto y geomorfogénesis, pues son altamente dependientes entre sí. Esto fortalece el valor que tiene la adecuada interacción entre el conocimiento profesional, experiencia y la experticia interpretativa.

Se encuentra inicialmente, una contextualización fisiográfica del sector de interés, en la que además de sus características físicas y atributos propios de su localización espacial, se vislumbra la magnitud de los canales estudiados y su importancia en el medio evolutivo de Marte.

En el capítulo de Geomorfología y teniendo como base la amplia cantidad de imágenes de sensores remotos interpretada y procesada, se lista y caracteriza cada uno de los rasgos de carácter regional existentes en el conjunto de canales mayores, acompañados de sus posibles agentes modeladores y particularidades, sin olvidar algunas geoformas que pese a no ser cartografiables a gran escala,

hacen las veces de indicadores de tiempo y ambientes de formación, teniendo como reflexión constante el fenómeno de la Equifinalidad.

Posteriormente en el capítulo de Morfometría, se efectúa un análisis individual de cada uno de los canales mayores, así como en conjunto, basado en perfiles longitudinales y secciones transversales, como expresiones geomorfológicas sencillas, de las cuales puede obtenerse información relevante, desde el punto de vista tectónico, litológico y evolutivo, que contribuya al objeto de la investigación.

Finalmente y luego de una aproximación de Kasei Valles, con los Análogos Terrestres más relevantes, dadas sus características litológicas, geomorfológicas y mineralógicas, se presenta una hipótesis sustentada en evidencias dadas por sensores remotos, que explica el origen del conjunto de canales mayores, mediante un modelo de Geodinámica Compleja, en el cual interactúan procesos endógenos, exógenos y de oblicuidad planetaria, hasta la conformación actual de las geoformas.

Por todo lo anterior, esta investigación pretende ser referente en los campos de la Teledetección, Geociencias y Exploración Planetaria, pues ha alcanzado satisfactoriamente los objetivos planteados. De otro lado, se convierte en uno de los pocos trabajos de grado enfocado en Ciencias Planetarias, realizado por una persona residente en un país en vía de desarrollo.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El resultado más fascinante de las misiones de naves espaciales a Marte, fue el descubrimiento de numerosos canales sinuosos que se asemejan a los producidos por la erosión fluvial. El Planeta Marte, que se encuentra incluido en la categoría de “planetas terrestres”, presenta una serie de geoformas análogas a muchas de las que existen en el Planeta Tierra y características fisiográficas similares, situación que permitiría que los procesos geológicos allí existentes, tengan mecanismos de generación similares a aquellos presentes en La Tierra.

Estudios afirman que las primeras observaciones sobre formas acanaladas en Marte se remontan al siglo XIX, donde diversos mapas incluían unas formas lineares conocidas como “Canali”. En dicho siglo, el astrónomo Percival Lowell describió algunos de estos Canali, planteando la posibilidad de que se debieran a civilizaciones más avanzadas y construidas progresivamente como respuesta a la desecación del planeta. Las fotografías obtenidas en la Misión Mariner 9 en el año de 1971 (Masursky, 1973), concluyeron que tales Canali descritos anteriormente no existían y que las especulaciones al respecto eran fruto de la imaginación de los observadores. Sin embargo, esta misión reveló la diversidad geológica de Marte y que conocemos en la actualidad, incluyendo la presencia de profundos cañones y canales secos, en los que el agua ha jugado un papel predominante.

Con el avance de la tecnología de los instrumentos embarcados a bordo de los satélites enviados a Marte, se tiene cada vez datos más detallados de su superficie, lo que ha permitido que se hayan realizado numerosas observaciones sobre distintos rasgos geomorfológicos relacionados con el agua o el hielo (ej. Carr, 1996; Irwin et al., 2005; Christensen et al., 2006; Dundas, 2007; de Pablo y Komatsu, 2007), siendo especialmente relevante la descripción de posibles líneas de costa, que denotan la existencia de un antiguo océano en Marte, así como ríos, mares y lagos en distintos momentos de su evolución (ej. Parker, 1993; Fairén et al., 2003; de Pablo y Pacifici, 2007).

Por otra parte, la sonda Mars Express de la Agencia Europea del Espacio –ESA-, con el instrumento OMEGA, ha detectado la presencia de arcillas (minerales formados por láminas de sílice con moléculas de agua entre ellas) (Bibring, 2005). La importancia de este descubrimiento, además de confirmar una vez más que el agua fue relativamente frecuente en Marte, es que la composición química de estas arcillas es la que cabría esperar de la alteración por acción del agua de los distintos tipos de rocas volcánicas que se han encontrado en Marte (Bell, 2007). Igualmente, en otras zonas de Marte, como Meridiani Planum, se ha encontrado la existencia de depósitos antiguos de rocas sedimentarias con estructura laminar y relativamente porosas, con composiciones químicas ricas en agua y con sales, lo que algunos autores lo han interpretado como debido a la sedimentación en

depresiones donde el agua permaneció durante largos periodos de tiempo (Bell, 2007). Todo esto demuestra una vez más que el agua ha jugado un papel importante, en el origen de algunos materiales, pero también en su alteración.

Los descubrimientos logrados por medio del rover Curiosity (Mars Science Laboratory-MSL) en la superficie de Marte, han sido de especial relevancia para el conocimiento de la superficie de Marte. Sus instrumentos han permitido identificar azufre, nitrógeno, hidrógeno, oxígeno, fósforo y carbono - algunos de los ingredientes químicos esenciales para la vida - en el polvo producto de una perforación efectuada a una roca sedimentaria, cerca del antiguo lecho de un arroyo en el cráter Gale de Marte, en el área de la bahía de Yellowknife, en el año 2013. Los datos obtenidos, indican que este sector fue el final de un antiguo río o el lecho de un lago con minerales de arcilla y no demasiada sal, que sugieren la antigua presencia de agua dulce, situación que podría haber proporcionado condiciones favorables para la vida microbiana (NASA-JPL, 2016). Williams, R.M.E. et al. (2013), reportan mediante imágenes obtenidas por la cámara Mastcam, afloramientos aislados de guijarros en el Cráter Gale (de 2 a 40 milímetros de diámetro), cementados y redondeados, así como granos de arena con texturas típicas de conglomerados sedimentarios fluviales, cuya composición química indica que el agua participó en la formación de esta unidad geológica.

Así, el papel del agua en el modelado de la superficie de Marte, y de la formación de nuevos materiales, o la alteración de los ya existentes, fue muy importante en la historia del planeta. Sin embargo, queda por conocer el papel concreto que jugó el agua en cada una de sus regiones. En la región de Kasei Valles, se han descrito algunos rasgos geomorfológicos que están relacionados con la existencia de agua, tanto en estado sólido como líquido. Igualmente, se han descrito algunos rasgos glaciares y periglaciares en esta zona, relacionados con la presencia de agua helada, así como de procesos de congelación-descongelación (de Pablo and Pacifici, 2007).

De acuerdo con Ferrández, G.B (2003) las inundaciones terrestres presentan morfologías similares a las que podemos encontrar en Marte, y en muchos casos se han utilizado como análogos para explicar su relación con flujos de agua. Algunas incluyen erosiones longitudinales, cataratas en canales internos, y zonas de erosión por desplazamiento. Varios rasgos geomorfológicos existentes en el sector de Kasei Valles del Planeta Marte, los cuales datan de billones de años, son análogos con formaciones de origen fluvial, volcánico y glaciar en el Planeta Tierra. La presencia de canales, se toma como evidencia de que un elemento fluía por la superficie de Marte, modelando dichas geoformas. Todo esto, ha conducido a que los científicos dedicados a la exploración planetaria, centren su atención en la explicación de la manera en la cual, estas expresiones morfológicas fueron modeladas hasta su actual estado, brindando un especial interés a la interrelación de los cráteres de impacto por Meteoritos, con la superficie y el subsuelo marciano y la influencia de eventos volcánicos a escala planetaria.

En el sector de Kasei Valles es necesario desarrollar un estudio a escala regional, con el objetivo de caracterizar la geomorfología de los canales mayores de esta región de Marte y analizar si este modelado ha ocurrido bajo la influencia de uno o varios agentes exógenos o endógenos. Hasta la fecha, no existe ningún estudio que integre diferentes imágenes o fotografías de distintas misiones y trate de elaborar un modelo geomorfológico del origen de dichos canales. Así mismo, no existe ninguna investigación metódica, que identifique, caracterice y contextualice, la geomorfología de los canales mayores en el sector de interés. De contarse con un estudio de este tipo, se aportará a la línea base, permitiendo avanzar en el entendimiento de la geología y posibles recursos de ese planeta.

En palabras del Profesor Jesús Martínez Frías (2006), investigador del CSIC de Madrid – España y Director de la Red Española de Planetología y Astrobiología (REDESPA), *“los estudios geológicos relacionados con la exploración planetaria cubren numerosos aspectos y no pueden entenderse actualmente sin considerar su carácter inter y transdisciplinar”*. El trasfondo de la anterior aseveración posee una amplitud que pasa desapercibida para el lego, pero adquiere una importancia vital para quienes desde su saber profesional en las ciencias geológicas, se han enfocado hacia la exploración de los planetas. En este caso, el uso de Sensores Remotos para la exploración planetaria y la integración de la Geología, Física y Geoquímica, complementan y mejoran la difícil labor de comprender y explicar la génesis de cuerpos planetarios y demás interrogantes que se plantea la comunidad científica en este ámbito específico.

2. JUSTIFICACIÓN

En la región de Kasei Valles, se han descrito algunos rasgos geomorfológicos que están relacionados con la existencia de agua, tanto en estado sólido como líquido. Igualmente, se han descrito algunos rasgos glaciares y periglaciares en esta zona, relacionados con la presencia de agua helada, así como de procesos de congelación-descongelación (de Pablo and Pacifici, 2007).

No obstante lo anterior, estos estudios son muy locales y relacionados con rasgos observados de manera puntual, siendo necesario un estudio más amplio y completo de toda la zona con el objetivo de caracterizar la geomorfología de los canales mayores de esta región de Marte y analizar si este modelamiento ha ocurrido bajo la influencia del agua u otros agentes exógenos o endógenos.

La caracterización de los grandes canales en la superficie marciana, facilitará la planeación de futuras misiones de exploración, para el establecimiento de sitios de interés para la investigación geológica, climatológica y astrobiológica. Se brindará a las agencias espaciales gubernamentales, así como a empresas privadas dedicadas a la exploración espacial, información acertada que facilite la planeación de la logística adecuada para los programas de exploración geológica, climatológica y astrobiológica, así como el programa de colonización del planeta. Por esta razón se contribuirá al conocimiento científico en la exploración planetaria.

3. OBJETIVOS

3.1. OBJETIVO GENERAL

Caracterizar la geomorfología de los canales mayores en el sector de Kasei Valles del Planeta Marte a partir de procesamiento digital de imágenes satelitales, con el propósito de proponer un esquema evolutivo bajo el cual se originó este conjunto de geoformas.

3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Identificar y describir los rasgos geomorfológicos existentes en los canales mayores del sector de Kasei Valles del Planeta Marte, usando las imágenes satelitales disponibles, a fin de establecer los posibles procesos exógenos y endógenos que los generaron.

Efectuar un análisis Morfométrico del conjunto de canales mayores, que permita determinar los potenciales condicionantes geográficos, geológicos e hidrológicos, que han configurado su estado actual.

Realizar una hipótesis de la geomorfogénesis de los canales mayores de Kasei Valles del Planeta Marte, teniendo como base la caracterización geomorfológica y demás evidencias halladas en imágenes de sensores remotos, que permita explicar la forma en que fueron modelados por los diversos procesos de transformación planetaria.

4. MARCO TEÓRICO

El origen de los cañones y valles fluviales ha sido uno de los grandes problemas de la ciencia, que ha originado importantes debates en el siglo XVIII y principios del siglo XIX, sobre el papel de los eventos cataclísmicos en la formación de los valles de la Tierra. Los famosos fundadores de la geología, incluyendo Hutton, Lyell, y Cuvier participaron en estos grandes debates. De acuerdo a Davies (1969), se puede argumentar que la Geología surgió como una ciencia, debido al razonamiento científico que se aplicó a este problema.

De manera sorprendente, la ciencia planetaria moderna descubrió una serie de valles y cañones en el planeta Marte, que aparecían en las imágenes “Vidicon” adquiridas por la nave espacial Mariner 9 (Masursky, 1973). Se cree que estas redes de valles tienen un origen fluvial (Baker et al., 1991). No obstante lo anterior, Baker et al (1992) indican que a diferencia de los valles fluviales, los canales mayores muestran amplias pruebas de circulación de fluidos (que no necesariamente tuvo que ser agua) a gran escala en sus pisos y paredes. Sin embargo, es posible que los canales de descarga provengan de la peculiar historia geológica de Marte y sus reservorios de agua (Baker et al., 1991).

La presencia de agua en Marte, que tanto ha sido estudiada y debatida en la comunidad científica, parece estar confirmada recientemente gracias a los datos espectrométricos facilitados por el sensor CRISM a bordo de la sonda Mars Reconnaissance Orbiter (Murchie et al., 2007,) así como por los estudios y análisis in situ realizados por algunas de las sondas de amartizaje y vehículos que se han posado en la superficie del planeta vecino, como Spirit, Opportunity o Phoenix (ej. Squyres et al., 2004; Haskin et al., 2005; Ash, 2008) y el rover Curiosity del MSL (NASA-JPL, 2016). Gracias a los datos adquiridos por los sensores instalados a bordo de distintas sondas planetarias, especialmente imágenes de muy diversa resolución, vamos conociendo poco a poco la geología de Marte.

La geografía y el paisaje de Marte y sus elementos geomorfológicos parecen indicar la existencia de varios episodios de actividad del agua durante distintos momentos de su historia geológica, incluyendo periodos muy recientes (ej. Carr, and Head, 2003; Fairén et al., 2003; Dohm et al., 2008). La mayoría de los elementos geomorfológicos relevantes del planeta son volcánicos, tectónicos y de impacto, pero también se han descrito multitud de rasgos fluviales, glaciares, periglaciares, y lacustres e incluso marinos, estando todos ellos asociados a la existencia de agua, ya sea en estado sólido o líquido, asumiendo que éstos se formaron de forma equivalente a los que podemos observar en la Tierra (Baker, 2006; Carr, 2006).

Con el avance de la tecnología de los instrumentos embarcados a bordo de los satélites enviados a Marte, se tiene cada vez datos más detallados de su

superficie, lo que ha hecho que se hayan realizado numerosas observaciones sobre distintos rasgos geomorfológicos relacionados con el agua o el hielo (ej. Carr, 1996; Irwin et al., 2005; Christensen et al., 2006; Dundas, 2007; de Pablo y Komatsu, 2007), Las observaciones de las naves espaciales, proporcionan evidencia de la debilidad de los depósitos poco cohesivos, expuestos en las secciones de la corteza gruesa dentro de Valles Marineris, cráteres, y otros valles en Marte, para lo cual el sistema de imágenes de emisión térmica Mars Odyssey 2001 -THEMIS- (Christensen et al, 2004), ha proporcionado mosaicos infrarrojos diurnos y nocturnos, que brindan información morfológica y termofísica de carácter regional (Edwards et al, 2011.).

Para las áreas de interés locales, con las imágenes THEMIS se han derivado mapas de inercia térmica a 100 m / pixel, a partir de imágenes individuales (Ferguson et al., 2006a). Estas observaciones de inercia térmica, son un medio eficaz de determinar el tamaño de las partículas y el grado de consolidación de los materiales expuestos (por ejemplo, Kieffer et al, 1977; Mellon et al, 2000; Ferguson et al, 2006a, b), y son utilizados para distinguir las capas de alta resistencia (por ejemplo, flujos de lava, sedimentos bien cementadas), de las capas de grano fino, poco cohesivas (por ejemplo, volcánicas o / sedimentos sueltos pobremente cementados).

Las imágenes de la cámara de Contexto -CTX- (Malin et al, 2007) del Mars Reconnaissance Orbiter (MRO) (normalmente = 5,5 m de muestreo), se utilizan para proporcionar la correspondiente información morfológica. En el Experimento Científico de Imágenes de Alta Resolución – HiRISE – del Mars Reconnaissance Orbiter (McEwen et al, 2007) se utilizan filtros rojos en imágenes muestreadas a 0,25-0,5 m / píxel, para describir las texturas de superficie y la morfología, así como para identificar la presencia de bloques de roca u otros elementos de tamaño reducido. En términos generales, las observaciones se basan principalmente en procesamiento digital de imágenes de los sensores activos y pasivos descritos anteriormente y muestran cómo estos datos pueden ser utilizados para distinguir, materiales de alta resistencia competentes a partir de materiales mecánicamente débiles, de grano fino.

Pero no sólo se han observado con detalle los relieves de la superficie de Marte en busca de indicadores de la presencia de agua, sino que también se ha buscado huellas de agua en la composición química de los minerales del planeta (ej. Bell, 2007). Mediante el análisis de los datos obtenidos por los robots Spirit, Opportunity (misión Mars Exploration Rovers-MER) y Curiosity (Mars Science Laboratory-MSL), se ha descubierto en el suelo de determinadas regiones de Marte, acumulaciones de minerales cuya formación estuvo ligada al agua.

Tal es el caso del mineral Jarosita, descubierto por el Rover Opportunity con su Espectrómetro Mossbauer (F. Rull et al, 2008), el cual dadas sus características Geoquímicas y condiciones de formación, observadas en la región Española de

Jaroso (localidad tipo de este mineral y uno de los principales análogos terrestres para Marte), es una prueba inequívoca de paleoambientes acuosos en el planeta rojo (G. Amaral, J. Martínez-Frias, L. Vázquez, 2007). Esto es confirmado además, con la presencia del mineral Hematites, descubierto en la superficie de Marte con la ayuda del Thermal Emission Spectrometer –TES, del cual se ha observado en análogos terrestres, que su precipitación ya sea bajo condiciones ambientales o hidrotermales, requiere grandes cantidades de agua líquida, y se constituye en una evidencia directa de procesos en Marte, donde el agua fue un elemento principal (Squyres et al., 2004).

Según Ferrández, G.B (2003) las inundaciones terrestres presentan morfologías similares a las que podemos encontrar en Marte, y en muchos casos se han utilizado como análogos para explicar su relación con flujos de agua. La reconstrucción de los caudales asociados a estas inundaciones catastróficas forma parte de la hidrología de paleocrecidas. Apoyando lo anterior, Ori, GG et al (2013) indica que los sistemas fluviales a gran escala de Marte son similares a sus homólogos terrestres en términos de procesos y escalas de canales y elementos asociados. Las fuentes de ríos son probablemente diferentes, pero con el fin de formar ríos serpenteantes se necesita descarga constante y uniforme. El tamaño de grano no está limitado ya que se han observado incluso Point Bars de grava. Sin embargo, los depósitos de un solo canal (recto y meandro) necesitan estar rodeados de depósitos cohesivos para formar bancos resistentes a la erosión. Esto implica la formación de espesas llanuras aluviales ricas en arcilla. En la actualidad, los depósitos de arcilla se han eliminado por la erosión eólica que suministra sedimentos para el sistema eólico.

De acuerdo a lo expresado por Dawson, A.G (1992), Las formas, procesos y magnitudes de caudal descritos para Marte, parecen distar mucho de las crecidas terrestres, incluso aquellas producidas en grandes ríos como el Amazonas (caudales punta de unos 100.000 m³ s⁻¹). A escala geológica, y más concretamente hace unos 20.000 años, se produjeron una serie de inundaciones catastróficas que por las consecuencias geomorfológicas y magnitudes de los caudales se acercan a las inundaciones marcianas. Estas inundaciones, las más grandes conocidas en la historia de la tierra, sirven como ilustración del papel de los eventos extraordinarios en la modificación de los sistemas fluviales y del modelado a gran escala.

No obstante los orígenes fluviales que se atribuyen a los grandes canales de Marte, Christiansen, E.H (1989) en el estudio fotogeológico de la provincia volcánica Elysium, del planeta Marte, muestra que sus canales sinuosos son parte de un gran depósito que probablemente fue emplazado como una serie de grandes Lahares. Algunos flujos se extienden a 1000 km de sus fuentes. El calor asociado con el magmatismo probablemente derritió el hielo del suelo debajo de los volcanes de Elysium y formó un lodo fangoso que salía de las fracturas regionales y se extiende sobre la llanura contigua. La identificación de estos

Lahares se suma a la evidencia de que Marte tiene una sustancial volatilidad de elementos. De igual manera, en este trabajo se expone la evidencia geomorfológica que los depósitos lobulados en la provincia volcánica Elysium de Marte, son Lahares, como se sugirió inicialmente por Christiansen y Greeley (1981). La fuente aparente de estos Lahares, se encuentra debajo de la provincia volcánica Elysium. Esta conclusión conduce al origen "volcánico" de algunos canales y se suma a la evidencia de extensos depósitos de agua y elementos volátiles en el subsuelo de Marte (Carr, 1986).

Marte se encuentra en la categoría de "planetas terrestres", el cual en conjunto con Mercurio, Venus y La Tierra, son rocosos y están formados principalmente por silicatos. De acuerdo a Christensen et al., (2005), hace millones de años, Marte tuvo una atmósfera compacta, con nubes y precipitaciones que formaban ríos. Sobre la superficie se adivinan surcos, islas y costas. Las grandes diferencias de temperatura provocan vientos fuertes. La erosión del suelo ayuda a formar tempestades de polvo y arena que degradan todavía más la superficie.

Existen dos formas principales de caracterizar los patrones de canal a través vista en planta de canales (Reading, 1996). El primero es el grado de sinuosidad, que es la relación de la longitud del canal a la longitud valle. Esto refleja la curvatura de la vaguada o Thalweg del canal, que es una línea de los puntos más bajos en este. El segundo es el grado en el que el flujo es dividido o trenzado, por barras o islas permanentes o efímeras. Ambos factores se pueden expresar como índices numéricos, pero hay muchos problemas con aplicaciones consistentes. Debido a esto, es más apropiado utilizar términos cualitativos como altamente sinuoso, o moderadamente trenzado.

De acuerdo a Johnson-Carroll, A (2011), existen muchos ambientes aluviales diferentes a los que es posible estudiar, describir y clasificar. Estos se encuentran en todos los regímenes climáticos, e incluyen llanuras aluviales, valles aluviales y conos de deyección. Las clasificaciones de canales fluviales sin embargo, no siempre son definiciones claras como el clásico modelo de tres tipos: meandros, trenzada y anastomosis. Hoy los canales se clasifican generalmente sobre la base del tamaño de grano del material del lecho, o patrones de canal. En las secciones medial a distal de los abanicos aluviales, el patrón río trenzado es la división de un único canal troncal en una red de sucursales, y el crecimiento y la estabilización de las barras de dicha trenza. Hoy se conoce que los sistemas de ríos trenzados, implican la interacción simultánea de los bancos erosionables, el transporte de sedimentos y la abundante carga y variaciones rápidas y frecuentes en la descarga. Los ríos anastomosados son los canales de distribución más permanentes que fluyen a través de una red interconectada. En la configuración más distal de un abanico aluvial, se presentan cuerpos suavizados, conformados por capas de arenas pertenecientes a una llanura de inundación, playa, posible origen marino eólico, o incluso de poca profundidad.

El tamaño del grano es la característica más fácil de reconocer en los ambientes aluviales antiguos (Reading, 1996). Se puede determinar el tamaño de grano a través de la carga sólida de sedimentos o la relación entre la carga de fondo y de la carga suspendida. Debido a que la cantidad de sedimentos en suspensión se considera como un fuerte factor de control en la morfología del canal, a través de estabilidad de los márgenes, se subdividen estos factores de la siguiente manera: 1) lecho de grano grueso, 2) carga sólida de arena, 3) ríos de carga mixta, 4) ríos de carga suspendida, y 5) zonas de desbordamiento. Incluso con estas subdivisiones, hay muchos más factores que desempeñan un papel en la clasificación de los canales.

Desde el año 1960, varias naciones se han sumado a los esfuerzos científicos para la exploración del planeta Marte, efectuado gran cantidad de programas, algunos de los cuales han tenido éxito. En la actualidad, la comunidad científica internacional, tiene acceso a un importante volumen de información adquirida por instrumentos a bordo de plataformas satelitales, que en la actualidad orbitan o han orbitado Marte hasta décadas recientes (NASA, 2016).

De acuerdo a la Universidad Estatal de Arizona (ASU, 2016), el siguiente es el desarrollo cronológico de la llegada al Planeta Marte, de cada uno de los orbitadores que sirvieron como plataformas para la obtención de las imágenes utilizadas en la presente investigación:

- El 12 de septiembre de 1997, arribó a Marte la sonda Mars Global Surveyor (MGS), con una serie de instrumentos para analizar la superficie y subsuelo marciano, entre los que se incluyen:
 - Mars Orbital Camera (MOC): encargada de tomar las imágenes de alta resolución del planeta así como otras de menor calidad para tener una visión general de la atmósfera y el clima en todo el planeta.
 - Thermal Emission Spectrometer (TES): es un Espectrómetro interferométrico, utilizado para determinar la composición de los minerales superficiales y las rocas de Marte, la temperatura y dinámica atmosférica, las propiedades de los aerosoles atmosféricos y las nubes, la naturaleza de las regiones polares y las propiedades termofísicas de los materiales de superficie.
 - Mars Orbital Laser Altimeter (MOLA): El altímetro Láser Orbitador de Marte (MOLA), generó perfiles altimétricos utilizados para crear mapas topográficos globales del planeta Marte. Detuvo la adquisición de datos de altimetría el 30 de junio de 2001 y después de eso, pasó a ser operado en modo de radiometría pasiva hasta el final de la misión Mars Global Surveyor. Los conjuntos de datos Mola, son producidos por el

equipo científico de Mola y archivados por el Nodo PDS Ciencias de la Tierra de la NASA.

- Radio Science Investigations (RS): mide las variaciones de la señal enviada desde la Tierra para medir las desviaciones gravitatorias.
 - Magnetic Fields Investigation (MAG/ER): magnetómetro dedicado al estudio del campo magnético de Marte y su intensidad.
 - Mars Relay: antena de apoyo a otras misiones de la NASA, Japón y la ESA.
- En febrero del 2002, la sonda espacial 2001 Mars Odyssey (MO) llegó a la órbita de Marte y comenzó a observar el planeta con diversos instrumentos, siendo uno de ellos el Sistema de imágenes de Emisión Térmica (THEMIS) (Christensen et al., 2004). THEMIS es un sensor multiespectral que adquiere información en diferentes bandas del infrarrojo térmico (IR) y también en distintas bandas del espectro visible (VIS), cuya misión es analizar los minerales y las propiedades físicas de la superficie de Marte (Christensen et al., 2004). De forma general, estas imágenes tienen una resolución de entre 100 (THEMIS-IR) y 18 metros por píxel (THEMIS-VIS), siendo estas últimas las que han sido seleccionadas para el estudio de Kasei Valles por su relación cobertura-resolución.

Existe una cobertura prácticamente total de la zona de Kasei Valles, lo que facilita un estudio mucho más general que otras imágenes de mayor resolución, como las adquiridas por los sensores MOC, o CTX y HiRISE, de las misiones Mars Global Surveyor y Mars Reconnaissance Orbiter, respectivamente. Estas hace posible determinar la presencia de distintos tipos de elementos geomorfológicos, especialmente de aquellos que indican la posible presencia de agua y en particular aquellos rasgos relacionados con el modelado fluvial, glacial, periglacial, volcánico y litoral, entre otros.

- El mes de diciembre de 2003, arriba la sonda espacial Mars Express (ME), lanzada el 02 de Junio de 2003, con la misión de realizar un mapeo geológico de alta resolución (2m/píxel), mapeo mineralógico global, cartografía de alta resolución de la atmósfera, caracterización del subsuelo hasta el permafrost, geoquímica de superficie y exobiología, con los siguientes instrumentos:
 - High Resolution Stereo Camera (HRSC): Cámara estereoscópica que fotografía la superficie marciana para revelar detalles de hasta 2 metros, sus imágenes se utilizan para el mapeo geológico de rocas y minerales, análisis de geomorfología y depósitos.

- Mars Radio Science experiment (MaRS): Utiliza ondas de radio para estudiar la superficie y la atmósfera. Mide variaciones locales en la gravedad sobre la superficie de Marte y proporciona perfiles de presión y temperatura de la atmósfera.
- Mars Advanced Radar for Subsurface and Ionosphere Sounding (MARSIS): Mapea la distribución de agua y hielo en las partes superiores de la corteza marciana. Analiza reflexiones de las ondas de radio en los primeros 2-3 km de la corteza de Marte, para revelar la estructura del subsuelo. Es capaz de distinguir entre el suelo seco, congelado y húmedo.
- Observatoire pour la Minéralogie, l'Eau, les Glaces et l'Activité (OMEGA): Sensor Pasivo para determinar el contenido mineral de la superficie de Marte y la composición molecular de la atmósfera, mediante análisis de curvas espectrales.
- La sonda Mars Reconnaissance Orbiter (MRO), llega al planeta Marte el 10 de marzo de 2006, luego de 7 meses de viaje, con una serie de sensores pasivos y activos, para complementar el gran despliegue tecnológico y científico que se ha efectuado en el vecino planeta:
 - High Resolution Imaging Science Experiment (HiRISE): Se trata de una cámara con una resolución sin precedentes (30 cm X pixel). Opera en longitudes de onda visibles, con las cuales es posible obtener información de los minerales y depósitos en la superficie, analizar los canales y su geomorfología de manera detallada
 - Context Camera (CTX): Esta cámara tiene amplias vistas de la zona, para ayudar a proporcionar un contexto para el análisis de alta resolución de los puntos clave en Marte proporcionadas por HiRISE y CRISM (espectrómetro). Desde 400 kilómetros sobre Marte, CTX toma imágenes de terreno que abarcan 30 kilómetros de ancho. La cámara tiene una resolución de 6 metros por píxel.
 - Mars Color Imager (MARI): Diseñada para ayudar a caracterizar las variaciones en el clima de Marte, tormentas de polvo y cambios en el casquete polar, utilizando cinco bandas de luz visible, así como observaciones ultravioleta a dos longitudes de onda, a escalas de decenas de kilómetros para detectar variaciones en el ozono, el polvo, y cambios de dióxido de carbono en la atmósfera.
 - Compact Reconnaissance Imaging Spectrometer for Mars (CRISM): Espectrómetro que posibilita la búsqueda de restos de minerales que se

forman en presencia de agua, dejados por aguas termales, chimeneas termales, lagos o estanques en Marte, cuando el agua pudo haber estado presente en la superficie. Obtiene imágenes a escalas tan pequeñas como de 18 metros de ancho, desde una altitud de 300 kilómetros.

- Shallow Subsurface Radar (SHARAD): Sensor activo que hace posible buscar líquido o agua congelada en los primeros cientos de metros (hasta 1 kilómetro) de la corteza de Marte. Sondea el subsuelo mediante ondas de radar utilizando una banda de frecuencias de 15-25 MHz, para obtener la resolución de alta profundidad deseada. Posee una resolución horizontal de entre 0,3 - 3 kilómetros y 15 metros verticalmente.

No hay ninguna otra actividad equivalente a la exploración planetaria y la aplicación de la Teledetección, en términos de estimulador y catalizador para el desarrollo de nuevas tecnologías e investigación en ciencias básicas, así como el desarrollo de nuevas herramientas tecnológicas que utilizamos de manera constante en nuestro diario vivir. Se puede incluso afirmar, que el programa de exploración espacial está asumiendo una función que, durante tres o cuatro mil años, ha sido la triste potestad de la guerra.

En palabras del doctor Ernst Stuhlinger (1970) *“Las primeras imágenes de nuestro planeta, obtenidas por el Apolo 8 en el año de 1968, abrieron los ojos de la humanidad al hecho de que nuestra Tierra es una preciada isla en un inmenso vacío y que no hay otro lugar en el que podemos vivir, más que la delgada capa superficial de su corteza terrestre, bordeada por la desolada nada del espacio... Nunca antes reconoció tanta gente, lo limitada que nuestra Tierra es en realidad, y lo peligroso que sería entrometerse en su balance ecológico. Todo gracias al desarrollo de los programas para la exploración espacial y en especial de los planetas que componen el sistema solar”*.

5. MATERIALES Y MÉTODOS

5.1 MATERIALES

Los materiales esenciales y sin los cuales esta investigación no hubiera sido posible, son las diferentes clases de imágenes de Sensores Remotos, obtenidas en las misiones espaciales cuyo objetivo ha sido el planeta Marte, Mars Global Surveyor, Mars Reconnaissance Orbiter, Mars Odyssey y Mars Express, las cuales son fruto del excelente trabajo profesional, articulado y organizado, entre agencias espaciales gubernamentales de diversos países y universidades de alta excelencia académica y tecnológica. Estas imágenes son las siguientes:

Imágenes CTX (Context Camera) con una resolución de 8 metros por píxel, descargadas por medio del Mars Image Explorer, que hace parte de Mars Space Flight Facility de la Universidad de Arizona (ASU)

Imágenes THEMIS (Thermal Emission Imaging System), obtenidas de los servidores que se encuentran a disposición pública de forma gratuita, como el Sistema de Datos Planetarios (PDS) de la agencia aeroespacial norteamericana NASA (pds.jpl.nasa.gov), y el servidor del propio del equipo THEMIS (global-data.mars.asu.edu/bin/themis.pl).

Imágenes TES (Thermal Emission Spectrometer), descargadas por medio del Mars Image Explorer, que hace parte de Mars Space Flight Facility de la Universidad de Arizona (ASU)

Imágenes HiRISE (High Resolution Imaging Science Experiment) con resolución de resolución de 30 cm por píxel, obtenidas de manera libre, en la página web propia de HiRISE, administrada por la Universidad de Arizona (<http://www.uahirise.org/dtm/>).

Datos adquiridos por el Mars Orbiter Laser Altimeter (MOLA), descargadas de manera gratuita en el sitio web administrado por el Goddard Space Flight Center de la NASA (<http://tharsis.gsfc.nasa.gov/MOLA/mola.php>).

Imágenes Estereográficas HRSC (High Resolution Stereo Camera) con resolución de 10 metros por píxel, disponibles de manera gratuita, previa autorización de la Agencia Espacial Europea –ESA, en el vínculo <http://sci.esa.int/mars-express/34826-design/?fbodylongid=1597>. De igual manera, han sido proporcionadas imágenes HRSC en perspectiva, por la Universidad de Berlín.

5.2 METODOLOGÍA

El tipo de investigación a que corresponde este trabajo de grado, es de carácter descriptivo y correlacional. Se pretende aportar al conocimiento científico, mediante la aplicación de una metodología comparativa de carácter inédito, diseñada específicamente para esta investigación, denominada La Colmena (Figura 1). En esta se articulan e interactúan de manera multidireccional, las diferentes fuentes de información que permiten inferir los mecanismos evolutivos de las geoformas en el sector de interés. Las variables consideradas, fueron los posibles condicionantes geográficos, geológicos y climáticos que han modelado la geomorfología que se observa en la actualidad, en los canales mayores del sector de Kasei Valles, del planeta Marte. A continuación se describen de manera concisa, las actividades que se realizaron con el fin de alcanzar el objeto de la investigación:

Figura 1. Proceso metodológico de la Colmena e interacción de sus componentes.



Fuente: Elaboración propia

5.2.1 RECOPIACIÓN, CLASIFICACIÓN Y ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN TEMÁTICA

Como inicio de la fase de Aprestamiento de la presente metodología, se efectuó una consulta de fuentes Bibliográficas de La Agencia Espacial de los Estados Unidos – NASA, Agencia Espacial Europea – ESA, artículos científicos, Tesis de Maestría y Doctorado en Astronomía y Ciencias Planetarias, así como textos especializados, para coleccionar la información disponible en cuanto a cartografía geológica, geomorfología, topografía, imágenes de sensores activos y pasivos, adquiridas mediante plataformas satelitales. Esta consulta no se limitó únicamente a la búsqueda de información relacionada con el planeta Marte, sino además sobre potenciales análogos de Kasei Valles en el planeta Tierra y sus mecanismos de formación. Posteriormente, la información obtenida fue clasificada y analizada por temáticas específicas, que apuntaran de manera concreta al propósito de la investigación.

Es importante aclarar, que la metodología de La Colmena, diseñada para lograr los objetivos de la presente investigación, permitió una consulta constante a las fuentes de información seleccionadas, durante todo el proceso de investigación, con el fin de resolver las inevitables inquietudes en este tema, y además evitar duplicidad de hipótesis con otros autores.

5.2.2 ANÁLISIS Y PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES MOLA (MARS ORBITER LASER ALTIMETRY) Y ELABORACIÓN DEL DEM (MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN)

Con el fin de delimitar el área objeto de la investigación, se efectuó la descarga de la nube de puntos Global, adquiridos por el instrumento MOLA (Mar Orbiter Laser Altimeter), información puesta a disposición en la web por el Goddard Space Flight Center de la NASA.

Esta nube de puntos tuvo que ser transformada y recortada para la escena específica de Kasei Valles, mediante un freeware Online en lenguaje IDL (Interactive Data Language) (Research Systems Inc., 2001), desarrollado por el *Laboratoire Dynamique de la Lithosphère* de la Universidad de Lyon - Francia. Posteriormente estos datos pudieron ser convertidos mediante Global Mapper a un DEM convencional.

Partiendo del DEM, se utilizó el Software ArcGIS 10.1 para obtener los perfiles longitudinales de Kasei Valles-Echus Chasma y secciones transversales de los canales mayores del área de interés, con el propósito de realizar el análisis morfométrico.

5.2.3 PROCESAMIENTO E INTERPRETACIÓN DE IMÁGENES

A fin de mejorar el aspecto de las superficies y elementos presentes en cada imagen y de esta manera facilitar su interpretación visual para los propósitos de la presente investigación, en ciertas ocasiones fue necesario aplicar operaciones digitales para realzar, resaltar o suprimir algunas características presentes en las imágenes. Cuando fueron aplicadas, dichas operaciones se centraron en el ajuste de contraste, realce de elementos, composiciones a color y combinación sinérgica de imágenes para acentuar atributos, sin transformar los datos originales.

Toda la actividad de descarga de las imágenes procesadas, se efectuó con la ayuda del Mars Image Explorer, que hace parte integral del Mars Space Flight Facility de la Universidad Estatal de Arizona (ASU) – School of Earth & Space Exploration.

Aunque el procesamiento de imágenes fue elaborado con el apoyo del Software ERDAS 11, es importante aclarar que debido a su versatilidad para trabajar con grandes volúmenes de datos y la capacidad de interactuar con diversos formatos digitales, se utilizó el software JMARS de la Universidad Estatal de Arizona (ASU), para la combinación de imágenes con el fin de acentuar atributos de manera sinérgica, que enriquecieran la labor interpretativa y en consecuencia, mejorar los resultados de la caracterización geomorfológica. Tal es el caso de las imágenes THEMIS (día y noche) y TES, las cuales al combinar sus propiedades en la banda del Infrarrojo, fueron utilizadas para la delineación de los rasgos geomorfológicos, determinación de tipos de depósitos y minerales presentes, así como los niveles de Albedo en el sector de interés. De igual manera, las imágenes MOLA se utilizaron para mejorar el detalle y la delineación de rasgos de gran escala, para el análisis geomorfológico, mediante composiciones con imágenes THEMIS, TES y Albedo.

Debido a que fue posible obtener imágenes de alta resolución espacial de los diferentes sectores a ser caracterizados, para el análisis de geoformas y depósitos, tales como las imágenes CTX (Context Camera) con una resolución de 8 metros X pixel, e imágenes HiRISE (High Resolution Image Science Experiment) de Altísima resolución (30 cm X pixel), no fue necesaria la aplicación de metodologías para la ampliación de imágenes y modificación de resolución espacial. Estas imágenes fueron fundamentales para el análisis y caracterización de alta resolución de los puntos clave en la superficie de Marte, tales como geoformas específicas de tamaño reducido, que actúan como indicadores de paleo-ambientes de formación.

En términos generales, la calidad de las imágenes disponibles para Kasei Valles y las mismas características atmosféricas del Planeta Marte en el sector objeto del estudio, no demandaron la utilización de técnicas de corrección atmosférica, supresión de ruidos o recuperación de información. No obstante, con el propósito

de mejorar la visualización de límites de unidades superficiales, canales exhumados, marcas de fondo de cauce, cuerpos intrusivos y cráteres de impacto, se utilizaron filtros de paso alto y direccionales, con valores de Kernel que fueron ajustados para cada imagen particular.

Finalmente y una vez procesadas las imágenes, se efectuó una labor de interpretación visual heurística y holística.

5.2.6 ELABORACIÓN DE LA CARACTERIZACIÓN GEOMORFOLÓGICA DE KASEI VALLES

La fase de Procesamiento y Caracterización de la metodología, finaliza con esta etapa. Una vez se obtuvieron los productos procesados, provenientes de las imágenes descritas con anterioridad, fueron visualizados y referenciados geográficamente en un Sistema de Información Geográfica convencional. Posteriormente fueron combinados mediante la utilización del software JMARS de la Universidad de Arizona, con el fin de mejorar la observación y delimitación de cada rasgo geomorfológico, así como las propiedades que presentaba en cada imagen desde el punto de vista comparativo, para seleccionar finalmente la imagen o conjunto de imágenes que mejor expusieran las particularidades de cada geoforma.

5.2.7 CONTEXTUALIZACIÓN CON AMBIENTES TERRESTRES ANÁLOGOS

La fase de Contexto y Geomorfogénesis de la presente metodología, continúa con la identificación de todos los elementos geomorfológicos existentes, los cuales con el apoyo de la información temática recopilada, se analizaron y homologaron con diversos ambientes geológicos del Planeta Tierra potencialmente similares a los canales de Kasei Valles.

En palabras del Doctor Jesús Martínez Frías, Investigador Científico del Instituto de Geociencias, IGEO (CSIC-UCM) y Director de la Red Española de Planetología y Astrobiología (REDESPA), publicadas en la versión electrónica de la Revista Investigación y Ciencia, el 23 de marzo de 2015: *Existen determinadas zonas de la Tierra que presentan características singulares y únicas, por su climatología, geomorfología, mineralogía, geoquímica, etc., que permiten utilizarlas como modelos para otros planetas. Estas zonas son los denominados "análogos terrestres". Sitios especiales donde podemos probar nuevos instrumentos y prototipos, que formarán parte de futuros rovers o landers, o donde estudiar y evaluar la validez de determinadas cuestiones y modelos científicos en su futura extrapolación planetaria.*

La importancia de estos análogos terrestres, es claramente determinada, cuando el Profesor Martínez en el mismo documento citado en líneas anteriores, precisa: *Por ello, desde el punto de vista del reconocimiento de las condiciones de*

habitabilidad planetaria es importante el estudio de los análogos terrestres. Tanto por la información ambiental que nos proporcionan, como por la identificación de geomarcadores y biomarcadores, que puedan ser utilizados en Marte, Europa, Titán, Encélado o cualquier otro planeta o luna de interés astrobiológico. Por ello, los estudios y las misiones planetarias se vienen complementando, desde hace ya más de 20 años, con la caracterización de los análogos terrestres.

Para Kasei Valles, la lista de rasgos geomorfológicos que poseen alguna similitud es extensa, debido a la variedad de procesos endógenos y exógenos que parecen haber operado en este sector específico, combinado con los posibles efectos, tanto físicos como químicos, del agua en estado líquido.

De estos se eligieron como análogos los más representativos y cercanos a las condiciones de escala, igualdad de geofomas y posibles mecanismos de formación, considerando el fenómeno de Equifinalidad. Lo anterior, se convierte en un insumo importante a ser aplicado en la etapa de formulación de la propuesta evolutiva.

5.2.8 REALIZACIÓN DE LA PROPUESTA EVOLUTIVA DE KASEI VALLES

Teniendo en cuenta los análogos terrestres representativos para Kasei Valles y al examinar las evidencias geomorfológicas, geológicas, geofísicas y de sensores remotos, mediante el desarrollo de la presente metodología fue posible tener al final, una serie de elementos de juicio, que ayudaron a elaborar una hipótesis inédita sobre el origen de los canales Mayores de Kasei Valles, procurando efectuar relaciones geomorfogénicas concluyentes, entre el complejo de canales de interés y su entorno. Esta hipótesis fue soportada adicionalmente, con base en la experticia profesional en el campo de la Geología

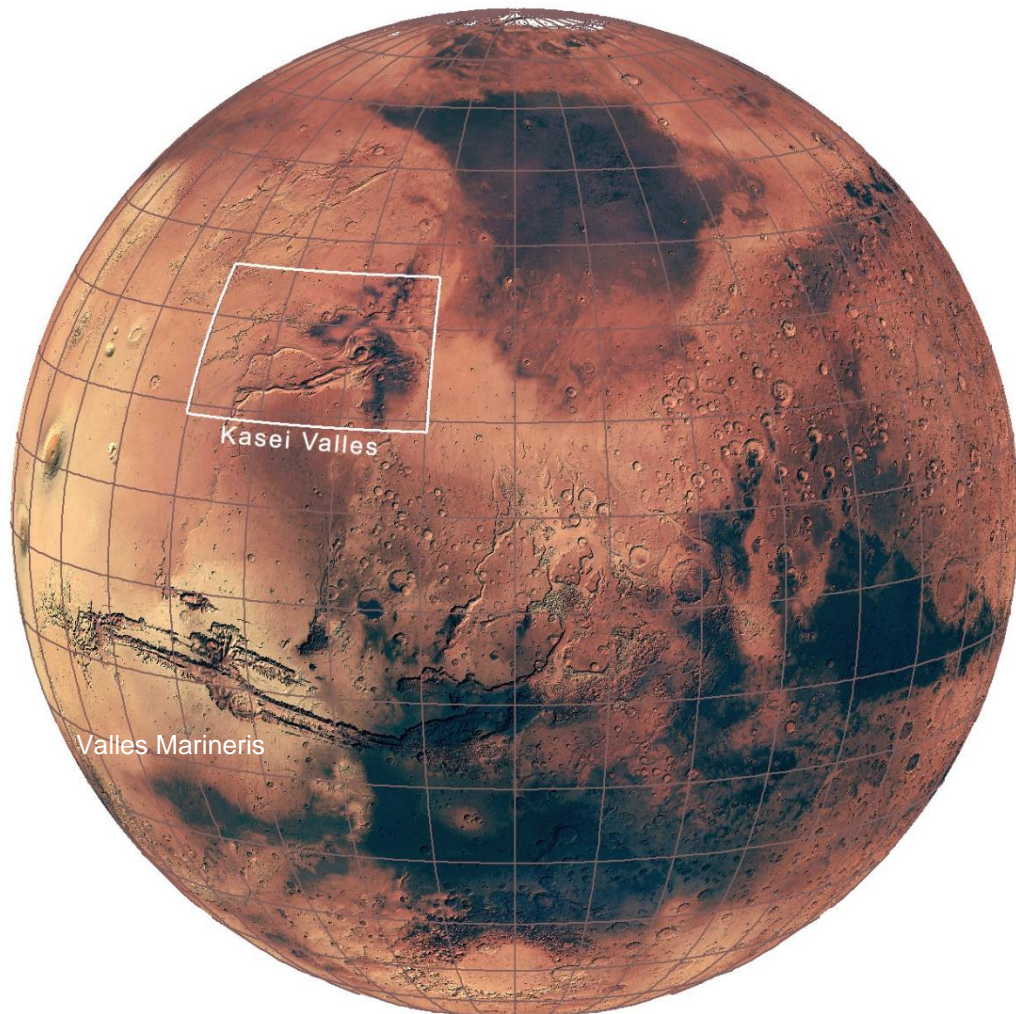
5.2.9 ELABORACIÓN DE LA MEMORIA TÉCNICA EXPLICATIVA

Como etapa final del proceso, se elaboró la presente memoria técnica explicativa, donde el elemento esencial es una amplia explicación gráfica de cada temática abordada. La presentación del Trabajo de Grado, se efectuó según las Normas ICONTEC 2016 para el texto y Normas APA 2016 para la Bibliografía, según lo estipulado en el reglamento de la Universidad, para esta clase de trabajos de grado.

6. CONTEXTO FISIOGRAFICO DE KASEI VALLES

Kasei Valles, cuyo primer nombre significa literalmente “Planeta Marte” en idioma Japonés (火星 – Kasei), es el nombre escogido por la International Astronomical Union ((IAU), 2006), para denominar a un gigantesco conjunto de Canales de “Descarga” (Outflow Channels), localizado al norte de la gran depresión denominada “Valles Marineris”, enmarcado en las siguientes coordenadas con origen Planetocéntrico: Latitud= 27.11 °- 16.28 ° y Longitud= 309.66 ° - 285.55 ° (Figura 2).

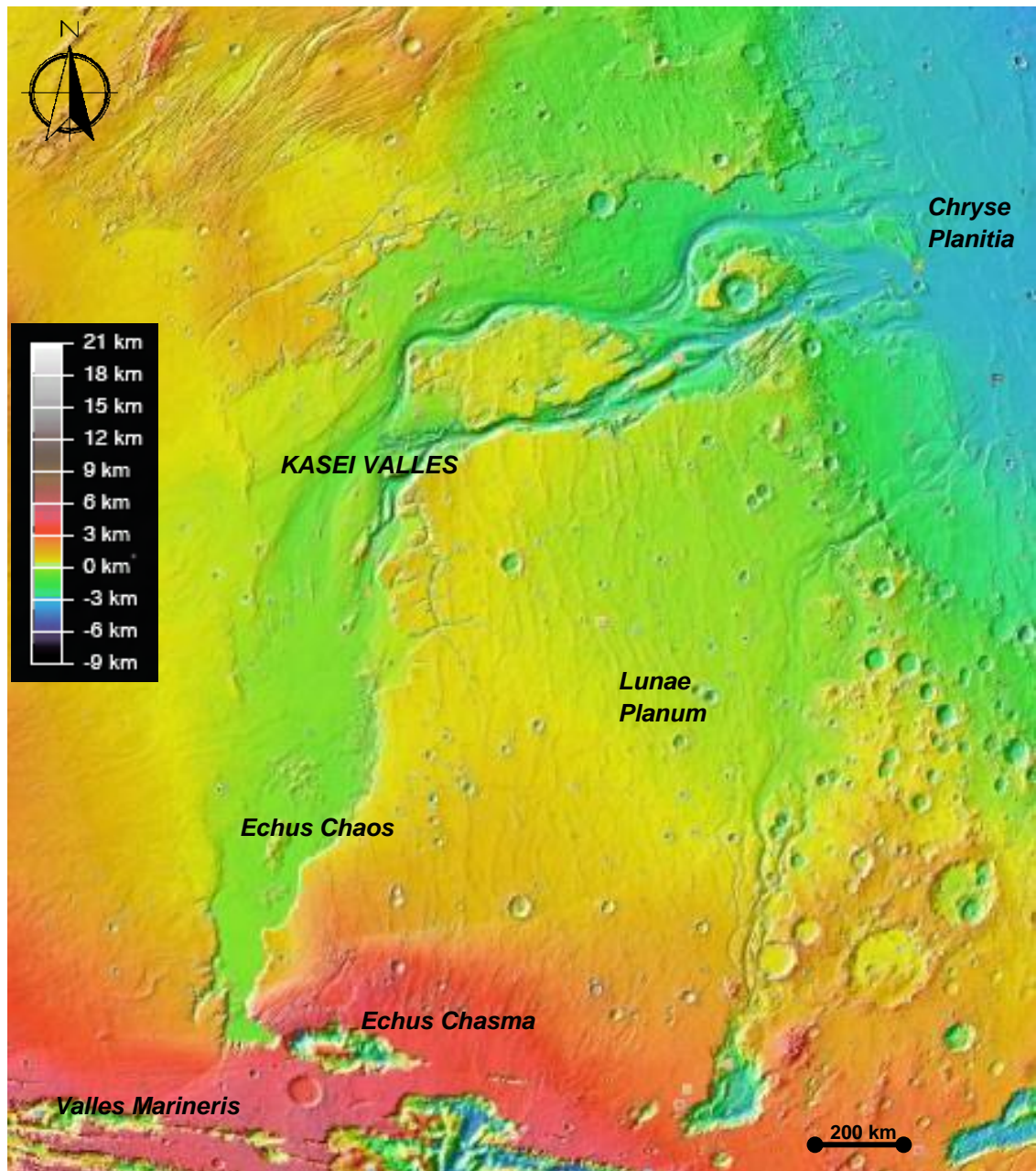
Figura 2. Contexto del sector de Kasei Valles dentro de la superficie del planeta Marte. Esquema basado en fotografías de la cámara gran angular del Mars Global Surveyor Orbiter.



Fuente: ESA/DLR/FU Berlin (G. Neukum) y NASA/JPL/MSSS

Este sistema de canales, tiene su origen en el área llamada Echus Chasma, cerca de Valles Marineris, y desemboca en las amplias llanuras de Chryse Planitia, lugar que por su vastedad, conformación geomorfológica y vestigios geológicos, se cree que es la cuenca de un antiguo océano (Chapman et al, 2010) (Figura 3).

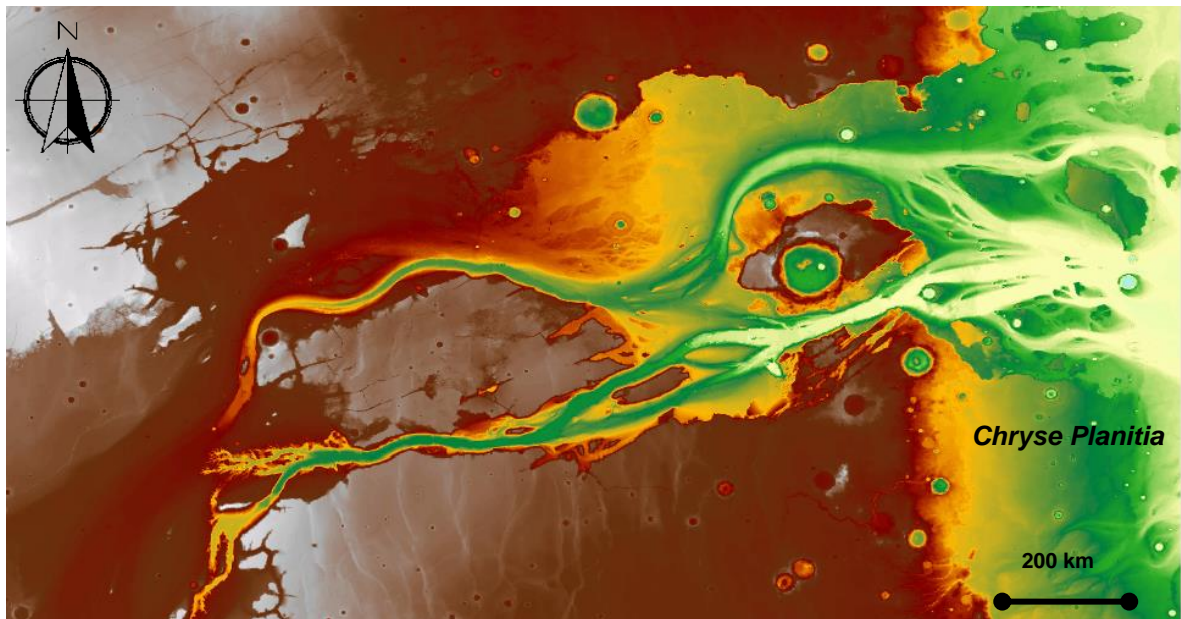
Figura 3. Imagen MOLA (Mars Orbiter Laser Altimeter), a bordo del Mars Global Surveyor, indicando los principales lugares que enmarcan el área de Kasei Valles.



Fuente: Modificado de ESA/DLR/FU Berlin (G. Neukum).

No obstante lo anterior, el sector específico de Kasei Valles, ha sido tradicionalmente enmarcado entre 27.11° a 16.28° de Latitud y 309.66° a 285.55° de Longitud, según el sistema de coordenadas Planetocéntricas para Marte, adoptadas por la International Astronomical Union ((IAU), 2006) (Figura 4).

Figura 4. Delimitación de Kasei Valles, de acuerdo a la International Astronomical Union. Modelo Digital de Elevación (DEM) de Kasei Valles, con resolución de 463 metros X pixel, obtenido mediante procesamiento de datos del DEM global de Marte a escala 1:100'000.000, obtenidos por el MOLA del Mars Global Surveyor.



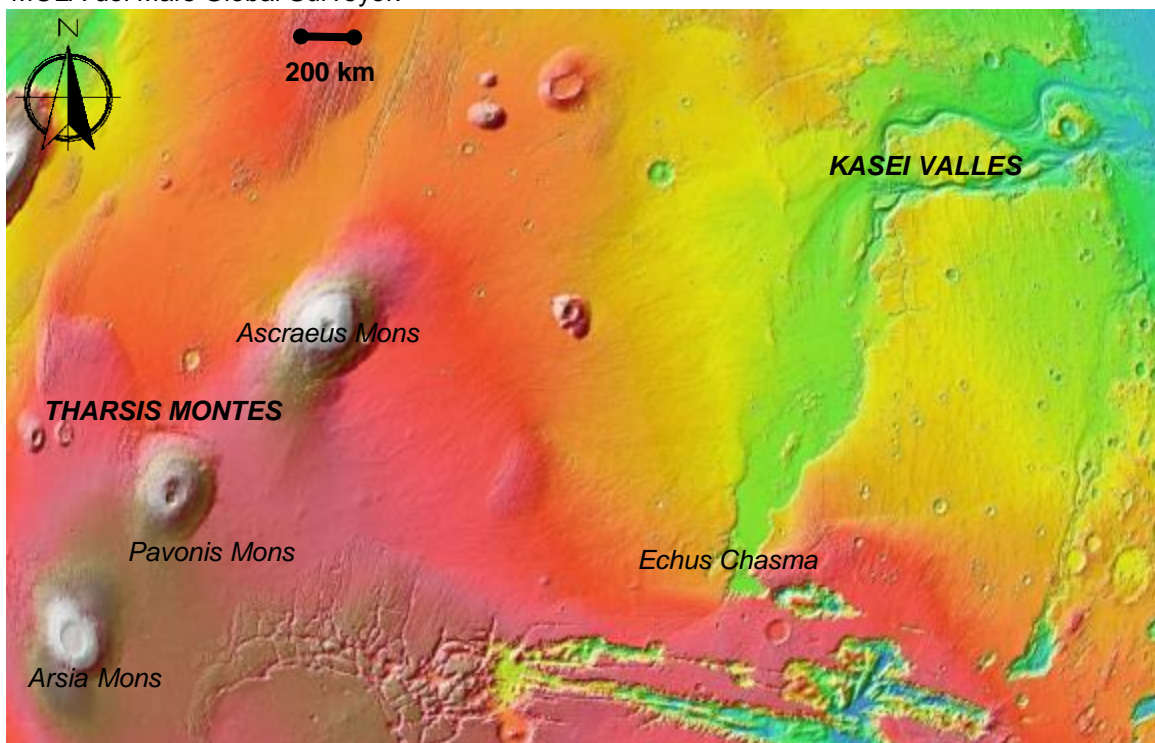
Fuente: Elaboración propia

Aunque Kasei Valles se muestra de manera clara, como un conjunto de grandes y marcados canales, que comunican el hemisferio sur de Marte, con las tierras bajas de Chryse Planitia, no es tan claro su origen y factores que influyeron en su conformación actual.

