



CONAMA10
CONGRESO NACIONAL
DEL MEDIO AMBIENTE

COMUNICACIÓN TÉCNICA

**Caracterización de los terrenos
poligonales de *Utopia Planitia* (Marte)
como posibles indicadores de la
presencia de agua y su comparación con
un análogo terrestre en Kevo (Laponia
finlandesa)**

Autor: Gonzalo Vicente Gómez Sáez

Institución: Universidad de Alcalá

e-mail: gongs18@hotmail.com

Otros Autores: Miguel Ángel de Pablo Hernández (Departamento de Geología.
Edificio de Ciencias. Universidad de Alcalá de Henares)

RESUMEN

Los terrenos poligonales son un tipo de estructura geomorfológica formada por procesos de contracción térmica estacional. Estos ciclos de hielo-deshielo del suelo generan una ordenación de los materiales dando lugar a redes poligonales, caracterizando así a las regiones con condiciones periglaciares. Además al aparecer en zonas con permafrost o hielo perenne, sirven como indicador de la presencia de agua. De forma análoga, el estudio de los terrenos poligonales en Marte es por tanto un medio de establecer la posible existencia de agua congelada cerca de la superficie. En este trabajo de investigación se caracterizan 721 polígonos de Utopia Planitia (Marte) a partir de imágenes de satélite (adquiridas por los instrumentos CTX y THEMIS). Después, se han caracterizado mediante fotografías aéreas 209 polígonos en la zona de Kevo, en Laponia Finlandesa, para comparar los terrenos poligonales en ambos planetas, y establecer las dificultades y factores a tener en cuenta a la hora de interpretar los relieves observados en las imágenes de Marte, discutiendo y analizando múltiples hipótesis de trabajo. Este trabajo de gabinete se ha ampliado con el estudio y caracterización de 169 polígonos de la zona de estudio de Kevo mediante una campaña de campo desarrollada durante Junio de 2010, en la que se recopilaban diversos parámetros para caracterizar los polígonos, y el entorno en el que éstos se encuentran. Comparando los resultados de ambas zonas se extraen similitudes y diferencias entre terrenos poligonales terrestres y marcianos, además de servir como ayuda para una mejora en la metodología de identificación de dichos terrenos poligonales en las imágenes obtenidas por teledetección, ayudando a diferenciarlos de otras estructuras geomorfológicas que en función de la resolución de las imágenes pueden llegar a confundirse otros con rasgos similares, pero producidos por procesos muy diferentes: grietas de desecación, los 'basketball terrains' o los terrenos corroídos. Al caracterizar los terrenos poligonales de Marte además se aportan más indicios de la presencia de agua subsuperficial con su consiguiente impacto en la posible existencia de formas de vida en el planeta tanto en el pasado como en la actualidad, y al establecer una analogía terrestre se abren otras vías de conocimiento de la presencia de agua.

Palabras Clave: Marte, Terrenos poligonales, Permafrost, Laponia, Agua

Resumen: Los terrenos poligonales son un tipo de estructura geomorfológica formada por procesos de contracción térmica estacional. Estos ciclos de hielo-deshielo del suelo generan una ordenación de los materiales dando lugar a redes poligonales, caracterizando así a las regiones con condiciones periglaciares. Además al aparecer en zonas con permafrost o hielo perenne, sirven como indicador de la presencia de agua. En consecuencia, el estudio de los terrenos poligonales en Marte es por tanto un medio de establecer la posible existencia de agua congelada cerca de la superficie. En este trabajo de investigación se caracterizan 721 polígonos de Utopia Planitia (Marte) a partir de imágenes de satélite (adquiridas por los instrumentos CTX y THEMIS). Después, se han caracterizado mediante fotografías aéreas 209 polígonos en la zona de Kevo, en Laponia Finlandesa, para comparar los terrenos poligonales en ambos planetas, y establecer las dificultades y factores a tener en cuenta a la hora de interpretar los relieves observados en las imágenes de Marte, discutiendo y analizando múltiples hipótesis de trabajo. Este trabajo de gabinete se ha ampliado con el estudio y caracterización de 169 polígonos de la zona de estudio de Kevo mediante una campaña de campo desarrollada durante Junio de 2010, en la que se recopilaban diversos parámetros para caracterizar los polígonos, y el entorno en el que éstos se encuentran. Comparando los resultados de ambas zonas se extraen similitudes y diferencias entre terrenos poligonales terrestres y marcianos, además de servir como ayuda para una mejora en la metodología de identificación de dichos terrenos poligonales en las imágenes obtenidas por teledetección, ayudando a diferenciarlos de otras estructuras geomorfológicas que en función de la resolución de las imágenes pueden llegar a confundirse con otros con rasgos similares, pero producidos por procesos muy diferentes: las grietas de desecación, los 'basketball terrains' o los terrenos corroídos. Al caracterizar los terrenos poligonales de Marte además se aportan más indicios de la presencia de agua subsuperficial con su consiguiente impacto en la posible existencia de formas de vida en el planeta tanto en el pasado como en la actualidad, y al establecer una analogía terrestre se abren otras vías de conocimiento de la presencia de agua.

Palabras clave: Marte, Terrenos poligonales, Permafrost, Laponia, Agua.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. El permafrost y los terrenos poligonales como indicadores de la presencia de agua.

El permafrost es el terreno que permanece a temperatura igual o inferior a 0°C durante al menos dos años consecutivos (van Everdingen, 2005; IPA, 2010). Se trata del rasgo más característico de los ambientes periglaciares, que incluyen todos aquellos con condiciones, procesos y geomorfologías asociadas con el frío (ej., Dylik, 1964; Washburn, 1979; French, 1996; van Everdingen, 2005), aunque la presencia de permafrost no es requisito esencial para que un ambiente sea denominado periglacial (ej. French, 1996, van Gasselt, 2007). En principio, el permafrost es una capa congelada permanentemente, de espesor variable, y que se ha formado como consecuencia de largos periodos de congelación invernal y cortos periodos de descongelación veraniegos (van Gasselt, 2007). En base a esto último, se puede considerar que los modelados periglaciares y más aún todos aquellos en los que aparece permafrost, son perfectos indicadores de la presencia de hielo y, por consiguiente, de agua y posible habitabilidad (Dylik, 1964; Levy et al., 2010). Los ciclos de congelación - descongelación del suelo que allí se suceden, generan una ordenación de los materiales dando lugar a redes de terrenos poligonales que son la geomorfología más común de las zonas periglaciares terrestres (Kuzmin y Zabalueva, 2003). Mientras la formación de los terrenos poligonales en la Tierra se relaciona con procesos de contracción térmica estacional, en el caso de Marte no existe una explicación unánime (Washburn, 1979; Williams y Smith, 1989; French, 1996; Carr, 2006; van Gasselt, 2007; Levy et al., 2010). Por ello, se consideró interesante llevar a cabo un estudio que caracterizase algunos de los terrenos poligonales observados en Marte y, desde un enfoque multidisciplinar, tratase de analizar su implicación con el agua, la geología y demás características del Planeta Rojo.

1.2. Justificación de la zona de estudio.

De todas las regiones de Marte donde se han observado terrenos poligonales, se seleccionó Utopia Planitia. De las nueve llanuras o “planitias” que constituyen las Tierras Bajas de Marte, es la que se localiza más al norte. Esta región, como el resto de las Tierras Bajas del planeta, pudo estar cubierta por un gran océano en el pasado (ej., Baket et al., 1991; Fairén et al., 2003). Mientras Kuzmin y Zabalueva (2003) incluían los terrenos poligonales de Utopia Planitia en su mapa de distribución global, Mangold et al. (2003, 2004) no lo hicieron, argumentando que los polígonos no aparecían de manera representativa o que eran escasos. Autores posteriores, como Levy et al., (2005) que los

comparó con polígonos presentes en la Antártida, o van Gasselt (2007) que estudió las morfologías presentes en la zona, argumentaron al respecto que Utopia Planitia presenta una gran variedad geomorfológica típica de ambientes periglaciares terrestres.

Dentro de Utopia Planitia, se ha seleccionado una región de 319.000 km² como área de estudio (43,69° - 55,16° N y 108,12° - 127,03° E), ya que es una zona donde pudo haber un océano y por tanto estar repleta de agua en un tiempo geológico muy antiguo y, aunque existen discrepancias acerca de la relevancia de los terrenos poligonales allí presentes, hay suficientes evidencias de la existencia de los mismos. Además, en este estudio, los terrenos poligonales marcianos caracterizados se comparan con los de un análogo terrestre, con el fin de extraer similitudes y diferencias que ayuden a explicar su origen y distribución en Marte. Al mismo tiempo, se pretende en la medida de lo posible, ayudar en la mejora de las metodologías de identificación basadas en el análisis de imágenes obtenidas por teledetección.

Como análogo terrestre se seleccionó la región de Kevo en Laponia Finlandesa, zona periglaciaria con presencia permanente de permafrost. En la zona de Kevo, la región más al norte de todo Finlandia, existen grandes campos de terrenos poligonales, muchos de los cuáles únicamente han sido citados (Svensson, 1964; Seppälä 1983, 1997), pero no caracterizados. Debido a razones de accesibilidad, se seleccionó un área de estudio de 200x300 metros en la ladera sur la colina *Nuuvus Ailegas* (69°45'N, 27°01'E), donde se llevó a cabo un estudio múltiple: tanto un trabajo de gabinete basado en fotografías aéreas de hasta 50 cm/píxel de resolución, como un trabajo de campo realizado del 14 al 22 de Junio de 2010.

En este trabajo se plantearon los siguientes objetivos:

1. Caracterizar los terrenos poligonales de la zona de estudio seleccionada de Utopia Planitia (Marte) con imágenes obtenidas mediante teledetección por distintas misiones de exploración planetaria de las agencias NASA y ESA.
2. Caracterizar los terrenos poligonales de un análogo terrestre situado en Kevo (Laponia Finlandesa) con imágenes obtenidas por fotografía aérea, estudiando las mismas variables que en Marte. Se amplió dicho trabajo de gabinete de Kevo con un estudio de campo que permitió obtener datos complementarios.

3. Comparar los terrenos poligonales de Utopia Planitia y de Kevo en busca de similitudes y diferencias que ayuden a aportar más indicios de la presencia de agua subsuperficial en Marte con su consiguiente impacto en la posible existencia de formas de vida en el planeta tanto en el pasado como en la actualidad, e intentar establecer alguna analogía terrestre para abrir otras vías de conocimiento de la presencia de agua en el planeta.
4. Mejorar la metodología de identificación de los terrenos poligonales en las imágenes obtenidas por teledetección, ayudando a diferenciarlos tanto de ellos mismos (terrenos poligonales, con terrenos poligonales en piedra) como de otras estructuras geomorfológicas que en función de la resolución de las imágenes al ser observadas, pueden llegar a ser confundidas también con polígonos (grietas de desecación, “basketball terrains”, etc).

2. MODELADO PERIGLACIAR, PERMAFROST Y TERRENOS POLIGONALES.

2.1. Modelado periglaciario.

El término “periglaciario” se define como las condiciones, los procesos y las geomorfologías asociadas con ambientes fríos no glaciares (Dylik 1964; Washburn 1979; French 1996, van Everdingen 2005). Mientras Péwé (1969) considera todas las zonas bajo la acción del permafrost como zonas periglaciares, French (1996) pone el ejemplo de regiones alpinas consideradas periglaciares pero que no muestran ningún signo de permafrost. A pesar de ello, French (1996) y van Gasselt (2007) destacan la concordancia entre la distribución de las regiones periglaciares y la extensión global del permafrost.

Según Dylik (1964), muchos procesos pueden todavía ser considerados únicos en los ambientes periglaciares: (a) la formación de permafrost, (b) el desarrollo de grietas de contracción térmica, (c) la congelación y degradación del permafrost, por ejemplo, termokarst, y (d) la formación de cuñas de hielo.

2.2. Permafrost

El permafrost es el terreno (suelo, roca, hielo o material orgánico) que permanece a temperatura igual o inferior a 0°C durante al menos dos años consecutivos (van Everdingen 2005; IPA, 2010). Por tanto, no se define por la cantidad de humedad medida en el suelo ni por su ubicación, sino únicamente en función de la temperatura (NSDIC, 2010). En principio, el permafrost es la capa del terreno permanentemente congelada y de espesor variable que se forma como consecuencia de periodos largos de congelación durante inviernos fríos, y periodos cortos de descongelación durante el verano (ej., French, 1996; van Gasselt, 2007).

Hay muchos factores que controlan el permafrost. Su espesor depende de la conductividad térmica del material del subsuelo y de la temperatura de la superficie (Embleton y King, 1975). Pero también depende de la densidad y porosidad del material y del tamaño de las partículas (ej. van Gasselt, 2007). El espesor del permafrost puede llegar a variar desde unos pocos centímetros hasta 1500 metros, como los encontrados en Schalagonzy (Siberia) (Embleton y King, 1975). La profundidad a la que afectan las variaciones de temperatura superficial depende de la escala de tiempo considerada: diariamente los cambios de temperatura pueden llegar hasta profundidades de 1 metro, mientras que los cambios estacionales pueden conseguir afectar al permafrost hasta profundidades de 15 metros (Embleton y King, 1975). Por tanto, para registrar variaciones temporales de periodos más largos (años y décadas) es necesario adquirir datos de temperatura a centenares de metros de profundidad.

