

## DE PUNTOS EN EL CIELO A PAISAJES EXÓTICOS: EL ORIGEN DE LAS CIENCIAS PLANETARIAS.

*From lights in the sky to exotics landscapes: the origin of Planetary Sciences*

Gabriel Castilla (\*) y Miguel Ángel de Pablo (\*\*)

### RESUMEN

*En este trabajo se plantean diversas reflexiones sobre el pasado y el presente de las Ciencias Planetarias. Se analizan aspectos relacionados con la taxonomía de los cuerpos planetarios, las principales lecciones que se desprenden de cuatro décadas de exploración espacial, la influencia que dicha exploración pueda ejercer sobre nuestra actual visión de la Geología, y de cómo la Frontera Espacial nos ofrece la oportunidad de poner a prueba el paradigma que rige las modernas Ciencias de la Tierra.*

### ABSTRACT

*This paper contains some reflections on the past and present of Planetary Sciences. The topics analysed include the taxonomy of planetary bodies, the main lessons learnt from four decades of space exploration, the influence that these voyages could bear on our vision of Geology, and how the Space Frontier offers a superb opportunity to callibrate the tenets of the modern Earth Sciences.*

**Palabras Clave:** *Geología Planetaria, Didáctica de la Geología, Epistemología, Ciencias Planetarias.*  
**Keywords:** *Planetary Geology, Teaching Geology, Epistemology, Planetary Sciences.*

### NACIMIENTO Y REVOLUCIÓN

La Astronomía nació de la mera observación del cielo. Las antiguas culturas del Mediterráneo, Mesopotamia y Oriente seguían el curso de las estrellas y establecían así tanto su calendario agrícola como sus ritos religiosos 3.000 años antes de nuestra era (Belmonte, 2002). Tras dos milenios de paciente observación, descripción y catalogación, los sacerdotes-astrónomos babilonios fundaron la astronomía matemática planetaria (Schiaparelli, 1945). Esta disciplina sirvió a Aristóteles de base para concebir un Universo estructurado, jerarquizado y finito.

Los primeros observadores no debieron tardar mucho en comprobar que unas pocas estrellas se movían sobre el fondo, en apariencia inmutable, de la bóveda celeste. Estos astros errantes que recorrían con distinto ritmo la región de las estrellas fijas fueron llamados por los griegos *planetai*, es decir, vagabundos. Según recogiera Claudio Ptolomeo en su obra *He mathematike syntaxis* (más conocida en su forma árabe: *Almagesto*), publicada en el siglo II d. C., siete eran los planetas que los astrónomos de la antigüedad creían que giraban alrededor de la Tierra: el propio Sol, la Luna, Mercurio, Venus, Marte, Júpiter y Saturno. (Shirley et al. 1997, p. 659; VV.AA, 2001). Esta visión del Cosmos, tan armo-

niosa y acorde con el dictamen de los sentidos, fue aceptada como verdadera durante más de quince siglos.

No fue hasta el siglo XVII cuando se demostró que todos los planetas, satélites y cometas giran alrededor del Sol obedeciendo a una misma ley: la gravitación universal. Isaac Newton allanó con su “nueva Física” el camino de quienes mantenían que las fuerzas materiales habían creado sistemas solares nuevos y que el universo evolucionaba según unas “leyes naturales”. Este cambio de *cosmovisión científica* o *macroparadigma* (Sequeiros, 2002) había dado sus primeros pasos más de un siglo antes con Nicolás Copérnico y su obra *Sobre las Revoluciones de los Orbes Celestes* (1543). Sin embargo, como nos recuerda Goethe (en Hawking, 2003, p. 15), este alumbramiento, hoy considerado como uno de los mayores logros de la cultura occidental, no fue nada fácil, pues:

*“De todas las opiniones y descubrimientos, ninguna debe haber ejercido mayor efecto sobre el espíritu humano que la doctrina copernicana. Apenas el mundo había sido considerado como redondo y completo en sí mismo, cuando se le pidió (sic) que renunciara al tremendo privilegio de ser el centro del universo. Quizá nunca se haya hecho una petición tan exigente a la humanidad, ya que al admitirla, tantas cosas se des-*

(\*) Departamento de Didáctica General y Organización Educativa. Facultad de Educación. Universidad Complutense de Madrid.  
E-mail: [gabrielplanetas@yahoo.es](mailto:gabrielplanetas@yahoo.es)

(\*\*) Área de Geología. Departamento de Matemática y Física Aplicadas y Ciencias de la Naturaleza. Escuela Superior de Ciencias Experimentales y Tecnología. Universidad Rey Juan Carlos. Móstoles, Madrid.

