

El fenómeno de las mareas: consideraciones sobre su abordaje en los libros universitarios de física

The phenomenon of the tides: considerations on its approach in university physics textbooks

Lucas Niell^{1*}, Santiago Luna^{2,3}, Andrea Fourty^{1,4} y Hugo Navone^{1,4}

¹Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura, Universidad Nacional de Rosario, Av. Pellegrini 250, CP 2000, Rosario. Argentina

²Instituto de Estudios Andinos "Don Pablo Groeber", UBA – CONICET, Intendente Güiraldes 2160, Ciudad Universitaria, CP C1428EGA, Buenos Aires. Argentina.

³Instituto de Tecnología e Ingeniería, Universidad Nacional de Hurlingham, Tte. Origone 151, CP B1688AXC, Hurlingham, Buenos Aires. Argentina.

⁴Instituto de Física de Rosario (CONICET-UNR), Bv. 27 de Febrero 210 Bis, CP 2000, Rosario. Argentina.

*E-mail: lniell@fceia.unr.edu.ar

Resumen

Se formula un primer análisis exploratorio de las explicaciones encontradas acerca del fenómeno de las mareas, en los libros de texto de física de nivel inicial universitario. Se seleccionaron 8 textos representativos de la enseñanza de la física en este nivel. Se partió de un análisis de contenido sobre el tema y se definieron tres argumentos que sirvieron de ejes para analizar las ideas presentadas en los documentos. Se encontró que, en la mayoría de los textos, el tema se trabaja a partir de ejercicios; en la mayoría, también, se omite la importancia de la caída libre de la Tierra para explicar el doble abultamiento mareal; y, en algunos casos, se confunden los efectos de mareas con los centrífugos producidos por la rotación sobre el propio eje. Se concluye que el abordaje de la temática en los cursos iniciales de física universitaria podría verse dificultado por la falta de profundidad y de claridad de las explicaciones disponibles en los documentos analizados.

Palabras clave: Mareas; Enseñanza de la física; Sistema Tierra-Luna; Interacción gravitatoria; Abultamientos mareales.

Abstract

This work addresses a first exploratory analysis of the explanations found in introductory level physics textbooks about the phenomenon of tides. For this purpose, 8 representative textbooks of physics teaching at this level were selected. Based on a review of the literature on the subject, three arguments considered central to the conceptualization of the phenomenon were defined, which served as guidelines for the analysis of the ideas presented in the considered books. It was found that in most of the books the topic is worked on through exercises; that in most of them the importance of the Earth's free fall is omitted to explain the double tidal bulge; and that in some cases the tidal effects are confused with the centrifugal effects produced by the rotation about its own axis. It is concluded that the approach to the subject of tides in initial university physics courses could be hindered by the lack of depth and clarity of the explanations available in the books analyzed.

Keywords: Tides; Physics Education; Earth-Moon system; Gravitational interaction; Tidal bulges.

I. INTRODUCCIÓN

Aunque son escasos los estudios que dan cuenta del abordaje de la problemática de las mareas en los distintos niveles educativos y de las dificultades asociadas a sus procesos de enseñanza y de aprendizaje, algunos estudios (Viiri, 2000; Corrochano, Gómez-Gonçalves, Sevilla, Pampín-García, 2017; Corrochano, Gómez-Gonçalves, Melo, 2017; Armario, Oliva, Jiménez-Tenorio, 2018; Armario, Jiménez-Tenorio, Oliva, 2019) dan cuenta de la existencia de una diversidad de concepciones alternativas acerca del fenómeno en cuestión, e indican una comprensión limitada del tema; al tiempo que visibilizan la necesidad de la construcción de dispositivos didácticos que favorezcan la apropiación, por parte de los estudiantes, de los modelos científicos y escolares construidos para su comprensión.

Entre las dificultades de conceptualización más claramente identificadas, destaca la de la comprensión del abultamiento mareal en el lado de la Tierra más alejado de la Luna; fenómeno que explica la existencia de dos mareas diarias en muchas costas, pero que parece contradecir a la imagen intuitiva que sugiere la idea de que las mareas se producen por la atracción gravitatoria de la Luna (un único abultamiento en la cara de la Tierra cercana a la Luna). Härtel (2000) afirma que la explicación de este segundo abultamiento mareal constituye la mayor dificultad didáctica a afrontar por parte de los profesores; mientras que Arons (1979) considera que, incluso para los profesores que quieren incursionar en el tema, las explicaciones de los modelos científicos resultan poco claras, lo que complejiza aún más el tratamiento adecuado del tema en las aulas.

Una primera revisión exploratoria de la literatura disponible permite revelar algunos elementos clave para entender el porqué de esta situación. En este trabajo realizaremos un análisis de contenido de cómo se presenta la temática de las mareas en algunos libros utilizados habitualmente como bibliografía en la enseñanza de la física básica universitaria. Intentaremos poner de manifiesto las características esenciales de los diferentes abordajes presentes, sus similitudes y diferencias, y cómo se relacionan con las propuestas y perspectivas de algunos autores de referencia sobre el tema.

