



Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de
las Ciencias
ISSN: 1697-011X
revista.eureka@uca.es
Universidad de Cádiz
España

Las fases de Venus como prueba para argumentar sobre el movimiento de la Tierra: el paradigma newtoniano y la cosmología actual

Hernández Villalobos, Lorenzo

Las fases de Venus como prueba para argumentar sobre el movimiento de la Tierra: el paradigma newtoniano y la cosmología actual

Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias, vol. 19, núm. 3, 2022

Universidad de Cádiz, España


Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=92070576007>

DOI: https://doi.org/10.25267/Rev_Eureka_ensen_divulg_cienc.2022.v19.i3.3202

Las fases de Venus como prueba para argumentar sobre el movimiento de la Tierra: el paradigma newtoniano y la cosmología actual

Venus phases as a proof to argue about the movement of The Earth: the Newtonian paradigm and the current cosmology

Lorenzo Hernández Villalobos
IES Gádor, Gádor. Almería, España
hernandezvillalobos@gmail.com

 <https://orcid.org/0000-0002-9103-1632>

DOI: https://doi.org/10.25267/Rev_Eureka_ensen_divulg_cienc.2022.v19.i3.3202
Redalyc: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=92070576007>

Recepción: 23 Diciembre 2021

Revisado: 07 Febrero 2022

Aprobación: 25 Marzo 2022

RESUMEN:

En este artículo se hace un análisis de las observaciones astronómicas más importantes de Galileo, haciendo especial énfasis en las fases de Venus, una de las pruebas más contundentes contra el modelo ptolemaico, con la finalidad de trasladar al aula de secundaria la controversia sobre los modelos cosmológicos (geocéntrico-heliocéntrico), contextualizada en los siglos XVI-XVII. Se propone una metodología activa donde el alumnado debe fabricar maquetas para analizar y visualizar las fases de Venus, para contrastar los tres modelos competidores en la época: el ptolemaico, el copernicano y el ticomónico. Se extiende el análisis a la cosmovisión newtoniana y a la cosmología actual. Además, se pretende reflexionar sobre la dificultad de transmitir la historia de la ciencia en dichos niveles.

PALABRAS CLAVE: argumentación científica, movimiento de la Tierra, geocentrismo-heliocentrismo, controversias científicas, modelos cosmológicos.

ABSTRACT:

This article analyses Galileo's most important astronomical observations, placing the emphasis on the phases of Venus, among the most conclusive evidence against the Ptolemaic model, with the purpose of bringing into the classroom the controversy about the cosmological models (geocentrism-heliocentrism), contextualized in the sixteenth and seventeenth centuries. This study recommends an active methodology that involves students in the creation of mockups to analyse and visualize the phases of Venus in order to contrast this evidence with the three competitor models of the time: Ptolemaic, Copernican and Tychonic. The analysis also includes the Newtonian worldview, Physics and the present cosmology. Also, this article aims to reflect on the difficulty of teaching the history of Science at this stage.

KEYWORDS: scientific argumentation, Earth's motion, geocentrism-heliocentrism, scientific controversies, cosmological models.

INTRODUCCIÓN

El movimiento de la Tierra es una de las controversias científicas más famosas, antiguas y largas de la historia. Más allá de las influencias filosóficas y religiosas de cada época, la controversia viene dada por la dificultad de encontrar pruebas o indicios contundentes que demostraran el movimiento de la Tierra así como de desarrollar una Física que explicase los fenómenos observables de ese movimiento y su causa y que pusiera en conflicto la cosmovisión aristotélica.