*vanecían en humo y niebla. (...) No sorprende que sus contemporáneos rehusaran perder todo esto y presentaran toda la resistencia posible a una doctrina que autorizaba y exigía de sus conversos una libertad de miras y una grandeza de pensamiento desconocidas, ni tan siquiera soñadas, hasta entonces”.*

La llamada Revolución Copernicana (Kuhn, 1957) no sólo desencadenó un cambio radical en nuestra concepción del Universo, sino que introdujo, además, una nueva forma de pensar y afrontar la ciencia. Se descubrió una idea sobre la que nadie había reparado antes debido a la inercia del estilo griego: si queremos estudiar una cosa conviene poner en duda todos los postulados previos, examinándola en detalle, cuidadosamente y sin prejuicios, mirando bien lo que tiene de particular y la distingue de las que se parecen a ella (Fernández Rañada, 1995). Gracias a esta duda, la misma que plantea Descartes como primer precepto en su *Discurso del Método* (1637), o que defiende en su tercera de las *Reglas para la Dirección de la Mente*, el racionalismo logró vencer los prejuicios que venían impuestos por la tradición y los sentidos, desencadenando con ello una revolución cultural y social sin precedentes. Como Fernández Rañada (2000) nos recuerda:

*“La combinación del método experimental y el análisis matemático permita afirmar que las creencias pueden ser sometidas a crítica, y saber si una afirmación es verdadera o falsa, y que su verdad no depende, por tanto, de la riqueza o el poder de quien sustenta una afirmación, sino de un análisis usando la razón humana.”*

Hoy podemos afirmar que la Revolución Científica nace de espectaculares triunfos intelectuales en los campos de la astronomía planetaria y de la ciencia física europea (Harman, 1983) que, entre otros logros, reorganizó el estatus de los cuerpos celestes: el Sol pasó a ser una estrella más, la Luna fue a parar al mismo cajón que las *estrellas mediceas* de Galileo, y la Tierra dejó de ocupar el centro del universo conocido para codearse con los demás planetas del Sistema Solar. Además, por primera vez, y gracias a la introducción del telescopio en el campo de la astronomía, se observaron y compararon rasgos geológicos de otro mundo con los de la Tierra. Como recogiera Galileo en su opúsculo *Sidereus Nuncius* (1610):

*“Ciertamente, nunca nadie las observó antes que nosotros, por lo que de las tantas veces repetida inspección de las mismas hemos derivado la opinión, que tenemos por firme, de que la superficie de la Luna y de los demás cuerpos celestes no es de hecho lisa, uniforme y de esfericidad exactísima, tal y como ha enseñado de ésta y de otros cuerpos celestes una numerosa cohorte de filósofos, sino que, por el contrario, es desigual, escabrosa y llena de cavidades y prominencias, no de otro modo que la propia faz de la Tierra, que presenta aquí y allá las crestas de las montañas y los abismos de los valles.”*

Aunque la introducción del telescopio fue una aportación fundamental en el posterior desarrollo de la Astronomía, debemos recordar que para la consolidación de las modernas ciencias planetarias tan decisivas fueron estas primeras experiencias de Galileo como el establecimiento de las tres leyes fundamentales de los movimientos planetarios por parte de Johannes Kepler (*Astronomía Nova*, 1606; y *Harmonice Mundi*, 1619). Tampoco podemos olvidar que él es el padre de los fundamentos de la óptica moderna, publicados bajo el nombre de *Dioptrice* (1610), un trabajo de capital importancia en el posterior desarrollo del telescopio astronómico; y que autores como Max Caspar y Arthur Koestler apuntan a su figura como precursor de la noción de gravedad. Como este último investigador recoge en una de sus obras (1988, p.97) citando al propio Kepler: *“Si dos piedras se hallan situadas en un lugar cualquiera del espacio, la una cerca de la otra, y fuera del alcance de la fuerza de un tercer cuerpo de la misma naturaleza, entonces se unirán entre sí, a la manera de los cuerpos magnéticos, en un punto intermedio, cada una aproximándose a la otra en proporción a la masa de esta última.”* Parece claro que el genial Matemático Imperial de la corte de Rodolfo II de Habsburgo intuía en sus obras que una nueva Física estaba por llegar.

Como heredero de las obras de Copérnico, Galileo y Kepler; Isaac Newton se perfila en la historia como el primer científico planetario moderno (Stevenson, 2000). En sus *Principios matemáticos de filosofía natural* (1687) establece las bases de la mecánica celeste, razón por la que esta obra es considerada como la cumbre de la revolución astronómica y suponen el nacimiento de la física moderna (López Piñero et al. 1989). Sin embargo, esta primera época de consolidación de la astronomía planetaria no culmina con él. A mediados del siglo XVIII ven la luz las primeras hipótesis sobre el origen del Sistema Solar. El primero en ofrecer una visión cosmogónica de corte científico como alternativa plausible al Génesis bíblico fue, en 1745, el francés George-Louis Leclerc, conde de Buffon. Posteriormente nacería la hipótesis nebular, propuesta inicialmente por Kant en una breve obra titulada *Historia Natural y Teoría del Cielo* (1755). Cuarenta años después, en 1796, Laplace publicó en su *Exposición del Sistema del Mundo* una versión mejorada de la teoría del filósofo de Königsberg (Papp, 1950).