II. CONSIDERACIONES TEÓRICAS

En la llamada “teoría de equilibrio” (o “teoría estática”) de las mareas, desarrollada originalmente por Newton en sus Principia (Ng, 2015), se asume una Tierra perfectamente esférica recubierta por una capa de agua de espesor uniforme, y se intenta determinar la forma que adopta dicha capa de agua debido a la interacción gravitatoria con la Luna¹ (además de, por supuesto, con la Tierra). En este modelo simple, que deja de lado muchas de las particularidades que influyen en el fenómeno tal como se presenta en la realidad, pero que resulta satisfactorio para una explicación de las características esenciales de las mareas en nuestro planeta (Kapoulitsas, 1985), la masa de agua resulta deformada de tal manera que se producen dos “abultamientos mareales” (*tidal bulges*) en las zonas de la Tierra más cercana (sub-lunar) y más alejada de la Luna (anti-lunar)². Debido a la rotación diaria de nuestro planeta, un punto dado sobre la superficie terrestre pasaría por estos dos abultamientos cada día, obteniéndose así las dos mareas altas correspondientes.

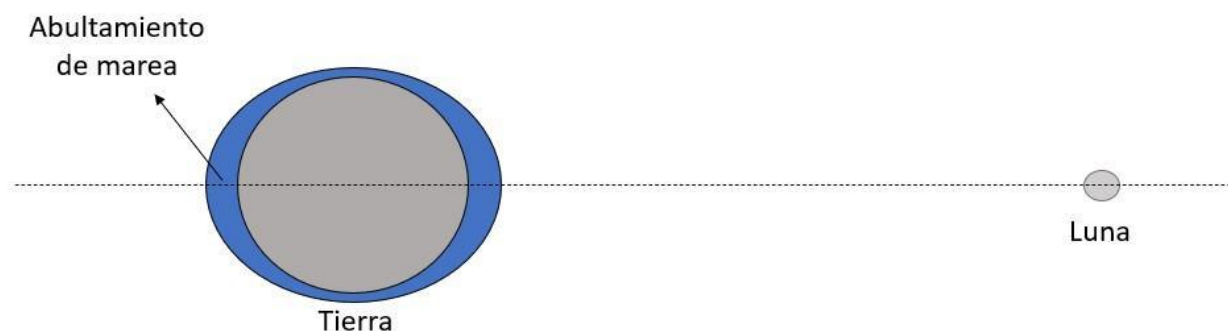


FIGURA 1. Representación de la capa de agua en la teoría de equilibrio de las mareas. Se observan dos abultamientos mareales, en las zonas de la Tierra más cercana y más alejada de la Luna. Los tamaños y distancias no se encuentran a escala.

Ahora bien, ¿cómo se obtiene dicha configuración? Si bien no desarrollaremos los cálculos necesarios para

¹ Las mareas son producidas tanto por la Luna como por el Sol, pero sus efectos pueden ser analizados por separado, y en este trabajo nos referiremos solamente a las causadas por la Luna.

² No se considerará, en este trabajo, el desplazamiento de estos abultamientos con respecto a la línea Tierra – Luna, debido a la fricción ocasionada por el movimiento de rotación de la Tierra debajo de esta capa de agua.

arribar a la misma³, intentaremos, a continuación, hacer un análisis cualitativo y explicitar los factores físicos determinantes del fenómeno, de manera de ponerlos de manifiesto e identificarlos claramente.

Diremos primeramente que la causa última del doble abultamiento mareal observado en la figura 1 se debe a un único fenómeno: la interacción libre entre la Tierra y la Luna. Pero inmediata y seguidamente distinguiremos dos factores de este fenómeno, constituyentes ambos de dicha interacción libre, que concurren para dar lugar a las mareas como las hemos descrito en este modelo, y que son, ambos, indispensables para obtener dicha configuración: (1) el hecho de que el campo gravitatorio lunar no es uniforme (no posee la misma dirección, sentido e intensidad en los distintos puntos del espacio que la rodea, y en particular a través de la Tierra), y (2) el hecho de que la Tierra está en caída libre en dicho campo gravitatorio, o, dicho de otra manera, que la Tierra está acelerada, como un todo, hacia el Centro de Masas (CM) del sistema Tierra-Luna (T-L).

