

Cartografía geológica planetaria: herramienta de síntesis geológica y de exploración futura del Sistema Solar

Cartografia geológica planetária: ferramenta de síntese geológica e de exploração futura do Sistema Solar

Planetary geological mapping: a comprehensive geologic tool in the upcoming Solar System exploration

Antonio Molina¹, Iván López² & Miguel Ángel de Pablo³

1. *Centro de Astrobiología (INTA-CSIC), 28850 Torrejón de Ardoz, Madrid, España*

2. *Universidad Rey Juan Carlos, 28933 Móstoles, Madrid, España*

3. *Universidad de Alcalá, 28805 Alcalá de Henares, Madrid, España*

PALABRAS CLAVE: Teledetección, SIG, Cuerpos planetarios, Mercurio, Venus, Marte, Luna

PALAVRAS CHAVE: Teledeteção, SIG, Corpos planetários, Mercúrio, Vénus, Marte, Lua
KEY WORDS: Remote sensing, GIS, planetary bodies, Mercury, Venus, Mars, Moon

RESUMEN

Los mapas geológicos de otros cuerpos planetarios del Sistema Solar han evolucionado tanto en las últimas décadas como lo ha hecho nuestro conocimiento sobre ellos. El incremento en la calidad y diversidad en los datos, disponiendo de un detallado registro topográfico y de imágenes en un amplio rango del espectro, con cada vez mayor resolución y cobertura, ha permitido a los investigadores conocer las superficies de forma más certera y detallada. Esto también ha requerido nuevas maneras de entender este proceso cartográfico. Cada vez más accesible, dada la popularización del uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y la libre distribución a través de internet, han surgido diferentes formas de plasmar las interpretaciones geológicas en un plano. La dificultad para datar materiales y procesos, sin embargo, cuando aún solo se han podido recuperar muestras de roca lunares, se restringe a correlaciones con densidad de craterización y las observaciones que permiten deducir una secuencia relativa de acontecimientos en la mayoría de cuerpos. Siendo esta la principal diferencia, el desarrollo tecnológico y el avance de la exploración espacial está reduciendo las disparidades cada vez más. Los geólogos planetarios operan vehículos con sofisticados instrumentos que han permitido que la Cartografía Geológica de lugares puntuales de Marte sea muy similar a la que realizamos en la Tierra, por lo que es solo cuestión de tiempo que la distinción entre la geología planetaria y la tradicional deje de ser necesaria.

RESUMO

Os mapas geológicos de outros corpos planetários do Sistema Solar evoluíram tanto nas últimas décadas como o fez o nosso conhecimento sobre eles. O incremento na qualidade e diversidade dos dados, ao se dispor de um registo topográfico detalhado e de imagens numa ampla faixa do espectro, com cada vez maior resolução e cobertura, permitiu aos investigadores conhecer as superfícies de forma mais certa e pormenorizada. Isto também requereu novas maneiras de entender este processo cartográfico. Ao ser cada vez mais acessível, dada a popularização do uso de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) e a livre distribuição através da internet, surgiram diferentes formas de plasmar as interpretações geológicas num

plano. Todavía, a dificuldade em datar materiais e processos, quando ainda só se puderam recuperar amostras de rocha lunares, restringe-se a correlações com densidade de craterización e às observações que permitem deduzir uma sequencia relativa de acontecimentos na maioria dos corpos. Sendo esta a principal diferença, o desenvolvimento tecnológico e o progresso da exploração espacial estão reduzindo cada vez mais as disparidades. Os geólogos planetários operam veiculos com instrumentos sofisticados, os quais permitiram que a Cartografia Geológica de lugares pontuais de Marte seja muito similar à que realizamos na Terra, pelo que é apenas uma questão de tempo para que a distinção entre a geologia planetária e a tradicional deixe de ser necessária.

ABSTRACT

The maps of other planetary bodies in the Solar Systems have evolved as much as our knowledge about them in the last decades. The data diversity and quality increase, together with the availability of detailed topography and images from a wide spectral range, rising in coverage and resolution, allowed the researchers to understand better the different planetary surfaces. That caused an evolution in the mapping process as well. The popularity of the Geographic Information Systems together with the free distribution of planetary data enabled new ways of showing geologic interpretations on a map. However, dating materials and processes are still challenging, and only Moon sample returns have been achieved yet. For the other bodies, crater statistics and other observations provide information to estimate relative dating. The technology and exploration advances, however, are decreasing the differences between planetary and terrestrial geological mapping each day. Now, sophisticated instrumentation onboard vehicles provide enough information to the planetary geologists to develop geologic maps as detailed as on Earth, and it is only a matter of time that differentiate between the geological mapping on our home planet and others will be no longer necessary.