Algunos de los descubrimientos más celebrados en esta primera infancia de las ciencias planetarias se fundamentaron en la aplicación directa tanto de la recién nacida mecánica newtoniana como de la llamada *Ley de Titius-Bode*, expresión algebraica que alcanzó una gran fama al lograr predecir con asombrosa precisión, y en un margen de dos décadas, la posición de Urano y Ceres (el mayor de los asteroides del cinturón principal). Cuarenta y cinco años más tarde, en 1846, Leverrier y Adams descubren el último de los grandes: Neptuno. Y finalmente, en 1930, el astrónomo norteamericano Clyde Tom- baugh descubrirá Plutón; perfilándose a partir de entonces la popular visión de un Sistema Solar constituido por nueve planetas.

## SELENOLOGÍA, AREOLOGÍA Y AS- TRONÁUTICA

En los siglos XVIII y XIX el continuo perfeccionamiento del telescopio permitió abordar la búsqueda sistemática de nuevos satélites, la observación detallada de la atmósfera de Júpiter y los anillos de Saturno; así como la confección de mapas relativamente detallados de la Luna y Marte. Los astrónomos comienzan a emplear el término *Selenología* para referirse a la nueva disciplina encargada de estudiar todos los aspectos relacionados con nuestro satélite natural; mientras que divulgadores de la Astronomía como Camille Flammarion hablan abiertamente de *Geología Lunar* en sus obras (Flammarion, 1876). Pero lo que más destaca de esta época son los trabajos que sobre Marte realizan los astrónomos Giovanni Schiaparelli y Percival Lowell, trabajos que servirán de base para una nueva rama de la astronomía: la Areología (llamada así en honor al dios griego Ares, Marte en el panteón romano); un término, este último, que nunca llegó a consolidarse.

A finales del siglo XIX, y como fiel reflejo del interés que entre el gran público despiertan los temas relacionados con la Ciencia, la Tecnología y las grandes exploraciones, comienzan a escribirse novelas pertenecientes a un nuevo género literario: la ficción científica. Las obras de autores como Julio Verne o H. G. Wells serán fuente de inspiración para los primeros “visionarios” que se atreven a concebir un medio de transporte para viajar por el espacio. El ruso Konstantin Tsiolkowsky, un profesor de matemáticas apasionado por los viajes espaciales y la obra de Verne, escribió en 1878 una memoria donde se sentaban las bases de la astronáutica, calculando todos los elementos esenciales del cohete espacial. Al otro lado del Atlántico, el físico norteamericano Robert Hutching Goddard, quien en su juventud quedó fascinado por obras de este género, como *La guerra de los mundos* de H. G. Wells, se propuso crear un vehículo capaz de llegar a Marte. Construyó el primer cohete de combustible líquido que llegó a volar y está considerado como el primero en desarrollar la tecnología de cohetes y lanzadores espaciales (Sagan, 1974). Y en Europa, el austríaco Hermann Julius Oberth descubrió su vocación leyendo la obra de Verne: *De la Tierra a la Luna*. Los cohetes empleados por los protagonistas para frenar su llegada al satélite fueron para él un descubrimiento que cambió su vida. A Oberth se le considera el creador de la astronáutica como ciencia, y uno de sus ayudantes fue Wernher von Braun, el artífice de la llegada del ser humano a la Luna (Ceuzin, 1971; Jáuregui, 1992; Reyes, 1992).

En el siglo XX, los dos grandes personajes de la astronomía planetaria fueron el Premio Nobel de Química, Harold Urey, quien se centró en el estudio del origen y evolución de los planetas desde la perspectiva de la química; y el investigador Gerard Kuiper, que trabajó en el campo de los cometas y las atmósferas de los gigantes de gas. Desde la perspectiva de la geología planetaria, uno de los episodios más importantes fue el protagonizado por el investigador alemán Alfred Lothar Wegener. Físico de for-

mación (se doctoró en Astronomía con una tesis sobre las Tablas Alfonsinas), al término de la Primera Guerra Mundial fue contratado como profesor de meteorología y geofísica por el Instituto de Física de Marburgo. El invierno de 1918 a 1919 lo dedicó a investigar sobre el origen de los cráteres lunares, y sus conclusiones fueron publicadas en un artículo titulado *El origen de los cráteres lunares* (Wegener, 1921), donde pasa revista a todas las hipótesis y opiniones que sobre esta controversia geológica existían hasta el momento. Modelizó cráteres de impacto empleando técnicas muy rudimentarias y, tras comparar la forma de las estructuras que obtenía en sus ensayos con la de volcanes terrestres y los cráteres lunares, llegó a la conclusión de que éstos se debían haber formado por el impacto de otros cuerpos contra la superficie de nuestro satélite; advirtiendo, sin embargo, de la necesidad de encontrar y estudiar estructuras semejantes en la Tierra con el fin de poder corroborar esta hipótesis. Una ardua tarea reservada para una disciplina que vería la luz con el comienzo de la carrera espacial: la Geología Planetaria.

