

DIAGNÓSTICO DEL ESTADO ENERGÉTICO DE LOS CUERPOS SÓLIDOS DEL SISTEMA SOLAR

Diagnosis of the energy state of the solid bodies in the solar system

Concha López-Llamas (*), Gabriel Castilla (**), y Miguel Ángel de Pablo (***)

RESUMEN

Realizar un diagnóstico aproximado del estado energético de los cuerpos sólidos del Sistema Solar es un ejercicio que va mucho más allá del análisis de las formas más representativas de sus superficies; es una actividad que requiere la valoración de un conjunto de parámetros intrínsecos, orbitales y espaciales, cuya interacción nos ofrece el cuadro energético específico que pone en marcha la maquinaria geológica de cada uno de estos planetas o satélites. A este conjunto de parámetros, factores determinantes e indicadores de las diferentes fuentes de energía del Sistema Solar lo hemos denominado “energímetro”.

ABSTRACT

To carry out an approximate diagnosis of the energy state of the solid bodies in the Solar System is an exercise that goes beyond the analysis of the most representative forms of their surfaces. It is an activity that also requires the assessment of a group of intrinsic, orbital and space parameters whose interaction provide the specific energy state that triggers the geologic machinery of each planet or satellite. This group of parameters, decisive factors and indicators of the different sources of energy of the Solar System, we have denominated “Energiometer”.

Palabras clave: *Energímetro, Diagnóstico energético, Geología planetaria, Fuentes de energía planetaria*
Keywords: *Energiometer, Energetic diagnostic, Planetary geology, Sources of planetary energy.*

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

“Diagnóstico del estado energético de los cuerpos sólidos del Sistema Solar” es un taller enmarcado en el ámbito de la Geología Comparada y aplicado al entorno del Sistema Solar.

Los objetivos principales de este taller son proporcionar al profesorado:

- Una metodología de investigación básica que les permita descifrar las claves de la dinámica geológica en cada cuerpo.
- Un instrumento didáctico para el análisis de las energías que desencadenan los procesos geológicos observados hasta el momento en los planetas y satélites del Sistema Solar: el “energímetro”.

FASES DEL TALLER

El plan de trabajo consta de las siguientes fases:

1. Presentación de un protocolo de investigación para trabajar en el aula aspectos relacionados con la Geología Planetaria.

2. Elaboración del “energímetro”: definición de los parámetros que lo constituyen.
3. Aplicación del “energímetro” en planetas y satélites del Sistema Solar.

DESARROLLO DEL TALLER

1ª Fase: Presentación del protocolo de investigación en Geología Planetaria.

En esta primera fase se pone de manifiesto la necesidad de utilizar en el aula una metodología de investigación en Geología Planetaria diferente a la que se sigue en las investigaciones sobre la Geología de la Tierra.

El hecho de trabajar con cuerpos situados a grandes distancias de la Tierra nos obliga a desechar muchos de los procedimientos utilizados para el estudio de nuestro planeta y a procurarnos un protocolo de investigación, a nivel sistémico, que nos permita adquirir un conocimiento global sobre la maquinaria geológica específica de cada cuerpo y de las energías que la ponen en marcha.

A continuación mostramos la secuencia de dicho protocolo:

(*) Departamento de Ciencias Naturales. Instituto de Educación Secundaria ‘María Zambrano’. Leganés, Madrid (Spain). colollamas@yahoo.es

(**) Seminario de Ciencias Planetarias. Facultad de Ciencias Geológicas. Universidad Complutense de Madrid (Spain).

(***) 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 (Spain).



1. Describir las formas que configuran los relieves de las superficies sólidas.
2. Indagar acerca de los procesos determinantes de los modelados del relieve.
3. Descifrar las fuentes de energía implicadas en la dinámica geológica específica para cada cuerpo a lo largo de su historia, así como su estado energético en el momento presente.

2ª Fase: Secuencia didáctica para la elaboración del “energímetro”.

Las imágenes que nos llegan de la superficie de los cuerpos sólidos nos permiten el desarrollo de la primera e incluso, a veces de la segunda fase de la investigación; pero ¿qué datos necesitaríamos conocer para poder realizar un estudio energético que nos informe sobre la fuente generadora de los procesos geológicos que determinan el aspecto superficial del planeta o del satélite?

