

# Influencia de la temperatura interna de la Tierra y de la Luna en la evolución dinámica del sistema Tierra-Luna

S.H. Luna<sup>1,2</sup>, M.G. Spagnuolo<sup>1</sup> & H.D. Navone<sup>3,4</sup>

<sup>1</sup> Instituto de Estudios Andinos “Don Pablo Groeber”, CONICET-UBA, Argentina

<sup>2</sup> Departamento de Tecnología e Ingeniería, UNaHur, Argentina

<sup>3</sup> Instituto de Física de Rosario, CONICET-UNR, Argentina

<sup>4</sup> Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura, UNR, Argentina

Contacto / sluna@gl.fcen.uba.ar

**Resumen** / En un trabajo anterior, se demostró que la evolución dinámica del sistema Tierra-Luna habría tenido un impacto significativo en la evolución térmica del manto terrestre. En este trabajo se profundiza en dicha interacción para evaluar y caracterizar el efecto recíproco, esto es, de qué forma la evolución térmica del interior terrestre puede afectar la evolución dinámica del sistema Tierra-Luna. Para ello, utilizamos las ecuaciones que dan las derivadas temporales de los parámetros orbitales y rotacionales de dicho sistema. El modelo utilizado considera la evolución de estas cantidades debido a la interacción de mareas sólidas. El parámetro físico que vincula la evolución térmica con la evolución dinámica es la viscosidad del manto, dado que tiene una fuerte dependencia con la temperatura y, al mismo tiempo, interviene en los factores que describen el cambio de forma de un cuerpo celeste debido a las fuerzas gravitatorias que tienden a deformarlo. De esta manera, tanto la evolución térmica como la evolución dinámica pueden restringirse mutuamente a los caminos evolutivos más probables, esto es, a aquellos que sean compatibles con las evidencias geológicas actualmente disponibles. La importancia de este tipo de estudios radica en que poder entender la influencia recíproca entre la geodinámica terrestre y lunar, y la dinámica orbital y rotacional del sistema, permite conjeturar racionalmente acerca de la evolución térmica de la Tierra e incluso puede aportar conocimientos sobre formación de la Luna.

**Abstract** / In a previous work, it was shown that the dynamical evolution of the Earth-Moon system would have had a significant impact on the thermal evolution of the Earth’s mantle. In this work, we further investigate this interaction to evaluate and characterize the reciprocal effect, i.e., how the thermal evolution of the Earth’s interior can affect the dynamical evolution of the Earth-Moon system. For this purpose, we use the equations that give the time derivatives of the orbital and rotational parameters of the Earth-Moon system. The model used considers the evolution of these quantities due to tidal interaction. The physical parameter that links the thermal evolution with the dynamical evolution is the viscosity of the mantle, since it has a strong dependence on temperature and, at the same time, it intervenes in the factors that describe the change of shape of a celestial body due to the gravitational forces that tend to deform it. In this way, both thermal evolution and dynamical evolution can be mutually restricted to the most probable evolutionary paths, i.e., those that are compatible with the geological evidence currently available. The importance of this type of study lies in the fact that understanding the reciprocal influence between terrestrial and lunar geodynamics, and the orbital and rotational dynamics of the system, allows rational conjecture about the thermal evolution of the Earth and may even provide insights into the formation of the Moon.

**Keywords** / planets and satellites: dynamical evolution and stability — planets and satellites: physical evolution — planets and satellites: tectonics — planets and satellites: individual (Earth, Moon)

## 1. Introducción

En un estudio anterior (Luna et al., 2021), se demostró que la evolución dinámica del sistema Tierra-Luna habría tenido un impacto significativo en la evolución térmica del manto terrestre. En este trabajo se profundiza en dicha interacción para evaluar y caracterizar el efecto recíproco, esto es, de qué forma la evolución térmica del interior terrestre y del interior lunar podrían afectar la evolución dinámica del sistema Tierra-Luna.

Para ello, se simula un sistema similar al que forman la Tierra y la Luna conformado por dos cuerpos que tienen el mismo radio y masa que aquellos pero que se consideran homogéneos. En otras palabras, el modelo considerado asume constantes las propiedades físicas

internas de la Tierra y la Luna como la densidad y la rigidez.

## 2. Metodología

A fin de abordar nuestro objetivo, partimos de las ecuaciones que dan las derivadas temporales de los parámetros orbitales y rotacionales de un sistema binario debido a la interacción de mareas sólidas derivadas por Boué & Efroimsky (2019), bajo la aproximación giroscópica. El modelo utilizado considera la evolución secular de estos parámetros (Luna et al., 2020).