Uno de los personajes más importantes en este cambio de paradigma, que supuso la (mal) llamada Revolución Científica^[1] de los siglos XVI-XVII, fue Galileo, ya que aportó distintas pruebas contra la cosmovisión aristotélica, gracias a que pudo usar el telescopio, a diferencia de sus antecesores. Entre sus hallazgos astronómicos más importantes se encuentran:



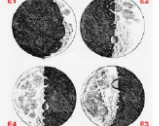



- los cráteres y las montañas de la Luna (también observadas por Thomas Harriot, astrónomo y matemático inglés, unos meses antes que Galileo, en 1609).
- las manchas solares (descubiertas además de manera independiente por los astrónomos Fabricius, Harriot, Scheiner y Passignani).
- las “orejas” o anillos de Saturno (que más tarde describió con más precisión Christiaan Huygens).
- las lunas de Júpiter.
- la observación de más estrellas de las que se ven a simple vista.
- y las fases de Venus.

Cada uno de estos hallazgos, resumidos en la Tabla 1, iba en contra de las ideas aristotélicas. Así, si la Luna tenía montañas y cráteres, es decir, era rocosa como la Tierra o como una piedra, ¿por qué no caía hacia la Tierra, hacia el centro del universo, como predecía la Física de Aristóteles?; observando las manchas solares se comprobaba que la región supralunar, a la que pertenecía el Sol, no era la región de la perfección inalterable que se creía en la cosmovisión aristotélica. Al igual que la Luna y las manchas solares, la observación de los anillos de Saturno producía una grieta en la cosmovisión aristotélica, dado que los planetas, compuestos por éter, tenían que ser perfectamente esféricos. Estas tres observaciones no mostraban en absoluto que la Tierra se moviera, pero socavaban la imagen aristotélica general del universo. El descubrimiento de más estrellas que las que podían verse a simple vista sugería la posibilidad de que el universo fuera mucho mayor de lo que previamente se creía, e incluso que fuera infinito, con un número infinito de estrellas (Galileo no llegó a plantear esta idea).

Respecto a las lunas de Júpiter (bautizadas por Galileo como “estrellas medicas”), observó cuatro puntos que giraban alrededor de este planeta. Esto mostraba que, contrariamente a la creencia aristotélica, no hay un solo centro de rotación del universo. Además, reforzaba la idea de que la Tierra podría estar en movimiento sin necesidad de dejar la Luna atrás, tal y como se pensaba.

Aunque Galileo también presentó el movimiento de las manchas solares como argumento, basado en criterios de economía y simplicidad del modelo explicativo, a favor del sistema heliocéntrico, las fases de Venus se podrían considerar la observación más relevante de la época para el debate geocentrismo-heliocentrismo.

TABLA 1
Resumen de las aportaciones astronómicas de Galileo

Fases de Venus y anillos de Saturno	Lunas de Júpiter	Montañas y cráteres de la Luna	Manchas solares	Más estrellas ²
				
 Bocetos de la Luna realizados por Thomas Harriot.				

[2] Galileo dibujó con doble trazo aquellas estrellas que veía a simple vista y con un trazo las que sólo podía contemplar a través del telescopio.

Estos hallazgos de Galileo, junto a otras observaciones y aportaciones que comento a continuación: como la publicación del libro de Copérnico *De revolutionibus orbium coelestium* (Sobre las revoluciones de las esferas celestes) de 1543, donde proponía un modelo heliocéntrico mezclando el modelo heliocéntrico de Aristarco con los epiciclos de Ptolomeo; la aparición de una nueva estrella en el firmamento en 1572 (SN 1572 o

Nova Tycho), observada por el danés Tycho Brahe y otros astrónomos europeos como Wolfgang Schuler, Thomas Digges, John Dee, Francesco Maurolico, Jerónimo Muñoz (valenciano), Tadeáš Hájek o Bartolomé Barrientos (salmantino); las aportaciones de Kepler, astrónomo alemán, que estableció las leyes básicas del movimiento de los planetas del sistema solar (las dos primeras publicadas en su libro *Astronomía Nova*, 1609, y la tercera en *Harmonices Mundi*, 1619) sustituyendo las órbitas circulares heredadas de la antigüedad y propuestas también por Copérnico y Galileo, por órbitas elípticas; y, posteriormente, con la obra de Newton, fue el final de la cosmovisión aristotélica y el inicio de una nueva que perduró como paradigma predominante unos 250 años (la cosmovisión newtoniana).