La mayoría de la actividad geomorfológica en el permafrost sucede en la “**capa activa**” (Pidwirny, 2006; van Gasselt, 2007) (Figura 1), que se define como la parte superficial estacionalmente descongelada y mide desde pocos centímetros hasta 3 metros de profundidad (Pidwirny, 2006). Al ser una capa dinámica, con constantes cambios de volumen y humedad, es capaz de producir modificaciones en los materiales más superficiales (textura y estructura), y dar lugar a modelados del relieve muy particulares (entre los que se encuentran los terrenos poligonales).

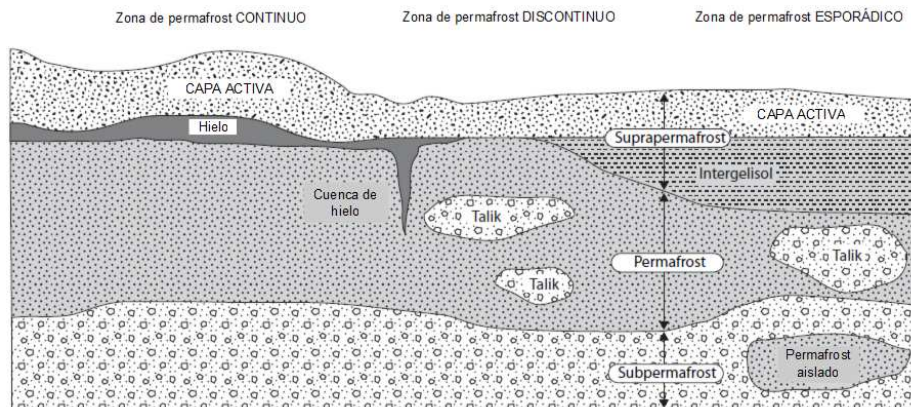


Figura 1: Estructura de la capa activa y del resto de componentes de permafrost terrestre en distintos tipos. (Modificado de van Gasselt, 2007).

2.3. Terrenos poligonales.

2.3.1. Terrenos poligonales en la Tierra.

Según Mellon y Arvidson (2009), los terrenos poligonales se definen como un tipo de estructura edáfica caracterizada por su forma poligonal y relacionados con procesos de contracción térmica estacional (Mellon y Arvidson, 2009).

Los terrenos poligonales generados por contracción térmica se producen como consecuencia de ciclos de congelación y descongelación de la capa activa del permafrost. Durante el invierno, debido a las temperaturas frías extremas, se produce una contracción térmica del terreno que se fractura y se forman fisuras y grietas, mucho más profundas que anchas (Pidwirny, 2006). Posteriormente en verano, la nieve presente en esos modelados periglaciares se derrite, liberando agua líquida que fluye dentro de las grietas, y al entrar en contacto con el permafrost se congela parcialmente. Al invierno siguiente el frío vuelve a congelar el agua de las grietas ampliándolas y creando un hueco que se rellena de agua durante el verano siguiente. Como se observa en la Figura 2, este ciclo se repite durante centenares de años formando nuevas grietas en la cuña de hielo en desarrollo (Pidwirny, 2006).

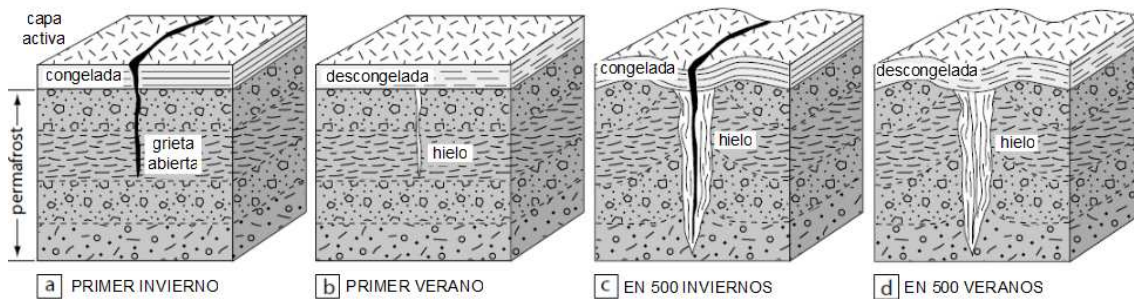


Figura 2: Proceso formador de las grietas que dan lugar a los terrenos poligonales por ciclos de congelación – descongelación de tipo estacional. (Adaptado de Lachenbruch, 1962; Pidwirny, 2006; van Gasselt, 2007).

Posteriormente, las grietas se propagan lateralmente y pueden formar celdas poligonales al cruzarse con otras grietas. Estas celdas varían en diámetro desde unos pocos decímetros hasta varios metros (French, 1996). Además, las grietas a menudo alcanzan una profundidad de varios decímetros, pero raramente superan los 10 metros (Black, 1976; French, 1996). Esa profundidad depende en gran medida del régimen climático y de la entrada de agua, hielo o arena (van Gasselt, 2007).

En función de las temperaturas alcanzadas durante el verano y el invierno, y del material que rellene las grietas, se pueden formar distintos tipos de polígonos como se observan en la Figura 3 (ej., Levy et al., 2010). De todos ellos, los polígonos generados por sublimación, presentan un aspecto bien distinto a los demás (Head et al., 2003; Levy et al., 2010). Estos se conocen como “**basketball terrains**”, por tener una textura similar a la de la superficie de una pelota de baloncesto, y sirven también como indicadores de la presencia de agua en el terreno (Levy et al., 2010). Como veremos más adelante, en la caracterización de los terrenos poligonales de Utopia Planitia han aparecido muchas zonas cubiertas por estos “basketball terrains” o polígonos por sublimación, por lo que han sido también objeto de estudio.

2.3.2. Terrenos poligonales en Marte.

Los terrenos poligonales en Marte se descubrieron por primera vez con las observaciones hechas por la cámara del módulo de amortizaje de la misión *Viking* en las inmediaciones de la cuenca de Utopia Planitia.

Al tener menos resolución las primeras imágenes, se observaron polígonos gigantes muy diferentes a los terrestres originados por contracción térmica estacional, por lo que se desechó la posibilidad de que fueran del mismo tipo (Hiesinger y Head, 2000). Con la posterior mejora de la resolución de los sensores de las siguientes misiones, se encontraron en Marte, además de los polígonos gigantes, terrenos poligonales más pequeños. Estos presentan una morfología y geometría muy similar a los polígonos terrestres generados por contracción térmica en zonas de permafrost, aunque todavía no hay evidencias que descarten su origen en otros procesos (van Gasselt, 2007). Algunos investigadores sugieren que dichos polígonos en el planeta rojo son indicadores clave de la presencia de hielo similar al terrestre, y por tanto de la existencia de agua en un pasado reciente (Andersen et al., 2005).

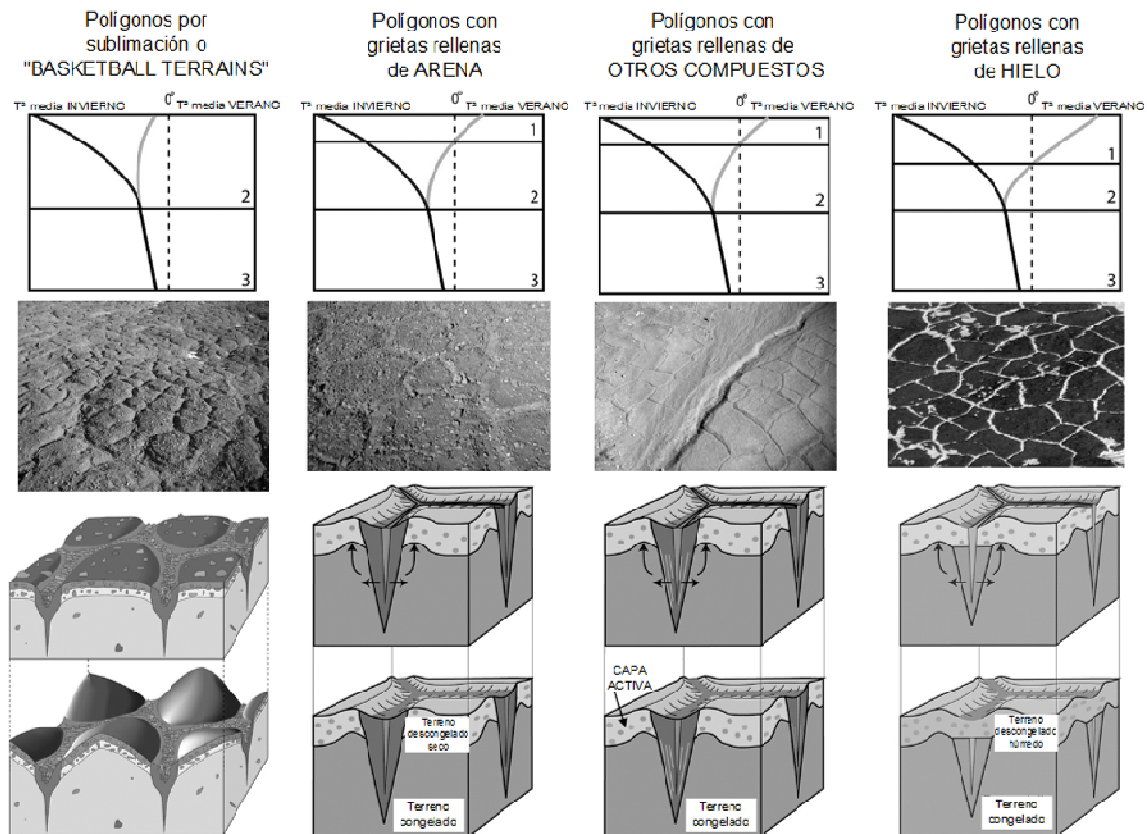


Figura 3: Distintos tipos de terrenos poligonales en los valles secos de la Antártida. (Modificado de Levy et al., 2010).

Mutch et al., (1977) y Luchitta (1981, 1983) fueron los primeros que interpretaron los terrenos poligonales de pequeño tamaño en Marte como posibles morfologías del terreno generadas por contracción térmica en zonas de permafrost. Desde entonces se han llevado a cabo más observaciones sobre estos polígonos, principalmente gracias a las

imágenes obtenidas por la cámara *MOC* (*Mars Orbiter Camera*), donde se observan con bastante claridad (Figura 4) (Malin et al., 1992; Malin y Edgett, 2001; van Gasselt, 2007).

Aunque este instrumento estuvo operativo durante 10 años y envió alrededor de 100.000 imágenes de alta resolución a la Tierra, la lista de publicaciones relacionadas con el tema “terrenos poligonales generados por contracción térmica” es relativamente corta (van Gasselt, 2007). Prueba de ello, si se escribe en el buscador Google “*permafrost + Mars*”, hay 206.000 referencias, de las que solo 734 además hablan de “*polygonal terrains*” y 21.600 referencias de “*polygonal terrains + Mars*”. Muchos de los trabajos se centran en mencionar las similitudes morfológicas y sólo unos pocos artículos se centran en observaciones y análisis más detallados.

Por su parte, con las imágenes *HIRISE*, de muy alta resolución espacial (hasta 25 cm/píxel), se han identificado polígonos de diámetros incluso menores de 10 metros (Figura 5) (van Gasselt, 2007). El hecho de que conforme se van mejorando los sensores, se estén reconociendo cada vez terrenos poligonales más y más pequeños, los asemeja a los polígonos terrestres originados por contracción térmica estacional en zonas con permafrost (Levy et al., 2010).

Por tanto, hoy en día, aunque posiblemente si se siguen mejorando los sensores esta clasificación evolucione, los terrenos poligonales en la superficie marciana se pueden catalogar en tres grupos diferentes atendiendo al tamaño (Yoshikawa et al., 2001):

- terrenos poligonales GRANDES, con polígonos gigantes, de 1 a 20 km de diámetro;
- terrenos poligonales MEDIANOS, de 100 a 200 m de diámetro;
- y terrenos poligonales PEQUEÑOS, con diámetros entre 5 y 20 m.

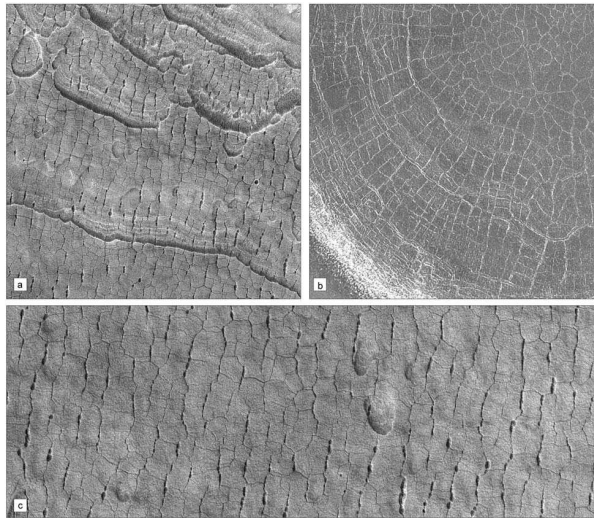


Figura 4: Imágenes MOC con redes de terrenos poligonales en Marte. (a) MOC2-1592, 83°9'E, 45°N. (b) MOC2-426, 32°3'E, 65°6'N. (c) MOC2-536, 84°6'E, 45°N. (Imágenes: *Malin Space Science System*).