Acerca de este segundo punto, es importante aclarar que las mareas se manifestarían de una manera muy distinta si la Tierra estuviera estática. De hecho, en este caso se produciría un único abultamiento en la cara de la Tierra cercana a la Luna (Arons, 1979; Härtel, 2000; Iparaguirre, 2000; Viiri y Saari, 2004). Al ser esta, justamente, la imagen más intuitiva de cómo el campo gravitatorio Lunar deformaría la capa de agua que envuelve la Tierra, quizá podríamos conjeturar que ambas imágenes, la del único abultamiento y la de la Tierra estática, están asociadas y se corresponden mutuamente. Coincidimos con Woolsey (1994) y con Mach (2013) en que esta característica de la interacción libre entre Tierra y Luna debe ser claramente explicitada en las explicaciones sobre el fenómeno, ya que resulta fundamental para su conceptualización.

Para poder visualizar con claridad cómo estos factores originan el doble abultamiento mareal, conviene primero observar las características de este movimiento orbital (caída libre) de la Tierra alrededor del CM del sistema T-L. Primeramente, notamos que las fuerzas de marea sólo pueden ser resultado de la interacción con la Luna y de las fuerzas inerciales asociadas al movimiento traslacional de la Tierra alrededor del CM del sistema T-L, ya que son estas las fuerzas que dependen de la posición aparente de nuestro satélite natural. La rotación de la Tierra sobre su propio eje, por lo tanto, no aporta a las fuerzas de marea⁴ (Butikov, 2002). Esto sugiere dejar de lado dicha rotación en el análisis de las causas de las mareas, y centrar nuestra atención en la traslación pura de la Tierra, es decir en su movimiento orbital de traslación sin rotación, alrededor del CM.

Si nos imaginamos un objeto rígido cualquiera, por ejemplo uno con forma rectangular, moviéndose en una órbita circular alrededor de un punto O (Fig. 2), pero sin rotar sobre su propio eje, observamos inmediatamente que el único punto de dicho cuerpo que describe una trayectoria circular alrededor de O es el centro geométrico de dicho cuerpo (C), mientras que el resto de las partículas que lo componen describen trayectorias circulares alrededor de otros centros, pero de igual radio. Además, notamos que, en cada instante, las velocidades de todos los puntos del rígido son iguales; condición necesaria para que el mismo se traslade como un rígido, manteniendo su orientación en el espacio. Luego, las aceleraciones de cada punto deben ser también, en cada instante, iguales a la del centro C.

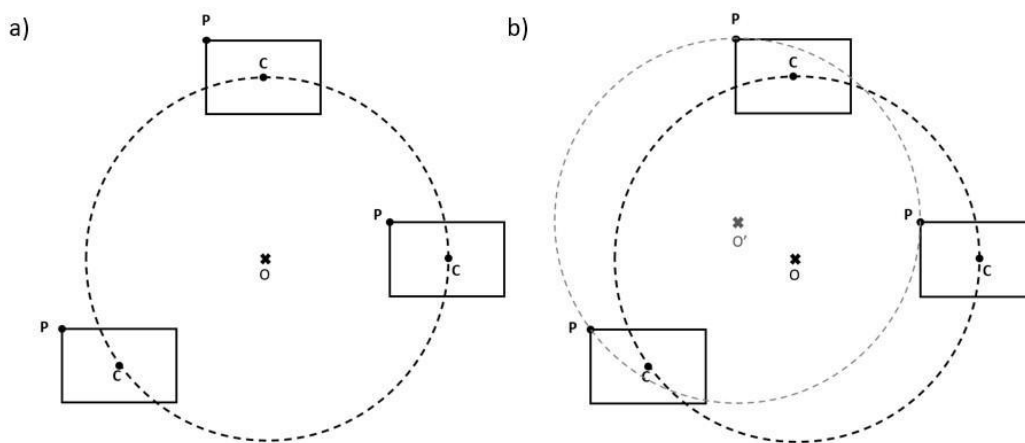


FIGURA 2. Representación del movimiento orbital de traslación sin rotación de un cuerpo rígido. En a) se observa, en líneas punteadas, la trayectoria que el centro C del rectángulo describe alrededor de O. En b) se observa que el punto P, ubicado en un vértice del rectángulo, describe una trayectoria circular de igual radio, pero alrededor de O'.

El movimiento orbital de la Tierra alrededor del CM del sistema T-L debe verse entonces como un movimiento de estas características. La única diferencia con la representación de la figura 2, pero que no produce modificaciones

³ El lector interesado en una descripción más detallada, puede consultar Butikov (2002) o Arons (1979).