Las fases de Venus

Venus constituía uno de los problemas astronómicos tanto para el sistema ptolemaico como para el copernicano, pues, según ambas teorías, su distancia a la Tierra variaba mucho. Pero Galileo tenía otro motivo para observar Venus: había razonado que la Luna era un cuerpo opaco, que brillaba únicamente por reflejar la luz del Sol. Si Venus fuera, similarmente, un cuerpo opaco, tendría fases, como la Luna. De modo que Galileo quería ver si Venus tenía fases (Wootton, 2017, p. 243).

Las fases de Venus, descubiertas por Galileo en 1610, son, quizás, la prueba más contundente que aportó contra el modelo ptolemaico. Un Venus con fases sí era compatible con el modelo de Ptolomeo, lo que no era compatible es un Venus cuyas fases van de creciente a llena (figura 1).

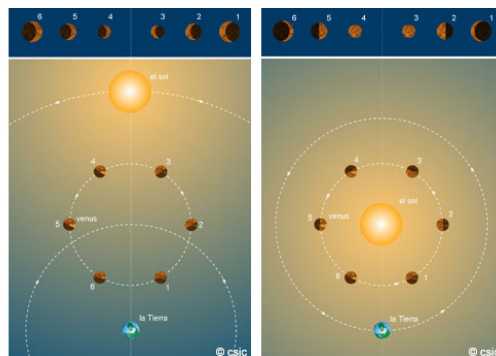


FIGURA 1

Comparativa de las fases de Venus según el modelo geocéntrico y heliocéntrico.

Museo Virtual de la Ciencia del CSIC

Así, esta observación viene a solucionar la competencia entre al menos dos de las tres explicaciones alternativas del cosmos de la época: la ptolemaica, la copernicana y la ticomónica. Estos sistemas son equivalentes desde el punto de vista geométrico, por lo que producen predicciones idénticas de las posiciones aparentes de los cuerpos en los cielos cuando se observan a simple vista desde la Tierra. Por esta razón, era imposible elegir entre dichos sistemas únicamente sobre la base de la información relacionada con la posición de los planetas en el cielo.

En una visión heliocéntrica sería de esperar que Venus pasase por una serie completa de fases y, por ello, el descubrimiento de Galileo proporciona evidencia de confirmación de esta, que no solo predice correctamente que Venus ha de pasar por una serie completa de fases sino que, además, explica de modo natural la correlación entre las fases de Venus y su tamaño aparente. Venus parece más pequeño cuando está en fase llena y más grande cuando está en cuarto creciente. Dado que Venus puede estar en fase llena (o casi llena) solo cuando está en parte más lejos del Sol, que es cuando está más lejos de la Tierra, esperaríamos verlo más pequeño. Igualmente, Venus puede estar en su fase creciente solo cuando está entre la Tierra y el Sol, cuando más cerca está de la Tierra y, por tanto, tiene que parecer mayor durante su fase creciente. En suma, las fases de Venus

proporcionan una importante evidencia contra el sistema ptolemaico; sin embargo, no bastan para zanjar la discusión entre geocentrismo y heliocentrismo (DeWitt, 2010, p. 201).



FIGURA 2
Riccioli, *Almagestum Novum* (1651).

Como estamos indicando, aunque las fases de Venus sí fueron una observación definitiva para descartar el modelo geocéntrico de Ptolomeo, no constituyeron una prueba indiscutible del movimiento de la Tierra, ya que también son compatibles con el modelo geocéntrico propuesto por Tycho Brahe, donde los planetas giran alrededor del Sol y a la vez el Sol gira alrededor de la Tierra, o con un modelo ptolemaico modificado como el propuesto por Riccioli en *Almagestum novum* ("Nuevo Almagesto"), 1651, donde algunos planetas, como Mercurio, Venus y Marte, orbitan alrededor del Sol y otros, como Saturno y Júpiter, alrededor de la Tierra. En este tratado se puede observar una ilustración (figura 2) en la que la balanza que sostiene Astrea (diosa de la justicia) representa los dos sistemas del mundo, el de Tycho Brahe y el de Copérnico. La balanza está desequilibrada a favor del modelo de Tycho Brahe ya que Riccioli es uno de los últimos grandes astrónomos que insistió en la superioridad del sistema ticonico. En el suelo se hallan Ptolomeo y su modelo descartado.