En esta segunda fase del taller se explica que:

1. El trabajo que van a desarrollar va encaminado a definir los parámetros esenciales que definirán el energímetro. Instrumento conceptual para diagnosticar el estado energético de los cuerpos sólidos del Sistema Solar, permitiendo, por ello, abordar el desarrollo de la última fase del protocolo.
2. El “energímetro” es un instrumento aplicable tanto a la Enseñanza Secundaria como a la Universitaria. Ahora bien, si se utiliza en la Enseñanza Secundaria, conviene utilizarlo en los cursos superiores de la misma. Esta recomendación se apoya en su adecuación a los

contenidos curriculares de la materia de Geología en esta etapa de la Enseñanza; y al hecho de que su aplicación en el aula requiere de la realización, por parte del alumno-a, de ejercicios de análisis y de relación de datos. No hay que olvidar que el desarrollo en los jóvenes estudiantes de las capacidades intelectuales que hacen posible la ejecución de este tipo de actividades se va adquiriendo en los cursos de la Enseñanza Secundaria Obligatoria, consolidándose su aprendizaje durante el Bachillerato.

3. El “energímetro” puede ser utilizado en el aula aplicando diferentes metodologías de enseñanza, siendo la metodología participativa con la que dicho instrumento pone de manifiesto sus verdaderas cualidades didácticas, adquiriendo éstas su grado máximo de expresión cuando el profesor propone al alumnado no sólo la aplicación del “energímetro” sino, incluso participar en su elaboración previa. Es por esto por lo que el profesorado que participe en el taller desarrollará la secuencia didáctica que realizan los alumnos-as en el aula, pudiendo así tomar conciencia de las virtudes del energímetro como instrumento de análisis en Geología Planetaria.

La secuencia de aprendizaje para la elaboración del energímetro consta de los siguientes momentos:

1er momento

En este primer momento se entrega un mapa conceptual en el que se muestran las diferentes fuentes de energía de la Tierra, en función de las características: espaciales, orbitales e intrínsecas de nuestro planeta (Fig. 1). El comportamiento geoló-

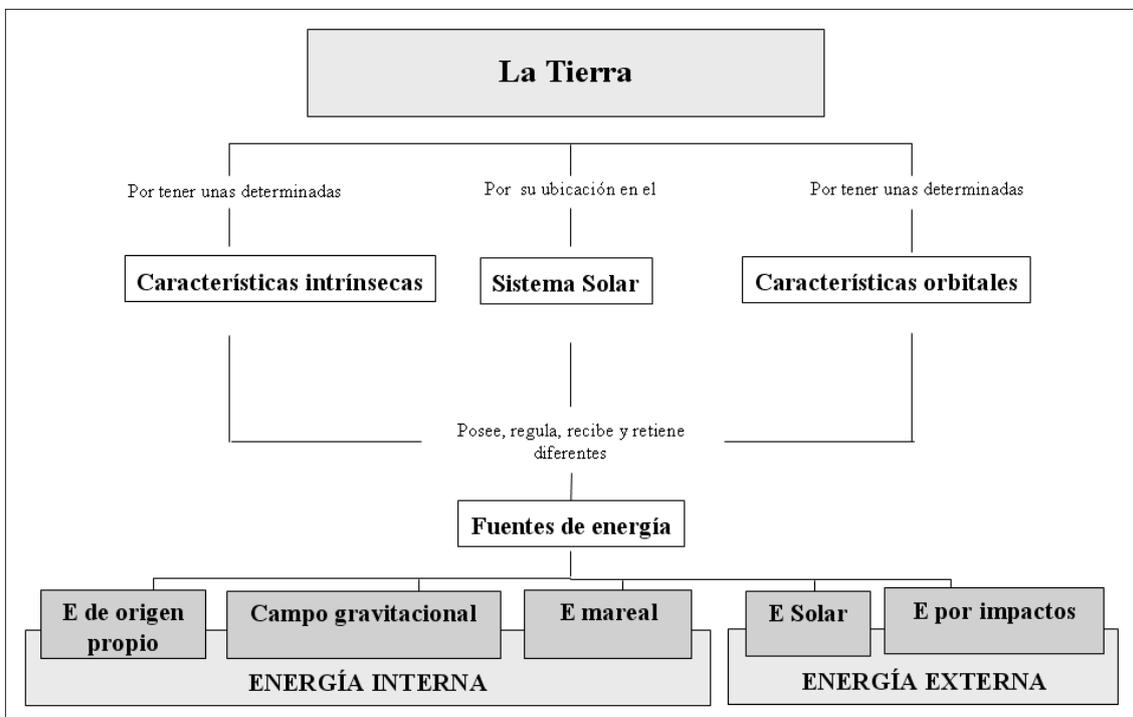


Fig. 1. Mapa conceptual de las fuentes de energía de la Tierra.