Se identifican a su alrededor, una serie de rasgos fisiográficos que han influido potencialmente en el modelado de estos grandes canales, tal como una extensa localidad de grandes edificios volcánicos denominada Región de Tharsis o Tharsis Rise (Protuberancia de Tharsis), cuya actividad a lo largo de las eras Areológicas, ha contribuido a la conformación del estado actual de la zona (Russell and Head, 2007). La región de Tharsis se compone de un inmenso conjunto de campos de flujos volcánicos, que se extienden 5.000 kilómetros de Este a Oeste por 6.000 km de norte a sur. Está coronada por algunas de las más grandes construcciones volcánicas que existen en el sistema solar, incluyendo Olympus Mons, Mons Alba, y los tres Montes Tharsis (Ascraeus Mons, Pavonis y Arsia), los cuales se

encuentran alineados en dirección NE-SW. Además, incluye campos de volcanes más pequeños, así como terrenos tectónicamente deformados, zonas elevadas que incluyen partes de Tempe Terra, Noctis Fossae, Claritas Fossae, Ceraunius Fossae, y las tierras altas Thaumasia (Tanaka et al, 2014; Dohm et al, 2008). De igual manera, es posible que desde el sector de Echus Chasma, una depresión de 100 km de largo y 10 km de ancho, ubicado al norte de Valles Marineris y considerado como una de las grandes fuentes de agua de Marte, se hayan generado potenciales actividades de origen endógeno/exógeno, que contribuyeran al modelado de este gran conjunto de canales (Figura 5).

Figura 5. A la izquierda, región de Tharsis Montes y sus edificios volcánicos. Abajo, la notable depresión topográfica de Echus Chasma. Arriba a la derecha, sector de Kasei Valles. Imagen MOLA del Mars Global Surveyor.

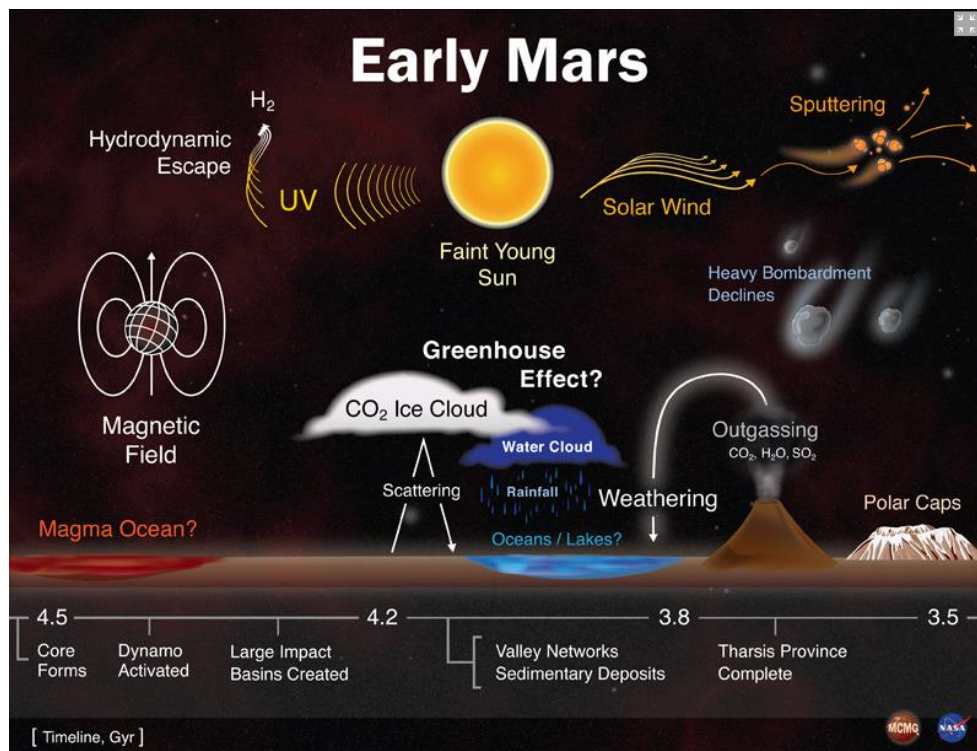


Fuente: Modificado de ESA/DLR/FU Berlin (G. Neukum).

En el presente, Marte es un planeta frío y seco, donde el agua líquida no es estable en la superficie. Sin embargo, hace más de 3.500 millones de años (Figura 6), las condiciones climáticas parecen haber sido favorables para la presencia de agua líquida en la superficie (NASA-AMES Mars Climate Modeling Center, 2015). La evidencia de esta afirmación, procede de características fluviales en terrenos antiguos, observadas mediante sensores remotos, tales como redes de valles y sistemas lacustres abierta, que probablemente indican la ocurrencia de eventos de precipitación y escorrentía. Según el Mars Climate Modeling Center de la NASA, (2015), El sol era un 25-30% menos luminoso durante sus primeros mil millones

de años de lo que es hoy en día, por lo que es difícil generar condiciones húmedas cálidas. Lo anteriormente descrito, se observa en la figura 6, donde además se muestra una compilación de los posibles factores presentes en la época denominada Early Mars (Marte Temprano), que se refiere a ese período de tiempo desde después de que el planeta se formó hace 4.500 millones de años, hasta el final del período de intenso bombardeo, aproximadamente 3.500 millones de años. Período conocido como la era Noaquiiana. Entre ellos se incluye nubes de agua, eventos pluviométricos y gases volcánicos provenientes de la provincia de Tharsis, que causaron un posible efecto invernadero, así como la existencia de un campo magnético en el planeta.

Figura 6. Esquema de las condiciones climáticas de la época denominada “Early mars” o Marte Temprano, que corresponde a la época Noaquiiana

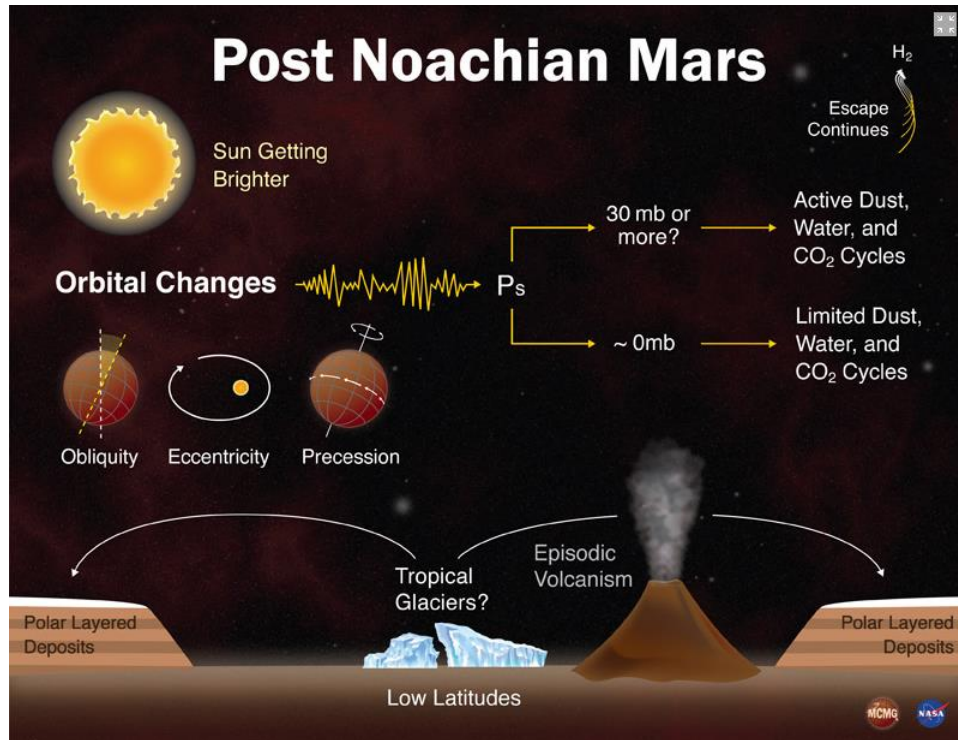


Fuente. NASA-AMES Mars Climate Modeling Center, 2015

Aunque las condiciones aparentemente más cálidas y húmedas en el Marte primitivo, no se extienden más allá del Noaquiiano (3.500 millones de años aproximadamente), el aumento gradual de la luminosidad del Sol con el tiempo, y las grandes variaciones casi periódicas en los parámetros de la órbita de Marte dieron lugar a variaciones climáticas significativas desde entonces. Las variaciones en la oblicuidad de Marte, la excentricidad y la longitud del perihelio alteran la distribución latitudinal y estacional de la luz solar, situación que finalmente controla el sistema climático (NASA-AMES Mars Climate Modeling

Center, 2015). Estos factores son descritos en la figura 7, en la que se aprecia además, los efectos de un sol más brillante para el planeta, la posible existencia de glaciares tropicales en latitudes bajas y eventos volcánicos episódicos.

Figura 7. Esquema de las condiciones climáticas de la época denominada Post Noachiana o Marte Temprano, que corresponde a la época Hesperiana.

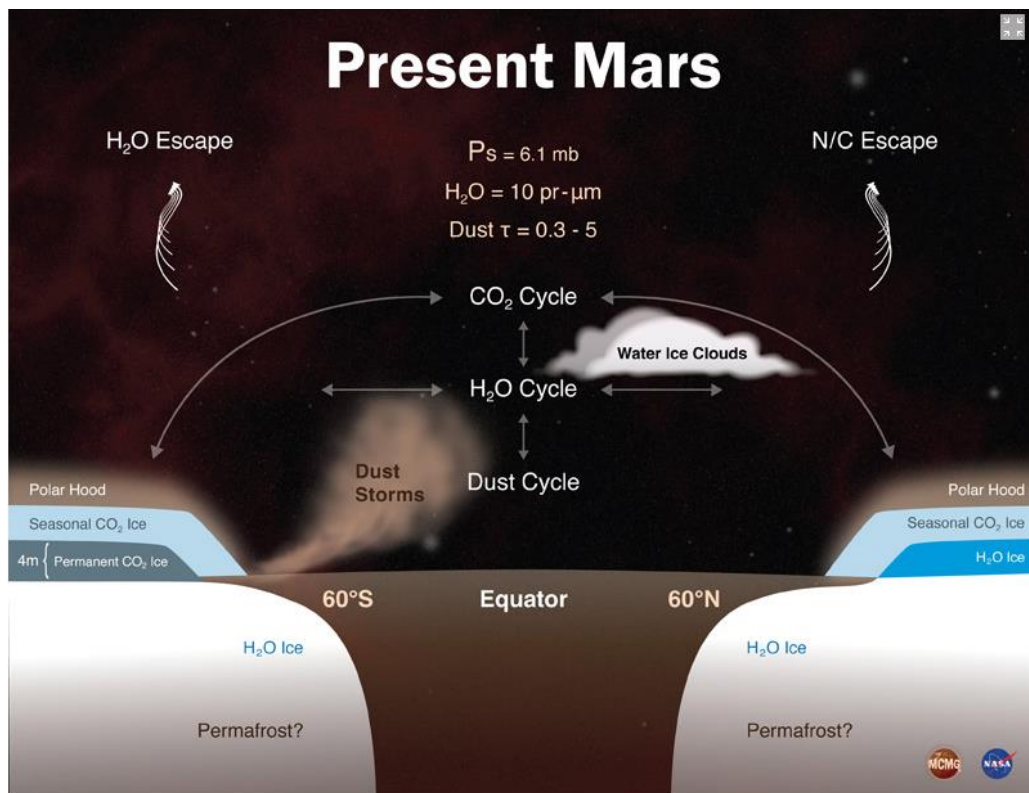


Fuente. NASA-AMES Mars Climate Modeling Center, 2015

De acuerdo al Centro de Astrobiología CSIC-INTA (2016), en la actualidad la superficie de Marte es más fría que en sus épocas antecesoras y experimenta grandes cambios estacionales de temperatura y pronunciadas variaciones diurnas, con diferencias de temperaturas entre su mínimo y máximo de 70 grados centígrados o más. Lo anterior, como consecuencia de la excentricidad y radio de su órbita, así como su falta de océanos. El Centro de Astrobiología CSIC-INTA, en la página web del Rover Environmental Monitoring Station-REM, afirma: *La escasez de vapor de agua en la atmósfera marciana y la ausencia de cuerpos de agua líquida, grandes o pequeños, significa que hoy en día Marte no tiene un ciclo hidrológico como en cualquier lugar cerca de la Tierra (donde las cuentas de vapor de agua para un impresionante 1 – 4% en la superficie). Sin embargo, la atmósfera marciana llega a temperaturas tan bajas, que el vapor de agua temporalmente superior al aporte máximo de la atmósfera que puede tener – la atmósfera se satura. Arriba en el cielo marciano se pueden formar nubes blancas muy delgadas hechas de cristales de hielo de agua, como los cirros en la Tierra. En la superficie, las heladas depositadas durante la noche y que generalmente se*

sublima a la mañana siguiente. Sin embargo zonas heladas pueden persistir por una fracción significativa del día, dependiendo de la temporada, sobre todo cuando se forman en áreas con poca iluminación, tales como las paredes interiores de los cráteres que, debido a su inclinación y orientación, pasa la mayor parte de los días de invierno en el sombra... En respuesta a la gran variación de temperatura en el ciclo diario, la presión en la superficie y la dirección del viento varía de forma correlacionada con la hora del día. Aunque la dirección del viento muestra una variabilidad pronunciada, como consecuencia de las ráfagas de pequeña escala, el comportamiento diario de los vientos en Marte se caracteriza por el contraste entre los vientos casi constantes durante la noche y una progresiva rotación de 360 ° durante el día (Figura 8).

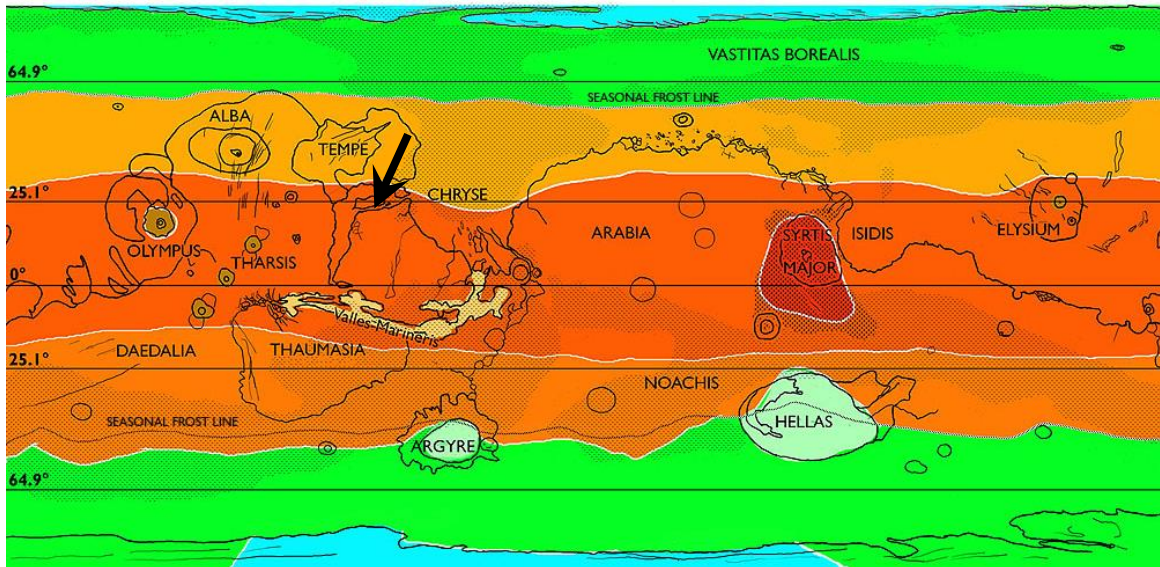
Figura 8. Esquema de las condiciones climáticas actuales de Marte.



Fuente. NASA-AMES Mars Climate Modeling Center, 2015.

De acuerdo a lo establecido por Hargitai en la definición del mapa climático de Marte, basado en imágenes TES y en la metodología desarrollada por Wladimir Köppen (Hargitai et al. 2010), Kasei Valles se encuentra localizado en una zona de clima tropical, cuya temperatura oscila entre los 1.8 a 6.8 °C (275 – 280° K). Lo anterior, teniendo en cuenta la menor complejidad del clima en Marte, ya que debido a la carencia de océanos y corrientes oceánicas, el clima es regulado por la topografía, la iluminación solar e inclinación del planeta, así como la inercia térmica y existencia de hielo estacionaria o permanente (Figura 9)

Figura 9. Zonas climáticas de Marte y nombres de algunos lugares mencionados en este texto. La flecha indica el sector de Kasei Valles, localizado en la zona tropical del planeta. Las líneas horizontales señalan los trópicos de referencia.

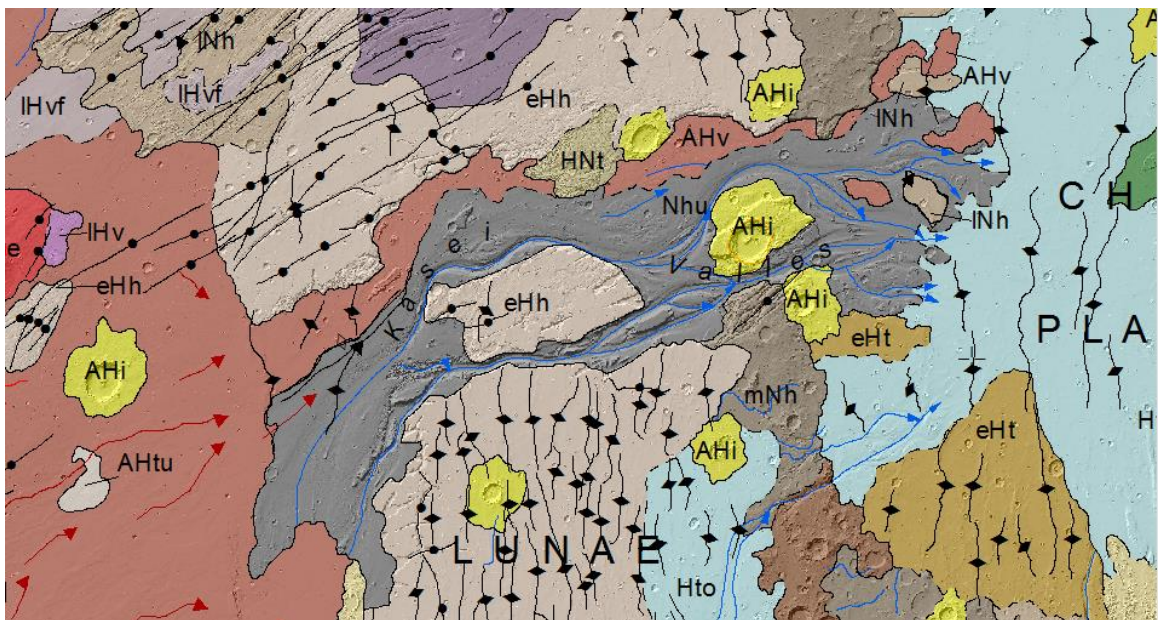


Fuente: Modificado de Hargitai (2010).

El nuevo mapa geológico global de Marte, que registra la distribución de las unidades geológicas y formas de relieve en la superficie del planeta a través del tiempo, se basa en una variedad sin precedentes, de una gran cantidad de datos de alta calidad, obtenidos mediante Sensores Remotos, incluso desde que el primer orbitador Viking llegó al planeta, los cuales incluyen aquellos adquiridos por Mars Global Surveyor (MGS), Mars Orbiter Laser Altimeter (MOLA), Mars Odyssey (ODY) Thermal Emission Imaging System (THEMIS) Daytime infrared (IR) image mosaic (100 m/pixel). Estos datos han permitido realizar observaciones morfológicas, topográficas, espectrales, termofísicas y de radar, entre otras, para la integración, análisis e interpretación en apoyo a la cartografía geológica. De manera particular, la cartografía topográfica de precisión ahora disponible, elaborada por instrumentos tales como el MOLA (Mars Orbiter Laser Altimeter), ha posibilitado obtener para la elaboración de la cartografía global del planeta, una representación morfológica más real de la superficie (mientras que bases de imágenes del rango del espectro visible utilizados anteriormente eran menos eficaces, ya que con ellas era necesario combinar información morfológica y de albedo, con grandes dificultades en algunos sectores, por fenómenos tales como neblina atmosférica y tormentas de polvo). Además, las bases de imágenes térmicas infrarrojas utilizadas para el nuevo mapa, tienden a ser menos afectadas por la bruma atmosférica y por lo tanto son más confiables para el análisis de la morfología de la superficie y textura a una resolución incluso mayor que los productos topográficos (Tanaka-USGS, 2014).

De acuerdo a esta versión reciente del Mapa Geológico de Marte, el contexto Geológico de Kasei Valles, está dominado por formaciones de los periodos Amazoniano (2.000 millones de años hasta el presente) y Hesperiano (3.500 a 2.000 millones de años), con vestigios de unidades de edad Noachiana (4.500 a 3.500 millones de años) (Figura 10).

Figura 10. Detalle del Mapa Geológico de Marte 20M, mostrando las unidades existentes en Kasei Valles. **AHi**: Amazonian and Hesperian impact unit; **AHv**: Amazonian and Hesperian volcanic unit; **AHtu**: Amazonian and Hesperian transition undivided unit; **eHh**: Early Hesperian highland unit; **eHt**: Early Hesperian transition unit; **IHv**: Late Hesperian volcanic unit; **HNT**: Hesperian and Noachian transition unit; **Nhu**: Noachian highland undivided unit. **INh**: Late Noachian highland unit.



Fuente: Tanaka/USGS (2014)

Debe resaltarse, que el nuevo Mapa Geológico considera los canales mayores de Kasei Valles, como una unidad de edad Noachiana, mientras que en trabajos realizados con anterioridad, algunos autores le otorgan una edad Amazoniana a dichos canales (Chapman et al, 2010).

Aunque cada una de las unidades cartografiadas en Kasei Valles, obedece a un ambiente de formación particular, varias han sido determinadas como transicionales o poseen características de dos Periodos Cronoestratigráficos.

7. GEOMORFOLOGÍA

La investigación de los orígenes de las geoformas en otros planetas, supone un gran reto para la comunidad científica, debido a que la mayoría de los datos disponibles, corresponden a imágenes obtenidas por medio de sensores remotos y no desde la observación directa o de muestreo, salvo algunos sitios puntuales, que como en el caso de Marte, son objeto de análisis directo por parte de los robots que se hallan en su superficie, los cuales hacen parte del programa para la exploración robótica de Marte, llamado Mars Exploration Rover. Muchos de estos desafíos giran en torno a algunos de los principios científicos más básicos de la geomorfología y la cuestión de cómo estos principios se podrían aplicar a otros mundos. Los paisajes extraterrestres no pueden interpretarse radicalmente dentro del contexto del conocimiento terrestre.

Todos los procesos en geomorfología son determinados por varios parámetros básicos. Estos parámetros son a menudo conocidos como las condiciones de base e incluyen factores del medio ambiente fundamentales, tales como la gravedad local, la temperatura y la densidad de la atmósfera. Las alteraciones en estas condiciones de base conseguirían cambiar muchos aspectos de las formas en que se producen los procesos (Pelletier et al, 2010). Marte tiene una gravedad superficial promedio poco más de un tercio de la de la Tierra. La temperatura media de la superficie es de alrededor de -65°C y la presión atmosférica media es de 0,6% la de la Tierra. Estas condiciones inducen a que los procesos funcionen de manera muy diferente en los dos planetas, lo cual significa que los procesos y principios que se han estudiado y modelado en la Tierra no siempre son aplicables directamente a Marte. Por ejemplo, a pesar de los glaciares de la Tierra se desplacen varios decímetros por día en algunas zonas, en el actual Marte es probable que los accidentes geográficos de hielo se muevan a velocidades tan bajas como centímetros por miles de años, o tal vez incluso más lento. Esto es principalmente debido a la baja gravedad (38% de la existente en La Tierra) y muy bajas temperaturas. Por lo tanto, el desarrollo de una comprensión de cómo se ha desarrollado la superficie de Marte, podría ser una tarea difícil.

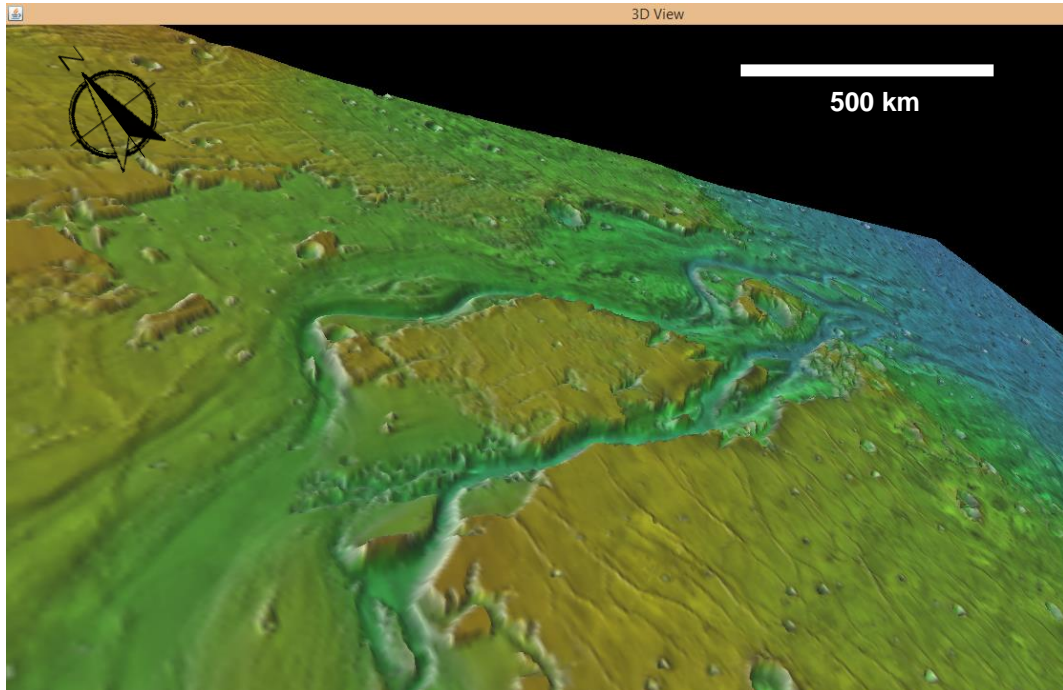
Así mismo diversos autores reconocen que existe una convergencia denominada "Equifinality o Equifinalidad", donde geoformas similares, son generadas por procesos de diferente origen (Howard, A. 2009)

Al observar los canales mayores de Kasei Valles, es imposible no suponer un potencial origen fluvial de esta singular, aunque familiar morfología, la cual ha sido atribuida tradicionalmente a inundaciones de origen cataclísmico (Robinson y Tanaka, 1990). Sin embargo, es aquí donde hace aparición la Equifinalidad, dada la similitud observada entre canales modelados por el agua y los efectuados por flujos de lava. Existen canales de lava que semejan cauces de ríos, en los flancos

de muchos volcanes terrestres (como en Hawaii), y es posible que los cauces de los ríos que a menudo han sido interpretados como evidencia de agua que pudo fluir de manera abundante, sean realmente vestigios de gigantescos episodios volcánicos en Marte. De igual manera y basados en evidencias halladas en imágenes adquiridas por los diferentes orbitadores que rodean al planeta Marte, varios autores proponen diversos mecanismos geomorfológicos.

Kasei Valles es un rasgo bien marcado en la superficie marciana, con características únicas, que posibilitan categorizarlo como el Canal de Descarga (Outflow Channel) más grande de todo Marte (Figura 11). En términos generales, se observa que no tiene afluentes, empieza como un canal único, con una sección casi constante desde una sola fuente, llamada Echus Chasma, localizada a 1.200 Km al Suroeste de Kasei Valles. Tiene una baja sinuosidad, paredes suavemente curvadas, posee islas en forma de gota o Diamante en torno al cual se ha desviado el flujo de manera convergente y divergente. En el piso de los canales se encuentra una gama de formas de fondo, incluyendo estrias, cataratas, cráteres de impacto, canales interiores, entre otras.

Figura 11. Imagen en perspectiva de Kasei Valles, obtenida de la integración de un mosaico THEMIS Day Infrarrojo (IR) + color, con un Hillshade generado a partir de imágenes MOLA. Procesada con Arc Gis 10.2 (ESRI) y JMARS (Arizona State University Mars Scientific Software Team).



Fuente: elaboración propia

Los Outflow Channels se diferencian de otras geoformas de origen fluvial o generadas con participación de agua líquida o sólida en su formación (diferentes a aquellas de carácter léntico) tales como los Valles Ramificados (Branching Valleys) y las Quebradas (Gullies), en que los primeros poseen secciones transversales de hasta cuatro kilómetros y los segundos, decenas de metros de ancho, mientras que los Outflow Channels pueden alcanzar incluso cientos de kilómetros de sección, formados por eventos de carácter global. Así mismo, los Branching Valleys han sido catalogados como de edad Noachiana, mientras que se le ha otorgado una edad Hesperiana a Amazoniana los Outflow Channel y Gullies (Carr H.M., 1996).

Kasei Valles es frecuentemente comparado con el sector de Channeled Scablands, localizado al Este del estado de Washington U.S.A (Baker V.R. 1974, 2008), debido a similitudes geomorfológicas que algunos autores han reportado, quienes han calculado para Kasei Valles un rango de descarga acuosa de 10^8 – 10^9 m³ /seg, en contraste con los 10^7 m³ /seg de los Channeled Scablands y un pico de 3×10^4 m³ /seg para el río Mississipi (Robinson & Tanaka, 1990). Según Marshak (2009) estos canales Terrestres, se originaron por represamientos ocasionados por grandes masas glaciares, las cuales al obedecer al retroceso glaciar, generaron inundaciones cataclísmicas provenientes del lago glaciar Missoula, al Este de Washington y descendieron por la meseta del río Columbia, durante el Pleistoceno (Figura 12). Cuatro décadas se han extendido en el debate sobre el origen de los Channel Scablands, convirtiéndose en una de las mayores controversias en la historia de las ciencias de la Tierra.

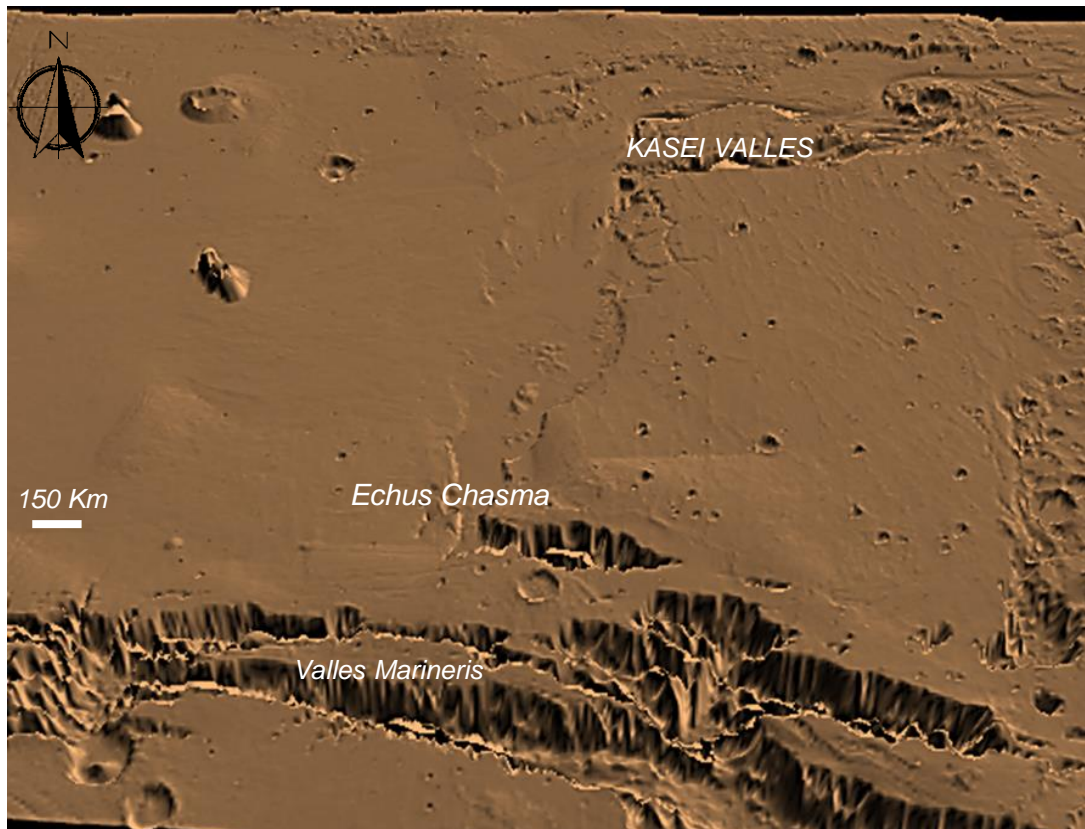
Figura 12. Mapa contextual de Channeled Scablands, indicando los potenciales puntos de represamiento (Dam) del lago Missoula, ocasionado por una masa glaciar. El avance y retroceso del glaciar, ocasionó varias inundaciones, que conformaron la geomorfología actual. Las flechas muestran las direcciones del flujo.



Fuente: Exploring the Planets, Christiansen and Hamblin, 2007.

El gran tamaño del canal, en el posible sector de nacimiento de Kasei Valles en Echus Chasma, con una sección de 50 kilómetros en su parte más angosta, así como la ausencia de morfología que indique la existencia de corrientes tributarias, ayudan a concluir de manera preliminar que este gran Outflow Channel, no fue formado bajo condiciones de precipitación o escorrentía superficial, sino por un evento que involucró grandes volúmenes de descarga de fluidos (Figura 13).

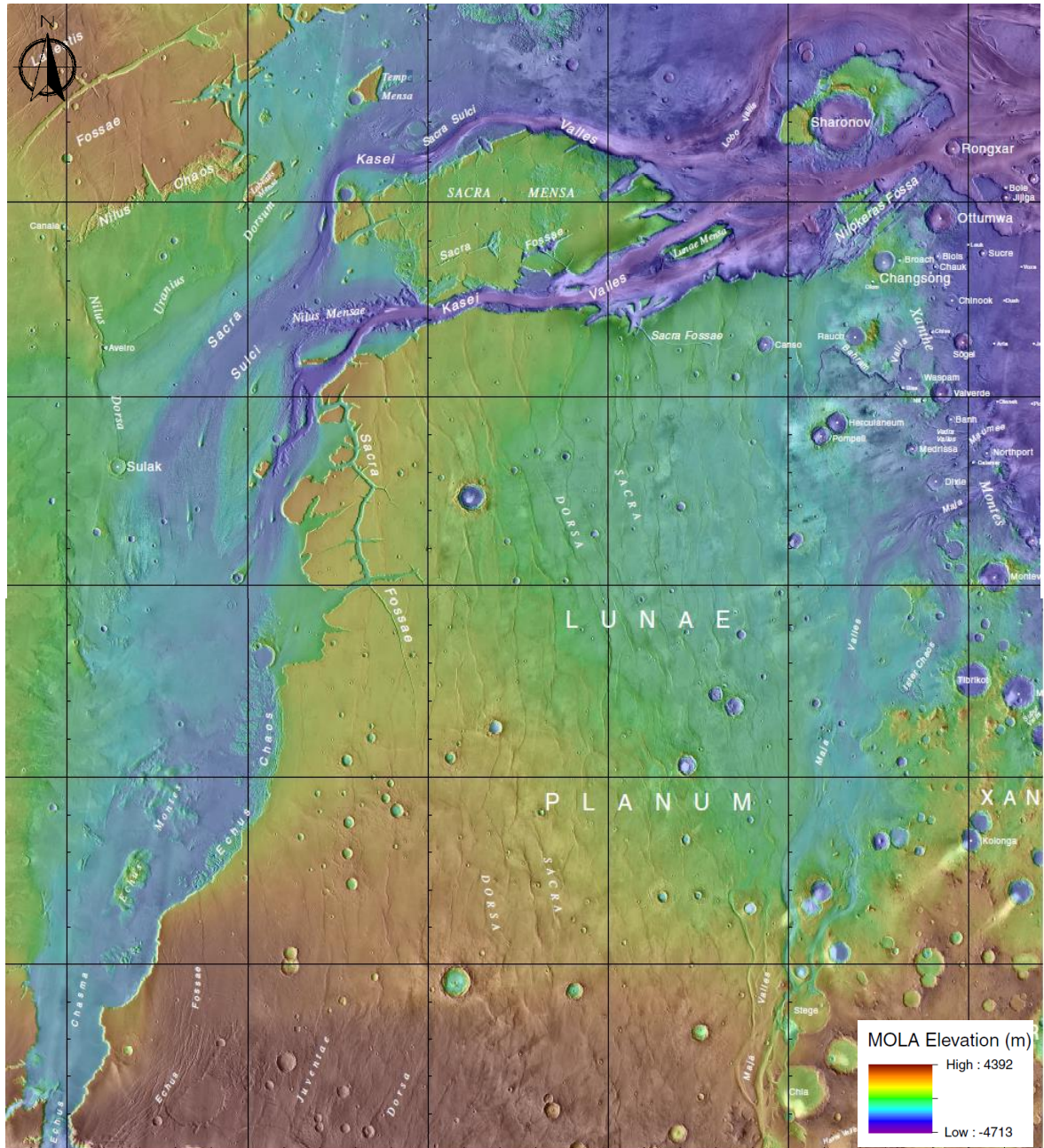
Figura 13. Perspectiva del potencial lugar de nacimiento de Kasei Valles, en el sector de Echus Chasma, obtenida mediante la combinación de un Hillshade e imágenes THEMIS Day IR (100 metros X pixel). Procesamiento mediante el software JMARS (Arizona State University Mars Scientific Software Team)



Fuente: ASU. Elaboración propia

Con el propósito de contextualizar al lector de este documento, es importante mencionar que diversos investigadores han propuesto nombres para los accidentes geográficos más sobresalientes de Marte, los cuales han sido aprobados y establecidos como oficiales por la International Astronomical Union (IAU). Estos topónimos son de gran importancia para la identificación, localización y familiarización con la superficie del planeta, particularmente, con el sector de Kasei Valles. En consecuencia, el mapa de nombres efectuado para el cuadrángulo MC-10 "Lunae Palus", indica los nombres convencionales que en la actualidad poseen los rasgos más prominentes del sector de interés (Figura 14).

Figura 14. Sección del Cuadrángulo MC-10 “Lunae Palus” del planeta Marte, escala 1:5.000.000, donde se muestra los nombres de los rasgos sobresalientes del sector de Kasei Valles y su sector de origen Echus Chasma. Imagen base: THEMIS IR Day mosaic by USGS, ASU. Topografía en escala de colores: MOLA Elevation Model, GSFC.

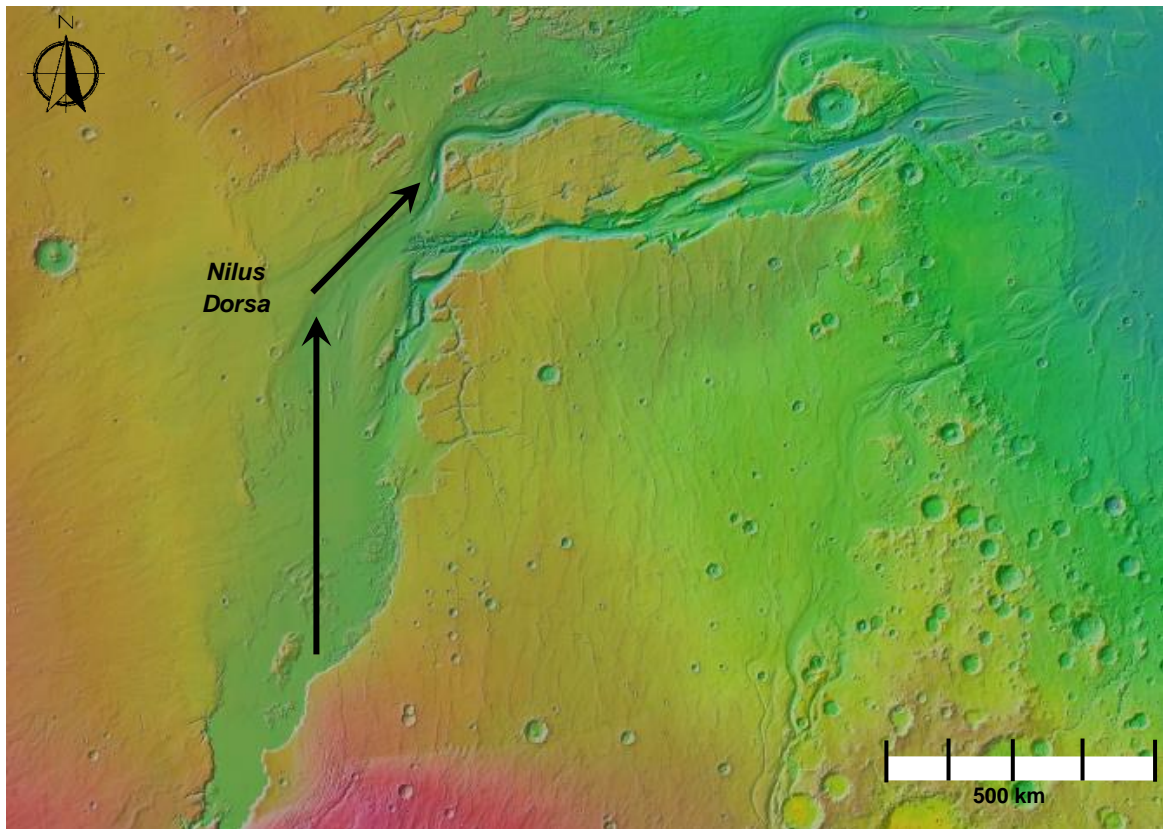


Fuente: Modificado de IAU-USGS-NASA 2010

Desde su origen en Echus Chasma, el gran canal que conforma posteriormente a Kasei Valles tiene una tendencia de rumbo, en dirección Sur – Norte, tomando una marcada inflexión hacia el Este, en el sector de Nilus Dorsa a una latitud de 20° Norte, hasta llegar a las tierras bajas de Chryse Planitia, justo en el sector límite de la dicotomía de Marte. El ancho promedio del Canal Principal es de 235 kilómetros.

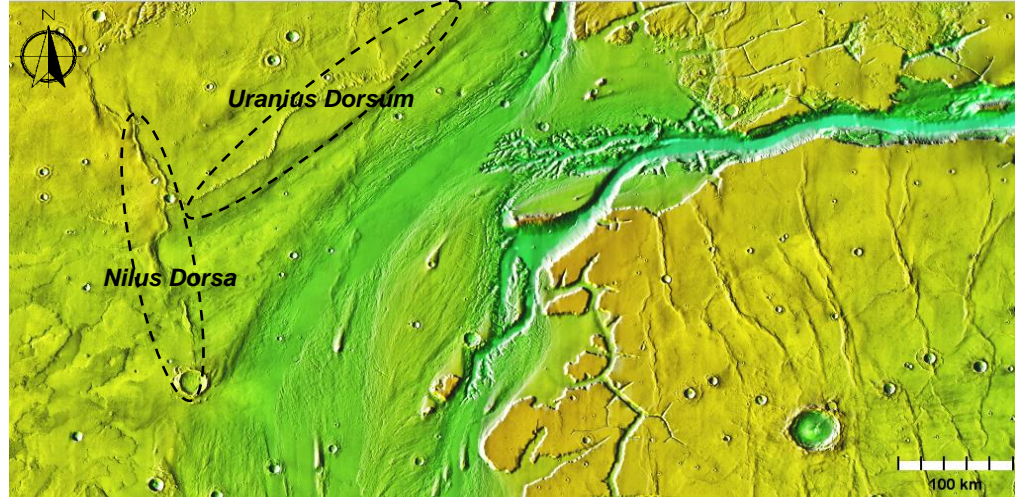
El confinamiento estructural en el cual se constituye las geoformas de Nilus Dorsa (con una tendencia general Sur - Norte), así como Uranius Dorsum (tendencia Suroeste - Noreste), pudieron haber influenciado en el cambio de dirección del canal principal de Kasei Valles (Figuras 15 y 16). Esta discusión se dará en un capítulo posterior.

Figura 15. Composición de imágenes MOLA con relieve sombreado y coloreado, con imágenes TES Thermal Inertia (Christensen), para el sector de Lunae Palus. Se observa las tendencias principales de los canales de Kasei Valles, tanto desde su origen en Echus Chasma con una dirección predominante Sur – Norte, como su inflexión hacia el Noreste en el sector de Nilus Dorsa. Procesada con Arc Gis 10.2 (ESRI) y JMARS (Arizona State University Mars Scientific Software Team).



Fuente: NASA/ MOLA Team. Procesada con Arc Gis 10.2 (ESRI) y JMARS (Arizona State University Mars Scientific Software Team). Elaboración propia.

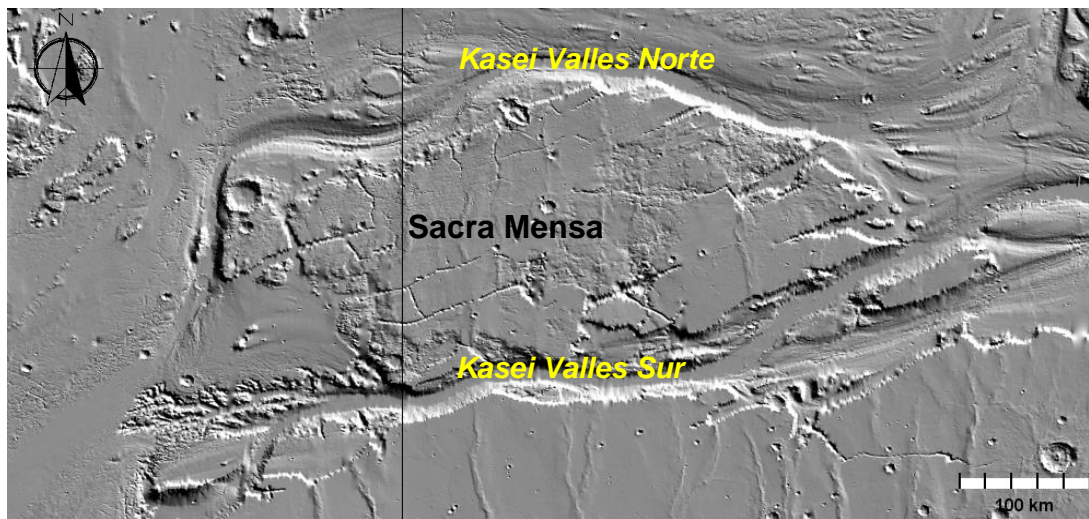
Figura 16. Detalle del sector de inflexión de los canales mayores de Kasei Valles, en el sector de Nilus Dorsa. Composición de imágenes THEMIS Day Infrarrojo (IR) e imágenes MOLA con relieve sombreado + color. Procesada con JMARS (Arizona State University Mars Scientific Software Team).



Fuente: NASA/ MOLA Team. Elaboración propia.

Luego de esta marcada desviación, el Canal Principal se divide en dos canales bien marcados, un canal Norte y un canal Sur, los cuales se denominarán para los propósitos de este texto, Kasei Valles Norte (KVN) y Kasei Valles Sur (KVS), cuyos cauces bordean una isla de 640 kilómetros de longitud, en forma de Diamante y orientada hacia la corriente, denominada Sacra Mensa (Figura 17).

Figura 17. Imagen del sector de Sacra Mensa en Kasei Valles, donde se observan los canales Kasei Valles Norte y Kasei Valles Sur. Imagen MOLA con relieve sombreado en dirección NE. Procesada con JMARS (Arizona State University Mars Scientific Software Team).



Fuente: NASA/ MOLA Team. Elaboración propia.

Las características fisiográficas del Planeta Marte y en especial de Kasei Valles, no hacen viable efectuar un análisis Geomorfológico y Morfométrico convencional. No es posible enmarcar los canales de Kasei Valles dentro de la unidad de análisis denominada cuenca, ya que su entorno corresponde a una penillanura sin divisorias topográficas diferenciables, no posee corrientes tributarias que permitan realizar análisis de simetría, disección o migración de canales, ni mucho menos de direcciones de flujo, ya que la diferencia de altura entre su lugar de origen en Echus Chasma y su confluencia con Chryse Planitia, es de 3 kilómetros en 1560 kilómetros recorridos, algo menos de 0.2 grados de pendiente. De igual manera, no se ha evidenciado ninguna forma de pluviosidad en el planeta, que favorezca la aparición de escorrentía superficial y los potenciales flujos subsuperficiales de agua en estado líquido aún están siendo estudiados, razón por la cual estos elementos no deben hacer parte de una ecuación geomorfológica, en el contexto analizado.

En los métodos geomorfológicos aplicados a la superficie del Planeta Tierra, para saber si un Valle se puede considerar como un Cañón, se ha propuesto aplicar el llamado índice de disección (Serrato, 2007). Este índice adimensional, se obtiene de dividir la profundidad del Valle sobre su ancho. Si dicho índice tiene un valor que oscila entre 0.17 y 2.86, el Valle será un Cañón. No obstante y en consecuencia de las características particulares de Marte, es preciso aclarar, que en contraste con lo anterior y de acuerdo con Carr (1986), el término "Cañón", como se aplica en el contexto del Planeta Marte, se refiere a geoformas que no constituyen redes de drenaje integradas, consistiendo depresiones segmentadas y con frecuencia cerradas, que muestran poca evidencia de la erosión por agua o sedimentación. Se infiere que estos Cañones han sido originados principalmente por la acción del tectonismo o subsidencia. El término "Canal" por el contrario, implica las características opuestas y a su vez, un origen debido a erosión por flujos de diversa naturaleza, concepto en el cual se enmarca Kasei Valles y el Canal Principal que lo origina.

7.1 GEOFORMAS PRESENTES EN KASEI VALLES

El abordar el estudio geomorfológico de Kasei Valles, supone un reto de importante envergadura, no solo por las dificultades antes expuestas que supone la interpretación del paisaje en un medio con características fisiográficas diferentes al Planeta Tierra, sino también por enfrentar paradojas como la Equifinalidad, que condicionan de manera importante la denominación que se le otorgue a cada morfología presente. Por esta razón, se hace fundamental la interpretación y el criterio geológico, basado en la experticia y soportado por la información proporcionada por las diversas misiones de exploración espacial, que han llegado a la órbita de Marte y recientemente hasta su superficie. El entorno de Kasei Valles, es completamente abundante en geoformas, cuya caracterización alentaría miles de investigaciones científicas y donde podría afirmarse, que se encuentran representados gran parte de los eventos que han delineado la historia geológica

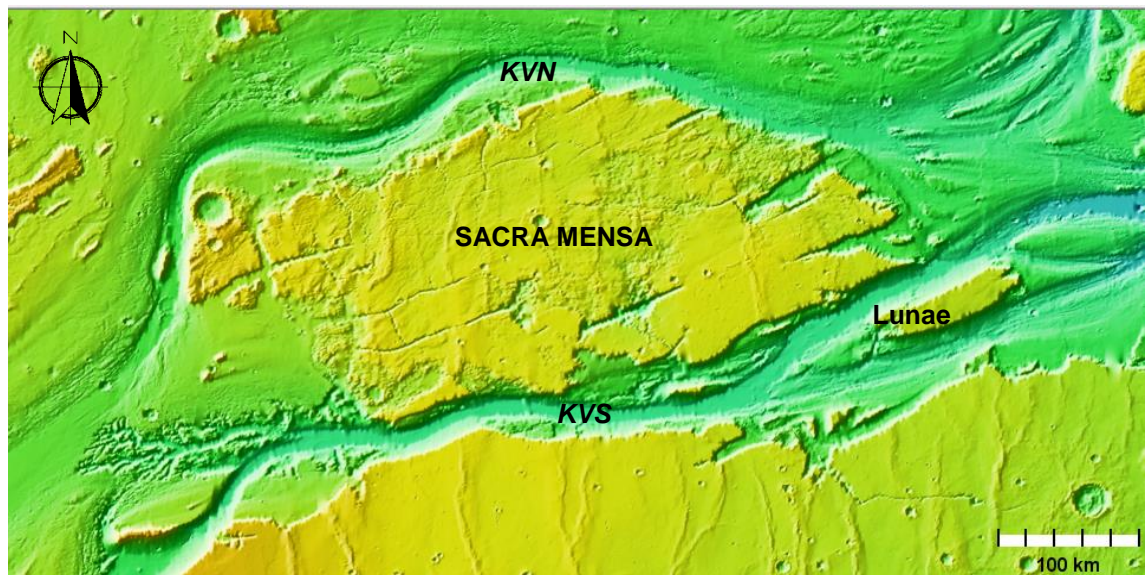
de Marte. Las geoformas más representativas, a la escala en que se ha realizado la presente investigación, son:

7.1.2 ISLAS FLUVIALES

Se denomina como Islas Fluviales en este trabajo, a aquellos elementos que se reconocen en las diferentes imágenes de Sensores Remotos, como formaciones resistentes a la erosión y no conformadas por sedimentos, ya sea tamaño limo, arcilla, arena o grava. Las islas fluviales en Marte se ubican en los pisos de canales de descarga (Outflow Channels), redes de valles, valles poco profundos, valles volcánicos y canales tectónicos (Hargitai, H., Gulick, V. y Glines, N., 2016). Son los elementos que más resaltan en el paisaje de Kasei Valles. Se presentan en forma de gota o Diamante y alineadas con la posible dirección de la corriente. Su extensión longitudinal es de cientos de kilómetros. Dada su gran área, al interior de estas geoformas se reconocen otro tipo de morfologías que corresponden tanto a eventos geológicos progresivos, como por ejemplo de carácter tectónico o acrecional, como a eventos de ocurrencia súbita, tales como impactos de meteoritos. En esta categoría se incluye:

7.1.2.1 Sacra Mensa. Sacra Mensa es una de las geoformas más prominentes de Kasei Valles. Esta Isla Fluvial con más de 600 kilómetros de largo y 250 kilómetros de ancho, está circundada por los canales Kasei Valles Norte y Kasei Valles Sur (Figura 18). En su interior se observan Cráteres de Impacto, Canales lineales, y Plegamientos Tectónicos.

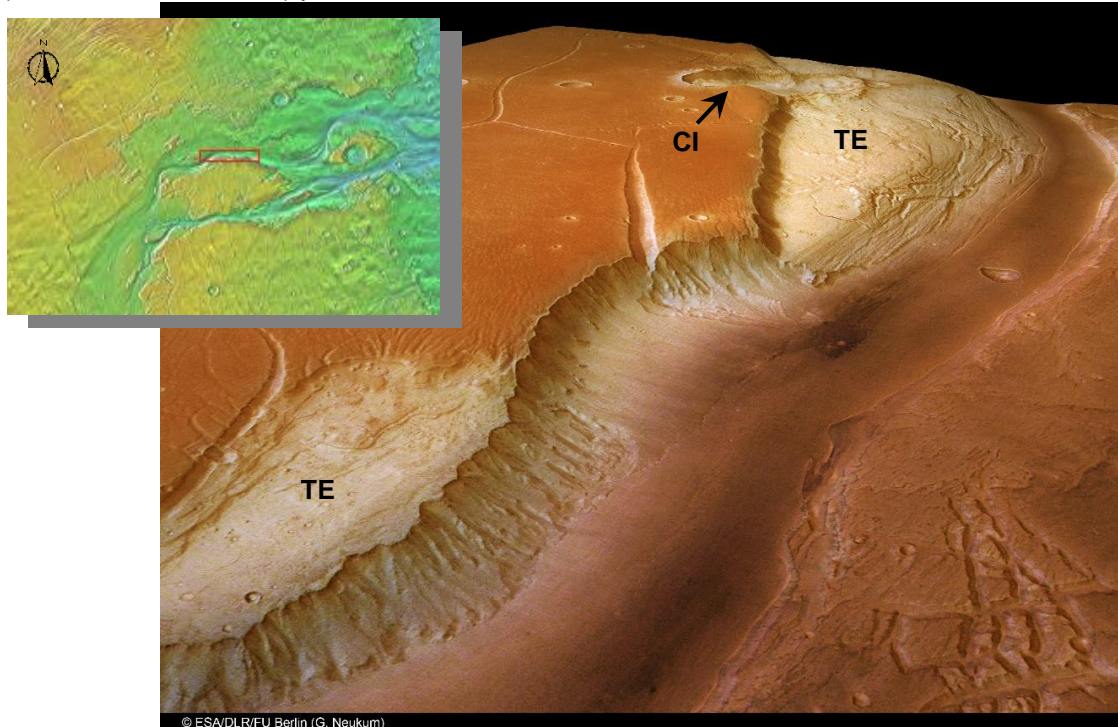
Figura 18. Zona de Sacra Mensa, ilustrada mediante una imagen MOLA con relieve sombreado + color. KVN: Kasei Valles Norte. KVS: Kasei Valles Sur. Procesada con JMARS (Arizona State University Mars Scientific Software Team).