Las ecuaciones de movimiento contienen los llamados factores de calidad  $K_R^{(k)}(l, \omega_{lmpq}^{(k)})$  y  $K_I^{(k)}(l, \omega_{lmpq}^{(k)})$

los cuales modelan el cambio del campo gravitatorio de un cuerpo celeste al ser deformado por las fuerzas de atracción gravitatoria ejercidas por el otro integrante del sistema binario. Estos factores están dados por:

$$K_R^{(k)}(l, \omega_{lmpq}^{(k)}) = \frac{3}{2} \frac{1}{l-1} \times \frac{(\Re[\mathcal{J}(\chi)] + B_l^{(k)} \eta \chi) \Re[\mathcal{J}(\chi)] + (\Im[\mathcal{J}(\chi)])^2}{(\Re[\mathcal{J}(\chi)] + B_l^{(k)} \eta \chi)^2 + (\Im[\mathcal{J}(\chi)])^2}, \quad (1a)$$

$$K_I^{(k)}(l, \omega_{lmpq}^{(k)}) = -\frac{3}{2} \frac{1}{l-1} \times \frac{B_l^{(k)} \eta \chi \Im[\mathcal{J}(\chi)] \operatorname{sgn}(\omega_{lmpq}^{(k)})}{(\Re[\mathcal{J}(\chi)] + B_l^{(k)} \eta \chi)^2 + (\Im[\mathcal{J}(\chi)])^2}, \quad (1b)$$

donde  $k = 1, 2$  es un índice que identifica a cada cuerpo,  $l, m, p$  y  $q$  son enteros,  $\omega_{lmpq}^{(k)}$  son los modos de mareas y  $\chi = \left| \omega_{lmpq}^{(k)} \right|$  son las correspondientes frecuencias físicas a las que se excitan las tensiones y las deformaciones (Efroimsky, 2012). Los  $\omega_{lmpq}^{(k)}$  están dados por:

$$\omega_{lmpq}^{(k)} = (l - 2p + q)n - m\dot{\theta}_k, \quad (2)$$

donde  $n$  es la frecuencia orbital media y  $\dot{\theta}_k$  es la velocidad de rotación del cuerpo  $k$ . Por otro lado,  $B_l^{(k)}$  es un factor que mide la intensidad de la autogravitación y está dado por:

$$B_l^{(k)} = \frac{R_k(2l^2 + 4l + 3)}{lGm_k\rho_k}, \quad (3)$$

donde  $R_k$  es el radio,  $G$  es la constante de Gravitación universal,  $m_k$  es la masa y  $\rho_k$  es la densidad. Además,  $\Re[\mathcal{J}(\chi)]$  e  $\Im[\mathcal{J}(\chi)]$  son las partes real e imaginaria, respectivamente de la flexibilidad compleja adimensional  $\mathcal{J}(\chi)$  (Efroimsky, 2015). La expresión de  $\mathcal{J}(\chi)$  depende del modelo reológico elegido para modelar la respuesta del cuerpo celeste ante las fuerzas que lo deforman. Dada la similitud entre las composiciones químicas entre la Tierra y la Luna (Lugmair & Shukolyukov, 1998; Wiechert et al., 2001; Touboul et al., 2007; Meier, 2012; Zhang et al., 2012; Young et al., 2016), la reología de ambos cuerpos puede describirse con el modelo de Maxwell-Andrade (Efroimsky, 2015):

$$\mathcal{J}(\chi) = J\eta\chi - i + \frac{J\eta\chi}{(\zeta_A J\eta\chi)^\alpha} \exp\left(-i\frac{\pi}{2}\alpha\right) \Gamma(1 + \alpha), \quad (4)$$

donde  $J = \mu^{-1}$  es la flexibilidad instantánea correspondiente a la respuesta elástica, siendo  $\mu$  la respectiva rigidez instantánea,  $i = \sqrt{-1}$ ,  $\eta$  la viscosidad,  $\alpha$  el parámetro de Andrade y  $\Gamma$  la función gamma.