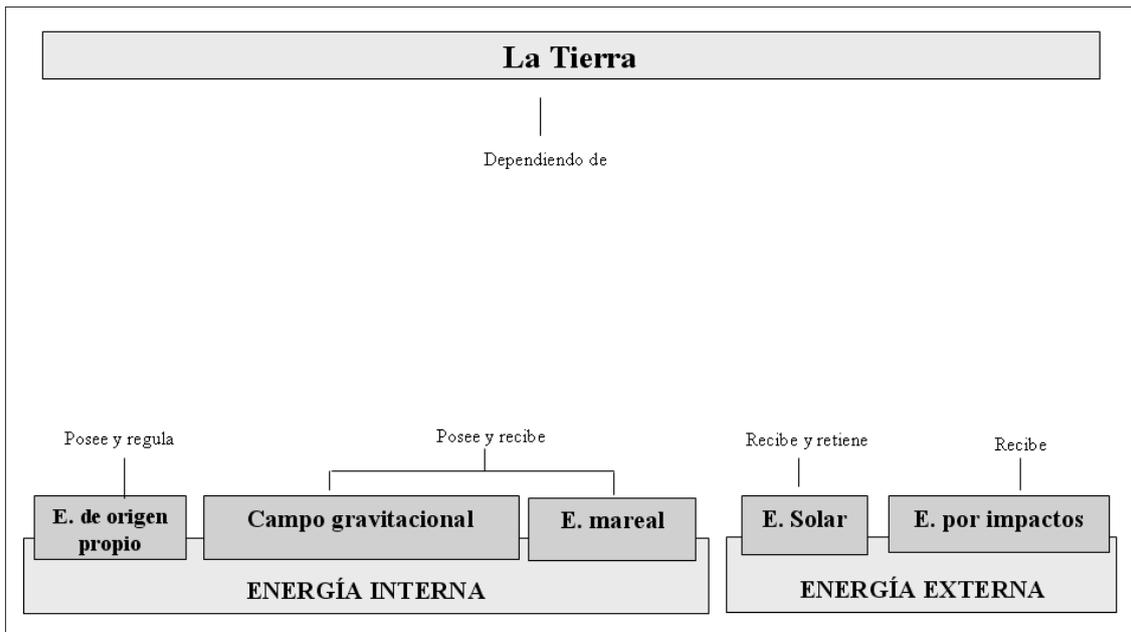


Fig. 2. Plantilla para el mapa conceptual de factores causales de las fuentes de energía de la Tierra.

gico de un cuerpo sólido como el nuestro viene determinado por la cantidad de energía de que disponga, y que dicha energía no posee un único origen, sino que es el resultado de la interacción de las diferentes fuentes generadoras:

- Las fuentes de energía propias: consecuencia de los procesos de acreción y del colapso gravitacional que experimentaron esos cuerpos en los primeros momentos de su formación; así como la presente en los elementos radiogénicos atrapados en los mismos.

- Las fuentes de energía externas que incrementan desde fuera el capital energético propio: el Sol, la estrella del sistema; la energía potencial presente en los cuerpos que viajan por el Sistema Solar sin órbita definida y susceptibles de impactar sobre la superficie de cualquier cuerpo planetario; y los procesos de resonancia orbital que se establecen entre cuerpos que giran respecto a un mismo centro de masas y se alinean en el espacio periódicamente.

Recursos:

- Mapa conceptual de las fuentes de energía de la Tierra (Fig.1).

2º momento

A continuación al profesorado se le entrega un segundo mapa conceptual, en la misma línea que el anterior, pero al que le faltan los conceptos situados en el centro del mapa (Fig. 2). En dicho documento se pone de manifiesto que un cuerpo terrestre como el nuestro dispone de la energía que es capaz de producir, recibir o retener por sí mismo. Por esta razón se pide a los profesores-as que seleccionen dichas características entre las que se le ofrecen en un documento complementario (puzzle conceptual), y las pongan en relación con las diferentes fuentes de

energía generadoras hasta configurar de nuevo un mapa conceptual completo.