Resulta especialmente llamativo, e indica la transición en que se encontraba el estado del problema, que, en el famoso juicio de la Iglesia contra Galileo, liderado por el cardenal Belarmino, este no pudo aportar ninguna prueba contundente y definitiva del movimiento de la Tierra. Y lo que él pensó que era una prueba definitiva, las mareas, fue una equivocación y no aportó nada a la verdadera solución. Teniendo en cuenta los conocimientos del siglo XVII, la opción heliocentrista era más estética que racional. De hecho, como describe Meléndez (2013, p. 268), Galileo llegó a una situación paradójica al proponer las mareas como prueba del movimiento de la Tierra ya que, según su principio de relatividad, que hacía aceptable el movimiento de la Tierra, ¡un movimiento circular y uniforme no debería tener ningún efecto mecánico observable! Es más, la argumentación de las mareas de Galileo no explicaba los hechos ya que estas se deberían producir a las mismas horas del día si este efecto fuera apreciable sin la presencia de la Luna.

Así, el modelo geocéntrico presentaba ventajas frente al heliocéntrico:

- Su poder explicativo era superior o igual al modelo heliocéntrico.

- Al considerar la Tierra estática no entraba en conflicto con la cosmovisión aristotélica, que era la aceptada y la que se enseñaba en las grandes universidades del momento.

- Era compatible con observaciones directas como la caída de los cuerpos, que no se retrasaban, o la no observación de paralaje estelar.

De este modo, aunque la física aristotélica estaba sin duda desmoronándose y el sistema ptolemaico estaba herido de muerte, aún en 1672 un autor podía decir que quien estudiaba los cielos tenía cuatro sistemas distintos para escoger, y había algunos que hablaban hasta de siete (Butterfield, 1981, 2019. p. 94).

Este escenario histórico resulta especialmente interesante para contraponer argumentos basados en las pruebas, e ideal para poner al alumnado en la piel de los científicos, filósofos o religiosos de una época pasada.

JUSTIFICACIÓN DE LA PROPUESTA

Con la introducción de la Historia de la Ciencia en las clases de ciencias es posible aumentar el interés hacia el estudio de la Física y la Química mediante un tratamiento mínimamente detenido de algunos aspectos históricos introducidos en el proceso de adquisición de los diferentes conceptos y teorías científicas (Jiménez-Liso, López-Gay y Martínez Chico, 2012; Solbes y Traver, 2001).

Distintas investigaciones (citadas en Peña, 2016) como las desarrolladas por Gagliardi y Giordan (1986); Gil (1993); Izquierdo (1994); Izquierdo, Aduriz y Quintanilla (2007); Matthews (1990); Solbes y Traver (2001), entre otros, muestran cómo una deficiencia del contexto histórico en la enseñanza de las ciencias provoca que los estudiantes tengan una visión de la ciencia caracterizada por considerarla como un descubrimiento y no como una construcción de conocimientos, desligando e ignorando el rol que jugaron los problemas y circunstancias que intervinieron en el desarrollo de algunas teorías importantes, es decir, se desconoce el papel del contexto de la historia social en la construcción de ciencia (Peña, 2016). Así, una enseñanza donde están ausentes aspectos históricos transmite una imagen deformada de la actividad científica (Solbes y Traver, 1996). Además, las dificultades epistemológicas que se han manifestado a lo largo de la historia de la ciencia resultan útiles para extraer información sobre las dificultades del alumnado (Saltiel y Viennot, 1985; Driver *et al.*, 1989; Wandersee, 1986).