1. INTRODUCCIÓN

La cartografía planetaria nació en el siglo XVII con los primeros dibujos de la superficie de la Luna vista a través del telescopio (Galileo realizó los primeros dibujos de las fases de la Luna en 1609), pero fue en la segunda mitad del siglo XX, con el comienzo de la exploración del espacio, cuando la disciplina de la cartografía planetaria alcanzó su madurez. Y es que en este segundo período se vivieron dos revoluciones que cambiaron por completo nuestra manera de ver y entender la Tierra: la tectónica de placas y la exploración del Sistema Solar, en los que la cartografía jugó un papel fundamental. Por una parte, la cartografía de los fondos oceánicos ofreció la información necesaria para poder entender nuestro propio planeta, del que solo conocíamos la parte emergida de su superficie. Por otra parte, durante la década de los 1950s y los 1960s, la carrera espacial requería de mejores mapas de la superficie de la Luna para la planificación y desarrollo de las misiones lunares. Fue entonces cuando los geólogos empezaron a ganar importancia en la reciente disciplina de las ciencias planetarias, naciendo así la cartografía geológica planetaria (WILHEMS, 1993). El primero de estos mapas fue publicado en 1960, cuando el creador del departamento de Astrogeología del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), Eugene Shoemaker, elaboró el mapa geológico de la región circundante al cráter Copérnico en la Luna (Figura 1). Este mapa se concibió como un prototipo de cómo tendrían que ser los mapas geológicos de otros cuerpos planetarios.

En paralelo a la carrera por la conquista de la Luna, comenzó un ambicioso programa de exploración científica del Sistema Solar, e.g. CRAWFORD & JOY (2014). Los datos obtenidos por estas misiones robóticas nos han ofrecido información sobre una gran diversidad de mundos, lo que ha puesto a prueba nuestro conocimiento básico sobre aquellos procesos endógenos y exógenos que modelan la superficie de los planetas, la Tierra incluida. La misma tecnología que nos permite estudiar la geología de los diferentes cuerpos planetarios hace posible, mediante una constelación de

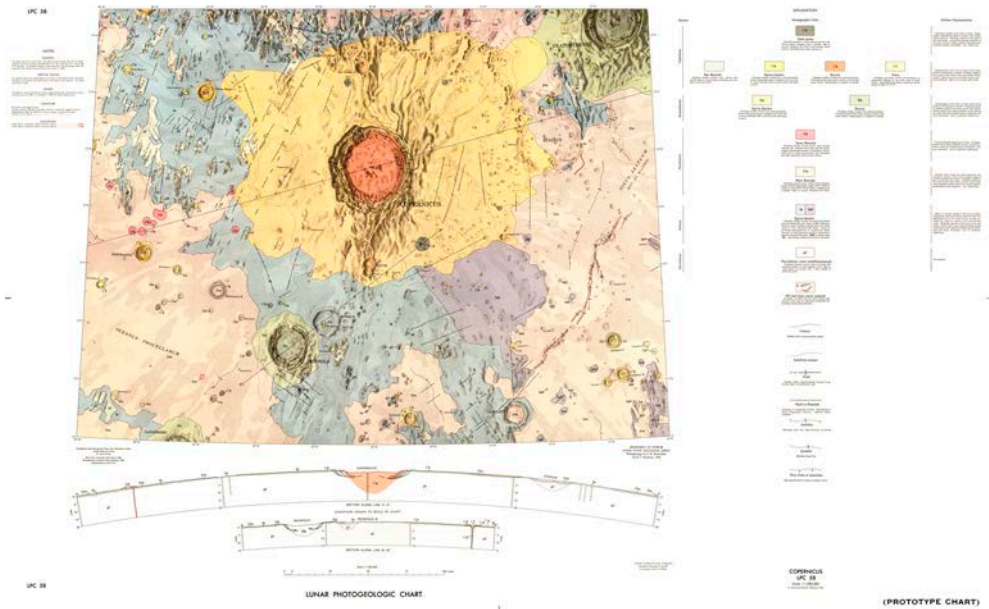


Figura 1. Mapa geológico del cráter Copérnico. Prototipo de mapa geológico de la Luna y considerado el primer mapa geológico de otro cuerpo planetario (SHOEMAKER, 1960).

satélites en órbita alrededor de la Tierra, estudiar en detalle la evolución de nuestro propio planeta y su medio ambiente.

El estudio y cartografía del Sistema Solar realizado durante las últimas décadas ha incluido no solo a los principales planetas, sino también a multitud de lunas y cuerpos menores, por lo que nos referiremos a todos ellos como cuerpos planetarios. En cualquier caso, este trabajo hará referencia fundamentalmente a la cartografía de los grandes cuerpos del Sistema Solar interior: Mercurio, Venus, la Luna y Marte.

La exploración geológica de un planeta requiere de la obtención de datos de gran parte de su superficie. Las primeras misiones que estudian un planeta suelen ser sobrevuelos que pasan por el planeta sin ponerse en órbita y obtienen datos de una pequeña parte de la superficie en un momento concreto (Figura 2). La primera misión que logró situar un dispositivo operativo en órbita alrededor de otro planeta fue la sonda Mariner 9 de la NASA, que obtuvo datos de toda la superficie de Marte. El estudio e interpretación de estos datos dio lugar a una serie de mapas que posteriormente fueron usados para realizar el primer mapa geológico global de otro planeta (Figura 3), el Mapa Geológico de Marte de SCOTT & CARR (1978).