En este momento se recuerda al profesorado que resulta conveniente, para favorecer esta tarea a nuestros alumnos-as, crear unos pequeños documentos bibliográficos al respecto (Fig. 3), adaptados a su nivel cognitivo. Su análisis científico les ayudará a encontrar sin grandes dificultades las relaciones adecuadas. En el taller el profesorado dispondrá de este tipo de documento como ejemplo de lo que se propone.

Por último el profesorado dispondrá de un mapa conceptual de los factores determinantes de las diferentes fuentes de energía (Fig. 4) para que lo contrasten con el realizado por cada grupo en el taller.

Recursos:

- Plantilla marco para la realización del mapa conceptual: “Factores causales de las fuentes de energía de la Tierra” (Fig. 2).

- Puzzle de conceptos para la elaboración del mapa conceptual: “Factores causales de las fuentes de energía de la Tierra”.

- Textos científicos adaptados para 2º de Bachillerato (Fig. 3).

- Mapa conceptual de los factores determinantes de las diferentes fuentes planetarias (Fig. 4).

3º momento

Las distintas características analizadas en el momento anterior (intrínsecas, espaciales y orbitales) pueden tener un mayor o menor peso en el condicionamiento de la dinámica planetaria. Estos factores pueden ser determinantes o indicadores de los diferentes tipos de energía que intervienen en la dinámica global planetaria. De manera que el análisis



Relación entre el Índice de Evolución Planetaria (IEP) y la E interna

El geólogo planetario James Head propuso en los años setenta un sencillo índice que permitiera estimar el grado de actividad de un cuerpo planetario, y que se conoce como **Índice de Evolución Planetaria (IEP)**. Este índice se justifica fácilmente: en el Sistema Solar, el Gran Bombardeo Meteorítico que se produjo tras la acreción de los cuerpos planetarios afectó a todas las superficies sólidas. El vulcanismo puede cubrir esas superficies craterizadas; también la erosión puede destruir los cráteres, pero este proceso no es tan general, ya que sólo actúa en los cuerpos con atmósfera. En conclusión, cuanto menor superficie primitiva (craterizada) muestre un cuerpo planetario, mayor actividad volcánica habrá tenido éste; de lo que se deduce una mayor E interna, propia o de origen mareal. El valor del IEP se calcula:

$$\text{IEP} = \% \text{ terrenos volcánicos} / \% \text{ terrenos craterizados}$$

En el caso de que no conozcamos toda la superficie de un cuerpo planetario, los valores sobre porcentaje de terrenos volcánicos y craterizados serán relativos.

La ordenación de los cuerpos planetarios según su IEP permite obtener una conclusión: los cuerpos son más activos cuanto mayor es su masa. Pero esta regla presenta una importante excepción: los satélites cuya energía procede de los efectos mareales por resonancias respecto a otros cuerpos (energía gravitacional) presentan unos IEP muy altos.

Fig. 3. Ejemplo de textos científicos, adaptados para los alumnos de educación secundaria, sobre algunos parámetros físicos de interés.

de los datos concretos de esos parámetros permitirá realizar un diagnóstico aproximado del estado de salud energético de dicho cuerpo. Sin embargo, se advierte al profesorado que el diagnóstico podría mejorarse extraordinariamente si a dicho energiómetro se incorporan otros parámetros que, aunque no se comportan como factores de determinantes de las diferentes fuentes de energía, si lo hacen como extraordinarios indicadores de su presencia. Estos son: Índice de Evolución Planetaria, retentividad y temperatura en superficie. De nuevo en este momento se recurre a la utilización de los textos científicos adaptados para la elaboración de estos nuevos contenidos (Fig. 3).

Recursos:

- Textos científicos adaptados para 2º de Bachillerato (Fig. 3)

4º momento

En esta última fase de la secuencia conviene que el profesorado-a realice un ejercicio que consolide lo asimilado hasta el momento. Para ello se le entrega una tabla donde se enfrentan los factores, determinantes e indicadores, con las distintas fuentes de energía posibles (Fig. 5), y se les pide que definan en cada casilla, mediante una X_D de determinante o una X_I de indicador, el comportamiento de cada factor en relación con la fuente energética.