## CRECE UNA RAMA DEL ÁRBOL DE LA CIENCIA

Hoy se acepta que “la ciencia que estudia los planetas, incluyendo sus superficies, interiores y atmósferas” debe llamarse Planetología (VV. AA., 1990; Ridpath, 1999). Sin embargo este término engloba en su definición un gran número de campos y especialidades pertenecientes a diversas ramas de la ciencia: Meteorología, Geoquímica, Biología, Geofísica, etc.; lo que la convierte en una herramienta poco precisa que dificulta el establecimiento de objetivos claros de cara a su enseñanza y aprendizaje desde la perspectiva de las modernas Ciencias de la Tierra

En plena era espacial el término *Geología* se está quedando obsoleto pues, mientras que los horizontes del Universo se han ampliado considerablemente, esta disciplina sigue anclada en un marco de referencia que se nos queda estrecho. Los fundamentos geológicos y los conocimientos acumulados sobre nuestro planeta se pueden extrapolar con las oportunas modificaciones a otros planetas y satélites del Sistema Solar; y desde hace dos décadas muchos son los educadores que consideran que ha llegado ya el momento de trascender desde la Geología hasta la Planetología (Acaso y Anguita, 1983; Anguita, 1986; Catalán, 1986; López Llamas, 2002; Martínez et al. 1986). Sin embargo, y después de lo anteriormente expuesto, el término Geología Planetaria parece el más adecuado para el ámbito de las Ciencias de la Tierra, pues se define como tal a la “ciencia que aplica los principios y técnicas de la Geología al estudio de los planetas y sus satélites” (Parker, 1994). Este término ha prevalecido sobre otros empleados en los primeros años de la exploración espacial (Astrogeología, Geoplanetología o Planetomorfología, por poner algunos ejemplos), y su definición deja bastante claro que se centra en el estudio de los cuerpos sólidos de nuestro entorno planetario, lo que excluye a los planetas gaseosos pero no a sus



lunas. Además, engloba tanto los procesos como las energías que generan formas en la superficie de estos cuerpos, sin olvidarnos del origen, historia y evolución de los mismos.

### PERO, ¿QUÉ ES UN PLANETA?

Empieza a ser frecuente que cada cierto tiempo se anuncie en los medios de comunicación el descubrimiento de un nuevo planeta en el Sistema Solar. Primero fue Quaoar, en 2002, y más recientemente el llamado Sedna. En ningún caso se trata de nombres oficiales, pues éstos sólo puede otorgarlos la Unión Astronómica Internacional; y mucho menos aún significa esto que existan 11 planetas en lugar de 9. La realidad es bien distinta. El Sistema Solar está constituido por millones de cuerpos de tamaños dispares, y sólo unos pocos ostentan el rango de planetas. Incluso este término no está libre de polémica, pues muchos son los astrónomos que opinan que va siendo hora de replantearnos los criterios de clasificación seguidos hasta el momento. Según recoge el vocabulario Científico y Técnico de la Real Academia de Ciencias Exactas Físicas y Naturales (1990), un planeta es: “un cuerpo celeste que describe una órbita, generalmente elíptica, de poca excentricidad, alrededor del Sol o de otra estrella a cuyo sistema pertenece, que no tiene luz propia, y es iluminado por la estrella en torno a la cual describe su órbita”. Si reflexionamos un poco sobre esta definición veremos que contiene elementos ambiguos. Por ejemplo, cualquier asteroide de las muchas familias descubiertas podría considerarse un planeta mientras que Plutón, por contar con una órbita muy excéntrica respecto a la eclíptica, no lo sería. Además, esta definición es poco precisa porque nada nos dice del tamaño mínimo que debe tener un cuerpo para que pueda ser clasificado como planeta. La certeza de que el Sistema Solar no es el único sistema planetario del universo nos obliga a ser rigurosos y precisos a la hora de seleccionar los criterios en los que sustentar una definición que aspire a ser aceptada por la comunidad científica en general.

La Unión Astronómica Internacional aprobó en 1999 la siguiente definición: “un planeta es un objeto en órbita alrededor de una estrella, que sea más pesada que Plutón y más ligero que la estrella más pequeña”. Al leer esto nos puede asaltar una duda: ¿hasta qué punto Plutón es un buen referente para establecer la definición de planeta? Aquí es donde actualmente se centra uno de los debates más interesantes de las ciencias planetarias, pues muchos son los especialistas que opinan que este cuerpo no debería ostentar semejante estatus. Pero, si además tenemos en cuenta las peculiaridades y características de los planetas extrasolares descubiertos en los últimos años, aún nos podría asaltar una segunda duda: ¿un planeta debe necesariamente girar en torno a una estrella? La verdad es que no estamos seguros. En 1991 se detectaron planetas girando en torno al púlsar 1257+12; y en el 2001 se descubrieron en la región de Orión, a unos 1.000 años luz de la Tierra, lo que parecen ser planetas de entre 5 y 15 veces la masa de Júpiter que

aparentemente no orbitan alrededor de una estrella: son los llamados *planetas libres*.