⁴ Además de modificar la forma de equilibrio de nuestro planeta, la rotación diaria de la Tierra juega un papel importante en un análisis dinámico de las mareas, ya que hace que las fuerzas de marea sean dependientes del tiempo, así como lo es la posición de la Luna en el cielo para un dado observador en la superficie de la Tierra.

sustanciales en el razonamiento hecho, es que el CM del sistema T-L se encuentra dentro de la propia Tierra. Con estas consideraciones en mente, podemos entonces visualizar el movimiento de un punto P cualquiera, perteneciente, digámoslo así, a la *forma* de la Tierra, o al cuerpo rígido ideal que la representa. Este punto (Fig. 3), se mueve alrededor de O' con una aceleración dada por el vector $\vec{A}_{C'}$, que no es otro que el valor del campo gravitatorio lunar en el centro de la Tierra (C). Sin embargo, el valor del campo gravitatorio lunar en P es \vec{A}_L , que difiere en dirección e intensidad respecto de $\vec{A}_{C'}$, siendo en el caso representado un poco menor en intensidad debido a la mayor distancia de la Luna a P que a C. Por lo tanto, una partícula ubicada en P sentirá, debido a su interacción con la Luna, la aceleración \vec{A}_L , y no $\vec{A}_{C'}$. La partícula no podrá moverse igual que como se mueve el punto en donde se ubica, a menos que algo compense la diferencia entre \vec{A}_L y $\vec{A}_{C'}$. Esta diferencia "a compensar", esta aceleración que "siente" la partícula relativa al punto de la Tierra en donde se encuentra, es la aceleración de marea $\vec{A}_M = \vec{A}_L - \vec{A}_{C'}$; y es la responsable de los desplazamientos en el agua hacia la forma de doble abultamiento indicada en la Fig. 1.

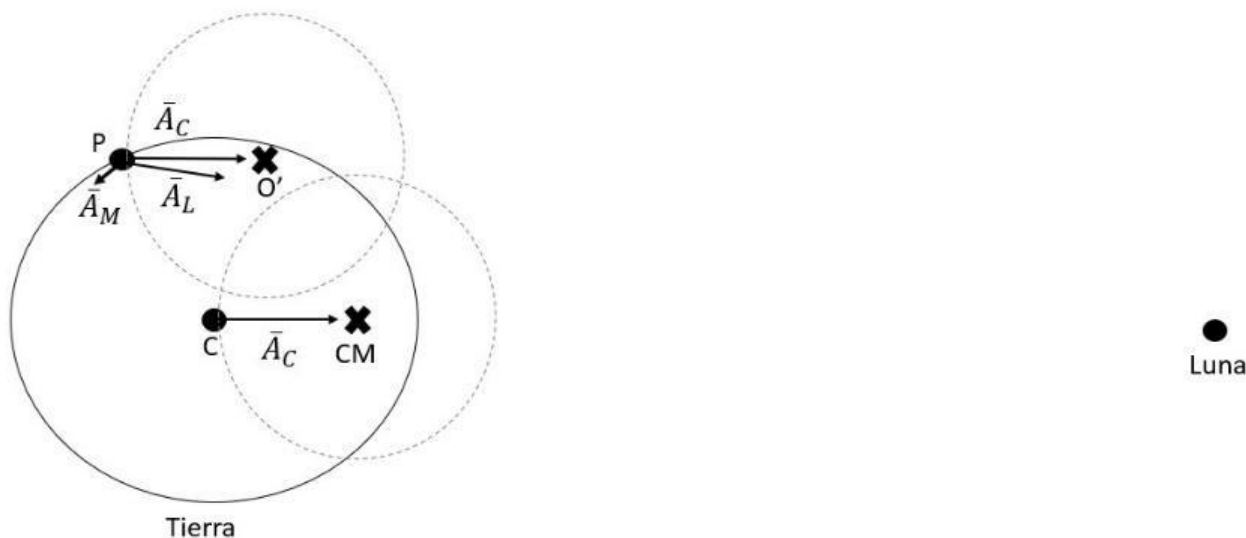


FIGURA 3. Representación de la Tierra, su centro C, un punto cualquiera de su superficie P, y las trayectorias que estos describen alrededor de los centros CM y O'. La aceleración del punto P, perteneciente a la forma de la Tierra, es la misma, en cada instante, que la de C. El campo gravitatorio lunar en P no puede producir la aceleración necesaria para que una partícula ubicada en dicho punto se mueva igual que P. La aceleración que siente dicha partícula respecto de P, es la aceleración de marea.

Debemos mencionar que dichos desplazamientos son el resultado de la acción global de estas fuerzas de marea sobre las aguas oceánicas de la Tierra, que en la mayoría de los puntos de su superficie posee componentes tangenciales (paralelas a la superficie) que el propio campo gravitatorio terrestre no puede compensar (Härtel, 2000). Las componentes de las fuerzas de marea perpendiculares a la superficie de la Tierra resultan muy pequeñas comparadas con el campo gravitatorio terrestre, y sólo modifican ligeramente dicho campo. Por ejemplo, las modificaciones que producen estas componentes en el peso aparente de una persona, allí donde son máximas (punto sub-lunar y anti-lunar), son aún menores que las que produciría un cuerpo de 1 kg sostenido a un metro sobre su cabeza (Hewitt, 2007).