Relación entre Retentividad, Campo Gravitatorio y E solar.

El término Retentividad (R) hace referencia a la capacidad que tiene un planeta para retener una atmósfera.

Una expresión general y simplificada de la Retentividad, que permite deducir las condiciones que un cuerpo necesita cumplir para que posea una atmósfera, es la siguiente:

$$(K \cdot T) / Mm \ll (G \cdot Mp) / R$$

Donde: K es la Constante de Boltzman, G la Constante de Gravitación, T es la temperatura, Mp es la masa del planeta, Mm la masa molecular del gas atmosférico, y R el radio del cuerpo planetario.

De esta expresión se deduce que en tres casos teóricos muy concretos un cuerpo podrá retener una atmósfera:

- Cuando la temperatura sea muy baja.
- Cuando la masa molecular de los gases de la atmósfera sea muy elevada.
- Cuando la masa del planeta sea muy grande.

En general se acepta que la condición fundamental para que un planeta tenga atmósfera es que, por término medio, las velocidades de las moléculas sean inferiores a la velocidad de escape.

La velocidad de la molécula dependerá en buena medida de la temperatura, y ésta de la distancia al Sol. Por lo tanto, podemos afirmar que:

$$R \propto \text{Velocidad de escape del planeta} \cdot (\text{distancia al Sol})^{1/2}$$

(\propto Significa "directamente proporcional")

Recursos:

- Energiómetro, o matriz de relación entre los factores causantes e indicadores y las fuentes de energía de los cuerpos planetarios del Sistema Solar (Fig. 5).

3ª fase: Aplicación del "energiómetro" en planetas y satélites sólidos del Sistema Solar.

Una vez elaborado el "energiómetro", y comprendidas las interacciones entre los diferentes parámetros que conducen a deducir las fuentes de energía que generan la dinámica geológica en cada cuerpo planetario sólido, el equipo de personas que imparten el taller, proponen a los profesores-as participantes que lleven a cabo el diagnóstico energético de tres cuerpos planetarios: dos planetas, Mercurio y Marte; y un satélite de Júpiter, Europa.

El ejercicio consta de tres partes:

- 1 Análisis y descripción de las formas o modelos de los relieves de cada cuerpo.
2. Descripción de los procesos generadores.
3. Dedución de las fuentes de energía implicadas en la dinámica geológica.

Para el desarrollo de los dos primeros ejercicios el profesorado dispondrá de una colección de imágenes que pongan de manifiesto las morfologías más relevantes de los cuerpos planetarios sometidos