Cualquier mapa geológico debe ser considerado como un “trabajo en marcha”, sujeto a revisión y corrección a la luz de nuevos datos. Esto es aún más cierto en la cartografía geológica planetaria, donde nuevos instrumentos proporcionan continuamente mejoras dramáticas en la resolución de los datos o información inédita que puede cambiar por completo nuestra visión de la geología ahí representada. El desarrollo de nuevas técnicas digitales de cartografía y el uso de Sistemas de Información Geográfica hace que la elaboración de mapas “dinámicos” sea mucho más fácil.

En la actualidad se han venido realizando mapas geológicos de todos los cuerpos con superficie sólida del Sistema Solar. La mayor parte de estos, se han realizado dentro de un programa financiado por la NASA pero coordinado por la división

de Astrogeología del USGS, y que representa el primer reconocimiento geológico sistemático de los cuerpos planetarios de nuestro espacio cercano <<https://planetary-mapping.wr.usgs.gov>>. En este trabajo vamos a analizar los diferentes tipos de datos y las técnicas que nos permiten estudiar la geología de otros cuerpos planetarios y realizar los mapas que ilustran nuestro conocimiento sobre ella, y que al mismo tiempo forman la hoja de ruta de aquellos descubrimientos que nos aguardan en las próximas décadas.

2. DATOS PLANETARIOS PARA CARTOGRAFÍA

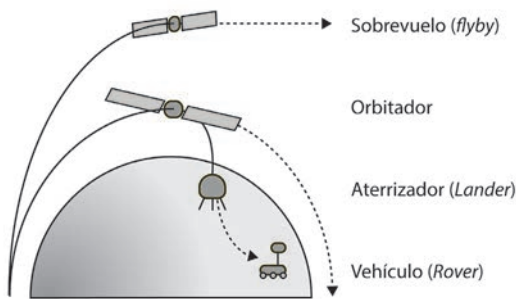


Figura 2. Diagrama que muestra los tipos de soportes para la obtención de datos según su desplazamiento respecto al cuerpo planetario (Elaboración propia).

oculta bajo la densa atmósfera venusiana. El avance de la exploración espacial permitió enviar sondas que pasaron de sobrevolar fugazmente los cuerpos planetarios hasta llegar a orbitarlos y obtener todo tipo de datos de la superficie de una forma sistemática (Figura 2). De esta forma, no únicamente a través de la fotointerpretación, sino que mediante múltiples técnicas se han ido obteniendo gran cantidad de datos sobre el relieve, la composición y el comportamiento físico de los planetas terrestres en las últimas décadas. Adicionalmente, múltiples dispositivos han aterrizado en algunos de estos cuerpos planetarios (Figura 2), con capacidad para visualizar y analizar los materiales y formaciones “a pie de campo”. Algunos de estos dispositivos no solo se posan en la superficie del cuerpo objeto de estudio (los denominados “aterrizadores”), sino que disponen de movilidad (los vehículos), pudiendo ejercer campañas de reconocimiento del terreno, pudiendo estudiar una mayor superficie con gran detalle, e.g. STACK *et al* (2016). Este paso de pequeños puntos en el cielo a paisajes, cada vez más cercanos, están permitiendo que la cartografía geológica planetaria se asemeje cada vez más a la que se realiza en la propia Tierra.

La resolución de los datos orbitales ha ido aumentando en todos los aspectos, permitiendo distinguir detalles de estructuras que abarcaban un simple píxel en las primeras imágenes. Además, una mayor frecuencia en el número de misiones ha permitido observar y cartografiar cambios recientes en aquellos cuerpos que presentan actividad geológica. Junto con imágenes de mejor resolución, otros sensores que operan en distintas regiones del espectro electromagnético han posibilitado detectar

Si la cartografía geológica se basa tradicionalmente en un reconocimiento de la zona de estudio mediante fotografía aérea o imágenes de satélite como complemento para el estudio posterior sobre el terreno, fuera de nuestro planeta la imposibilidad de acceder a la superficie requiere de una metodología de trabajo con algunas diferencias respecto a la cartografía geológica clásica. Los primeros mapas de superficies planetarias se basaban únicamente en manchas de albedo, esto es, las diferencias de iluminación observadas mediante telescopios. Así, se vieron mares en la Luna, canales artificiales en Marte y apenas se pudo distinguir la superficie