III. METODOLOGÍA

Como ya se ha mencionado, el objetivo de este trabajo es relevar la presencia del tema en los textos de física universitaria (en particular aquellos que se orientan a la enseñanza de la física en el nivel inicial universitario), y dar cuenta de las características esenciales del tratamiento que los mismos presentan. Para la selección del material a analizar, se realizó una revisión de la bibliografía sugerida en los programas de la asignatura Física I de las carreras de Licenciatura en Física de las universidades nacionales de Córdoba (UNC), La Plata (UNLP) y Rosario (UNR), y de la Universidad de Buenos Aires (UBA). De este modo, se seleccionaron 8 textos (enumerados a continuación para futuras referencias en este trabajo) a los efectos de realizar un primer análisis de contenido, de carácter exploratorio, acerca del tema: Alonso y Finn (1970) [1]; Giancoli (2008) [2]; Freedman y Young (2009) [3]; Tipler y Mosca (2008)

[4]; Ingard y Kraushaar (1966) [5]; Roederer (2008) [6]; Resnick, Halliday y Krane (2001) [7]; Feynman, Leighton y Sands (1998) [8].

Se analizó el contenido que estos textos presentan con relación al tema en estudio, prestando especial atención a los siguientes tres ejes, identificados más arriba como claves para la conceptualización del fenómeno: [a] la consideración del argumento de la no-uniformidad del campo gravitatorio externo, o gradiente del campo gravitatorio, como causa de las mareas; [b] la consideración del estado de movimiento de la Tierra (caída libre) alrededor del CM del sistema T-L, como una de las causas centrales del doble abultamiento mareal; y [c] el movimiento de la Tierra considerado para el estudio de las mareas, y la explicitación que del mismo se hace.

IV. RESULTADOS

De la muestra analizada, solo en [1] no se encuentra ningún tratamiento del tema; únicamente una breve referencia en el capítulo de interacción gravitatoria en la que se lee: “*las mareas, por ejemplo, se deben enteramente a la interacción gravitacional de la luna y el sol con la tierra*” (Alonso y Finn, 1970, p. 443). En tres de los textos analizados [2, 4, 7], aparecen referencias al tema únicamente en preguntas y problemas a finales de capítulo (es decir, no se trata en un apartado dedicado específicamente al tema), plasmando sus autores sugerencias y comentarios en torno a la temática de las mareas solamente en esas instancias; mientras que en [3], se encuentran referencias a las fuerzas de marea que sentiría una persona en las inmediaciones de un agujero negro. Si bien esta situación no es la misma que la que pretendemos analizar en este trabajo, llamaremos la atención sobre algunas características del enfoque de los autores sobre la problemática de las mareas que pueden resultar de interés en relación con los análisis que nos ocupan. Finalmente, en el resto de los documentos [5, 6, 8] se encuentran explicaciones más detalladas de la causa de las mareas, aunque en [8] la discusión es enteramente conceptual y más acotada.

Acerca del material disponible en [2] y en [4], destacamos que, en los ejercicios mediante los que se proponen abordar la física de las mareas, el énfasis parece estar puesto en la no-uniformidad del campo gravitatorio externo. Esto se revela a partir de la insistencia que se hace, en los enunciados, en la comparación entre los efectos que sobre las mareas tienen el Sol y la Luna (como la Luna está más cerca que el Sol, su campo gravitatorio varía más que el de este, a través de la Tierra, y por ello su efecto en las mareas es mayor que el del Sol), en la insistencia en la comparación entre las fuerzas que los astros ejercen de un lado y del otro del planeta, y en el uso de frases como: “*estime la **diferencia en la fuerza**⁵ resultante (la causa de las mareas)*” (Giancoli, 2008, p. 162). En [4] incluso se incluye una representación del planeta con dos abultamientos mareales, y se identifica claramente a la diferencia en la fuerza gravitacional lunar como la causa. No se menciona, en ningún momento, que dichos abultamientos también son una consecuencia de la aceleración que adquiere la Tierra a causa de dicha fuerza gravitatoria.

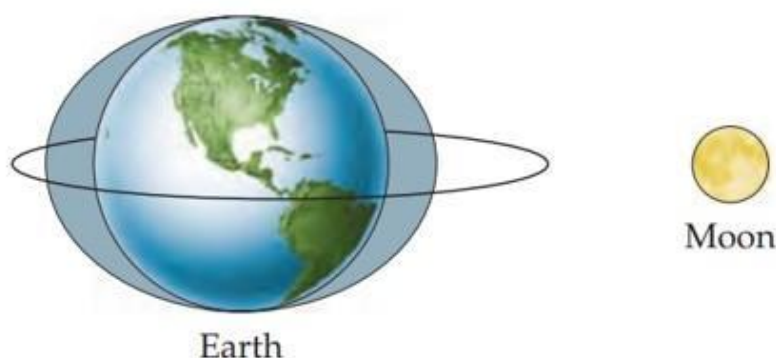


FIGURE 11-32 Problem 106 The lunar tidal bulges (exaggerated here) are due to the difference in the gravitational pull of the moon on opposite sides of Earth.