A diferencia de los demás planetas del Sistema Solar, Plutón está constituido básicamente por hielo. Cuando fue descubierto se barajó la posibilidad de clasificarlo como un asteroide debido a su pequeño tamaño, sólo el doble que Ceres, el mayor de los cuerpos que constituyen el cinturón de asteroides. Por otro lado, sigue una órbita muy excéntrica por lo que periódicamente pasa de ser el noveno planeta a ocupar la octava posición por delante de Neptuno. Por esta razón algunos especialistas creen que se trata de un cometa gigante y afirman que la tenue atmósfera detectada en 1988 tiene su origen, igual que sucede en los cometas, en la sublimación de hielo como consecuencia del calentamiento que experimenta la superficie del cuerpo al aproximarse al perihelio de su órbita.

En agosto de 1992 se localizó el primer objeto del Cinturón de Kuiper, el enjambre de cuerpos pequeños, presuntamente cometas, que rodea al Sol más allá de Neptuno. Los objetos descubiertos hasta la fecha se asemejan bastante a Plutón en su composición, distancia al Sol y características orbitales. Esto ha dado lugar al concepto de *plutino*, esto es: un cuerpo que sigue una órbita semejante a la de Plutón y que mantiene una resonancia de 3:2 con Neptuno. Actualmente disponemos de tres clasificaciones alternativas a la de planeta para Plutón: asteroide, cometa y plutino. Sin embargo, también son tres las razones por las que el noveno planeta aún no ha sido degradado en el escalafón celeste. Primero, no puede ser clasificado como un cometa porque se trata de un cuerpo binario (sistema Plutón-Caronte) y carece de una coma visible. Segundo, por la voluntad de muchos astrónomos que no están dispuestos a aceptar que el único planeta descubierto hasta el momento por un estadounidense sea “rebajado” de categoría; y tercero, porque la tradición histórica tiene mucho peso en la Astronomía, y a todos nos han enseñado que Plutón es el noveno planeta del Sistema Solar (Kitger, 1998; Trigo, 2001).

El estudio de otros sistemas planetarios está dando buenos resultados en lo que a planetas gigantes se refiere, pero aún no tenemos una idea clara de la disparidad de tamaños, órbitas o composiciones que nos podemos encontrar. En el horizonte se avista una amplia variedad de mundos de hielo, roca y gas que pueden ser clasificados según una taxonomía que se rija más por prejuicios humanos que por criterios puramente científicos. Hoy la exploración avanza a un ritmo trepidante y no resulta fácil encontrar pautas o generalidades con las que construir una definición. A pesar de todo nos empeñamos en realizar esta complicada tarea siguiendo, eso sí, la máxima de Protágoras: el ser humano como medida de todas las cosas.

### CUATRO LECCIONES DEL PASADO

La perspectiva histórica que nos brindan las cuatro décadas transcurridas desde el comienzo de la exploración del Sistema Solar nos permite ver que

esa tarea se inició partiendo de unos conocimientos bastante rudimentarios sobre la dinámica global de nuestro planeta. El modelo de tectónica de placas, paradigma actual de la Geología y la Geofísica terrestres, apenas si había dado sus primeros pasos y las nociones que se manejaban acerca del interior de la Tierra eran muy incompletas. Nos aventuramos a estudiar otros astros con un equipaje lleno de prejuicios y una Geología geocéntrica por definición. Desde entonces hemos visto crecer y enriquecerse nuevos modelos sobre el origen y la evolución de nuestro entorno planetario. Gracias a la exploración espacial hemos descubierto que vivimos en un entorno cósmico en el que prima la diversidad y la individualidad. Planetas y satélites muestran una gran variedad de formas y paisajes que son fiel reflejo de las complejas interacciones que mantienen la materia que los constituye y la energía que los alimenta. Sin embargo, no sabemos si esta diversidad geológica responde en realidad a una disparidad en las condiciones iniciales del sistema o, por el contrario, tiene su origen en divergencias evolutivas controladas por el azar. En opinión del paleontólogo especialista en evolución, Stephen Jay Gould, para responder a esta pregunta necesitamos realizar un análisis histórico de cada cuerpo, una complicada labor sólo apta para disciplinas de corte historicista como la Biología y la Geología (Gould, 1991).