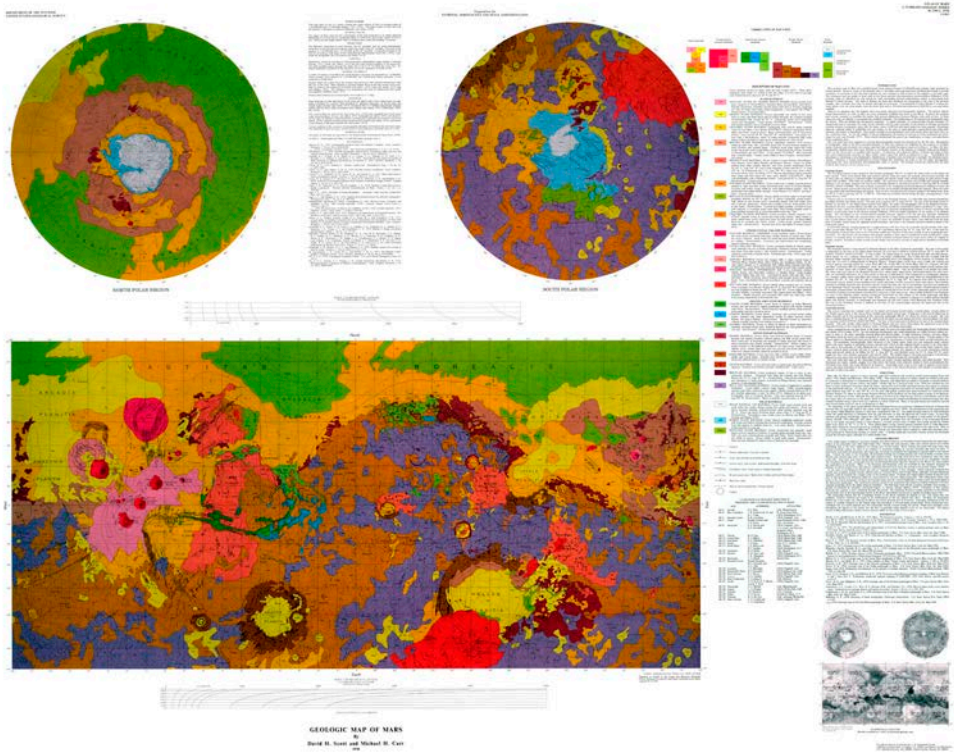


Figura 3. El mapa geológico de Marte de SCOTT & CARR (1978), donde aparece cartografiada la totalidad del planeta.

firmas espectrales suficientemente claras para estimar la composición y el estado de los materiales superficiales con cada vez más precisión (Figura 4), acercándonos así aún más a la identificación de materiales, tal y como se hace en los estudios geológicos en la Tierra.

Toda cartografía geológica cuenta con una base topográfica y de imágenes de la superficie (Figura 5). La topografía se adquiere de forma activa mediante el retorno de pulsos de láser o radio tras rebotar contra la superficie, el lidar y radar respectivamente (POMMEROL *et al.*, 2012, y referencias interiores), o de forma pasiva al realizar procesamiento fotogramétrico de imágenes estereoscópicas, e.g. GWINNER *et al.* (2016). Mientras que el primer método reporta una gran precisión vertical, la información es puntual y permite tan solo derivar modelos con poca resolución espacial, el segundo, aunque resulta en un mayor detalle en superficie, también suele contar con una cobertura mucho más limitada y un grado mayor de incertidumbre en la elevación absoluta. Mayor resolución implica menor cobertura espacial, por lo que los datos no son excluyentes sino complementarios, y deben ser seleccionados teniendo en cuenta la escala y extensión de la cartografía que se pretenda realizar (Figura 4-5).

Las imágenes por su parte suelen ser adquiridas en el espectro visible o del infrarrojo cercano, excepto para aquellos cuerpos donde la atmósfera impide la observación de su superficie. En estos casos, otro tipo de sensores que operan en el rango de las microondas (e.g., radar) son utilizados para caracterizar la topografía, materiales y procesos que tienen lugar en la superficie, como en Venus y Titán, e.g. CAMPBELL (2002). Las imágenes, por tanto, pueden tomarse en diferentes regiones