FIGURA 4. Imagen extraída de Tipler y Mosca (2008, p. 396). Se observan los dos abultamientos mareales, y se indica que los mismos se deben a la diferencia en la fuerza gravitatoria de la Luna en lados opuestos de la Tierra.

En [5], en cambio, aparecen mencionados a lo largo del tratamiento del tema los tres factores mencionados arriba (no-uniformidad del campo, caída libre de la Tierra y traslación sin rotación alrededor del CM). El hecho de

⁵ Resaltado en el original.

que la Tierra esté en movimiento alrededor del CM del sistema T-L es puesto de manifiesto y considerado de la siguiente manera:

Aun cuando ordinariamente decimos que la Luna gira alrededor de la Tierra, es más correcto decir que la Tierra y la Luna giran alrededor de su centro de masa común. [...] el centro de masa se halla en el interior de la Tierra, a sólo 3R/4 del centro. En la mayoría de los estudios cualitativos, este desplazamiento del centro de masa respecto al centro de la Tierra carece de importancia. En cambio, en el estudio del movimiento de las mareas, este desplazamiento es de importancia primordial, puesto que la Tierra gira en realidad alrededor del centro de masa. (Ingard y Kraushaar, 1966, p. 331)

El movimiento de la Tierra considerado en el análisis es el de una traslación sin rotación, y aunque esta elección es explicitada, no es justificada. Solo se expresa mediante la frase: “*Obsérvese que no tenemos en cuenta aquí el movimiento de rotación de la Tierra en torno a su eje*” (Ingard y Kraushaar, 1966, p. 331).

En [8], el abordaje del tema es más escueto, pero se observan claramente, como ideas centrales de su argumentación, la variación del campo gravitatorio lunar y la caída libre de la Tierra hacia el CM del sistema. Incluso, se representan en un esquema el doble abultamiento mareal y el movimiento mutuo de la Tierra y la Luna. Como referencias a la rotación de la Tierra sobre su propio eje, sólo aparece mencionada con relación a la observación de dos mareas diarias: “...y, como la tierra está rotando debajo, esto hace que la marea en un lugar suba y baje cada 24 horas. Realmente la marea sube y baja en 12 horas” (Feynman et al., 1998, p. 7-6) y no aparece explícitamente la idea de que ese movimiento puede omitirse al analizar las causas de las mareas. También notamos en este tratamiento que los autores remiten en sus explicaciones al concepto de “fuerza centrífuga”. No entraremos en detalles aquí acerca de esta elección de la terminología. Solo mencionaremos que, aunque es relativamente común encontrarla en la literatura (ver, por ejemplo, Darwin, 1899; Murray y Dermott, 1999; Goldreich, 1972), no acordamos con esta decisión, ya que consideramos que puede inducir confusiones respecto de las ideas necesarias para conceptualizar el fenómeno estudiado⁶.

En [7], las mareas se abordan en un ejercicio y en algunas preguntas conceptuales. En ellos se refieren razonamientos y cálculos que involucran analizar la variación del campo gravitatorio lunar a través de la Tierra, y se define la fuerza de marea a partir de esta variación, como “*la fuerza [que ejerce la luna] sobre el agua con relación a la Tierra*” (Resnick et al., 2001, p. 412). Esa definición alude a la idea de que la Tierra está en caída libre, pero no la explicita en ningún momento. Tampoco menciona la existencia de un centro de masas alrededor del cual se mueve el sistema T-L.

Abordajes cualitativamente distintos, y con características similares entre sí, se encuentran en [6] y en [3]. En ellos, el origen de las fuerzas de marea es presentado, no en el análisis del sistema T-L, sino en una situación análoga, como lo es la de un satélite (en [6]) o una astronauta (en [3]) en órbita alrededor de la Tierra. El punto distintivo en los análisis aquí presentados es la consideración que se hace acerca de este movimiento: en ambos casos se considera que el cuerpo rota sobre su propio eje, a la vez que se traslada en su órbita, con igual velocidad angular para ambos movimientos. Esta situación no es explicitada en ninguno de los casos. En [6] se interpreta a partir de las ecuaciones de movimiento que acompañan a las explicaciones, mientras que en el ejercicio que presenta [3] algunos comentarios en el enunciado dan pistas en ese sentido, y la solución planteada por Ford y Anderson (2012) es acorde a esta interpretación. En este caso, la fuerza obtenida como *fuerza de marea* (“*fuerza tidal*”, en [6]) comprende una parte originada en la rotación sobre el propio eje; componente que, estrictamente, no es de marea (Kapoulitsas, 1985) ya que no tiene relación con la posición del cuerpo que origina el campo gravitatorio externo (Butikov, 2017). Debe resaltarse también que, si bien en ambos casos se pone de manifiesto la diferencia en la fuerza gravitatoria originada por la no-uniformidad del campo externo (relacionado con el eje [a] de nuestro análisis, aunque la no-uniformidad no es llamada o identificada de esta forma), y también se hace explícito que el cuerpo objeto de las fuerzas de marea se encuentra acelerado, describiendo una órbita alrededor del cuerpo que genera dicho campo (eje [b] de nuestro análisis), las explicaciones no centran la atención sobre estas ideas sino que se focalizan en la cinemática de la situación:

