

## EL VULCANISMO EN EL SISTEMA SOLAR

### *Volcanism in the Solar System*

Francisco Anguita (\*)

#### **RESUMEN**

*El vulcanismo es el proceso geológico más común en el Sistema Solar. En la Tierra y en Marte, los magmas más frecuentes son el basáltico y el andesítico; en general, los basaltos parecen ser la roca volcánica predominante en todo el interior del Sistema Solar, mientras que en el exterior abundan los magmas de volátiles, sobre todo agua.*

*Tras una rápida revisión del vulcanismo en los principales cuerpos planetarios, se analiza su marco dinámico: mientras que en la Tierra hay magmas en bordes de placa y en puntos calientes, éstos últimos son la solución única defendida en este momento para todo el vulcanismo extraterrestre, una situación claramente insatisfactoria como lo demuestra la envergadura y diversidad de las cuestiones pendientes.*

#### **ABSTRACT**

*Volcanism is the most common geologic process in the Solar System. On the Earth and Mars, basaltic and andesitic magmas are prominent. Basaltic and water magmas predominate respectively in the inner and outer Solar System.*

*Volcanic types and landscapes on the main planetary bodies are revised. Then the dynamic frameworks are compared: while on Earth volcanism is found both on plate borders and hotspots, all extraterrestrial volcanism is attributed to the action of the last ones, a clearly unsatisfactory situation in view of the scope and diversity of the pending questions.*

**Palabras clave:** *Vulcanismo, Sistema Solar.*

**Keywords:** *Volcanism, Solar System.*

#### **INTRODUCCIÓN**

Desde que la Oceanografía moderna reveló la estructura de los fondos oceánicos, sabemos que las rocas volcánicas, además de cubrir millones de kilómetros cuadrados de los continentes, forman la mayor parte de la corteza sumergida. Si pudiésemos imaginarnos la Tierra sin sedimentos, veríamos un planeta volcánico, con zonas activas y otras apagadas. Ese pequeño ejercicio de imaginación es todo lo que hace falta para *viajar* a la geología de buena parte de los cuerpos del Sistema Solar, un conjunto de mundos cuya principal actividad geológica, en el pasado y en el presente, ha sido y es el vulcanismo. ¿Es entonces éste el proceso geológico más universal? Quizá lo sea; aunque extrapolar siempre es arriesgado, como lo demuestra la larga lista de incógnitas sobre el vulcanismo extraterrestre que cierra esta síntesis.

#### **MAGMAS EN EL SISTEMA SOLAR**

A unos 1.000°C (una temperatura que se alcanza con frecuencia en el manto superior de la Tierra) y en presencia de pequeñas cantidades de agua, las

peridotitas del manto terrestre se funden parcialmente dando magmas basálticos. Hasta ahora, los basaltos han resultado ser las rocas más comunes en el Sistema Solar, por lo que suponemos que en otros cuerpos planetarios<sup>1</sup> deben haberse producido procesos semejantes al descrito. Es importante añadir que en el Arcaico, cuando el planeta estaba mucho más caliente, el porcentaje de fusión del manto debió ser mucho mayor. Ello resultó en lavas muy calientes y fluidas, llamadas ultrabásicas, que ya no pueden formarse en la Tierra actual pero sí encontraremos en otros cuerpos, en los que reflejan la huella de máximos térmicos muy importantes.

Hay dos localizaciones típicas para el vulcanismo basáltico terrestre: las dorsales oceánicas y los puntos calientes. En las primeras, el material basáltico producido a través de fisuras se va extendiendo a medida que el propio océano se ensancha, un proceso que termina cuando, por causas no del todo comprendidas, la litosfera oceánica comienza a subducir. Sobre la zona de subducción, el manto sufre una compleja alquimia cuyo principal producto son los magmas andesíticos, generados por fusión parcial de la corteza oceánica, o más probablemente del manto

(\*) Depto. de Petrología y Geoquímica, Facultad de Ciencias Geológicas, Universidad Complutense, 28040 Madrid.