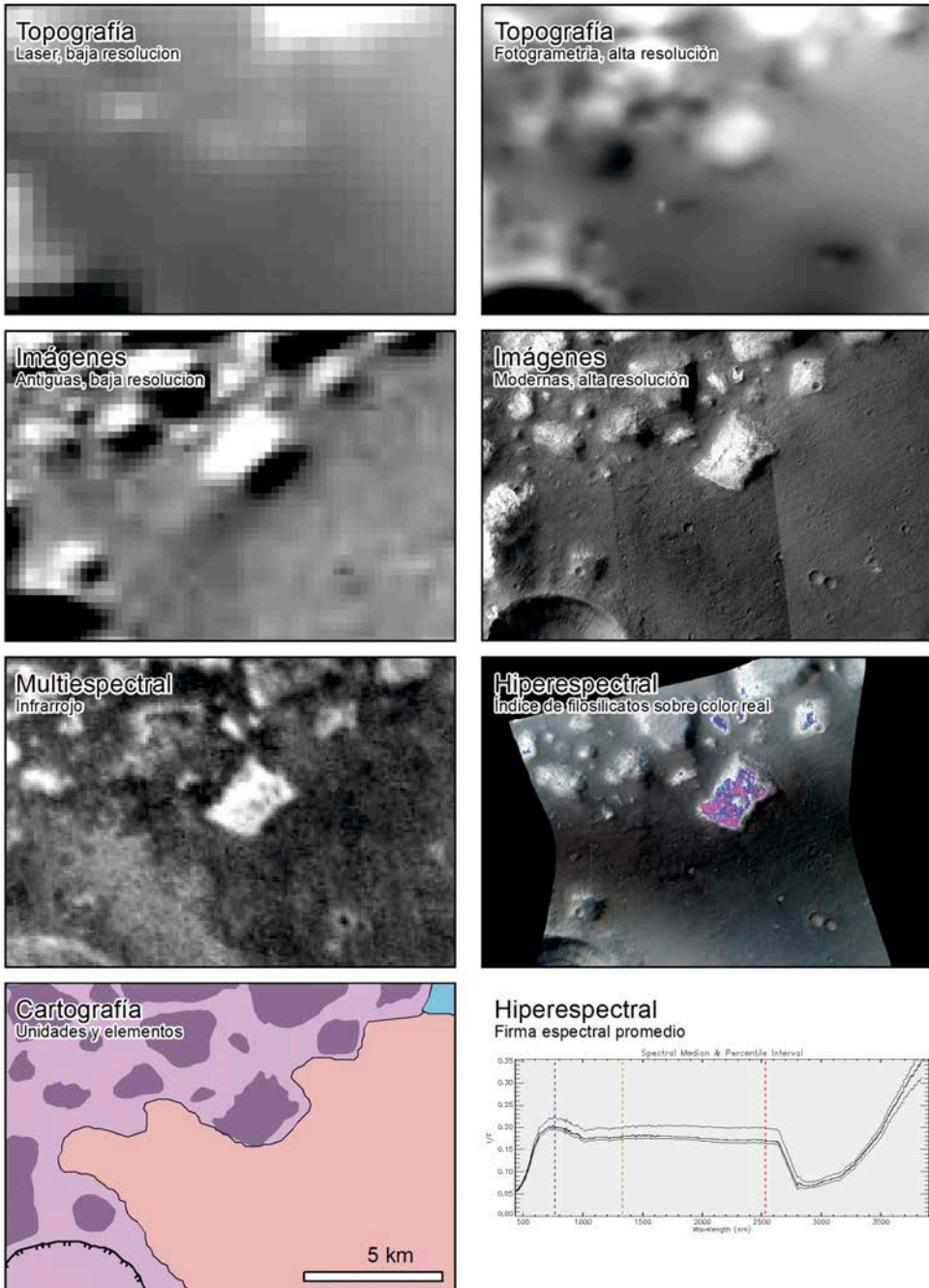


Figura 4. Ejemplo de la evolución en los tipos de datos para una zona de Marte llamada Ariadnes Colles. La primera fila muestra diferencias de topografía entre MOLA y la derivada de HRSC (blanco más elevado), la segunda entre las imágenes adquiridas por las Viking a las CTX y HiRISE más modernas. En la tercera fila se muestra una imagen infrarroja de THEMIS junto a una composición de CRISM, que muestra coloreadas las zonas con incidencia de filosilicatos (debajo la firma espectral). Abajo a la izquierda un ejemplo de cartografía derivada en esa misma zona (MOLINA *et al.*, 2014).

del espectro (Figura 4). Aquellas dentro del infrarrojo aportan información térmica, que se relaciona con la composición y textura de la superficie, pero también se ven condicionadas por la topografía, condiciones atmosféricas y otros procesos, e.g. PUTZIG & MELLON (2007). Cuando se obtienen datos de una gran cantidad de partes del espectro para un mismo punto, las imágenes multi- o hiperespectrales (Figura 5) permiten conocer la composición mediante las diferencias de absorción de la superficie, teniendo cada material una firma espectral característica. Otros instrumentos analizan los neutrones, rayos gamma y rayos X, entre otros, aportando más información de interés geológico de forma remota.

El libre acceso a estos datos, fomentado por las agencias públicas, ha permitido además hacer participe a toda la comunidad científica internacional para juntar las piezas de ese complicado rompecabezas. De esta forma, científicos desvinculados de las misiones han sido los principales productores de estas cartografías geológicas, a su vez utilizadas para el desarrollo de nuevas misiones. El geólogo planetario, por tanto, se ve ante el desafío de explorar las bases de datos para encontrar los datos disponibles para la zona que pretende estudiar, así como tratarlos e interpretarlos de forma correcta. Internet ha hecho posible que todos los datos almacenados en las bases de datos de las agencias espaciales, como son el Planetary Data System (PDS) de la NASA (<https://pds.jpl.nasa.gov/>) o el Planetary Science Archive (PSA) de la ESA (<https://www.cosmos.esa.int/web/psa/>) sean fácilmente accesibles mediante motores de búsqueda, además de proveer las herramientas de software y los procedimientos relativos a su procesamiento y utilización.

