



Estudio de diferentes escenarios en el modelado de la influencia de la interacción de mareas en la evolución térmica del interior terrestre

S.H. Luna^{1,2}, M.G. Spagnuolo¹ & H.D. Navone^{3,4}

¹ Instituto de Estudios Andinos “Don Pablo Groeber”, CONICET-UBA, Argentina

² Instituto de Tecnología e Ingeniería. Universidad Nacional de Hurlingham.

³ Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura. Universidad Nacional de Rosario.

⁴ Instituto de Física de Rosario, CONICET-UNR, Argentina

Contacto / sluna@gl.fcen.uba.ar

Resumen / En el presente trabajo se estudia la influencia de las mareas sólidas en el manto terrestre a lo largo de la historia dinámica del sistema Tierra-Luna. Para comprender su influencia, se analizaron y se compararon distintos modelos de evolución térmica del manto, asumiendo que su viscosidad depende fuertemente de la temperatura. Teniendo en cuenta la mayor cercanía de la Luna en el pasado se establece como hipótesis que el calor de mareas aportado podría haber tenido un rol significativo en algunos procesos geológicos como facilitar la fusión y/o la tectónica de placas. Para comprobar esta hipótesis se partió de un modelo reológico del manto terrestre y un modelo del interior de la Tierra, que incluye el perfil de temperatura, y asumiendo que la Luna es una masa puntual. En primer lugar, se realizaron simulaciones teniendo en cuenta la influencia de las distintas fuentes y sumideros de calor interno, como el decaimiento radiactivo y la fusión en el manto, sin el aporte de mareas. Posteriormente se incorporó el calor por mareas aportado a lo largo de la historia terrestre teniendo en cuenta la evolución del sistema Tierra-Luna. Se obtuvo como resultado que la interacción de mareas puede elevar apreciablemente la temperatura media del manto en comparación con las otras fuentes de calor consideradas, siendo de fundamental importancia el rol de la fusión del manto para mantener controlada la temperatura. Se discuten las posibles consecuencias de la fusión en la parte superior del manto.

Abstract / The present work studies the influence of solid tides on the Earth’s mantle throughout the dynamical history of the Earth-Moon system. In order to understand its influence, different models of thermal evolution of the mantle were analyzed and compared, assuming that its viscosity strongly depends on temperature. Taking into account the closer proximity of the Moon in the past, it is hypothesized that the tidal heat provided could have played a significant role in some geological processes such as facilitating melting and/or plate tectonics. To test this hypothesis, a rheological model of the Earth’s mantle and a model of the Earth’s interior, including the temperature profile, and assuming that the Moon is a point mass, were used. First, simulations were performed taking into account the influence of the various sources and sinks of internal heat, such as radiative decay and melting in the mantle, without the contribution of tides. Subsequently, the tidal heat contributed throughout the Earth’s history was incorporated, taking into account the evolution of the Earth-Moon system. It was found that the tidal interaction can appreciably raise the mean mantle temperature compared to the other heat sources considered, being of fundamental importance the role of mantle melting to keep the temperature under control. The possible consequences of upper mantle melting are discussed.

Keywords / celestial mechanics — planets and satellites: individual (Earth, Moon) — planets and satellites: interiors — planets and satellites: physical evolution — planets and satellites: terrestrial planets

1. Introducción

El comportamiento dinámico del sistema Tierra-Luna a lo largo del tiempo, así como la evolución térmica de ambos cuerpos, es actualmente objeto de debate y de investigación en diversos trabajos científicos. Esto se debe a que las problemáticas que se intentan resolver son muy complejas y de naturaleza interdisciplinaria, ya que necesariamente involucran a diversos campos del conocimiento (geofísica, geoquímica y astronomía, entre otros).

Además, a pesar de que se ha avanzado mucho en cuanto al modelado de la evolución térmica y dinámica acopladas, la evidencia geológica es escasa en el pasa-

do remoto de la tierra y, en algunos casos, controversial (Williams, 2000; López de Azarevich & Azarevich, 2017).