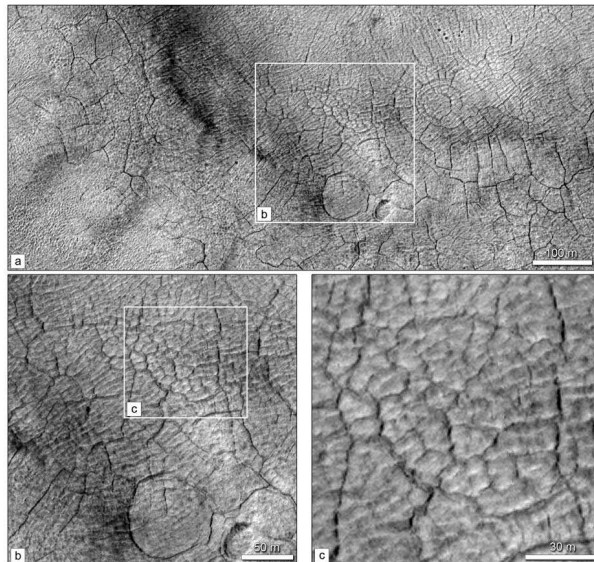


Figura 5: Imagen HiRISE TRA_000823_1720_RED, con las coordenadas 46°N y 92°E. En ella se puede observar como al ir aumentando el zoom se aprecian paulatinamente mayor número de subpolígonos de menor tamaño. (Imágenes MRO-HiRISE Science Team/JPL/NASA).

3. DATOS Y MÉTODOS

3.1. Estudio de Marte.

De la zona de estudio en Utopia Planitia situada entre las coordenadas 43,69° - 55,16° N y 108,12° y 127,03° E, con un área de 319.000 km², se han seleccionado ocho subzonas en las que se han identificado un total de 721 polígonos (Figura 6).

De la misión *Mars Odyssey* se obtuvieron las imágenes THEMIS-Vis y los datos espectrométricos GRS, de la *Mars Reconnaissance Orbiter* las imágenes HiRISE y CTX, y de la *Mars Global Surveyor* los datos espectrométricos TES y los datos altimétricos MOLA que sirvieron como mapa base (Tabla 1).

Instrumento	Tipo	Misión	Resolución (m/píxel)	Número de bandas	Longitud de onda (µm)	Imágenes analizadas.
THEMIS-Vis	Sensor	<i>Mars Odyssey</i>	18 ó 36	5	0,425 – 0,860 V – IR	356
CTX	Sensor	<i>Mars Reconnaissance Orbiter</i>	6	1	0,5 – 0,8 V – IR	51
HiRISE	Cámara	<i>Mars Reconnaissance Orbiter</i>	0,35	3	0,4 – 1 A-V, R, IR	63

Tabla 1: Características más importantes de los sensores cuyas imágenes se han analizado visualmente en el trabajo de gabinete de Marte, siendo "V" = Visible, "A-V" = Azul-Verde, "R" = Rojo, "IR" = Infrarrojo cercano (modificado de: de Pablo, 2009).

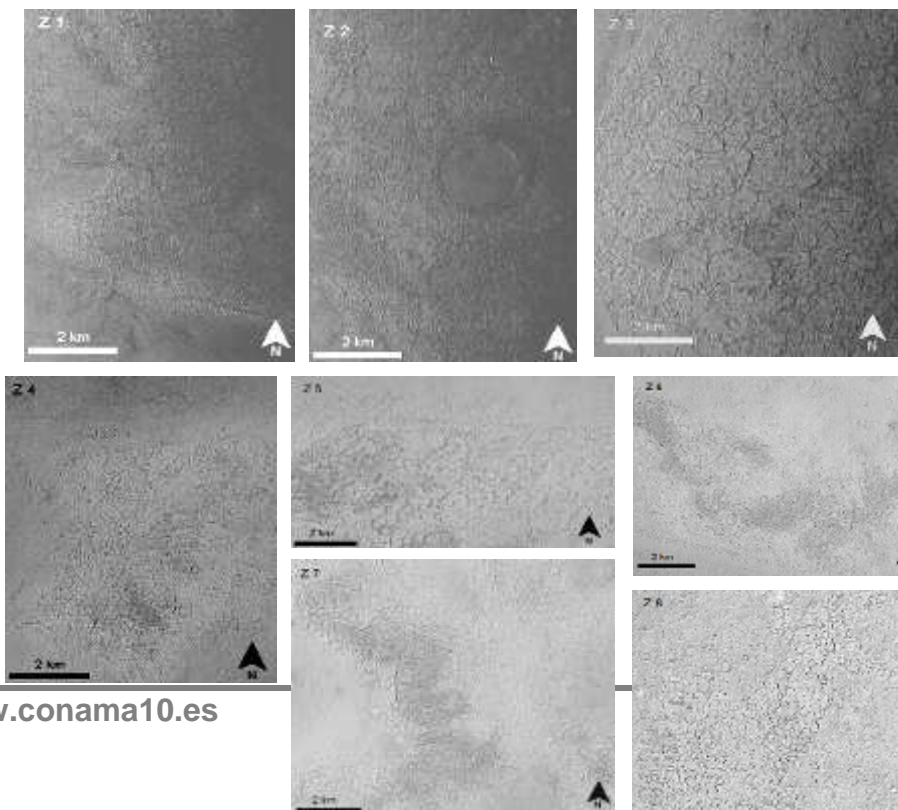


Figura 6: Zonas de estudio en el trabajo de gabinete de Marte:

Zona 1 (Z1), zona 2 (Z2) y zona 3 (Z3), pertenecen a la imagen CTX: B03_010811_2295_XN_49N246W.

Zonas 4, 5 y 6 a la imagen CTX: B01_010099_2301_XN_50N247W

Y la zona 8 a la imagen CTX: P21_009334_2273_XN_47N241W (Datos: JMARS).

3.2. Estudio del análogo terrestre.

Para llevar a cabo la caracterización del análogo terrestre se eligió Kevo, por estar localizado en la región más septentrional de Laponia Finlandesa (Figura 7).

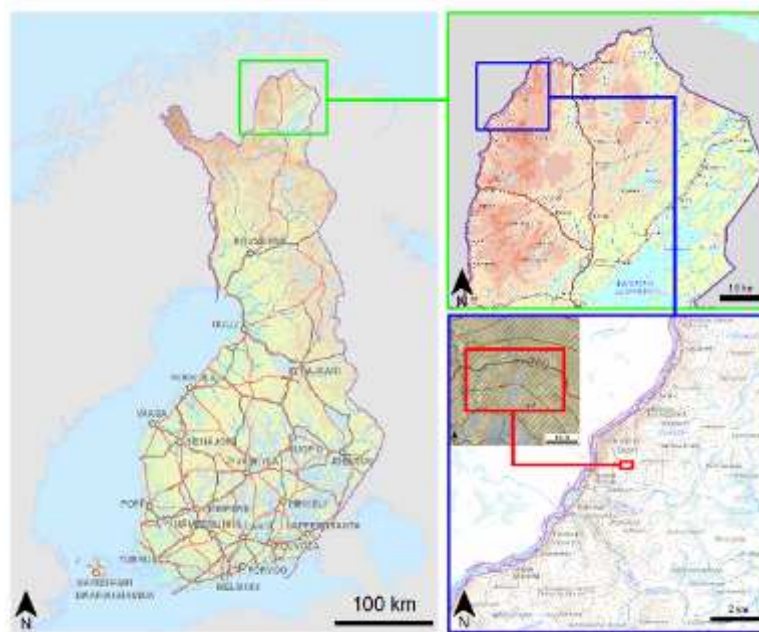


Figura 7: Mosaico de imágenes explicando el emplazamiento de la zona de estudio seleccionada en Finlandia. (Datos: GTK)

Los datos empleados fueron obtenidos del portal web “*Geological Maps and Material*” (<http://www.geo.fi/en/>) del que se pueden obtener fotografías aéreas de alta resolución (hasta 50 cm/píxel), a partir de las cuales se dividió la región en siete zonas distintas (Figura 8) que posteriormente fueron caracterizadas en el trabajo de gabinete y, de las cuales, se seleccionaron dos (Figura 9) sobre las que se llevó a cabo un trabajo de campo realizado del 14 al 22 de Junio de 2010 en la Reserva Natural de Kevo, en la ladera sur de la montaña “*Nuuvus Ailegas*”, a 27,46 km de la base científica “*Kevo Subartic Research Centre*” (69°45´N, 27°01´E).

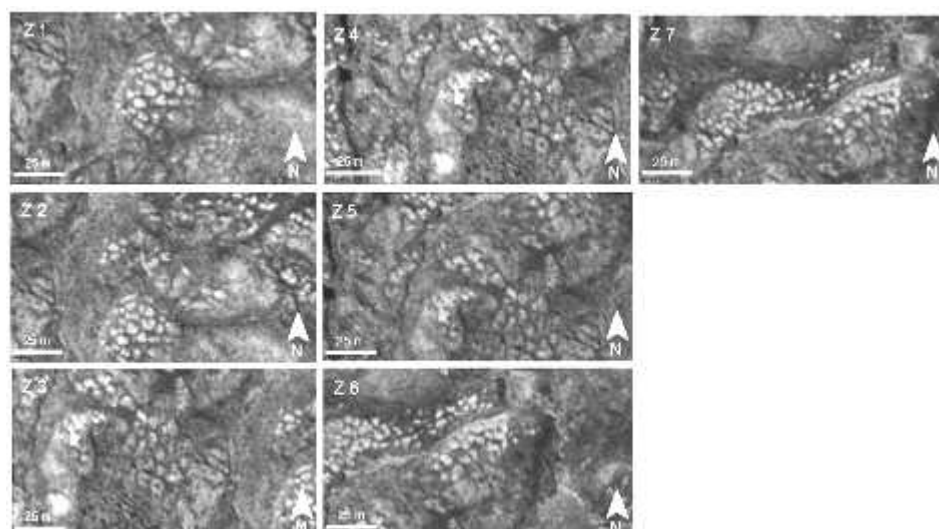


Figura 8: Mosaico de las fotografías aéreas seleccionadas de las 7 zonas de estudio (Imágenes: GTK)

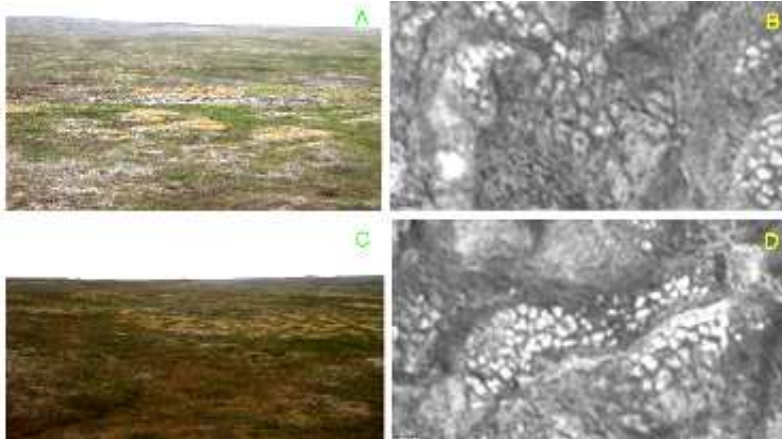


Figura 9: Mosaico con las dos zonas de estudio en el campo (A y C) y las fotografías de las zonas del trabajo de gabinete con las que corresponden (B y D). (Imágenes "B" y "D": GTK; Fotografías "A" y "C": Gonzalo V. Gómez-Sáez)

4. ESTUDIO DE UTOPIA PLANITIA

4.1. Características de la región de estudio

En cuanto a la geología regional, se diferencian tres unidades geológicas distintas en la zona de estudio encuadrada en Utopia Planitia: en la mitad norte, la unidad "*Vastitas Boreales interior*" (ABvi) perteneciente a principios del Amazónico y con un material relativamente accidentado. En el centro y la mitad sur de la zona de estudio, aparecen las otras dos unidades geológicas presentes: "*Tinjar Valles A*" (AEta), de principios del Amazónico, con forma de lengua ancha interpretada como el resultado de lahares y/o otros flujos volcánicos o de desechos resultantes de la mezcla del magma y los depósitos de volátiles, fruto de la actividad volcánica presente en la región cercana de Elysium Planitia; y la unidad "*Crater unit*" (AHc), de finales del Amazónico a principios del Hespérico, rodeando los cráteres de impacto presentes.

En lo referente a la topografía, Utopia Planitia está en una antigua cuenca de impacto que se localiza en la región deprimida de las Tierras Bajas de Marte, con una topografía

mucho más regular y baja que la de las Tierras Altas. Es una zona muy homogénea situada en lo que se presupone como un antiguo fondo oceánico y presentando una pendiente media menor de 0,1%.