E-mail: [anguita@eucmax.sim.ucm.es](mailto:anguita@eucmax.sim.ucm.es)

(1) E incluso en asteroides: la superficie de Vesta tiene las características ópticas del basalto. Las eucritas, meteoritos basálticos, parecen provenir de este asteroide.

hidratado situado sobre ella. Pero se ha demostrado que tanto la evolución lenta de los magmas basálticos como su asimilación de corteza granítica puede generar magmas andesíticos, por lo cual la ecuación andesitas = subducción no es obligatoria; algo de importancia decisiva ahora que estamos comenzando a entrever la petrología marciana.

Junto con los magmas graníticos, que rara vez llegan como tales a la superficie terrestre, los basálticos y los andesíticos (y sus variantes, que se producen por “cocción a fuego lento” en la cámara magmática) son los magmas típicos de un planeta con manto rocoso. Pero estos planetas construidos con materiales tan refractarios sólo son representativos de la zona más interna del Sistema Solar, de Mercurio a los asteroides (o sea, poco más del 5% de la distancia media Sol-Plutón). En el resto, los volátiles dominan: la “roca” es hielo (de agua, como en Europa, Ganímedes o Ariel, o de nitrógeno, como en Tritón), y el “magma” es hielo fundido, o bien sublimado (Tritón). Hay dos casos especiales: Ío, en el sistema de Júpiter, parece un mundo-frontera para los vulcanólogos espaciales. Su exuberante magmatismo actual lleva a la superficie azufre (un elemento volátil) o sus compuestos, pero también parece capaz de fundir silicatos (o sea, rocas). El segundo cuerpo excéntrico es Japeto, que gira en torno a Saturno: parte de su superficie está cubierta por un material negro como el betún, probablemente un compuesto carbonoso. Aunque se ha propuesto que procede del exterior, algunos datos (ver la figura 8) indican que surge del interior; se trata por lo tanto de material volcánico, el más exótico del Sistema Solar, tanto como para dar pie a una de las obras clave (“2001”) de la ciencia-ficción moderna.

## ERUPCIONES Y PAISAJES VOLCÁNICOS

La detallada subdivisión de los tipos de erupciones volcánicas que recogen los libros de texto es de poca utilidad en otros planetas, donde en general no podemos verlas, y tenemos que contentarnos con imágenes de satélite de los productos de las emisiones. Mientras que los rasgos típicos de las coladas

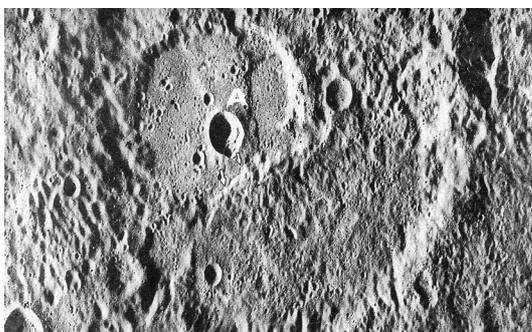


Figura 1. Vulcanismo lávico en Mercurio: frente de colada (A) en el fondo de un cráter.

En este planeta y en la Luna, las lavas fueron muy fluidas: algunas coladas lunares superan los mil kilómetros de longitud. Foto: J.P.L. (NASA).

son relativamente fáciles de distinguir (p.ej., en la figura 1), la teledetección de unidades piroclásticas se ha revelado muy complicada. Por tanto, cuando se divide el vulcanismo extraterrestre en lávico y piroclástico, el segundo tipo siempre queda peor ilustrado, y probablemente infrarrepresentado.