Fuente: NASA/MOLA Team. Elaboración propia.

Posee evidencias de su resistencia a la erosión, ya que el fluido que modeló esta geoforma, el cual ha sido catalogado como de edad Amazoniana por varios autores, conformó terrazas por erosión diferencial debido a las diferencias de competencia de las rocas que encontró a su paso, así como el grado de fracturamiento de la superficie (Figura 19).

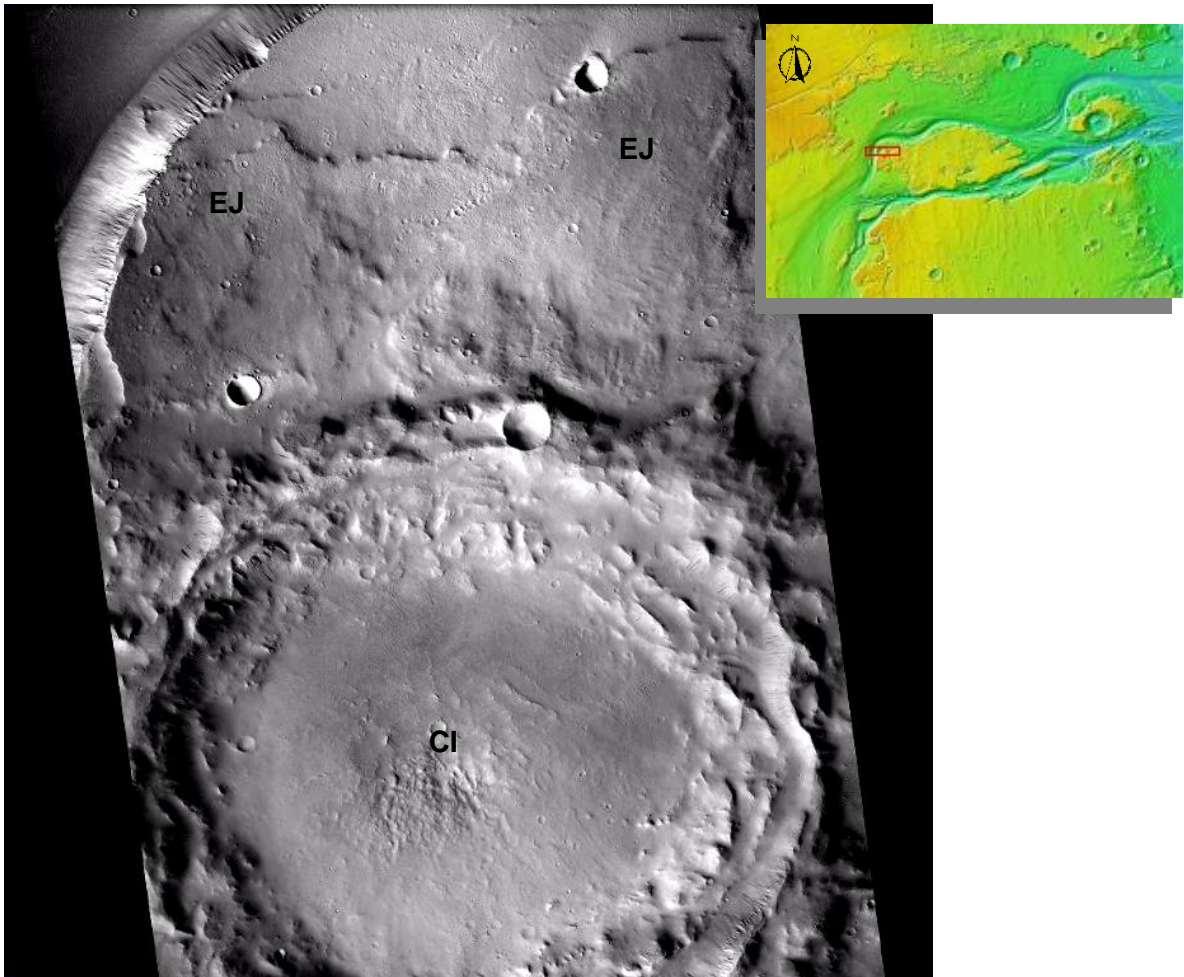
Figura 19. Imagen HRSC, que muestra una perspectiva, con vista hacia el Oeste, del sector norte de la Isla Fluvial de Sacra Mensa, donde se observan Terrazas Erosionales (TE), debido a erosión diferencial. En la imagen se observa además, la erosión de los Cráteres de Impacto (CI) y su material de eyecta. Imagen de contexto procesada con JMARS (Arizona State University Mars Scientific Software Team), mediante composición de imágenes THEMIS Day IR (Christensen et al, 2006) y MOLA.



Fuentes: Imagen HRSC ESA/DLR/FU Berlin (G.Neukum). Imagen de Contexto ASU/NASA/MOLA (Elaboración propia).

Varias evidencias conducen a concluir, que Sacra Mensa no es una Isla formada por procesos de sedimentación. Una de las principales razones, es su similitud cronoestratigráfica con Lunae Planum, con edades cercanas a los 3.500 millones de años, correspondientes al Hesperiano Temprano (Tanaka-USGS, 2014). Así mismo, el corte de los canales lineales presentes y la erosión del material de eyecta de los cráteres de impacto que se encuentran en su sector proximal, indica que estos eventos afectaron las formaciones geológicas allí presentes, antes de la formación del canal (Figura 20). Esta conclusión es soportada por investigaciones recientes efectuadas por Hargitai, Gluick y Glines (2016), donde se afirma que las islas fluviales son herramientas para la investigación de los orígenes de los paleocanales y las condiciones de flujo en Marte.

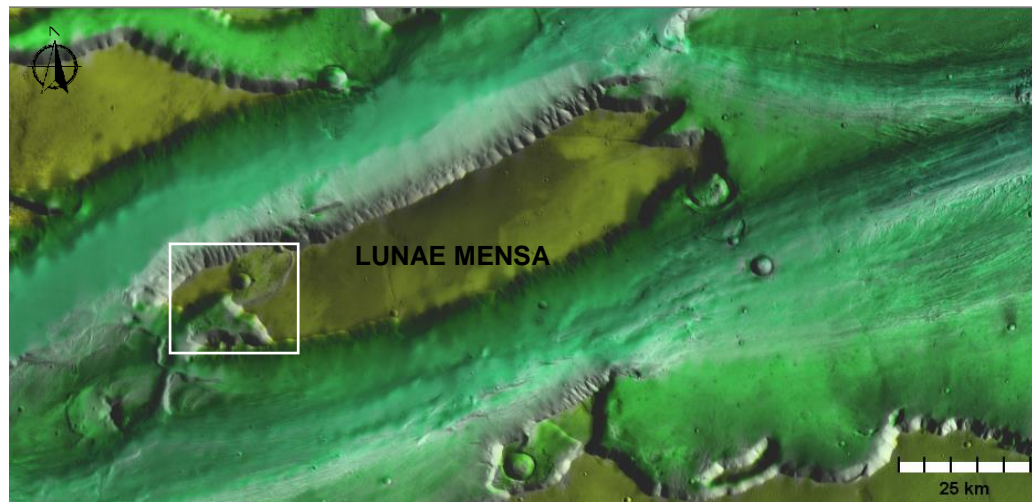
Figura 20. Imagen Pancromática CTX No P13_006256_2034_XN_23N072, obtenida por el Mars Reconnaissance Orbiter (MRO), donde se aprecia el material de Ejecta (EJ) de un Cráter de Impacto (CI) de 28 kilómetros de diámetro en la Isla Sacra Mensa, que ha sido erosionado por el flujo que modeló a KVN.



Fuente de la imagen CTX: NASA/Arizona State University. Procesada mediante ERDAS 11 (Elaboración propia). Imagen de contexto procesada con JMARS (Arizona State University Mars Scientific Software Team). Fuente: NASA/MOLA Team. Elaboración propia.

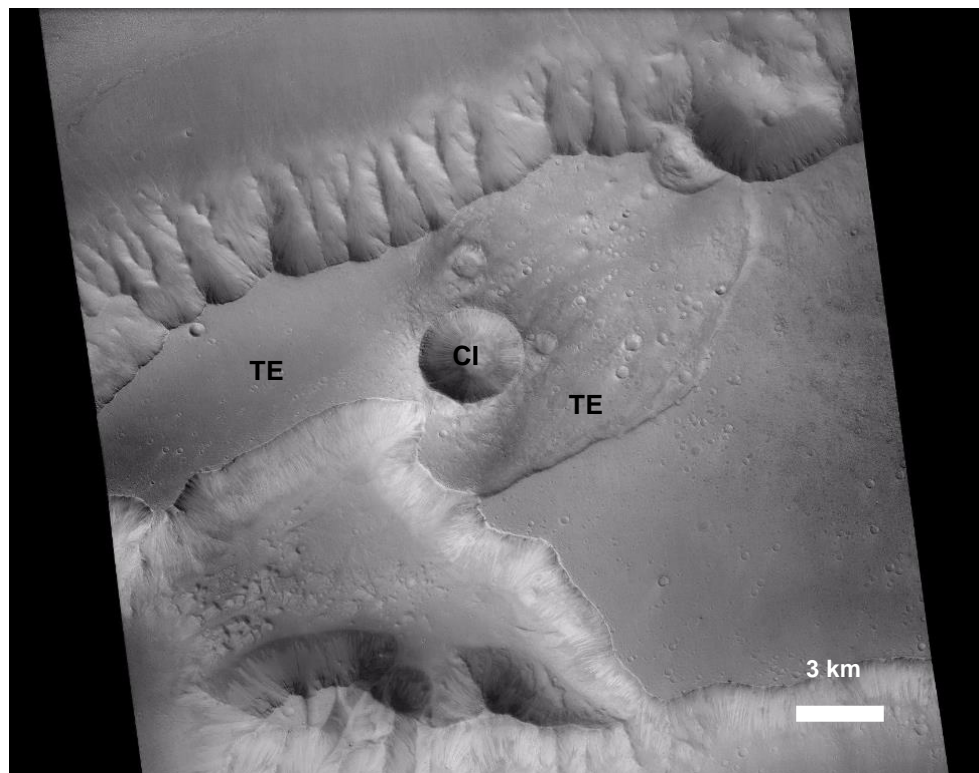
7.1.2.2 Lunae Mensa. Isla Fluvial localizada al Este de Sacra Mensa, en inmediaciones de Kasei Valles Sur. Posee 110 kilómetros de longitud y 24 kilómetros de ancho (Figura 21). Comparte las mismas características cronoestratigráficas de Sacra Mensa y Lunae Planum, por lo que se deduce que sus mecanismos de formación son similares a los que actuaron en el modelado de Sacra Mensa. En esta geoforma, se observan Cráteres de Impacto y Terrazas de Erosión (Figura 22), que indican que los materiales que la conforman, son resistentes a la acción hidrodinámica de flujos con alta capacidad erosiva.

Figura 21. Composición de imágenes THEMIS Day IR (Christensen et al, 2006) e imágenes MOLA con relieve sombreado + color, donde se aprecia la Isla Fluvial de Lunae Mensa. El cuadro indica la escena de la figura 18.



Fuente: NASA/Arizona State University. Imagen procesada con JMARS (Arizona State University Mars Scientific Software Team). Elaboración propia.

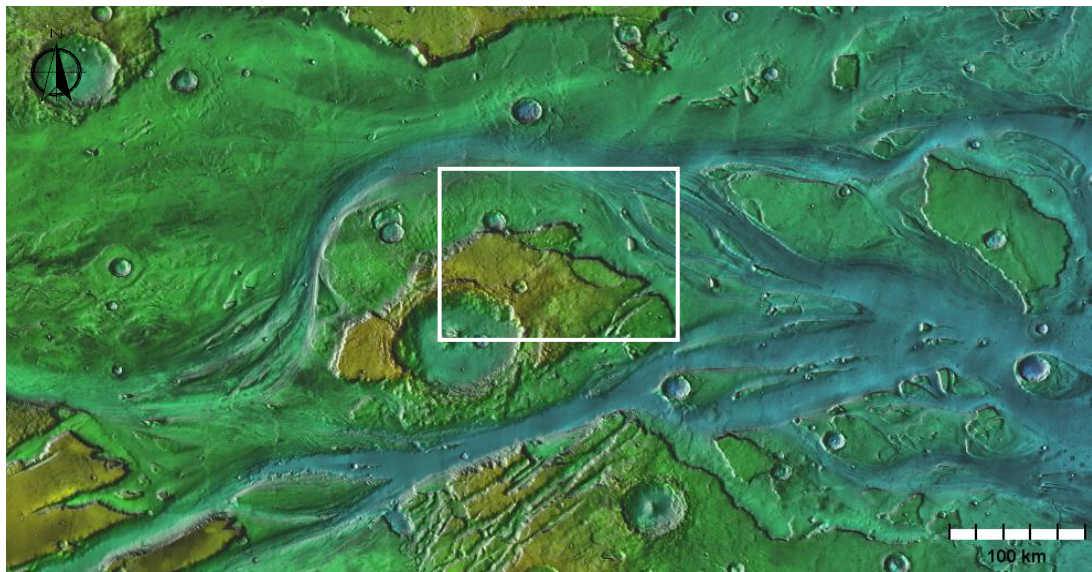
Figura 22. Imagen Pancromática CTX No P11_005214_2038_XN_23N063W, en la cual es posible observar un Cráter de Impacto (CI) de 3.3 kilómetros de diámetro, en una Terraza Erosional (TE), acompañado de cráteres de menor diámetro.)



Fuente de la imagen: NASA/Arizona State University. Elaboración propia mediante ERDAS 11.

7.1.2.3 Isla Fluvial del Cráter Sharonov. En el modelado de esta geoforma de 350 kilómetros de longitud y 210 kilómetros de ancho, las imágenes de Sensores Remotos hacen posible distinguir la participación de dos eventos de gran magnitud e intensidad. En primera instancia, el impacto de un meteorito en un área con características litológicas y texturales similares a Sacra Mensa y Lunae Planum, dejó un Cráter de Impacto de 95 kilómetros de diámetro, así como sus consecuentes depósitos de ejecta. Posteriormente, eventos de descarga en los que participó un fluido con alta capacidad erosiva, modelaron el lugar hasta conformar su actual morfología (Figura 23). Esta observación efectuada en la presente investigación, es confirmada por Eugene F. Milone et al. (2014), donde por medio de análisis de un mosaico Mars Odyssey, afirma que flujos masivos pasaron tanto al norte como al sur de Sharonov, creando rasgos típicos de flujos e islas en forma de gota.

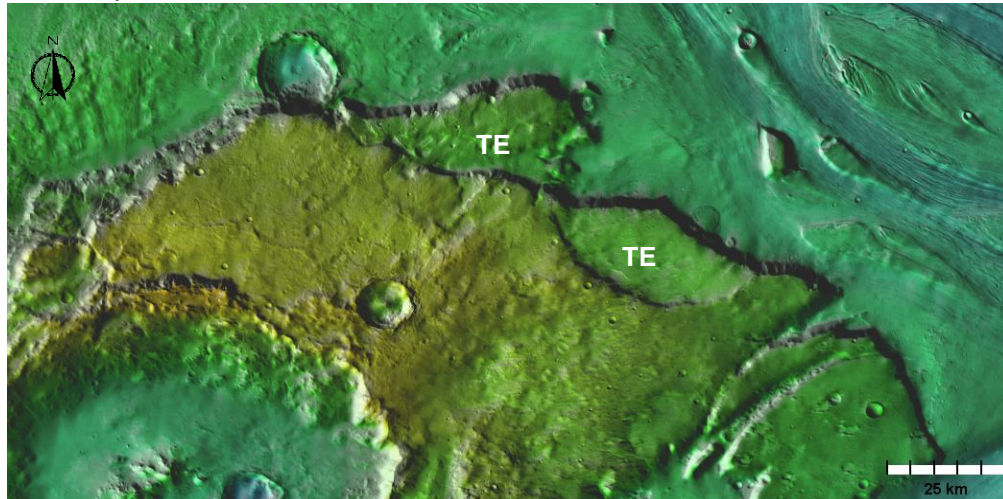
Figura 23. Isla del Cráter de Impacto Sharonov, detallada mediante una composición de imágenes THEMIS Day IR (Christensen et al, 2006) e imágenes MOLA con relieve sombreado + color. El cuadro indica el área de escena de la figura 20.



Fuente: ASU. Imágenes procesadas con JMARS (Arizona State University Mars Scientific Software Team). Elaboración propia

Posee una forma disímil a las demás Islas Fluviales observadas en Kasei Valles, pues su geometría en vista de planta, se acerca más a la circularidad que a la elongación en forma de gota. Esta situación se explica debido a que los depósitos de ejecta expulsados durante el impacto meteórico, pudieron obligar la modificación de la ruta del flujo que modeló los canales, aunque finalmente fueron erosionados por la corriente. De igual manera, no se descarta un control de estructuras tectónicas, que hayan obligado al desvío del curso del flujo, el cual regresó posteriormente a su curso ideal para alcanzar el nivel base. Al interior de esta Isla, se aprecian Cráteres de Impacto de menor tamaño al Cráter Sharonov, así como Terrazas de Erosión (Figura 24).

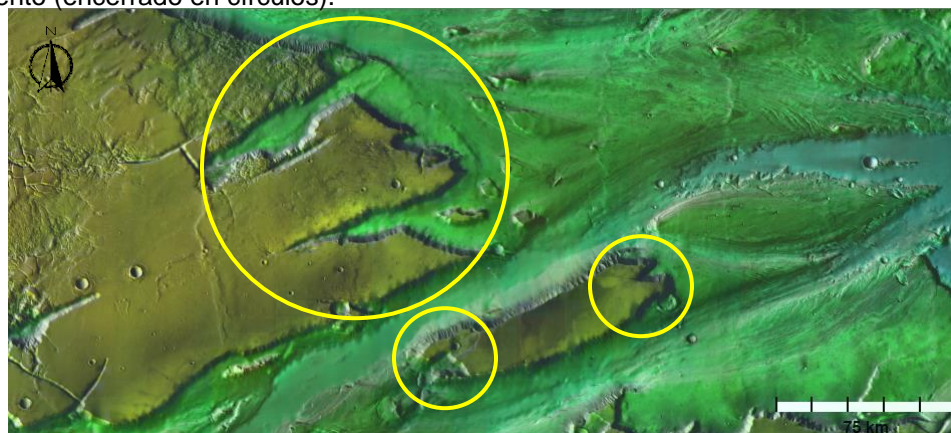
Figura 24. Imagen del sector norte de la Isla Fluvial de Sharonov, en una composición de imágenes THEMIS Day IR (Christensen et al, 2006) e imágenes MOLA con relieve sombreado + color. Se detallan Terrazas de Erosión (TE) y Cráteres de Impacto que fluctúan entre decenas de kilómetros y centenas de metros.



Fuente: ASU. Procesadas con JMARS (Arizona State University Mars Scientific Software Team). Elaboración propia

Se observa que todas las Islas Fluviales de Kasei Valles descritas anteriormente, poseen tanto en su cola proximal (localizada a barlovento), como en su cola distal (sotavento), distintivos rasgos de erosión ocasionada por el comportamiento hidrodinámico de flujos turbulentos con alta capacidad erosiva. Estos dejan como evidencia de su acción, incisiones profundas en las formaciones, cuya vista en planta recuerda a la morfología de los Fiordos, aunque con diferente geomorfogénesis (Figura 25).

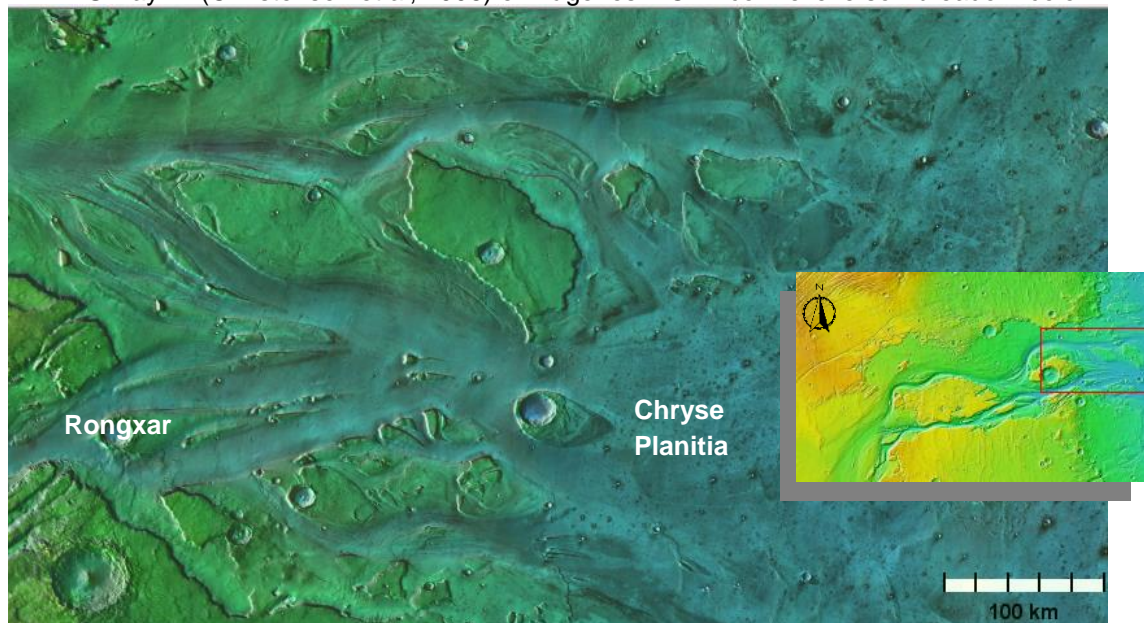
Figura 25. Detalle de las Islas Fluviales Sacra Mensa y Lunae Mensa, en composición de imágenes THEMIS Day IR e imágenes MOLA con relieve sombreado + color. Puede observarse los efectos hidrodinámicos de los flujos turbulentos, que causan erosión a barlovento y sotavento (encerrado en círculos).



Fuente: ASU. Imágenes procesadas con JMARS (Arizona State University Mars Scientific Software Team). Elaboración propia.

7.1.2.3 Conjunto de Islas Fluviales de Rongxar - Chryse Planitia. Este conjunto de Islas Fluviales, se encuentra localizado al Este de la Isla Fluvial del Cráter Sharonov, cerca de la confluencia de Kasei Valles con Chryse Planitia. Poseen longitudes que fluctúan desde decenas hasta una centena de kilómetros. En ellas se observan muy marcados los efectos de la erosión por flujos y se presentan en forma de gota o Diamante, orientadas hacia la corriente. De acuerdo a Tanaka (2014), la edad de las unidades geológicas que las conforman, fluctúan entre el Noachiano – Hesperiano – Amazoniano y a ninguna de ellas se le atribuye origen fluvial (Figura 26). En este conjunto de Islas, son fácilmente diferenciables Cráteres de Impacto, tal como el cráter Rongxar, así como Terrazas de Erosión.

Figura 26. Conjunto de Islas Fluviales Rongxar – Chryse Planitia. Composición de imágenes THEMIS Day IR (Christensen et al, 2006) e imágenes MOLA con relieve sombreado + color.



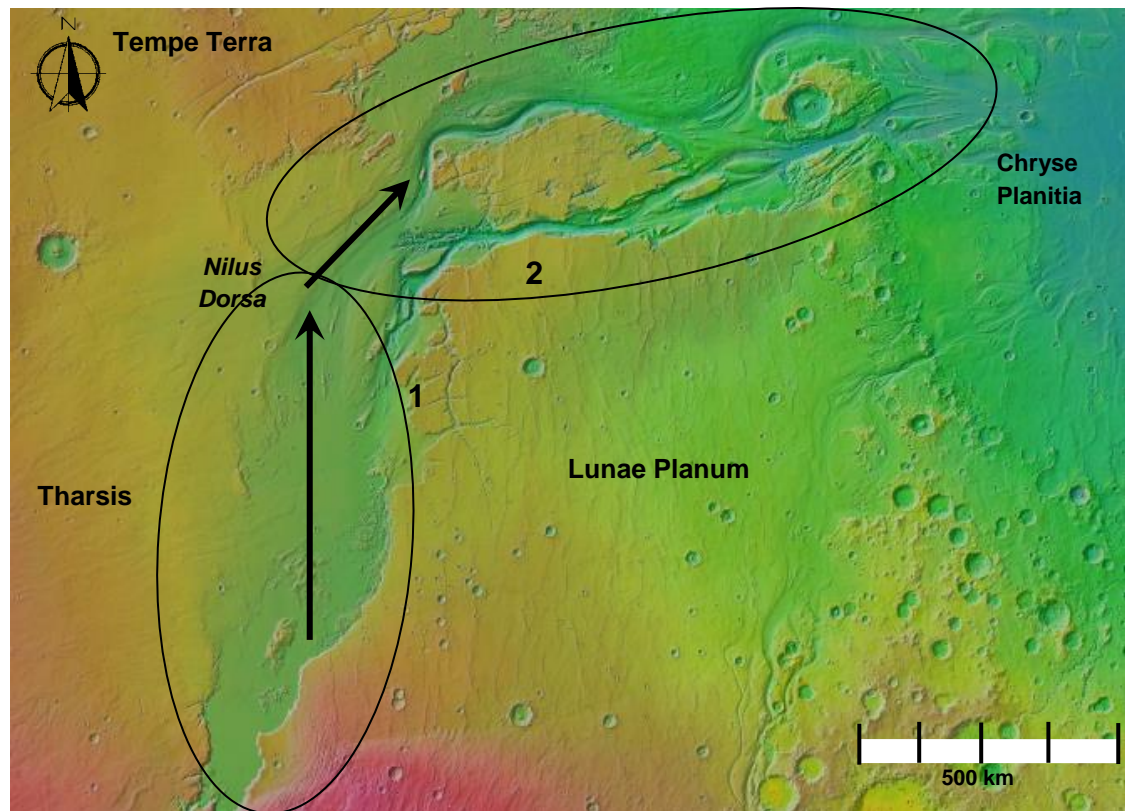
Fuente: ASU. Imágenes procesadas con JMARS (Arizona State University Mars Scientific Software Team). Elaboración propia. Fuente imagen de contexto: NASA/MOLA Team procesada con JMARS (Arizona State University Mars Scientific Software Team). Elaboración propia.

7.1.2 CANALES

Kasei Valles posee el conjunto de canales de descarga (Outflow Channels), más grande de todo el planeta Marte. Diversos autores, defensores de la teoría que sustenta su formación por flujos de agua líquida, han calculado para Kasei Valles un rango de descarga acuosa de 10^8 a 10^9 m³/seg, en contraste con los 1.5×10^5 m³/seg para el río Amazonas (Robinson & Tanaka, 1990), casi siete mil veces su caudal. Los canales de Kasei Valles, alcanzan los 300 kilómetros de ancho en su lugar de máxima amplitud y separan la Provincia de Lunae Planum de la Provincia volcánica de Tharsis y la Provincia tectónica de Tempe Terra.

En Kasei Valles, son fácilmente diferenciables dos unidades de canales. Una primera unidad, con un gran Canal Principal proveniente desde su origen en Echus Chasma, cerca de los cero grados de latitud y la segunda unidad, diferenciable desde los 17 grados de latitud Norte aproximadamente (donde se aprecia la división del Canal Principal en dos canales secundarios, así como una fuerte inflexión a 20 grados de latitud Norte, en el sector de Nilus Dorsa, donde modifica su rumbo hacia el Noreste), hasta la desembocadura en Chryse Planitia (Figura 27).

Figura 27. Composición de imágenes MOLA + relieve sombreado, con imágenes TES Thermal Inertia (Christensen, 2006), para el sector de Lunae Palus. Se observa las tendencias principales de las unidades de canales diferenciables en Kasei Valles. La unidad uno (1), desde su origen en Echus Chasma con una dirección cercana al rumbo Sur – Norte. La unidad dos (2), desde la inflexión hacia el Noreste en el sector de Nilus Dorsa, hasta Chryse Planitia



Fuente: NASA/ MOLA Team. Procesada con Arc Gis 10.2 (ESRI) y JMARS (Arizona State University Mars Scientific Software Team). Elaboración propia.

A lo largo de los canales, son observables gran cantidad de geformas e indicadores de diferentes procesos geológicos, que participaron en el modelado de estos gigantescos canales. Cráteres de Impacto, Complejos de Cataratas, Valles Colgantes, Terrazas de Erosión, Flujos de Lava, Crestas Longitudinales y Valles por Excavación (Sapping Valleys), son algunos de los rasgos que se evidencian mediante Sensores Remotos.

7.1.2.1 Cráteres de Impacto. Estas geofomas imperantes en la fisiografía de Marte, no son la excepción en toda el área de Kasei Valles. Con las imágenes logradas por los diferentes programas de exploración del planeta, es posible detectar miles de Cráteres de Impacto, con diámetros que varían desde decenas de metros hasta decenas de kilómetros.

De acuerdo con Koeberl, C. (2002): Los cráteres de impacto se forman cuando un gran meteorito se estrella en un cuerpo planetario más grande que tiene una superficie sólida. La clave para entender la naturaleza explosiva de un evento de impacto, es la alta velocidad con que un meteorito golpea la Tierra. Estas velocidades varían entre 11,2 kilómetros por segundo (la velocidad de escape del sistema Tierra-Luna) y 72 kilómetros por segundo (la velocidad orbital de la Tierra, más la velocidad de escape del sistema solar a la distancia de la Tierra al Sol). Debido a que la energía cinética liberada por el impacto de un objeto es proporcional al cuadrado de su velocidad, estos meteoritos de alta velocidad pueden ser, gramo por gramo, hasta 100 veces más explosivos que la Dinamita.

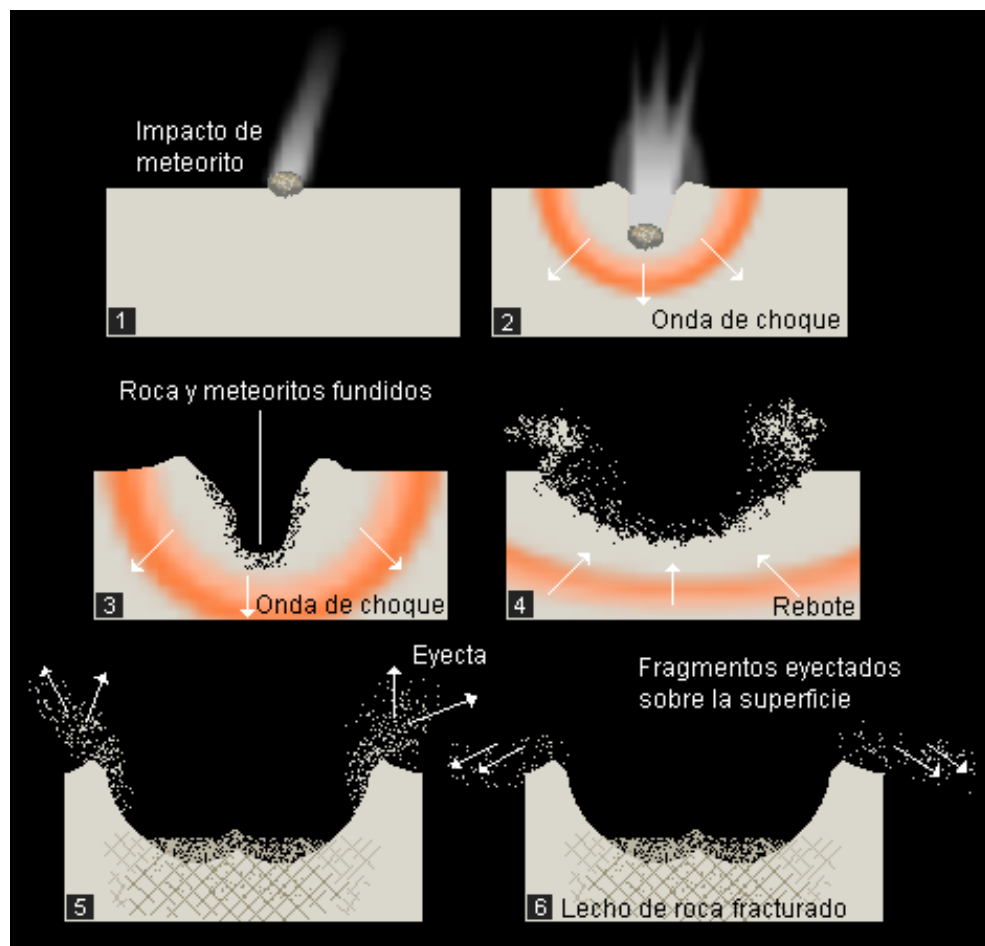
Todos los cuerpos en nuestro sistema solar han sido fuertemente bombardeados por meteoritos a lo largo de su historia. Los paisajes de la Luna, Marte y Mercurio han conservado notablemente este registro de bombardeo, porque las superficies de estos relativamente pequeños cuerpos planetarios se han mantenido sin cambios durante cientos de millones de años.

Este evento solo se consigue con proyectiles de gran tamaño, que no son detenidos o destruidos por la fricción de la atmósfera. Koeberl, C. (2002), afirma que la formación de un cráter de impacto puede ser resumida de la siguiente manera:

En primer lugar, un cuerpo extraterrestre relativamente pequeño, con un tamaño suficiente para no ser detenido por la fricción de la atmósfera, viajando a una velocidad de varias decenas de kilómetros por segundo, golpea la superficie, marcando el comienzo del contacto y la etapa de compresión. Casi inmediatamente, una pequeña cantidad de material es expulsado del lugar del impacto durante un proceso llamado eyección con velocidades que pueden acercarse a aproximadamente a la mitad de la velocidad de impacto. El material de Ejecta es fuertemente contaminado con material del proyectil. Cuando este proyectil impacta la superficie, una onda de choque se propaga de forma concéntrica en el suelo. Debido a que las presiones en las ondas de choque son tan altas, la liberación de la presión (descompresión) resulta en la fusión casi instantánea y vaporización del proyectil y grandes cantidades de rocas de la superficie impactada. Los resultados de la interacción de la onda de choque con la materia, se puede observar en diversas formas de minerales y rocas alcanzadas por el choque, las cuales se originan durante la etapa de contacto (o compresión), que dura sólo hasta unos pocos segundos, incluso para grandes impactos.

Después del paso de la onda de choque, la alta presión es liberada por una onda denominada de rebote o liberación, que sigue al frente de choque. La onda expansiva, es una onda de presión, no una onda de choque, y viaja a la velocidad del sonido en el material impactado. La onda de rebote, conduce a la creación de un flujo de masa, que abre un cráter, marcando el comienzo de la fase de excavación. El exceso de calor se refleja en el material descomprimido, que puede resultar en cambios de fase (por ejemplo, fusión o vaporización). El cráter es entonces formado en esta etapa. En las capas superiores del objetivo, el material se mueve principalmente hacia arriba y hacia fuera, mientras que en los niveles más bajos, el material se mueve principalmente hacia abajo y hacia el exterior, lo que resulta en una depresión en forma de cuenco, denominada "cavidad transitoria". Esta cavidad puede crecer en tamaño, siempre y cuando las ondas de choque y de liberación tengan la suficiente energía para excavar el material desde el lugar de impacto. (Figura 28).

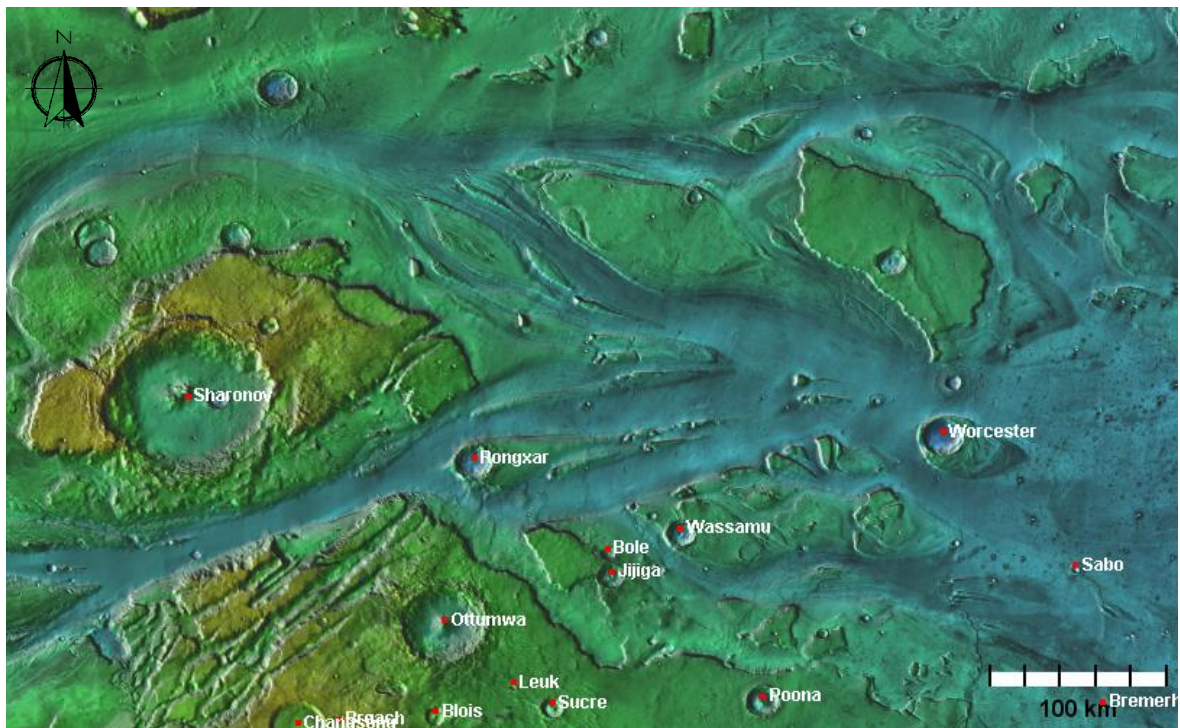
Figura 28. Esquema simplificado de las etapas de formación de un Cráter de Impacto.



Fuente: Benítez (2007).

Cráteres de Impacto con diversos diámetros, pueden ser localizados al interior de las Islas Fluviales, dentro de los canales de Kasei Valles, en las márgenes, e incluso formando ellos mismos Islas Fluviales, tal como es el caso de los Cráteres Sharonov, Rongxar, Worcester y otros sin nomenclatura oficial de la IAU (Figura 29).

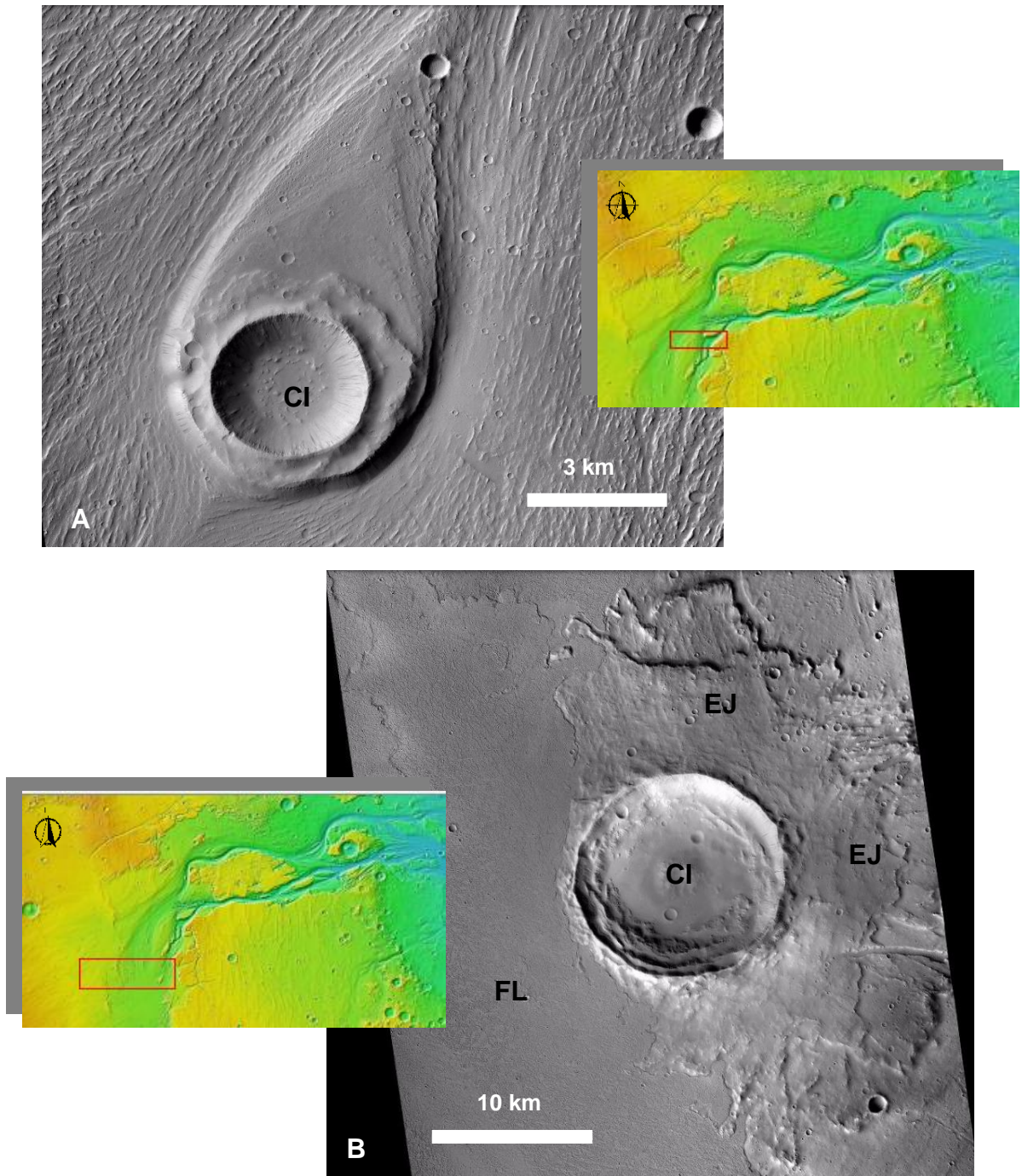
Figura 29. Grupo de Cráteres de Impacto, cerca de la confluencia de Kasei Valles y Chryse Planitia. Algunas de estas estructuras se transformaron en Islas Fluviales, debido a los procesos hidrodinámicos en el canal.



Fuente: Arizona State University. Composición de imágenes THEMIS Day IR (Christensen, 2006) y MOLA (NASA/MOLA Team), procesadas con JMARS (Arizona State University Mars Scientific Software Team). Fuente: Elaboración propia.

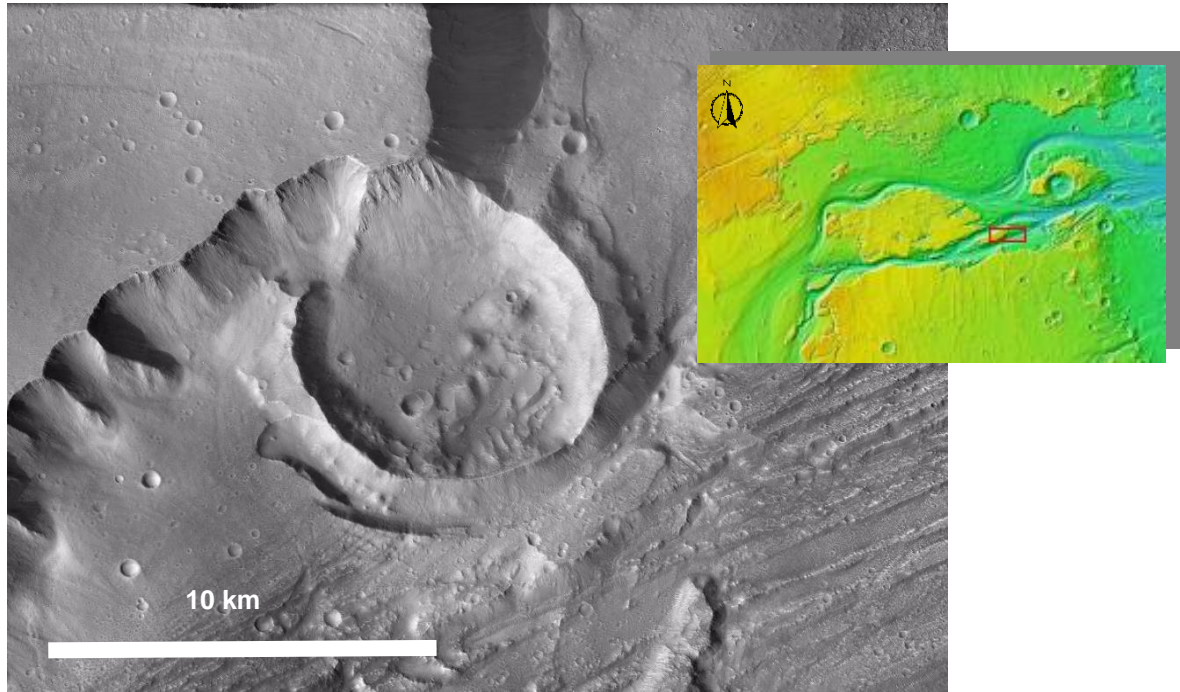
Los Cráteres de Impacto han sido punto de referencia fundamental, para esclarecer la Cronoestratigrafía de Marte. La observación del grado de conservación o ausencia del cuerpo de la propia estructura del cráter, de los depósitos de Ejecta que los acompañan, si estos se encuentran intactos o afectados por erosión o depósitos de material de diversos orígenes, así como la relación cronológica de las superficies impactadas, son una ingeniosa e importante herramienta que ha sido utilizada para los levantamientos de cartografía geológica a nivel global, así como para la reconstrucción de la geomorfogénesis de diversas zonas del planeta. Es posible observar varios ejemplos de Cráteres de Impacto y sus depósitos de Ejecta, en los canales de Kasei Valles (Figuras 30 y 31).

Figura 30. A) Imagen Pancromática CTX No B21_017965_2004_XI_20N074W, en la cual se observa un Cráter de Impacto (CI) de 6 kilómetros de diámetro, transformado en una Isla Fluvial, acompañado de cráteres de menor diámetro. B) Imagen Pancromática CTX No G11_022633_1968_XI_16N079W, donde puede apreciarse un Cráter de Impacto (CI) de 13 kilómetros de diámetro, con su depósito de Ejecta (EJ) parcialmente cubierto por un flujo de Lava (FL).



Fuente: NASA/ASU. Procesada mediante ERDAS 11 (Elaboración propia).

Figura 31. Cráter de Impacto al este de Lunae Mensa, con un diámetro de 7.7 kilómetros, cubierto parcialmente por depósitos de pendiente. Su material de Ejecta ha sido erosionado por los eventos hidrodinámicos que han entallado el canal KVS. Imagen Pancromática CTX No B06_011912_2043_XI_24N061W.



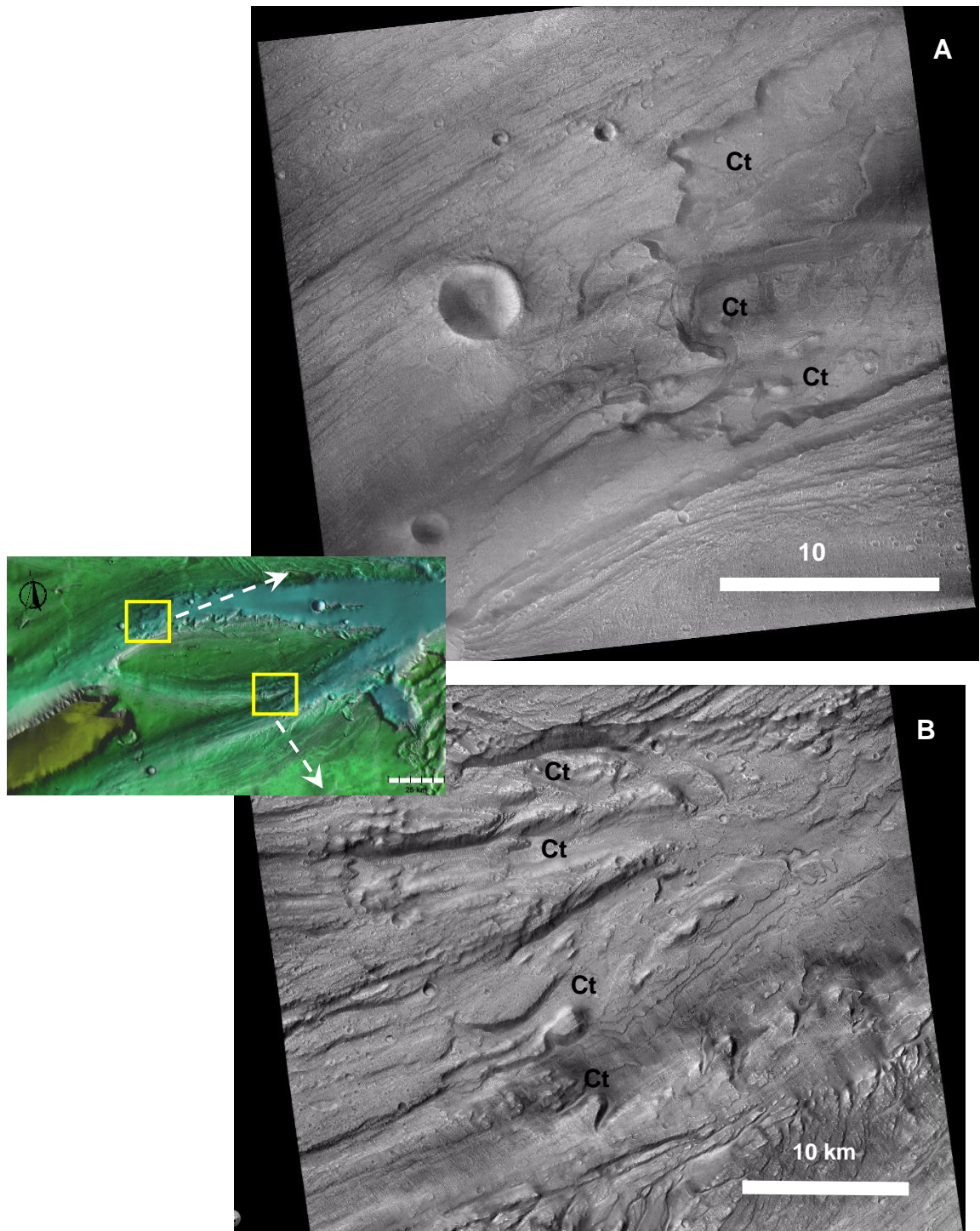
Fuente: NASA/Arizona State University. Procesada mediante ERDAS 11. Elaboración propia.
Fuente imagen de contexto: NASA/MOLA Team. Procesada con JMARS (Arizona State University Mars Scientific Software Team). Elaboración propia.

7.1.2.2 Complejos de Cataratas. En Kasei Valles existen complejos de Cataratas o caídas de agua, con alturas que alcanzan los centenares de metros. Las más sobresalientes se localizan en los canales Kasei Valles Sur y Kasei Valles Norte, pudiendo estar asociadas tanto a la acción hidrodinámica de fluidos en rocas de diferente competencia, como a desniveles tectónicos que afectan a las unidades geológicas.

Este tipo de rasgos, algunos de los cuales se confunden fácilmente con el fondo de los canales, pueden apreciarse mediante el uso de imágenes de alta resolución, tales como las imágenes obtenidas por los sensores CTX y HiRISE a bordo del Mars Reconnaissance Orbiter.

El principal Complejo de Cascadas en Kasei Valles, se encuentra en el sector Este de Lunae Mensa, brazo Sur de Kasei Valles. Allí existen estructuras de hasta 600 metros de altura y 14 kilómetros de ancho en promedio. Geformas similares se replican 50 kilómetros hacia el Sureste, al lado opuesto de esta Isla Fluvial, en el brazo adventicio de Kasei Valles Sur (Figura 32).

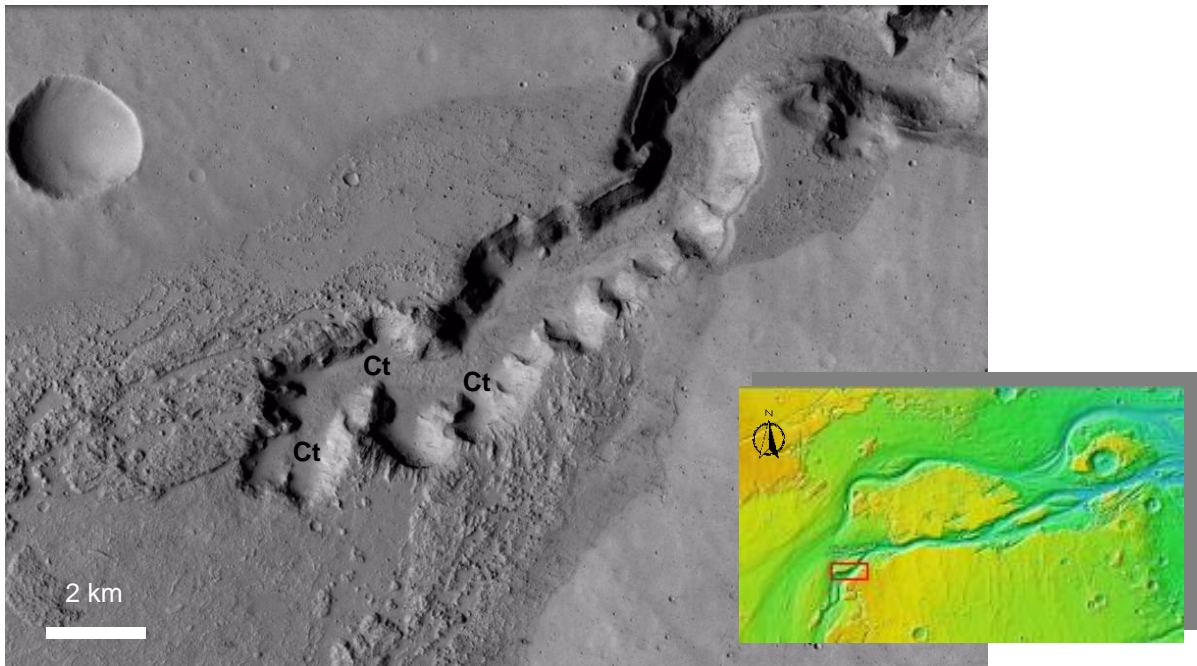
Figura 32. Complejos de Cataratas (Ct) en el área de Lunae Mensa. A) Imagen Pancromática CTX No B08_012690_2052_XN_25N061W. B) Imagen Pancromática CTX No G21_026430_2046_XN_24N060W.



Fuente: NASA/Arizona State University. Procesada mediante ERDAS 11. Fuente imagen de contexto: NASA/THEMIS (Christensen 2006). Procesada con JMARS (Arizona State University Mars Scientific Software Team). Elaboración propia.

Los Complejos de Cataratas se presentan en diferentes estados de evolución, determinados por su amplitud, profundización del cauce y erosión. Por lo anterior, también se hallan caídas de agua de menores dimensiones, tal como la existente al inicio de Kasei Valles Sur, con 150 metros de altura y 1 kilómetro de ancho, que parece haber sido modelada por una corriente joven (Figura 33).

Figura 33. Catarata al inicio de Kasei Valles Sur, posiblemente elaboradas por la acción hidrodinámica de una corriente joven. Imagen Pancromática CTX No P03_002287_2005_XI_20N072W.

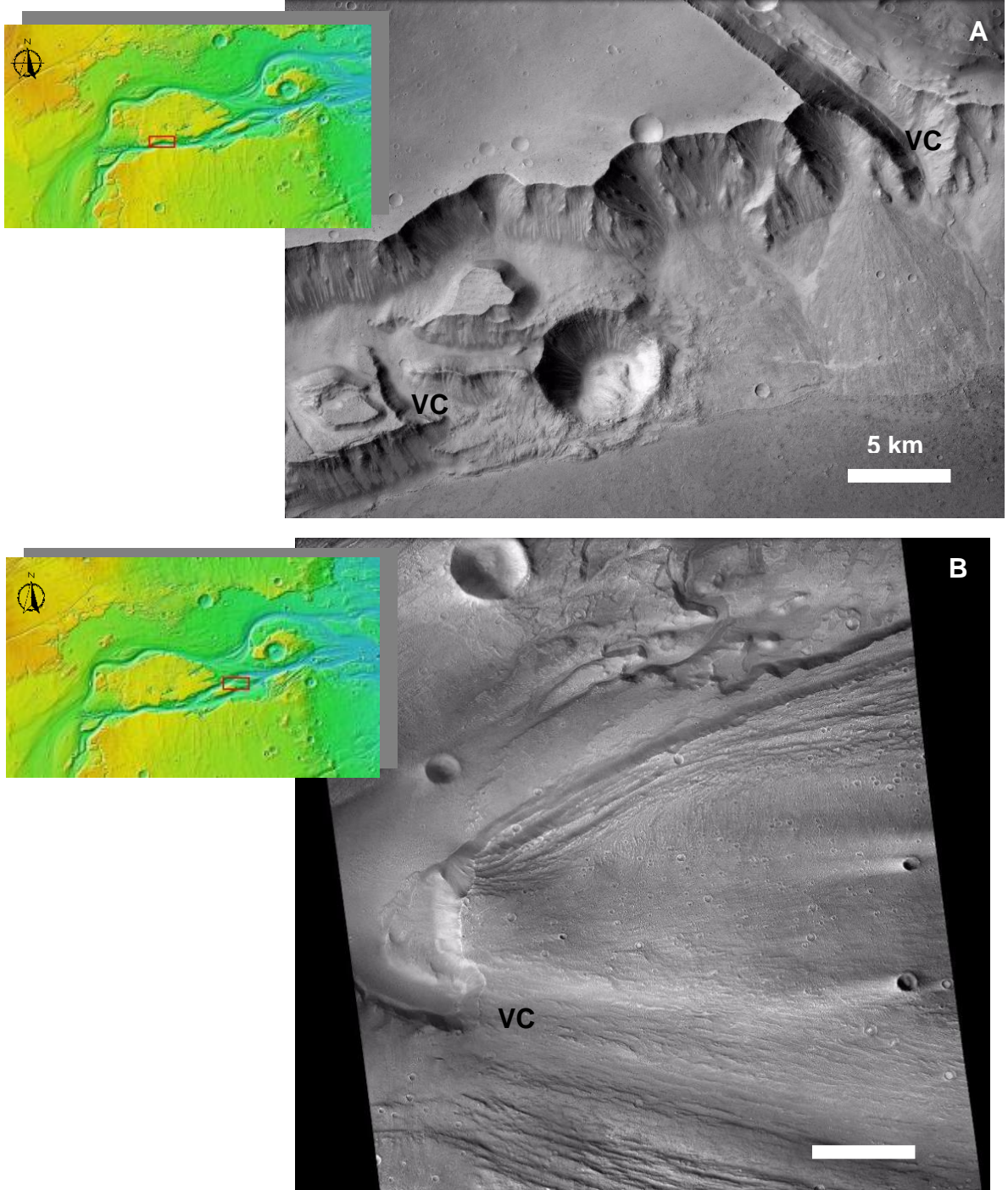


Fuente: NASA/Arizona State University. Procesada mediante ERDAS 11. Elaboración propia.
Fuente imagen de contexto: NASA/MOLA Team. Procesada con JMARS (Arizona State University Mars Scientific Software Team). Elaboración propia.