El estudio de la Historia de la Ciencia a través de controversias científicas tiene gran interés didáctico (Jiménez-Liso, López-Banet y Dillon, 2020) ya que ilustra sobre cómo aparecen las teorías, los condicionantes epistemológicos y sociológicos de la resistencia de la comunidad científica a aceptarlas, así como de su posterior aceptación y pervivencia, hasta que son superadas por otras con mayor poder explicativo; todo esto facilita la relativización del conocimiento científico y ayuda a superar posiciones dogmáticas ante la ciencia (Álvarez, 1996). Autores como Acevedo-Díaz y García-Carmona (2017, p.23) afirman que la forma más adecuada de utilizar la historia de la ciencia para una culturización *en* y *sobre* la ciencia es mediante el estudio y análisis crítico de controversias científicas.

La controversia del movimiento de la Tierra, clave en la Revolución Científica de los siglos XVI-XVII, es uno de los capítulos más tratados sobre historia de la ciencia en el currículo científico por su relevancia científica y social y porque supone el comienzo de la ciencia moderna. Debido a la complejidad de la Historia, al tiempo disponible para transmitirla y al público al que va dirigido (el alumnado de secundaria), se puede pecar por defecto y, por tanto, dar una visión superficial donde se cometan errores graves o profundizar demasiado y hacerla demasiado compleja. Ambas elecciones pueden hacer perder el interés: la primera, por parecer intrascendente y, la segunda, por ser incomprensible y aburrida. Así, aunque, como señala Sánchez Ron (1988), la Historia de la Ciencia puede ser un arma de doble filo en la enseñanza de la ciencia debido a que no está exenta de errores, dos de las ventajas que señala Campanario (1998) son:

- que puede ayudar a los alumnos a descubrir que los científicos aplican con frecuencia criterios de evaluación sesgados que se basan en la adscripción a paradigmas que actúan como marcos conceptuales;

· y que se puede fomentar la discusión en clase sobre los procesos de producción de conocimiento científico con el fin de conseguir que los alumnos adquieran una visión más adecuada de los mismos.

Estas dos ventajas se pueden trabajar a través del estudio de las fases de Venus y las pruebas aportadas por Galileo contra el modelo de Ptolomeo.

Una opción para acercar las controversias científicas al aula, más allá de contar la Historia y reconocer a los personajes principales y sus ideas, es plantear las preguntas (de manera sencilla) que impedían a los antiguos pensadores abandonar una teoría determinada, de tal manera que el alumnado comprenda la manera de pensar de épocas pasadas y sea capaz de ponerse en la mente de una persona formada de la época. Respecto al tema del movimiento, concretamente del movimiento de la Tierra, es quizás más sencillo que con otros temas (electricidad, física cuántica, etc.) debido a que, como afirman multitud de estudios didácticos, existe un sorprendente paralelismo entre las ideas de los alumnos y los pensadores precientíficos (Pozo, 1987). De este modo, resulta sencillo que reflexionen sobre las mismas, ya que ponen a prueba sus propias creencias. Así, por ejemplo, para defender el geocentrismo frente al heliocentrismo se pueden plantear las siguientes preguntas:

· ¿Cómo equiparar la Tierra, nuestro hogar, con las inmutables luces que se mueven en la esfera celeste?

Comentario: Se debe hacer ver al alumnado que, según el conocimiento de los planetas en la antigüedad, nada hacía indicar que esas luces del cielo que se movían de manera “errante” eran de la misma naturaleza que la Tierra.

· ¿Qué pruebas tenemos desde la Tierra que se mueva (Jiménez-Aleixandre, 2010)?

Comentario: Es importante hacer ver que es lógico pensar que la Tierra no está en movimiento si no notamos su movimiento. Si se moviera, podríamos notar dicho movimiento al igual que lo notamos cuando montamos en un carro, en un caballo o giramos en un carrusel.