*También es ilustrativo describir el fenómeno de las mareas desde un sistema inercial, para el cual no existen las fuerzas tidales. Para este sistema, la porción de agua que está más cerca de la Luna, y aquella que esté más lejos, tienen, al estar en reposo respecto de la Tierra, una velocidad **incorrecta**⁷ para ejecutar el mismo movimiento que el centro de la Tierra alrededor del centro de masa Tierra-Luna. En particular, la porción que está más cerca tiende a seguir una órbita elíptica más curvada (que se acerca a la Luna). La masa de agua en la cara opuesta, en cambio, tiende a ir, con esa velocidad, por una órbita elíptica menos curvada (alejándose de la Luna). (Roederer, 2008, p. 195)*

La crítica principal hacia este enfoque sobre la causa de las mareas es que pone en el centro de las explicaciones a la velocidad, mientras que lo único que importa es la aceleración de traslación de la Tierra (Butikov, 2002, 2017; Ingard y Kraushaar, 1966) que es la aceleración de caída libre, y es independiente de la velocidad. Es decir que el

⁶ Ver Butikov (2017) para una discusión más profunda acerca de esto.

⁷ Resaltado en el original.

fenómeno de las mareas sería esencialmente el mismo si, por ejemplo, los astros estuvieran moviéndose en línea recta el uno hacia el otro; al menos, mientras la distancia T-L no cambie demasiado (Iparaguirre, 2000). Por este motivo, consideramos que una explicación centrada en las velocidades orbitales podría resultar confusa o engañosa.

V. CONCLUSIONES

En este trabajo de investigación, de carácter cualitativo y exploratorio, se realizó un primer análisis de contenido acerca del tratamiento de la problemática de las mareas sobre una selección de textos universitarios. Si bien la base documental utilizada es muy reducida en relación con la cantidad de material pasible de ser estudiado, creemos que es suficientemente representativa de la enseñanza de la física en los cursos iniciales universitarios debido a su extendida presencia en los programas de estudio. En este sentido, nos permitiremos elaborar algunas ideas y formular algunas conjeturas, a modo de conclusiones que se desprenden del estudio realizado.

En primer lugar, como en solo dos de los ocho textos seleccionados el tema se aborda con cierta extensión y profundidad, en apartados dedicados a ello dentro de capítulos específicos, podemos conjeturar que la problemática de las mareas (y su complejidad) es mayormente omitida o escuetamente abordada por los principales textos utilizados en los cursos de física inicial universitaria. El hecho de que en cuatro de los ocho documentos analizados el tema queda referenciado únicamente en ejercicios de aplicación se constituye en una evidencia que respalda esta hipótesis de carácter exploratorio.

Además, el hecho de que en sólo uno de los ocho textos estudiados se pongan de manifiesto explícitamente las tres ideas que se han considerado, más arriba, como claves para la comprensión del fenómeno, podría sugerir que en muchos casos los textos dedicados a la enseñanza de la física en este nivel promueven conceptualizaciones incompletas o parciales del fenómeno. En particular, la idea de que la aceleración de la Tierra hacia el centro de masas del sistema Tierra-Luna juega un papel decisivo en el doble abultamiento observado en la teoría de equilibrio, y la idea de que la rotación de la Tierra sobre su propio eje no influye en la determinación de las fuerzas de marea de la que es objeto (Butikov, 2002), podrían no estar lo suficientemente extendidas en la literatura dedicada a la enseñanza de la física inicial universitaria.

En futuros estudios, podrían ponderarse los alcances de estas primeras conjeturas y establecer con mayor claridad cuáles son las problemáticas que presentan los abordajes del fenómeno en este tipo de textos universitarios, y cómo estas podrían traducirse en obstáculos para la conceptualización del fenómeno tanto para estudiantes como para docentes que recurren a ellos. Aun así, creemos que los resultados de este trabajo sugieren la importancia de revisar críticamente, como docentes, el material al cual recurrimos, tanto para nuestra formación sobre el tema, como para soporte de las explicaciones y desarrollos en nuestras clases; así como el material sugerido a nuestros estudiantes.