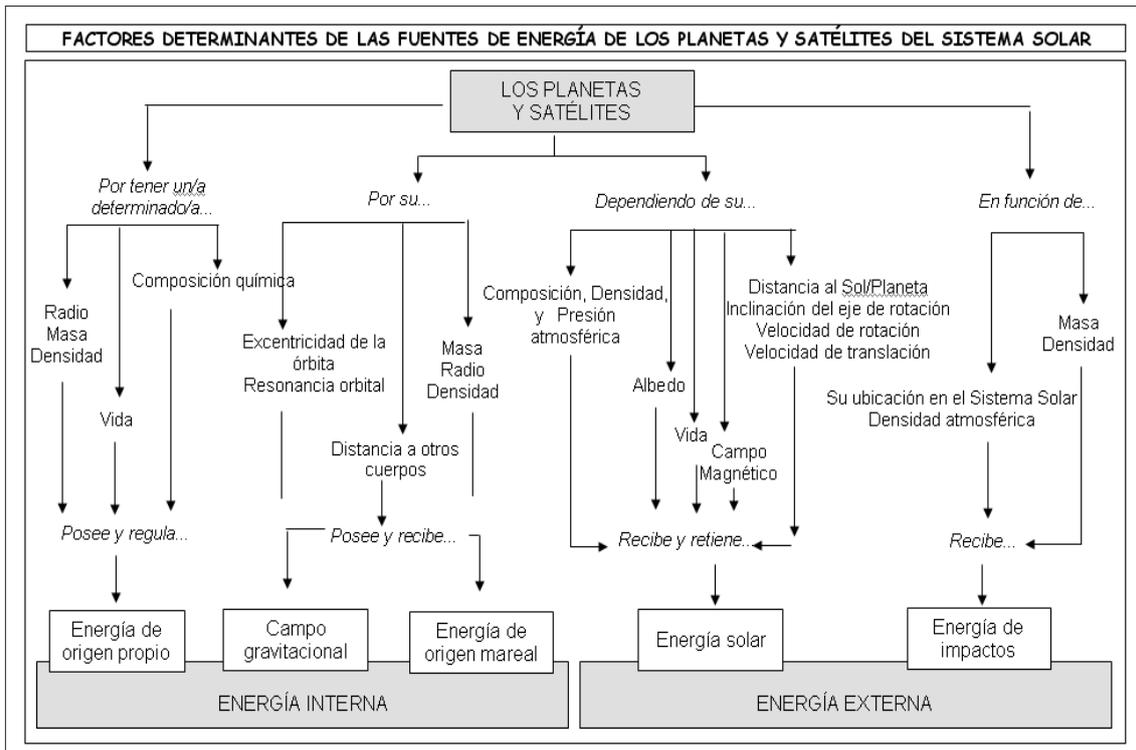


Fig. 4. Mapa conceptual de los factores determinantes de las diferentes fuentes de energía implicadas en la dinámica planetaria.

a análisis (Fig. 6). Para el desarrollo del tercer ejercicio el profesorado dispondrá para cada cuerpo del “energímetro” correspondiente (Fig. 5).

El contraste de las valoraciones de los diferentes participantes dará como resultado un diagnóstico aproximado de la dinámica geológica de cada cuerpo estudiado.

ESTUDIO DE UN CASO: Análisis morfológico y diagnóstico energético de Mercurio.

1. Análisis de las formas del relieve y descripción de los procesos generadores.

Las imágenes tomadas de la superficie de Mercurio (Fig. 6) nos muestran un planeta densamente craterizado. La mayor estructura de impacto del planeta es la Cuenca Caloris (Fig. 6-a), de 1500 km de diámetro. En la imagen fotomosaico se aprecia el borde multianillo de la estructura (parte superior de la imagen), y las llanuras de lava poco craterizadas que la circundan (parte inferior de la imagen). En las antípodas de Caloris (Fig. 6-b) el terreno muestra una textura muy rugosa y escarpada debido a una intensa fracturación. Se cree que el impacto fue tan grande que las ondas de choque recorrieron todo el planeta y confluyeron en la parte opuesta (esta imagen cubre un área de 450 km de ancho). En la Fig. 6-c se observa una colada volcánica de 10 km de frente en el fondo de un cráter de impacto. La colada tendría su foco de emisión en algún lugar de la parte superior de la imagen. En la Fig. 6-d podemos ver un ejemplo de crestas (un tipo espe-

cial de pliegues formados por contracción del terreno) en una llanura volcánica de 460 x 350 km de extensión. Por último, en la Fig. 6-e tenemos el escarpe de Santa María Rupes, de 200 km de longitud. Esta fractura del terreno presenta una forma lobulada que parece corresponder a una falla inversa. Se cree que tanto las crestas como los escarpes se originaron a causa de una contracción global del planeta por enfriamiento.

2. Dedución de las fuentes de energía implicadas en esta geología.

El análisis de los datos conocidos de Mercurio (Tabla 1) nos permite saber que éste es un cuerpo pequeño que no está sometido a bruscas resonancias, por lo que debió perder su energía interna hace varios miles de millones de años. Prácticamente carece de atmósfera, por lo que los únicos procesos efectivos de erosión pueden ser: la gravedad (deslizamientos, derrumbes, colapsos, etc), bruscas variaciones de temperatura (su bajo ángulo de inclinación garantiza la existencia de zonas polares en perpetua penumbra), y el continuo bombardeo de micrometeoritos. Todos estos procesos son muy poco efectivos, como evidencia la intensa craterización que demuestra tener el planeta. A excepción de algún rasgo volcánico aislado (coladas principalmente), no muestra evidencias de grandes edificios volcánicos. Las llanuras de lava observadas están asociadas a la Cuenca Caloris, un fenómeno catastrófico que parece haber condicionado el paisaje y la historia geológica de este cuerpo. Los principales rasgos de deformación tectónica, a excepción de las fracturas distensivas observadas en