Con los datos espectrométricos procedentes de los instrumentos TES y GRS (sensores de las misiones de la NASA Mars Global Surveyor y Mars Odyssey respectivamente), se puede deducir que la zona de estudio con terrenos poligonales presenta niveles medios de polvo superficial, albedo e inercia térmica. En cuanto a los tipos de rocas se observa como en Utopia Planitia predomina un suelo repleto de andesita y prácticamente sin presencia de basalto. Respecto a los llamados minerales acuosos, hematites (Fe_2O_3), sulfatos y carbonatos, sus concentraciones son poco relevantes, aunque se observa una presencia uniforme de hierro y un gradiente de menor a mayor concentración de agua (a partir del hidrógeno presente en la superficie) en dirección este – oeste. Este mismo gradiente es el que sigue la distribución de los terrenos poligonales, presentes en la zona de estudio en mayor número en la zona oeste que en la zona este.

4.2. Caracterización de los terrenos poligonales.

Tras analizar visualmente todas las imágenes THEMIS-Vis (356 en total) de la zona de estudio, en busca de terrenos poligonales o posibles estructuras geomorfológicas que pudieran (al no ser éstas imágenes de muy alta resolución) ser confundidas con ellos, se seleccionaron 113 imágenes. Posteriormente se analizaron visualmente las 63 imágenes HiRISE presentes en la zona de estudio, pero al no presentar una amplia cobertura global por el momento, y observarse que no coincidían con las zonas marcadas con posibles terrenos poligonales en el análisis de las THEMIS, se pasó a estudiar con detalle las 51 imágenes CTX, de menor resolución espacial, pero mayor cobertura. De todas ellas, se seleccionaron las 3 imágenes en las que se diferenciaban mejor los distintos tipos de morfologías con forma de polígonos y a partir de ellas se establecieron tres zonas de estudio en la primera imagen, cuatro en la segunda y una más en la tercera. En total, ocho zonas de estudio con un total de 721 polígonos reconocidos en ellas (Figura 6).

A parte de los polígonos, la principal morfología que se repetía constantemente, fueron los “basketball terrains”, que fueron marcados también en la caracterización. En forma de red, estos terrenos se observaban constantemente dentro de los cráteres de impacto y de los canales, mientras que en las inmediaciones de ambos, era donde aparecían terrenos poligonales. Aún así, desde las imágenes THEMIS-Vis de no muy alta resolución, se diferencia claramente entre los terrenos poligonales y los “basketball terrains”. Sin embargo, a esta resolución, la morfología que creaba conflictos a la hora de caracterizar

los terrenos poligonales, fueron los terrenos corroídos. Por ello, cuando se amplió la resolución con las imágenes CTX, se observó que diversas zonas antes caracterizadas como polígonos, fueron reinterpretadas como terrenos corroídos sin seguir ningún orden o patrón.

Las razones por las que se seleccionaron las imágenes de estudio fueron las siguientes (Figura 6):

- 1) En la primera imagen CTX (B03_010811_2295_XN_49N246W) se puede observar un canal que atraviesa la imagen de norte a sur, alternando “basketball terrains” en el interior de su cauce, con terrenos poligonales tanto en la orilla este del canal (Zona 3), como alrededor de dos cráteres de impacto (Zonas 1 y 2). Además, aparecen también en algunas zonas terrenos corroídos.
- 2) Por su parte, en la segunda imagen CTX (B01_010099_2301_XN_50N247W) se observa un canal que atraviesa la mitad superior de la imagen de oeste a este, de nuevo con “basketball terrains” en su interior y con terrenos poligonales tanto en la orilla norte (Zonas 4 y 5), como en la orilla sur (Zonas 6 y 7).
- 3) La tercera imagen CTX (P21_009334_2273_XN_47N241W) se eligió por ser muy peculiar. En ella no se observa un patrón definido de terrenos poligonales, pero sí que se alternan con los terrenos corroídos unos terrenos de morfología claramente poligonal aunque sin seguir dicho orden ni patrón, sin estar ordenados alrededor de un cráter de impacto o en las orillas de un cauce, y sin tener “basketball terrains” en sus inmediaciones. Se trata además de terrenos con forma de polígonos con los bordes levantados, como los terrenos poligonales en roca estudiados en el análogo terrestre.

En lo relativo a las observaciones de las características de cada polígono, se pueden organizar en tres grupos: las relacionadas con el tamaño (diámetros máximos y mínimos y área), las que tienen que ver con la morfología al contabilizar el número de lados y las que analizan la distribución espacial.

4.2.1. Tamaño.

En lo relativo al tamaño (Tabla 2), se observa que en la zona 1 y la zona 2, ambas en torno a cráteres de impacto, pese a tener diámetros máximos y mínimos con promedios similares, el promedio del área es aproximadamente el doble en la zona 1 que en la zona 2. Inversamente a lo que ocurre en las zonas situadas en las orillas de los cauces, de la zona 3 a la 7, que presentan áreas similares de la zona 3 a la 6, con la excepción de la zona 7 con un área mucho menor. Pero sus diámetros son muy diferentes y, en general mucho mayores que los de las zonas 1 y 2.

	<i>Promedios Diámetros Máximos (metros)</i>	<i>Promedios Diámetros Mínimos (metros)</i>	<i>Promedios Áreas (metros cuadrados)</i>
ZONA 1	146,51	101,57	51.232,51
ZONA 2	159,72	102	25.198,10
ZONA 3	296,28	184,41	188.422,18
ZONA 4	226,71	135,71	196.518,82
ZONA 5	368,6	233,37	176.607,06
ZONA 6	274,61	173,45	148.624,45
ZONA 7	261,38	162	53.403,05
ZONA 8	278,96	151,49	105.651,31

Tabla 2: Tabla con los promedios de las variables relacionadas con el tamaño: diámetro máximo, diámetro mínimo y área, de las ocho zonas de estudio en Marte.

4.2.2. Morfología.

En lo referente a la forma de los terrenos poligonales, se estudia el número de lados (Figura 10). Se observa que los polígonos tetragonales son la minoría en todas las zonas, mientras que los pentagonales y los hexagonales se reparten la mayoría a partes iguales.

Así, en las zonas 3, 4, 6 y 8 predominan los polígonos de 5 lados, mientras en las zonas 1, 2, 5 y 7 prevalecen los de 6 lados.

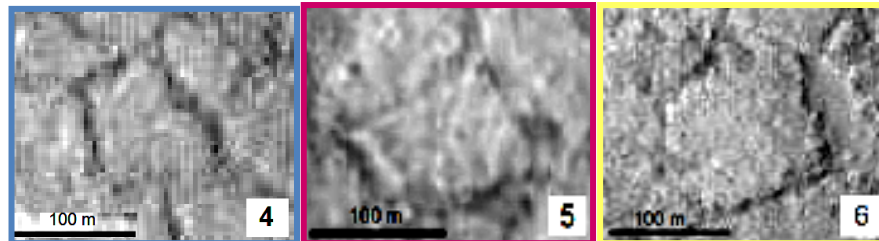


Figura 10: Ejemplos de polígonos de 4, 5 y 6 lados en Marte. (Datos: CTX)

4.2.3. Distribución espacial.

En lo relativo a la distribución espacial (Figura 11), se observa en todos ellos que la distribución predominante es la de terrenos poligonales aislados, en algunos casos muy abundantes como en la zona 7 con un 87% o cercanos a las tres cuartas partes en las zonas 2 (74%), zona 6 (72%) o en la zona 8 (78%). La proporción de polígonos aislados es superior a la mitad en las zonas 3 (55%), 4 (60%) y 5 (54%), y únicamente en la zona 1, con un 34%, se encuentran en mayor igualdad con el resto de posibilidades. El resto de distribuciones son en grupo, diferenciando entre los distintos polígonos que forman cada conjunto.

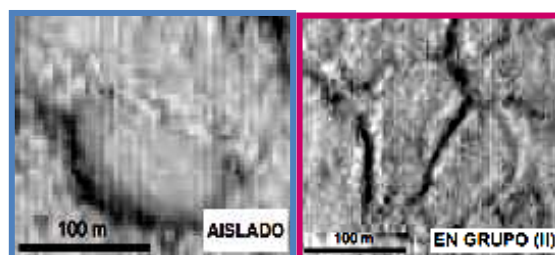


Figura 11: Ejemplos de polígonos aislado y en grupo en el estudio de Marte. (Datos: CTX)

De cara a realizar un análisis de los resultados obtenidos en la caracterización, se calcularon todos los coeficientes de correlación posibles entre todas las variables caracterizadas (diámetro máximo, diámetro mínimo, número de lados, distribución espacial y área).

5. ESTUDIOS DE KEVO, UN ANÁLOGO TERRESTRE.

5.1. Características de la región de estudio

La geología de la región es muy homogénea. Pertenece al llamado “*Cinturón Granulítico Lapón*” que se extiende desde la Laponia Noruega a Rusia (Lehtinen et al., 2005). Al oeste (donde se encuentra la zona de estudio) y al sur de la base científica de Kevo, se caracteriza por la presencia de distintos tipos de materiales graníticos (Kallio et al., 1969).

En cuanto a la topografía, las mayores elevaciones sobre el nivel del mar en la parte oeste de la región son de 500-600 m y las diferencias en altura son de 200-400 m sobre grandes áreas. Los campos de la parte más al este presentan una menor elevación y las diferencias relativas oscilan entre los 50 y 250 m. La topografía general es monótona y bastante homogénea. Las colinas tienen casi todas aproximadamente la misma altura, sus laderas ligeramente descendientes y sus superficies raramente exhiben grandes variaciones morfológicas. Algunos autores caracterizan esta zona como una penillanura surcada por algunos ríos y arroyos (Kallio et al., 1969). Los terrenos poligonales objeto de estudio se encuentran en *Nuuvus Ailegas*, una colina de 400 m de altura en la parte oeste de Kevo, y la zona de estudio se encuadra concretamente entre los 370 y 390 m sobre el nivel del mar en la ladera sur de la misma.

En el entorno del centro de investigación *Kevo Subartic Research Station* (69°45'N, 27°01'E) en Laponia Finlandesa, aparecen muchos fenómenos geomorfológicos originados por procesos de congelación - descongelación. Dentro de estas formas periglaciares destacan las palsas, donde el hielo del permafrost se encuentra bien aislado bajo una gruesa capa de tundra (Seppälä, 1976), y los terrenos con patrones repetitivos, entre los que destacan aquellos en los que se centra este estudio: los terrenos poligonales en roca (Seppälä, 1983, 1997; Svensson, 1964).

Los terrenos poligonales en roca ordenados aparecen en las cumbres de muchos páramos (Seppälä, 1973, 1997). Estas geomorfologías irregulares con forma de polígonos miden entre 3 y 6 m de diámetro y en algunos casos llegan hasta los 10 m. Actualmente en las cimas de los páramos, muchos de estos campos de polígonos en roca presentes a altitudes menores de 550 m están inactivos. Pero también aparecen

grandes campos de polígonos en roca en páramos altos próximos a bosques boreales de la zona.

Existe otro ambiente en el que los polígonos en roca ordenados son más activos que en los páramos altos: en el fondo de estanques muy profundos que están secos parte del año. Allí, el nivel freático está muy cerca de la superficie del terreno y muchas veces puede verse agua entre las rocas durante el verano. La actividad de congelación es muy fuerte en estos puntos incluso a bajas altitudes (100 m.s.n.m) en las zonas de bosques de abedules (que en la zona de estudio aparecen en la misma colina pero a menor altitud) (Seppälä, 1983). Algunos ejemplos típicos de este tipo de polígonos ordenados en roca se encuentran por ejemplo en Skallovarri, en Ivvanasvarri y en las proximidades del río Utsjoki (Seppälä, 1997), como en la zona de estudio caracterizada (Figura 12).



Figura 11: Zonas con terrenos poligonales en roca. A la izquierda, en Ivvanasvarri, el profesor Matti Seppälä (Tomado de Seppälä, 1997). A la derecha, en Kevo, Gonzalo V. Gómez-Sáez como escala.

Un tercer emplazamiento de los terrenos poligonales ordenados en roca depósitos de gravas fluvioaglaciacares, con algunos materiales finos en su interior. En ellos las rocas son redondeadas y muchas presentan el mismo tamaño. Este tipo de polígonos con un diámetro de hasta 3 m han sido encontrados por ejemplo en la terraza del río Vaskojoki (Seppälä, 1997).

5.2. Trabajo de gabinete.

En base a estudios bibliográficos previos a la estancia en la base científica de Kevo y a discusiones con algunos de los científicos que trabajan allí se eligieron algunas zonas en las que era posible realizar un estudio de campo. De esas mismas zonas, se procuraron obtener imágenes aéreas de la máxima resolución posible, para realizar sobre ellas un estudio similar al efectuado con las imágenes satelitales de Utopia Planitia.