7.1.2.3 Valles Colgantes. En la geomorfología terrestre, este término se ha otorgado generalmente a valles suspendidos, generados por el desplazamiento de Glaciares, aunque no parece ser el caso de los presentes en Kasei Valles.

Dados los indicios hallados en el área de interés en las imágenes de sensores remotos, esta particular geoforma fue originada cuando un flujo con alta capacidad erosiva, cortó el Thalweg de un canal preexistente, ocasionando que el canal antiguo quedara en una cota topográfica superior, debido a la profundización del lecho, por parte del más reciente. Ejemplos de esta morfología, se encuentran en las zonas de Sacra Mensa y Lunae Mensa, asociados al canal Kasei Valles Sur, debido a su mayor profundidad. Estas evidencias dan cuenta de la circulación de fluidos de carácter Newtoniano, con alta capacidad erosiva hacia la parte media de Kasei Valles, tal como se observa en la figura 34.

Figura 34. Imágenes CTX Pancromáticas, donde se observan dos ejemplos de Valles Colgantes en Kasei Valles Sur. A) Imagen No P18_008194_2048_XN_24N069W. Dos Valles Colgantes (VC) en Sacra Mensa. B) Imagen No F09_039274_2051_XN_25N061W. Valle Colgante (VC) en un sector aledaño a Lunae Mensa.



Fuente: NASA/Arizona State University. Procesadas mediante ERDAS 11 (Elaboración propia).
Fuente imágenes de contexto: NASA/MOLA Team. Procesadas con JMARS. Elaboración propia.

7.1.2.4 Terrazas de Erosión. En la geomorfología de Kasei Valles, se reconocen claramente dos unidades de Terrazas de Erosión, relacionadas cada una con los canales Kasei Valles Norte y Kasei Valles Sur. Se constituyen en la huella que han dejado los agentes modeladores de los canales y fueron generadas debido a la acción hidrodinámica de los flujos, sobre rocas con diferentes competencias y diverso grado de fracturamiento (Figura 35).

Son indicadores importantes, para determinar los potenciales volúmenes de fluidos y material, que alguna vez se desplazaron por los canales e incluso para estimar vectores de trayectoria y velocidades.

Las Terrazas de Erosión del sector Norte, son relacionadas con el canal Kasei Valles Norte. Según las evidencias halladas en las diferentes imágenes, parecen haber sido modeladas por casi la totalidad del flujo que se desplazaba por el Canal Principal, proveniente de Echus Chasma, el cual fue desviado por una barrera Tectónica en el sector de Nilus Dorsa y Uranus Dorsum. La alta velocidad que conservaba el flujo en su hasta entonces, desplazamiento rectilíneo, fue disminuida de manera violenta por las unidades geológicas de la Provincia tectónica de Tempe Terra, que fueron afectadas en gran magnitud por los flujos.

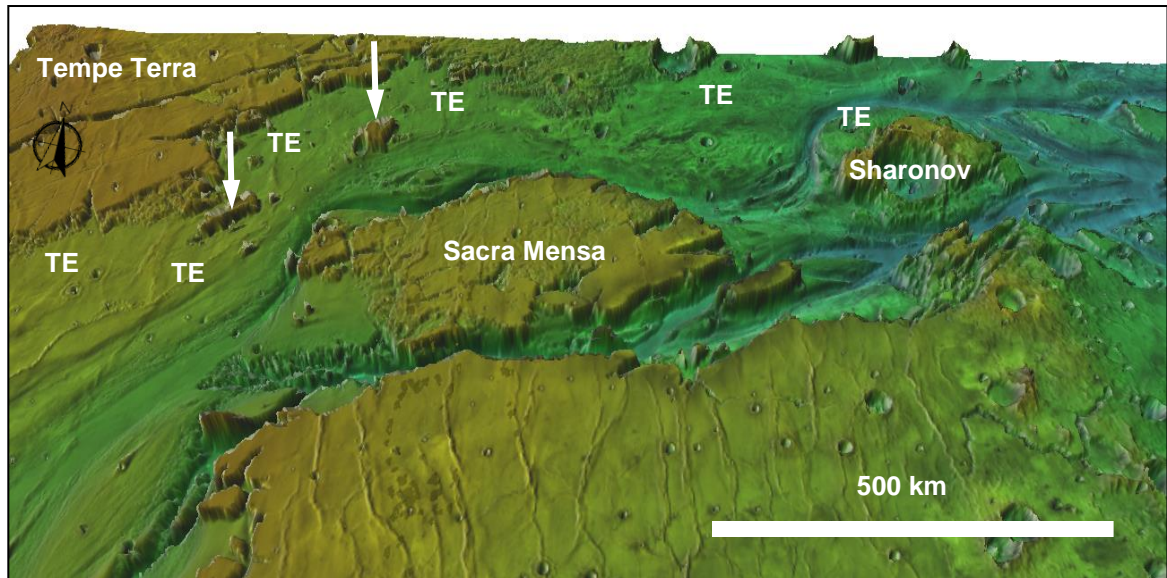
Muestra de lo anterior, es el entallamiento del basamento litológico de la parte Sur de Tempe Terra, así como la presencia de relictos de las unidades que afloraban en superficie. Estos remanentes aislados, no poseen orientación indicativa de alguna dirección de corriente y se asemejan más a la morfología dejada a Barlovento y Sotavento, por los flujos turbulentos en las Islas Fluviales.

Son diferenciables dos niveles principales de Terrazas de Erosión, que indicarían varios episodios de grandes volúmenes de descarga, en los que participaron fluidos con alto poder erosivo. La terraza mayor, posee un ancho promedio de 80 kilómetros y una diferencia de altura de 90 metros entre su cota superior e inferior, extendiéndose de manera continua por 1.500 kilómetros, desde la inflexión del Canal Principal y origen de Kasei Valles Norte, hasta la zona de descarga del canal en Chryse Planitia (Figura 35).

Los eventos que modelaron estas Terrazas Erosivas, también fueron responsables de la erosión del material de Ejecta del Cráter Sharonov, así como del modelado de las Islas Fluviales observadas, dejando como consecuencia, Terrazas Erosivas en estas geoformas.

No obstante lo anterior, es importante mencionar que se observan evidencias de procesos acrecionales en las Terrazas de Erosión de la margen izquierda de este canal, tales como flujos de Lava, los cuales serán descritos en líneas posteriores.

Figura 35. Vista 3D en perspectiva de Kasei Valles en dirección Noreste, basada en una composición de imágenes THEMIS Day IR (Christensen, 2006), adquiridas durante la misión Mars Odyssey, así como en datos de altimetría obtenidos por el sensor MOLA del Mars Global Surveyor, de un total de 600 millones de puntos de observación. Se observan las Terrazas de Erosión relacionadas con Kasei Valles Norte e incluso la Terraza de Erosión del Cráter Sharonov. Las flechas indican relictos litológicos de la Provincia de Tempe Terra, aislados por la acción de flujos turbulentos.

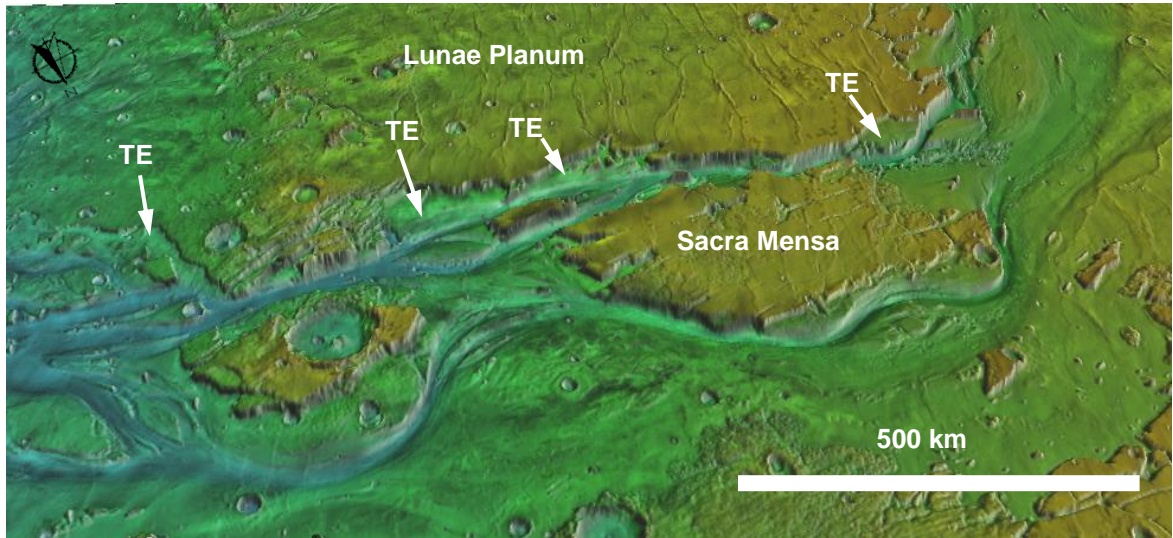


Fuente: ASU/NASA/MOLA Team. Procesamiento realizado con JMARS (Arizona State University Mars Scientific Software Team). Exageración vertical 4X. Elaboración propia.

La unidad Sur de Terrazas de Erosión, muestra terrazas aisladas en la margen derecha de Kasei Valles Sur, modeladas en las formaciones geológicas que hacen parte de la zona Norte de Lunae Planum, en sectores aledaños a Sacra Mensa, Lunae Mensa y la confluencia con Chryse Planitia. Llama la atención, la ausencia de Terrazas Erosivas en la margen izquierda del canal, donde la capacidad erosiva es menor, debido a la geometría del cauce de Kasei Valles Sur, aunque si se observan Valles Colgados en Sacra Mensa y Lunae Mensa (Figura 36).

Los anteriores hallazgos llevan a suponer de manera inicial, dos escenarios para la geomorfogénesis local de estas terrazas: formaciones geológicas más competentes y menos afectadas por eventos tectónicos, que resistieron la acción hidrodinámica de los flujos o una fuerte influencia de estructuras tectónicas que ocasionaron la desviación y el basculamiento hacia el Sur del bloque donde se localiza Kasei Valles, posibilidad apoyada por la mayor profundidad que posee el Thalweg de Kasei Valles Sur, con respecto a Kasei Valles Norte. Esta posibilidad será discutida en el análisis morfométrico de los canales de Kasei Valles.

Figura 36. Composición 3D en perspectiva de Kasei Valles, basada en imágenes THEMIS Day IR (Christensen, 2006) e imágenes MOLA (NASA/MOLA Team), Vista en dirección Suroeste. Se aprecian Terrazas de Erosión (TE) relacionadas con Kasei Valles Sur en el sector Norte de Lunae Planum.

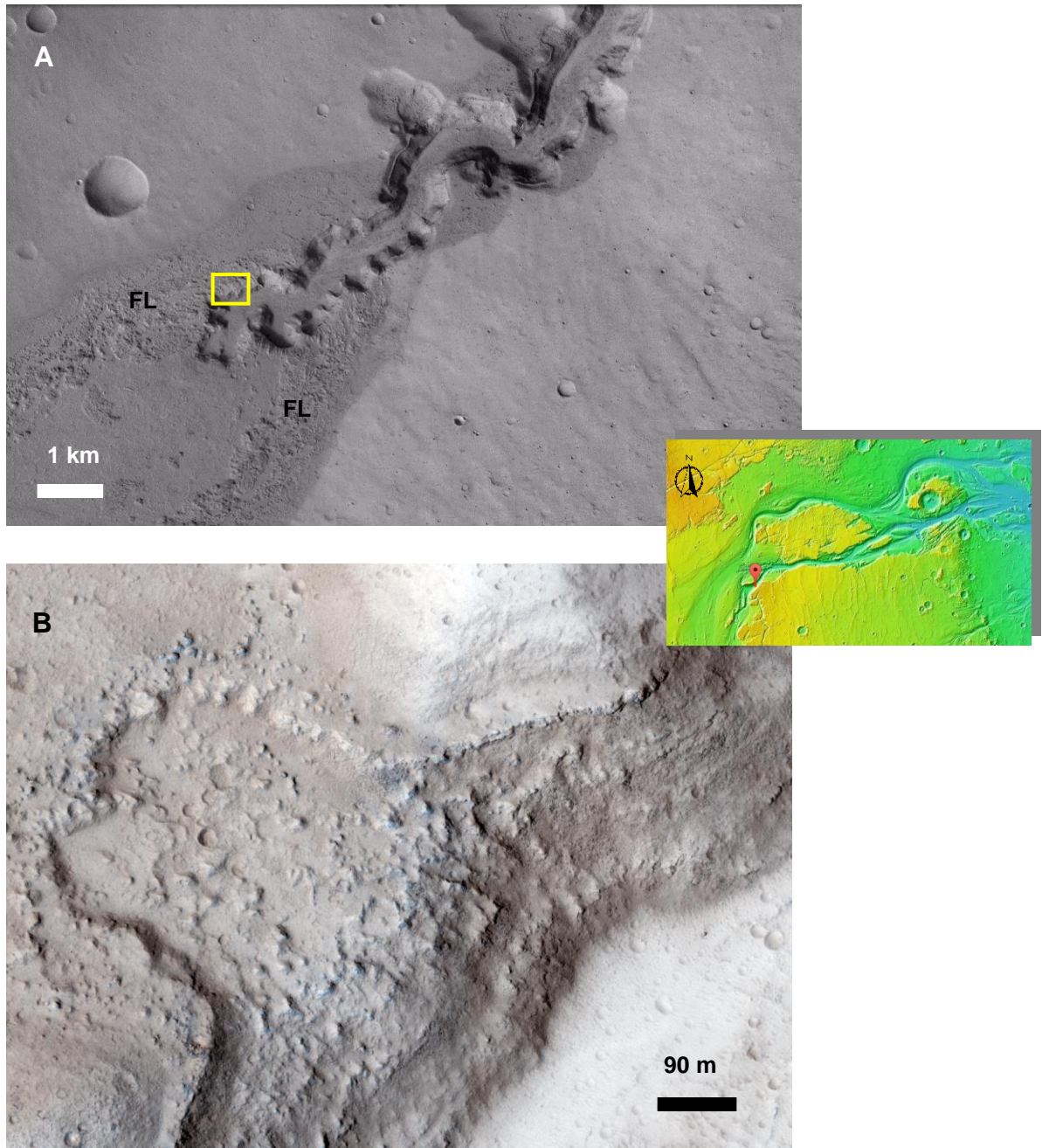


Fuente: ASU/NASA/MOLA Team. Procesamiento realizado con JMARS (Arizona State University Mars Scientific Software Team). Exageración vertical 2X. Elaboración propia.

7.1.2.5 Flujos de origen Volcánico (Lava y/o Lahares). La geomorfogénesis de Kasei Valles, ha estado altamente influenciada por la actividad eruptiva de la provincia volcánica de Tharsis (alineada con Valles Marineris), la cual posee los volcanes más grandes del Sistema Solar, cuyos flujos alcanzaron los canales de Kasei Valles. De acuerdo a la Agencia Espacial Europea-ESA (2012), la Provincia de Tharsis presentaba actividad volcánica hace unos 100-250 millones de años, la cual comenzó con lavas andesíticas de baja densidad, que podrían estar relacionadas con la presencia de agua, para luego cubrirse de lavas basálticas de mayor densidad.

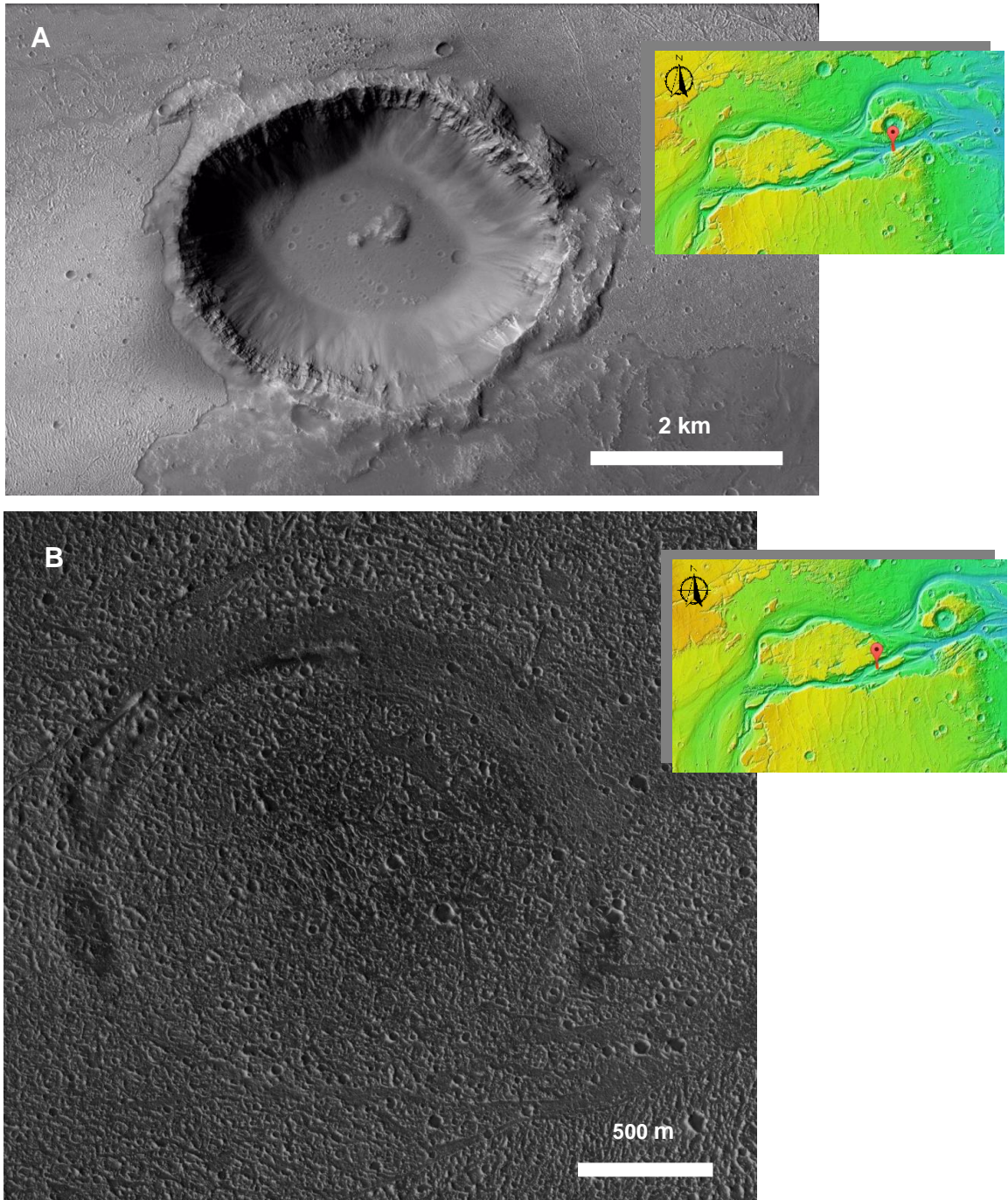
Incluso autores como Leverington (2011), exponen la teoría de que los grandes canales de Kasei Valles, fueron formados por gigantescos flujos de lava de baja viscosidad, asociadas con procesos de erosión térmica y mecánica. La hipótesis de Leverington es fundada en la existencia de otras geoformas análogas en el sistema solar, tales como Venus y la Luna terrestre, las cuales fueron formadas por comprobados flujos de lava, así como en la compatibilidad de los canales con los datos mineralógicos disponibles y en la ausencia de depósitos aluviales y rasgos claros de origen fluvial, pese a la gran cantidad de volumen de agua y sedimentos que estuvieron supuestamente involucrados. Así mismo y en contravía de la hipótesis más aceptada de la mega inundación para la formación de Kasei Valles, cuestiona la potencial fuente abastecedora de agua, que pudo haber alimentado los gigantescos flujos acuosos. Con la ayuda de las imágenes HiRISE y CTX, se aprecian flujos de origen volcánico en diversos lugares de Kasei Valles, tal como se observa en las figuras 37, 38 y 39.

Figura 37. A) Imagen Pancromática CTX No B08_012875_2009_XN_20N072W, donde se aprecia un pequeño canal al interior de Kasei Valles Sur, el cual ha sido cubierto por una delgada capa de flujos de origen volcánico (FL). El cuadro indica la escena de la imagen B. B) Par estereográfico HiRISE No ESP_024202_2010, en el cual se detalla el lóbulo frontal del flujo al llegar al canal.



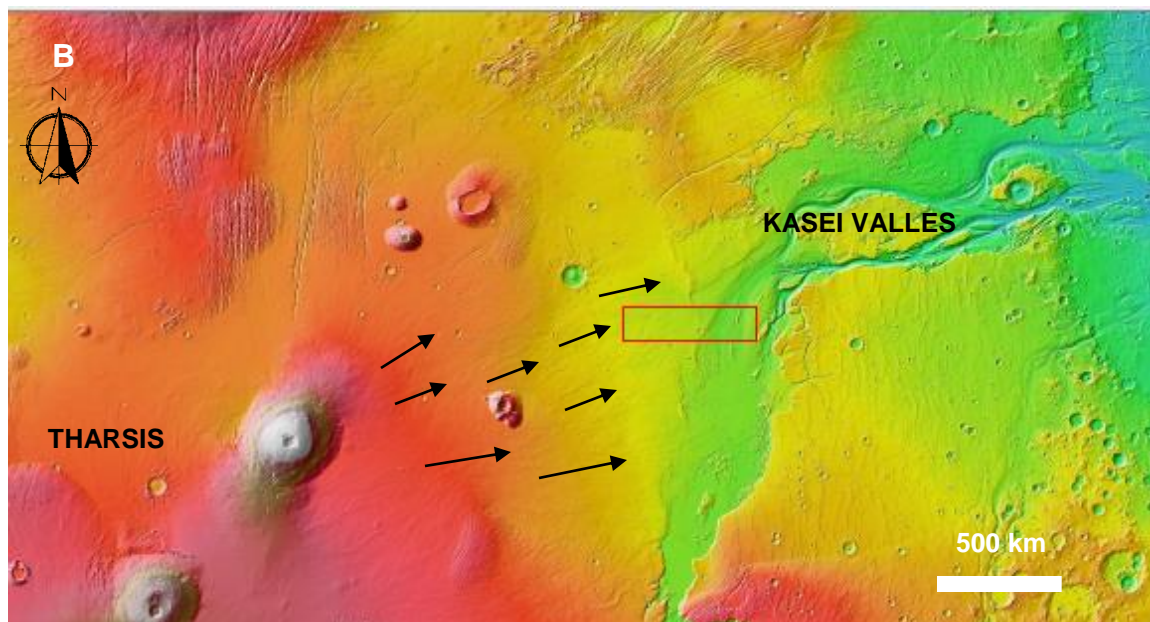
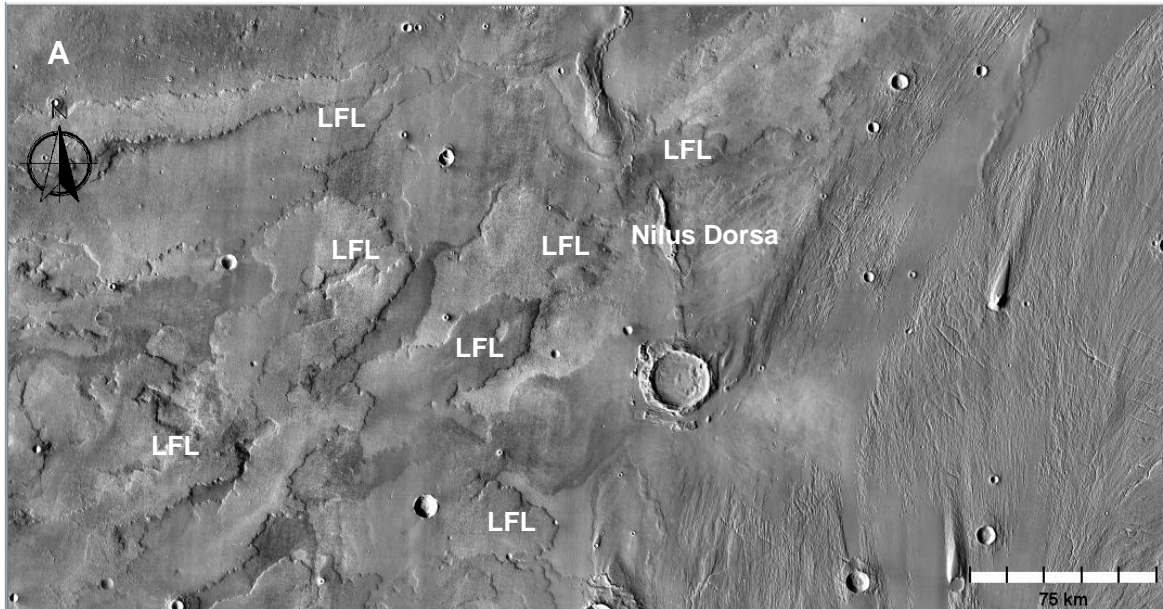
Fuente de las imágenes: A) (NASA/Malin Space Science Systems/ASU-University of Arizona) B) (NASA/JPL/ASU-University of Arizona). Procesadas mediante ERDAS 11. Imagen de contexto: NASA/MOLA Team. Procesada con JMARS. Elaboración propia.

Figura 38. Cráteres de Impacto, afectados por flujos de origen volcánico. A) Imagen Pancromática CTX P19_008510_2074_XN_27N058W. Flujos (FL), cubriendo el material de Ejecta de un cráter, sin afectarlo. B) Imagen HiRISE ESP_033709_2040. Cráter de Impacto totalmente cubierto por un flujo



Fuente: NASA/JPL/University of Arizona/MOLA. A) Procesada mediante ERDAS 11. B) visualizada mediante HiVIEW (University of Arizona). Imagen de contexto: NASA/MOLA Team. Procesada con JMARS. Elaboración propia.

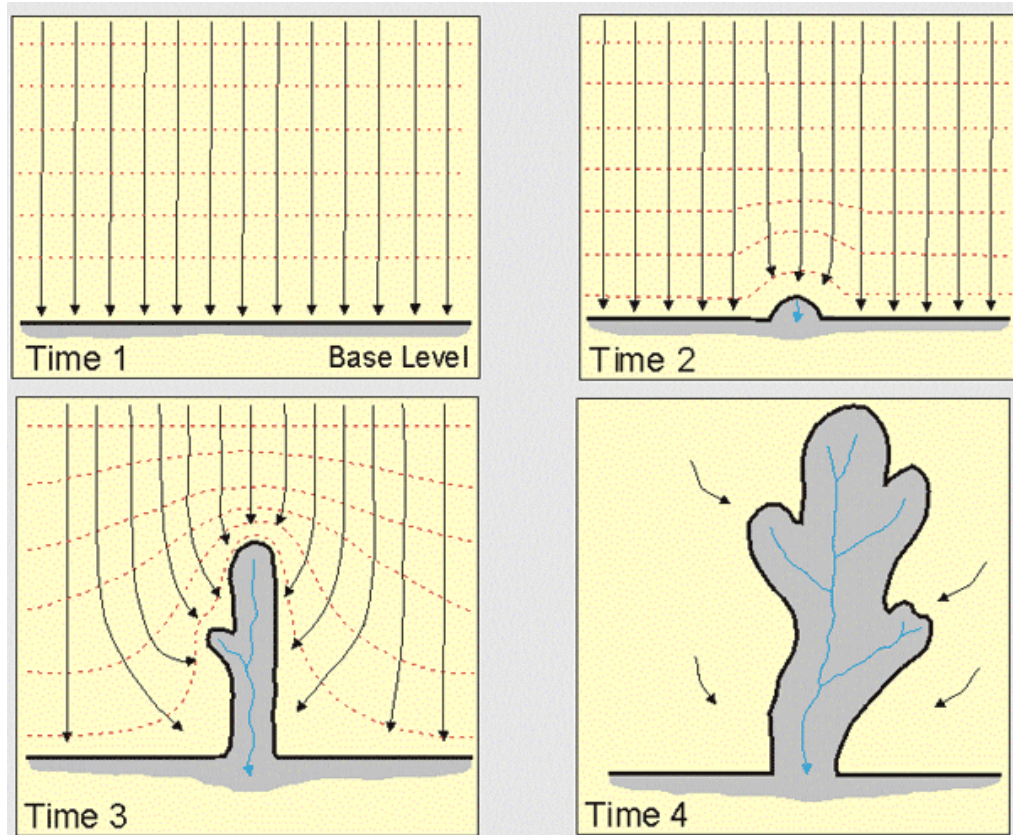
Figura 39. Flujos de origen Volcánico, que podrían ser lava o Lahares, provenientes de la provincia volcánica de Tharsis, en su trayectoria en dirección a Kasei Valles. A) Mosaico de imágenes THEMIS Day IR, que muestran lóbulos de flujos (LFL), alcanzando el sector de Nilus Dorsa, que pueden ser indicativos de varios episodios eruptivos. B) Imagen MOLA donde se observa el área de la escena A, así como la posible dirección de los flujos, desde la provincia volcánica de Tharsis.



Fuente: NASA/University of Arizona/MOLA. Imágenes procesadas con JMARS (Arizona State University Mars Scientific Software Team) y ERDAS 11. Elaboración propia.

7.1.2.6 Valles por Socavación (Sapping Valleys). De acuerdo a Marra et al (2015) estos valles, los cuales poseen en su origen una característica forma de “escenario de teatro”, redondeada en su cabecera, se forman por la infiltración de las aguas subterráneas en sedimentos erosionables. Estos valles se forman debido a la erosión con efecto retrocedente o Sapping, que es producida por la socavación en los lugares donde el agua subterránea aflora en la superficie (Figura 40). Sin embargo, un flujo superficial también puede producir valles similares, cuando la erosión afecta un sustrato con una capa superior resistente a la erosión, el cual es socavado por diferencia de competencia hasta que el estrato resistente cae, por falta de soporte en su base.

Figura 40. Diagrama en planta, del modelo de extensión de drenajes mediante el proceso de Sapping, por flujos subterráneos. En el tiempo 1, el flujo subterráneo se desplaza por los estratos, en busca del nivel base, hasta encontrar una irregularidad en el tiempo 2, generalmente un afloramiento o una discontinuidad por erosión y emerge por este punto. En el tiempo 3, La salida del flujo aumenta la erosión local y se inicia el proceso de Sapping, causando la migración retrocedente del valle. Finalmente en el tiempo 4, el número de afluentes crece, a medida que el flujo subterráneo emana por zonas de debilidad, generalmente contactos litológicos, a lo largo de las paredes laterales.

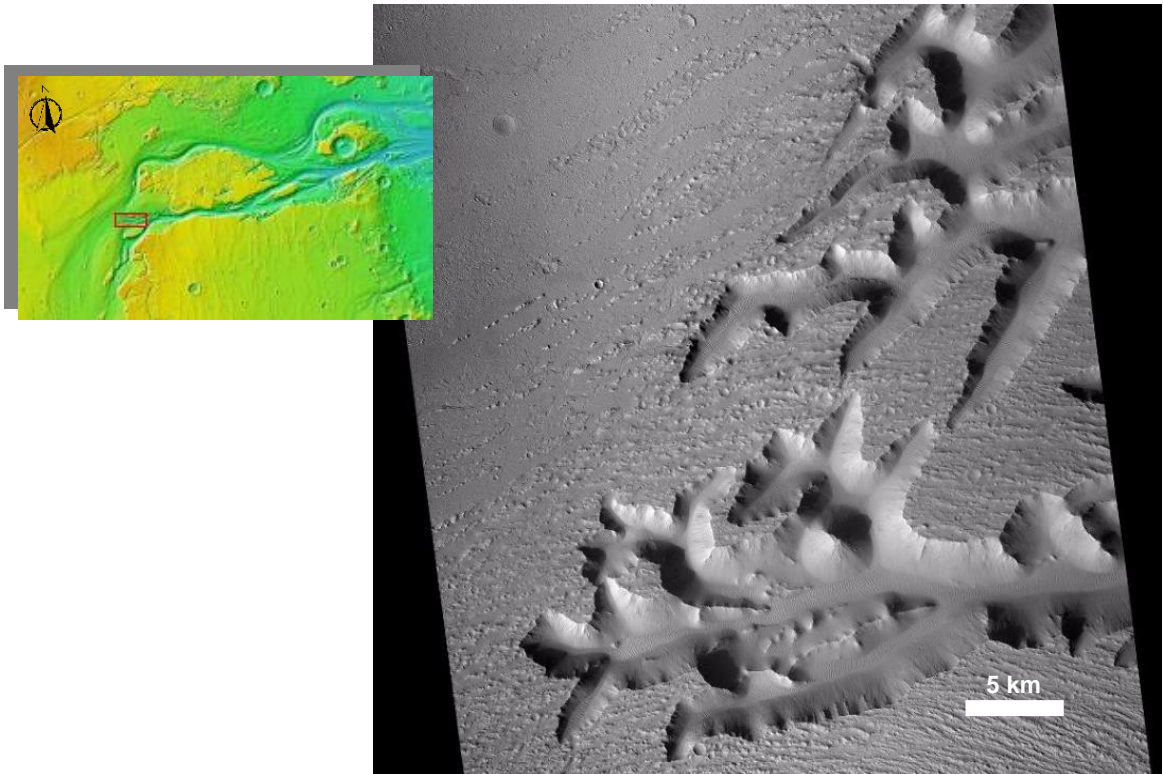


Fuente: Tomado de Cansler and Carr (2001) - Kansas Geological Survey en <http://www.kgs.ku.edu/PRS/publication/OFR2001-55/P3-02.html>.

La ambigüedad en el mecanismo de formación de los Valles por Socavación o Sapping Valley, dificulta la interpretación de su origen, si se hace únicamente en función de su geomorfología, ya que se carecen de observaciones directas en el campo, del material y sus propiedades físicas.

La zona de Nilus Mensae, con un área aproximada de 8000 km², se constituye en el ejemplo más claro de un Sapping Valley en Kasei Valles (Figura 41). Esta se localiza al inicio de Sacra Mensa, una de las principales Islas Fluviales de Kasei Valles.

Figura 41. Valles de Socavación o Sapping Valleys, en el área de Nilus Mensae de Kasei Valles. Imagen Pancromática CTX No P06_003487_2012_XN_21N073W.



Fuente: NASA/Arizona State University. Procesada mediante ERDAS 11. Elaboración propia.
Fuente imagen de contexto: NASA/MOLA Team. Procesada con JMARS. Elaboración propia.

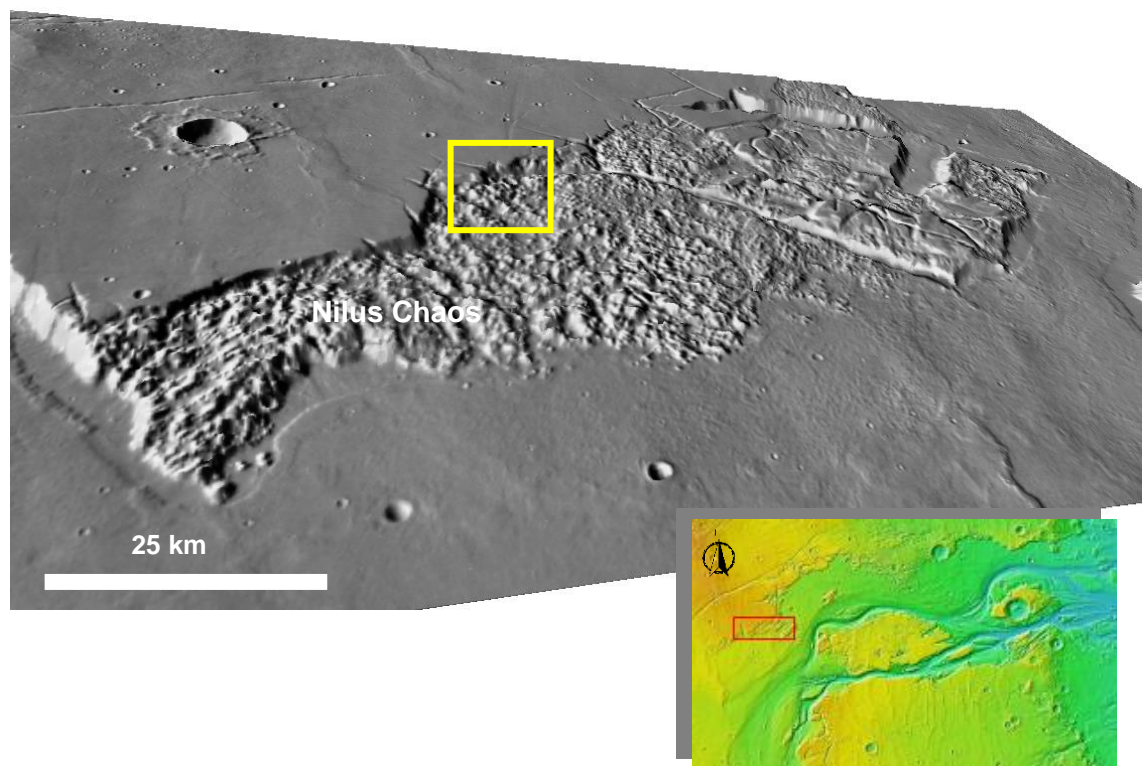
El Sapping Valley de Nilus Mensae, proporciona información concluyente acerca del orden de formación de los canales de Kasei Valles. Las cabeceras de los Valles de Socavación que dieron origen a Nilus Mensae, afectan los materiales del Canal Principal, el cual es continuo con Kasei Valles Norte, mientras que la parte distal de este Sapping Valley se aprecia interrumpida por el canal Kasei Valles Sur, dejando como evidencia un Valle Colgante, así como Terrazas de Erosión de hasta tres kilómetros de ancho. De lo anterior se concluye, que en primer lugar se dio la formación de Kasei Valles Norte, luego el Sapping Valley de Nilus Mensae y finalmente Kasei Valles Sur

7.1.3 TERRENOS CAÓTICOS (CHAOS TERRAIN)

Son rasgos geomorfológicos únicos en Marte, los cuales no tienen ningún análogo en el Planeta Tierra. Son realmente un grupo de geoformas, tales como Mesetas, Colinas, Buttes (pequeñas colinas aisladas con cima aplanada), reunidas a manera de un entramado de bloques, que parecieran estar dispuestos en patrones, con profundos cañones y valles entre ellos. Se cree que su origen se debe a la acción de gigantescas inundaciones (Chapman M., et al 2010) o derretimiento de capas de hielo subsuperficiales (Zegers T., et al 2010). No obstante, su origen continúa siendo tema de debate en las ciencias planetarias.

Kasei Valles posee algunos Terrenos Caóticos, que pudieran servir de clave para desentramar el complejo origen de los eventos geológicos que lo modelaron hasta su estado actual. Estos se encuentran tanto cerca del origen del Canal Principal (Echus Chaos) como en su punto de inflexión en Nilus Chaos (Figuras 42, 43 y 44), algunos de los cuales pudieran correlacionarse con los eventos que dieron origen a las Terrazas de Erosión existentes en el área de interés.

Figura 42. Imagen 3D en perspectiva, elaborada desde un mosaico de imágenes THEMIS Day IR, donde se aprecia la zona de Nilus Chaos cerca de Nilus Dorsa. El cuadro indica el sector detallado a continuación en la imagen 37, mediante imagen CTX.



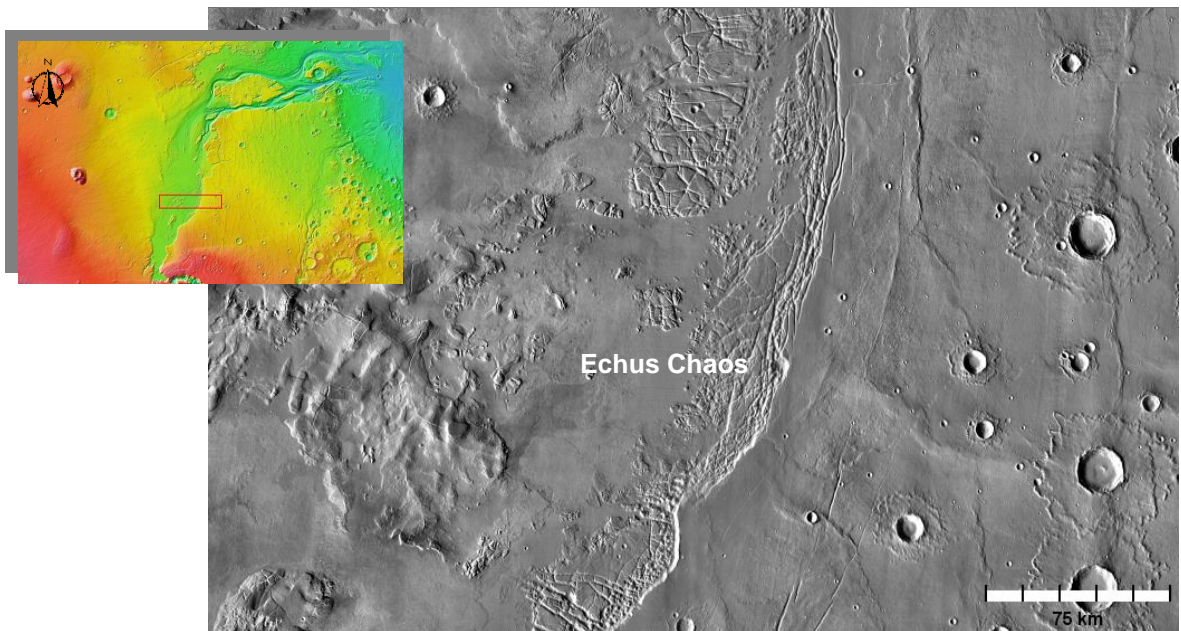
Fuente: NASA/University of Arizona/MOLA. Procesada con JMARS y Arc Gis 10.1. Fuente imagen de contexto: NASA/MOLA Team. Procesada con JMARS. Elaboración propia

Figura 43. Detalle de un sector de Nilus Chaos, mediante la imagen Pancromática CTX No P21_009394_2059_XN_25N076W. Se aprecia la disposición de Colinas, Mesetas y Buttes. Los valles profundos hacia la parte media superior, corresponderían a estructuras de origen tectónico.



Fuente: NASA/JPL/University of Arizona. Procesada mediante ERDAS 11. Elaboración propia.

Figura 44. Imagen THEMIS Day IR, donde se aprecia la zona de Echus Chaos.



Fuente: NASA/University of Arizona. Procesada con ERDAS 11. Fuente imagen de contexto NASA/MOLA Team. Procesada con JMARS. Elaboración propia

8. MORFOMETRÍA

Para abordar la caracterización morfométrica del área de interés y debido a su inicial correlación con morfogénesis de tipo fluvial, se aplicará una metodología basada en la expresión geomorfológica más sencilla y que contiene la mayor cantidad de información: El Perfil Longitudinal y la Sección Transversal del cauce.

Para la realización del perfil longitudinal, no se recurrirá a métodos automatizados para la simplificación y vectorización de las líneas de flujo y su posterior tabulación numérica. Con el apoyo en Sistemas de Información Geográfica (SIG), dicho perfil se obtendrá basado en el DEM obtenido para Kasei Valles, teniendo como eje el Thalweg. Dadas las características del sector de interés, que han sido expuestas en varias oportunidades en líneas anteriores, se optará por elaborar el perfil longitudinal, de manera analítica y no automatizada, basada en la experiencia profesional. De igual manera, basado en el DEM de Kasei Valles y mediante el apoyo de un SIG, los perfiles transversales serán efectuados de manera secuencial a lo largo de los canales de Kasei Valles, teniendo como criterio de elaboración, la presencia de rasgos sobresalientes, inflexiones en los canales, divisiones u otro tipo de novedad que deba reflejarse en el perfil, y que pueda otorgar datos de utilidad para el análisis de los canales. Esto proporcionará información sobre los posibles condicionantes geológicos de formación para los canales de Marte.

8.1 SECCIONES TRANSVERSALES DE LOS CANALES DE KASEI VALLES

8.1.1 CANAL PRINCIPAL

Este proviene de aquel originado en Echus Chasma, cerca de Valles Marineris, 1250 kilómetros al sur.

Figura 45.

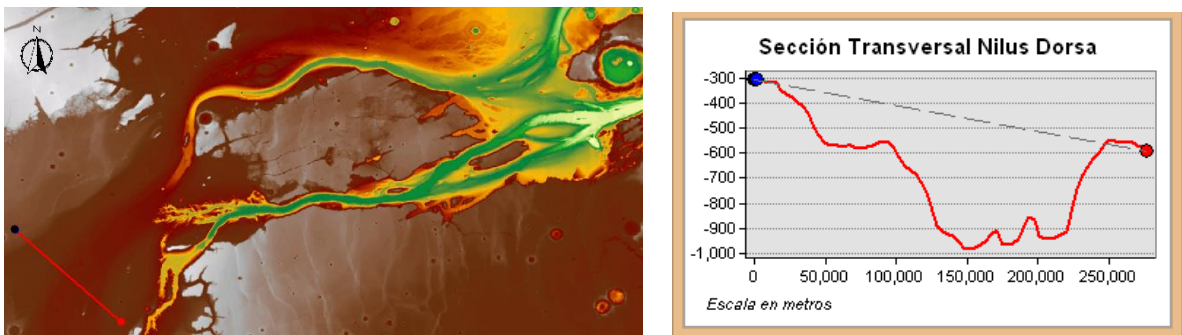
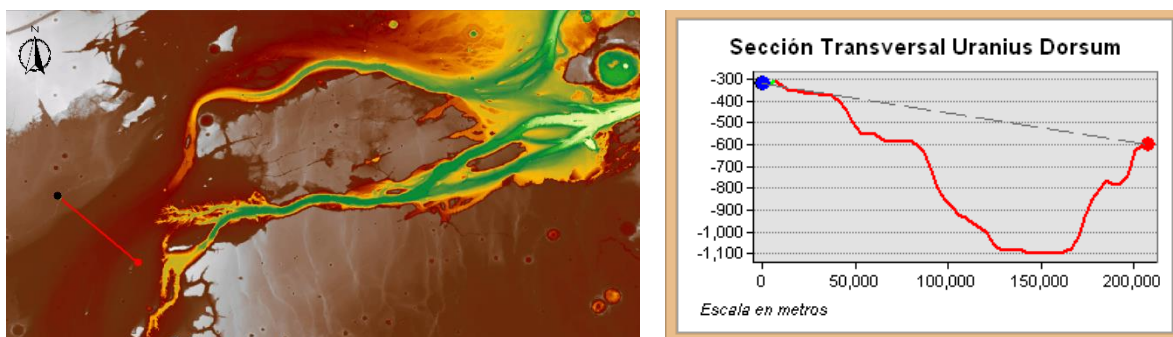


Figura 46.



Las secciones transversales del Canal Principal, muestran que este posee una marcada forma de Artesa con irregularidades en el fondo, posiblemente por la acumulación de flujos de origen volcánico, que podrían ser lavas o depósitos de Lahar. Se aprecia una Terraza de Erosión en la margen izquierda del canal, sobre las formaciones geológicas de Tempe Terra, que posee una altura que oscila entre 200 a 300 metros y casi 40 kilómetros de amplitud, rasgo que indica la ocurrencia de al menos dos episodios de inundación que modelaron las geoformas de Kasei Valles

El canal se profundiza 1100 metros bajo el nivel cero de referencia para Marte, el cual convencionalmente fue establecido respecto a su presión atmosférica y se refiere a la altura a la que se alcanza una presión de 6.105 milibares, en la cual el agua se encuentra en su punto triple. El ancho promedio de la sección cercana al Thalweg, es de 50 kilómetros.

8.1.2 KASEI VALLES SUR (KVS)

Su sección empieza a marcarse en inmediaciones de Nilus Mensae y se divide en dos ramales A y B, en el sector de Lunae Mensa.

Figura 47.

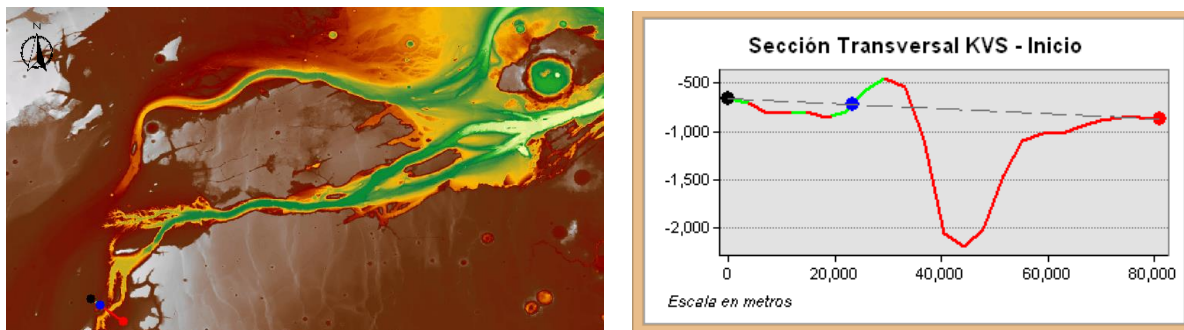


Figura 48.

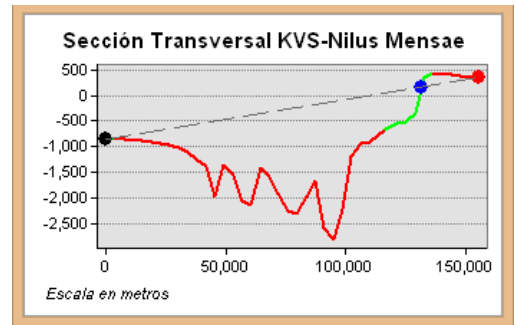
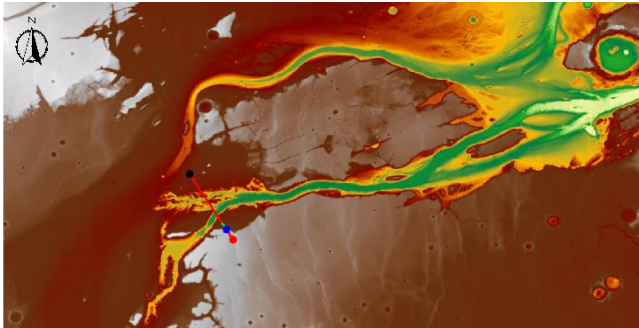


Figura 49.

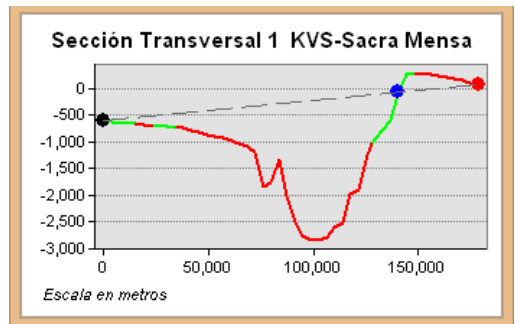
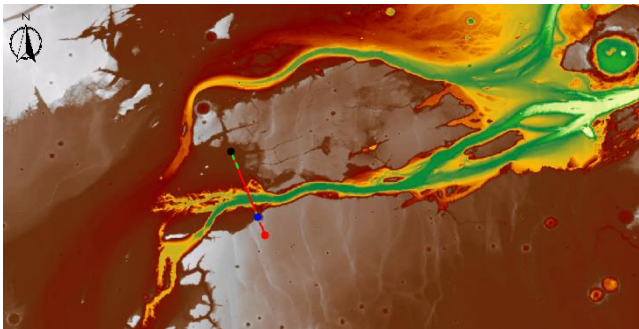


Figura 50.

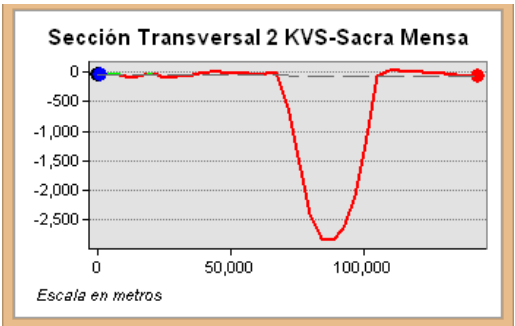
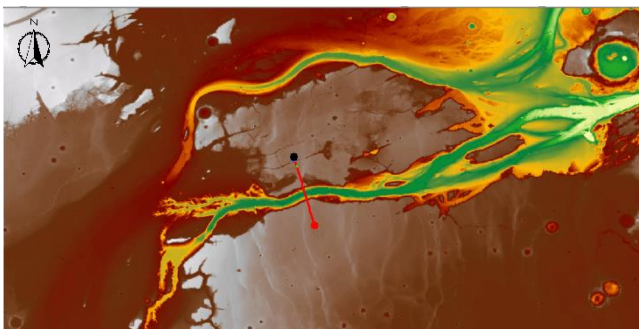


Figura 51.

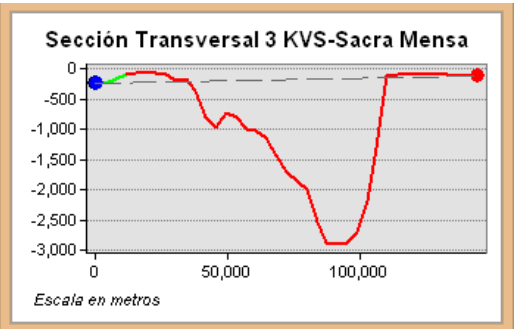
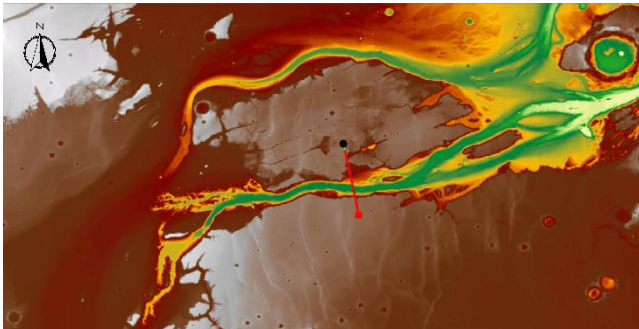


Figura 52.

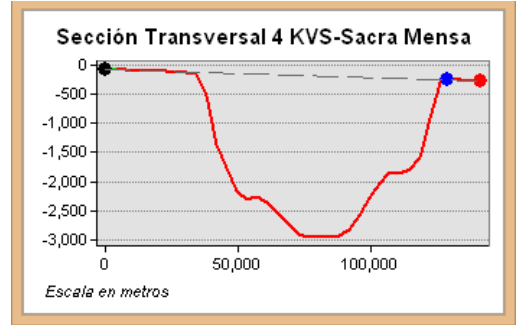
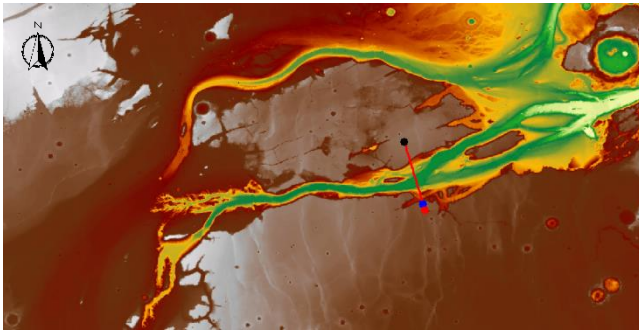


Figura 53.

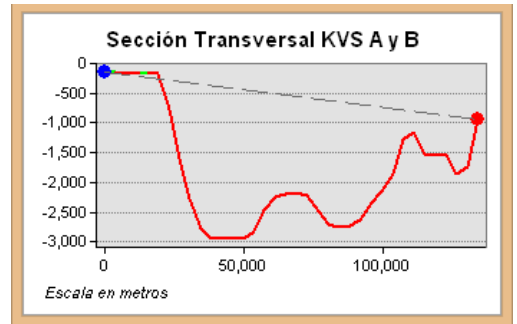
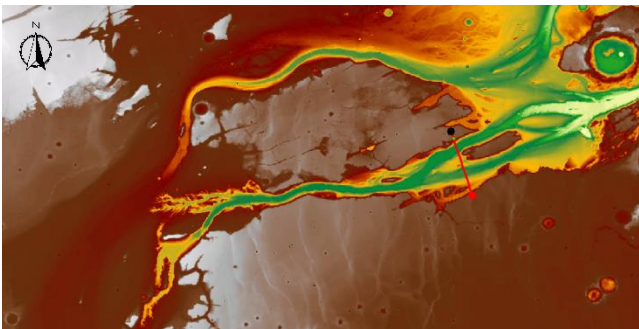


Figura 54.