En la Tierra existen dos tipos de relieves volcánicos: las mesetas basálticas y los edificios. Las primeras son enormes volúmenes de lavas emitidos a través de fisuras. El récord lo tiene la meseta siberiana, que cubrió 1,5 millones de km<sup>2</sup> al final del Paleozoico (el triple de la más conocida meseta basáltica del Deccán): sus efectos climáticos pudieron causar la extinción pérmica, la *madre de todas las extinciones*. Pero, puesto que también son producidos por vulcanismo fisural, también los fondos oceánicos pueden considerarse mesetas basálticas formadas en un contexto especial. En cuanto a los edificios volcánicos, los tipos más importantes son los escudos (pequeña pendiente, basálticos [aunque el Hekla es andesítico]), los volcanes compuestos (pendiente abrupta, andesíticos), y los domos (edificios escarpados formados por magmas de gran viscosidad derivados de los anteriores).

Comencemos nuestro viaje volcánico por el Sistema Solar por Mercurio y la Luna, que presentan excelentes ejemplos de coladas de lava (Fig. 1), pero pobres ilustraciones de otros tipos de actividad volcánica: los domos (Fig. 2) representan probablemente actividad piroclástica. Las lavas lunares son basaltos que se acumularon (hasta más de dos km de espesor, y en un largo periodo entre 3.900 y 2.500 millones de años, Ma) en los *maria*, cuencas formadas en impactos asteroidales. Por su color más claro que las lunares, no es evidente que las lavas de Mercurio sean también basaltos.

En Venus, el vulcanismo es un fenómeno avasallador, pero (al contrario que en la Luna) esencialmente moderno: su impresionante muestrario de volcanes se ha acumulado sólo en los últimos 400 Ma, la jovencísima edad de toda la superficie venusina. Hay, por ejemplo, unas cincuenta mesetas basálticas, pero en realidad todo el planeta parece una gran llanura volcánica más o menos modificada por la tectónica, y el número de edificios es difícil de contar: hay unos

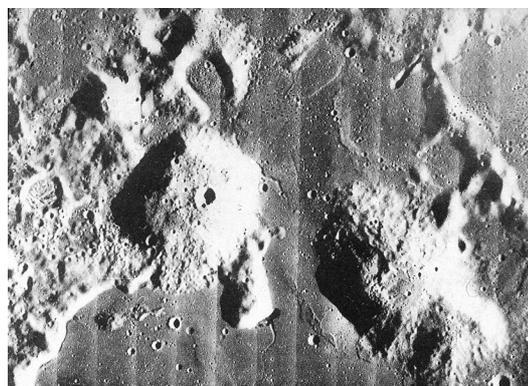


Figura 2. Domos volcánicos cerca de Mare Imbrium, en la Luna. El de la izquierda tiene un diámetro de 20 km. Foto: J.P.L. (NASA).

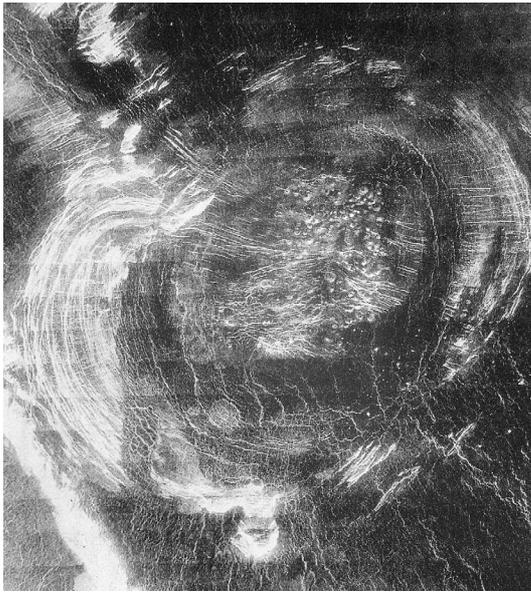


Figura 3. Un campo de volcanes en escudo en el interior de una corona (diámetro: 225 km) en Venus. Foto: J.P.L. (NASA).