La dependencia de la viscosidad con la temperatura está dada por (Stamenković et al., 2012):

$$\eta(T) = \eta_{\text{ref}} \exp\left[\frac{E^*}{R_{\text{gas}}}\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{\text{ref}}}\right)\right]. \quad (5)$$

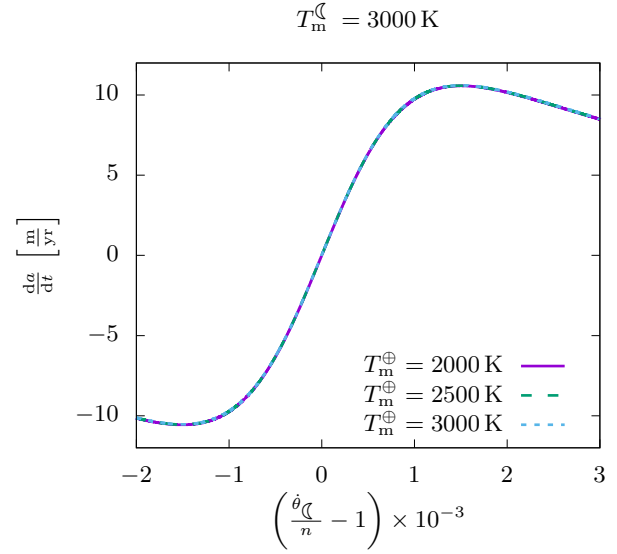


Figura 1: Derivada temporal del semieje mayor en función de la velocidad de rotación normalizada de la Luna, para varios pares de valores de la temperatura media del manto ( $T_m^k$ ,  $k = \oplus$ : Tierra,  $k = \textcircled{C}$ : Luna) para  $T_m^{\textcircled{C}} = 3000$  K.

donde  $\eta_{\text{ref}}$  es un valor de referencia de la viscosidad a la temperatura  $T_{\text{ref}}$ ,  $E^*$  es la energía de activación y  $R_{\text{gas}}$  es la constante de los gases. En virtud de que  $\eta$  interviene en los factores que describen el comportamiento reológico, se puede afirmar que es el parámetro físico que relaciona la evolución térmica con la evolución dinámica de un cuerpo celeste.

En este trabajo de carácter exploratorio nos propusimos evaluar las derivadas temporales de los elementos orbitales de la Luna en función de su velocidad de rotación normalizada, para distintos pares de valores de la temperatura media del interior de la Tierra y del interior de la Luna. Dichas temperaturas se mantienen constantes, así como también los demás parámetros dinámicos en cada evaluación.

### 3. Resultados y discusión

En las Figuras 1, 2 y 3 se muestran las gráficas de la derivada temporal del semieje mayor de la órbita lunar ( $\frac{da}{dt}$ ) en función de la velocidad de rotación normalizada de la Luna ( $\frac{\theta_c}{n}$ ). El valor cero en las abscisas corresponde a la corrotación exacta ( $\theta_c = n$ ). Puede observarse que los mayores cambios en la forma de  $\frac{da}{dt}$  ocurren cuando se modifica la temperatura media del interior lunar ( $T_m^{\textcircled{C}}$ ). En este sentido, se observa que la variación de la temperatura media de la Tierra ( $T_m^{\oplus}$ ) no produce cambios significativos, sino que sigue la curva establecida por la temperatura media de la Luna.

Una manera de interpretar estos resultados es la siguiente. A bajas inclinaciones, la derivada temporal del semieje mayor de la órbita de la Luna se puede expresar

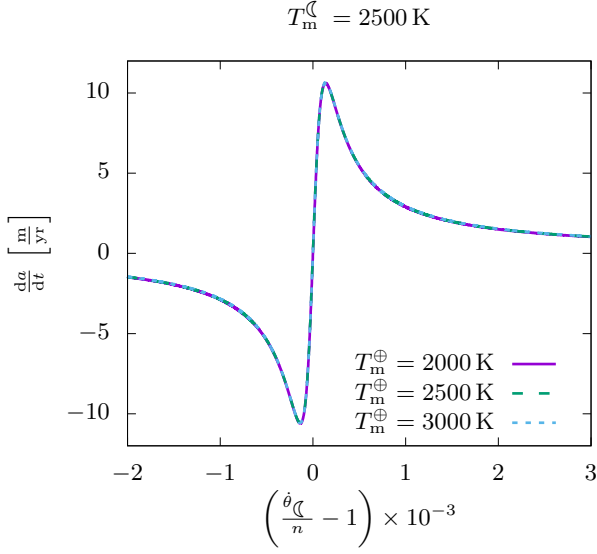


Figura 2: Derivada temporal del semieje mayor en función de la velocidad de rotación normalizada de la Luna, para varios pares de valores de la temperatura media del manto ( $T_m^k$ ,  $k = \oplus$ : Tierra,  $k = \zeta$ : Luna) para  $T_m^\zeta = 2500$  K.