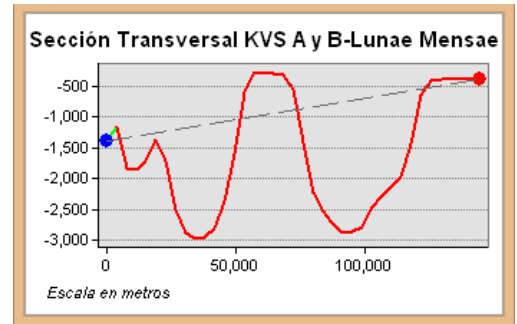
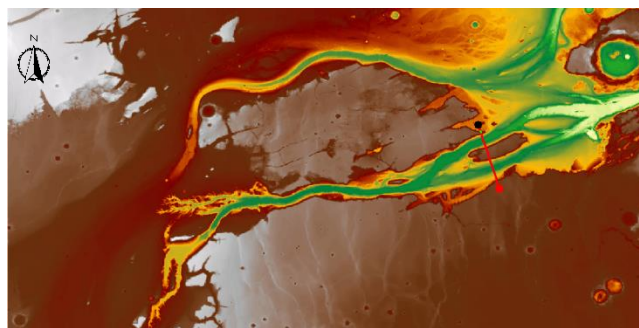


Figura 55.

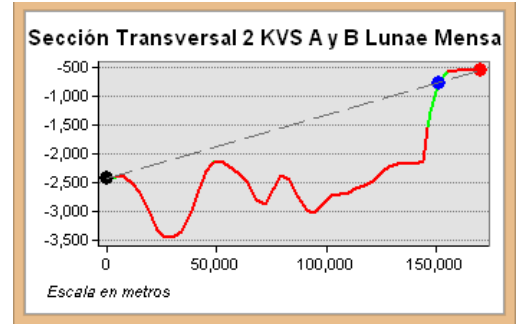
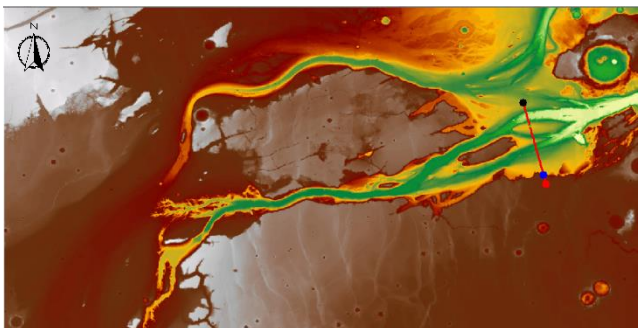


Figura 56.

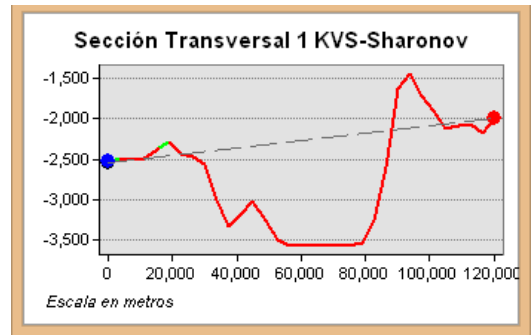
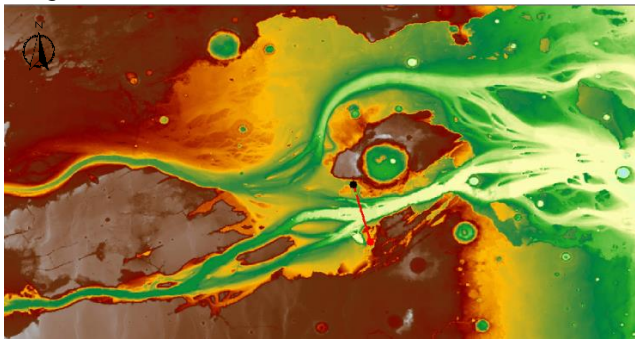


Figura 57.

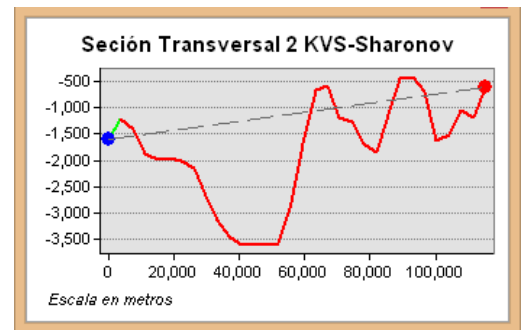
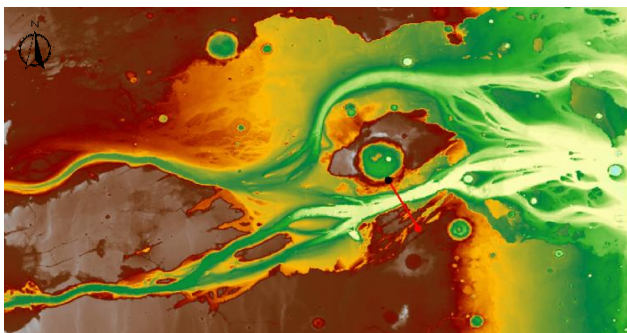


Figura 58.

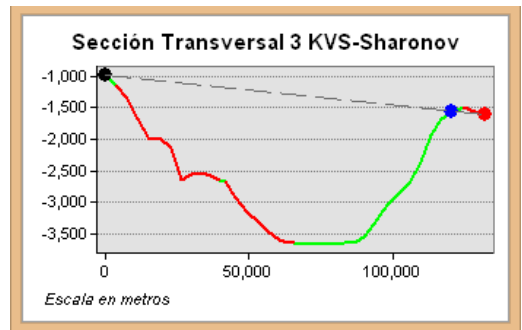
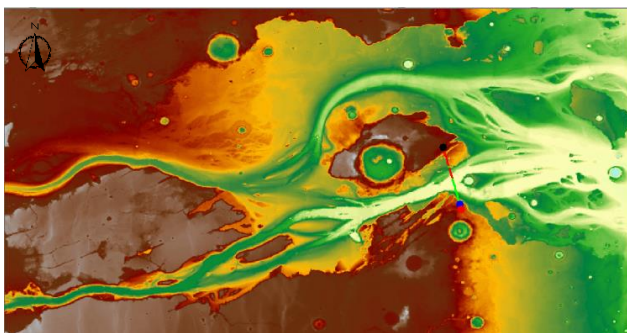
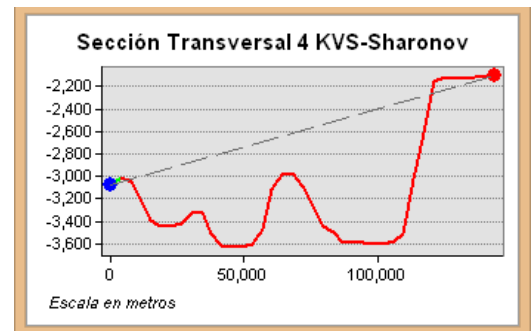
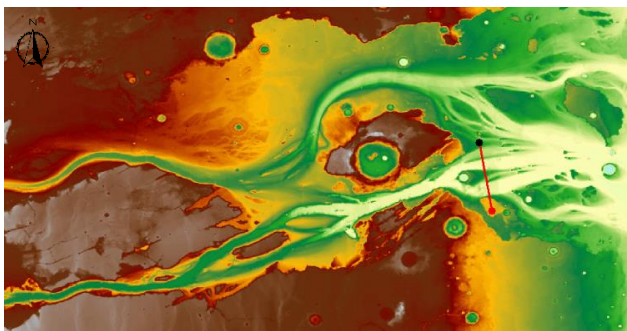


Figura 59.



En términos generales Kasei Valles Sur no posee un ancho promedio mayor a 20 kilómetros. Al inicio del canal, este posee una acentuada forma en “V” y se profundiza algo más de 2000 metros (Figura 47). Al llegar a la parte distal de Nilus Mensae (Figura 48), el canal se profundiza 500 metros adicionales, continuando con su forma en V. En el área de Sacra Mensa (Figuras 49, 50, 51 y 52), es posible observar amplias Terrazas de Erosión hasta 80 kilómetros de amplitud, las cuales se replican en varios sitios durante el segmento que Kasei Valles Sur comparte con esta geoforma, lugar en el cual el valle se ha profundizado hasta casi llegar a -3000 metros. La margen derecha de este canal Sur, correspondiente a las formaciones geológicas de Lunae Planum, presentan una alta pendiente.

Al llegar a Lunae Mensa (Figuras 53, 54 y 55), la sección transversal se amplía, adoptando forma de Artesa e indicando la división de Kasei Valles Sur en dos canales A y B. Existe una particularidad que se aprecia al comparar ambos canales de Kasei Valles Sur, que consiste en que el canal B localizado más al sur es menos profundo que el canal A, por decenas de metros, lo que indicaría que el canal A se comporta como el canal central de Kasei Valles Sur. Posteriormente, al alcanzar la Isla Fluvial del Cráter Sharonov, este brazo adventicio B es capturado nuevamente por dicho cauce central.

En la zona de Sharonov, se aprecian nuevamente amplias Terrazas de Erosión, cuya conformación fue facilitada por la baja resistencia a la erosión del material de Ejecta (Figuras 56, 57, 58, 59). El canal alcanza la profundidad de -3600 metros, para llegar finalmente con una depresión de -3700 metros a Chryse Planitia.

8.1.3 KASEI VALLES NORTE (KVN)

Este canal se define claramente en el sector de Uranus Dorsum, en el área de influencia de Nilus Mensae.

Figura 60.

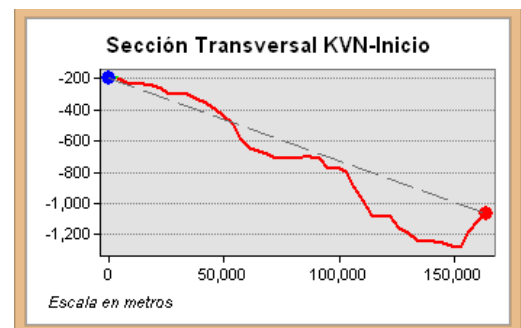
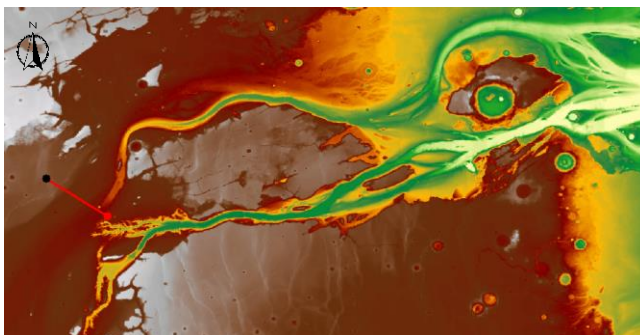


Figura 61.

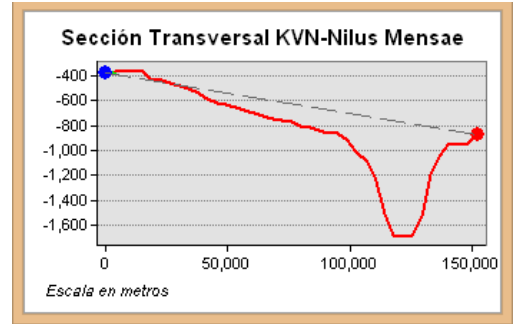
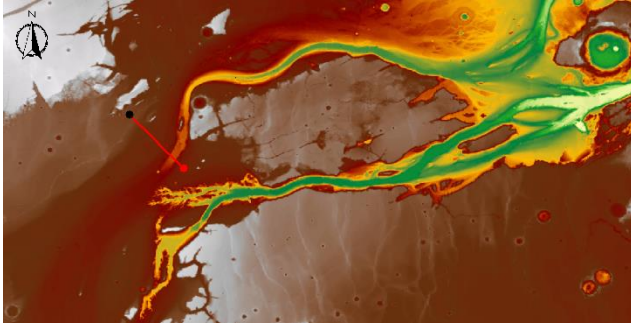


Figura 62.

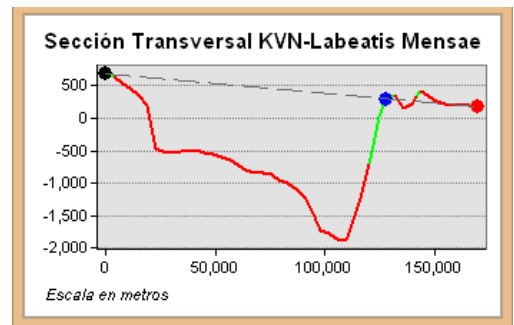
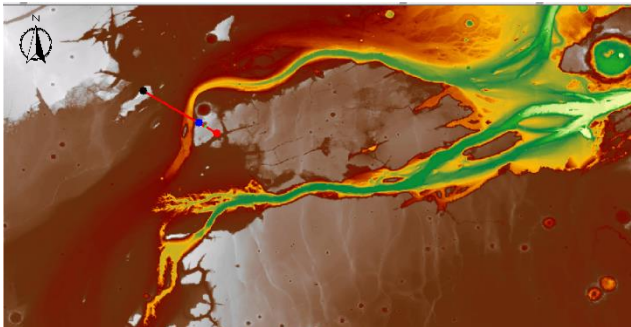


Figura 63.

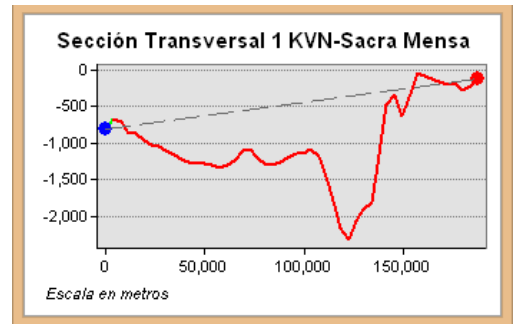
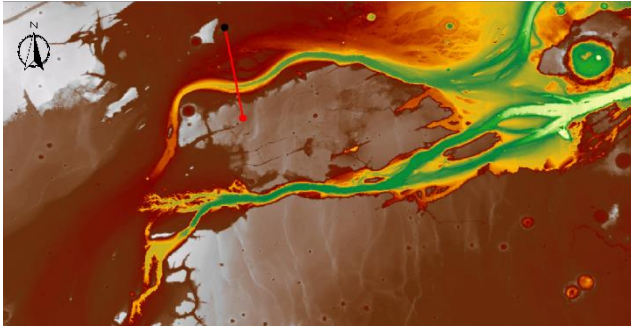


Figura 64.

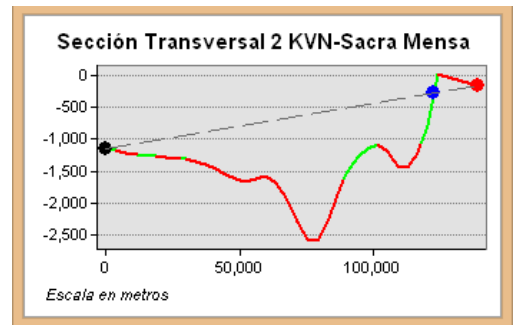
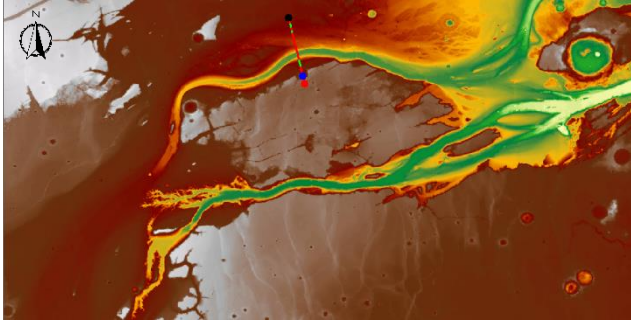


Figura 65.

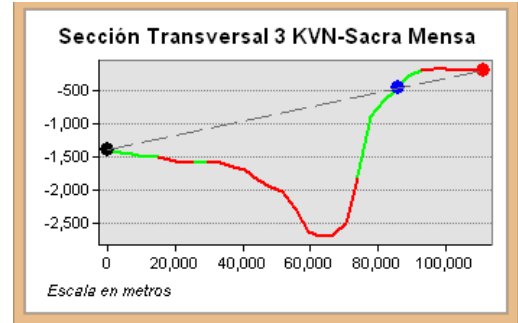
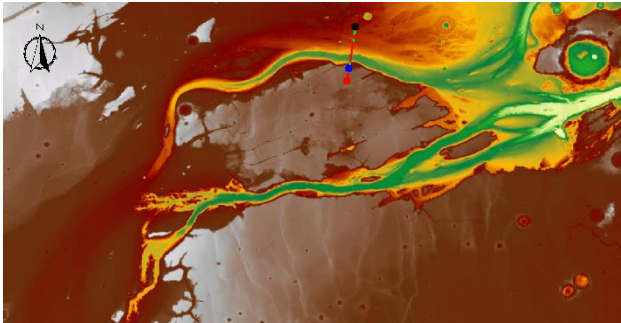


Figura 66.

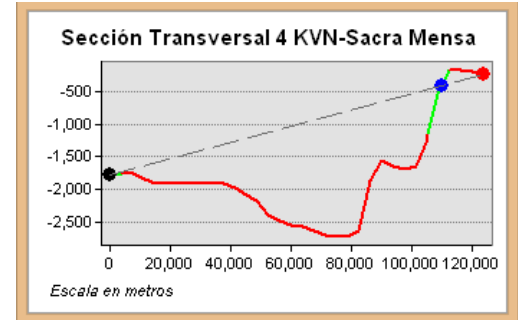
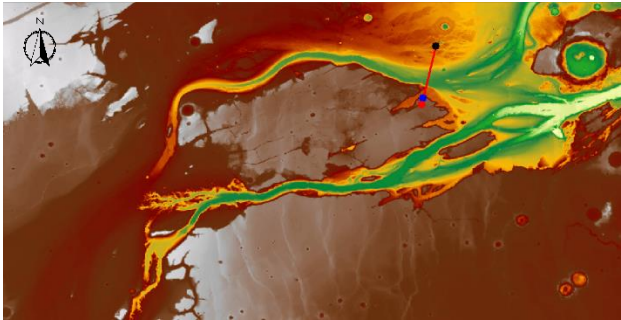


Figura 67.

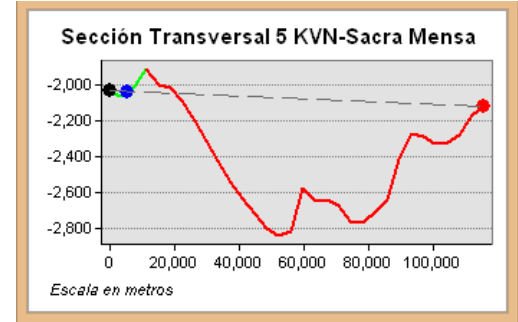
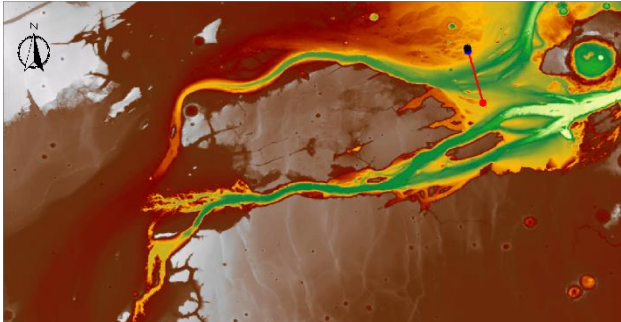


Figura 68.

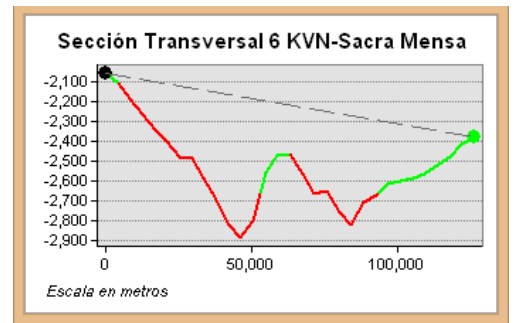
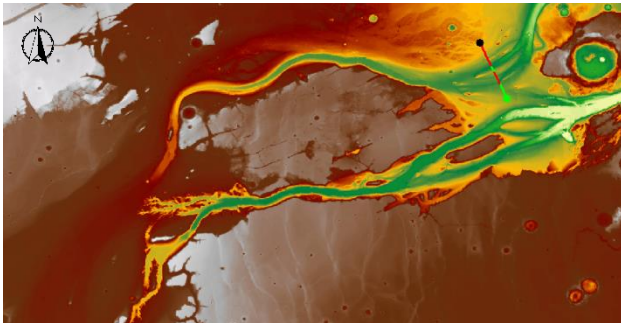


Figura 69.

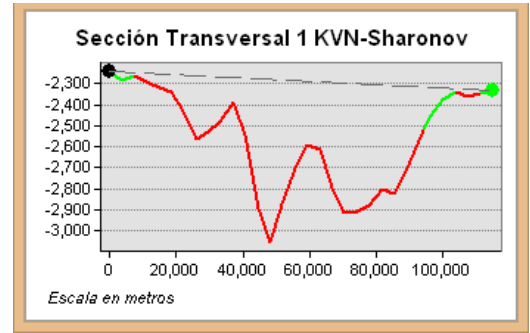
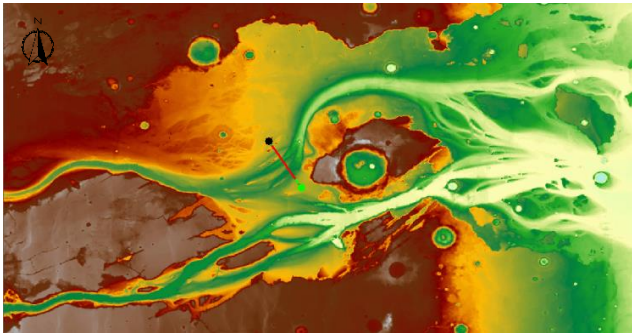


Figura 70.

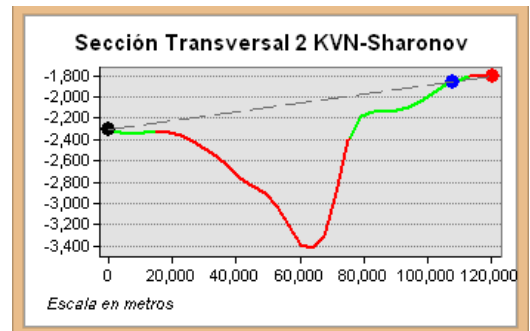
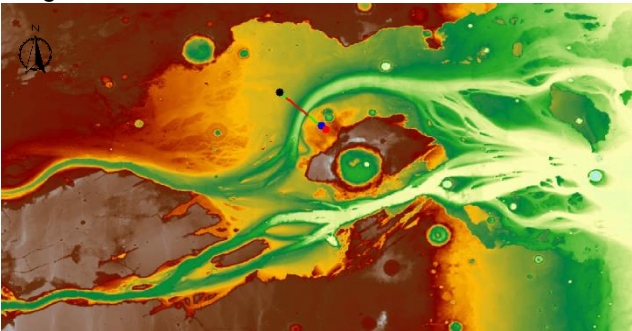


Figura 71.

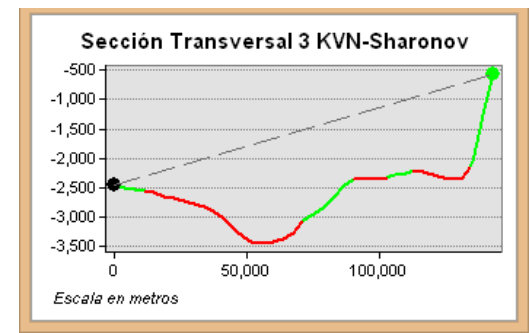
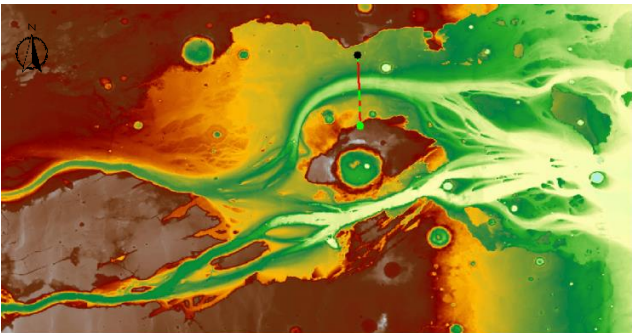


Figura 72.

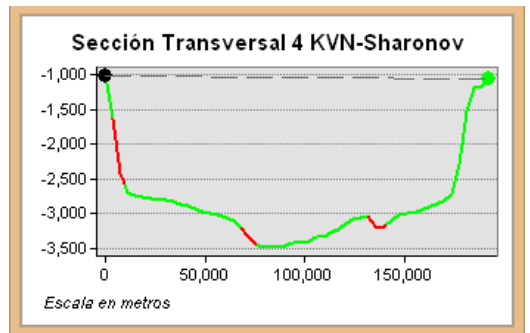
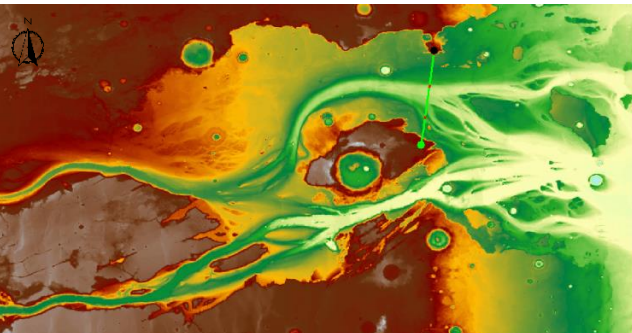
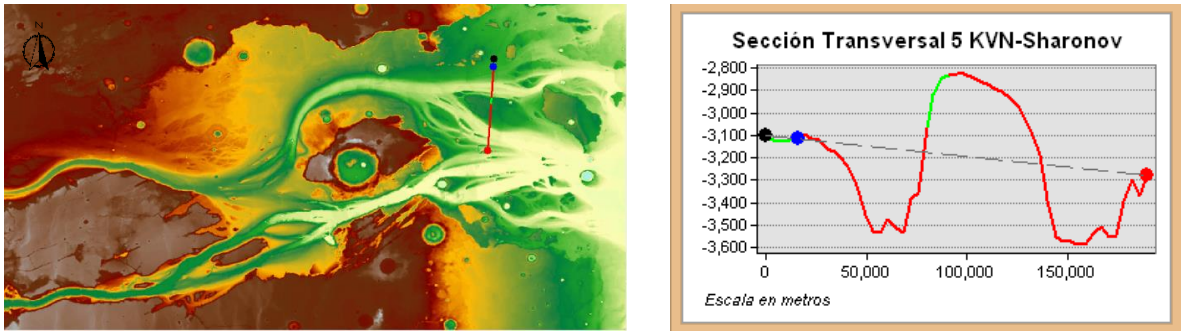


Figura 73.



Desde su inicio con una profundidad de 1200 metros, el canal Kasei Valles Norte presenta una sección en V, la cual se amplía hasta lograr forma de Artesa en el sector de Sacra Mensa, donde llega a ahondarse hasta los -2500 metros. Durante este trayecto es posible observar una inmensa Terraza de Erosión labrada en los materiales que componen a Tempe Terra, que en algunos sitios sobrepasa los 100 kilómetros de ancho.

Las secciones indican que la zona de máxima erosión hidrodinámica, se localiza en la margen izquierda de Kasei Valles Norte, en inmediaciones de Sacra Mensa, tal como se observa en las figuras 62, 63 y 64, lugar que recibió frontalmente la mayor parte de la fuerza que traía el flujo en su desplazamiento rectilíneo desde su origen en Echus Chasma, luego del punto de inflexión del Canal Principal en Nilus Dorsa. Su conformación geomorfológica hace posible concluir que a través de Kasei Valles Norte, se desplazó gran porcentaje del volumen de flujo que discurría por el Canal Principal de Kasei Valles.

Posteriormente al llegar a la Isla Fluvial del Cráter Sharonov, el canal toma una marcada forma de Artesa, sin ampliar su sección de manera considerable. Hasta este lugar, la altura promedio de las paredes del canal oscila entre 800 a 1000 metros. En la figura 71 se aprecia una zona de erosión máxima por parte de los flujos que han modelado a Kasei Valles, ya que aunque el canal se ha profundizado hasta casi 3500 metros, está flanqueado por dos Terrazas de Erosión, tanto en Tempe Terra como en Sharonov y la altura de sus paredes se aprecia disminuida hasta casi 500 metros.

Al finalizar Sharonov y en cercanía a Chryse Planitia, el canal se amplía y adquiere un comportamiento de río trenzado, donde los canales localizados al Sur, se aprecian con mayor profundidad de aquellos ubicados al Norte, igualando la cota de -3600 metros alcanzada por Kasei Valles Sur.

8.1.4 SECCIONES COMPARATIVAS KASEI VALLES NORTE (KVN) – KASEI VALLES SUR (KVS)

Con el propósito de hallar diferencias o semejanzas desde el punto de vista morfométrico, en el comportamiento de los canales Kasei Valles Norte y Kasei Valles Sur, estos son analizados de manera simultánea, labor que se facilita por su disposición espacial.

Figura 74.

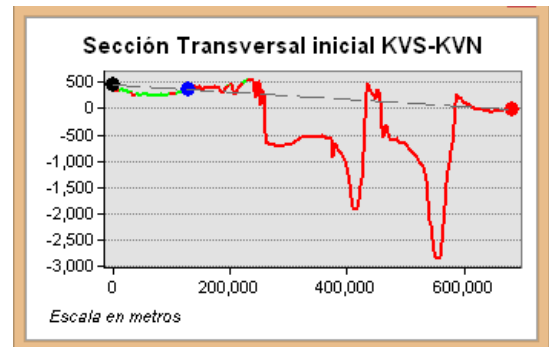
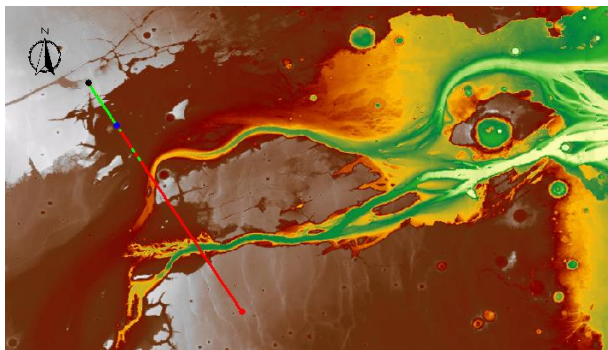


Figura 75.

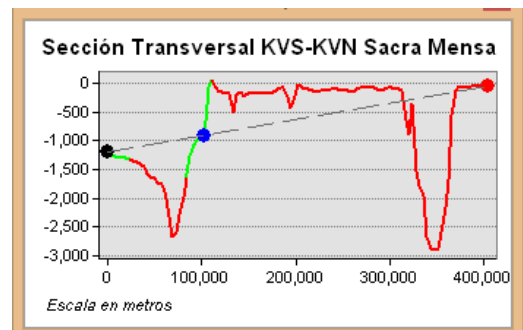
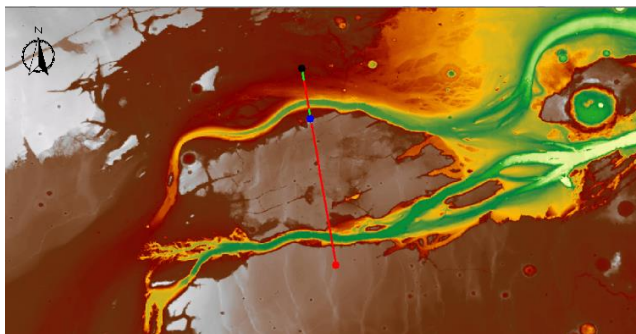


Figura 76.

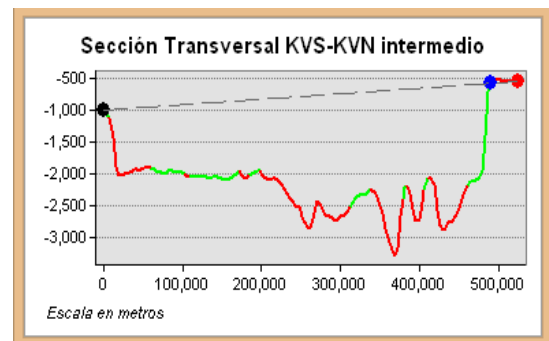
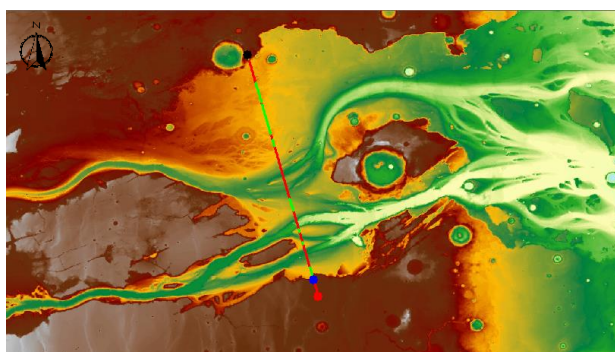


Figura 77.

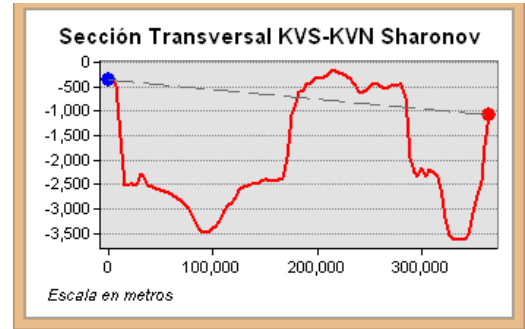
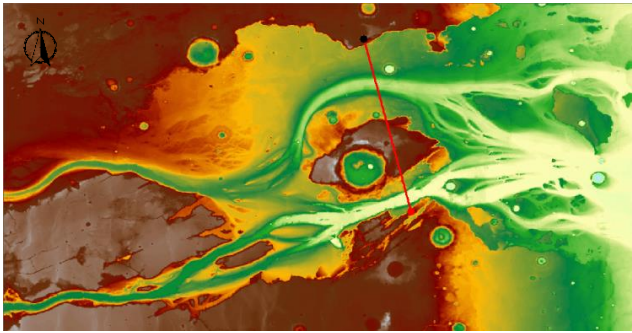


Figura 78.

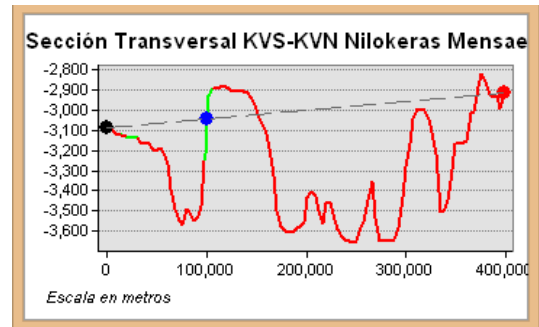
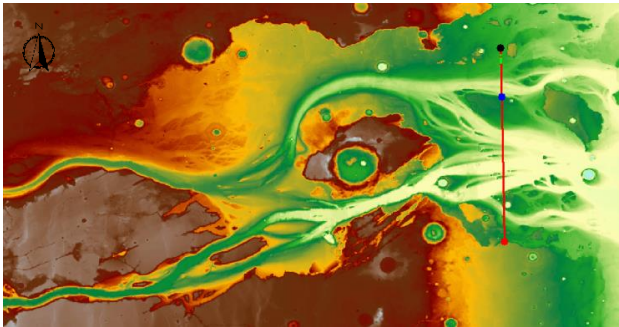
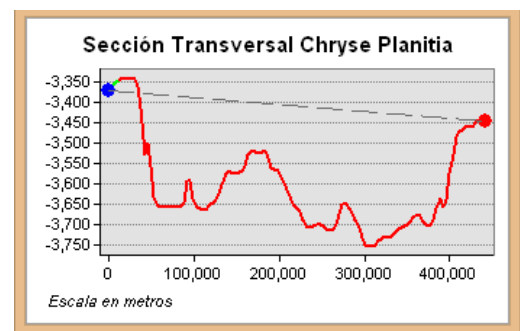
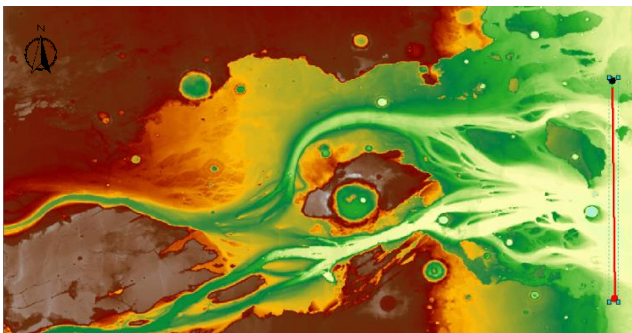


Figura 79.



En la sección transversal inicial (Figura 74), efectuada a manera de contexto desde los sectores, tanto en Tempe Terra como en Lunae Planum, que no fueron afectados por la acción hidrodinámica de los flujos que conformaron a Kasei Valles, es posible apreciar la alta correlación que existe entre las alturas máximas de Tempe Terra, Sacra Mensa y Lunae Planum. Así mismo, es notoria la diferencia en profundidad de ambos canales, siendo mayor la sima de Kasei Valles Sur, con una diferencia de 1000 metros entre los dos. Sobresale de igual manera, las amplias Terrazas de Erosión en las márgenes izquierdas de estos.

Ambos canales derivados del Canal Principal, poseen una estrecha sección en “V” hasta llegar a la Isla Fluvial de Sacra Mensa. Entre ambos se observa una diferencia de profundidad de aproximadamente 300 metros, a favor de Kasei Valles Sur (Figura 75).

Cuando se analiza la sección de ambos canales, en la parte intermedia entre la Isla Fluvial de Sacra Mensa y la Isla Fluvial del Cráter Sharonov, detallada en la figura 73, se observa en Kasei Valles Norte una Terraza de Erosión cercana a los 200 kilómetros de ancho y paredes casi verticales en la margen derecha de Kasei Valles Sur. A la altura del Cráter Sharonov, la sección transversal se amplía notablemente y ambos cauces adquieren forma de artesa, situación que fue posible debido a la menor compactación de los depósitos de Ejecta generados por este cráter de impacto. No obstante, la margen derecha de Kasei Valles Sur, presenta una mayor verticalidad, probablemente debido a su composición litológica, menor afectación por discontinuidades geológicas de origen tectónico o adquiridas desde su génesis.

En la figura 78, se observan múltiples secciones de canales adventicios, existentes en la zona donde los dos canales hacen su transición de rectos a trenzados. De igual manera es posible apreciar que los canales de Kasei Valles Sur, tanto el central como los secundarios, alcanzan una profundidad mayor que aquella lograda por Kasei Valles Norte. Esta condición se conserva, hasta alcanzar finalmente el nivel base de Chryse Planitia (Figura 79).

De acuerdo al Mapa Geológico de Marte 20M (Tanaka-USGS, 2014), tanto las unidades geológicas que conforman a Tempe Terra como Lunae Planum y la Isla Fluvial de Sacra Mensa, son consideradas unidades de montaña de edad Hesperiana Temprana, por lo que podría asumirse que son singenéticas.

Dado las anteriores evidencias halladas en las secciones transversales de los canales de Kasei Valles y teniendo en cuenta que las formaciones en las cuales fueron labrados los canales en el área de interés, tienen características litológicas similares, es posible asumir que la mayor profundización hallada en Kasei Valles Sur, se debe a la posible acción de eventos tectónicos de basculamiento hacia el Sur, que forzaron a que la acción de socavación por parte de los flujos, generara una mayor profundidad del cauce en Kasei Valles Sur.

8.2 PERFILES LONGITUDINALES DE LOS CANALES DE KASEI VALLES

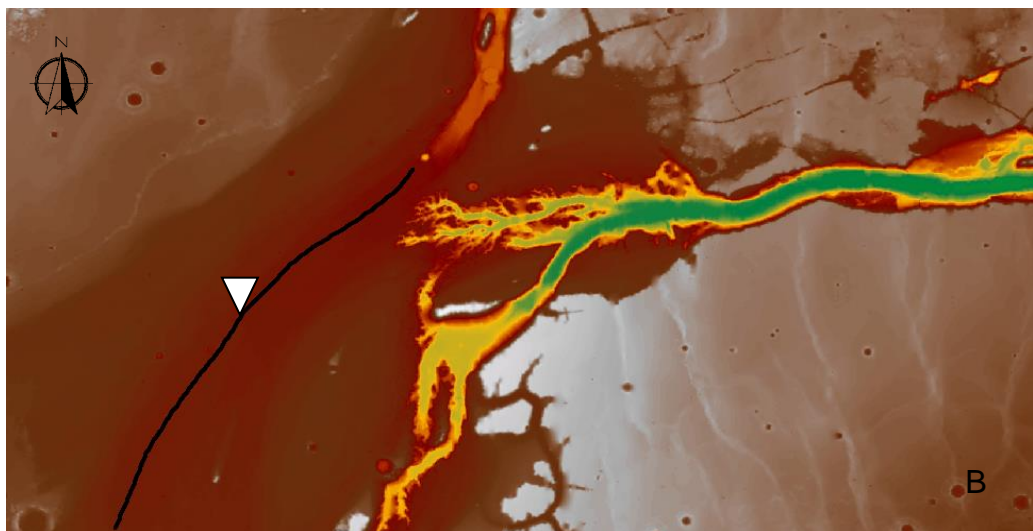
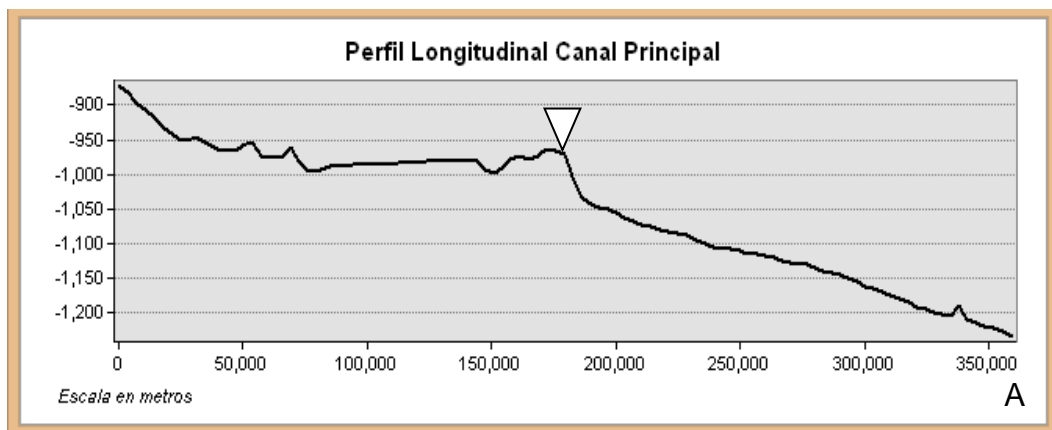
8.2.1 CANAL PRINCIPAL

Para este canal se identifica un solo cauce, desde su origen en la zona Echus Chasma. Posteriormente en el lugar de inflexión del rumbo, el cual ocurre en Nilus Dorsa a una latitud de 20°, toma una marcada morfología trenzada, diferenciándose claramente los canales Kasei Valles Norte y Kasei Valles Sur.

No obstante desde una latitud de 15° , es donde realmente comienza a formarse un brazo secundario hacia el sector Este, que se transforma kilómetros más adelante, en el canal Kasei Valles Sur. Para el propósito de la presente investigación, únicamente se analizará el segmento del Canal Principal, que se incluye en la delimitación oficial de Kasei Valles, efectuada por la International Astronomical Union (IAU).

El perfil analizado en la figura 76, muestra que el Thalweg de los primeros 180 kilómetros del Canal Principal, desciende desde -850 metros con una pendiente suave, casi horizontal en los últimos 100 kilómetros de este segmento inicial, hasta la profundidad de -950 metros. Al llegar hasta este punto, se aprecia un salto altimétrico de casi 100 metros, a los 20° de latitud, para luego volverse uniforme el descenso de la pendiente hasta alcanzar -1250 metros, luego de recorrer 200 kilómetros (Figura 80).

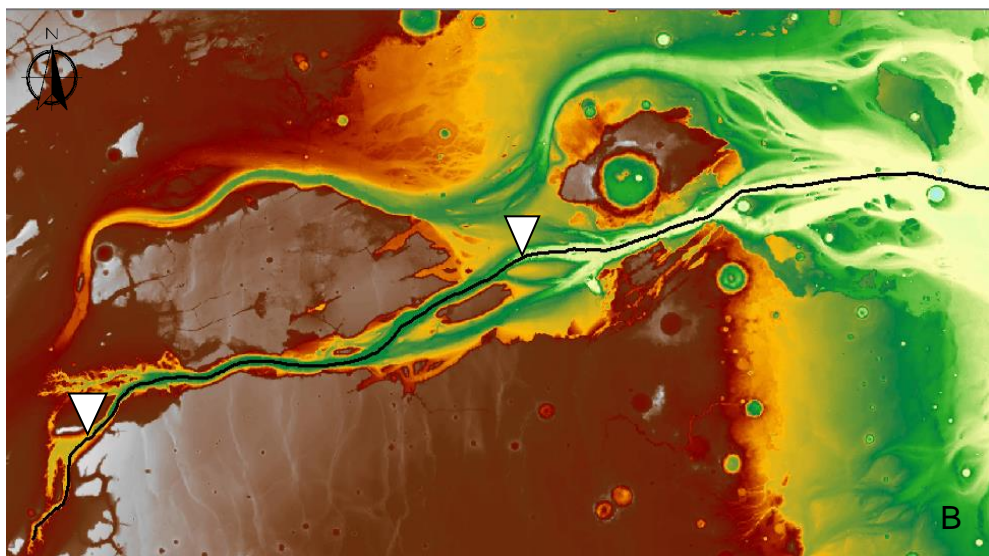
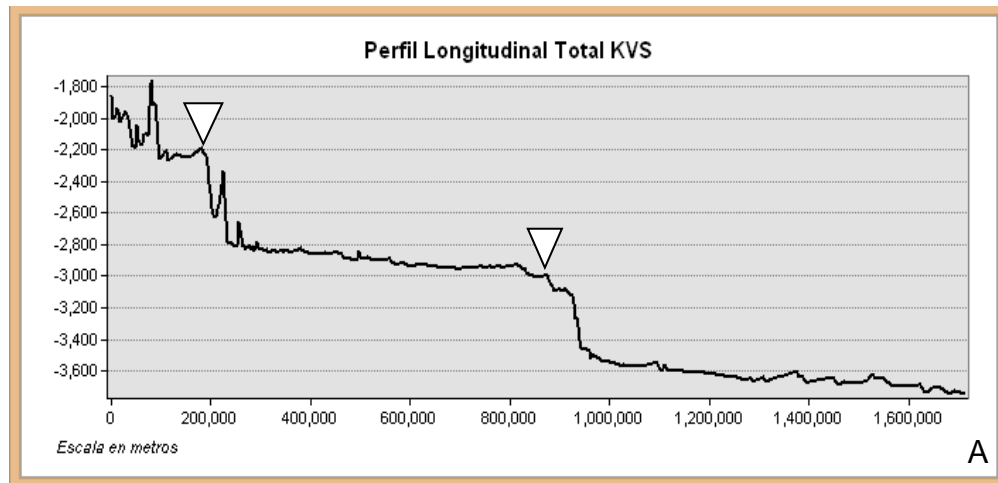
Figura 80. A) Perfil longitudinal del Canal Principal. El triángulo indica un salto altimétrico. B) Localización del perfil, en una vista de detalle del DEM de Kasei Valles.



8.2.2 KASEI VALLES SUR (KVS)

Comienza a definirse como un cauce aparte del Canal Principal, desde una latitud de 15° . Presenta a lo largo de su recorrido, que inicia en -1900 metros y culmina en -3700 metros de profundidad, tendencia a ramificarse en brazos secundarios (sectores de Sacra Mensa y Cráter Rongxar). Se aprecian dos saltos altimétricos notables, ambos de 600 metros de altura. El primero de ellos en el sector de Nilus Mensa a 20° de latitud y el segundo salto en la zona del complejo de cataratas en el área de Lunae Mensa. No obstante la gran profundidad a la que llega este canal, su totalidad no posee alta pendiente. Muestra de ello es que desde el kilómetro 200 hasta el 900, únicamente se profundiza 200 metros y el descenso total de 1.800 metros es logrado en 1.700 kilómetros de recorrido (Figura 81).

Figura 81. A) Perfil longitudinal del canal Kasei Valles Sur. El triángulo indica un salto altimétrico. B) Vista general del DEM de Kasei Valles, en la cual se localiza el perfil.

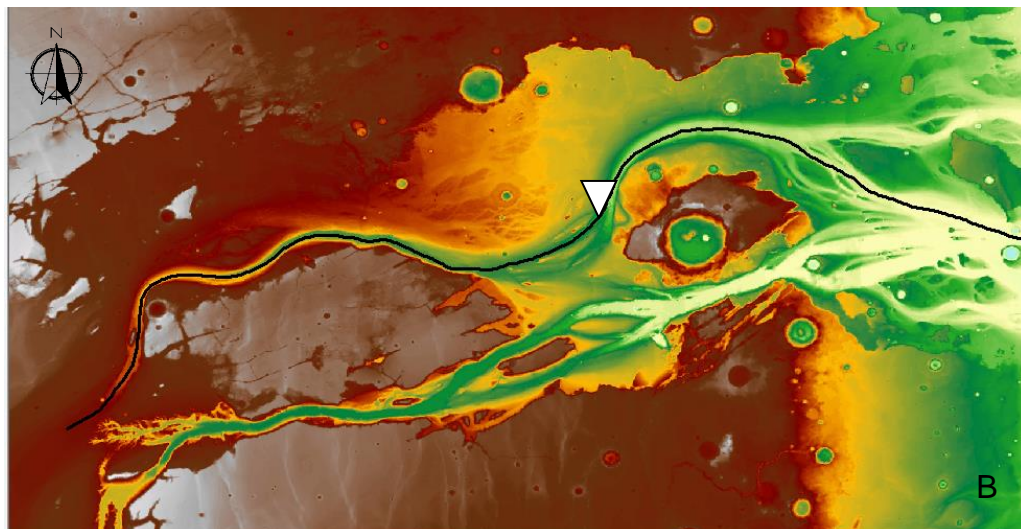
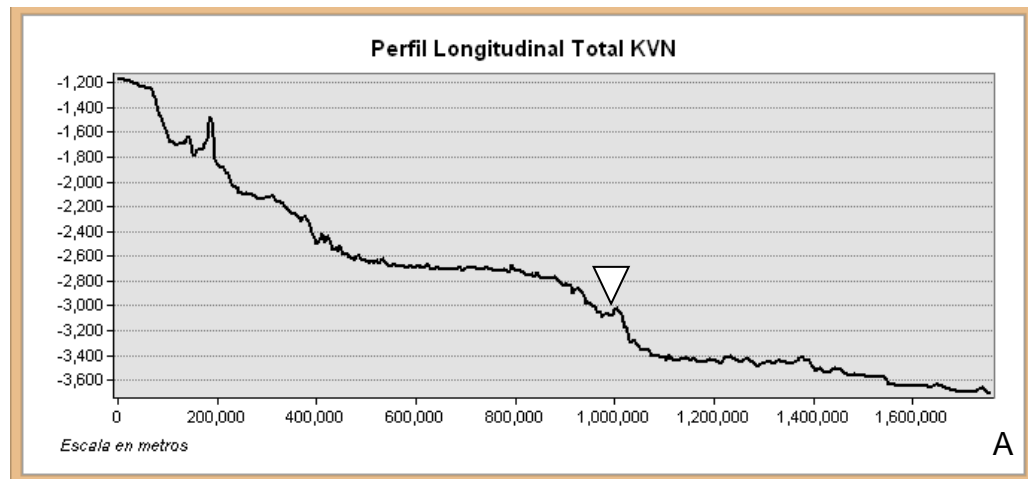


8.2.3 KASEI VALLES NORTE (KVN)

Morfológicamente es una extensión del Canal Principal de Kasei Valles. En el sector distal de la Isla Fluvial del Cráter Sharonov, adquiere las características de un canal trenzado, hasta que finalmente alcanza a Chryse Planitia.

En general posee una pendiente mayor a aquella que tiene Kasei Valles Sur y su descenso altimétrico conserva una pendiente constante, profundizándose 2.400 metros en una distancia de 1.700 kilómetros. Es posible apreciar un salto altimétrico de 400 metros al inicio de Sharonov, lugar donde el canal cambia la forma de su sección y se amplía. Este desnivel está alineado en dirección aproximada Norte-Sur, con el salto altimétrico existente en Kasei Valles Sur en la zona del complejo de cataratas de Lunae Mensa (Figura 82).

Figura 82. A) Perfil longitudinal del canal Kasei Valles Norte. El triángulo indica un salto altimétrico. B) Localización del perfil, en una vista general del DEM de Kasei Valles



8.3 ANÁLISIS DEL TRAZADO DE LOS CANALES MAYORES DE KASEI VALLES

Con el propósito de analizar el trazado de los canales de Kasei Valles, se utilizará el denominado Índice de Sinuosidad (P), el cual se define por la siguiente expresión:

$$P = LT/LV$$

Donde LT es la longitud del Thalweg y LV es la longitud en línea recta del valle, desde su nacimiento hasta la desembocadura.

Dado lo anterior y aunque el sector denominado por la IAU como Kasei Valles no incluye su lugar de nacimiento, es necesario realizar este análisis de sinuosidad desde el sector de Echus Chasma, el cual ha sido señalado por diversos autores como su punto de origen.

De acuerdo a Pedraza (1996) el trazado de los canales fluviales, puede ser de los siguientes tipos:

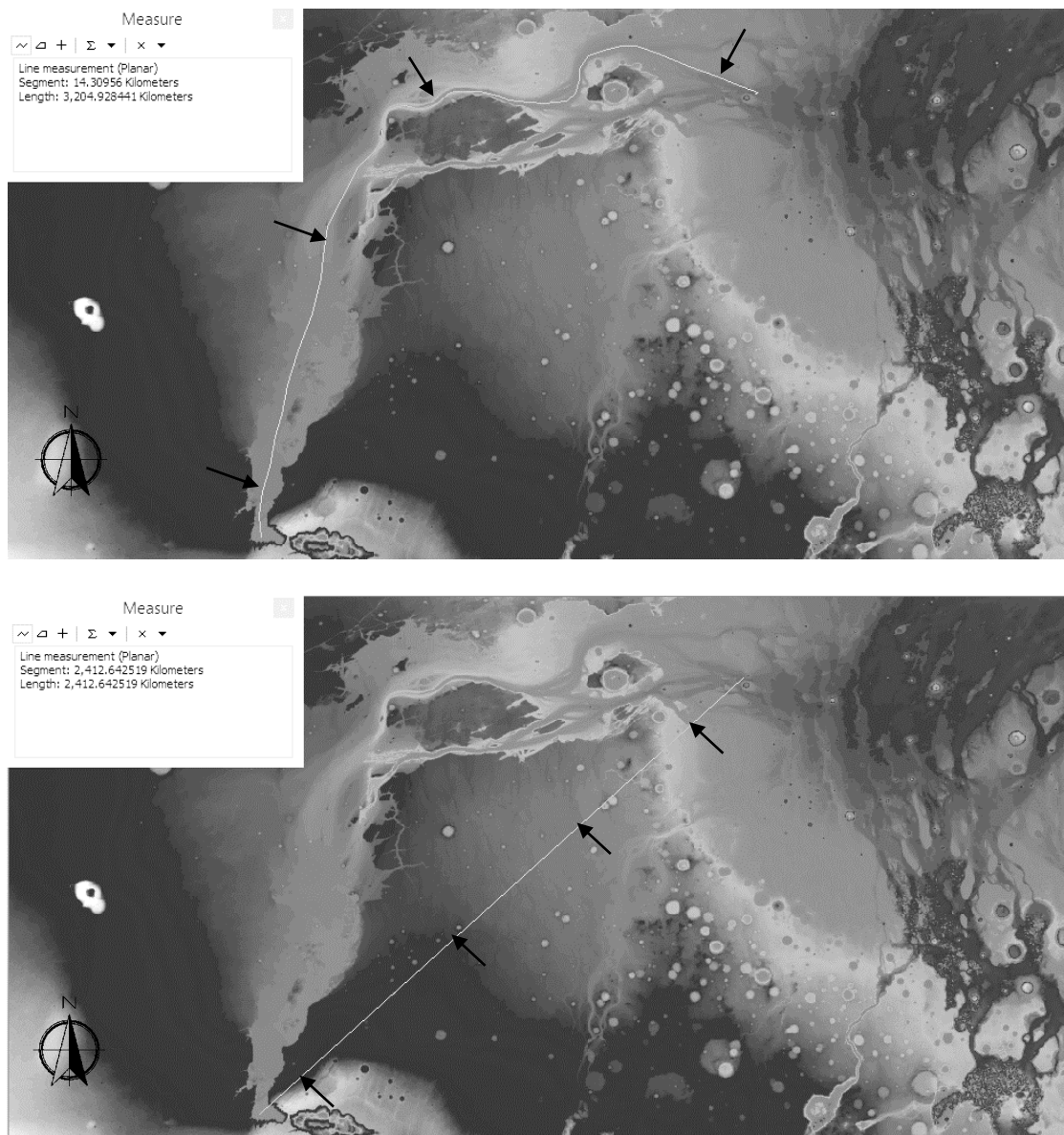
- Rectilíneo. De cauce inestable que tiene la tendencia a evolucionar en otro tipo de canal. Da cuenta de una gran energía y capacidad erosiva. Sinuosidad baja (<1.5)
- Anastomosado. De gran capacidad de transporte y sedimentación. Al cambiar su trayectoria según el relieve y los sedimentos, son menos rectos. En ocasiones tienen canales múltiples o canales divididos dentro de su propio cauce.
- Meandriforme. Alta sinuosidad (>1.5) donde la parte cóncava es erosiva y la parte convexa, es el lugar donde se depositan los sedimentos. Suelen tener un único canal.