Teniendo en cuenta todo esto, el principal objetivo de este trabajo es abordar la construcción de las herramientas necesarias para modelar en conjunto la evolución térmica y dinámica del sistema Tierra-Luna desde un punto de vista interdisciplinario, integrando la física de los procesos involucrados en el contexto de los datos geológicos disponibles. De esta forma, se avanza en la construcción de un modelo co-evolutivo del sistema, acoplando las propiedades internas de cada uno de los cuerpos (Tierra y Luna) a la dinámica del sistema.

En un trabajo anterior (Luna et al., 2021), se propuso un modelo muy simple que, si bien permitía seguir la evolución temporal de las temperaturas medias del núcleo y del manto terrestre considerando las fuentes de calor por decaimiento radiactivo y por interacción de mareas, pero sin tener en cuenta el rol de la fusión en el manto terrestre, daba como resultado temperaturas medias muy por encima de las temperaturas de fusión, especialmente en el manto. No obstante, el modelo construido permitió evaluar el impacto de la interacción de mareas en la evolución térmica del manto terrestre e identificar las magnitudes relativas de los aportes de calor de los diferentes procesos involucrados.

En este trabajo, presentamos un modelo más abarcador que, además de las fuentes y procesos antes mencionados, incorpora la fusión en el manto terrestre. La principal ventaja de tal incorporación radica en que la energía requerida para el cambio de fase proporciona un mecanismo muy efectivo para controlar los aumentos excesivos de temperatura producidos por el decaimiento radiactivo y la interacción de mareas. De esta manera, nos acercamos a un modelo más realista del sistema que nos permite evaluar su comportamiento ante diferentes parámetros de entrada y valores iniciales.

2. Metodología

El modelo desarrollado está basado en los trabajos de Schubert et al. (2001) y de Driscoll & Bercovici (2014). Al igual que la mayoría de los modelos térmicos disponibles en la literatura, estas investigaciones parten del balance térmico del núcleo y del manto. Se asume que la convección es el mecanismo principal de transmisión de calor en el manto terrestre y se obtienen las expresiones de los flujos térmicos en virtud de la teoría de la capa límite. En este sentido, el perfil de temperatura del manto está caracterizado por dos capas límites en donde el calor se transmite por conducción, una en contacto con la interfase manto-núcleo (CMB), denominada capa límite inferior (*Lower Boundary Layer*, LBL) y otra lindante con la superficie, llamada capa límite superior (*Upper Boundary Layer*, UBL). El perfil de temperatura dentro del manto, y entre ambas capas, se considera adiabático puesto que se asume un manto bien mezclado (Figura 1a).

En virtud de que se incluye la posibilidad de fusión parcial dentro del núcleo y del manto, se consideran los perfiles de temperatura del *solidus* en el núcleo, $T_{\text{sol}}^{\text{núcleo}}$, (Driscoll & Bercovici, 2014) y aquellos del *solidus* y *liquidus* del manto (Monteux et al., 2016), $T_{\text{sol}}^{\text{manto}}$ y $T_{\text{liq}}^{\text{manto}}$, respectivamente (Figura 1b). La expresión de la tasa de calor generado por decaimiento radiactivo se obtuvo del trabajo de Turcotte & Schubert (2014). El calor aportado por interacción de mareas se incorporó al modelo de evolución térmica siguiendo el trabajo de Efroimsky & Makarov (2014). Cabe mencionar que la evaluación de la cantidad de calor por mareas requiere del modelado de la dinámica del sistema Tierra-Luna, que nos permite modelar, en particular, la evolución del semieje mayor de la órbita lunar (a) y los cambios en la longitud del día terrestre (LOD). La construcción de

este modelo se realiza a partir de la evidencia geológica disponible (Luna et al., 2021).

La distribución inicial de temperatura (Figura 1b) se obtiene asumiendo que el núcleo se encuentra totalmente fundido y se fija un valor inicial para el salto de temperatura entre la CMB y la parte superior de la capa límite inferior, $\Delta T_L = T_{\text{CMB}} - T_{\text{LBL}}$, donde T_{LBL} es la temperatura en la parte superior de la capa límite inferior. De esta forma se determinan los espesores de las capas límites (δ_U y δ_L) y las temperaturas en la base de la capa límite superior (T_{UBL}) y en la CMB (T_{CMB}). Una vez iniciada, se sigue la evolución temporal de estas dos temperaturas a lo largo de cada simulación, dado que estas cantidades son las que caracterizan completamente el perfil térmico del interior terrestre. La temperatura en la superficie terrestre se mantiene constante e igual a 293 K, a lo largo de cada simulación.