como (Boué & Efroimsky, 2019):

$$\begin{aligned} \frac{da}{dt} = & -3na \left( \frac{R_\zeta}{a} \right)^5 \frac{m_\oplus}{m_\zeta} \\ & \times \left[ \left( \frac{R_\oplus}{R_\zeta} \right)^5 \left( \frac{m_\zeta}{m_\oplus} \right)^2 K_I^\oplus \left( 2, 2 \left( n - \dot{\theta}_\oplus \right) \right) \right. \\ & \left. + K_I^\zeta \left( 2, 2 \left( n - \dot{\theta}_\zeta \right) \right) \right] \quad (6) \end{aligned}$$

Para el caso del sistema Tierra-Luna, se tiene:

$$\left( \frac{R_\oplus}{R_\zeta} \right)^5 \left( \frac{m_\zeta}{m_\oplus} \right)^2 \approx \frac{1}{10}.$$

En consecuencia:

$$\begin{aligned} \frac{da}{dt} = & -3na \left( \frac{R_\zeta}{a} \right)^5 \frac{m_\oplus}{m_\zeta} \left[ \frac{1}{10} K_I^\oplus \left( 2, 2 \left( n - \dot{\theta}_\oplus \right) \right) \right. \\ & \left. + K_I^\zeta \left( 2, 2 \left( n - \dot{\theta}_\zeta \right) \right) \right] \quad (7) \end{aligned}$$

donde puede observarse por qué la evolución térmica de la Luna domina la evolución temporal del semieje mayor de la órbita.

#### 4. Conclusiones y perspectivas

En virtud de los resultados obtenidos, podemos concluir que el modelo adoptado indica que la dinámica del sistema Tierra-Luna está dominada por la evolución térmica del interior lunar más que por la del interior terrestre. El proceso de enfriamiento de ambos cuerpos desde

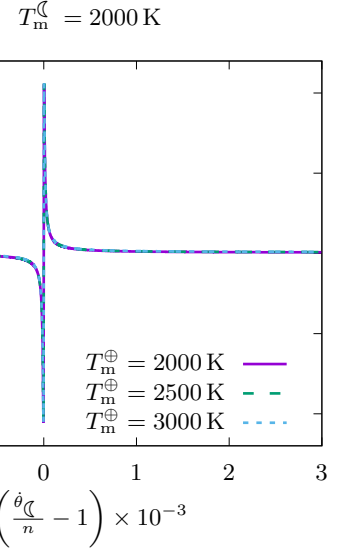


Figura 3: Derivada temporal del semieje mayor en función de la velocidad de rotación normalizada de la Luna, para varios pares de valores de la temperatura media del manto ( $T_m^k$ ,  $k = \oplus$ : Tierra,  $k = \zeta$ : Luna) para  $T_m^\zeta = 2000$  K.

mayores temperaturas se vería reflejado en la evolución dinámica como una transición de una curva a la otra. Es decir, desde las curvas de la Figura 1 hacia las de las Figuras 2 y 3.

Este resultado abre nuevas perspectivas para el estudio de la evolución dinámica y térmica del sistema Tierra-Luna. Si bien se trata de un trabajo exploratorio, queda demostrado que la combinación de modelos dinámicos y térmicos de mayor complejidad puede brindar caminos evolutivos posibles para dicho sistema, teniendo en cuenta las restricciones impuestas por las evidencias geológicas disponibles y la compleja relación entre la evolución térmica y dinámica de sistemas binarios.

#### Referencias

- Boué G., Efroimsky M., 2019, *Celest. Mech. Dyn. Astron.*, 131, 30  
 Efroimsky M., 2012, *Celest. Mech. Dyn. Astron.*, 112, 283  
 Efroimsky M., 2015, *AJ*, 150, 98  
 Lugmair G., Shukolyukov A., 1998, *GeoCoA*, 62, 2863  
 Luna S.H., Navone H.D., Melita M.D., 2020, *A&A*, 641, A109  
 Luna S.H., Spagnuolo M.G., Navone H.D., 2021, *BAAA*, 62, 53  
 Meier M.M.M., 2012, *Nature Geoscience*, 5, 240  
 Stamenković V., et al., 2012, *ApJ*, 748, 41  
 Touboul M., et al., 2007, *Nature*, 450, 1206  
 Wiechert U., et al., 2001, *Science*, 294, 345  
 Young E.D., et al., 2016, *Science*, 351, 493  
 Zhang J., et al., 2012, *Nature Geoscience*, 5, 251