Como se ha descrito anteriormente, en el sector de Kasei Valles el canal principal original, se divide en dos canales secundarios que han sido denominados Kasei Valles Norte (KVN) y Kasei Valles Sur (KVS). Debido a la gran escala de estos canales, se realizará el análisis de sinuosidad considerando el canal principal más el trazado de cada una de estas ramificaciones.

8.3.1 INDICE DE SINUOSIDAD CONSIDERANDO KASEI VALLES NORTE

Mediante un Sistema de Información Geográfica (SIG), se obtiene a partir de la imagen planetaria MOLA, la longitud del Thalweg del Canal Principal más el canal Kasei Valles Norte (KVN), desde Echus Chasma hasta la desembocadura en las tierras bajas de Chryse Planitia, tal como se observa en la figura 83.

Figura 83. (Arriba). Detalle de la imagen MOLA planetaria en escala de grises, donde se marca con línea blanca (indicada por flechas), la longitud del Thalweg del canal principal más el canal KVN. (Abajo). Detalle de la imagen MOLA global, en la cual se indica con línea blanca (indicada por flechas), la distancia en línea recta entre origen y la desembocadura.



Fuente de las imágenes: NASA's MOLA Science Team. Procesamiento de los datos mediante Arc GIS 10.1. Elaboración propia.

De acuerdo a los datos obtenidos, se obtiene la Sinuosidad para el Canal Principal más Kasei Valles Norte, de la siguiente manera:

$$P = LT/LV, \text{ donde } LT= 3204,92 \text{ kilómetros y } LV= 2412.64 \text{ kilómetros}$$

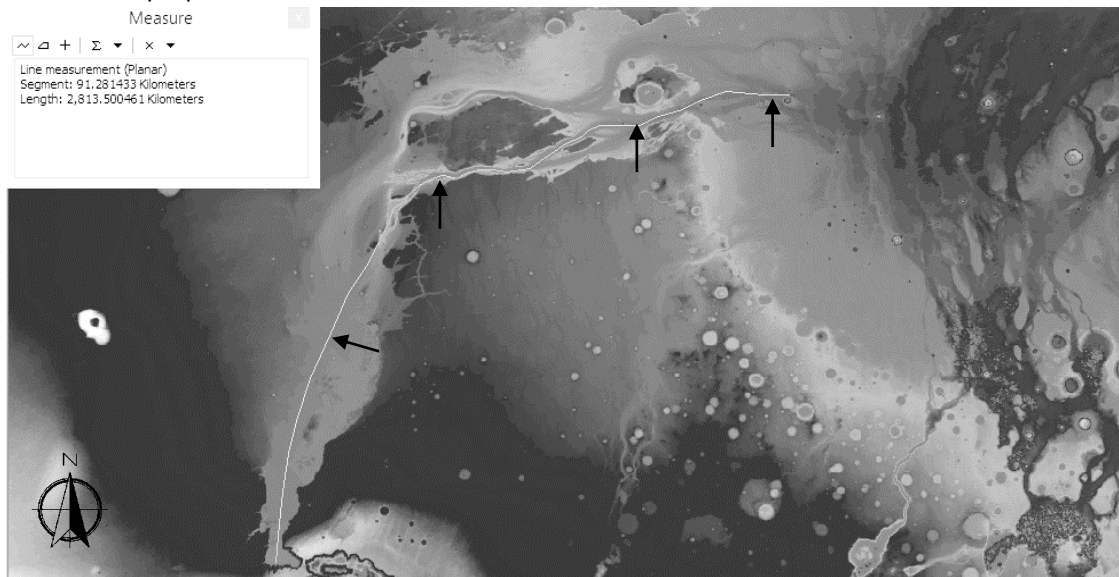
$$P = 1.33$$

Teniendo en cuenta este resultado, se obtiene que el Canal Principal más Kasei Valles Norte, se encuentra en la categoría de Canal Rectilíneo

8.3.1 INDICE DE SINUOSIDAD CONSIDERANDO KASEI VALLES SUR

Para este cálculo, se considera el Thalweg del Canal Principal más el canal Kasei Valles Sur, el cual se distingue cerca de los 15° de Latitud, donde Kasei Valles tiene su lugar de inflexión en rumbo (Figura 84).

Figura 84. Detalle de la imagen global MOLA en escala de grises, donde se marca con línea blanca (indicada por flechas), la longitud del Thalweg del canal principal más el canal KVS. Fuente de las imágenes: NASA's MOLA Science Team. Procesamiento de los datos: elaboración propia.



Fuente de las imágenes: NASA's MOLA Science Team. Procesamiento con Arc GIS 10.1. Elaboración propia.

Posteriormente, al calcular la Sinuosidad para el Canal Principal más Kasei Valles Sur, se obtiene:

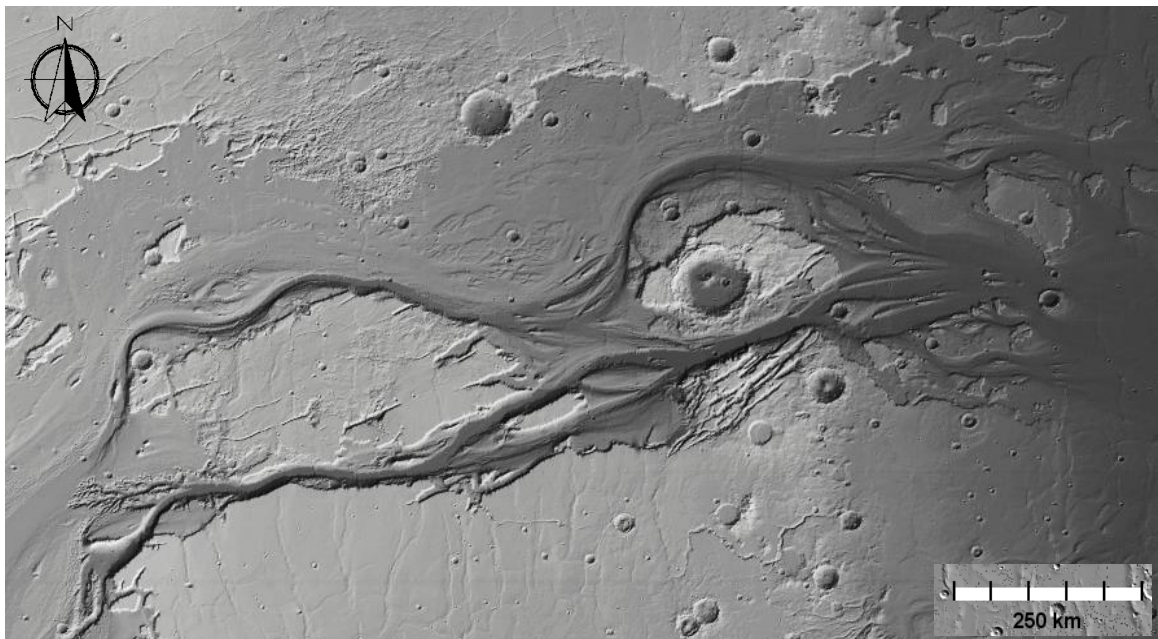
$$P = LT/LV, \text{ donde } LT= 2813,50 \text{ kilómetros y } LV= 2412.64 \text{ kilómetros}$$

$$P = 1.16$$

El resultado nos indica, que el Canal Principal más Kasei Valles Sur, se clasifica como un canal Rectilíneo.

Los anteriores análisis geométricos de los canales de interés, concluyen de manera precisa que el comportamiento de este gran Outflow Channel, desde su nacimiento en Echus Chasma hasta su desembocadura en Chryse Planitia, es el de un canal Rectilíneo. Sin embargo, al analizar específicamente el marco geográfico de Kasei Valles, se observa que este evoluciona a un canal Trenzado (Braided channel), en el lugar de inflexión descrito en líneas anteriores, en el sector de Nilus Dorsa. Evidencia de esto, la constituyen los canales Kasei Valles Norte y Kasei Valles Sur, así como sus canales adventicios, que han sido mencionados con anterioridad (Figura 85). Cabe resaltar que aunque ambos canales poseen el índice de Sinuosidad de un canal rectilíneo, el recorrido de Kasei Valles Sur es más recto.

Figura 85. Composición efectuada con el Hillshade obtenido del DEM de Kasei Valles y un mosaico de imágenes THEMIS IR, donde se resalta el carácter de canal trenzado que adquiere el cauce del canal original, con los canales KVS y KVN, así como sus demás canales adventicios.



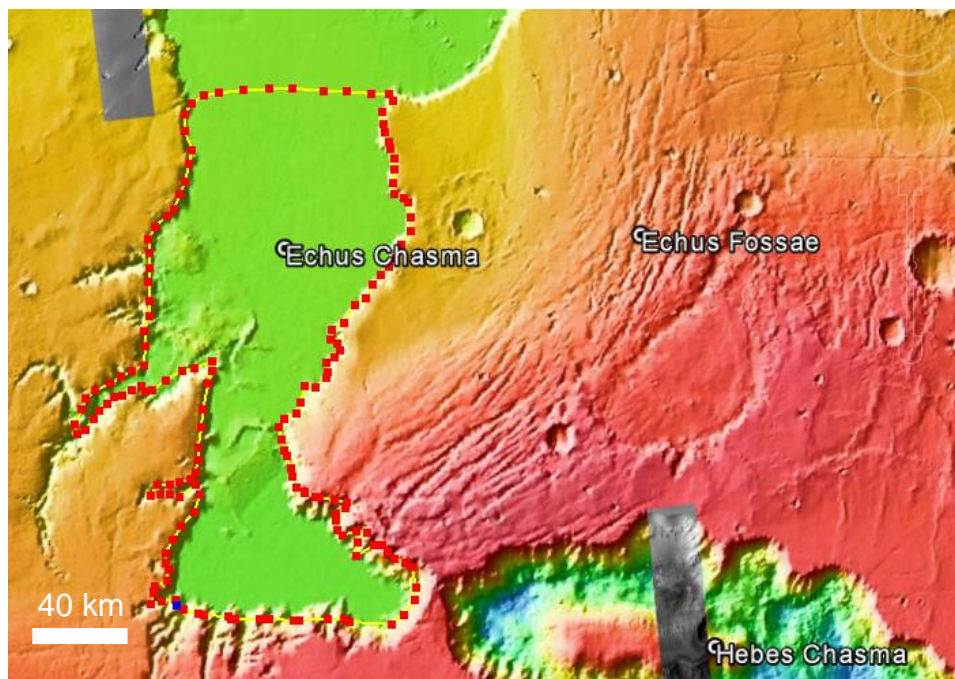
Fuente de las imágenes: NASA's MOLA Science Team. Procesamiento mediante ERDAS 11 y Arc GIS 10.1. Elaboración propia.

Según Pedraza (1996), para realizar un estudio hidrológico e hidráulico de un canal, es importante conocer las descargas y volúmenes de agua que lo crearon, así como su fuente y evolución. Tradicionalmente, para el cálculo de la descarga y volúmenes de agua en un canal, son utilizadas las ecuaciones de Continuidad y de Manning.

Aunque en el presente texto, se aborda la geomorfología y morfometría de los canales mayores de Kasei Valles, desde su analogía con canales producidos por corrientes fluviales, se considera que no es posible realizar un análisis hidráulico e hidrológico, que considere la descarga y volúmenes de agua que potencialmente modelaron su relieve actual, debido a que sus características no posibilitan la aplicación de métodos y ecuaciones convencionales. En su origen no se aprecia una zona de recarga, no posee tributarios y no es posible la delimitación de una cuenca. Así mismo, hasta este punto no se ha conocido con certeza el número de eventos que formaron los canales y si el agua líquida participó en su geomorfogénesis. No obstante lo anterior y de acuerdo con lo hallado en este estudio, la cantidad de agua superficial que hubiese estado disponible en la zona de Echus Chasma, para la generación de una potencial inundación, habría sido de $8.16 \times 10^{13} \text{ m}^3$.

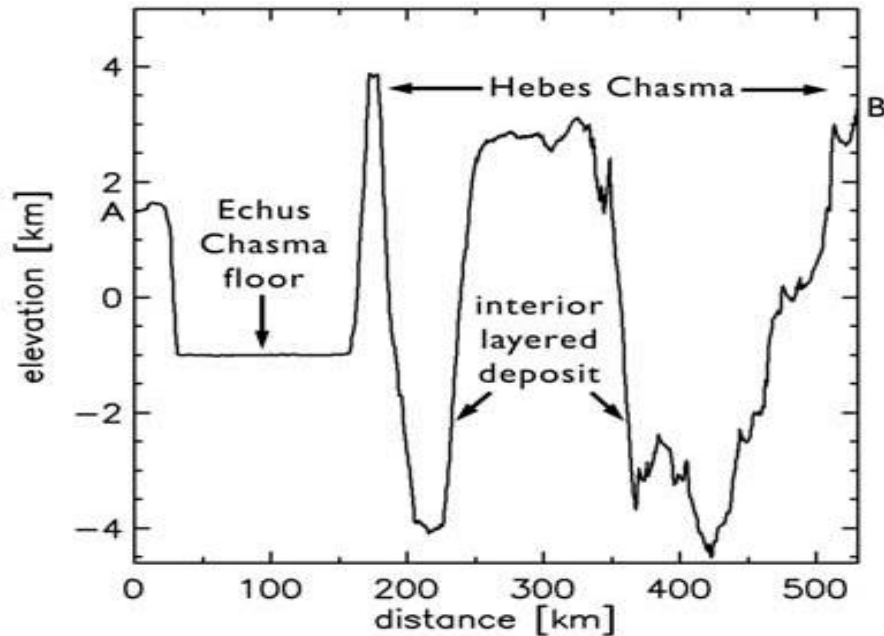
Este cálculo resulta del producto del área calculada para el polígono de Echus Chasma, donde se propone en el presente trabajo, es el origen de los canales de Kasei Valles y una profundidad media de esta depresión, tomada con respecto al perfil efectuado por Harrison y Grimm (2008), de Echus Chasma y Hebes Chasma, con la cual comparte similitudes fisiográficas, donde el piso de Echus Chasma, aparece tres kilómetros por encima de su profundidad original, en comparación con Hebes Chasma (Figuras 86 y 87).

Figura 86. Hillshade de datos MOLA + color, en la que se aprecia con puntos rojos, el polígono de Echus Chasma al cual se le ha calculado el área.



Fuente: NASA/ASU/MOLA Team. Imagen Procesada con Arc GIS 10.1 .Elaboración propia.

Figura 87. Perfil realizado desde Echus Chasma (A) hasta Hebes Chasma (B), donde se aprecia la diferencia de profundidad entre ambas depresiones, lo que es indicativo de la probable profundidad inicial de Echus Chasma.



Fuente: Tomado de Harrison y Grimm (2008)

En conclusión, con el análisis Morfométrico de los Canales de Kasei Valles, es factible deducir una fuerte influencia de factores de origen tectónico y/o litológico, tanto en el control de su trayectoria como en su perfil longitudinal. Grandes saltos indican la existencia de discontinuidades estructurales o diferencia de competencia de las rocas ante la erosión mecánica, que determinan el gradiente de profundización de los canales, máxime si se tiene en cuenta que la pendiente general de los canales a lo largo del recorrido, no es alta.

Así mismo, la diferencia de profundidad existente entre los canales de Kasei Valles Norte y Kasei Valles Sur y que se aprecia a favor de este último, indica la existencia de un basculamiento de origen tectónico hacia el Sur.

Las secciones transversales de los canales e imágenes de sensores remotos, muestran extensas Terrazas de Erosión, generadas por un agente modelador de alta capacidad denudativa.

9. HIPÓTESIS DE LA GEOMORFOGÉNESIS DE KASEI VALLES

Durante el desarrollo de la investigación, fue posible observar la gran semejanza de los canales de Kasei Valles, con las características de relieves terrestres conformados por mega inundaciones. Así mismo, la enorme diversidad de rasgos geomorfológicos de diferentes tamaños y escalas, que fueron descritos con anterioridad, se replican en su mayoría de manera sorprendente en el planeta Tierra. Es en este punto de la investigación, donde adquiere especial relevancia la Planetología Comparativa, basada para este caso específico, en las imágenes de sensores remotos procesadas y analizadas para los propósitos de esta investigación.

Si bien cada una de las geformas presentes, desde aquellas centimétricas a las que poseen decenas y hasta cientos de kilómetros de longitud, son evidencia de procesos particulares que hicieron parte de la historia evolutiva de los Canales Mayores de Kasei Valles, debido al alcance particular de la investigación, solo se escogieron análogos que cumplieran una razón de escala similar al área objetivo.

La información recopilada en el Catálogo de Análogos Planetarios, por The Planetary and Space Sciences Research Institute- The Open University (2012), bajo contrato de la Agencia Espacial Europea – ESA, incluye una serie de análogos para Marte en el planeta Tierra. Luego de ser contextualizados, aquellos que representan de manera cercana las condiciones de los Canales Mayores de Kasei Valles y su área de influencia, son los siguientes:

Alice Springs, Australia (Figura 88). Localizado a 23.7°S/133.87°E. Descrito en el Catálogo, como lugar análogo para el sector de Chryse Planitia, donde se estableció el Viking 1, cerca de su confluencia con Kasei Valles.

Figura 88. Análogo en Alice Springs, Australia.



Fuente: The Planetary and Space Sciences Research Institute – The Open University (2012)

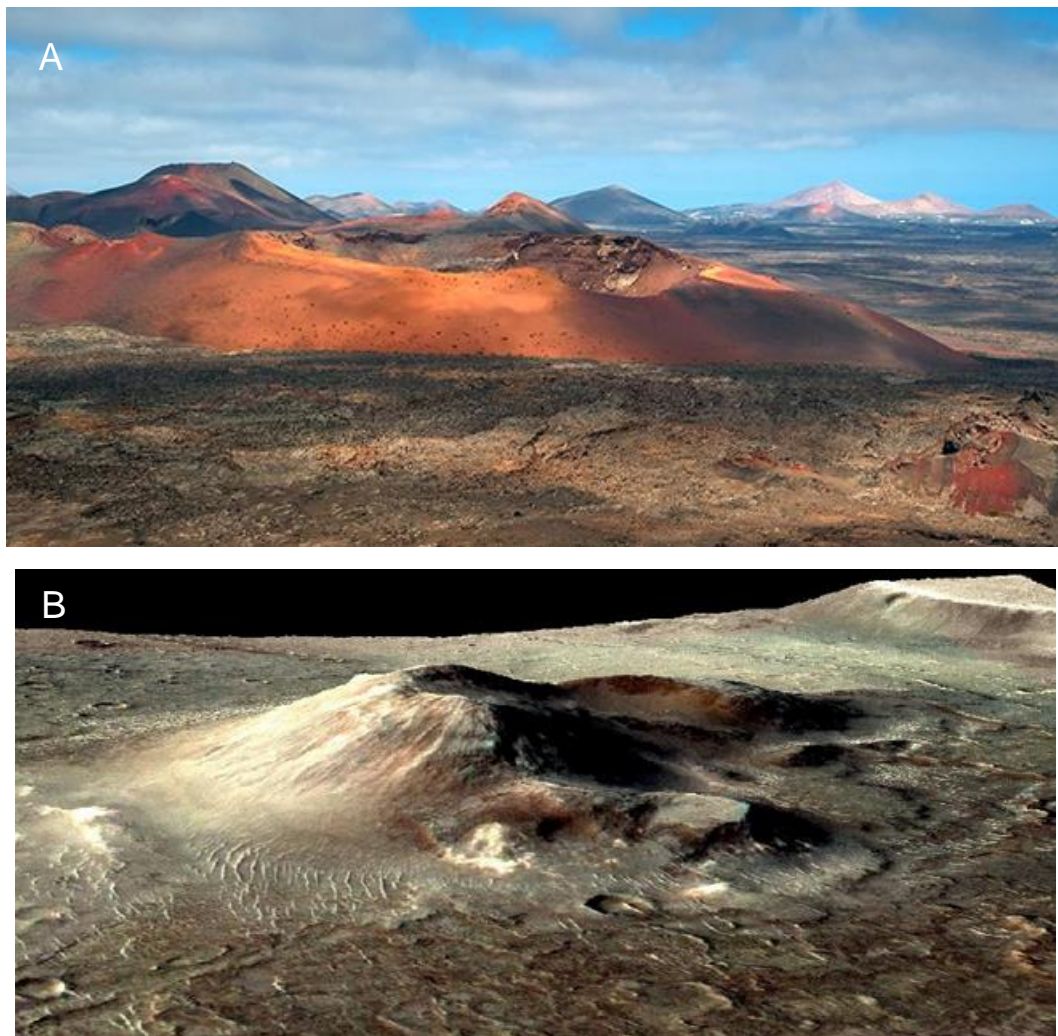
Relevancia: de acuerdo al Catálogo de Análogos Planetarios, en esta área es posible encontrar rasgos fluviales y eólicos, geformas desérticas, dunas en media luna, depósitos fluviales secos, regolito y suelos similares a los observados en los principales canales de Marte, cráteres de impacto, rayos de eyección (Ejecta), drenajes en paredes de cráteres de impacto, depósitos hidrotermales, relieves invertidos, depósitos minerales en aguas ácidas, cortezas de meteorización, formas poligonales, campos volcánicos antiguos.

Islas Canarias, España (Figura 89). Localización $28^{\circ} 13' 27.97''\text{N}/16^{\circ}37'36.60''\text{W}$. Uno de sus lugares emblema, El Teide, es descrito por el Catálogo de Análogos Planetarios, como uno de los lugares más completos para el estudio de símiles de Marte, dada su riqueza geológica y visual, así como por sus condiciones de formación. No obstante, este escenario ideal para la investigación en condiciones similares a Marte, se extiende a todas las Islas Canarias. De acuerdo a Chaparro, L. (2016), *el paisaje esconde un mensaje planetario importante para la exploración del planeta rojo*. Esta importancia, dada su gran similitud de geformas y procesos geológicos presentes y que pudieron haber ocurrido en Marte, ha conducido a que científicos del Instituto de Geociencias de la Universidad Complutense de Madrid y el CSIC, hayan instalado un laboratorio de investigación hace treinta años y que la UNESCO haya declarado más de una decena de geoparques en las islas, y declarado como de interés mundial al geoparque de Lanzarote – Chinijo (Chaparro, L., 2016).

Esta relevancia ha sido refrendada con la firma de un convenio entre el Cabildo de Lanzarote y el Instituto de Geociencias, IGEO (centro mixto CSIC-UCM), que según información publicada en la página web del Cabildo de Lanzarote (2016), *está enmarcado en la línea de investigación sobre análogos planetarios del Laboratorio de Geociencias del IGEO, en estrecha colaboración con el Cabildo y está promovido y dirigido por Jesús Martínez Frías, jefe del grupo de investigación de meteoritos y geociencias planetarias del CSIC, director de la Red Española de Planetología y Astrobiología (REDESPA) y miembro de los equipos de ciencia de la misión NASA-MSL (rover Curiosity), ESA-ExoMars y NASA-Mars 2020*.

Por todo lo anterior, las Islas Canarias se constituyen sino en uno de los principales y más completos análogos de Marte. Allí es posible estudiar de manera amplia procesos volcánicos y astrobiológicos, gracias a la existencia de tubos de lava, flujos de lava basálticos y diferenciados, depósitos piroclásticos inconsolidados, alteración hidrotermal, procesos hidromagmáticos en los que se relaciona el vulcanismo con el agua, diques, cavernas, canales y valles, sistemas de rift basálticos y crestas. Así mismo, las propiedades ópticas de sus formaciones geológicas, poseen una alta similitud con la corteza de Marte.

Figura 89. Análogo en Islas Canarias, España. A. Volcanes en el Parque Nacional de Timanfaya, Islas Canarias. B. Caldera Nili Patera de Marte.



Fuente: A. Luc Viatour, en <http://www.ucm.es/rutas-marcianas-por-los-volcanes-de-lanzarote>
B. NASA, en <http://www.ucm.es/rutas-marcianas-por-los-volcanes-de-lanzarote>

Desierto de Utah, Estados Unidos. Localizado a $38^{\circ}24'23.5''\text{N}/110^{\circ}47'30.85''\text{W}$. Dadas sus características como análogo de Marte, en este lugar cerca de Hanksville - Utah, se ha establecido la Estación de Investigación Mars Desert Research Station –MDRS-, la cual se diseñó con el fin de llevar a cabo investigaciones bajo condiciones similares a las que podrían hallarse en Marte (Figura 90). En este lugar es posible encontrar sedimentos derivados de la meteorización y la erosión, que varían desde ambientes marinos a depósitos fluviales y lacustres que contienen cenizas volcánicas. El paisaje está formado por mesas y escarpes pronunciados (The Planetary and Space Sciences Research Institute – The Open University, 2012).

Figura 90. Mars Desert Research Station, en el Desierto de Utah, Estados Unidos



Fuente: The Planetary and Space Sciences Research Institute – The Open University (2012)

Relevancia: El Catálogo de Análogos Planetarios, lo describe como un lugar que provee un sinnúmero de análogos físicos, químicos y astrobiológicos. Su regolito, suelo y minerales, tienen grandes similitudes con la superficie de Marte. Se encuentran además canales invertidos y exhumados, lechos de antiguos lagos con concreciones y canales fluviales.

Grupo Basáltico del Río Columbia, Estados Unidos. Localizado en los estados de Washington, Oregon, Idaho, Nevada y California (Figura 91).

Relevancia: Se constituye como uno de los mayores flujos de Basalto que hayan discurrido en la Tierra, cubriendo 163.700 Km². En su enorme área, se encuentra el sector denominado Channeled Scablands, descrito en un capítulo anterior, como el principal análogo terrestre para los Canales Mayores de Kasei Valles, dada la similitud de eventos que modelaron sus geoformas, entre los cuales se incluye varias mega inundaciones Pleistocénicas por depósitos de agua del Lago Missoula, en el oeste de Montana y el norte de Idaho, que dejaron tras su paso enormes y profundos canales en las rocas basálticas. Es un complejo de canales fluviales anostomasados, excavados en la roca, cataratas, islas de loess y amplios depósitos de grava. Los estudios de esta región y los procesos de inundación de alta energía que la generaron están permitiendo descubrir y explicar geoformas similares, relacionadas con inundaciones cataclísmicas, tanto en la Tierra como en Marte.

La causa del vulcanismo que generó los flujos basálticos, se cree que se centra en el Punto Caliente de Yellowstone, cerca de Steer Mountain. (The Planetary and Space Sciences Research Institute University, 2012)

Figura 91. Vistas del Grupo Basáltico del Río Columbia, Estados Unidos



Fuente: The Planetary and Space Sciences Research Institute – The Open University (2012)

Desde hace décadas, diversos autores han propuesto varios tipos de mecanismos para explicar la formación de estos gigantescos canales. Entre estas investigaciones predecesoras, se incluyen aquellas que proponen el flujo de agua líquida (Carr, 1986; Masursky et al., 1974).

De igual manera, se han planteado hipótesis donde su formación se explica por la ocurrencia de eventos como:

- Flujos de lava (Leverington, 2011).
- Procesos eólicos (Cutts and Blasius, 1981).
- Flujo de hielo glaciar (Lucchitta, 1982).
- Flujos de dióxido de carbono (Sagan et al., 1973; Coleman, 2003).
- Acción dinámica de flujos de escombros (McCauley et al., 1972; Nummedal and Prior, 1981; Tanaka, 1999).

En años recientes, la comunidad científica se ha inclinado por un escenario donde el responsable de las mega inundaciones, es un flujo alimentado por grandes depósitos de agua en el subsuelo (Baker and Milton, 1974; Carr, 1986, 1996, 2006; Mars Channel Working Group, 1983; Clifford, 1993; Clifford and Parker, 2001; Coleman, 2003; Carr, 2007; Keszthelyi et al., 2007; Leask et al., 2007; Montgomery et al., 2009; Warner et al., 2009; Zegers et al., 2010).

Las explicaciones donde el agua fue el posible actor del modelado de los canales, han dado lugar a inferencias de la existencia pasada de grandes cuerpos de agua estancada en la cabecera de los canales (Baker et al., 1991; Parker et al., 1993; Kargel et al., 1995; Clifford and Parker, 1999; Baker, 2001; Clifford and Parker, 2001; Head, et. Al. 1999; Fairén et al., 2003; Baker, 2006; Harrison and Chapman, 2008; Dohm et al., 2009).

Diversos autores consideran que los Outflow Channel (Canales de Descarga) y las formas de relieve asociadas, son las mejores evidencias que confirmarían la pasada existencia de un amplio sistema de aguas subterráneas y grandes cuerpos de agua superficial en Marte (Head and Pratt., 2001; Masson et al., 2001, Chapman et al., 2009).

No obstante lo anterior, algunos autores han cuestionado la hipótesis del origen fluvial de los canales. Según sostienen, los resultados de los trabajos recientes sugieren que las hipótesis “acuosas” para la formación de los canales de Kasei Valles, sufren de numerosas debilidades y que los mecanismos volcánicos por medio de los cuales pudieron desarrollarse los canales, son dignos de considerarse nuevamente (Leverington, 2011). De acuerdo a esta teoría, las hipótesis donde se supone, existió una posible participación del agua, poseen deficiencias en aspectos como una dependencia de supuestos hidrológicos improbables para Marte, inconsistencia entre la cantidad de agua subsuperficial necesaria para explicar los fenómenos de grandes inundaciones y lo encontrado tanto en las evidencias geoquímicas como la mineralogía de la superficie, la ausencia de claros depósitos fluviales a lo largo de los canales y en su desembocadura. Todo esto conduce a depender de procesos acuosos “exóticos”, para los que no existen análogos conocidos en el sistema solar (Leverington 2011).

El entendimiento del origen de los canales de Kasei Valles, es de vital importancia para la comprensión de la posible abundancia de agua, tanto superficial como subsuperficial en el pasado de Marte, así como su interacción con su geología, clima, la existencia y naturaleza de los probables ambientes hospitalarios para la vida, así como las posibles similitudes entre los procesos que han modelado las superficies de los planetas del sistema solar interior.

Debido a esta relevancia, se propone a continuación un modelo de evolución geológica, que potencialmente condujo a la conformación de este sorprendente conjunto de canales.

9.1 MODELO DE GEODINÁMICA COMPLEJA

El propósito de este trabajo, no es lograr una estricta correlación cronoestratigráfica, de los eventos que hicieron parte del modelado de los canales de Kasei Valles y su entorno, ni redefinir la nomenclatura geológica existente para el Planeta Marte. Esto supondría un alcance diferente al propuesto para esta investigación y requeriría de gran cantidad de recursos humanos y tecnológicos, que no se han proyectado para los objetivos específicos del presente trabajo.

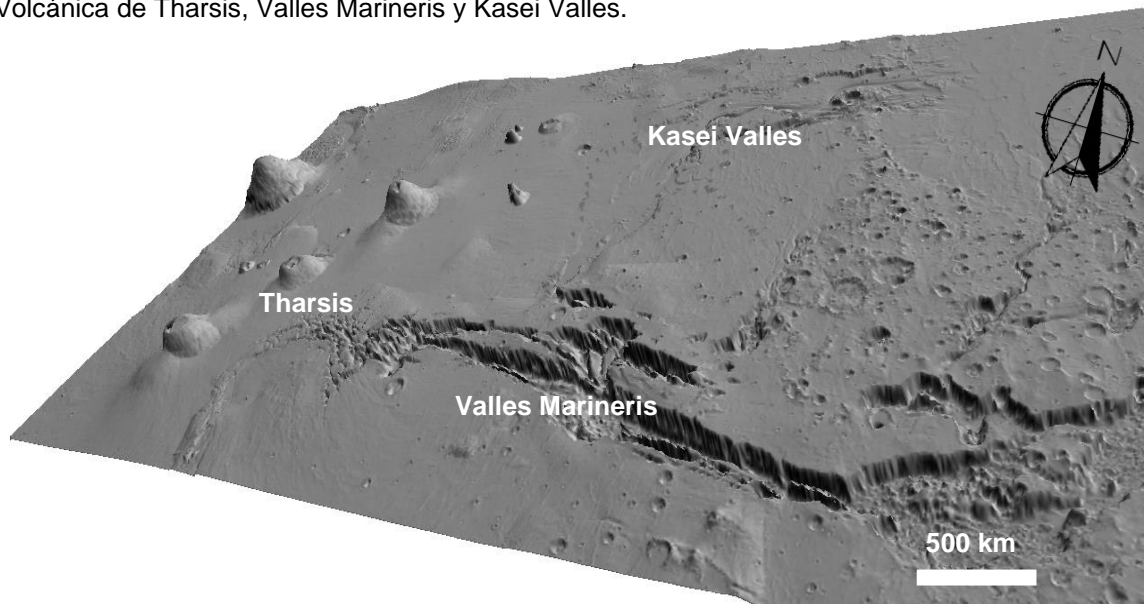
En esta investigación se pretende, mediante el procesamiento e interpretación de imágenes obtenidas a través de plataformas satelitales, proponer una secuencia lógica de procesos geodinámicos, basados en las complejas evidencias halladas a través de los sensores remotos y sus análogos terrestres, con la explícita dificultad de carecer en la actualidad, de la posibilidad de efectuar recopilación de información mediante labores de campo.

Al analizar las evidencias geomorfológicas, geológicas, geofísicas y de sensores remotos, parece plausible concluir la evidente relación geomorfogénica que posee Kasei Valles, tanto con la Provincia volcánica de Tharsis como con el complejo de cañones y valles de lo que se conoce como Valles Marineris. Estos dos grandes rasgos, causados por una intensa geodinámica interna, podrían haber condicionado la formación de este gigantesco “Canal de Descarga (Outflow Channel)”.

De acuerdo con Lucchitta et al. (1992), Valles Marineris comenzó a tomar su forma, a partir de fallas geológicas hace unos 3.500 millones de años. Este fallamiento posiblemente fue causado por la actividad tectónica que acompañó el crecimiento de los volcanes gigantes Ascraeus, Pavonis y Arsia en la provincia volcánica de Tharsis, situados al oeste. A medida que el magma empujaba los materiales de la corteza, toda la región comenzó a abrirse en respuesta a un tirón lento y poderoso de la corteza de Marte.

A medida que las fuerzas tectónicas responsables de la construcción de Tharsis la halaron, es probable que esta corteza se haya agrietado dejando gigantescas fracturas, tales como Valles Marineris, que posee miles de kilómetros de longitud, cientos de kilómetros de ancho y profundidades de hasta 10 kilómetros (Figura 92).

Figura 92. Imagen 3D a partir de un hillshade de datos MOLA, donde se aprecia la Provincia Volcánica de Tharsis, Valles Marineris y Kasei Valles.



Fuente: NASA/ASU/MOLA Team. Procesada con Arc Gis 10.2 (ESRI) y JMARS (Arizona State University Mars Scientific Software Team). Elaboración propia

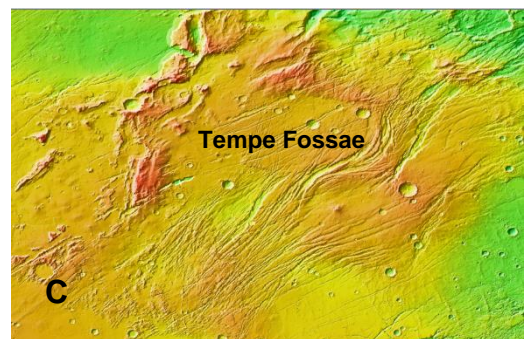
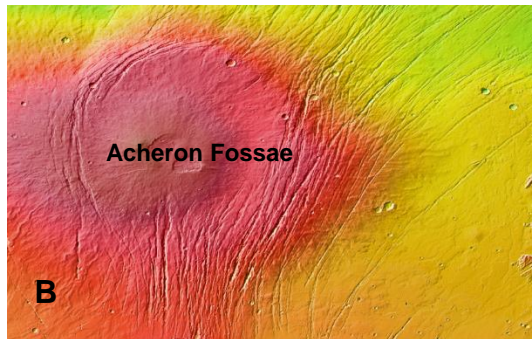
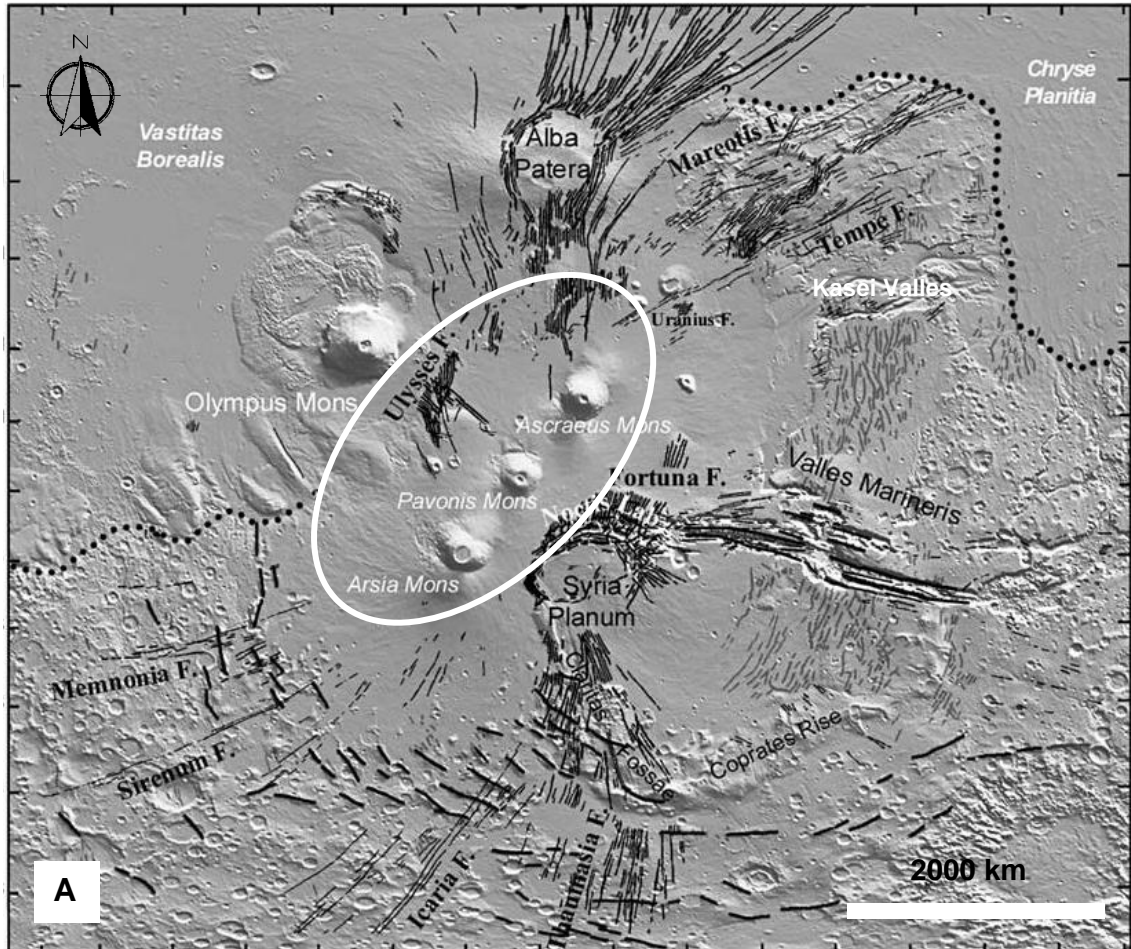
Aunque el complejo de Valles Marineris es la fosa tectónica más sobresaliente asociada al levantamiento de Tharsis, lo hallado permite suponer que no fue el único resultado de estas descomunales fuerzas. Con las imágenes de sensores remotos, es posible observar extensas zonas de fractura, que se propagan de manera radial teniendo como centro a la Provincia Volcánica de Tharsis (Figura 93 A).

Ejemplo de lo anterior lo constituye además, tanto la gran cantidad de crestas alineadas hacia el Norte, en Lunae Planum, como las Fosas y Graben existentes en diversas zonas tanto del hemisferio Norte como del hemisferio Sur, tal como en los sectores de Acheron Fossae y Tempe Fossae (Figura 93 B y C), Fortuna Fossae, Uranius Fossae, así como también en el Sur de Lunae Planum, en áreas como Echus Fossae, aledaña a Echus Chasma.

En estas áreas es posible apreciar la forma curva de estas discontinuidades, lo cual indicaría que los vectores de las fuerzas de tensión no se movieron de manera rígida, sino que fluctuaban a lo largo del tiempo en la región.

De acuerdo a lo descrito en el Mapa Geológico de Marte 20M (Tanaka-USGS, 2014), parte de estas geoformas se encontrarían cubiertas por flujos de eventos volcánicos de edad Amazoniana y se apreciarían en unidades que datan desde el Noachiano medio hasta el Amazoniano.

Figura 93. A. Imagen hillshade de datos MOLA y un mosaico de imágenes THEMIS Day IR. Se resaltan con líneas negras, las discontinuidades geológicas (Tanaka-USGS, 2014), que se irradian desde Tharsis (indicada por la elipse). Con líneas grises, crestas alineadas en Lunae Planum. Se aprecia en la parte media derecha, el sector de Valles Marineris. B y C. Imágenes MOLA + color, donde se detallan las estructuras. Izquierda: Acheron Fossae. Derecha: Tempe Fossae.



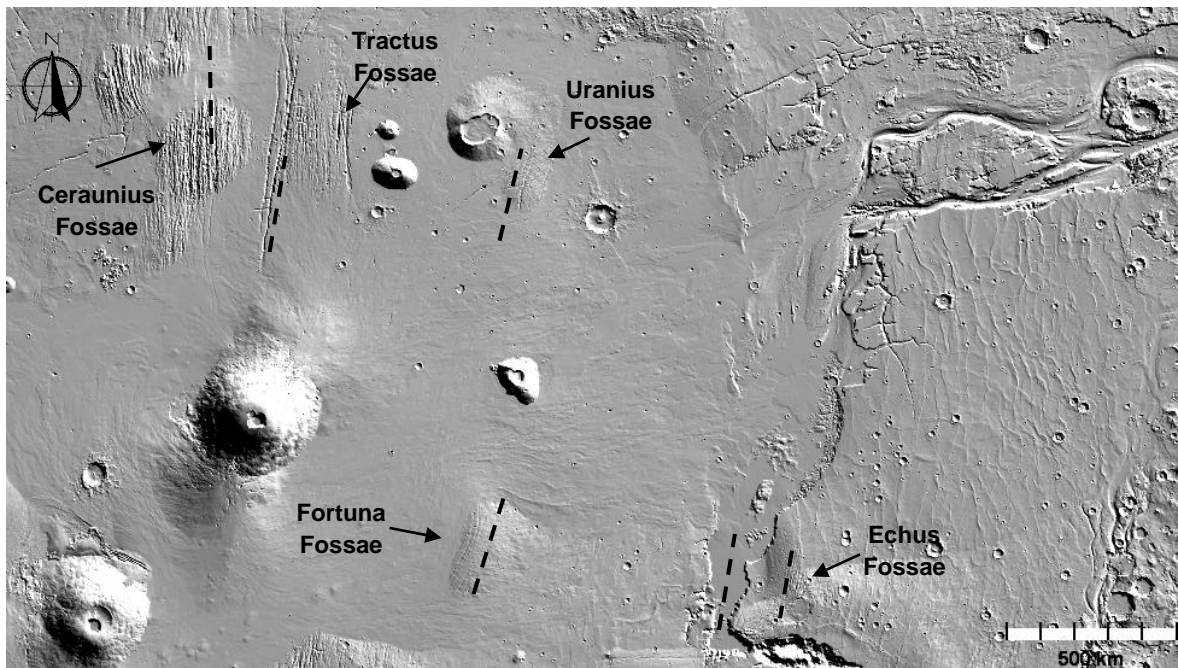
Fuentes: A. Mege et al, 2003. B y C. NASA/ASU/MOLA Team. Procesamiento imágenes B y C efectuado con Arc GIS 10.1 y JMARS. Elaboración propia.

Es en este complejo escenario de geodinámica interna, brevemente evocado en las anteriores líneas, donde se esboza el origen de Kasei Valles. Las evidencias geomorfológicas y geológicas posibilitan asociar la génesis de este gran Canal de Descarga, con los rastros dejados por las fuerzas internas que dieron origen a Valles Marineris y la Provincia Volcánica de Tharsis.

Al realizar una apreciación a escala regional, es notable la similitud que existe entre la dirección de rumbo de las discontinuidades en la corteza (ocasionadas por el levantamiento de Tharsis) y la tendencia general de los canales de Kasei Valles. Los sectores de Fortuna Fossae, Tractus Fossae, Ceraunius Fossae, Uranius Fossae y Echus Fossae, tienen un rumbo entre 5° a 10° al Noreste, muy similar a la dirección general del Canal Principal de Kasei Valles (Figura 94).

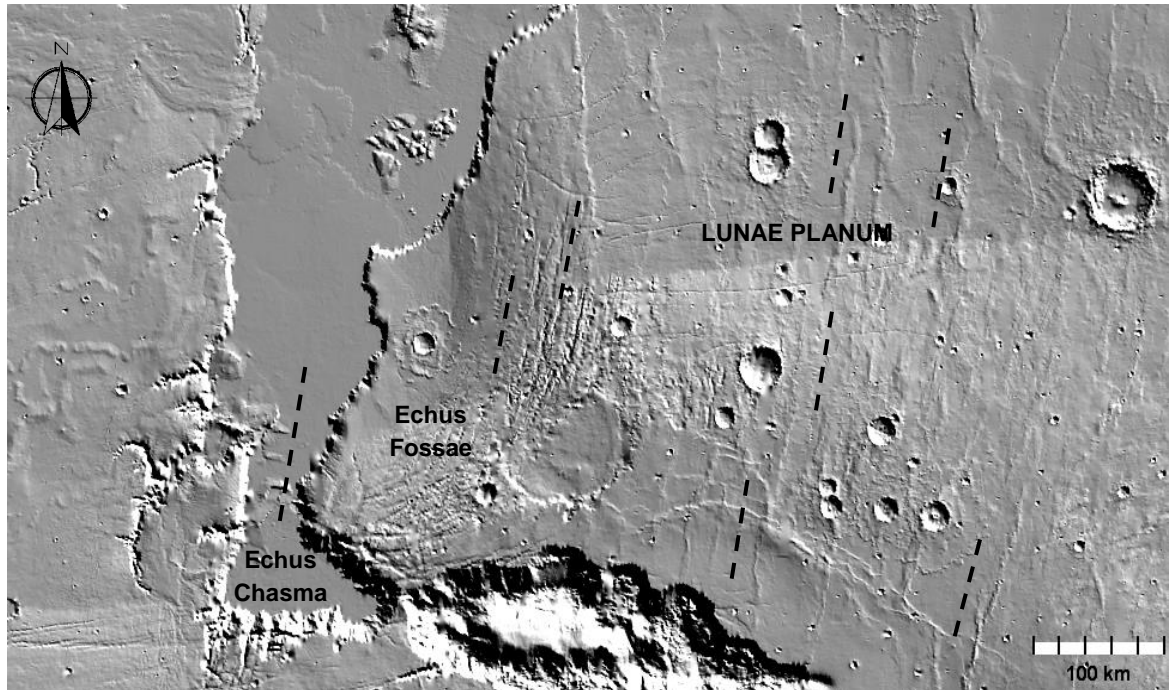
Igualmente, es posible observar que el rumbo de las visibles crestas alineadas del sector de Lunae Planum, posee valores que no exceden los 10° Noreste, conformes con la dirección de trayectoria del Canal Principal, situación que se hace notable cerca de Echus Chasma (Figura 95).

Figura 94. Vista regional de las áreas de Tharsis, Kasei Valles y Tempe Terra. Se observa la similitud que existe entre el sentido de Kasei Valles, con el rumbo (indicado con líneas discontinuas) de Fortuna Fossae, Tractus Fossae, Ceraunius Fossae y Uranius Fossae, el cual no excede los 10° Noreste. Imagen hillshade de datos MOLA.



Fuente: NASA/ASU/MOLA Team. Procesamiento efectuado con JMARS (Arizona State University Mars Scientific Software Team). Elaboración propia.

Figura 95. Las líneas discontinuas indican, el rumbo de las crestas alineadas en el sector de Lunae Planum, así como en la depresión de Echus Fossae, similares a la dirección de trayectoria del canal principal de Kasei Valles. Imagen hillshade de datos MOLA.

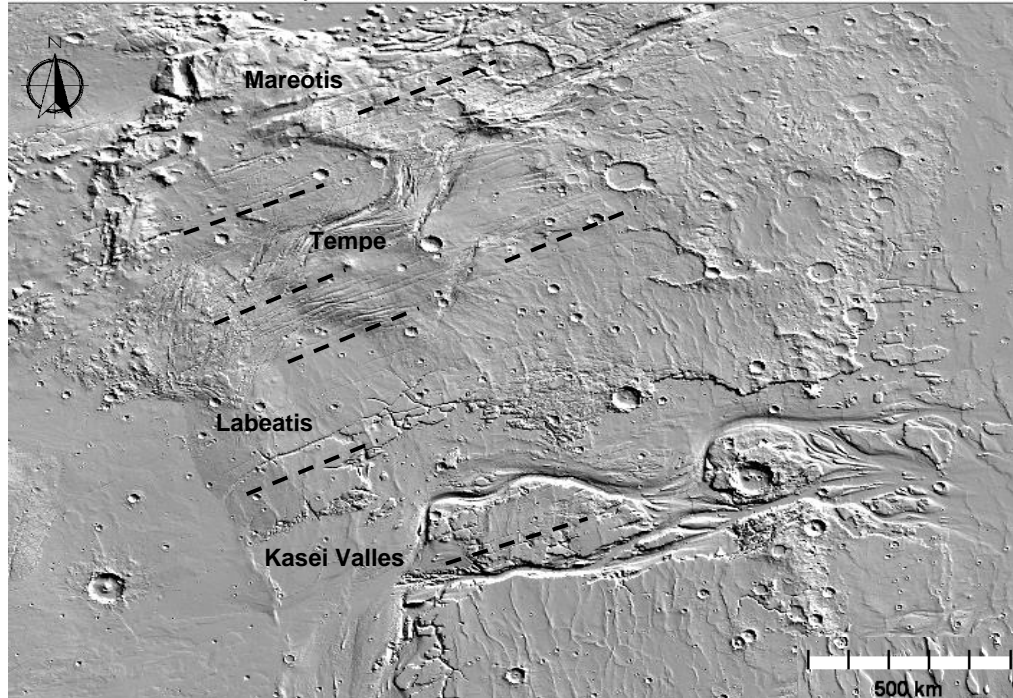


Fuente: NASA/ASU/MOLA Team. Procesamiento efectuado con JMARS (Arizona State University Mars Scientific Software Team). Elaboración propia.

De otro lado, el sentido de los canales Kasei Valles Norte y Kasei Valles Sur, oscila entre 70° a 80° Noreste, el cual es similar a la trayectoria de 70° Noreste que poseen las discontinuidades en las áreas de Labeatis Fossae, Mareotis Fossae y Tempe Fossae (Figura 96).

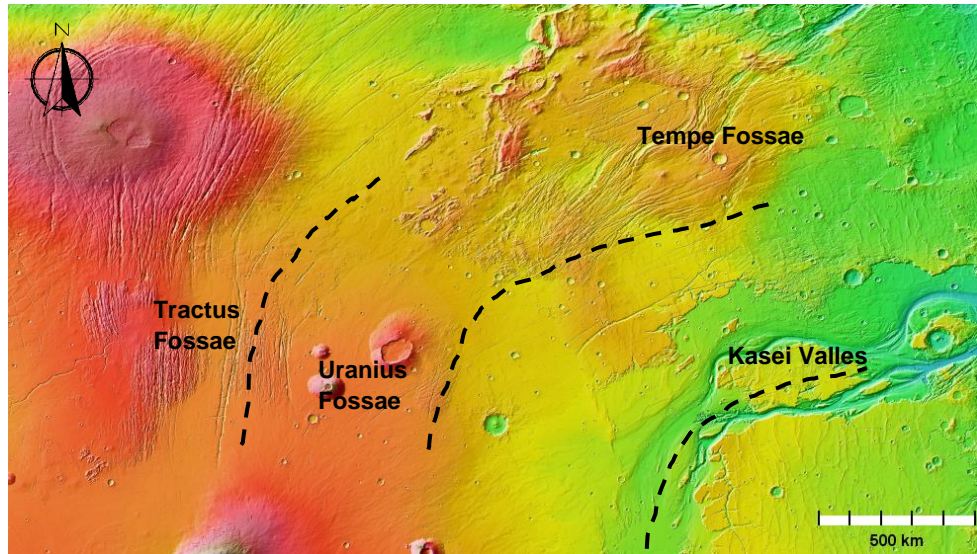
Como consecuencia del dinamismo de los eventos de carácter regional que conformaron la Provincia Volcánica de Tharsis, entre las áreas de Tractus Fossae, Uranus Fossae y Tempe Fossae, localizadas en la Provincia Tectónica de Tempe Terra, es posible observar cambios marcados de trayectoria de las líneas de fractura, los cuales poseen características similares al punto de inflexión de Kasei Valles, localizado en el sector de Nilus Dorsa y Uranium Dorsae. En este lugar, tal como se ha descrito con anterioridad, el Canal Principal adquiere una marcada morfología de río trenzado y es posible diferenciar los canales Kasei Valles Norte y Kasei Valles Sur (Figura 97).

Figura 96. Hillshade basados en datos MOLA, donde las líneas discontinuas indican el rumbo 70° Noreste, de las Fosas en el sector de Tempe Terra, similar a la trayectoria de los canales Kasei Valles Norte y Kasei Valles Sur.



Fuente: NASA/ASU/MOLA Team. Procesamiento efectuado con JMARS (Arizona State University Mars Scientific Software Team). Elaboración propia.

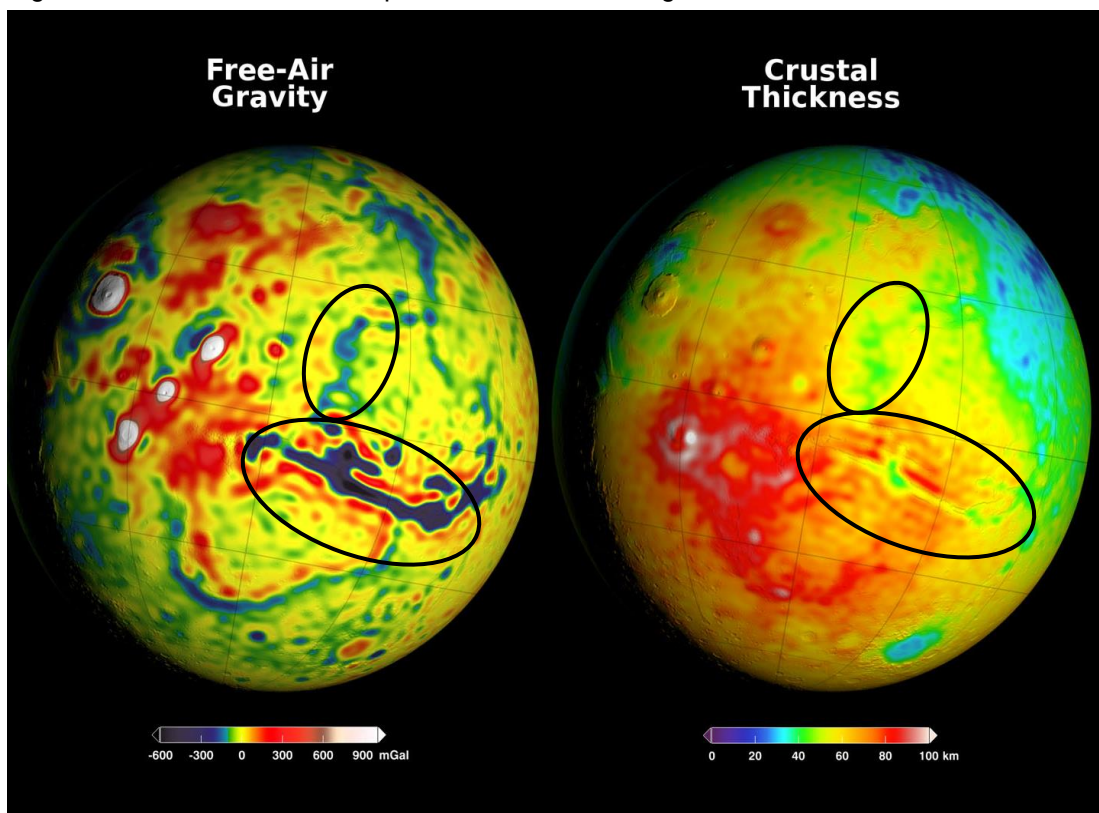
Figura 97. Imágenes MOLA+ color, donde se detalla la inflexión de discontinuidades en la Provincia de Tempe Terra, guardando similitud con el cambio de trayectoria de los canales de Kasei Valles.



Fuente: NASA/ASU/MOLA Team/USGS. Procesamiento efectuado con JMARS (Arizona State University Mars Scientific Software Team). Elaboración propia.