3. Resultados

En la Figura 2 se muestran los resultados obtenidos de la evolución térmica del interior terrestre, considerando diferentes valores iniciales del salto de temperatura en la capa límite inferior ($\Delta T_L(0)$). Puede observarse que el impacto de la interacción de mareas, esto es, el calor generado por la fricción interna en el manto terrestre, resulta significativo a la luz de este nuevo abordaje. Por otro lado, puede notarse también que la efectividad de la convección mantélica hace que los valores finales de T_{UBL} y de T_{CMB} , considerando la interacción de mareas, sean muy cercanos a aquellos en los que se tiene en cuenta solamente el calor producido por decaimiento radiactivo.

4. Conclusiones y perspectivas

En virtud de los resultados obtenidos, podemos concluir lo siguiente:

- el modelo desarrollado brinda una descripción mucho más coherente con las hipótesis más aceptadas acerca de la posible evolución térmica del interior terrestre. Incorporando la fusión se equilibran las temperaturas y se obtienen valores finales similares a los actuales;
- parece ser importante en la historia térmica temprana de la Tierra tener en cuenta la interacción de mareas. En particular, y como era esperable, los resultados muestran que en los primeros millones de años la interacción era mucho más intensa. Se observa que el efecto tiene un pico en los primeros 500 Ma, una cola que se extiende hasta los 2 Ga y luego es mínimo;
- la elección del valor $\Delta T_L(0)$ parece ser de importancia en la evolución del perfil de temperatura.

Finalmente, y tal como se mencionó al comienzo, entender la evolución térmica de la Tierra permite conocer los cambios geológicos a lo largo de su historia. De estos resultados se infiere una relación entre la curva de evolución térmica del manto, cuando son consideradas las mareas, con la transición entre el régimen de *stagnant lid* y el de tectónica de placas. Los modelos termomecánicos comparativos entre la litosfera oceánica del

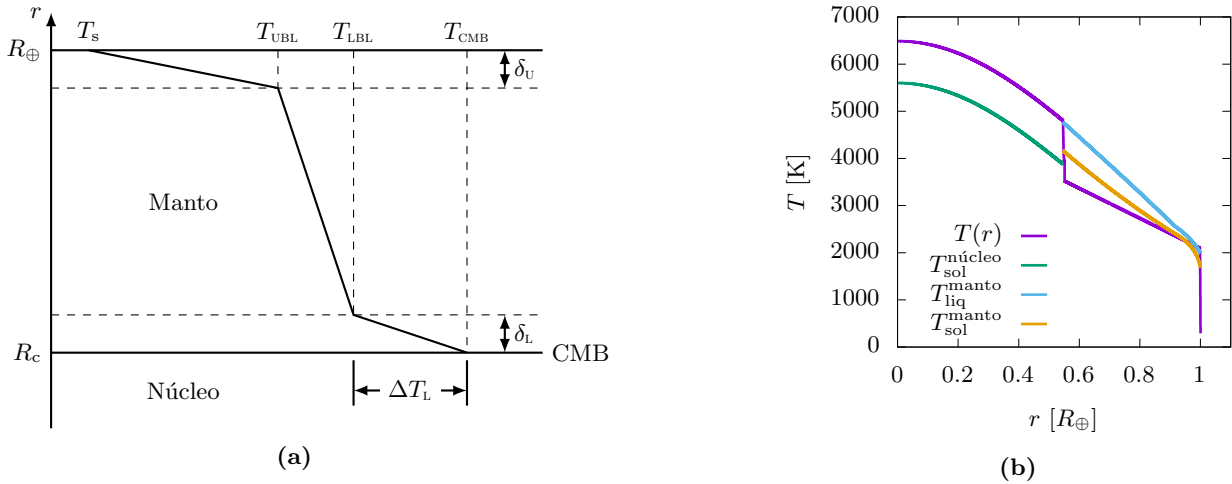


Figura 1: (a) Esquema del perfil de temperatura del manto. (b) Gráfica del perfil inicial de temperaturas del interior terrestre.