Pero a pesar de lo aprendido, cuando llega la hora de abordar el estudio de otros mundos, seguimos el modelo geológico terrestre porque es el único que manejamos con confianza. Ahora bien, imaginemos que fuéramos geólogos marcianos. Es muy probable que hubiéramos desarrollado nuestra ciencia desde un punto de vista exclusivamente catastrofista, porque nuestros objetos de estudio serían tormentas de polvo de dimensiones planetarias, volcanes gigantes, cataclísmicas inundaciones y grandes impactos asteroidales. Seguramente nunca habríamos enunciado un dogma semejante al de la Geología terrícola según el cual el presente es la clave del pasado, porque, sencillamente, los procesos geológicos que marcaron el pasado marciano no tienen casi nada que ver con los actuales. No hay duda de que desde este peculiar punto de vista los problemas surgirían cuando intentáramos estudiar la Tierra siguiendo exclusivamente nuestro peculiar modelo geológico. ¿Seríamos capaces de construir un modelo de tectónica de placas para la Tierra? Extrapolamos ahora este ejemplo para el resto de planetas del Sistema Solar... y más allá. ¿No podría pasarnos lo mismo que a esos geólogos marcianos, catastrofistas por necesidad? (Acaso y Anguita, 1983).

En uno de los artículos publicado por la revista norteamericana *Science* con motivo del cambio de milenio, el científico planetario David Stevenson (2000) hizo un repaso de lo que estimaba eran las lecciones más importantes que podíamos extraer de los últimos cuarenta años de exploración planetaria. Veamos si las reflexiones de Stevenson pueden ayudarnos.

• Primera lección. **Todos los procesos geológicos que reconocemos en otros cuerpos planeta-**

**rios pueden ser explicados en último término por principios, leyes y modelos estudiados en la Tierra.** El hecho de que algunas formas no hayan sido observadas en nuestro planeta no significa que no podamos abordar su estudio con nuestros conocimientos actuales de Geología y Física. Es decir, con la ciencia aprendida en la Tierra podemos lanzarnos a explorar el Sistema Solar y, en principio, cualquier otro sistema planetario.

• Segunda lección. **La perspectiva histórica es esencial.** Gracias a los datos aportados por las misiones espaciales podemos reconstruir la historia geológica, y por consiguiente la evolución de otros planetas y satélites del entorno solar. Además, la exploración espacial nos desvela la parte de la historia primigenia de nuestro planeta, que ha sido borrada por 4.500 millones de años de actuación de los procesos geológicos.

• Tercera lección. **El medio cósmico influye en la evolución de los cuerpos planetarios.** Los impactos asteroidales y cometarios han jugado un importante papel en la evolución de la Tierra y los demás cuerpos del Sistema Solar. Creemos que la Luna se originó por el impacto de un planetésimo contra la Tierra, y que procesos parecidos pudieron arrancar la corteza de Mercurio y alterar la velocidad y sentido de rotación de Venus. Pero el medio cósmico no se limita a los impactos, pues también podríamos incluir en este apartado los efectos de marea por resonancias orbitales y la radiación solar.

• Cuarta lección. **Procesos semejantes en cuerpos parecidos producen distintos resultados.** Aquí es donde nos damos de bruces contra nuestra ignorancia y debemos admitir que no terminamos de comprender qué procesos son los que, en último término, hacen que dos cuerpos que en teoría deberían ser parecidos (por su tamaño, composición y distancia al Sol) presenten un aspecto radicalmente distinto. Muchas son las posibles explicaciones: desde los grandes impactos hasta pequeñas variaciones de composición del manto o el núcleo que condicionen la actividad volcánica de un planeta o satélite. En efecto, el azufre, el agua y el carbono actúan como anticongelantes planetarios que favorecen la fusión y la formación de magmas, y en consecuencia vulcanismo a temperaturas más bajas de lo ordinario). Un tercer factor son las resonancias, posibles responsables de los tortuosos paisajes descubiertos en la superficie de lunas como Miranda o Encélado.

Como podemos deducir de esta última lección, existe un alto grado de contingencia en la evolución geológica de cualquier cuerpo planetario, lo que podría ser la explicación de la enorme variedad de formas descubiertas en el Sistema Solar. No es arriesgado predecir que si algún día podemos estudiar detalladamente exoplanetas, encontraremos un variado zoo de mundos parecidos a muchos otros, pero con peculiaridades propias que nos obligarán a crear nuevos modelos. Estas lecciones nos sugieren que su estudio será posible con la ciencia que hemos aprendido en nuestro planeta y que estamos poniendo a prueba en el Sistema Solar, pero será una tarea a realizar por equipos interdisciplinares. Necesitaremos mante-

ner un espíritu crítico con los modelos establecidos y una mentalidad muy abierta hacia opiniones alternativas; porque como bien afirma el paleontólogo David Raup (1994, p. 159-160), “*las disciplinas a las que les falta agitación<sup>1</sup> probablemente tienen problemas: o no tienen personas creativas o el dogma convencional es tan fuerte que el cambio resulta imposible*”. Tal vez no seamos lo suficientemente creativos, pero lo que sí es seguro es que un dogma tan fuerte como el modelo de tectónica de placas sólo podrá encontrar su revulsivo en esa frontera exterior, cuando podamos comparar en profundidad la Tierra con muchos otros cuerpos planetarios.