A partir del portal web del *Centro de Investigaciones Geológicas de Finlandia (GTK)* se descargaron sucesivamente mapas de mayor a menor escala, hasta llegar a las fotografías aéreas de la región de estudio. A partir de ellas se caracterizaron, uno a uno, todos los polígonos presentes con la misma metodología y obteniendo las mismas variables calculadas en el trabajo de gabinete de Utopia Planitia (Marte):

- 1) *Número de polígonos*: siendo en este caso 47 polígonos en la zona 1, 18 en la zona 2, 24 en la zona 3, 13 polígonos en la zona 4, 12 en la zona 5, 25 en la zona 6 y 70 en la zona 7. En total: 209 polígonos (Figura 8).
- 2) *Diámetro máximo y mínimo*: para cada terreno poligonal y medido en metros.
- 3) *Número de lados*: para cada terreno poligonal, encontrando de 4, 5 o 6 lados.
- 4) *Distribución espacial*: diferenciando entre: (1) Aislados: todos aquellos terrenos poligonales que no se presentan en el campo como un conjunto, sino de manera individual; y (2) en grupo: todos aquellos terrenos poligonales que aparecen en el campo en conjuntos solapados. Se establece el número de polígonos que aparecen por grupo, apareciendo desde grupos de dos hasta grupos de ocho.
- 5) *Área*: de cada polígono y en metros cuadrados.

5.2.1. Tamaño

Respecto al tamaño, existe bastante uniformidad entre los 209 polígonos caracterizados en las siete zonas de estudio. En cambio en las áreas existe un poco más de diferencia, con el mínimo en la zona 1, el máximo en la zona 7 y más uniformidad en las cinco zonas restantes (Tabla 3).

	<i>Promedios Diámetros Máximos (metros)</i>	<i>Promedios Diámetros Mínimos (metros)</i>	<i>Promedios Áreas (metros cuadrados)</i>
ZONA 1	5,56	3,25	14,63
ZONA 2	6,55	3,69	19,86

ZONA 3	7,37	3,94	22,67
ZONA 4	5,92	4,00	17,28
ZONA 5	5,92	3,96	20,48
ZONA 6	5,76	3,72	17,25
ZONA 7	5,29	3,09	30,84

Tabla 3: Promedios de los diámetros máximos y mínimos y las áreas de los distintos terrenos poligonales.

5.2.2. Morfología.

En la morfología existe también bastante homogeneidad. Al analizar el número de lados de cada polígono en Kevo, se observa como el tipo predominante son los pentágonos, oscilando entre el 45% de la zona 2 y el 67% de la zona 5. Únicamente en la zona 4 se encuentra la misma proporción de terrenos poligonales pentagonales y hexagonales, que aparecen entre el 17 y el 46% en segundo lugar de predominancia en todas las zonas menos en la zona 1 donde el segundo lugar lo ocupan los tetragonales. Estos polígonos de cuatro lados se observan en seis de las siete zonas, a excepción de la zona 6, y se encuentran en porcentajes entre el 4% de la zona 7 y el 28% de la zona 1 (Figura 13).

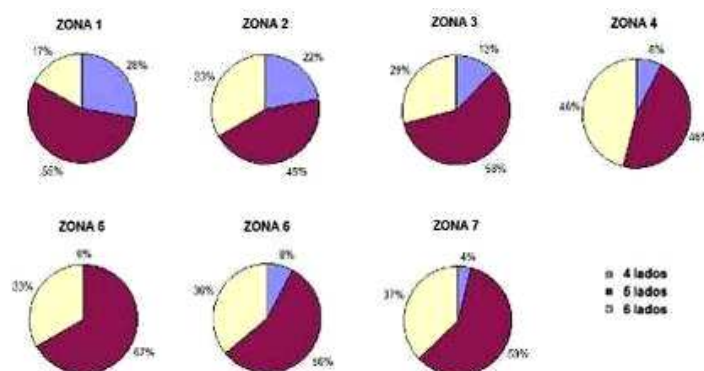


Figura 13: Distribución del número de lados en las distintas zonas de estudio seleccionadas.

5.2.3. Distribución espacial.

En lo referente a la distribución espacial, se observa en cinco de las siete zonas, que la distribución predominante es la de terrenos poligonales aislados (61% en la zona 1, 67% en la zona 2, 62% en la zona 3, 60% en la zona 6 y 54% en la zona 7), mientras que en las dos zonas restantes predominan los polígonos en grupos de dos (62% en la zona 4 y 50% en la zona 5). Además, las zonas 2 y 4 únicamente presentan estos dos tipos de distribuciones, mientras las zonas 1, 3, 5, 6 presentan además polígonos agrupados en conjuntos de tres. Tan sólo la zona 7, presenta además grupos de cinco polígonos que ocupan un 14% del total (Tabla 4).

Tipo de distribución espacial	Categoría (*)	Cantidad de polígonos						
		ZONA 1	ZONA 2	ZONA 3	ZONA 4	ZONA 5	ZONA 6	ZONA 7
Aislado	1	29	12	15	5	3	15	38
En grupo de dos	2	12	6	6	8	6	4	16
En grupo de tres	3	6	0	3	0	3	6	6
En grupo de cuatro	4	0	0	0	0	0	0	0
En grupo de cinco	5	0	0	0	0	0	0	10
En grupo de seis	6	0	0	0	0	0	0	0
En grupo de siete	7	0	0	0	0	0	0	0
En grupo de ocho	8	0	0	0	0	0	0	0
TOTAL		47	18	24	13	12	25	70

Tabla 4: Distribuciones espaciales

5.3. Estudio de campo.

En el trabajo de campo se caracterizaron los terrenos poligonales existentes en la ladera Sur de la montaña “*Nuuvus Ailegas*”, a 27,46 km de la base científica “*Kevo Subartic Research Centre*” (69°45’N, 27°01’E). La zona de estudio se divide en dos (Figura 13):

- *Zona de estudio 1:* Coordenadas: 69,79°N. 26,30° E. Altitud: 370-375 m.s.n.m. Número de terrenos poligonales: 38.
- *Zona de estudio 2:* Coordenadas: 69,79° N. 26,30° E. Altitud: 380-385 m.s.n.m. Número de terrenos poligonales: 131

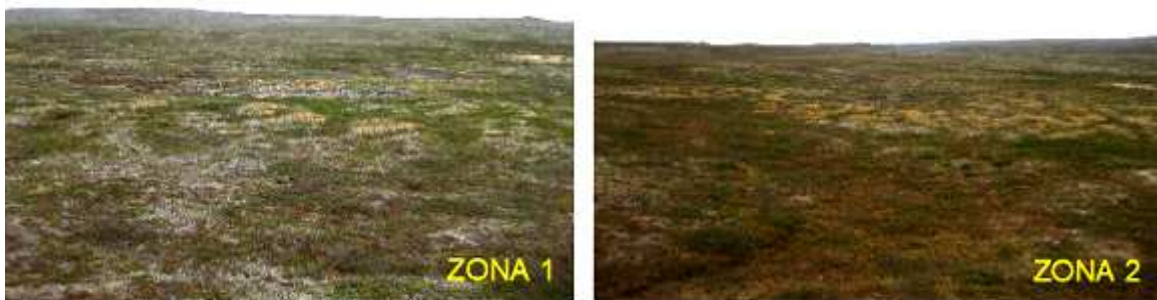


Figura 14: Zonas de estudio. Fotografías: Gonzalo V. Gómez Sáez

5.3.1. Caracterización de los terrenos poligonales.

En la toma de datos en el campo llevada a cabo los días 17 y 21 de junio de 2010, se caracterizaron todos y cada uno de los 169 polígonos midiendo en ellos las mismas variables que en el estudio de gabinete: diámetros máximo y mínimo, número de lados (Figura 15), distribución espacial (Figura 16) y añadiendo además de una fotografía individualizada otras tres variables: una caracterización del interior (en tres categorías: con permafrost, sin permafrost y mixto) (Figura 17), una medición del porcentaje de cobertura vegetal (Figura 18) y de la estructura del borde de cada uno (Figura 19).



Figura 15: Imágenes con polígonos con los distintos números de lados presentes en el estudio de campo, y siendo la escala una botella mineral de 0,25 m de longitud. (Fotografías: Gonzalo V. Gómez-Sáez)

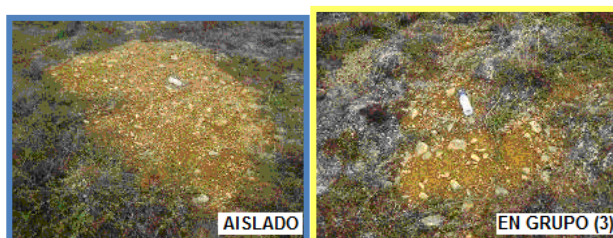


Figura 16: Imágenes ejemplo de polígonos aislados y en grupo. (Fotografías: Gonzalo V. Gómez-Sáez)



Figura 17: Imágenes de polígonos con las categorías de características del interior de los polígonos. (Fotografías: Gonzalo V. Gómez-Sáez)

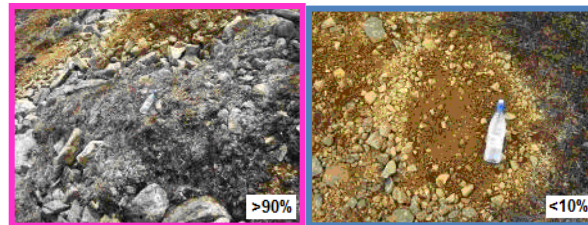


Figura 18: Imágenes ejemplo de polígonos con cobertura vegetal >90% y <10%. (Fotografías: Gonzalo V. Gómez-Sáez)

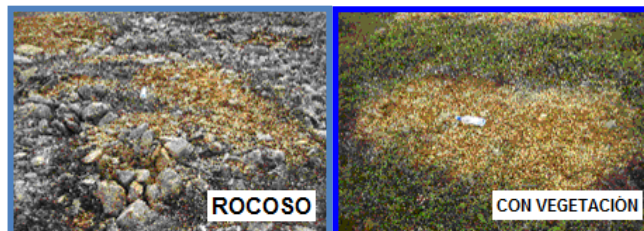


Figura 19: Imágenes ejemplo de polígonos con borde rocoso y cubierto con vegetación. (Fotografías: Gonzalo V. Gómez-Sáez)

5.3.2. Tamaño

Respecto al tamaño, se observa una clara similitud entre las dos zonas (Tabla 5).

VARIABLES (metros)	ZONA 1	ZONA 2
Promedios DM	2,66	2,10
Promedios dm	1,75	1,50
Modas DM	1,70	2,20
Modas dm	1,85	1,90

Máximos DM	8,30	5,60
Mínimos dm	0,75	0,40

Tabla 5: Variables relacionadas con el tamaño. Siendo “DM” = diámetro máximo y “dm” = diámetro mínimo.

5.3.3. Morfología.

En lo referente a la morfología, mientras en los trabajos de gabinete tan sólo se puede obtener la variable “número de lados”, en el trabajo de campo se pudieron obtener además las variables “características del interior”, “cobertura vegetal del interior” y “estructura del borde”. En lo relativo al número de lados, destaca la ausencia de terrenos poligonales tetragonales en la zona de estudio 1, frente al 21% en la zona de estudio 2. Por otra parte, en ambas zonas, el número de lados predominante son cinco. En cuanto a los hexágonos tienen valores similares en torno al tercio del total (Figura 20).

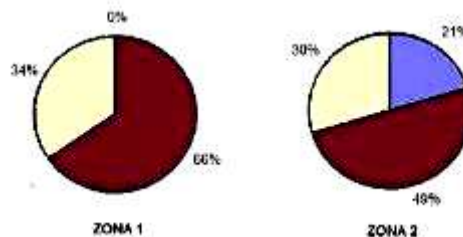


Figura 20: Distribución del número de lados de los polígonos en ambas zonas de estudio, siendo “azul” = 4, “rojo” = 5 y “amarillo” = 6 lados.

En lo referente a las características del interior se aprecian valores similares en ambas zonas, lo que concuerda también con la cobertura vegetal del interior. Se observa como la mayoría de polígonos, tanto en la zona 1 (38%) como en la zona 2 (46%) presentan una cobertura vegetal en su interior menor del 10%. Por otro lado, ambas zonas se diferencian claramente en los polígonos cubiertos más de un 90% en su interior por vegetación, al ser únicamente un 2% en la zona 2 frente al 18% del total de los terrenos poligonales de la zona 1. En lo relativo a la estructura del borde, se observan bordes más rocosos en la zona 1, frente a un mayor número de bordes cubiertos por vegetación en la zona 2.

5.3.4. Distribución espacial.

A pesar de que ambas zonas de estudio se encuentran próximas entre sí (90 metros de distancia entre una y otra), la distribución espacial de sus polígonos no es la misma. Mientras en la zona 1, casi la mitad de sus polígonos (el 48%) aparecen de manera aislada, en la zona de estudio 2 la mayoría de los polígonos se observan o en grupos de tres (26%) o en grupos de siete (21%), y únicamente un 10% de todos los polígonos aparecen aislados. Destaca también el hecho de que mientras que en la zona 2 aparecen polígonos aislados o en grupos desde dos hasta ocho, la distribución espacial de la zona 1 es más limitada al no observarse polígonos en grupos ni de cinco, ni de seis, ni de ocho. Como similitud, se observa en ambas zonas un 5% de polígonos en grupos de dos y un porcentaje similar en grupos de siete (un 18% en la zona 1 y un 21% en la zona 2).