3. INTEGRACIÓN DE LOS DATOS: LOS SIG

Como hemos visto, hoy en día se disponen de multitud de fuentes de datos para la realización de un mapa geológico de otros cuerpos del Sistema Solar. Pero esto a su vez hace que este importante volumen de datos, y sus distintos formatos, resoluciones, proyecciones y fuentes, sean complejos de manejar y explotar. Sin embargo, al igual que en la cartografía terrestre, se recurre a los Sistemas de Información Geográfica (SIG) para manejar estos datos. Los SIG permiten situar en el espacio datos tomados por diferentes sondas y compararlos de forma válida, a pesar de que tengan diferentes características (Figura 5). Esto no es únicamente útil para su visualización, también pueden realizarse análisis como el estudio de las pendientes y orientaciones derivadas de la topografía, la mezcla de bandas espectrales resaltando morfologías o materiales específicos, la evaluación de la distribución y tamaño de los cráteres de impacto o las direcciones de alineamientos tectónicos. Los SIG son una potente herramienta cartográfica, donde la delimitación de unidades y elementos servirá como unidad de análisis, e incluso los propios elementos cartográficos pueden provenir del análisis automático de los datos. De esta forma, una reclasificación de las pendientes permite identificar escarpes o algoritmos delimitar estructuras circulares como crá-

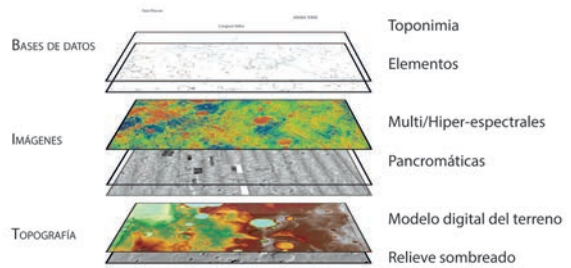


Figura 5. Tipos de datos que suelen ser usados para la realización de cartografías geológicas y que se superponen mediante el uso de SIG (Elaboración propia).

teres de impacto. En cualquier caso, estas herramientas requieren del punto de vista experto del geólogo planetario que identifique correctamente las observaciones y las plasme de manera sistemática y fácilmente interpretable en un mapa.

Tras pasar la realidad al plano es el mayor reto de la cartografía. Por ello, al igual que en la Tierra, se han acordado diversas normas que sirvan como un lugar común para facilitar esta transmisión de conocimiento en otros cuerpos planetarios. Existen sistemas de coordenadas y proyección normalizados, así como una nomenclatura oficial que se gestiona y recoge en el Gazetteer de nomenclatura planetaria de la International Astronomical Union (IAU) (<https://planetarynames.wr.usgs.gov/>). De hecho, el USGS también cuenta dentro de sus estándares en cartografía digital con simbología geológica específica para cuerpos planetarios. Esta normalización formal, se enfrenta a la diversidad creciente en soporte, ya que los mapas han pasado del papel a estar disponibles digitalmente como capas compatibles con los SIG o incluso accesibles mediante mapas digitales interactivos de acceso web. Además, esta representación se está viendo cada vez menos restringida a las dos dimensiones con la capacidad para la visualización interactiva en tres dimensiones.

4. METODOLOGÍAS DE ESTUDIO

La cartografía geológica es la base del análisis descriptivo en geología, y es el medio que los geólogos usan para registrar sus observaciones e interpretaciones. Así pues, la construcción de un mapa es fundamental para entender los procesos geológicos (GILBERT, 1886). Un mapa geológico no es solo la meta de un trabajo, sino la herramienta que permite entender los procesos que dan forma a la superficie de los planetas y la historia que estas superficies registran.

Un mapa geológico planetario difiere de uno terrestre en la ausencia de estudios sobre el terreno que verifiquen las observaciones previas, la naturaleza de los materiales y de los contactos entre ellos. Sin embargo, recientemente, la operación de vehículos en la superficie (Figura 2), convertidos en geólogos de campo y en la proyección de los científicos que los operan, ha hecho que la cartografía geológica de lugares puntuales de Marte, sea muy similar a la que realizamos en la Tierra, e.g. STACK *et al.* (2016). Por tanto, un factor que va a condicionar las hipótesis de trabajo que podemos plantear es la resolución de los datos usados para cartografiar (ZIMBELMAN, 2001).