| FACTORES CAUSANTES E INDICADORES DE LAS DIFERENTES FUENTES DE ENERGÍA EN EL SISTEMA SOLAR | Energía interna propia | Energía Gravitacional Energía Mareal | Energía Solar | Energía de impactos |
|--|------------------------|---|----------------|---------------------|
| 1 - Radio (Km) | X _o | X _o | X _o | X _o |
| 2 - Masa (Kg) | X _o | X _o | X _o | X _o |
| 3 - Densidad (Kg/m ³) | X _o | X _o | | X _o |
| 4 - Composición química y estado físico | X _o | X _o | X _o | |
| 5 - Distancia al Planeta/Sol (Km) | X _o | X _o | X _o | X _o |
| 6 - Órbitas resonantes | | X _o | | |
| 7 - Excentricidad de la órbita (grados °) | | X _o | X _o | |
| 8 - Periodo orbital-translación (días). Directa/Retrógada | | X _o | X _o | |
| 9 - Periodo de rotación (días) | | X _o | X _o | |
| 10 - Inclinação del eje de rotación (grados °) | | | X _o | |
| 11 - Campo magnético (Gauss) | X _c | X _c | X _o | |
| 12 - Composición atmosférica (gases invernadero) | X _c | X _c | X _o | X _o |
| 13 - Densidad atmosférica | X _c | X _c | X _o | X _o |
| 14 - Presión atmosférica en superficie (mbar) | X _c | X _c | X _o | |
| 15 - Temperatura en superficie (K) | X _c | X _c | X _c | |
| 16 - Albedo | X _c | X _c | X _o | |
| 17 - Retentividad | X _c | X _c | X _c | |
| 18 - % Superficie craterizada | X _c | X _c | X _c | X _c |
| 19 - % Superficie volcánica | X _c | X _c | | X _c |
| 20 - Biomarcadores: Clorofila, Metano, CO ₂ , O ₂ , O ₃ | X _o | | X _o | |

Fig. 5. Energiómetro. Matriz de relación entre factores determinantes e indicadores, y las fuentes de energía de los cuerpos planetarios.

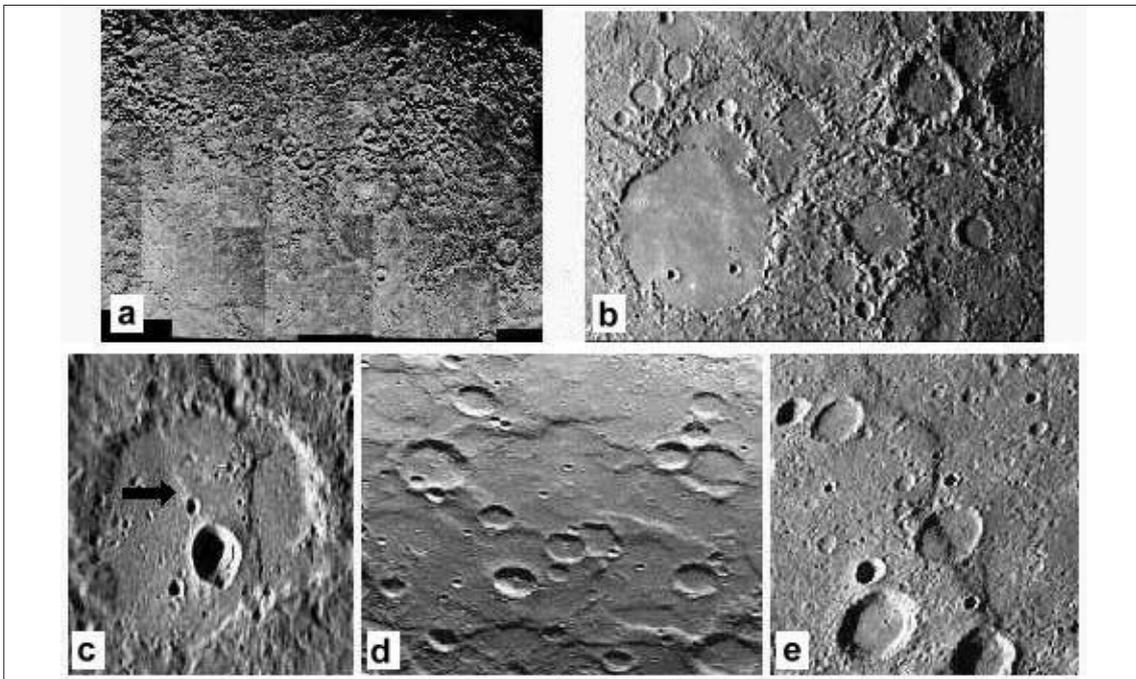


Fig. 6. Algunas de las imágenes de la superficie de Mercurio en las que se observan algunos de los rasgos más destacados del planeta (ver texto).