6. DISCUSIÓN GENERAL

6.1. Topografía.

Utopia Planitia se localiza en la región deprimida de las Tierras Bajas de Marte, con una topografía mucho más regular y con una cota muy inferior (en varios miles de metros) que la de las Tierras Altas. Se trata de una zona extremadamente llana sin prácticamente ningún relieve (en toda la zona de estudio no hay variaciones de cota superiores a 400 m) (Figura 20) en lo que pudo ser un antiguo fondo oceánico (ej, Baket et al., 1991; Fairén et al., 1993). La zona de estudio tiene un tamaño aproximado de 319.000 km². La pendiente media en Utopia Planitia no supera el 0,1% y la elevación del volcán Elysium (al sureste de Utopia Planitia y cuya diferencia de altitud respecto a la planicie es de 19.000 m) tiene unas pendientes máximas variando del 1,2% al 7% (Russell y Head, 2003) (Figura 21).

Kevo por su parte, está en una zona de bajos desniveles con variaciones de cota de 200 a 400 metros en una extensión de 2.500 km². Las pequeñas colinas que pueblan Kevo, presentan pendientes poco pronunciadas (del 2 al 6%). En particular, la zona de estudio en la que se han caracterizado los polígonos, en la ladera de la colina *Nuuvus Ailegas*, tiene una variación máxima de cota de 10 metros en un área de 200 x 300 metros.

Se observa por tanto, que además de que las escalas de ambas zonas de estudio son muy diferentes (Figura 22), las pendientes del terreno también son significativamente distintas ya que en Marte se trabaja con una llanura homogénea y en Laponia con un terreno ondulado de elevaciones suaves y pendientes no muy pronunciadas. Esto podría llevar a la conclusión de que los terrenos poligonales aparecen en zonas llanas o con poca pendiente donde los materiales están consolidados y no hay arrastre de material pendiente abajo. Para verificar esta conclusión sería necesario llevar a cabo estudios en otras zonas con mayores pendientes tanto en la Tierra como en Marte.

Figura 20: Región de Utopia y Elysium. a) Mapa con la cuenca que va desde Elysium Planitia hasta Utopia Planitia. b) Mapa de cotas altimétricas con la pendiente media en la zona de estudio (recuadro rojo) inferior a 0,1%. (Modificado de Russell y Head, 2003).

Figura 21: Tamaño de ambas áreas de estudio. Cuadro rojo: Kevo, aproximadamente: 50 x 50 km (2.500 km²) (la zona de estudio de 200 x 300 m se localiza en su interior). Cuadro naranja: en Utopia Planitia, Marte aproximadamente: 440 x 725 km (319.000 km²). (Datos: Google maps)

6.2. Geología.

En lo referente a la geología de la zona de estudio en Utopia Planitia, aparecen los terrenos poligonales en la unidad denominada “*Tinjar Valles A*” (Tanaka et al., 2005) de principios del Amazónico (hace unos 1.800 millones de años), con forma de lengua ancha interpretada como depósitos dejados por grandes lahares fruto de la actividad volcánica en la cercana región de Elysium (Christiansen, 1989; Tanaka et al., 2005; Russel y Head 2003; de Pablo, 2009). Estos materiales se cree que han sido causados como en la Tierra, por flujos de lodo o barro que se moviliza desde las laderas de los volcanes activos (Bolt et al., 1975). Al tratarse Utopia Planitia de una antigua cuenca de impacto con numerosas fracturas (McGill, 1989; Smith et al., 1999; Yoshikawa et al., 2001), y Elysium un importante centro de actividad tectónica extensional (ej., Anderson et al., 2008), es muy posible que las fracturas de la región sean los conductos apropiados para permitir el desplazamiento del magma desde una cámara magmática bajo el complejo volcánico de Elysium hacia puntos situados más al oeste, como el sector oriental de Utopia Planitia, permitiendo el calentamiento y fusión del permafrost (de Pablo, 2009) (Figura 22). En esta zona oriental de Utopia Planitia se halla la zona de estudio.

Los depósitos de lahar estarían constituidos por sedimentos finos y porosos capaces de retener ciertas cantidades de agua en profundidad. El agua estaría en estado sólido a las temperaturas de las capas superiores del terreno en Marte, pero existiría en estado líquido a profundidades mucho mayores donde la presión parcial y la temperatura lo permitieran. Russell y Head (2003) realizan un estudio de toda la zona de Utopia Planitia y el cercano volcán Elysium y explican, correlacionando el modelo hidrológico de Clifford (1993) con los datos conocidos de esa zona, las condiciones bajo las cuales la actividad volcánica y la presión hidrostática, podrían hacer manar agua líquida en la superficie que, al llegar a ella, se congelaría dada la temperatura allí existente.

En resumen respecto a la geología, se cuenta con dos zonas de estudio: en una de ellas (Kevo) el terreno está formado por rocas cristalinas que ante la aplicación de fuerzas inducidas por contracción térmica, se fragmentan. Para ello, es necesaria una gran

energía que rompa los enlaces de la estructura cristalina, generando la grieta que luego se propaga. En cambio, en Utopia Planitia se cuenta con terrenos sedimentarios del lahar volcánico, con partículas más pequeñas, que presentan una textura en grano y fuerzas de unión (entre esos granos) mucho menores. Debido a ello, será necesaria menos energía para generar y propagar la grieta.

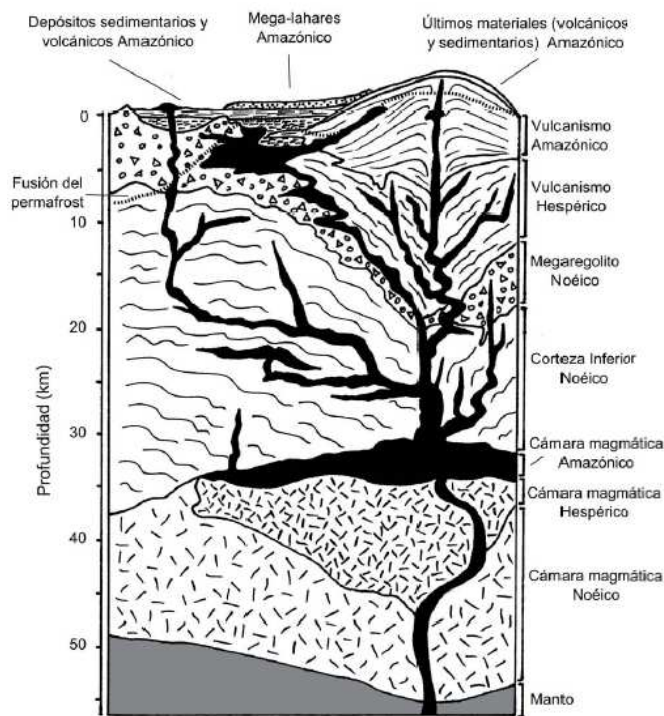


Figura 23: Esquema geológico del complejo volcánico de Elysium, desde donde se supone que procedería el lahar que ocupó Utopia Planitia. Se representa la posible concentración de magma bajo Utopia Planitia, que podría ser la posible causa de la fusión local del permafrost a una profundidad menor de 5 km, permitiendo las interacciones magma-agua. (Tomado de: de Pablo 2009, modificado de Kargel, 2004).

En la Tierra se producen ciclos repetidos de congelación y descongelación, seguidos de procesos asociados de relleno de las grietas con agua y otros materiales durante la estación cálida. En definitiva, mientras en la Tierra se necesitan centenares de ciclos anuales de congelación y descongelación, y el aporte de nueva agua en forma de precipitaciones, en Marte los terrenos poligonales podrían haberse generado tras un número menor de ciclos de congelación - descongelación (al necesitar menor energía). Esto pudo suceder en épocas remotas, si existieron temperaturas más elevadas que las actuales, o incluso, podría ocurrir actualmente si los posibles canales subterráneos llenos de lava actuasen como fuente de calor capaz de descongelar el agua contenida en el terreno del subsuelo, e iniciar grietas cuando este agua se volviese a congelar ante la acción de las bajas temperaturas ambientales. Está claro que, si como consecuencia de la actividad volcánica o mediante cualquier otro proceso asociado a ella, llegase agua líquida hasta la superficie de Marte, esta se congelaría y podría generar grietas en el terreno.

Sea cual sea el mecanismo de generación de polígonos en Marte, este involucra la existencia de ciertas cantidades de agua en estado líquido en algún momento de la

historia geológica de la región. La caracterización detallada de los terrenos de Utopia Planitia y la identificación de los polígonos que aparecen en ellos, y de sus mecanismos de generación y crecimiento está, por tanto, vinculada a la presencia de agua líquida en el planeta, uno de los objetivos fundamentales de la investigación de Marte en la actualidad. Por tanto, parece muy interesante la posibilidad de ampliar los estudios tanto climáticos como hidrológicos por un lado, como la caracterización de los terrenos poligonales y otras geomorfologías asociadas al ambiente periglacial por otro. De esta forma se podría avanzar en el conocimiento de la distribución y presencia de agua en Marte.

6.3. Terrenos poligonales.

6.3.1. Tamaño

En primer lugar, en lo relativo al tamaño, se observan en Marte terrenos poligonales en las ocho zonas de estudio caracterizadas en este documento. Los promedios de los diámetros máximos oscilan entre 145 y 385 metros, y los promedios de los diámetros mínimos entre 100 y 230 metros. Por tanto, atendiendo a la clasificación hecha por Yoshikawa et al. (2001), los polígonos aquí caracterizados en Utopia Planitia se podrían incluir dentro de la categoría de “terrenos poligonales medianos”, aunque no sería incoherente incluirlos como “terrenos poligonales gigantes” al superar claramente los 200 metros de diámetro (Tabla 6). En comparación con los encontrados en Kevo, el tamaño observado cambia mucho. Del trabajo de gabinete en base a fotografías aéreas se obtienen terrenos poligonales entre 5 y 7 metros de diámetro máximo en promedio y entre 3 y 4 metros de diámetro mínimo. En el estudio de campo, por su parte, se han observado entre 2 y 3 metros de diámetro máximo y 1,5 y 2 metros de diámetro mínimo (Tabla 6). En cualquiera de los dos casos en Kevo, midiendo los bordes de los polígonos en el campo o sin ellos en el gabinete, el valor superior del diámetro máximo es de 8,3 metros, en ningún caso superior a los 10 metros, por lo que se encuentran con bastante seguridad dentro de la clasificación hecha por Seppälä en 1997 de “terrenos poligonales en roca” típicos de Laponia Finlandesa.

VARIABLE (metros)	Utopia Planitia	Kevo	
	Trabajo de gabinete	Trabajo de gabinete	Trabajo de campo
Promedio Diámetros Máximos	146,51 - 386,6	5,29 – 7,37	2,10 – 2,66
Promedio Diámetros Mínimos	101,57 - 233,7	3,09 – 4	1,50 – 1,75

Tabla 6: Valores medios de diámetros máximos y mínimos en los tres estudios realizados tanto en Marte como en la Tierra.

Comparando ambas zonas, se observa claramente como los terrenos poligonales de Marte son mucho mayores. Esto puede tener varias explicaciones:

- Por un lado existe la posibilidad de que la enorme diferencia de tamaños entre los polígonos sea debido al polvo. Es decir, al haber una capa de polvo superficial encima del terreno, aumentando el albedo medido en las imágenes espectrométricas, se ocultan las grietas y por tanto no es posible diferenciar bien los polígonos más pequeños, siendo únicamente reconocibles los de mayor tamaño. De hecho los bordes de los terrenos poligonales en roca caracterizados en el estudio de campo, no son de fácil visibilidad, pudiendo aparecer cubiertos por vegetación o con rocas. En Marte, no es posible la opción de la vegetación, pero en cambio si que es posible que existan terrenos poligonales en roca, asemejándolos con los de Kevo. Si además estuviesen cubiertos por polvo sería aún más complicado diferenciarlos nítidamente en las imágenes.
- Otra explicación posible es debido a las diferencias de resolución espacial entre las imágenes utilizadas en un estudio y en otro. Puede ser que existan polígonos pequeños (como los de Laponia), en el interior de los terrenos poligonales marcianos de gran tamaño (como los de Utopia Planitia), pero debido a la menor resolución de las imágenes marcianas no se puedan percibir en un análisis visual como el llevado a cabo en esta caracterización.
- La otra posibilidad es que efectivamente sean mucho más grandes los terrenos poligonales en Marte que en Kevo. Esto podría ser debido a alguno de los siguientes supuestos o a la conjunción de varios de ellos:
 - 1) Al efecto de la gravedad: que al ser menor en Marte, con la misma cantidad de energía las fracturas de los polígonos en Marte pueden deformarse y abrirse mucho más.
 - 2) Al tamaño de los materiales: cuanto menor es el tamaño de grano, mayor es la superficie expuesta por volumen. Un cm^3 de sedimento de grano grueso (como las rocas graníticas de Kevo) tiene una superficie expuesta menor a un cm^3 de sedimento de grano fino (como los materiales del lahar de Utopia Planitia). Por tanto, si son materiales finos los granos están mas sujetos entre si, la superficie en contacto es mucho mayor y el sedimento puede resistir una deformación mayor sin perder la integridad estructural y quebrarse, generando subpolígonos menores.