500 escudos<sup>2</sup> con diámetros basales entre 20 y 200 km, unos 600 campos de escudos *pequeños* (entre 5 y 10 km, en realidad *gigantes* comparados con el Teide, cuyo diámetro es de unos 3 km), y un número indefinido de domos. También hay 175 ejemplos de unas peculiares estructuras llamadas coronas (Fig. 3), que aunque no son estrictamente hablando edificios volcánicos, incluyen siempre distintos tipos de vulcanismo. Los análisis de rocas volcánicas de Venus han permitido definir basaltos y rocas derivadas de ellos, como las que en la Tierra forman domos. Sin embargo, la longitud de algunas coladas (cientos de kilómetros, como en la Luna) obliga a pensar que parte del vulcanismo es de tipo ultrabásico. Un rasgo único en el Sistema Solar es que incluso los impactos pueden provocar un vulcanismo importante (Fig. 4), sin duda a favor de la elevada temperatura superficial.

El vulcanismo de Marte está caracterizado sobre todo por sus llanuras volcánicas y sus escudos gigantes. También se han descrito domos, y un tipo específico de edificio, desconocido en la Tierra, la pátera (del latín *patera*, plato llano), de pendiente aún menor que los escudos. Con un diámetro de 500 x 700 km, Alba Patera es el edificio volcánico más extenso del Sistema Solar, así como Olympus Mons, con 27 km de altura, es el más alto (Fig. 5). Ambos

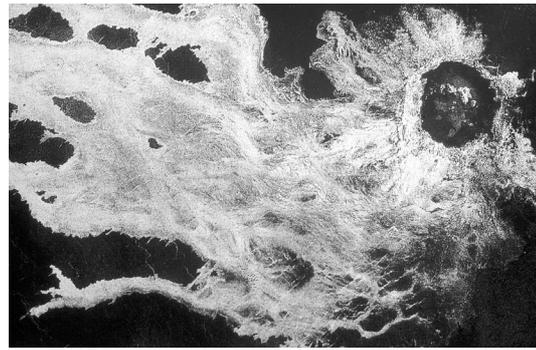


Figura 4. Vulcanismo de impacto en Venus: esta colada, que surge del cráter Franklin, alcanza los 300 km de longitud. Foto: J.P.L. (NASA).

se sitúan sobre una elevación topográfica circular de más de 7.000 km de diámetro y 10 de altura, el domo de Tharsis, la provincia volcánica más importante de Marte. Tharsis, sin duda una de las claves de la evolución del planeta, parece un rasgo primordial pero no se descarta que alguno de sus edificios esté aún activo. A diferencia de la Luna, cuyo vulcanismo es sobre todo inicial, y Venus, que ha borrado su historia, Marte parece ofrecer un registro completo de su actividad interna, un hecho que resalta aún más su interés científico.

En 1997, la sonda *Mars Pathfinder* analizó varias rocas marcianas que (aunque con algunas particularidades) se parecen a los basaltos o a las andesitas terrestres. Estos datos han sido confirmados por el espectrómetro de la *Mars Global Surveyor*, que además ha detallado que las andesitas predominan en el hemisferio Norte, y los basaltos en el Sur. En la Tierra, los geólogos de principio de siglo se dieron cuenta de que las andesitas tienen una distribución lineal, que llamaron "línea de la andesita" y que ahora sabemos que coincide con las zonas de subducción. En Marte, por el contrario, las andesitas no parecen tener una distribución lineal, sino areal.

En el Sistema Solar exterior, Ío, el cuerpo de vulcanismo más activo de todo el Sistema, es el gran protagonista. Su actividad sigue los dos patrones básicos, el lávico y el piroclástico: el primero da lugar a coladas que surgen de edificios bajos, y el segundo a las fuentes de lava (Fig. 6) que las fotos de las sondas *Voyager* hicieron famosas. Surtidores semejantes, pero cargados con agua de hielo, pueden brotar de Europa (Fig. 7) y de Encélado, que parece nutrir de partículas uno de los anillos de

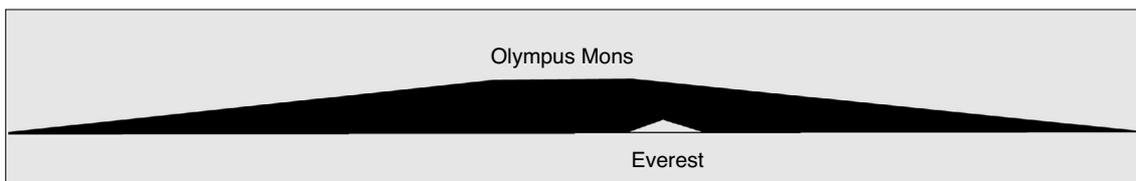


Figura 5. Olympus Mons comparado con el Monte Everest.