· Si para que algo se mueva necesita un motor (una fuerza), ¿cómo de grande debería ser para mover toda la Tierra? Comentario: Es fácil que el alumnado considere la idea de que el movimiento de la Tierra pareciese absurdo a la luz de la física aristotélica, ya que nuestra propia experiencia nos indica que para mover un objeto hay que empujarlo. Cuanto más pesa, mayor fuerza hay que ejercer. Así pues: ¿Cuánta fuerza hay que ejercer para mover un lápiz, una mochila llena de libros, un camión, una montaña, un continente, ¡y la Tierra!? Es fácil llegar a la conclusión de que la fuerza sería tan enorme que es difícil de imaginar que pudiera existir tal cosa.

· Si se moviera, ¿no debería dejar atrás todo lo que no esté “pegado a ella”: pájaros, nubes, proyectiles..?

Comentario: una concepción alternativa del alumnado que coincide con una creencia aristotélica es que si desde un cuerpo en movimiento se lanza un objeto este objeto se retrasaría respecto al cuerpo.

· Si la Tierra se moviera, ¿no se debería observar el efecto de paralaje estelar? Comentario: Una de las pruebas clave que aportó Ptolomeo para argumentar que la Tierra no se movía era que no se observaba paralaje estelar, el cambio aparente de la posición de las estrellas debido a la rotación de la Tierra alrededor del Sol. Esta idea se puede ilustrar en el aula de manera sencilla usando el típico símil del dedo pulgar y su aparente cambio de posición si guiñamos el ojo derecho e izquierdo.

Por otro lado, como apuntan Grau, Amat y Feixas (2019, p. 6), al igual que las civilizaciones antiguas “sólo disponemos de la observación y nuestra capacidad de representarnos cómo deben moverse los astros en el cielo, ya que difícilmente tendremos acceso a los aparatos especializados que utilizan los astrónomos hoy en día. Por lo tanto, las investigaciones que podemos llevar a cabo en las aulas deberán ir enfocadas sobre todo a estos dos grandes aspectos: la observación y la representación. [...] Por esto, hay que promover que el alumnado construya sus representaciones (maquetas, dibujos...) sobre el movimiento de los astros”. Así, como señala Domènech Casal (2019), el trabajo con maquetas o representaciones de las proporciones o movimientos de los cuerpos estelares es una vía de trabajo interesante, sobre todo cuando se orienta a justificar desde los modelos científicos implicados.

Un punto muy relevante es que los modelos cosmológicos (heliocéntrico-geocéntrico) son una oportunidad para enseñar a evaluar teorías a la luz de pruebas (Jiménez-Aleixandre, 2010) y para tratar en el aula qué es una prueba y su uso para configurar un argumento válido, así como desmentir el mito de que en ciencia un solo experimento o prueba es suficiente para refutar una teoría y aceptar otra.

Por último, el estudio de las fases de Venus es una oportunidad para representar el movimiento de astros de forma diferente a como aparecen en las típicas representaciones del Sistema Solar, sistema Sol-Tierra o sistema Sol-Tierra-Luna, tan usados (por necesarios) en la enseñanza de la astronomía, tanto en primaria como en secundaria, con distinto fin: visualizar escalas, estudiar las estaciones, las fases de la Luna, etc.

¿Qué es una prueba?