Todo mapa geológico tiene una componente de interpretación, pero esta componente es aún más crítica en el caso de la cartografía planetaria, en la que no existe un trabajo sobre el terreno y en la que el factor tiempo no siempre puede ser determinado con precisión. Un requisito fundamental para los mapas que realizamos de otros cuerpos planetarios es la separación de la componente observacional de la interpretativa en la descripción de las unidades cartografiadas (WILHEMS, 1990). Los primeros mapas de otros cuerpos planetarios se basaban únicamente en la fotointerpretación de superficies que apenas comprendíamos. Es por ello que su elaboración se enfocaba a identificar superficies diferenciadas por su textura, albedo y las diferentes morfologías que les afectaban. Por ejemplo, se agrupaban superficies oscuras y rugosas donde había una mayor incidencia de fallas, diferenciándolas de otras llanas, claras y uniformes, sin atender a su desconocida formación o naturaleza.

Muchos geólogos planetarios utilizaban la metodología establecida derivada de los primeros mapas de la Luna (WILHEMS, 1990). Este conjunto de métodos surgió en los años 60 del siglo XX con el nacimiento del programa espacial y deriva del estudio geológico de la Luna y Marte, dos cuerpos que en la actualidad no presentan una actividad geológica muy importante. Como vimos en la introducción, paralelamente al desarrollo de la carrera espacial y el comienzo del estudio científico del Sistema Solar, un descubrimiento fundamental revolucionó nuestra forma de entender

la Tierra, la Tectónica de Placas. Esta metodología inicial de cartografía geológica nació antes que la tectónica de placas fuera ampliamente aceptada, y muchos de los principios geológicos aplicados a la cartografía de la Luna y Marte son previos a este nuevo paradigma científico y al concepto de un planeta dinámico. Uno de estos principios anteriores a la tectónica de placas es el de la existencia de una columna estratigráfica que podía ser aplicada a toda la Tierra, idea que se aplicó a la cartografía planetaria (WILHEMS, 1990) y que todavía perdura en algunos casos.

Un aspecto crítico de esta metodología es que, aunque WILHEMS (1990: 227) deja claro que ‘Al cortar las estructuras varias unidades litológicas, el código estratigráfico no permite la cartografía de unidades basándonos únicamente en su deformación’, muchas unidades se describieron basándose en su deformación (e.g., Llanuras con crestas; plains with wrinkle ridges), asignando a los materiales y a las estructuras de deformación la misma edad. Se propusieron siguiendo esta metodología columnas estratigráficas para la Luna, e.g. WILHEMS (1987), Marte, e.g. TANAKA *et al.* (1992) y Venus, e.g. BASILEVSKY *et al.* (1997). Los mapas realizados mediante esta metodología muestran muy pocas estructuras porque la mayor parte de estas se encuentran en la propia descripción de la unidad.

Más tarde, HANSEN (2000) planteó modificaciones a la metodología de cartografía que considere el papel que los procesos de deformación tienen en la evolución de la superficie. Este método, el método geohistórico, propone realizar historias geológicas locales en lugar de establecer secuencias estratigráficas regionales. En este método se distinguen entre unidades, estructuras primarias (producidas durante el emplazamiento del material) y las secundarias (estructuras tectónicas que se forman tras el emplazamiento), evitando especialmente el uso de estas últimas para definir las unidades. Otros autores, como SKINNER & TANAKA (2003) y TANAKA & SKINNER (2004), proponen ideas similares al introducir el concepto de unidades aloestratigráficas. Este cambio de metodología tiene como objetivo la realización de mapas que puedan ser reevaluados con el uso de nuevos datos (SKINNER & TANAKA, 2003).

Otro problema para establecer secuencias estratigráficas regionales es la ausencia de marcadores fiables para hacer esta correlación. Aquellos métodos usados en la Tierra (fósiles, dataciones radiométricas, polaridad magnética) no están disponibles para otros cuerpos planetarios, lo que deja a los estudios de contaje de cráteres como método para determinar la edad de los materiales y realizar estas correlaciones. Las dataciones exactas mediante isótopos para el caso de la Luna, fueron validadas con la datación estimada mediante la densidad de craterización de la superficie que, de forma simplificada, se basa en la idea de que a mayor número de cráteres de impacto en una superficie que no haya sido afectada por otros factores, mayor es su edad. La extrapolación de estos resultados a otros cuerpos, geológicamente menos activos que la Tierra como Marte y Mercurio, con superficies antiguas y altas densidades de cráteres, permiten obtener dataciones absolutas con cierto grado de confianza. Esta aproximación es más complicada para aquellos cuerpos donde la actividad geológica reciente es más intensa, como puede ser el caso de Venus e Ío. Los principios de superposición y continuidad de los estratos, así como de sucesión de eventos, se pueden aplicar actualmente gracias a la mejora de los datos obtenidos en muchos de estos cuerpos, asignando una cronología relativa a las diferentes superficies y morfologías que complementan estos contajes. En cualquier caso, el factor tiempo es la principal diferencia que podemos encontrar en un mapa geológico de la Tierra y uno realizado de otro cuerpo planetario.