(2) Curiosamente, éste es aproximadamente el número total de volcanes activos existentes en la Tierra.

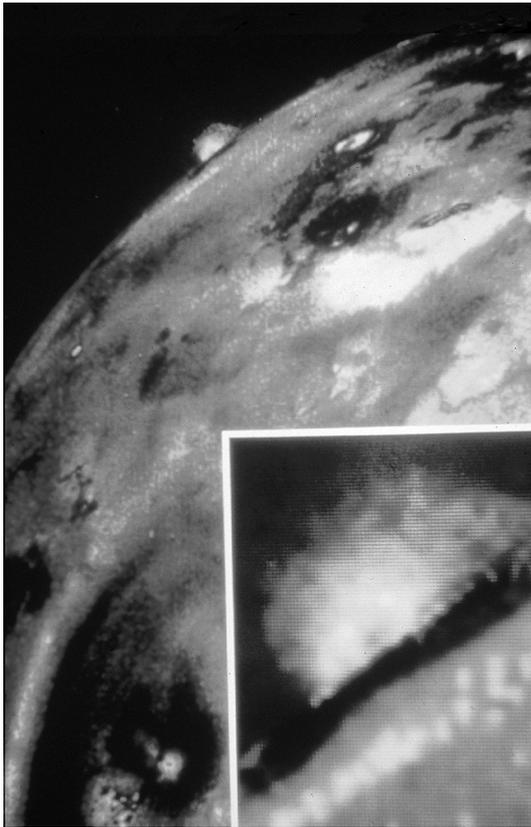


Figura 6. Vulcanismo piroclástico en Ío. La composición más probable del penacho volcánico es dióxido de azufre. Foto: J.P.L. (NASA).

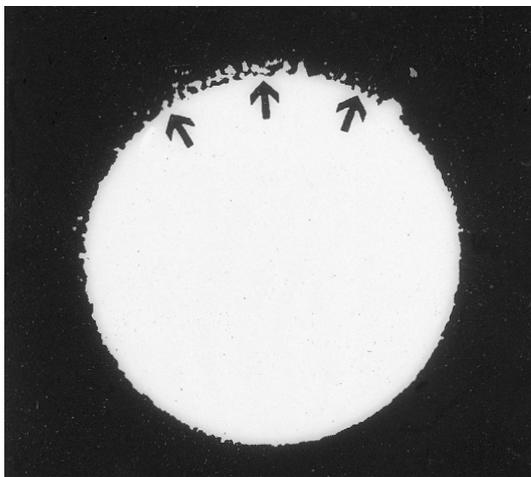


Figura 7. Probables penachos volcánicos en Europa. Estos "géiseres" aparecieron sólo en esta imagen ultravioleta tomada por Voyager 2. A juzgar por los rasgos de su superficie, Ganímedes, el siguiente satélite galileano, ha debido experimentar también un vulcanismo semejante. Foto: J.P.L. (NASA).

Saturno. Por último, los géiseres de nitrógeno sólido de Tritón, cuyos penachos son arrastrados por un viento de nitrógeno y metano, parecen un remate lo bastante extraterrestre para este viaje.

## EL MARCO DINÁMICO

En nuestro planeta, hay vulcanismo:

(a) cuando material caliente del manto inferior llega a una profundidad de unas decenas de kilómetros; allí se funde por descompresión, y (ya como un líquido) prosigue su camino hasta la superficie.