Las pruebas, según Jiménez-Aleixandre (2010, p.20), son “las observaciones, hechos, experimentos, señales, muestras o razones con las que se pretende mostrar que un enunciado es cierto o falso”. Una característica fundamental de la ciencia es que sus afirmaciones deben estar apoyadas en pruebas. Sin embargo, la mayoría de los conocimientos científicos adquiridos en la educación formal se construyen por autoridad. Un ejemplo es el caso concreto del sistema Sol-Tierra, en el que, como apuntan Jiménez-Liso *et al.* (2012), desde muy pequeños, se nos indica que la Tierra da vueltas alrededor del Sol, pero no se nos ofrece ninguna prueba de que ello suceda así y, además, se atribuye esta formulación del movimiento absoluto a Galileo, al mismo tiempo que se estudia su principio de relatividad. Así, es común que al pedir al alumnado de secundaria que aporten pruebas sobre el movimiento de la Tierra, estas brillan por su ausencia. Esto se arrastra en el tiempo y se ha observado que en cursos de formación de profesores de secundaria (licenciados), ante la misma pregunta, la ausencia de pruebas es absoluta y los alumnos recurren únicamente a los argumentos de autoridad (Jiménez-Liso *et al.*, 2012). Es cierto que evaluar pruebas a cierto nivel puede resultar complicado, pero sí es posible enseñar algunas características de estas. Una importante es que generalmente para abandonar una teoría y/o apoyar otra no es suficiente con una prueba, sino la acumulación de pruebas, datos o indicios que la refuten. Además, como se afirma desde la Filosofía de la Ciencia, la observación está cargada de teoría (Kuhn), es decir, las pruebas serán evaluadas según la teoría que se use para analizarlas. De este modo, una misma observación, como las fases de Venus, puede ser evaluada por el modelo de Tycho Brahe o por el modelo de Copérnico.

OBJETIVOS

Los objetivos de este trabajo son, por un lado, mostrar una secuencia didáctica para trabajar los distintos modelos planetarios en el aula utilizando controversias científicas, concretamente los modelos cosmológicos vigentes en los siglos XVI-XVII, y, por otro, fomentar el debate y favorecer el desarrollo de la capacidad de análisis en el alumnado, usando para ello modelos argumentativos basados en pruebas.

METODOLOGÍA

Descripción de la secuencia didáctica

La secuencia se inicia habiendo previamente introducido los distintos modelos cosmológicos más relevantes propuestos en la Antigüedad (Aristóteles, Ptolomeo, Aristarco...) y los propuestos en los siglos XVI-XVII (Copérnico, Tycho Brahe, Kepler, Galileo...), y las pruebas que aportaron unos y otros para defender el geocentrismo o el heliocentrismo. En este desarrollo histórico es importante señalar los siguientes aspectos:

- Uno de los problemas astronómicos más importantes es el de la retrogradación de los planetas y cómo lo explica cada modelo. Para visualizarlo de forma más clara se puede proyectar este vídeo en el aula, donde

se explica la retrogradación con los tres modelos: esferas, epiciclos y heliocéntrico: <https://www.youtube.com/watch?v=vVBIMJUfO54>.

• Las observaciones de Galileo y qué supuso para la teoría aristotélica, haciendo especial hincapié en las fases de Venus.

• A pesar de que se suele marcar el lanzamiento de la obra de Copérnico *De revolutionibus orb coelestium* (1543) como el inicio de la Revolución, realmente Copérnico no aportó ninguna prueba al modelo heliocéntrico. Aunque la pretensión de Copérnico era que con un modelo heliocéntrico la geometría del mundo se simplificara muchísimo, lo cierto es que a medida que avanzaba en sus cálculos, se iba dando cuenta de que no era así. Si Ptolomeo había empleado 40 esferas para “salvar los fenómenos”, Copérnico necesitó 48 (Bersanelli, M., 2016, p.102). Además, Copérnico no hace girar la Tierra alrededor del Sol, sino alrededor de un punto exterior al Sol, que se encuentra a una distancia de seis veces el radio solar. Un punto vacío. Así, se debe presentar el modelo de Copérnico como una hipótesis más, como realmente fue considerado en su época.

• Si queremos intentar ser lo más fiel a la historia, es positivo comentar también los errores de los científicos y lo que sus teorías no pudieron explicar. Un ejemplo es la prueba de las mareas de Galileo y la acción a distancia de Newton. También, que los cambios producidos en muchas ocasiones provienen de detalles muy sutiles. Es el caso, por ejemplo, de las elipses de Kepler. Aunque en los libros de texto aparecen como elipses muy pronunciadas realmente la excentricidad de Marte (que es la que estudió Kepler) es de 0,0934, por lo que la órbita es casi circular (figura 3).