Sería interesante, en futuros trabajos, analizar los materiales, recursos y propuestas que se presentan, para el abordaje del tema, en los textos destinados a la enseñanza de la física en las escuelas secundarias, para ver qué relación guardan con los resultados aquí encontrados. A su vez, un relevamiento del tratamiento que efectivamente se hace del tema en las aulas (la bibliografía utilizada, la extensión y profundidad con la que se aborda, etc.) nos permitiría trazar relaciones con este trabajo y así ir construyendo un panorama o estado de situación de la enseñanza del fenómeno de las mareas.

REFERENCIAS

- Alonso, M. y Finn, E. (1970). *Física. Volumen I: Mecánica*. España: Fondo Educativo Interamericano.
- Armario, M., Jiménez-Tenorio, N. y Oliva, J.M. (2019). Ideas de los maestros en formación inicial sobre el fenómeno de las mareas. *Boletín ENCIC, Revista del Grupo de Investigación HUM-974*, 3(2), 63-65.
- Armario, M., Oliva, J.M. y Jiménez-Tenorio, N. (2018). Explicaciones de los estudiantes sobre el fenómeno de las mareas. *Actas del Congreso Iberoamericano de Docentes*. Universidad de Cádiz, Algeciras, Cádiz, España 26 de noviembre al 8 de diciembre de 2018.
- Arons, A. (1979). Basic physics of the semidiurnal lunar tide. *American Journal of Physics* 47, 934-937. doi: 10.1119/1.11614
- Butikov, E. (2002). A dynamical picture of the oceanic tides. *American Journal of Physics*, 70(10), 1001-1011. doi: 10.1119/1.1498858
- Butikov, E. (2017). Ocean tides: a physical explanation and modeling. *Computer tools in education*, 5, 12-34.

- Corrochano, D., Gómez-Gonçalvez, A. y Melo, L. (2017). Concepciones alternativas de futuros maestros sobre la naturaleza de las mareas. *Enseñanza de las ciencias*, N.º extraordinario, 2085-2090
- Corrochano, D., Gómez-Gonçalvez, A., Sevilla, J. y Pampín-García, S. (2017). Ideas de estudiantes de instituto y universidad acerca del significado y el origen de las mareas. *Revista Eureka sobre enseñanza y divulgación de las ciencias*, 14(2), 353-366. http://dx.doi.org/10.25267/Rev_Eureka_ensen_divulg_cienc.2017.v14.i2.05
- Darwin, G. H. (1899). *The tides and kindred phenomena in the solar system*. Boston: Houghton, Mifflin and Company.
- Feynman, R., Leighton, R. y Sands, M. (1998). *Física Volumen I: Mecánica, radiación y calor*. México: Addison Wesley Longman.
- Ford, L. y Anderson, W. (2012). *Instructor solutions manual. Sears & Zemansky's University Physics (13th ed)*. San Francisco: Pearson Education.
- Giancoli, D. (2008). *Física para ciencias e ingeniería (4ª ed.)*. México: Pearson Educación.
- Goldreich, P. (1972). Tides and the Earth-Moon system. *Scientific American*, 226(4), 42-53.
- Härtel, H. (2000). The tides - a neglected topic. *Physics Education*, 35(1), 40-45.
- Hewitt, P. (2007). *Física Conceptual (10ª ed)*. México: Pearson Educación.
- Ingard, U. y Kraushaar, W. (1966). *Introducción al estudio de la mecánica, materia y ondas*. Barcelona: Reverté.
- Iparaguirre, L. M. (2000). Las mareas. *Revista de Enseñanza de la Física*, 13(2), 25-35.
- Kapoulitsas, G. (1985). On the generation of tides. *European Journal of Physics*, 6, 201-207.
- Mach, E. (2013). *The science of mechanics. A critical and historical exposition of its principles*. Nueva York: Cambridge University Press.
- Murray, C. y Dermott, S. (1999). *Solar system dynamics*. Nueva York: Cambridge University Press.
- Ng, C. (2015). How tidal forces cause ocean tides in the equilibrium theory. *Physics Education*. 50(2). 159-164
- Resnick, R., Halliday, D. y Krane, K. (2001). *Física Vol. I (3ª ed.)*. México: Compañía Editorial Continental.
- Roederer, J. G. (2008). *Mecánica elemental (2ª ed.)*. Buenos Aires: Eudeba.
- Tipler, P. y Mosca, G. (2008). *Physics for scientists and engineers with modern physics (6ª ed.)*. Nueva York: W. H. Freeman and Company.
- Viiri, J. (2000). Student's understanding of tides. *Physics Education*, 35(2), 105-110
- Viiri, J. y Saari, H. (2004). Research-based teaching unit on the tides. *International Journal of Science Education*, 26(4), 463-481. doi: 10.1080/0950069032000072791
- Woolsey, J. (1994). Satellites and tides. *Physics Education*, 29, 177-179.
- Young, H. y Freedman, R. (2009). *Física universitaria volumen 1 (12ª ed.)*. México: Pearson Educación