De igual manera, estudios geofísicos recientes otorgan valiosa información que hace viable proponer escenarios factibles, en los cuales Kasei Valles pudo tener su origen. Los resultados de análisis gravimétricos del Planeta Marte, obtenidos mediante el proyecto Goddard Mars Model (GMM) 3 de la NASA (2016), han permitido efectuar mapas globales del campo de gravedad de Marte, estudiando las trayectorias de vuelo de las plataformas satelitales Mars Global Surveyor (MGS), Mars Odyssey (ODY), y Mars Reconnaissance Orbiter (MRO). Los datos obtenidos de gravedad de Aire Libre y gravedad de Bouguer, fueron procesados en combinación con la altimetría proporcionada por MOLA, para obtener el mapa de espesor de la corteza de Marte. Una alta gravedad indican los lugares donde el manto está más cerca de la superficie, y por lo tanto, donde la corteza es más delgada (Genova et al., 2016). De acuerdo a lo anterior, tanto el sector de Valles Marineris como la zona de canales de Kasei Valles, poseen los valores más bajos de espesor de corteza, en el entorno conformado por la Provincia Volcánica de Tharsis, Valles Marineris, la Provincia Tectónica de Tempe Terra y Lunae Planum (Figura 98), situación que haría probable el ascenso de material desde el manto, a través de estas zonas de debilidad.

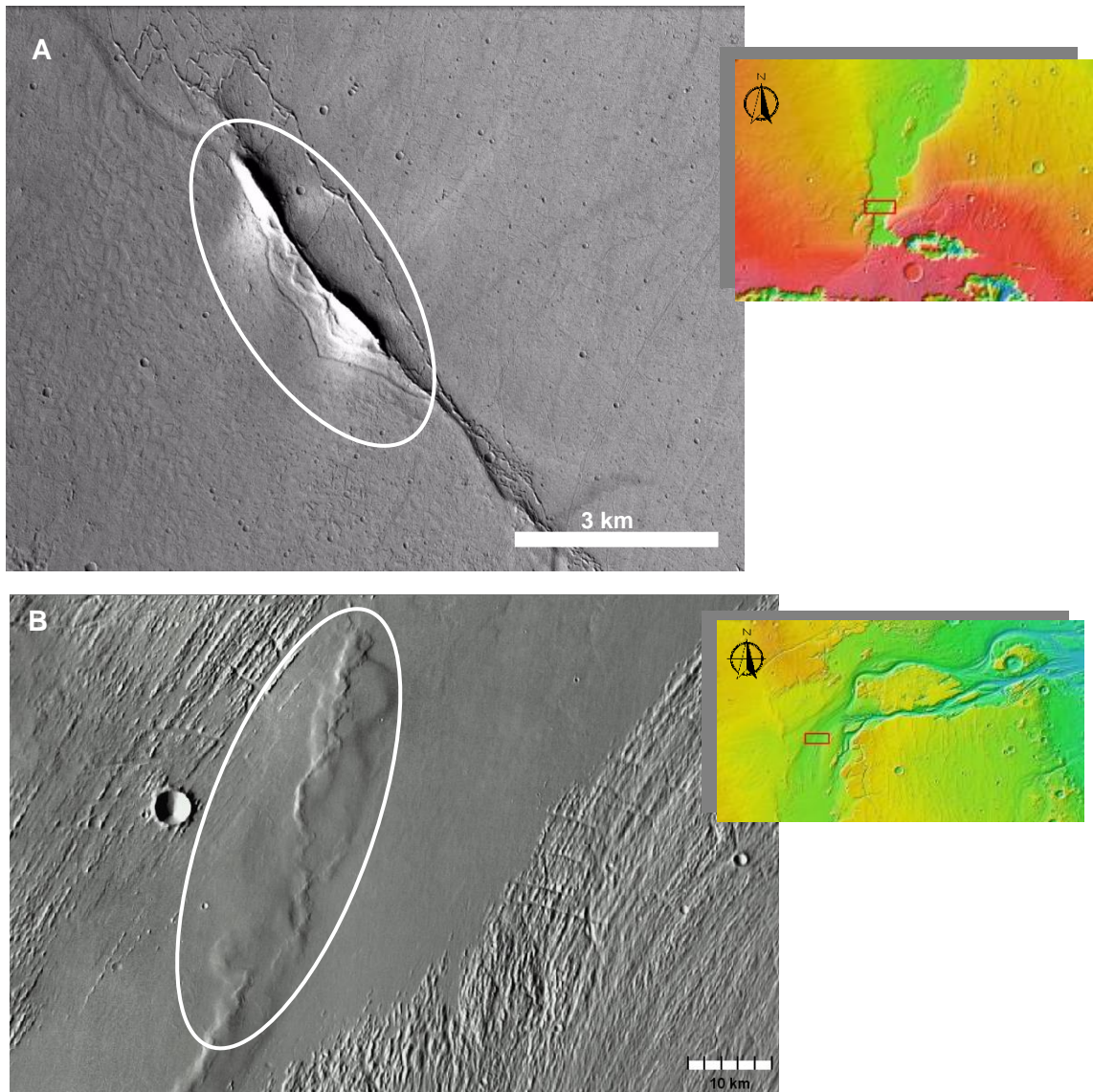
Figura 98. Diagrama de los mapas de Anomalías Gravimétricas y Espesor de la Corteza de Marte. Se aprecia en círculo los sectores de Valles Marineris y Kasei Valles, los cuales según los resultados obtenidos, poseen una corteza delgada.



Fuente: NASA/GSFC/Scientific Visualization Studio (2016).

Es común ver en zonas de fisura o fracturamiento tectónico, la existencia de cuerpos intrusivos a manera de diques. Estos diques no son ajenos al entorno de Kasei Valles y aunque gran parte de los que puedan existir en el área de influencia de los canales, han sido sepultados por los vestigios de eventos deposicionales, es posible observar algunos de ellos incluso intruyendo formaciones de edad Amazoniana (Figura 99).

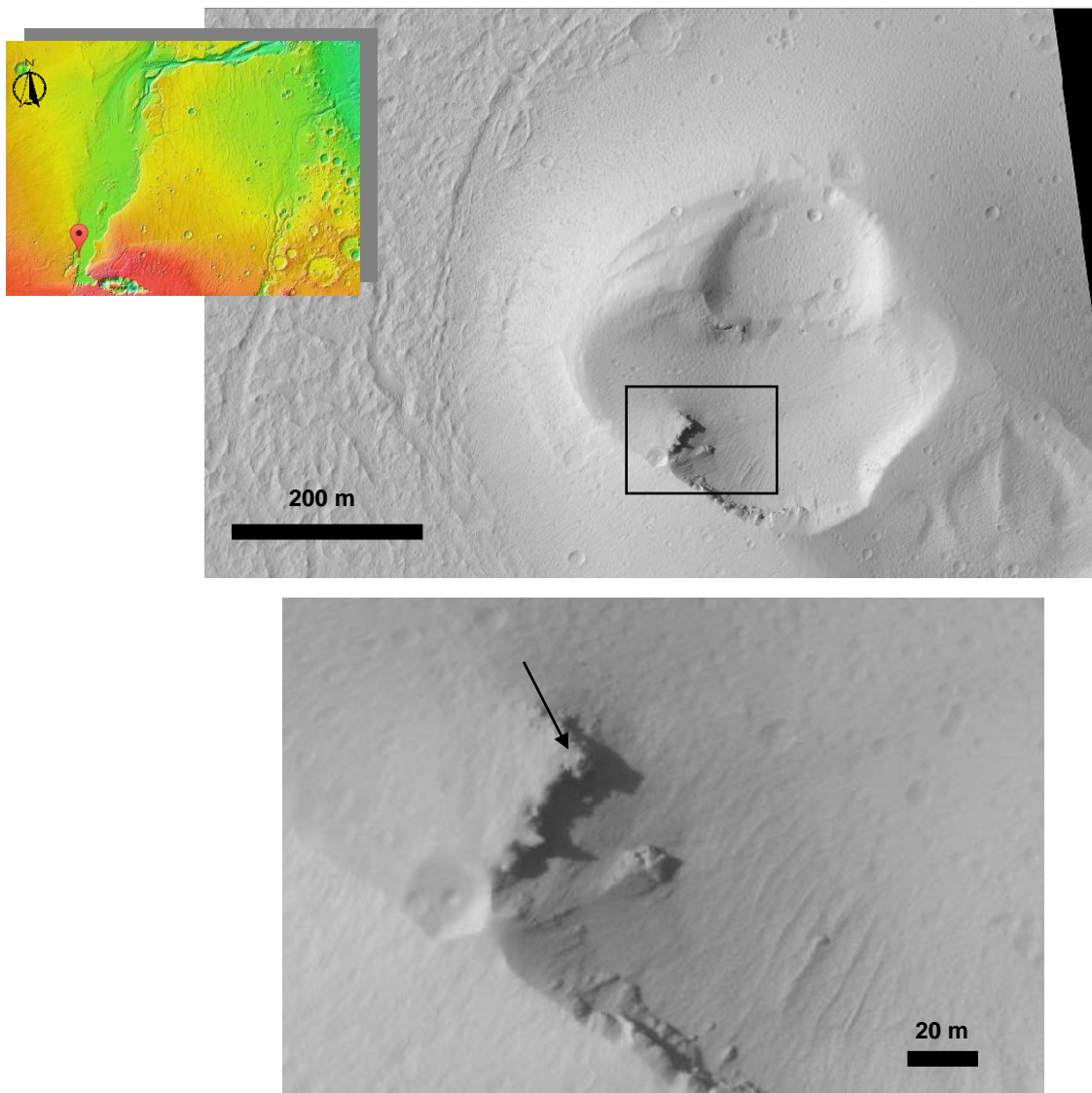
Figura 99. A. Dique, aflorando en una fisura en depósitos Amazonianos, en el sector de Echus Chasma. Imagen Pancromática CTX No P08_004173_1812_XI_01N080W. B. Imagen THEMIS Day IR (Christensen 2006) del sector de Nilus Dorsa, en la cual se aprecian su intrusión a través de una fisura que afecta depósitos de Lahar



Fuente: NASA/ASU/USGS. Procesamiento efectuado con JMARS (Arizona State University Mars Scientific Software Team). Imagen de contexto: NASA/MOLA Team. Procesada con JMARS. Elaboración propia.

Otra muestra de la probable actividad endógena en la zona del Canal Principal de Kasei Valles, la constituiría una pequeña caldera volcánica en el sector de Echus Chasma, diez kilómetros al Oeste del dique de la figura 88A, sobre la misma latitud, la cual fue posible hallar a través de imágenes de alta resolución HiRISE (Arizona State University – ASU). Esta geoforma se encuentra afectada por procesos denudativos y Cráteres de Impacto. En su flanco Suroeste, se observa una columna de lava de 50 metros de longitud (Figura 100), tal como se encuentra en diversos volcanes terrestres (Figura 101).

Figura 100. Caldera Volcánica en el Canal Principal de Kasei Valles, sector de Echus Chasma. El cuadro encierra una columna de lava, detallada en la figura inferior, donde se indica con la flecha. Imagen HiRISE No ESP_033_802_1825_COLOR.



Fuente de las imágenes: NASA/Arizona State University. Procesadas mediante ERDAS 11. Imagen de contexto: NASA/MOLA Team. Procesada con JMARS. Elaboración propia.

Figura 101. Columna de Lava en el borde del Cráter Volcánico La Olleta, Volcán Nevado del Ruiz o Kumanday, Colombia.

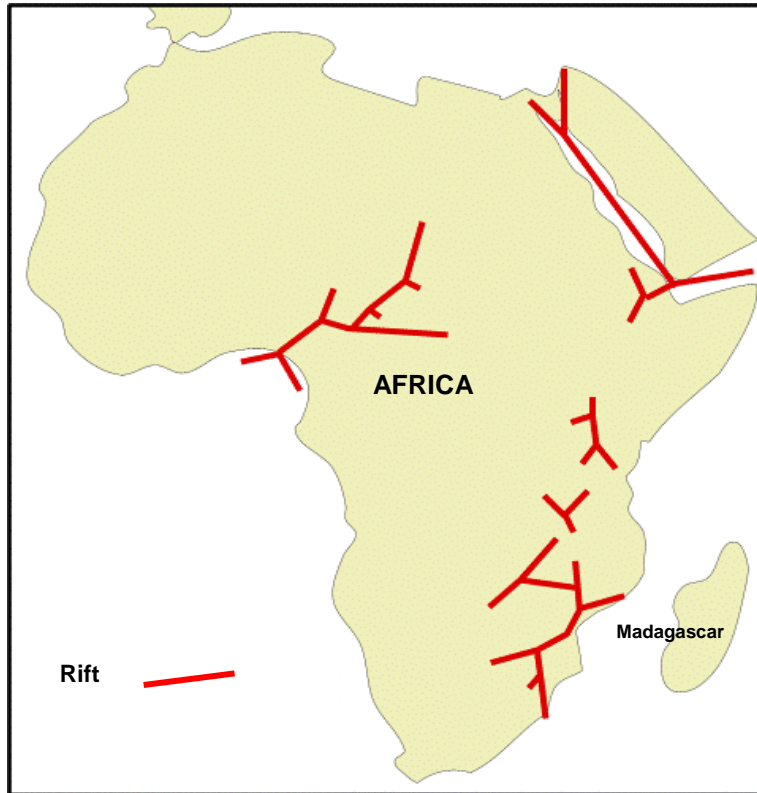


Fuente de la imagen: Servicio Geológico Colombiano, 2012.

Teniendo en cuenta el notorio dinamismo tectónico que ha sucedido en las vecindades de Kasei Valles, las evidencias halladas mediante el uso de sensores remotos, la geomorfología y morfometría de sus canales, su disposición respecto a los accidentes topográficos que conforman el complejo de Valles Marineris, además de la contundente evidencia proporcionada por las recientes investigaciones geofísicas, es posible considerar a Kasei Valles como una gran fosa tectónica, probablemente originado como un Rift abortado de una unión triple durante la apertura de Valles Marineris.

La formación de un Rift implicaría la generación temprana de estructuras tipo Graben, que podría estar asociada con la elevación de la corteza causada por el ascenso de material caliente desde el manto. Este empuje dejaría como resultado una serie de aberturas lineales a manera de brazos, que coincidirían en un punto de unión triple. Durante su evolución, es posible que algún brazo detuviera su avance, hasta convertirse en un Rift abortado. Como analogía terrestre, se cree que el continente africano ha sido dividido por una serie de valles de Rift en varios estados de desarrollo. Los que están en el este de África se encuentran todavía en la corteza gruesa. Los que están en el África occidental están asociados con sedimentos petrolíferos gruesos. En la zona del Mar Rojo el Rift ha avanzado hasta formar un océano estrecho. En el sureste de África, la isla de Madagascar ha sido completamente separada del continente por este proceso (Figura 102).

Figura 102. Esquema generalizado del continente africano, donde se muestra con líneas, las zonas de Rift existentes.



Fuente: modificado de Burke y Whiteman (1973).

Al analizar los datos aportados por los instrumentos a bordo de los diferentes orbitadores de Marte, parece plausible llegar a la conclusión de que esta zona de Rift, se extendía por cerca de 300 kilómetros, a lo largo de Echus Chasma hasta Echus Montes. Este brazo de Rift abandonado o Aulacógeno, que diera origen a los canales de Kasei Valles, podría haber sido modelado posteriormente por diversos agentes de carácter tanto endógeno como exógeno hasta alcanzar su estado actual, en los cuales tuvo gran relevancia el agua. El conjunto de geformas denominadas por la IAU como Echus Montes, se mostrarían como vestigios de lo que alguna vez fuera una barrera natural de la fosa tectónica de Kasei Valles y que posiblemente fueron destruidas de manera parcial, por flujos de origen volcánico provenientes de la Provincia de Tharsis.

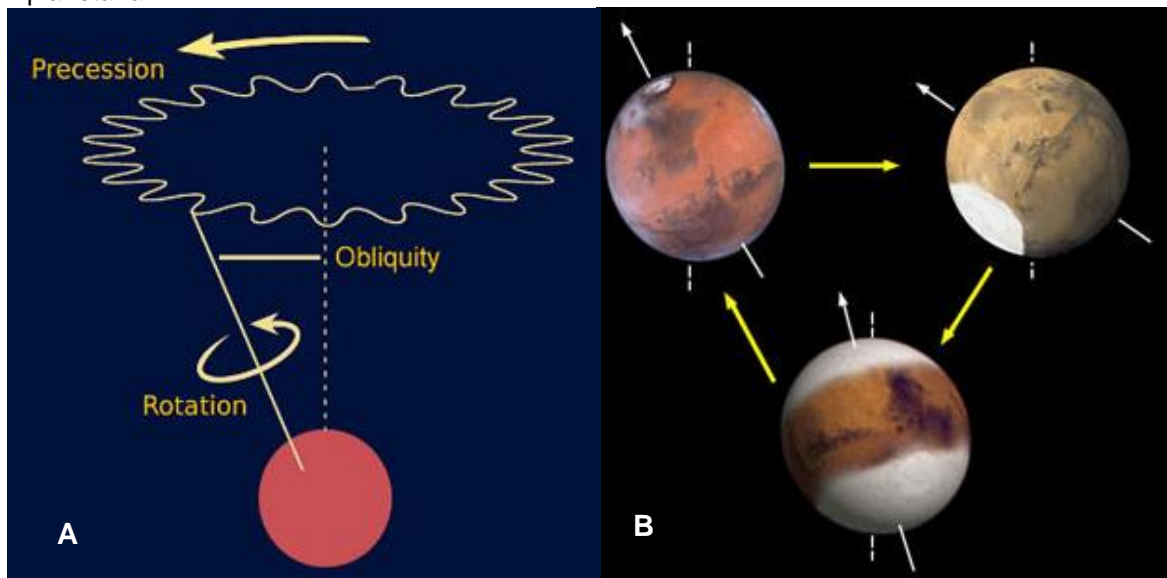
Todo parece indicar que esta barrera confinaba un cuerpo de agua lenticó que se extendía desde Echus Chasma y que tenía sus homólogos en las depresiones de Hebes Chasma, Candor Chasma, Melas Chasma y otras depresiones que conforman el complejo de Valles Marineris, lugares donde las imágenes de alta resolución han permitido hallar capas sedimentarias. El agua se encontraría tanto en estado líquido en estas fosas, como de manera sólida en las alturas de los montes Tharsis, por influencia del fenómeno planetario de oblicuidad.

Es conocido para el planeta Tierra, que los cambios de oblicuidad (inclinación axial) han jugado un papel fundamental en la estimulación de épocas glaciares e interglaciares. Así mismo, las grandes variaciones en los movimientos planetarios de Marte, aparentemente son la causa de sus cambios climáticos. Al igual que la Tierra, la órbita de Marte es excéntrica, su movimiento de precesión del eje de rotación, y sobre todo, su oblicuidad oscila. No obstante, las variaciones de Marte son más grandes, en parte porque la Tierra está anclada por la Luna.

Según lo afirmado por Laskar et al. (2004), la oblicuidad en Marte oscila en un rango de hasta 0° a 60° , en períodos de millones de años, en comparación con el de la Tierra que fluctúa entre 22° a 24° aproximadamente. Cuando hay una baja oblicuidad, menos luz solar cae en las regiones polares, posibilitando la acumulación de hielo. A alta oblicuidad, los polos reciben más luz solar y el ecuador menos, por lo que las capas de hielo migran hacia las regiones ecuatoriales (Figura 103).

De acuerdo a Fastook et al. (2008), la elevación de la Provincia de Tharsis (Tharsis Bulge o Tharsis Raise), al estar localizada en un extremo del planeta, afecta el momento de la inercia de rotación e influencia directamente su ángulo de oblicuidad. Esta inclinación en el presente, se encuentra en 25.2° pero oscila en un rango de 60° a 0° . Esto ocasionaría una redistribución latitudinal de las capas de hielo en Marte, proceso cíclico que posibilitaría que haya existido disponibilidad de agua tanto en esta sólido como líquido, en latitudes ecuatoriales como Valles Marineris y la Provincia Volcánica de Tharsis.

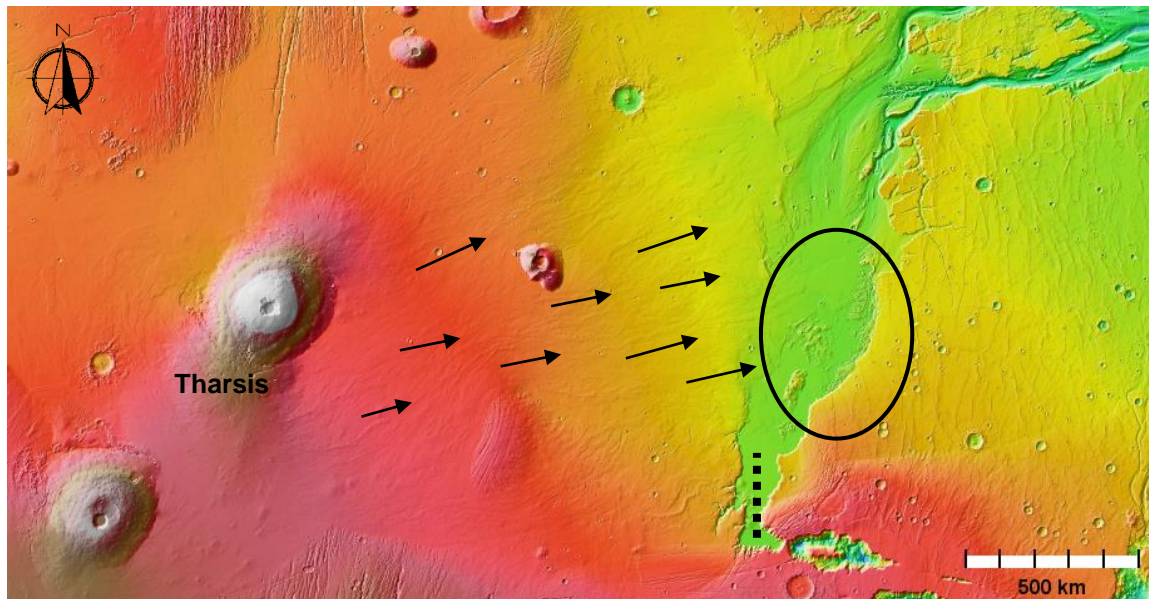
Figura 103. A. Ilustración donde se aprecia los ciclos de oblicuidad del Planeta Marte. B. Esquema en el que se observa la migración de las capas de hielo, en respuesta a la oblicuidad planetaria.



Fuente: ASD/IMCCE-CNRS, after Jim Head/Brown University and NASA/JPL.

Como consecuencia de la actividad volcánica en la Provincia de Tharsis, la cual inició desde el Noachiano tardío hasta el Amazoniano, se habría generado una posible fusión de casquetes glaciares, originando gigantescos Lahares que descendieron hacia el Este, hasta encontrar la depresión del Rift de Kasei Valles. Estos flujos habrían llegado en dirección perpendicular al rumbo del Rift, chocando con las barreras que delimitaban el sector norte de la depresión, derribándolas por medio de la acción hidrodinámica y erosionando fuertemente las formaciones geológicas de Lunae Planum, dejando como evidencia las geoformas que conforman a Echus Montes y la abrupta ampliación del área de influencia a partir de los 7° de latitud, sitio que potencialmente recibió de manera directa la acción hidrodinámica de flujos de origen volcánico (Figura 104).

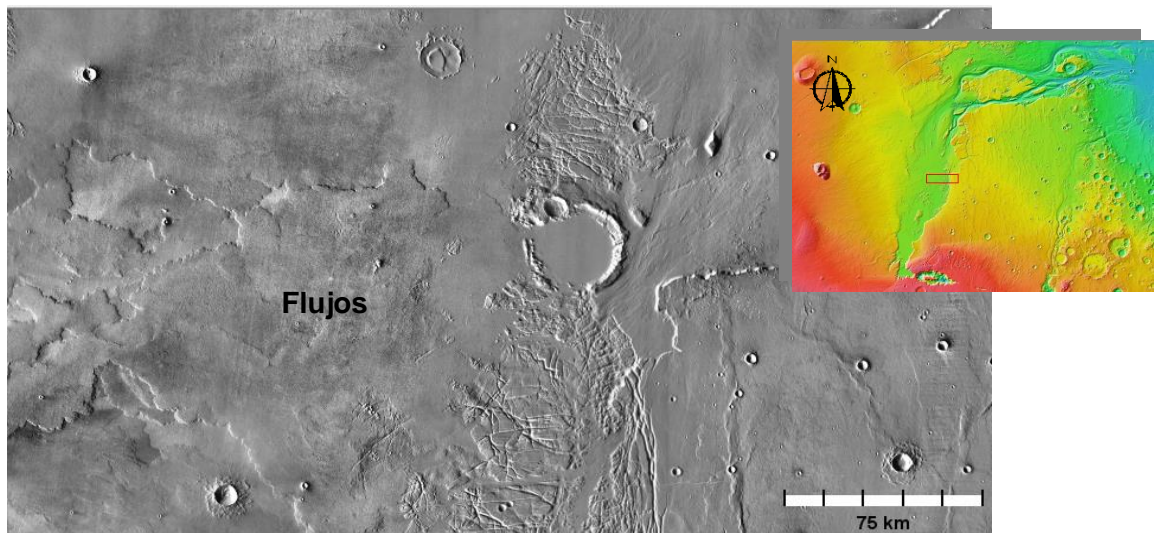
Figura 104. Imagen MOLA + color, donde se aprecia en círculo, el sector de Echus Montes y Echus Chaos, lugar en el cual se amplía de manera abrupta el Canal Principal de Kasei Valles, debido a una probable acción directa de flujos de origen volcánico (señalados por flechas), procedentes de la región volcánica de Tharsis. La línea punteada indica la longitud que tendría el Rift de Kasei Valles.



Fuente: NASA/ASU/MOLA Team. Imagen procesada con JMARS (Arizona State University Mars Scientific Software Team). Elaboración propia.

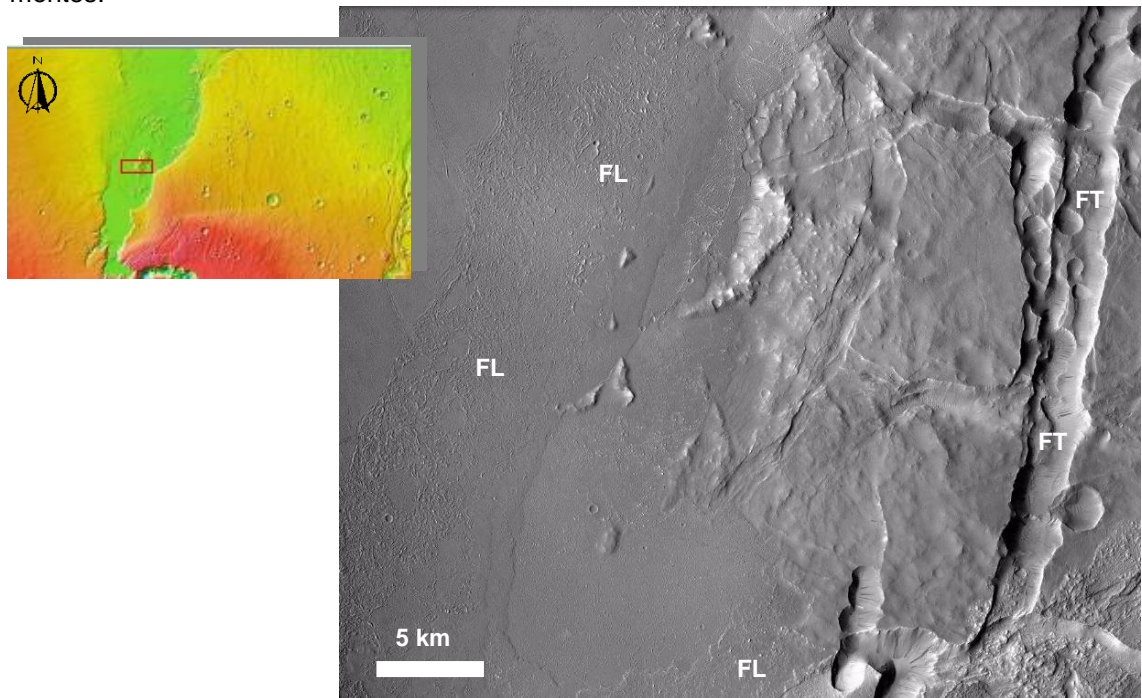
Se aprecian dos evidencias significativas que apoyarían esta posibilidad. La primera es una tendencia general de desplazamiento de los flujos de origen volcánico hacia Echus Montes y Echus Chaos, los cuales llegan hasta estas formaciones geomorfológicas (Figuras 104 y 105). La segunda es que dichas geoformas aparentan ser un remanente de Lunae Planum, ya que aunque Echus Montes se halla afectado por la acción de procesos denudativos, se aprecian fosas probablemente heredadas de eventos tectónicos, con un rumbo no superior a 10° Noreste, coincidente con las tendencias principales de fracturamiento observadas a nivel regional y que fueron descritas con anterioridad (Figura 106).

Figura 105. Imagen THEMIS Day IR, donde se aprecian lóbulos de flujos de origen volcánico en la zona Norte de Echus Chaos.



Fuente: NASA/University of Arizona. Procesada con ERDAS 11. Imagen de contexto: NASA/MOLA Team. Procesada con JMARS. Elaboración propia

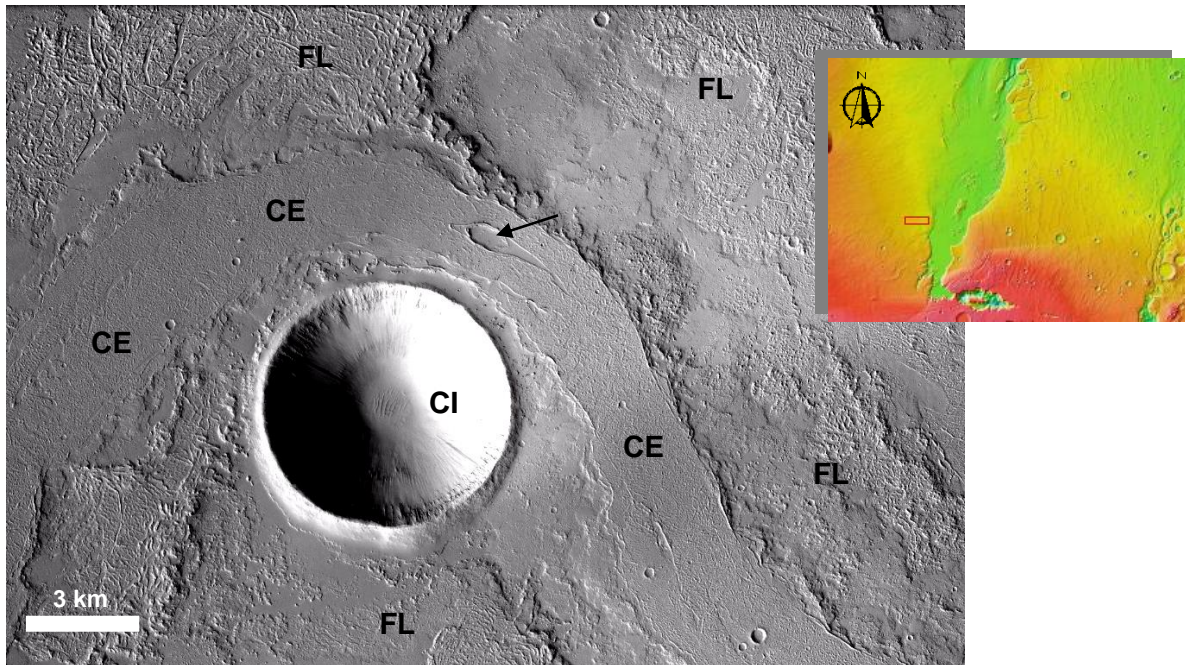
Figura 106. Imagen Pancromática CTX No F16_041912_1867_XI_06N078W, en la cual se aprecia una fosa tectónica (FT) heredada en Echus Montes y flujos de lodo (FL) en la base de los montes.



Fuente de la imagen: NASA/Arizona State University. Procesada mediante ERDAS 11. Imagen de contexto: NASA/MOLA Team. Procesada con JMARS. Elaboración propia.

Las evidencias halladas por sensores remotos, indican que los Lahares habrían ocurrido en varios eventos eruptivos, intercalados con Flujos de Lava de baja viscosidad que alcanzaron la zona de Kasei Valles. Evidencia de esta interacción entre lujos de lodo y lavas, se observa mediante imágenes de contexto adquiridas por el sensor CTX del Mars Reconnaissance Orbiter – MRO. En ellas se aprecian islas en forma de gota o Diamante, orientadas hacia la corriente y formadas por la acción hidrodinámica del flujo, canales exhumados por donde discurriría el lodo de los Lahares, así como superficies irregulares y aleatorias con frentes lobulados, que corresponderían a flujos de lava, cubiertas en algunos sectores por superficies de textura uniforme y lisa, posiblemente asociadas a Lahares (Figura 107).

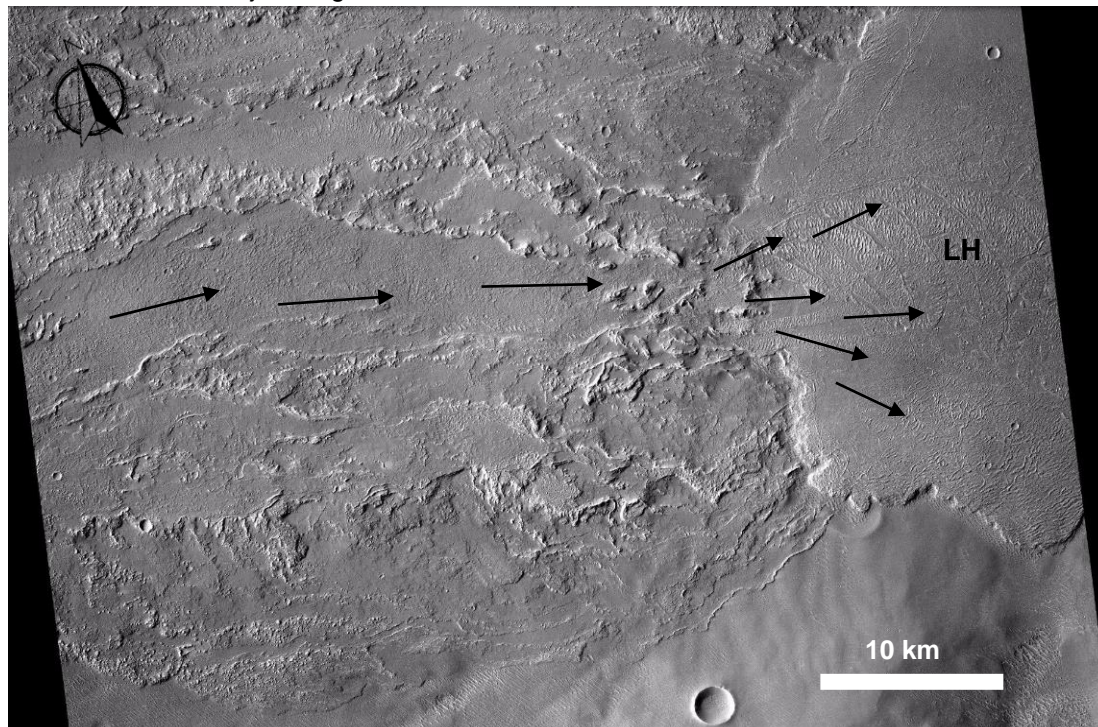
Figura 107. Canal exhumado (CE) y depósitos de Lahar, rodeando un Cráter de Impacto (CI). La flecha señala una isla orientada hacia la corriente, formada por la acción hidrodinámica del flujo acuoso. Bajo el canal exhumado, se aprecian flujos de lava (FL) de diversos eventos efusivos, caracterizados por una textura irregular y aleatoria, que contrasta con la superficie suave del lodo. Imagen Pancromática CTX P06_003461_1853_XN_05N081W.



Fuente de la imagen: NASA/Arizona State University. Procesada mediante ERDAS 11. Fuente imagen de contexto: NASA/MOLA Team. Procesada con JMARS. Elaboración propia.

Erupciones volcánicas de diversas magnitudes, pudieron fusionar en consecuencia distintas cantidades de glaciar, generando episodios de flujos que diferirían entre sí por la cantidad de agua que poseían. Estos se habrían dirigido hacia el Rift de Kasei Valles, donde es posible ver extensos depósitos de cuerpos de flujos de lodo y sus lóbulos frontales, que indican la dirección de propagación de los posibles Lahares (Figura 108).

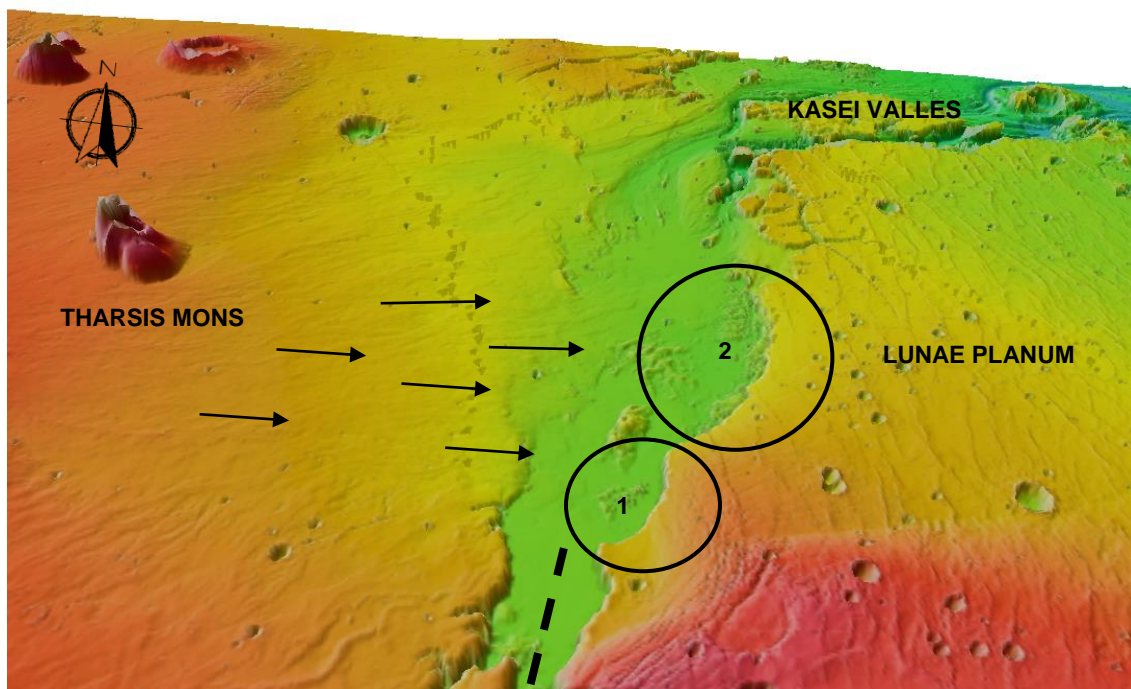
Figura 108. Depósitos de Lahar (LH) al llegar al canal de Kasei Valles, en la zona de Echus Chaos, luego de desplazarse por un canal desde la Provincia Volcánica de Tharsis. Su forma amplia indica la baja pendiente de la zona de depositación y los lóbulos frontales, son indicios de la dirección del flujo. Imagen Pancromática CTX B17_016172_1863_XN_06N080W.



Fuente de la imagen: NASA/Arizona State University. Procesada mediante ERDAS 11. Elaboración propia.

La zona de Echus Chaos y Echus Montes, muestran de manera clara la capacidad erosiva que tendrían los flujos que llegaban desde la Provincia Volcánica de Tharsis, creando bordes en forma de herradura en el Canal Principal de Kasei Valles. Estas formas en planta, podrían indicar la ocurrencia de al menos dos eventos de gran envergadura que sucedieron en el canal. Uno de ellos que modelaría a Echus Montes y el otro que entallaría lo que hoy se conoce como Echus Chaos (Figura 109). Como se ha descrito en esta cadena de procesos y debido a que los accidentes topográficos de Fortuna Fossae posiblemente desviaron y concentraron los Lahares, uno de estos habría ocasionado la ruptura de lo que hoy se conoce como Echus Montes, formación que haría las veces de presa natural para el confinamiento de un cuerpo lenticó de agua que reposaba en el Rift de Kasei Valles, desde el sector de Echus Chasma. Esto pudo haber generado una gigantesca inundación que discurrió de manera rectilínea, dado el control estructural en sentido 10° Norte de la zona de Rift, desviándose posteriormente en sentido 70° Noreste, luego de recorrer una distancia cercana a 1000 kilómetros, siguiendo la otra tendencia general de fracturas en la corteza.

Figura 109. Imagen 3D en perspectiva, a partir de un hillshade de datos MOLA + color, donde se aprecia los bordes en forma de herradura (encerrados por círculos), probablemente originados por la acción hidrodinámica de los Lahares provenientes de la Provincia Volcánica de Tharsis, en los sectores de Echus Montes (1) y Echus Chaos (2). Las flechas señalan la dirección de flujo. La línea discontinua demarca el Rift o Aulacógeno de Kasei Valles

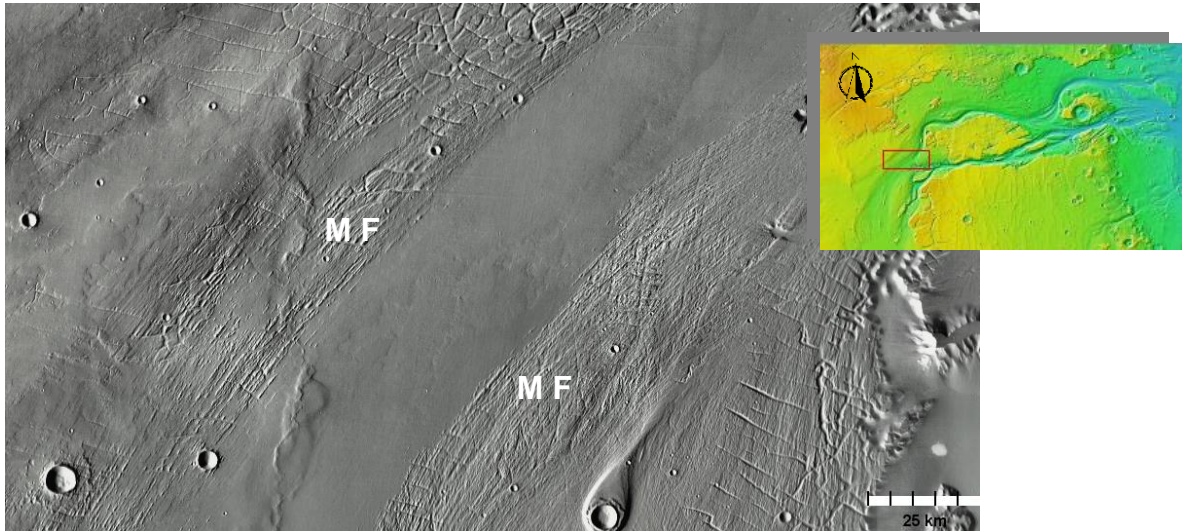


Fuente: NASA/ASU/MOLA Team. Procesada con Arc Gis 10.2 (ESRI) y JMARS (Arizona State University Mars Scientific Software Team). Elaboración propia

Esta gran inundación dejaría evidencias en la zona de Kasei Valles, la mayoría de las cuales fueron cubiertas por los flujos de origen volcánico. Debido a que la acción de los Lahares, habría tenido su punto de máxima energía al llegar hasta Echus Montes y Echus Chaos, así como las zonas aledañas, allí no se hallan ningún tipo de vestigios. Sin embargo, cerca del punto de inflexión del Canal Principal de Kasei Valles, así como en sus canales Norte y Sur, se aprecian marcas de fondo orientadas con la dirección de la corriente y otras estructuras indicativas de la acción de esta factible inundación y su efecto hidrodinámico en los materiales del fondo de los canales (Figuras 110 y 111).

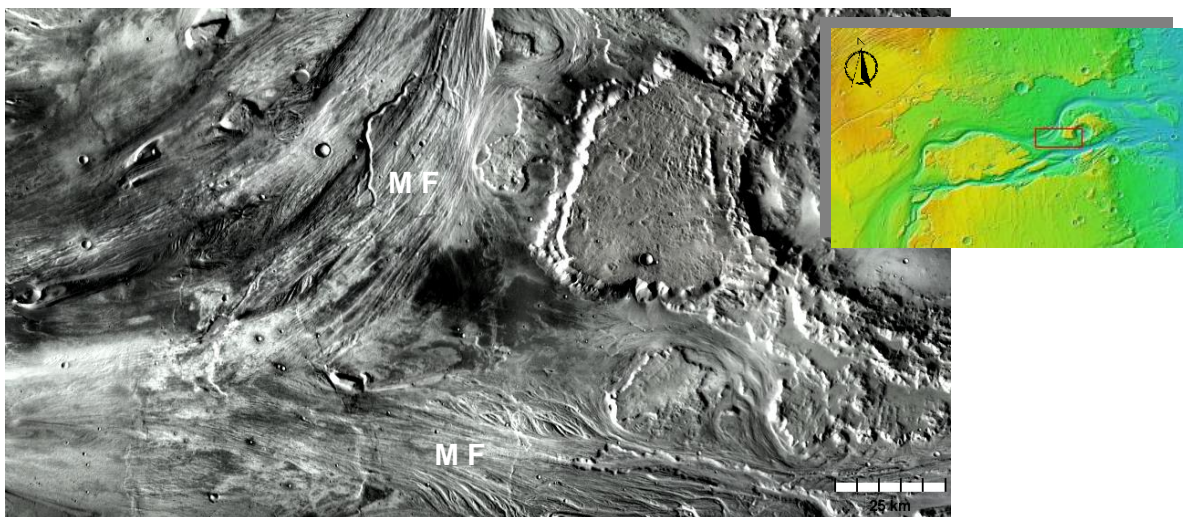
De igual manera existe un pequeño pero importante rastro de esta gran inundación, 45 kilómetros aguas arriba del sector donde posiblemente fue generada esta ruptura, el cual consiste en una isla fluvial orientada hacia la corriente, en sentido aproximado Sur-Norte, localizada en el borde opuesto al punto de choque de los Lahares con Echus Montes. Uno de los canales que la bordean, fue socavado posteriormente por la corriente originada en un Sapping Valley, dejando como resultado un Valle Colgante (Figura 112).

Figura 110. Imagen THEMIS Day IR (Christensen 2006) del sector de Uranius Dorsum, en la cual se aprecian marcas de fondo (MF) orientadas hacia la corriente, que fueron dejadas por la inundación generada en Echus Chasma.



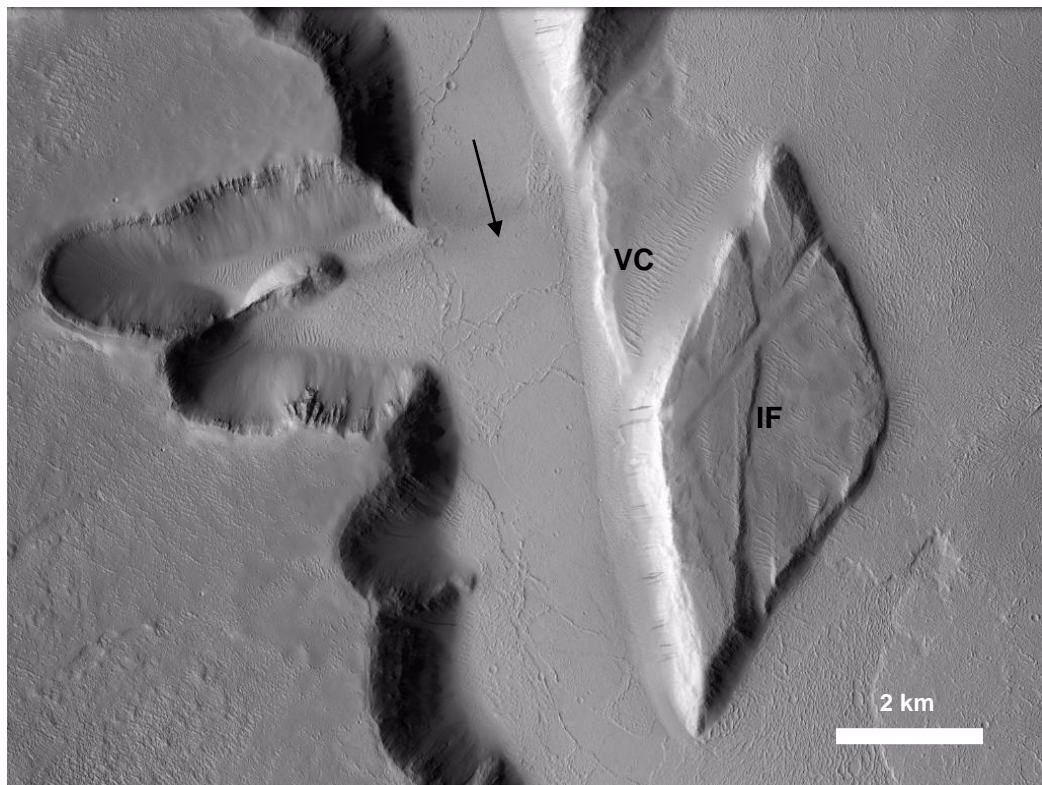
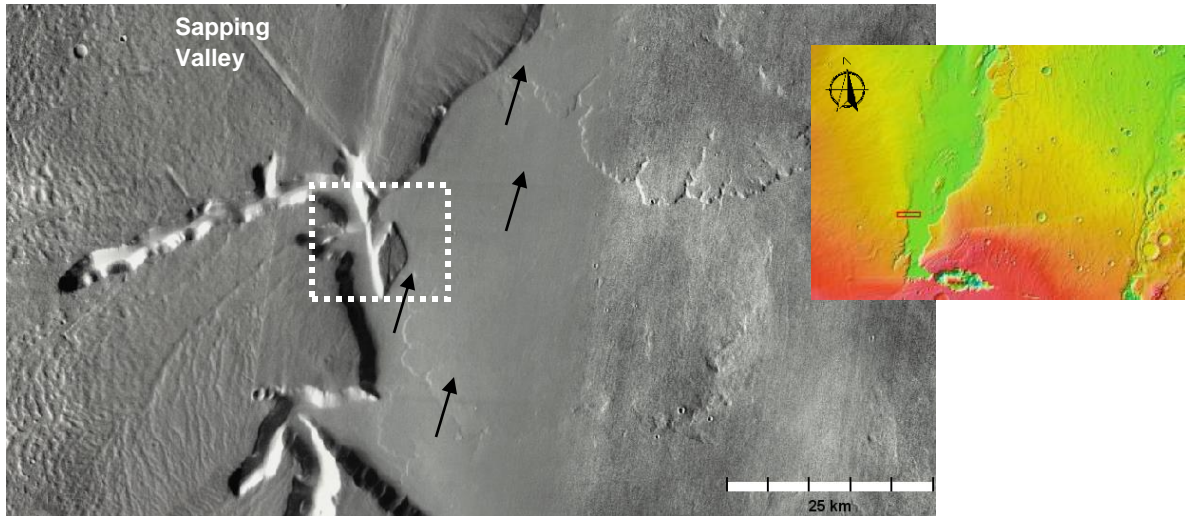
Fuente: NASA/ASU/USGS. Procesamiento efectuado con JMARS. Fuente imagen de contexto: NASA/MOLA Team. Procesada con JMARS. Elaboración propia.

Figura 111. Imagen THEMIS Day IR (Christensen 2006) del sector de la Isla Fluvial del Cráter Sharonov, en la cual se aprecian marcas de fondo (MF) orientadas hacia la corriente, tanto en los canales Kasei Valles Norte como Kasei Valles Sur, debido a la inundación generada en Echus Chasma.



Fuente: NASA/ASU/USGS. Procesamiento efectuado con JMARS. Fuente imagen de contexto: NASA/MOLA Team. Procesada con JMARS. Elaboración propia.

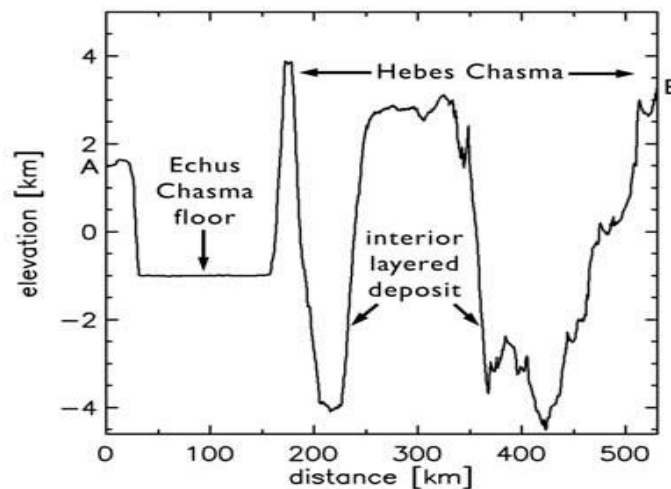
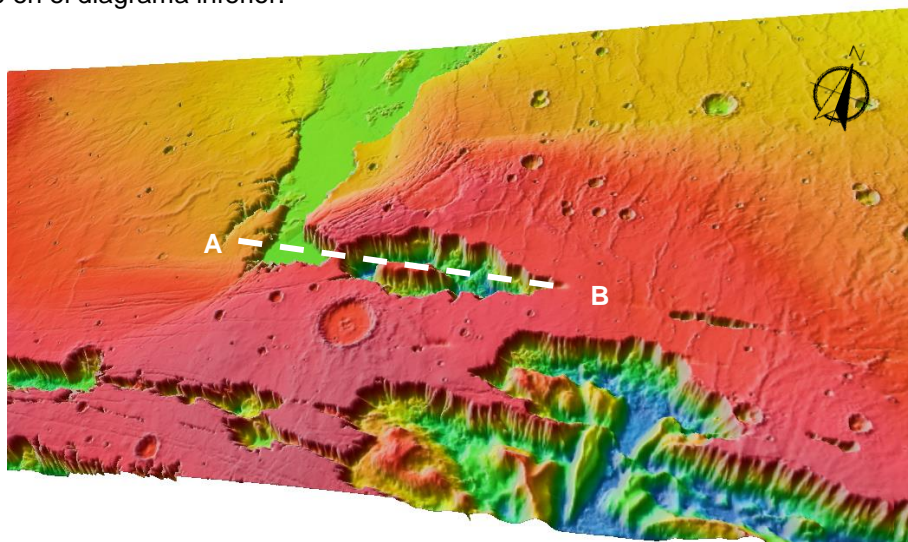
Figura 112. Arriba. Imagen THEMIS Day IR (Christensen 2006) de una zona aledaña a Echus Montes, donde se observa una Isla Fluvial Orientada hacia la dirección de corriente de la gran inundación generada en el Rift de Kasei Valles (indicada por flechas). Se muestra la localización de un Sapping Valley aledaño y en cuadro la escena de la imagen inferior. Abajo. Detalle de la Isla Fluvial (IF) y su entorno, mediante la imagen CTX No D05_028976_1861_XN_06N081W. Se indica la localización del Valle Colgado (VC).



Fuente: NASA/ASU/USGS. Procesamiento de las imágenes con ERDAS 11 y JMARS (Arizona State University Mars Scientific Software Team). Elaboración propia.

Harrison y Grimm (2008), exponen la posibilidad de que alguna vez haya existido agua represada en las estructuras de colapso en el área de Valles Marineris, principalmente en Echus Chasma, la cual se formó bajo las mismas condiciones tectónicas de Hebes Chasma y comparte con esta, similitudes fisiográficas. El piso de Echus Chasma, aparece tres kilómetros por encima de su profundidad original, en comparación con Hebes Chasma (Figura 113), lo cual indicaría que el antiguo cañón, que durante su formación era 3000 metros más profundo que en la actualidad, está lleno de un depósito hidrostáticamente equilibrado, formado por material posiblemente proveniente de la Provincia Volcánica de Tharsis.

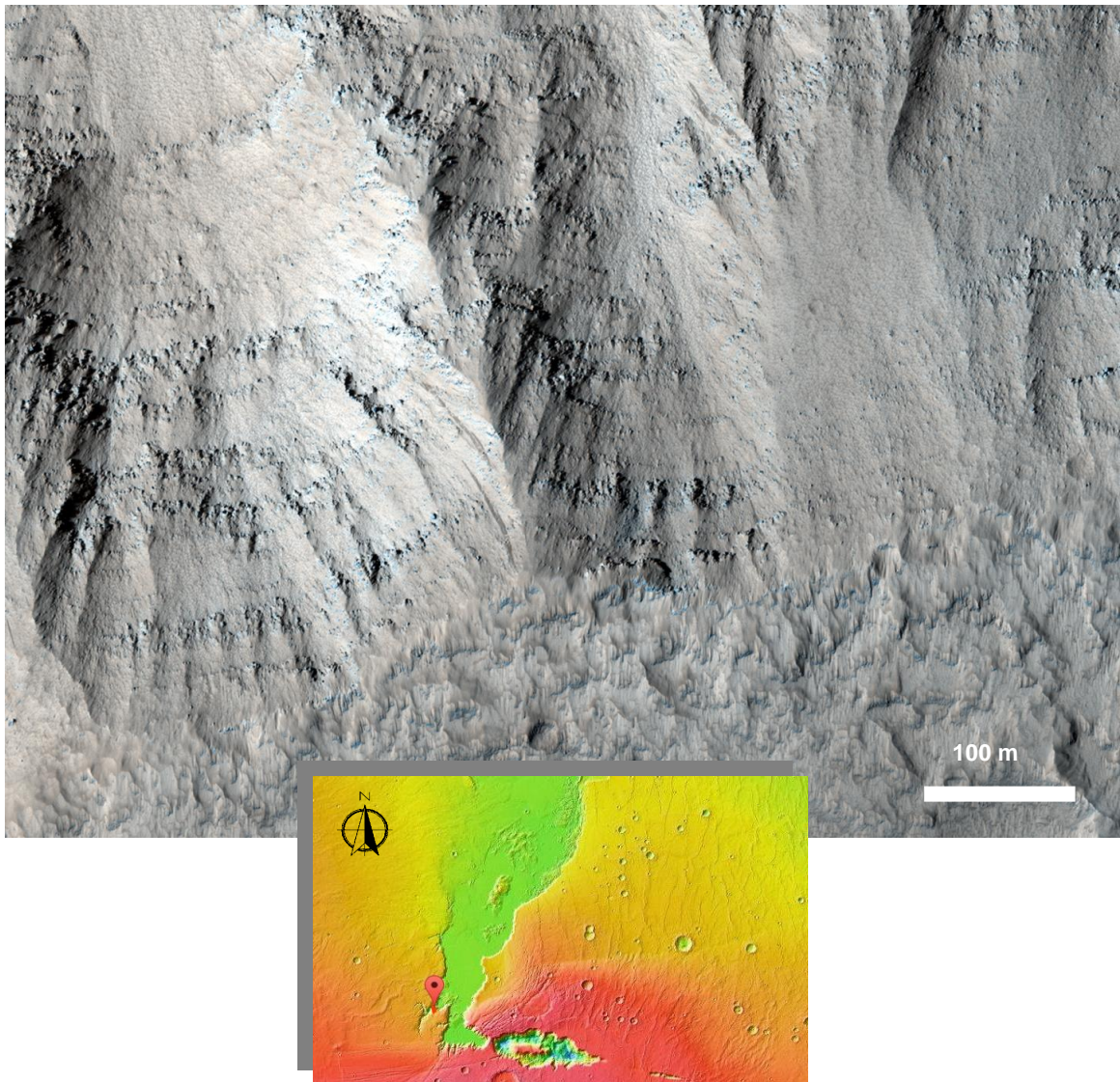
Figura 113. Hillshade de datos MOLA + color, en la que se aprecia los hundimientos tectónicos del complejo de Valles Marineris, y Echus Chasma lleno por sedimentos. La línea discontinua indica la dirección del perfil, realizado desde Echus Chasma (A) hasta Hebes Chasma (B) e ilustrado en el diagrama inferior.