## EPÍLOGO

Durante siglos la ciencia permaneció estancada en un modelo griego fundamentado en el criterio de autoridad y el dictamen de los sentidos. La Revolución Científica se apoyó en tres pilares fundamentales: la duda, la comparación y la experimentación; tres motores que impulsaron un cambio social e intelectual sin precedentes. Tres lecciones que deberíamos ser capaces de transmitir a nuestros alumnos.

Las Ciencias Planetarias tienen la virtud de ofrecernos la posibilidad de llevar al aula la actualidad científica, contribuyendo así a modernizar y hacer más atractivos los contenidos de las tradicionales Ciencias Naturales. Nos invitan a ser críticos con la ciencia establecida y a descubrir que no hay paradigmas definitivos. Nos enseñan a mantener ciertas reservas hacia las clasificaciones y normas taxonómicas impuestas, normalmente imperfectas, sobre todo cuando hacen referencia a ciencias que presumen de estar vivas. Estimulan nuestra curiosidad, consolidan los aprendizajes de nuestros alumnos y los animan a contemplar la ciencia desde la globalidad.

Las Ciencias Planetarias, en definitiva, nos ofrecen el marco adecuado desde el que revitalizar la enseñanza de la Geología y poner a prueba el fuerte paradigma que la mantiene estancada desde hace décadas.

## BIBLIOGRAFÍA

Acaso, E. y Anguita, F. (1983). Actualización del programa de Geología general: la Geología de los planetas. *Actas del II Simposio Nacional sobre Enseñanza de la Geología*. (pp. 85-93). Gijón.

Anguita, F. (1986). Tendencias Actuales de la Geología. *Actas del IV Simposio Nacional sobre Enseñanza de la Geología* (239-305). Universidad del País Vasco, Vitoria-Gasteiz.

Anguita, F. y Castilla, C. (2003). *Crónicas del Sistema Solar*. Equipo Sirius. Madrid.

Aristóteles (1996). *Acerca del cielo*. Meteorológicos. Gredos. Madrid.

Belmonte, J. A. y Hoskin, M. (2002). *Reflejo del Cosmos*. Atlas de Arqueoastronomía del Mediterráneo Anti-

guo. Equipo Sirius. Madrid.

Caspar, M. (1948). *Kepler*. Acento. Madrid (1ª ed. cast. 2003).

Catalán, G. (1986). La Astronomía en la enseñanza de la Geología. *Actas del IV Simposio Nacional sobre Enseñanza de la Geología* (185-193). Universidad del País Vasco, Vitoria-Gasteiz.

Ceuzin, P. (1971). Introducción histórica. En De Latil, P. *El Firmamento*. Argos. Barcelona.

De Pater, I. y Lissauer, J. (2001). *Planetary Sciences*. Cambridge University Press. Cambridge, Reino Unido.

Descartes, R. (1983). *Discurso del método*. Reglas para la dirección de la mente. Orbis. Barcelona.

Fernández-Rañada, A. (1995). *Los muchos rostros de la ciencia*. Ediciones Nobel. Oviedo.

Fernández-Rañada, A. (2000). Por qué comunicar la ciencia hoy. En Páramo, E. *Actas del I Congreso sobre Comunicación Social de la Ciencia*. Parque de las Ciencias. Granada.

Flammarion, C. (1876). *Viaje por el espacio*. Imprenta de la Renaixensa. Barcelona.

Galileo-Kepler (1990). *El Mensaje y el mensajero sideral*. Alianza Editorial. Madrid.

Gould, S.J. (1991). *Brontosaurio y la nalga del ministro*. Crítica. Barcelona.

Harman, P. (1983). *La revolución científica*. Crítica. Barcelona.

Hawking, S. (2002) (Edit.) *A hombros de gigantes*. Crítica. Barcelona.

Jáuregui, A. (1992). *Von Braun*. Editorial Labor. Estella (Navarra).

Kelly, J., Collins, C. y Chaikin, A. (1999). (Eds.). *The New Solar System*. Cambridge University Press & Sky Publishing Corporation. Cambridge, Reino Unido.

Kidger, M. (1998). Plutón en tela de juicio. *Universo*, 41, 70-72.

Koestler, A. (1959). *Kepler*. Salvat Editores. Barcelona (1ª Ed. española, 1988).

Kuhn, T. (1957). *La revolución copernicana*. Orbis. Barcelona (1ª Ed. española, 1987).

López Llamas, C., Castilla, G. y de Pablo, M.A. (2002). Retrato de la familia solar: una unidad didáctica de Geología Planetaria. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 10, 41-46.

Lovelock, J. (1988). *Las edades de Gaia*. Tusquets Editores. Barcelona.

Martínez, R. y Prieto, M.I. (1986). Didáctica de la Geología Planetaria en el BUP: utilización del material aportado por las sondas interplanetarias. *Actas del IV Simposio Nacional sobre Enseñanza de la Geología* (181-184). Universidad del País Vasco. Vitoria-Gasteiz.