- 3) A la presencia de vegetación: la vegetación es uno de los agentes más importantes en la alteración de un suelo. El suelo de Laponia ha sido alterado por la vegetación por tanto es mas heterogéneo en cuanto a dispersión de materiales, las plantas tienden a acumular diferentes elementos en torno a sus raíces lo que puede funcionar como superficies o zonas de debilidad a la hora de deformarse y quebrarse mas fácilmente que otras zonas.

- 4) A la frecuencia de los ciclos de congelación – descongelación: en Kevo se sabe que son anuales, mientras que en Utopia Planitia, si sucedieran debido a la actividad volcánica serían mucho menos frecuentes. Por tanto, en Marte sería de nuevo más difícil que aparecieran fracturas generadoras de subpolígonos dentro de los ya existentes.

6.3.2. Morfología.

De todas las variables caracterizadas en ambos estudios, la única que presenta una clara analogía es la relacionada con la morfología, concretamente el número de lados. En la caracterización llevada a cabo en Marte, predominan los polígonos pentagonales con un 45% del total, seguidos de los polígonos hexagonales con un 38% y la minoría son polígonos tetragonales con un 17% del total. Por su parte, en el análisis de Laponia, tanto en el estudio de campo como en el de las fotografías aéreas, también se observa una mayoría de polígonos pentagonales (56% en el trabajo de gabinete y 53% en el de campo) seguidos de hexagonales (32% en el trabajo de gabinete y 31% en el de campo) y en último lugar aparecen polígonos tetragonales (12% en el trabajo de gabinete y 16% en el de campo).

Aunque se ven pequeñas variaciones en el número de lados, el patrón que siguen tanto los terrenos poligonales estudiados en Marte como los del análogo terrestre es el mismo. Por tanto, esta variable podría servir como posible indicador de que los procesos de congelación – descongelación puedan ser el origen de los polígonos de ambos planetas. Esto no es concluyente ya que para verificarlo o desmentirlo serían necesarios otros estudios que buscasen más analogías en el resto de variables morfológicas y condiciones climáticas presentes o pasadas en zonas con polígonos tanto en Marte como en la Tierra.

6.3.3. Distribución espacial y correlaciones entre las variables.

En el análisis de las imágenes llevado a cabo en este trabajo en la región de estudio de Utopia Planitia se aprecia como los “basketball terrains” surgen principalmente en el interior de cauces y de los cráteres de impacto. Los terrenos poligonales, en cambio, aparecen principalmente en las orillas de dichos cauces y en las inmediaciones de cráteres de impacto (Figura 6).

La distribución de los “basketball terrains” en los cauces se podría explicar ya que en su interior el material fino y poroso podría albergar grandes cantidades de agua que al sublimarse los generasen, mientras que en las orillas de los cauces al haber menos agua el fenómeno predominante no sería la sublimación y podrían ser los procesos de degradación del permafrost por contracción térmica, lo que explicaría allí la existencia de terrenos poligonales. En los cráteres, la aparición en su interior de “basketball terrains” podría deberse a que cuando hay un impacto, las capas superficiales del terreno salen

desprendidas, quedando al descubierto capas más profundas con alto contenido en hielo que pasarían a sublimarse. Esos materiales eyectados con menos hielo que salen desprendidos se depositan en las inmediaciones del cráter, haciendo que esas zonas tengan de nuevo menos contenido de hielo en su superficie, y por tanto el proceso predominante no sería la sublimación y podrían ser los procesos de degradación del permafrost por contracción térmica, lo que explicaría de nuevo la existencia de terrenos poligonales.

En Kevo por su parte, los terrenos poligonales caracterizados se encuentran en la ladera de una colina, en una zona con poca pendiente y donde además existe un pequeño riachuelo superficial cuyo curso parece interrumpirse al pasar por la zona de los terrenos poligonales. Por tanto, no es descabellado pensar en la existencia de agua subsuperficial procedente de ese riachuelo que puede estar en forma de hielo durante algún momento del año y descongelarse en otros momentos.

De esta forma, aparece de nuevo algo que ya había sido identificado como posible en la zona estudiada de Marte: la presencia de agua subsuperficial en estado líquido. En Utopía Planitia provendría de la interacción del magma con el terreno granuloso cargado de agua procedente de los lahares; y en Kevo procedería de una posible acumulación de agua subterránea que podría actuar de forma similar a la comentada en el caso de Marte: congelándose en contacto con el permafrost y volviéndose a descongelar al ser alimentada por el río subterráneo, apareciendo un mecanismo diferente al puramente climático (precipitaciones que rellenan las grietas y se congelan en el invierno siguiente) como se veía que podía ocurrir en Utopía Planitia. Sería interesante confirmar esta hipótesis del río subterráneo y, como se indicó en el caso de Marte, ampliar los estudios climáticos y modelos de distribución del agua en Marte asociados a las geomorfologías identificadas en el planeta.

La distribución espacial y los coeficientes de correlación entre todas las variables, presentan valores similares en los dos estudios de gabinete (Marte y Laponia) y valores diferentes en el estudio de campo (Laponia). De esta forma, en lo relativo a la distribución espacial, se observa en Utopía Planitia como el 64,5% de todos los polígonos aparece de manera aislada, frente al restante 35,5% de polígonos que aparecen en grupo de dos (17%) de tres (9,5%), de cuatro (3,5%), de cinco (0,7%), de seis (0,8%), de siete (2%) o de ocho polígonos (2%). Por su parte en Kevo, mientras en el trabajo de gabinete, más de la mitad (el 56%) de los terrenos poligonales se presentan de manera aislada, observándose en el resto muy poca variedad en la cantidad de grupos (únicamente de dos, tres y cinco polígonos), en el trabajo de campo por su parte, se observan grupos de polígonos desde los dos hasta los ocho y la cantidad mayoritaria no está clara, siendo en

la zona 1 prácticamente la mitad de sus polígonos (el 48%) aislados, frente a los grupos de tres (26%) o de siete (21%) que dominan en la zona 2, en la que solamente el 10% de los polígonos se presentan aislados.

Por su parte, en los coeficientes de correlación, en los dos estudios de gabinete (el de Marte y el de Laponia) se observan correlaciones altas únicamente entre las variables que tienen que ver con el tamaño (el área y ambos diámetros); mientras que en el estudio de campo (Laponia) se observa además de una correlación alta entre las variables del tamaño, otra entre las características del interior y la cobertura vegetal del interior. Es decir, cuanto mayor inactividad presenta el permafrost en el interior de los polígonos, más vegetación crece en dicho lugar.

6.3.4. Metodología

La metodología cobra un papel básico a la hora de analizar los resultados obtenidos. Respecto a estos últimos relacionados con los coeficientes de correlación, todo hace pensar que la metodología empleada puede influir en esos resultados: la aparición de polígonos en forma aislada o agrupada puede estar muy influida por la resolución de las imágenes, que no permitan ver bordes donde sí los podría haber (si la anchura de la grieta o la sombra proyectada por ella es menor que la resolución mínima de la imagen, no se apreciaría).

Respecto a la metodología, una de las principales deducciones derivadas de este estudio está relacionada con la resolución espacial de los datos empleados en la localización y caracterización de los terrenos poligonales. En el estudio de Kevo llevado a cabo en base a fotografías aéreas de alta resolución, utilizando imágenes de hasta 50 cm/píxel, se observa como en función de la altitud a la que se ha tomado la imagen, se pueden confundir los terrenos poligonales con morfologías del terreno muy similares a los “basketball terrains” caracterizados en Marte. Al aumentar la resolución de las imágenes, aquello que en un principio parecían polígonos, resultan ser pequeños cerros y no terrenos poligonales (Figura 24). Por tanto, si esta observación se cumple, aquello clasificado como zonas con terrenos poligonales en el primer análisis visual de baja resolución empleando las imágenes THEMIS-Vis, a partir de las cuáles se seleccionaron las tres imágenes CTX caracterizadas, podrían tratarse de zonas con otro tipo de morfología como terrenos corroídos o grietas de desecación, mientras que aquellas otras clasificadas como “basketball terrains” cabe la posibilidad de que pudieran ser terrenos poligonales de mucho menor tamaño (Figura 25).

Esto demuestra de nuevo como el papel de la calidad de los datos y la metodología empleada cobra especial importancia en cualquier análisis de imágenes de Marte. Con el paso de los años y las misiones espaciales, la calidad visual de las imágenes obtenidas ha ido aumentando al mejorar los sensores, por lo que no hay que descartar la posibilidad de que se visualicen y clasifiquen terrenos poligonales en Marte distintos en número, tamaño, forma o distribución conforme se vaya mejorando dicha calidad visual.

Una metodología múltiple combinando estudios basados en la teledetección con trabajos de campo obteniendo datos *in-situ*, puede ser muy útil de cara a diferentes estudios realizados en el área de las Ciencias Planetarias. Esto es una opción muy difícil de llevar a cabo en una misión interplanetaria ya que únicamente algunas misiones robóticas han llegado a obtener datos en la superficie de Marte. En este estudio se pretende demostrar, en cierta forma, la importancia y utilidad de realizar estudios comparativos con análogos terrestres, no sólo mediante estudios de gabinete sino, en la medida de lo posible, con estudios de campo.

En resumen, todos los datos recogidos apuntan a que en la zona de estudio de Utopia Planitia se han caracterizado terrenos poligonales similares a los originados por contracción térmica estacional en modelados periglaciares terrestres con presencia de permafrost, a pesar de las diferencias geológicas y en las variables estudiadas en unos y otros.

Se ha demostrado la utilidad de una metodología múltiple (con un estudio de campo de un análogo terrestre) y también la necesidad de disponer en futuros estudios de imágenes de mayor resolución para, por ejemplo, diferenciar con claridad si lo que parecen “basketball terrains” o polígonos generados por sublimación, pudieran ser terrenos poligonales de menor tamaño en función de la resolución espacial (Figuras 24 y 25).

Además se destaca la importancia de estudiar con detalle los ciclos climáticos de Marte (como los propuestos por Laskar et al., 2004), así como la actividad volcánica en Utopia Planitia y otros rasgos geomorfológicos asociados a procesos periglaciares en esta región, como pingos (ej., Soare et al., 2007; Dundas et al., 2007; de Pablo, 2009) con el objetivo de poder determinar si los terrenos poligonales marcianos de esta zona se formaron por procesos periglaciares hace millones de años o más recientemente debido a las interacciones magma-agua.

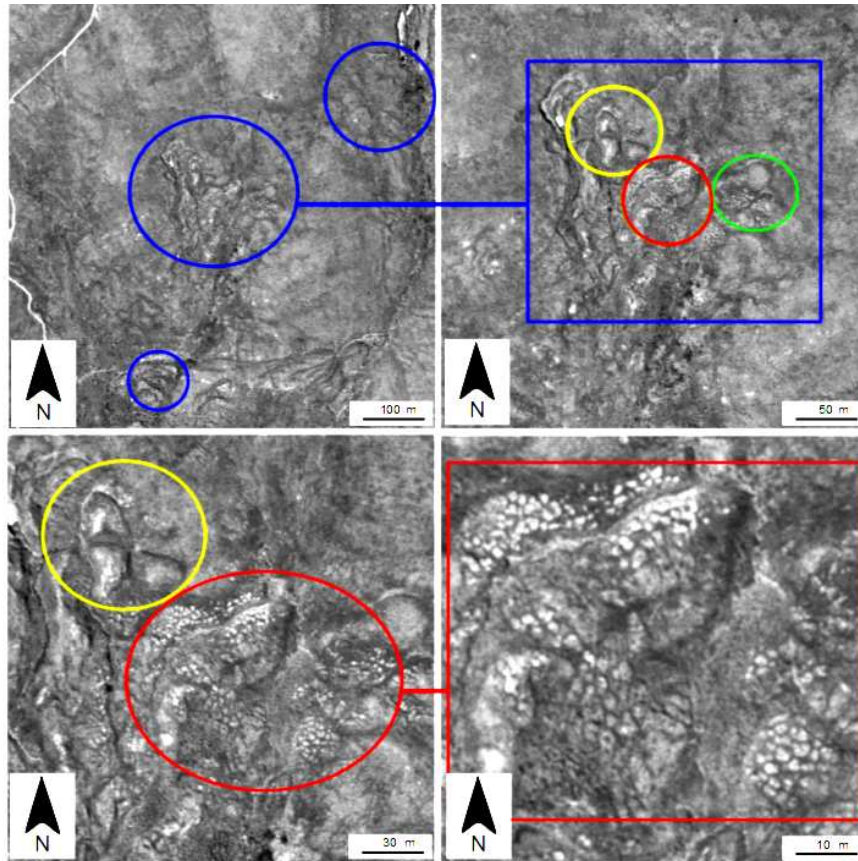


Figura 24: Explicación de las diferentes percepciones visuales en función del grado de resolución espacial de las fotografías aéreas. Lo que en primera instancia a baja resolución parecen estructuras poligonales (Azul), al aumentar la resolución de la imagen se subdividen en zonas con distintos tipos de morfologías. Al aumentar un poco más la resolución, se observa como aquello que parecen polígonos (Amarillo) no son más que colinas y en cambio lo que se asemeja a los "basketball terrains" marcianos (Círculo Rojo), resulta que son los terrenos poligonales en roca caracterizados durante la campaña de campo (Recuadro Rojo) (Fuente: imágenes GTK).