Fuente: NASA/ASU/MOLA Team. Elaboración propia. Fuente imagen inferior: Tomado de Harrison y Grimm (2008),

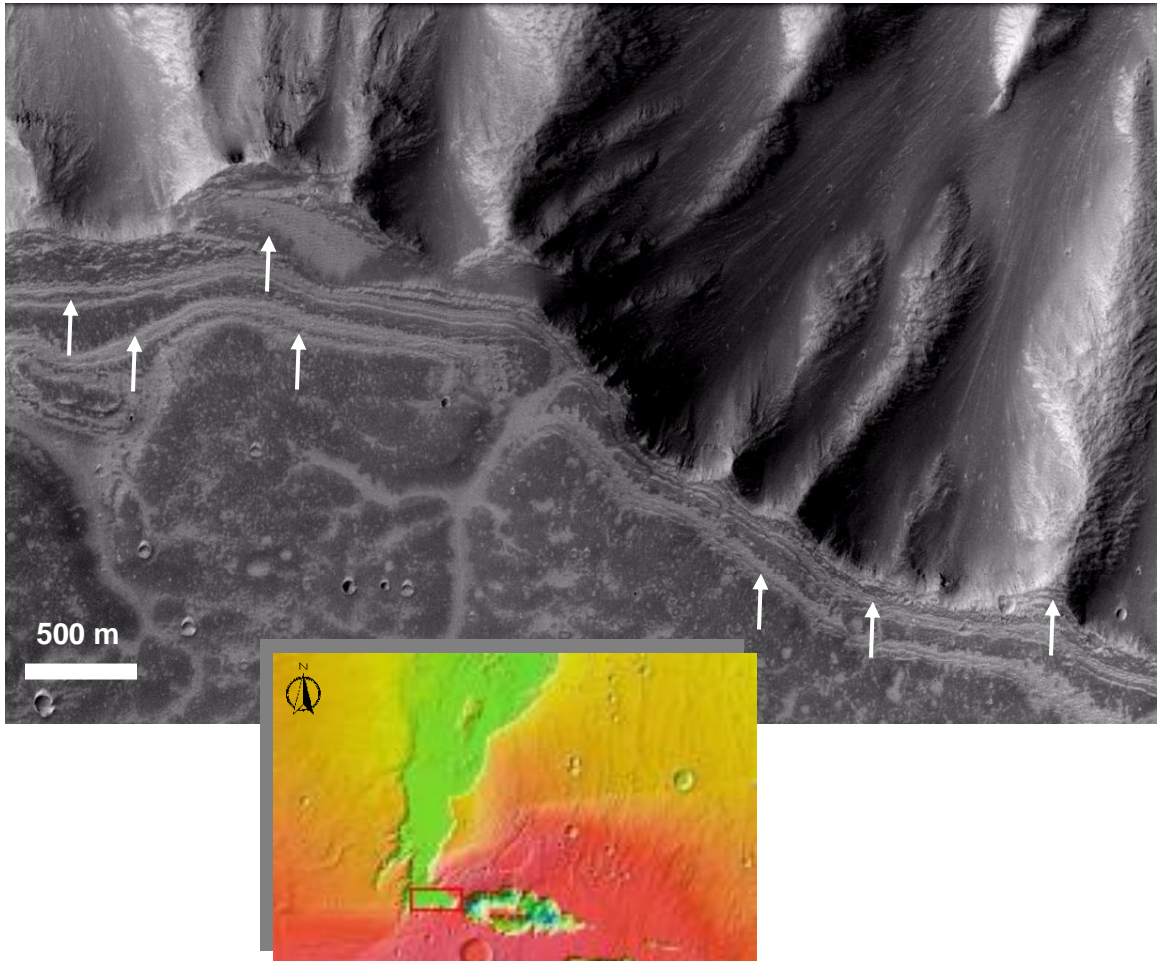
La existencia de agua represada a manera de cuerpos lénticos, en las depresiones del complejo de Valles Marineris y en Echus Chasma, ha sido confirmada mediante imágenes de Contexto (CTX) y de alta resolución HiRISE, donde se aprecian tanto en Hebes Chasma, como el complejo de Valles Marineris y especialmente en Echus Chasma, afloramientos con estratificación sedimentaria (Figura 114) y marcas dejadas por varios niveles de agua acumulada (Figura 115). Estas marcas confirmarían que los depósitos de agua en este sector eran de carácter estacionario y que fluctuaban con el tiempo.

Figura 114. Imagen Color HiRISE No PSP_002472_1810, en la cual se observa bandas de estratificación en las paredes de Echus Chasma.



Fuente de la imagen: NASA/Arizona State University- Procesadas mediante ERDAS 11.
Fuente imagen de contexto: NASA/MOLA Team. Procesada con JMARS. Elaboración propia.

Figura 115. Imagen Pancromática CTX No P14_006586_1800_XN_00N079W, sector Sur de Echus Chasma, mostrando marcas de erosión (señaladas por flechas), que indican la acumulación de agua a diferentes niveles. La parte inferior de la imagen corresponde a las cotas más altas, mientras que la parte superior a las más bajas.



Fuente de la imagen: NASA/Arizona State University. Procesada mediante ERDAS 11. Imagen de contexto MOLA + color, procesada con JMARS. Fuente: NASA/MOLA Team. Elaboración propia.

Estas marcas de agua son registros innegables de la acumulación de agua por largos periodos de tiempo, que incluso son replicadas en cuerpos lenticos de agua en la actualidad en el planeta Tierra (Figura 116). Estas fueron interpretadas desde el año 1886 por el Geólogo T.C. Chamberlain, como evidencias de la existencia del gigantesco Lago Missoula, cuyas inundaciones generaron los Scablands del estado de Washington (Christiansen and Hamblin, 2007), generalmente comparados con las geoformas existentes en Kasei Valles.

Figura 116. Marcas de agua expuestas a orillas del Lago Powell, indicando varios niveles de agua. Estado de Utah (USA).

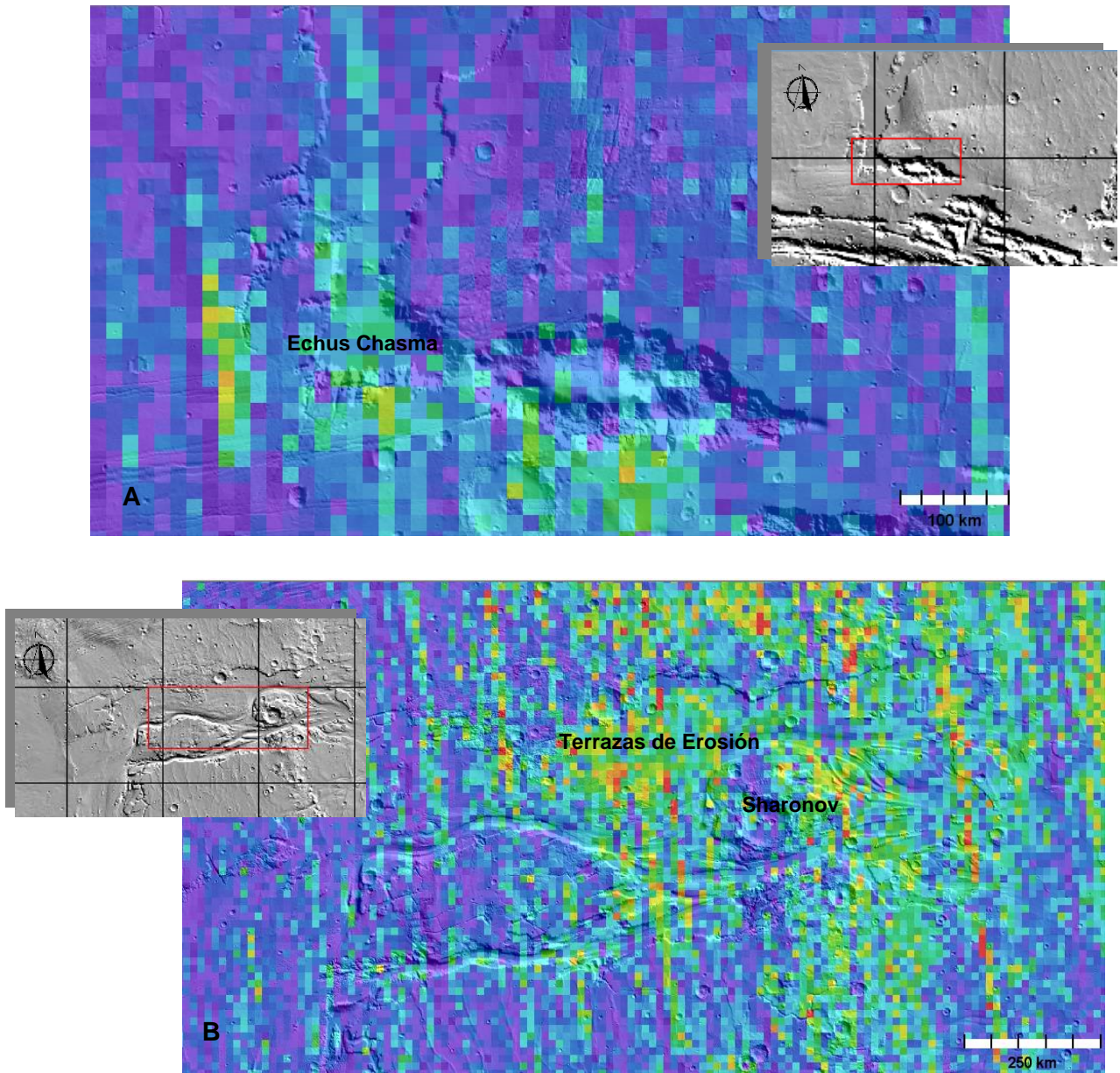


Fuente: Justin Sullivan/Getty Images - www.theatlantic.com

Otro hallazgo importante que soportaría la antigua presencia de agua en Echus Chasma, Hebes Chasma y las demás depresiones tectónicas de Valles Marineris, así como la participación de fluidos acuosos en el modelado de los canales de Kasei Valles, lo constituye el hallazgo de Filosilicatos a través de imágenes de Espectroscopía de Emisión Térmica-TES (Bandfield, 2002). Estos se hallaron en grandes concentraciones, en los sectores de Echus Chasma, la Isla Fluvial del Cráter Sharonov, las Terrazas de Erosión y la desembocadura de Kasei Valles Norte y Kasei Valles Sur en Chryse Planitia (Figura 117).

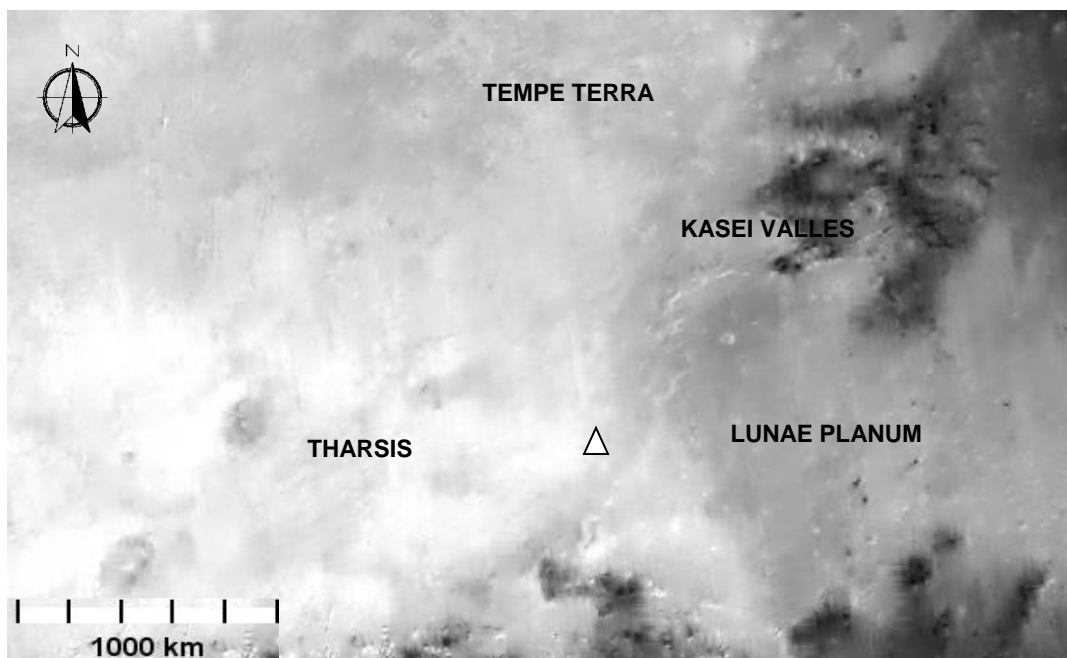
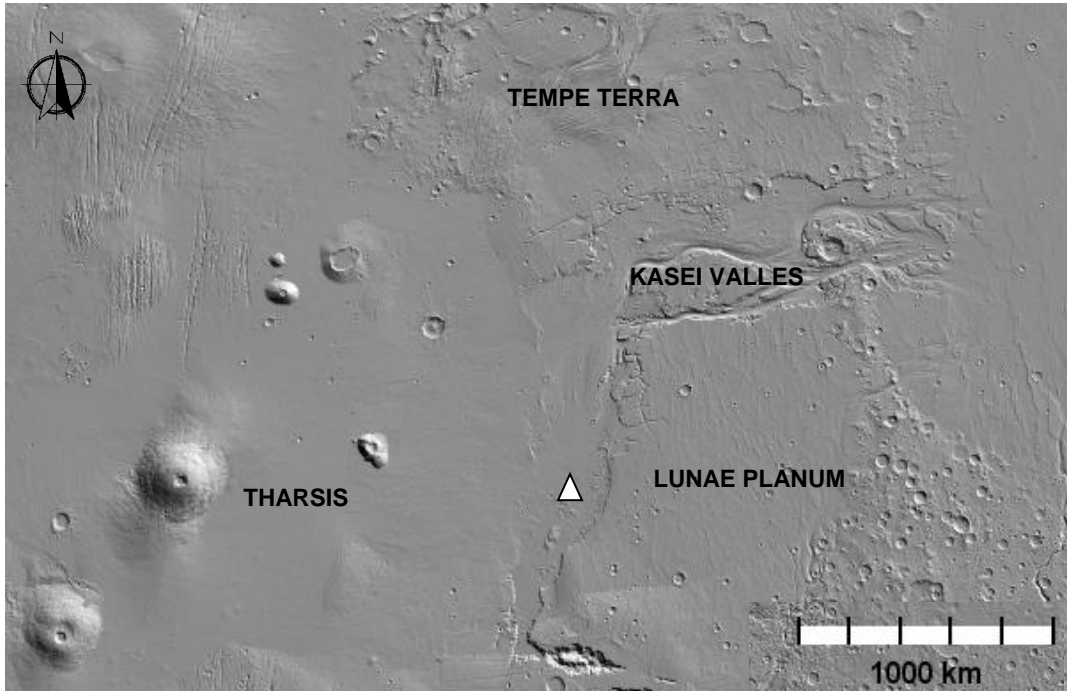
No se encontró evidencia de Filosilicatos en las demás zonas de Kasei Valles, debido a la extensa cobertura de polvo que muestra altos niveles de Albedo (Figura 118), la cual no permite la utilización de técnicas de percepción remota para su análisis, ya que enmascara o distorsiona las propiedades de los materiales de la superficie.

Figura 117. A. Composición de una imagen TES para Filosilicatos (Bandfield, 2002) en conjunto con un hillshade basado en datos MOLA, en la cual se aprecia la concentración de Filosilicatos en Echus Chasma, indicando la participación de agua en los eventos formadores de Kasei Valles. B. Composición con características similares a la Figura A, mostrando la zona del Cráter Sharonov y las Terrazas de Erosión. Los valores más altos de concentración equivalen al color amarillo y rojo, mientras que el color azul corresponde a lugares donde no se encuentran Filosilicatos. Imagen de contexto: hillshade de datos MOLA en escala de grises.



Fuentes: NASA/ASU/MOLA Team. Procesamiento efectuado con ArcGis 10.2 (ESRI) y JMARS (Arizona State University Mars Scientific Software Team). Elaboración propia.

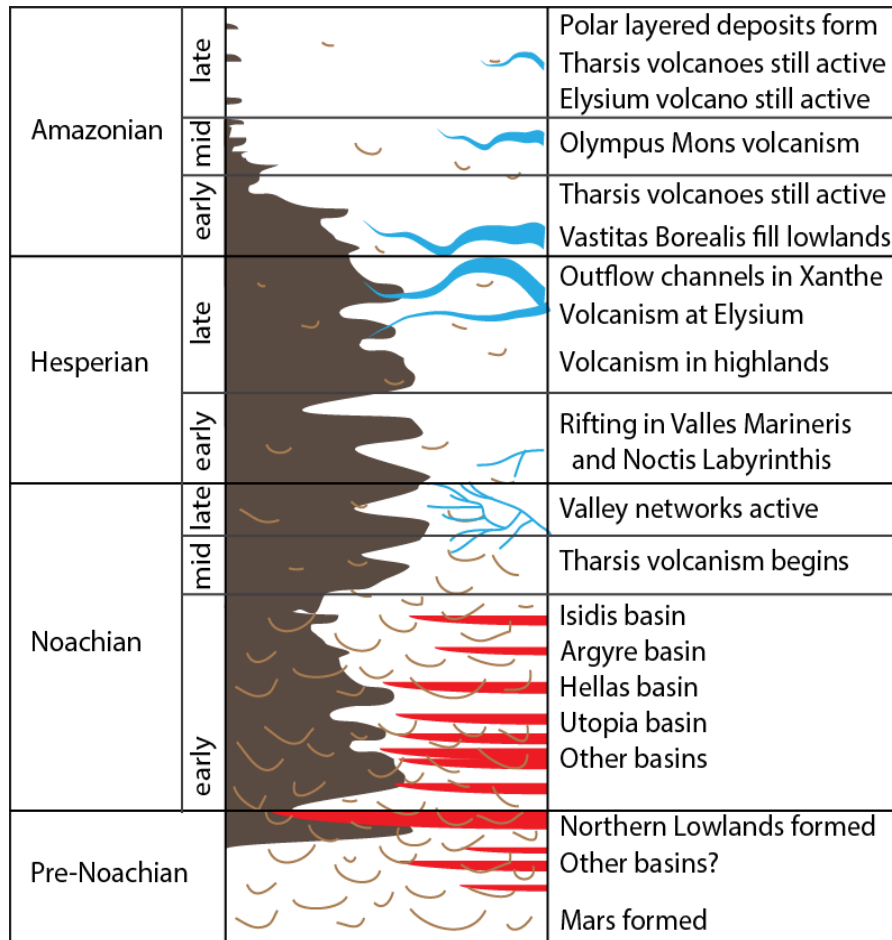
Figura 118. A. Imagen de contexto hillshade de datos MOLA en escala de grises, donde se observan las provincias de Tharsis, Tempe Terra, Lunae Planum y Kasei Valles. B. Imagen de Albedo medido de 0.3 a 2.9 micrómetros (Christensen, 2001), donde las tonalidades claras indican valores de alta reflectancia, correspondientes a superficie cubierta por polvo. El triángulo indica un punto de referencia en Echus Chaos.



Fuentes: NASA/ASU/MOLA Team. Procesamiento efectuado con ArcGis 10.2 (ESRI) y JMARS (Arizona State University Mars Scientific Software Team). Elaboración propia.

Lakdawalla (2013), propone un diagrama esquemático de la historia geológica de Marte, a manera de escala relativa sin edades numéricas. En este diagrama se listan algunos eventos sobresalientes en el registro geológico (Figura 119). Por medio de dicho esquema, se hace fácil visualizar el posible punto de origen en el tiempo, de lo que hoy se conoce como Kasei Valles.

Figura 119. Esquema de la historia geológica del Planeta Marte. Lo más reciente arriba y más antiguo abajo. La flecha indica el punto de inicio de Kasei Valles, justo después del Rifting de Valles Marineris



■ volcanism ■ fluvial activity ■ basins ☪ craters

Fuente: Emily Lakdawalla after Tanaka & Hartmann 2012

De acuerdo a lo expuesto, se considera que el mejor escenario para explicar el origen de los canales de Kasei Valles, es aquel acorde con lo hallado en las imágenes de sensores remotos, donde se conjugan eventos geodinámicos endógenos y exógenos, de manera compleja pero secuencial. En esta propuesta, no intenta explicarse su origen con procesos poco convencionales, que no tienen homólogos en el Sistema Solar.

De manera concluyente, es factible afirmar que los Canales de Kasei Valles se habrían originado en el Hesperiano, como una zona de Rift en conjunto con Valles Marineris, como respuesta de la corteza al levantamiento de la Provincia Volcánica de Tharsis. El sector de Echus Chasma se convertiría posteriormente en un brazo de Rift abandonado o Aulacógeno. Esta misma elevación de Tharsis, generaría una alta oblicuidad del eje de Marte, posibilitando la acumulación de capas glaciares de hielo en los montes Tharsis y agua en las depresiones del complejo de Valles Marineris y el Rift abandonado de Echus Chasma, que diera origen a Kasei Valles.

La actividad volcánica en la Provincia de Tharsis, generaría el derretimiento de la masa glaciaria, ocasionando Lahares que al llegar con gran empuje a la depresión de Echus Chasma habrían derribado una barrera orográfica que confinaba el agua contenida en Echus Chasma, dejando como remanente lo que se conoce como Echus Montes, además del área de Echus Chaos como registro de la carga erosiva frontal en contra de los materiales de Lunae Planum. El agua liberada desde el lugar de represamiento en Echus Chasma, ocasionaría una gigantesca inundación que seguiría un rumbo aproximado hacia el Norte, en dirección de las estructuras tectónicas regionales, tomando una posterior inflexión hacia el Noreste, a una latitud de 20 grados, luego de 1000 kilómetros de recorrido aproximadamente, como respuesta al control estructural en esta zona, que aún es observable y que se confirma por su baja sinuosidad. Marcas de esta posible inundación se aprecian de manera evidente en los canales Kasei Valles Norte y Kasei Valles Sur, ya que en latitudes bajas, las marcas fueron borradas por los depósitos de Lahares y flujos de Lava Volcánica, que sucederían en varios pulsos luego de la inundación.

La acción hidrodinámica, tanto de la inundación en primera instancia, así como los Lahares, conformarían el relieve actual de Kasei Valles con geoformas netamente erosivas, tales como las Islas Fluviales o Diamante, Canales, Cataratas, Terrazas de Erosión, así como el modelado de Cráteres de Impacto y su material de eyección. Este modelado no se daría en un solo evento catastrófico. Los valles colgantes en diferentes sectores de los canales Norte y Sur, evidencian la disección que habrían sufrido los canales inicialmente formados, por el canal Kasei Valles Sur, el cual es más profundo que su contraparte Norte y su sección transversal, podrían indicar un basculamiento tectónico hacia el Sur. Estos flujos que tendrían origen en la actividad volcánica de Tharsis, probablemente también se desviaron hasta el Rift de Echus Chasma, cubriéndolo con una columna de depósitos de 3000 metros. Posteriores procesos exógenos, generarían Valles de Socavación o Sapping Valleys, erosión eólica y deslizamientos en altas pendientes, contribuyendo al aspecto actual de los canales. No obstante, es plausible que la actividad tectónica en el Rift de Echus Chasma/Kasei Valles, haya continuado. Muestra de esto es la presencia de diques intruyendo los depósitos Amazonianos de flujos volcánicos y un cono volcánico con restos de columnas de lava, que indicarían una viscosidad diferente a aquellas que fluyeron desde Tharsis.

10. CONCLUSIONES

El gran tamaño del canal, en el posible sector de nacimiento de Kasei Valles en Echus Chasma, con una sección de 50 kilómetros en su parte más angosta, así como la ausencia de morfología que indique la existencia de corrientes tributarias, ayudan a concluir de manera preliminar que este gran Canal de Descarga (Outflow Channel), no habría sido formado bajo condiciones de precipitación o escorrentía superficial, sino por un evento que involucraría grandes volúmenes de descarga de fluidos, los cuáles, según los resultados obtenidos en el presente estudio, serían del orden de $8.16 \times 10^{13} \text{ m}^3$.

Kasei Valles es un rasgo bien marcado en la superficie marciana, con características únicas, que posibilitan categorizarlo como el Canal de Descarga más grande de todo Marte. En términos generales, puede observarse que no tiene afluentes, empieza como un canal único, con una sección casi constante desde una sola fuente, llamada Echus Chasma, localizada a 1.200 Km al Suroeste de Kasei Valles, posee una baja sinuosidad, paredes suavemente curvadas, posee islas en forma de gota o Diamante en torno a las cuales se ha desviado la acción hidrodinámica de manera convergente y divergente. En el piso de los canales se encuentra una gama de formas de fondo, incluyendo estrías, cataratas, cráteres de impacto, canales interiores, entre otras.

Las características fisiográficas del Planeta Marte y en especial de Kasei Valles, no hacen factible efectuar un análisis Geomorfológico y Morfométrico convencional. No es posible enmarcar los canales de Kasei Valles dentro de la unidad de análisis denominada cuenca, ya que su entorno corresponde a una penillanura sin divisorias topográficas diferenciables, no posee corrientes tributarias que permitan realizar análisis de simetría, disección o migración de canales, ni mucho menos de direcciones de flujo.

En la actualidad no se ha evidenciado ninguna forma de pluviosidad en el planeta Marte, que favorezca la aparición de escorrentía superficial y los potenciales flujos subsuperficiales de agua en estado líquido aún están siendo estudiados, razón por la cual no hace parte de una ecuación geomorfológica en el contexto fisiográfico estudiado.

El abordar el estudio geomorfológico de Kasei Valles, supone un reto de importante envergadura, no solo por la dificultad que supone la interpretación del paisaje en un medio con características fisiográficas diferentes al Planeta Tierra, sino también por enfrentar paradojas como la Equifinalidad, que condicionan la denominación que se le otorgue a cada morfología presente. Por esta razón, se hace fundamental la interpretación y el criterio geológico, basado en la experticia y soportado por la información proporcionada por las diversas misiones de

exploración espacial, que han llegado a la órbita de Marte y recientemente hasta su superficie.

En el análisis morfométrico pudo evidenciarse que la zona de máxima erosión hidrodinámica, se localiza en la margen izquierda de Kasei Valles Norte, en inmediaciones de Sacra Mensa, lugar que recibió frontalmente la mayor parte de la fuerza que traía el flujo en su desplazamiento rectilíneo desde su origen en Echus Chasma, luego del punto de inflexión del Canal Principal en el sector de Nilus Dorsa. Dada su conformación geomorfológica, es posible concluir que a través de Kasei Valles Norte, se desplazó gran porcentaje del volumen de flujo que discurría por el Canal Principal de Kasei Valles.

Dadas las evidencias halladas en las secciones transversales de los canales de Kasei Valles y teniendo en cuenta que las formaciones en las cuales fueron labrados los canales en el área de interés, tienen características litológicas similares, es posible determinar que la mayor profundización hallada en Kasei Valles Sur, se debería a la acción de eventos tectónicos de basculamiento hacia el Sur, que forzaron a que la acción de socavación por parte de los flujos, hubiera generado una mayor profundidad del cauce en Kasei Valles Sur.

Aunque en el presente texto, se aborda la geomorfología y morfometría de los canales mayores de Kasei Valles, desde su analogía con canales producidos por corrientes fluviales, se considera que no es posible realizar un análisis hidráulico e hidrológico, que considere la descarga y volúmenes de agua que potencialmente modelaron su relieve actual, debido a que sus características no posibilitan la aplicación de métodos y ecuaciones convencionales. En su origen no se aprecia una zona de recarga, no posee tributarios y no es posible la delimitación de una cuenca.

Del análisis Morfométrico de los Canales de Kasei Valles, se deduce una fuerte influencia de factores de origen tectónico y/o litológico, tanto en el control de su trayectoria como en su perfil longitudinal. Grandes saltos indican la existencia de discontinuidades estructurales o diferencia de competencia de las rocas ante la erosión mecánica, que determinan el gradiente de profundización de los canales, máxime si se tiene en cuenta que la pendiente general de los canales a lo largo del recorrido, no es alta.

La diferencia de profundidad existente entre los canales de Kasei Valles Norte y Kasei Valles Sur y que se aprecia a favor de este último, harían viable la existencia de un basculamiento de origen tectónico hacia el Sur.

Las secciones transversales de los canales e imágenes de sensores remotos, muestran extensas Terrazas de Erosión, posiblemente generadas por un agente modelador de alta capacidad denudativa.

El mejor escenario para explicar el origen de los canales de Kasei Valles, es aquel acorde con lo hallado en la caracterización geomorfológica lograda en la presente investigación y basada en las imágenes de sensores remotos, donde se conjugan eventos geodinámicos endógenos y exógenos, de manera compleja pero secuencial, para el modelado de estas geoformas hasta su estado actual.

La conformación de los canales mayores de Kasei Valles, tuvo inicio como un Aulacógeno en el Hesperiano Temprano, luego del Rift de Valles Marineris. Este tallado en la superficie de Marte, no se dio en un solo evento catastrófico, sino que fue producto de múltiples eventos conjugados.

Es factible que la actividad tectónica en el Rift de Echus Chasma/Kasei Valles, haya continuado. Muestra de esto es la presencia de diques intruyendo los depósitos Amazonianos de flujos volcánicos y un cono volcánico con restos de columnas de lava, que indicarían una viscosidad diferente a aquellas que fluyeron desde Tharsis.

11. RECOMENDACIONES

Con el fin de dilucidar de manera completa la presencia de minerales compatibles con ambientes acuosos, en el sector de Echus Chasma y en los canales de Kasei Valles, es importante que se densifique la cobertura de imágenes HiRISE, CRISM y THEMIS en estos sectores, pues esto permitiría obtener modelos digitales del terreno con mayor y mejor resolución espacial, además de que sería posible un análisis detallado y con continuidad espacial, de potenciales afloramientos minerales en diversos sectores de interés.

De igual manera, es indispensable contar con imágenes de Kasei Valles que posean una mayor resolución temporal, ya que las encontradas pertenecen a uno o pocos momentos en el tiempo histórico de la exploración de Marte, situación que disminuye la posibilidad de analizar la evolución de los rasgos geomorfológicos presentes, a través de estudios multi-temporales y de series de tiempo.

Es necesario el estudio de la dinámica interna de los Montes Tharsis y la posible evolución del Rift de Echus Chasma/Kasei Valles, mediante la implementación de técnicas de Interferometría con Radar de Apertura Sintética (InSAR), con las cuales sería posible determinar la existencia de deformaciones en los edificios volcánicos de Tharsis y las potenciales subsidencias o desplazamientos en el Aulacógeno Echus Chasma/Kasei Valles. Esta investigación podría ser complementada mediante la implementación en el sector de interés, de una red de GPS (Sistema Global de Posicionamiento), que permita determinar vectores de desplazamiento de la corteza marciana, para contrastar y armonizar los datos obtenidos por los análisis Interferométricos.

Se hace preciso ahondar en el conocimiento del ciclo del agua en Marte y su interacción con la litósfera y atmósfera, con el fin de esclarecer la realidad de los supuestos que muchos autores realizan, con respecto a la existencia de virtuales reservorios de agua y zonas de recarga, sus características, distribución y profundidad.

Muchos de los interrogantes que surjan alrededor del origen de Kasei Valles, sería posible solucionarlos mediante la exploración de su desembocadura, razón por la cual sería relevante el envío de un Rover Espacial, al sector donde confluye este complejo de canales con las tierras bajas de Chryse Planitia, el cual permitiría detallar los rasgos superficiales y la Geología a una escala métrica, así como realizar análisis de Petrología, Geoquímica y propiedades mecánicas de los materiales superficiales y subsuperficiales.

La difusión del conocimiento científico, así como la posibilidad de acceder de manera libre a la información obtenida por las diferentes misiones de exploración planetaria, es fortalecida por los esfuerzos de instituciones como la Agencia Espacial de los Estados Unidos -NASA, La Universidad de Arizona y la Agencia Espacial Europea –ESA. Dado lo anterior, es esencial que las demás instituciones involucradas en la exploración espacial que aún no lo han hecho, pongan a disposición de la comunidad científica, la información de Teledetección que pueda ser utilizada para aumentar el nivel de conocimiento en las ciencias planetarias.

Por razones de disponibilidad de tiempo y recursos financieros, el estudio realizado tiene los alcances previstos. No obstante, es recomendable que otros investigadores sigan el camino, ya que esto puede significar el hecho de poseer más elementos para el entendimiento de la geomorfología marciana y la potencial participación del agua, como elemento fundamental en la conformación actual del planeta.

12. BIBLIOGRAFÍA

- Arizona State University – ASU, (2016). Mars Space Flight Facility. Planetary Missions. Recuperado de <http://www.mars.asu.edu/ap/missions/index.html>
- Bandfield, J.L. (2002). Global mineral distributions on Mars, *Journal of Geophysical Research*, 107, 10.1029/2001JE001510.
- Baker, V. R. & Milton, D. J. (1974). Erosion by catastrophic floods on Mars and Earth. *Icarus* 23, 27–41. doi:10.1016/0019-1035(74)90101-8
- Baker, V.R., Strom, R.G., Gulick, V.C., Kargel, J.S., Komatsu, G., Kale, V.S. (1991). Ancient oceans, ice sheets and the hydrological cycle on Mars. *Nature*, 352, pp. 589-594. doi: 10.1038/352589a0.
- Baker, V. R., M. H. Carr, V. C. Gulick, C. R. Williams, and M. S. Marley. (1992). Channels and valley networks, in Mars. *University of Arizona Press, Tucson, USA.*
- Baker, V.R. (2006). Geomorphological evidence for water on Mars. *Elements: An International Magazine of Mineralogy, Geochemistry, and Petrology*. USA. American Chemical Society. Vol 2, pp.139-143.
- Baker, V.R., Maruyama, S., and Dohm, J.M. (2008). Tharsis superplume and the geological evolution of early Mars. In *Superplumes: Beyond Plate Tectonics*, edited by D.A. Yuen, S. Maruyama, S.-I. Karato, and B.F. Windley, Springer, Dordrecht, the Netherlands, pp 507–523.
- Bell, J.M., Bougher, S. W., Murphy, J.R. (2007). Vertical dust mixing and the interannual variations in the Mars thermosphere. *Journal of Geophysical Research: Planets*. USA. American Geophysical Union. Vol 112, Issue E12. doi:10.1029/2006JE002856.
- Bibring, J.P. et. al. (2005). Global mineralogical and aqueous Mars history derived from OMEGA/Mars Express data. *Science*. Paris. *American Association for the Advancement of Science – AAAS.*

- Burke, K. & Whiteman, A.J. (1973). Uplift, rifting and break-up of Africa. In Tarling, D.H. & Runcorn, S.K. (eds) *Implications of continental drift to the earth sciences*. Academic Press, London. 735-755.
- Cansler and Carr (2001). Paleogeomorphology of the Sub-Pennsylvanian Unconformity of the Arbuckle Group (Cambrian-Lower Ordovician). Kansas Geological Survey. Open-file Report 2001-55. Recuperado de <http://www.kgs.ku.edu/PRS/publication/OFR2001-55/P3-02.html>
- Carr M.H. (1986). Mars: A water-rich planet? *Icarus* 56. 187-216.USA. Elsevier. doi: 10.1016/0019-1035(86)90019-9
- Carr, M.H. (1996). Channels and valleys on Mars: cold climate features formed as a result of a thickening cryosphere. *Planetary and Space Science*. Vol. 44, No. 11, pp. 1411-1423, doi:10.1016/S0032-0633(96)00053-0.
- Carr, M. H., and Head III, J. W. (2003). Basal melting of snow on early Mars: A possible origin of some valley networks. *Geophysical Research Letters*. USA. American Geophysical Union. Vol. 30, No. 24, pp. 2245, doi:10.1029/2003GL018575.
- Carr, M.H., (2006). The Surface of Mars. *Cambridge planetary science*, pp. 307. ISBN-13: 978-0-521-87201-0, doi: 9780521872010.
- Centro de Astrobiología CSIC-INTA (2016). Rover Environmental Monitoring Station-REM. *Atmosfera de Marte*. Recuperado de <http://cab.inta-csic.es/remes/es/atmosfera-de-marte/>
- Chaparro, L. (2016). Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación, Universidad Complutense de Madrid. *Rutas marcianas por los volcanes de Lanzarote*. Recuperado de http://www.ucm.es/data/cont/docs/3-2016-07-14-2016_07_not07.pdf
- Chapman, M. G. et al. (2010). Amazonian geologic history of the Echus Chasma and Kasei Valles system on Mars: New data and interpretations. *Earth and Planetary Science Letters*, 294, 238–255 pp.

- Christiansen, E.H., and Greeley, R. (1981), Megalahars(?) in the Elysium region, Mars. [abs.]: Houston, Lunar and Planetary Institute, *Lunar and Planetary Science XII*, 138-140 pp.
- Christiansen, E.H. (1989). Lahars in the Elysium region of Mars. *Geology*, Vol. 17, pp. 203. USA. The Geological Society of America, doi: 10.1130/0091-7613.
- Christiansen E. H. and Hamblin W. K. (2007). Exploring the Planets / Edition 2, Prentice Hall Professional Technical Reference. ISBN-3:9780023224218
- Christensen, P. R., Kieffer, H. H., Jakosky, B. M and Mellon, M. T, (2000). High resolution thermal inertia mapping from the Mars Global Surveyor Thermal Emission Spectrometer. *Icarus*. USA. Elsevier.
- Christensen, P. R., et al. (2004). The Thermal Emission Imaging System (THEMIS) for the Mars 2001 Odyssey Mission. *Space Science Reviews*. Springer Science Business Media. Netherlands. Ed. Springer, Vol. 110, Issue 1, pp.85-130, doi: 10.1023/B:SPAC.0000021008.16305.94.
- Christensen, P. R., et al. (2005). Water at the Poles and in Permafrost Regions of Mars. *Elements: An International Magazine of Mineralogy, Geochemistry, and Petrology*. USA. American Chemical Society. Vol. 2, No 3, pp 151-156. ISSN 1811-5209.
- Christensen, P.R., et al. (2006), Formation of recent martian gullies through melting of extensive water-rich snow deposits, *Nature*, 422, 45-48. doi:10.1038/nature01436.
- Claudin, F. and Ernstson, K. (2003). Geologia planetaria y Geologia regional: el debate sobre un impacto múltiple en Aragón. *Enseñanza de las ciencias de la Tierra*, Vol. 11, nº 3, pp 202-212.
- Clifford, S.M. and Parker, T.J., (2001). The Evolution of the Martian Hydrosphere: Implications for the Fate of a Primordial Ocean and the Current State of the Northern Plains. *Icarus* . Vol.154, pp. 40-79. doi:10.1006/icar.2001.6671.
- Coleman, N. M., (2003). Aqueous flows carved the outflow channels on Mars. *Journal of Geophysical Research*. Vol. 108(E5), pp. 5039, doi:10.1029/2002JE001940.

- Cook, A. C et al. (2003). Volcanic rifting at Martian grabens. *J. Geophys. Res.*, 108 (E5), 5044. doi:10.1029/2002JE001852, 2003.
- Cutts, J.A. and Blasius, K.R., (1981). Origin of Martian outflow Channels-The eolian hypothesis. *Journal of Geophysical Research*. Vol. 86, pp, 5061-5074. doi:10.1029/JB086iB06p05075.
- Davies, K. (1969). Some Jurassic environments and tectonics [abs]: *Geol. Soc. America Abs. with programs*, pt 2, South-Central Sec., pp. 8-9.
- Dawson, A.G (1992). *Ice Age Earth: Late Quaternary Geology and Climate*. United Kingdom. Routledge, Chapman and Hall Inc. ISBN-13: 978-0415015677
- De Pablo, M.A., Pacifici, A. (2007). Geomorphologic evidences of water level changes on Nepthes Mensae, Mars. *Geophysical Research Abstracts*, Vol.9. 02266, SRef-ID: 1607-7962/gra/EGU2007-A-02266.
- De Pablo, M.A., Komatsu, G. (2007). A smoke-like phenomenon observed in Elysium Planitia, Mars. *Geophysical Research Abstracts*. Vol. 9, 01775, SRef-ID: 1607-7962/gra/EGU2007-A-01775.
- Dohm, J.M. et. al. (2008). Recent geological and hydrological activity on Mars: The Tharsis/Elysium corridor. *Planetary and Space Science*. Volume 56, Issue 7, pp. 985–1013, doi: 10.1016/j.pss.2008.01.001.
- Dohm, J.M. et al., (2009). GRS Evidence and the possibility of paleoceans on Mars. *Planetary and Space Science*. Vol. 57(5), pp.664-684. doi: 10.1016/j.pss.2008.10.008
- Dundas, C., Bridges, N., HiRISE Team. (2007). Early HiRISE observations of light-toned layered deposits. [abs.]: Houston, Lunar and Planetary Institute, *Lunar and Planetary Science XXXVIII*. 148 pp.
- Edwards, C.S. et al. (2011). Mosaicking of global planetary image datasets. Techniques and data processing for Thermal Emission Imaging System (THEMIS) multi-spectral data. *Journal of Geophysical Research: Planets*. USA. American Geophysical Union.

- European Space Agency –ESA, (2012). Mars Express devela la historia de la actividad volcánica de Marte. Recuperado de http://www.esa.int/esl/ESA_in_your_country/Spain/Mars_Express_desvela_la_historia_de_la_actividad_volcanica_en_Marte
- Fairén, A.G. et al. (2003). Episodic flood inundations of the northern plains of Mars. *Icarus* 165, p 53–67. doi: 10.1016/S0019-1035(03)00144-1
- Fastook J. L., Head J. W., Marchant D. R. (2007). Tharsis Montes ice sheet models at high obliquity driven by GCM results. [abs.]: Houston, Lunar and Planetary Institute, *Lunar and Planetary Science XXXVIII*, 1338, p.1119
- Fastook, J.L., Head, J.W., Marchant, D.R., Forget, F., (2008). Tropical mountain glaciers on Mars: Altitude-dependence of ice accumulation, accumulation conditions, formation times, glacier dynamics, and implications for planetary spin-axis/orbital history. *Icarus*. Vol. 198, pp. 305–317
- Ferguson, R. L., Christensen P. R., and Kieffer H. H., (2006a). High-resolution thermal inertia derived from the Thermal Emission Imaging System (THEMIS): Thermal model and applications, *J. Geophys. Res.* Vol. 111(E12004), doi:10.1029/2006JE002735.
- Ferguson, R. L., Christensen P. R., Bell III J. F., Golombek M. P. Herkenhoff, K. E., and Kieffer H. H., (2006b), Physical properties of the Mars Exploration Rover landing sites as inferred from Mini-TES derived thermal inertia, *J. Geophys. Res.* Vol.111(E2), E02S21, doi:10.1029/2005JE002583.
- Ferrández, G.B. (2003). Inundaciones catastróficas en Marte y sus análogos Terrestres. *Curso de Ciencias Planetarias, Salamanca. España*. Editorial Universidad de Salamanca. ISBN 84-7800-582-X, pp. 111-130.
- F. Rull et al. (2008). Raman and Mössbauer spectroscopic characterisation of sulfate minerals from the Mars analogue sites at Rio Tinto and Jaroso ravine, Spain. [abs.]: Houston, Lunar and Planetary Institute, *Lunar and Planetary Science XXXIX*, 1616.
- Genova, A. et al (2016). Seasonal and static gravity field of Mars from MGS, Mars Odyssey and MRO radio science. *Icarus* 272, p 228–245. doi:10.1016/j.icarus.2016.02.050

- G. Amaral, J. Martinez-Frias and, L. Vázquez (2007). UV Shielding Properties of Jarosite Vs. Gypsum: Astrobiological Implications for Mars. *World Applied Sciences Journal 2 (2)*: 112-116, ISSN 1818-495
- Hargitai, H. et al. (2010). Mars climate zone map based on TES data. [abs.]: Houston, Lunar and Planetary Institute, *Lunar and Planetary Science XL1.1199* pp.
- Hargitai, H., Gulick, V. y Glines N. (2016). A Global Survey of the Fluvial Islands of Mars. [abs.]: Houston, Lunar and Planetary Institute, *Annual Planetary Geologic Mappers Meeting.7011.pdf*
- Haskin, L. A., et al. (2005). Water alteration of rocks and soils on Mars at the Spirit rover site in Gusev crater, *Nature*, 436, 66–69, doi: 10.1038/nature03,640.
- Harrison, K. P., and R. E. Grimm (2008), Multiple flooding events in Martian outflow channels, *Journal of Geophysical Research*, 113, E02002. doi:10.1029/2007JE002951.
- Harrison, K.P., Chapman, M.G., (2008). Evidence for ponding and catastrophic floods in central Valles Marineris, Mars. *Icarus*. Vol. 198, pp.351–364. doi:10.1016/j.icarus.2008.08.003.
- Head, J.W., Hiesinger, H., Ivanov, M.A., Kreslavsky, M.A., Pratt, S., Thomson, B.J., (1999). Possible Ancient Oceans on Mars: Evidence from Mars Orbiter Laser Altimeter Data. *Science*. Vol. 286, 2134, doi:10.1126/science.286.5447.2134.
- Head, J.W., Pratt, S., (2001). Extensive Hesperian-aged south polar ice sheet on Mars: evidence for massive melting and retreat, and lateral flow and ponding of meltwater. *Journal of Geophysical Research*. Vol. 106, pp.275–299.
- Howard, A. (2009). Planetary morphodynamics: Scaling and interpreting sedimentary processes from Earth to Mars and Titan. In Vionnet, C. A., Garcia, M. H., Latrubesse, E. M., and Perillo, G. M. E. (eds), *River, Coastal and Estuarine Morphodynamics: RCEM 09*, CRC Press, Boca Raton, Volume 1, p. 207-216.

- IAU, I. A. (2006). *Gazetteer of Planetary Nomenclature*. Recuperado de <http://planetarynames.wr.usgs.gov/Feature/2942>
- Irwin, R. P., Craddock, R. A. & Howard, A. D. (2005). Interior channels in Martian valley networks: discharge and runoff production. *Geology*. Vol 33, pp. 489-492, doi 10.1130/G21333.1.
- Johnson-Carroll, A., (2011). A report of the depositional environments: braided rivers, anastomosing rivers, and sheet sands. Recuperado de http://www.academia.edu/8082802/A_report_of_the_depositional_environments_braided_rivers_anastomosing_rivers_and_sheet_sands.
- Kargel, J. S., Baker, V. R., Beget, J. E., Lockwood, J. F., Pewe, T. L., Shaw, J. S., and Strom, R. G. (1995). Evidence of ancient continental glaciation in the martian northern plains. *Journal of Geophysical Research*. Vol.100, pp. 5351-5368.
- Kieffer, H. H., Martin, A. R., Peterfreund, B. M., Jakosky, E. D. Miner, F. D., (1977). Thermal and albedo mapping of Mars during the Viking primary mission. *Journal of Geophysical Research: Planets*. USA. American Geophysical Union.
- Koeberl, C. (2002). Mineralogical and geochemical aspects of impact craters. *Mineralogical Magazine*, Vol. 66(5), pp. 745–768. doi: 10.1180/0026461026650059
- Lakdawalla, E., (2013). Noachian, Hesperian, and Amazonian, oh my! --Mars' Geologic Time Scale. Recuperado de <http://www.planetary.org/blogs/emily-lakdawalla/2013/10251246-noachian-hesperian-amazonian.html?referrer=https://www.google.com.co/>.
- Leask, H.J., Wilson, L. and Mitchell, K.L. (2007). Formation of Mangala Valles outflow channel, Mars: Morphological development and water discharge and duration estimates. *Journal of Geophysical Research*. Vol. 112: doi: 10.1029/2006JE002851. issn: 0148-0227.
- Leverington, D.W.,(2011). A volcanic origin for the outflow channels of Mars: Key evidence and major implications. *Geomorphology*. Vol. 132, pp.51-75, doi: 10.1016/j.geomorph.2011.05.22

- Luchitta, B.K., (1982). Ice sculpture in the Martian outflow channels. *Journal of Geophysical Research*. Vol. 87, pp. 9951-9973. doi: 10.1029/JB087iB12p09951.
- Lucchitta, B. K., Clow, G. D., Geissler, P. E. et al. (1992). The canyon system on Mars. *In Mars*, ed. H. H. Kieffer, B. M. Jakosky, C. W. Snyder, and M. S. Matthews. Tucson: University of Arizona Press, pp. 453-92.
- Malin, M.C., Bell, J., Cantor, B., Caplinger, M., (2007). Context Camera investigation on board the Mars Reconnaissance Orbiter. *Journal of Geophysical Research: Planets*. USA. American Geophysical Union. Vol. 112, E05S04, doi:10.1029/2006JE002808.
- Marra, W. A., et al., (2015). Groundwater seepage landscapes from distant and local sources in experiments on Mars. At www.earth-surf-dynam.net/3/389/2015/doi:10.5194/esurf-3-389-2015.doi:10.5194/esurf-3-389-015-supplement
- Mars Channel Working Group, (1983). Channels and valleys on Mars. *Bulletin v. 94*. USA. Geological Society of America.
- Marshak, S., (2009), *Essentials of Geology*, W. W. Norton & Company, 3rd ed. ISBN 978-0-393-19656-6
- Martínez Frías, J. (2015). Análogos terrestres. Marte... y más allá. *Revista Científica Investigación y Ciencia*. Recuperado de <http://www.investigacionyciencia.es/blogs/astronomia/71/posts/anlogos-terrestres-marte-y-ms-all-13012>.
- Martínez-Frías, J. (2006). Interdisciplinariedad y Exploración Planetaria. *Tribuna de la Ciencia*, julio: 3.
- Masson, P., Carr, M. H., Costard, F. et al., (2001). Geomorphologic evidence for liquid water. In *Chronology and Evolution of Mars*, ed. R. Kallenbach, J. Giess, and W. K. Hartmann. Dordrecht: Kluwer Academic, pp. 333 64.
- Masursky, H., (1973). An overview of geological results from Mariner 9. *Journal of Geophysical Research: Planets*. USA. American Geophysical Union. Volume 78, Issue 20, pp. 4009–4030.

- McCauley, J.K. Carr, M.H., Cutts, J.A., Hartmann, W.K., Masursky, H., Milton, D.J. and Williams D.E., (1972) Preliminary Mariner 9 report on the Geology of Mars. *Icarus*. Vol. 17, pp.289-327.
- McEwen, A.S., Eliason, E., Bergstrom, J., (2007). Mars Reconnaissance Orbiter High Resolution Imaging Science Experiment (HiRISE). *Journal of Geophysical Research: Planets*. USA. American Geophysical Union. Vol. 112, Issue E5, doi: 10.1029/2005JE002605.
- Mege, D., Cook, A. C., Garel, E., Lagabrielle, Y., and Cormier, M. H. (2003). Volcanic rifting at Martian grabens. *Journal of Geophysical Research (planets)*. Vol.108 (ES), pp.5044.
- Milone E. F., William J., Wilson F. (2014). *Solar System Astrophysics*. pp.300 ISSN 2196-96-98. Springer, doi: 10.1007/978-1-4614-8848-4
- Montgomery, D.R., Som, S.M., Jackson, M.P.A., Schreiber, B.C., Gillespie, A.R., and Adams, J.B., (2009). Continental-scale salt tectonics on Mars and the origin of Valles Marineris and associated outflow channels. *Geological Society of America Bulletin*. Vol. 121, pp. 117–133, doi:10.1130/B26307.1
- Murchie, S., et al. (2007). Compact Reconnaissance Imaging Spectrometer for Mars (CRISM) on Mars Reconnaissance Orbiter (MRO). *Journal of Geophysical Research: Planets*. USA. American Geophysical Union. Vol. 112, E05S03, doi:10.1029/2006JE002682.
- NASA-AMES, (2015). *Mars Climate Modeling Center*. Recuperado de <http://spacescience.arc.nasa.gov/mars-climate-modeling-group/past.html>.
- NASA, (2015). All about Mars. Recuperado de <http://mars.nasa.gov/allaboutmars/extreme/>.
- NASA-JPL, (2016). Mars Science Laboratory – Curiosity Rover. Recuperado de <http://mars.nasa.gov/msl/mission/science/results/>.
- Nummedal, D. and Prior, D.B., (1981). Generation of Martian chaos and channels by debris flows. *Icarus*. Vol. 45, pp. 77-86

- Ori, G. G., et al., (2013) Mud volcanoes in Mars' Geologic Record: the case of Firsoff Crater. *Earth and Planetary Science Letters* Vol. 304, Issue 3, pp. 511-519, doi: 10.1016/j.epsl.2011.02.027.
- Parker, T.J., et al., (1993). Coastal geomorphology of the Martian northern plains. *Journal of Geophysical Research: Planets*. USA. American Geophysical Union. Vol, 98, Issue E6, pp 11061–11078. doi: 10.1029/93JE00618
- Pedraza, J., (1996). Geomorfología fluvial y lacustre. *Geomorfología. Principios, métodos y aplicaciones*. Editorial Rueda. Madrid.
- Pelletier, J. D., Comeau, D. and Kargel, J., (2010). Controls of glacial valley spacing on Earth and Mars. *Geomorphology*, 116, pp. 189-201.
- Reading, H.G. 1996. *Sedimentary Environments: Processes, Facies and Stratigraphy*. Blackwell Science, 688 p. ISBN: 978-0-632-03627-1
- Russell, P.S., Head, J.W., (2007). The Martian hydrologic system: multiple recharge centers at large volcanic provinces and the contribution of snowmelt to outflow. channel activity. *Planet. Space Sci. Planet Mars II* 55, 315–332. <http://dx.doi.org/10.1016/j.pss.2006.03.010>.
- Robinson, M.S., and Tanaka, K. L (1990). Highest discharge values calculated for floods events on Mars. *Geology* 18, p. 902-905. doi: 10.1130/0091-7613(1990)018<0902:MOACFE>2.3.CO;2
- Sagan, C., Toon, O. B., and Gierasch P. J., (1973). Climatic change on Mars, *Science*, Vol. 181, pp. 1045-1049.
- Serrato, P.K., (2007). Propuesta metodológica para la definición, clasificación y zonificación de los cañones colombianos: una vision geográfica. *Perspectiva Geográfica*, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Núm. 12.
- Squyres, S. W. et al., (2004). In situ evidence for an ancient aqueous environment at Meridiani Planum, Mars. *Science* 306, 1709–1714 (2004). American Association for the Advancement of Science – AAAS doi: 10.1126/science.1104559; pmid: 15576604

- Stuhlinger, E., (1970). *Why Explore Space?*. Marshall Space Flight Center. Recuperado de <http://documents.mx/documents/why-explore-space-1970-nasamsfc-dr-ernst-stuhlinger.html>
- Tanaka, K. L. & Golombek, M. P., (1989). Martian tension fractures and the formation of grabens and collapse features at Valles Marineris. [abs.]: Houston, Lunar and Planetary Institute, *Lunar and Planetary Science XIX*. Pp. 383-396.
- Tanaka, K.L., et al., (2014). Geologic map of Mars. *U.S. Geological Survey Scientific Investigations Map 3292*, scale 1:20,000,000, pamphlet 43 p. SIM 3292. At <http://dx.doi.org/10.3133/sim3292>.
- The Planetary and Space Sciences Research Institute- The Open University UK (2012). *The Catalogue of Planetary Analogues. Final Version*. Under ESA Contract 4000104716/11/NL/AF.
- Warner, N., Gupta, S., Lin, S.Y., Kim, J.R., Muller J.P. and Morley, J., (2009). Late Noachian to Hesperian climate change on Mars: Evidence of episodic warming from transient crater lakes near Ares Vallis. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 115, E06013, doi:10.1029/2009JE003522.
- Williams, R.M.E. et al. (2013). Martian fluvial conglomerates at Gale Crater, *Science*, Vol 340, Issue 6136, pp.1068-1072, doi:10.1126/science.1237317.
- Zegers, T. et al., (2010). Melt and collapse of buried water ice: An alternative hypothesis for the formation of chaotic terrains on Mars. *Earth and Planetary Science Letters* 297 (3–4). P. 496–504. Bibcode: 2010E&PSL.297..496Z. doi:10.1016/j.epsl.2010.06.049