(b) cuando el manto situado sobre una zona de subducción se hidrata (con lo que su punto de fusión baja) al recibir el agua expulsada de la placa.

(c) cuando un sistema importante de fracturas descomprime material caliente situado bajo la litosfera. Llamamos puntos calientes a las zonas del primer caso, márgenes activos a las del segundo, y provincias volcano-tectónicas a las terceras. ¿Y en el Sistema Solar?

Para la parte exterior del Sistema, el calor mareal es una explicación suficiente para el vulcanismo de Europa (por sí solo) e Ío (sumado al calor radiactivo); pero no para los de Encélado o Japeto, cuyas órbitas no justifican deformaciones mareales importantes, y que son además tan ligeros (densidad, 2,1 g/cm<sup>3</sup>) que apenas deben contener rocas, por lo que estarán casi totalmente desprovistos de elementos radiactivos. En cuanto al vulcanismo de los cuerpos rocosos, el modelo universal es el punto caliente: tanto las llanuras volcánicas y coladas desde Mercurio hasta Marte, como los domos lunares, los edificios grandes y pequeños de Marte (y el mismo domo de Tharsis) y Venus, e incluso las coronas de este planeta, todo recibe el mismo tratamiento. Que no es muy satisfactorio, ya que en último término la hipótesis del punto caliente se limita a *constatar* que unas zonas son volcánicas y otras no, sin *explicar* por qué unas zonas del núcleo o del manto de un cuerpo planetario son más calientes que otras. Sin embargo, hoy por hoy no existe una alternativa organizada a los puntos calientes como explicación del vulcanismo en el Sistema Solar interior.

## ALGUNAS PREGUNTAS PARA VULCANÓLOGOS ESPACIALES

\* ¿Qué rocas volcánicas hay en Mercurio? ¿Quizá andesitas, como podría indicar su color?

\* ¿A qué se debió el vulcanismo masivo que renovó la corteza de Venus hace 400 Ma? ¿Se trata quizá de un acontecimiento periódico? ¿Ha podido suceder algo semejante en otros cuerpos del Sistema Solar?

\* ¿Por qué en Venus algunos puntos calientes originan edificios normales, mientras que otros originan coronas? ¿Por qué no hay coronas en la Tierra, donde existen tantos puntos calientes?

\* ¿Cuántas andesitas terrestres *no* se han formado por subducción? ¿Cuánto del magmatismo intraplaca se debe a fracturas y no a puntos calientes?

\* ¿Cuál es el origen de las andesitas de Marte, y por qué abundan más en el hemisferio Norte, el más joven? ¿Podría indicar esto un cambio significativo en el régimen magmático de este planeta en algún

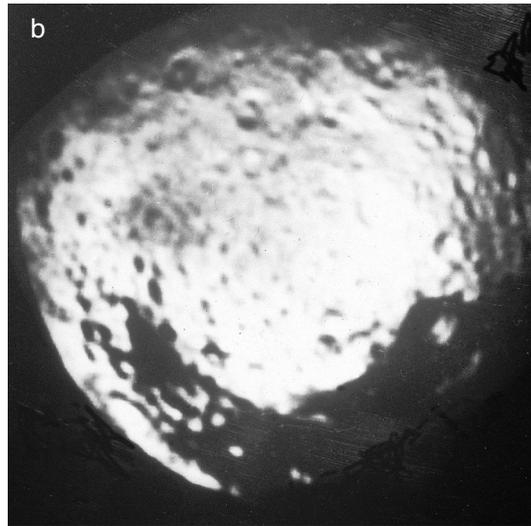
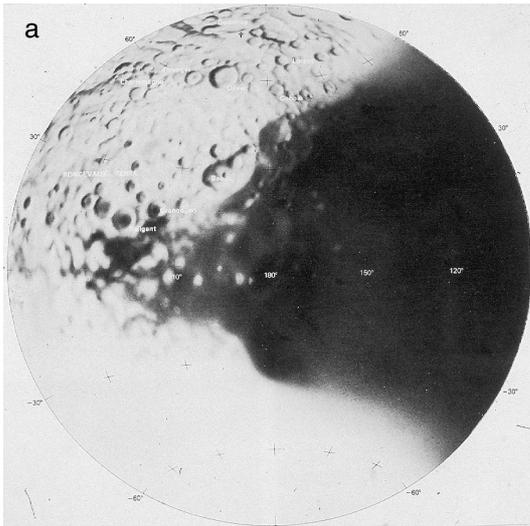