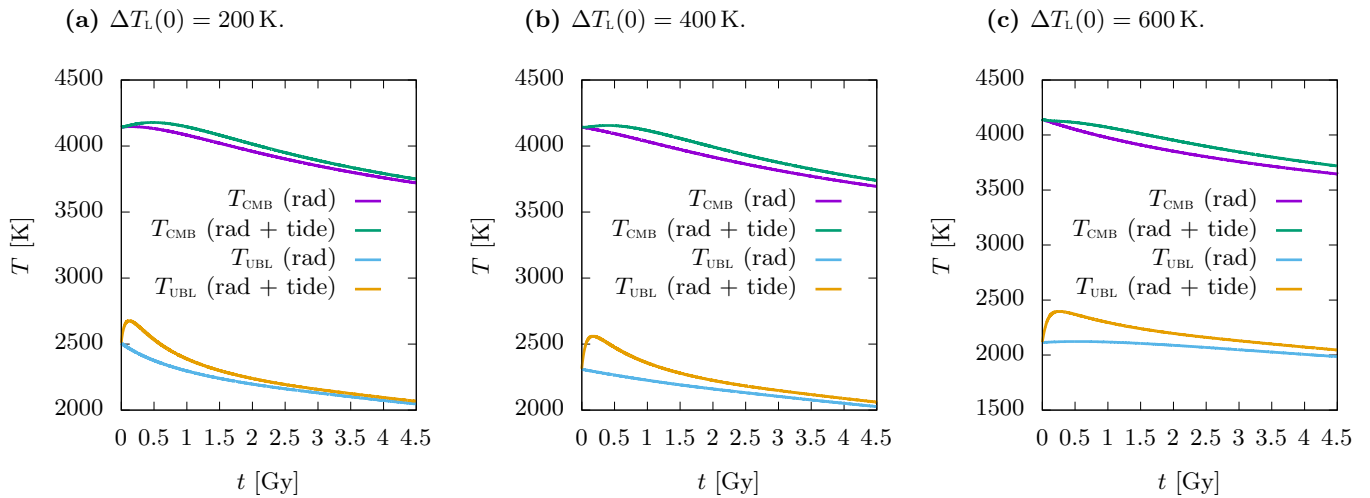


Figura 2: Gráficas de la evolución temporal de la temperatura en la CMB (T_{CMB}) y de la base de la capa límite inferior (T_{UBL}) teniendo en cuenta solamente el calor radiogénico (rad) y este junto al calor por mareas (rad + tide) para distintos valores iniciales del salto de temperatura entre la CMB y la parte superior de la capa límite inferior.

Fanerozoico y el Arcaico sugieren que un manto más caliente reduciría el contraste de flotabilidad entre la litosfera oceánica y la astenósfera subyacente dificultando la subducción (van Hunen & Moyen, 2012). Según varios autores, el inicio de la tectónica de placas se habría dado entre 0.5 y 1.5 Ga después de la formación de la Tierra (Condie, 2018; Palin & Santosh, 2021) coincidente con la caída rápida de la temperatura luego de un pico máximo y en concordancia con el inicio del enfriamiento rápido del manto.

Referencias

Condie K.C., 2018, *Geoscience Frontiers*, 9, 51 . Lid Tectonics
 Driscoll P., Bercovici D., 2014, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 236, 36
 Efroimsky M., Makarov V.V., 2014, *The Astrophysical Journal*, 795, 6

Luna S.H., Spagnuolo M.G., Navone H.D., 2021, *Boletín de la Asociación Argentina de Astronomía La Plata Argentina*, 62, 53
 López de Azarevich V.L., Azarevich M.B., 2017, *Geo-Marine Letters*, 37, 333
 Monteux J., Andraut D., Samuel H., 2016, *Earth and Planetary Science Letters*, 448, 140
 Palin R.M., Santosh M., 2021, *Gondwana Research*, 100, 3. SPECIAL ISSUE: GR-100
 Schubert G., Turcotte D.L., Olson P., 2001, *Mantle Convection in the Earth and Planets*, Cambridge University Press
 Turcotte D., Schubert G., 2014, *Geodynamics*, 3 ed., Cambridge University Press
 van Hunen J., Moyen J.F., 2012, *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 40, 195
 Williams G.E., 2000, *Reviews of Geophysics*, 38, 37