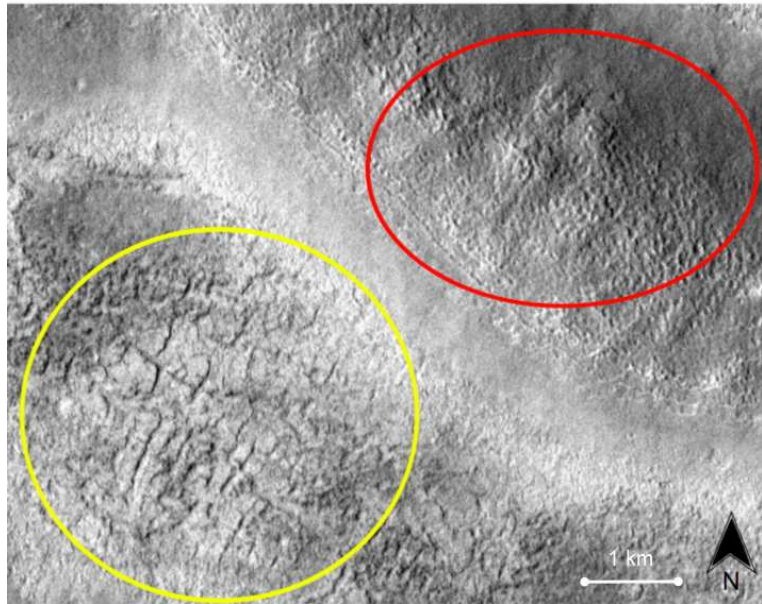


Figura 25: Extracto de la imagen THEMIS-Vis. En "amarillo" aquello que se ha clasificado como "terrenos poligonales". En "rojo" aquello que se ha clasificado como "basketball terrains". (Imagen: THEMIS-Vis V28140015)

7. CONCLUSIONES FINALES

1. Se han caracterizado 721 terrenos poligonales de ocho zonas de estudio seleccionadas dentro de una región de 319.000 km² en Utopia Planitia (Marte) mediante el empleo de 356 imágenes THEMIS-Vis de baja resolución, e imágenes de alta resolución tanto HiRISE (63) como CTX (51), todas ellas obtenidas por teledetección. Se han analizado diversas variables de tamaño (diámetros máximo y mínimo, y área), morfología (número de lados) y distribución espacial, así como las correlaciones existentes entre todas ellas y se han elaborado mapas espectrométricos a partir de los instrumentos TES y GRS.

Se concluye que los terrenos poligonales de Utopia Planitia pueden ser clasificados dentro de la categoría "terrenos poligonales medianos", aunque no sería incoherente incluirlos como "terrenos poligonales gigantes" debido a su gran tamaño, que los polígonos predominantes en la zona de estudio son de cinco lados y su distribución predominante es de manera aislada. Además del estudio espectrométrico llevado a cabo se concluye que los terrenos poligonales aparecen en zonas con poco polvo, bajo albedo, inercia térmica media, en suelos con una relativamente importante composición andesítica, sin presencia de basaltos, con plagioclasas y sin concentraciones relevantes

ni de hematites (Fe_2O_3), ni de carbonatos, ni de sulfatos, y con presencia uniforme de hierro y un gradiente de menor a mayor concentración de agua (a partir del hidrógeno presente en la superficie) en dirección este – oeste.

2. Se han caracterizado 209 terrenos poligonales de un análogo terrestre, subdividido en siete zonas de estudio, situado en Kevo (Laponia Finlandesa) con imágenes obtenidas por fotografías aéreas de una zona con terrenos poligonales en roca, estudiando las mismas variables que en Marte. Se ha completado esta caracterización terrestre de Kevo con un estudio de campo que ha permitido obtener además de los datos del trabajo de gabinete, otras variables como la cobertura vegetal del interior de cada polígono, las características del permafrost, y la estructura del borde, de 169 terrenos poligonales distribuidos en dos de las siete zonas de estudio.

Se concluye que los terrenos poligonales caracterizados en este estudio son del tipo polígonos en roca de tamaño pequeño en comparación con el resto de terrenos poligonales terrestres en condiciones periglaciares, que presentan la mayoría cinco lados y que su distribución varía en función del tipo de estudio que se lleve a cabo, lo que argumenta la importancia de utilizar imágenes de alta resolución espacial. Se demuestra la utilidad de una metodología múltiple (gabinete y campo) ya que los datos obtenidos en el estudio de campo sirven para confirmar y completar aquellos obtenidos por teledetección.

3. De la comparación de los polígonos en Marte con los del análogo terrestre se encuentran algunas similitudes, como el número de lados o, en menor medida, la distribución espacial, y algunas diferencias, principalmente en lo referente al tamaño. A pesar de las diferencias geológicas entre las zonas de estudio en ambos planetas, también se han identificado algunas similitudes que junto a las encontradas en la caracterización de los polígonos, permiten sustentar la hipótesis de que ambos terrenos poligonales, tanto en Kevo como en Utopia Planitia, tienen un origen similar en procesos de contracción térmica estacional generados sobre terrenos periglaciares con presencia de permafrost. Además, se destaca la importancia de estudiar con mayor detalle los ciclos climáticos de Marte, así como la actividad volcánica en Utopia Planitia para poder saber con exactitud si los terrenos poligonales marcianos de esta zona se formaron por procesos de congelación – descongelación hace millones de años o más recientemente debido a las interacciones magma-agua.

4. Al haber podido emplear una metodología múltiple (trabajo de gabinete en ambos planetas y de campo en Laponia Finlandesa) se ha puesto de manifiesto que hay

características de los polígonos muy difíciles de identificar a través de imágenes obtenidas por teledetección, especialmente si la resolución de las imágenes no es suficiente para distinguirlas. De la comparación de ambos estudios en Kevo se concluye el interés de disponer de sensores con mayor resolución espacial para poder identificar mejor las geomorfologías de Marte y, por ejemplo, averiguar si los “basketball terrains” observados se tratan de polígonos por sublimación o son terrenos poligonales de tamaño pequeño. En futuras misiones a Marte que incluyan el uso de vehículos trabajando sobre el terreno, se podría pensar en llevar a cabo estudios múltiples como el aquí realizado en Kevo.

8. BIBLIOGRAFÍA

- ANDERSON, R.C., DOHM, J.M., HALDEMANN, A.F.C., POUNDERS, E., GOLOMBEK, M. AND CASTANO, A. (2008) Centers of tectonic activity in the eastern hemisphere of Mars. *Icarus* 195. 537-546.
- BAKET, V.R., STROM, R.G., GULICK, V.C. et al. (6 autores) (1991) Ancient oceans, ice sheets and the hydrologic cycle on Mars. *Nature* 352. 589-594.
- BOLT, B.A., AND URHAMMER, R. (1975). Resolution techniques for density and heterogeneity in the Earth. *Geophysical Journal Astronomy Society* 42. 419-435.
- CARR, M.H. (2006) The Surface of Mars. *Cambridge University Press* (Nueva York) ISBN: 9780-521-47201-0
- DE PABLO, M.A. (2009) Cartografía geológica de la región volcánica de Elysium, Marte. Interacciones magma-agua-clima. Tesis doctoral. *Universidad Rey Juan Carlos, Departamento de Biología y Geología*.
- DYLIK, J. (1964), Eléments essentiels de la notion de 'périglaciaire', *Biuletyn Peryglajalny* 14. 111–132.
- EMBLETON, C. AND KING, C.A.M. (1975). Periglacial geomorphology, 2. *Edward Arnold*, London. 203p.
- FAIRÉN, A.G., DOHM, J.M., BAKET, V.R., DE PABLO, M.A., RUIZ, J., FERRIS, J.C. y ANDERSON, R.C. (2003). Episodic flood inundations on the northern plains of Mars. *Icarus* 165. 53-67.
- FRENCH, H.M. (1996). The periglacial environment. *Addison Wesley Longman*, Harlow. 341p.
- IPA (2010), *International Permafrost Association*. <http://ipa.arcticportal.org/>. Consulta: Noviembre 2009.
- KUZMIN, R.O., AND ZABALUEVA, E.V. (2003). Polygonal terrains on Mars: preliminary results of global mapping of their spatial distribution. *XXXIV Lunar and Planetary Science Conference*. Abstract#1912.

- LEVY, J.S., HEAD, J.W., AND MARCHANT, R. (2005). The Origin and Evolution of Oriented-Network Polygonally Patterned Ground: The Antarctic Dry Valleys as Mars Analogue. *XXXVI Lunar and Planetary Science Conference Abstracts*. Abstract#1334.
- LEVY, J.S., MARCHANT, D.R., HEAD, J.W. (2010). Thermal contraction crack polygons on Mars: A synthesis from HiRISE, Phoenix, and terrestrial analog studies. *Icarus* 206. 229-252.
- MANGOLD, N, MAURICE, S., FELDMAN, W. et al. (5 autores) (2003). Geographical Relationships Between Small Scale Polygons and Ground Ice Distribution from Neutron Spectrometer on Mars. *Third International Conference on Mars Polar Science and Exploration*. Abstract#8043.
- MANGOLD, N.S., MAURICE, W.C., FELDMAN, F. (2004). Spatial relationships between patterned ground and ground ice detected by the Neutron Spectrometer on Mars. *Journal of Geophysical Research* 109(E08001), doi:10.1029/2004JE002235.
- McGILL, G.E. (1989). Buried topography of Utopia, Mars: persistence of a giant impact depression. *Journal of Geophysical Research* 94. 2753-2759.
- MELLON, M.T., AND ARVIDSON, R.E.(2009). Permafrost and polygons at the phoenix landing site. *XXXIX Lunar and Planetary Science Conference*. 1904-1905.
- MÜLLER, S.W. (1947). Permafrost or permanently frozen ground and related engineering problems. Annual Arbor Edward Bros. 62-231p
- MUTCH, T.A., ARVIDSON, R.E., GUINNESS, E.A., et al. (6 autores) (1977). The Geology of the Viking Lander 2 site. *Journal of Geophysical Research* 82(11). 4452-4467.
- NSDIC (2010), *National Snow and Ice Data Center*. <http://nsidc.org/>. Consulta: Noviembre 2009.
- PÉWÉ, T.L. (1969). The periglacial environment. *McGill-Queen's University Press*, Montreal, Canada.
- PIDWIRNY, M. (2006). Periglacial processes and landforms. *Fundamentals of Physical Geography*, 2nd Edition.
- RUSSEL, P.S. AND HEAD, J.W. (2003). Elysium-Utopia flows as mega-lahars: a model of dike intrusion, cryosphere cracking, and water-sediment release. *Journal of Geophysical Research* 108. doi: 10.1029/2002JE001995.
- SEPPÄLÄ, M. (1976). Periglacial character of the climate of the Kevo region (Finnish Lapland) on the basis of meteorological observations 1962-71. *Reports from the Kevo Subarctic Research Station*. p 1-11.
- SEPPÄLÄ, M. (1983). Palsa mires in Finland. *Oulanka Reports*. 20-24.
- SEPPÄLÄ, M. (1997). Introduction to the periglacial environment in Finland. *Biuletyn Peryglacjalny*. 144p
- SMITH, D.E., ZUBER, M.T., SOLOMON, S.C. et al. (19 autores) (1999). The global topography of Mars and implications for surface evolution. *Science* 284. 1495-1503.
- SOARE, R.J., KARGEL, J.S., OSINSKI, G.R. AND COSTARD, F. (2007). Thermokarst processes and the origin of crater-rim gullies in Utopia and western Elysium Planitia. *Icarus* 191. 95-112.
- SVENSSON, H. (1964). Traces of pingo-like frost mounds. *Biuletyn Peryglacjalny* 19. 93-106.

- TANAKA, K.L., SKINNER, J.A. AND HARE, T.H. (2005). Geologic map of the northern plains of Mars (1:15.000.000). *U.S. Geological Survey Scientific Investigations Series*, Map 2888.
- VAN EVERDINGEN, R.O. (2005). Multi-language glossary of permafrost and related ground-ice terms, *International Permafrost Association (IPA)*, Calgary, Canada.
- VAN GASSELT, S. (2007). Cold climate landforms on Mars. PhD Thesis. *Free University*, Berlin. 264 pp.
- WASHBURN, A. L. (1979), *Geocryology, a survey of periglacial processes and environments*. Edward Arnold, London. 406p.
- WILLIAMS, P.J. AND SMITH, M.W. (1989). *The frozen Earth*. Cambridge:CUP.
- YOSHIKAWA, K., LADERACH, S., HINZMAN, L. (2001). Origin of the polygons and underground structures in southern layered deposits and Utopia Planitia on Mars. *American Geophysical Union*. Abstract#22B-0547.