Papp, D. (1950). *El problema del origen de los mundos*. Espasa-Calpe. Buenos Aires.

Parker, S. (1994). *Dictionary of Geology and Mineralogy*. McGraw-Hill.

Raup, D. (1986). *El asunto Némesis*. Ediciones del Prado. Madrid.

(1) Ver un ejemplo de “agitación” en el apéndice.

- Reyes, L. (1992). *Julio Verne*. Editorial Labor. Estella (Navarra).
- Ridpath, I. (1999). *Diccionario de Astronomía Oxford-Complutense*. Editorial Complutense. Madrid.
- Sagan, C. (1974). *El cerebro de Broca*. Crítica. Barcelona.
- Schiaparelli, J. (1945) *La Astronomía en el Antiguo Testamento*. Espasa-Calpe. Madrid.
- Sequeiros, L. (2002). Las cosmovisiones científicas o macroparadigmas: Su impacto en la enseñanza de las Ciencias de la Tierra. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra* 10, 17-25.
- Shirley, J.H. y Fairbridge, R.W.(Edit). (1997). *Encyclopedia of Planetary Sciences*. Chapman & Hall, Londres.
- Stevenson, D. (2000). Planetary Science: A Space Odyssey. *Science*, 283, 997-1005.
- Trigo, J.M. (2001). *El origen del Sistema Solar*. Editorial Complutense. Madrid.
- Volk, T. (1998). *Gaia toma cuerpo. Fundamentos para una fisiología de la Tierra*. Cátedra. Madrid.
- VV. AA. (1996). *Vocabulario Científico y Técnico de la Real Academia de Ciencias Exactas Físicas y Naturales* (3ª Ed.). Espasa Calpe. Madrid.
- VV. AA. (2001). Real Academia Española. *Diccionario de la Lengua Española* (22ª Ed.). Espasa Calpe. Madrid.
- Wegener, A. (1921). The origin of lunar craters. *The Moon* 14, 211-236. ■

## APÉNDICE

### GAIA O LA GEOFISIOLOGÍA: UN EJEMPLO DE AGITACIÓN GLOBAL

En 1974 los investigadores James Lovelock y Lynn Margulis publicaron un controvertido artículo en el número 26 de la revista *Tellus*. Bajo el título de titulado *Homeostasis atmosférica por y para la biosfera: la hipótesis Gaia* llamaron la atención de toda la comunidad científica al definir la Tierra como “una entidad compleja que comprende la biosfera, la atmósfera, los océanos y el suelo; que constituye un sistema autorregulador y cibernético, y que persigue un ambiente físico y químico óptimo para la vida en el planeta”. Es decir, estos autores proponían que la Tierra es un *superorganismo* (al que denominaron Gaia, igual que la diosa madre Tierra de los griegos) que integra tanto la parte viva como la inerte, regulando, en su propio beneficio, todos los flujos e interacciones de materia y energía existentes entre ellos (Lovelock, 1988).

Con el tiempo los autores han ido modificando su postura, perfilado y suavizando la idea original. Ya no defienden que la biosfera conduzca el sistema Tierra conforme a su interés; sino que la vida y el planeta Tierra forman un sistema único en coevolución, con condiciones reguladas hasta un cierto punto por la primera. Recientemente, Lovelock ha redefinido Gaia como: “un sistema interactivo integrado por la vida, los suelos, la atmósfera y los océanos; que contiene ciclos complejos y transformación de materiales impulsados por energía biológica”. Además, se está lavando la imagen de la teoría de una forma más sutil, pues poco a poco se ha ido abandonando el contaminado nombre de Gaia, que ha sido sustituido por el de Geofisiología. Este término tiene connotaciones más “científicas” y cuenta con unos antecedentes históricos de mayor solera, pues fue acuñado por el geólogo británico del siglo XVIII James Hutton, uno de los padres de la Geología, quien la empleó durante una comunicación en la Real Sociedad Geológica de Edimburgo. Hutton consideraba a la Tierra como un *superorganismo* y creía que la mejor forma de estudiarlo era precisamente la fisiología (Volk, 1998).

El término Geofisiología ha comenzado a fraguar en algunos ambientes y la moderación en los planteamientos está atrayendo a numerosos investigadores e instituciones. Las agencias espaciales trabajan en el desarrollo de satélites y sistemas de observación de la Tierra capaces de medir y modelizar flujos de iones, la circulación oceánica, atmosférica y el balance global de CO<sub>2</sub>. El más conocido de estos proyectos es el EOS, término ambiguo que responde tanto a la diosa griega del amanecer como a las siglas de Earth Observatory System (al parecer, a la NASA también le gustan las diosas, aunque se mantenga dentro de los márgenes de lo políticamente correcto). Sin embargo, no debemos olvidar que Gaia fue pionera en concebir la Tierra como un todo constituido por multitud de sistemas complejos, y su principal virtud como teoría reside en que reclama una mayor atención hacia los modelos globales.