DATOS DE LOS FACTORES DETERMINANTES E INDICADORES DE LAS DIFERENTES FUENTES DE ENERGÍA

| PROPIEDAD | MERCURIO | TIERRA |
|--|--|---|
| 1 - Radio (Km) | 2440 | 6378 |
| 2 - Masa (Kg) | 3302x10 ²³ | 5974x10 ²⁴ |
| 3 - Densidad (Kg/m ³) | 5,43 | 5,52 |
| 4 - Composición química y estado físico | M: Silicatos N: Metálico de gran tamaño (¿líquido?) | C: Basalto, granito, agua M: Peridotita N: Ni, Fe, Sulfuros. (int: sólido; ext: líquido) |
| 5 - Distancia al Planeta/Sol (Km) | 57,91x10 ⁶ | Sol: 149,60x10 ⁶ Luna: 384,40x10 ³ |
| 6 - Órbitas resonantes | 3/2 con el Sol | — |
| 7 - Excentricidad de la órbita (grados °) | 0,206 | 0,017 |
| 8 - Periodo orbital-translación (días). Directa/Retrógrada | 87,97 | 365,26 D |
| 9 - Periodo de rotación (días) | 58,65 | 1 |
| 10 - Inclinación del eje de rotación (grados °) | 0,1 | 23,4 |
| 11 - Campo magnético (Gauss) | 0,003 | 0,31 |
| 12 - Composición atmosférica (gases invernadero) | O ₂ , He, Na, K | N ₂ , O ₂ (CO ₂ , H ₂ O) |
| 13 - Densidad atmosférica | Muy tenue | Densa |
| 14 - Presión atmosférica en superficie (mbar) | < 0,3 | 1000 |
| 15 - Temperatura en superficie (K) | 100-725 | 288 |
| 16 - Albedo | 0,12 | 0,39 |
| 17 - Retentividad | 9 | 30 |
| 18 - % Superficie craterizada | Relativo: 75% | 10% |
| 19 - % Superficie volcánica | Relativo: 25% | 62% |
| 20 - Biomarcadores: Clorofila, Metano, CO ₂ , O ₂ , O ₃ | — | Clorofila, Metano, CO ₂ , O ₂ , O ₃ |

Tabla 1. Datos de interés de Mercurio y la Tierra para su comparación (Energímetro).

las antípodas de Caloris, son de naturaleza compresiva y parecen asociados a un enfriamiento generalizado del planeta. Todas estas evidencias nos indican que Mercurio es en la actualidad un cuerpo con escasa energía interna y una actividad geológica muy limitada. Sin embargo, el hecho de que un cuerpo con estas características muestre evidencias de contar con una tenue atmósfera, un débil campo magnético y un casquete polar, lo convierten en un interesante objeto de estudio. Investigar sobre el origen de estas interesantes anomalías, la posible influencia del Sol en todas ellas, así como fotografiar con detalle todo el planeta, son los objetivos de varias misiones que tanto la Agencia Espacial Europea (ESA) como la NASA tienen previsto lanzar a finales de esta década.

BIBLIOGRAFÍA

- Anguita, F. (1993). *Geología Planetaria*. Mare Nostrum. Madrid, España.
- Greeley, R., Bastón, R. (2001). *The compact NASA Atlas of the Solar System*. Cambridge University Press. Cambridge, U.K.
- Hartmann, W.K. (1993). *Moons and Planets*. Wardsworth Publishing Company. Belmont, USA.
- Kelly, J., Collins, C., Chaiking, A. (1999). *The New Solar System*. Cambridge University Press. Cambridge, U.K.
- De Pater, I., J-Lissauer, J. (2001). *Planetary Sciences*. Cambridge University Press. Cambridge, U.K. ■