Figura 8. Las dos caras de Japeto. El material oscuro se encuentra sobre todo en la cara de avance (a, sector derecho), lo que hizo pensar que era recogido del espacio; pero una imagen de contraste máximo (b) permitió definir coladas, y también una zona difusa (centro-izquierda) que podría ser un halo de piroclastos. Foto: J.P.L. (NASA).

momento de su historia? Por otra parte, con tanta andesita, ¿cómo no se ha identificado en Marte ningún volcán compuesto, que es el edificio andesítico típico en la Tierra?

\* ¿Hay géiseres activos en Europa? La renovación de su superficie parece indicar que sí, pero la sonda *Galileo* no los ha detectado en varias observaciones próximas, mientras que la *Voyager 2* sí detectó los de Tritón en su única pasada.

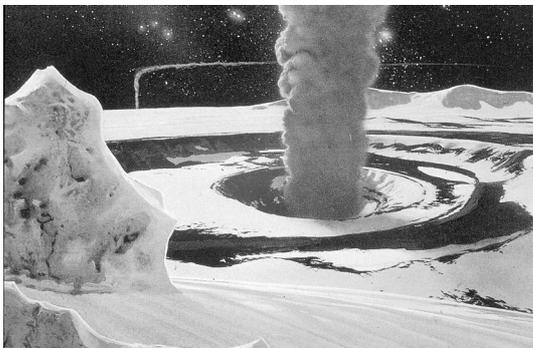


Figura 9. Los géiseres de Tritón podrían estar movidos por calor radiactivo; sin embargo, como su órbita retrógrada sugiere que es un satélite capturado, se han propuesto soluciones más exóticas, como fusión generalizada por fricción mareal después de la captura. Foto: J.P.L. (NASA).

\* ¿Por qué no ha habido vulcanismo que renueve la superficie de Calisto? Ganímedes, de masa y composición casi idénticas, sí ha experimentado un vulcanismo “tipo Europa”.

\* ¿Cuál es, o ha sido, el motor del vulcanismo en Encélado y Japeto?

## CONCLUSIÓN

Vemos así cómo, incluso limitándonos al tema del vulcanismo, los problemas menudean de una punta a otra del Sistema. Algunos no tienen solución a la vista (p.ej., ¿cuándo sabremos lo bastante sobre Japeto...o sobre Venus?), y otros acaban de surgir (como el de las andesitas marcianas) al amparo de los datos de la última misión. Debemos reconocer humildemente que sólo estamos comenzando a explorar un vastísimo terreno virgen; que nuestros mapas (o sea, las “recetas” del vulcanismo terrestre) son muy poco adecuados, e incluso pueden contribuir a extraviarnos; y que, por ello, únicamente una generación aún lejana de vulcanólogos puede esperar obtener una comprensión profunda del fenómeno geológico más común en el Universo.

## BIBLIOGRAFÍA

- Anguita, F. (1993). *Geología planetaria*. Ed. Mare Nostrum, Madrid, 132 p.
- Mittlefehldt, D.W. (2000). The latest news from Mars. *Science*. 287, 1601-1602.
- Patrick, R.R. y Howe, R.B. (1994). Volcanism on the terrestrial planets. *J. Geol. Ed.* 42, 225-238.
- Phillips, R.J. y Hansen, V.L. (1998). Geological evolution of Venus: rises, plains, plumes and plateaus. *Science*. 279, 1492-1497. ■