5. CONCLUSIONES

En las últimas décadas, la evolución del conocimiento de los cuerpos planetarios del Sistema Solar interior ha sido exponencial. Múltiples misiones han accedido

a la superficie de estos cuerpos de forma remota, desvelando su naturaleza, lo que ha permitido a los investigadores plasmar estos descubrimientos en mapas cada vez más certeros y detallados. Para ello, se cuenta con el tratamiento y análisis de datos de muy distinta naturaleza que proporcionan una base cada vez más sólida; resultando la cartografía planetaria en una herramienta de síntesis de gran importancia.

Al igual que ha ocurrido con la propia geología, a pesar de que en sus primeros años la cartografía geológica planetaria contaba con datos y métodos muy diferentes de los que se aplicaban a la Tierra, el desarrollo tecnológico y el avance de la exploración espacial está reduciendo estas disparidades cada vez más. El estudio geológico de la Tierra mediante teledetección está cada vez más extendido en la geología terrestre. A esto hay que sumar el acceso a la superficie de otros cuerpos con equipos cada vez más sofisticados, que está permitiendo entender esta geología extraterrestre. Con la expectativa de nuevas misiones tripuladas a la Luna y la colonización de Marte, es de esperar que se requieran ya no solo mapas geológicos genéricos, sino incluso temáticos, que se centren en la representación de recursos e incluso mapas geotécnicos o de riesgos. La presencia humana en otros cuerpos inevitablemente llevará a que la distinción entre geología planetaria y geología tradicional se disipe, así como las de su representación.

BIBLIOGRAFÍA

- CAMPBELL, B.A. 2002. *Radar remote sensing of planetary surfaces*. 342 págs. Cambridge University Press. Cambridge, UK.
- CRAWFORD, I.A. & JOY, K.H. 2014. Lunar exploration: opening a window into the history and evolution of the inner Solar System. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, **372**(2024): 20130315.
- GILBERT, G.K. 1886. The inculcation of scientific method by example, with an illustration drawn from the Quaternary geology of Utah. *American Journal of science*, **184**: 284-299.
- GWINNER, K., JAUMANN, R., HAUBER, E., HOFFMANN, H., HEIPKE, C., OBERST, J., NEUKUM, G., *et al.* 2016. The High Resolution Stereo Camera (HRSC) of Mars Express and its approach to science analysis and mapping for Mars and its satellites. *Planetary and Space Science*, **126**: 93-138.
- HANSEN, V.L. 2000. Geologic mapping of tectonic planets. *Earth and Planetary Science Letters*, **176**(3): 527-542.
- MOLINA, A., DE PABLO, M.Á., HAUBER, E., LE DEIT, L. & FERNÁNDEZ-REMOLAR, D. 2014. Geology of the Ariadnes Basin, NE Eridania quadrangle, Mars-1: 1Million. *Journal of Maps*, **10**(3): 487-499.
- POMMEROL, A., CHAKRABORTY, S. & THOMAS, N. 2012. Comparative study of the surface roughness of the Moon, Mars and Mercury. *Planetary and Space Science*, **73**(1): 287-293.
- PUTZIG, N.E. & MELLON, M.T. 2007. Apparent thermal inertia and the surface heterogeneity of Mars. *Icarus*, **191**(1): 68-94.
- SCOTT, D. & CARR, M. 1978. Geologic map of Mars, *U.S. Geol. Surv. Misc. Invest. Ser. Map, I-1083*. <http://www.lpi.usra.edu/resources/mars_maps/1083/> [Consulta: 16-05-17]
- SHOEMAKER, E., SKINNER, J.A. & TANAKA, K.L. 2003. How should map units be defined? *Lunar and Planetary Science Conference XXXIV*, Houston, Tex., abstract 2100. <<https://astrogeology.usgs.gov/search/map/RPIF/Moon/Maps/Copernicus-300>> [Consulta: 16-05-17]

- STACK, K.M., EDWARDS, C.S., GROTZINGER, J.P., GUPTA, S., SUMNER, D.Y., CALEF, F.J., *et al.* 2016. Comparing orbiter and rover image-based mapping of an ancient sedimentary environment, Aeolis Palus, Gale crater, Mars. *Icarus*, **280**: 3-21.
- TANAKA, K. L., SKINNER, J. A. & HARE, T. M. 2009. Planetary Geologic Mapping Handbook-2009. *Abstracts of the Annual Meeting of Planetary Geologic Mappers*, págs. 1-21, San Antonio, Texas (USA).
- TANAKA, K.L., SCHABER, G.G., CHAPMAN, M.G., STOFAN, E.R., CAMPBELL, D.B., DAVIS, P.A., *et al.* 1993. The Venus geologic mappers' handbook (No. 93-516). *US Geological Survey*.
- WILHELMS, D.E. 1990. Geologic mapping. In: GREELEY, R., AND BATSON, R.M., Eds., *Planetary mapping*. págs. 208-260. New York, Cambridge University Press.
- ZIMBELMAN, J.R. 2001. Image resolution and evaluation of genetic hypotheses for planetary landscapes. *Geomorphology*, **37**(3): 179-199.