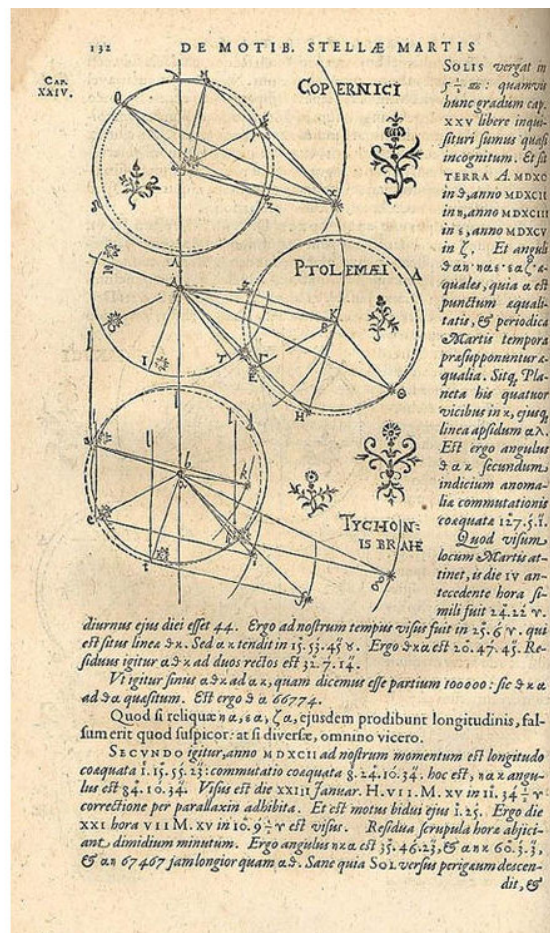


FIGURA 3

Página de Astronomía Nova de Kepler que muestra los tres modelos: copernicano, ptolemaico y ticonico.

· Otro punto importante es resaltar las teorías alternativas de las que finalmente supimos que eran más explicativas y coherentes. Además de comentar la lucha entre geocentrismo y heliocentrismo, es conveniente hablar de la teoría de los remolinos de Descartes, alternativa a la de acción a distancia de Newton^[3]. Esta disputa se resolvió midiendo el meridiano y descubriendo que la Tierra estaba achatada por los polos, que era lo que predecía la teoría de Newton. De esta manera, se dota de relevancia a este dato habitualmente conocido por el alumnado. Incluso algunas alternativas de las elipses de Kepler fueron los óvalos de Cassini, descartados tras el desarrollo de la gravitación universal.

Una vez analizado el contexto histórico, se divide al alumnado en grupos de tres o cuatro (según convenga) y se les entrega un diagrama con un modelo cosmológico diferente: el ptolemaico, el copernicano y el ticonico (Tabla 2). Siguiendo un criterio geométrico, deben indicar las caras de Venus que se iluminan y qué fases se verían desde la Tierra según cada modelo. A la vez, se les entrega una plantilla donde vienen las observaciones y creencias que apoyan dicho modelo y un esquema simplificado basado en el esquema argumentativo de Toulmin (Domenech-Casal, 2019) que deben rellenar para redactar sus argumentos (Tabla 3).

TABLA 2
Esquemas y argumentaciones correspondientes a los modelos ptolemaico, copernicano y ticonico

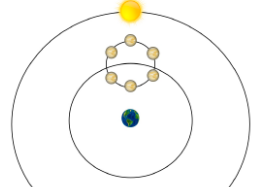
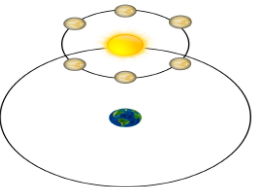
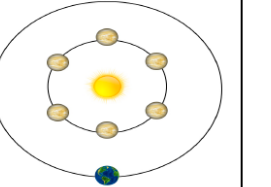
Modelo geocéntrico de Ptolomeo	Modelo de Tycho Brahe	Modelo de Copérnico o Aristarco
		
Argumentos a favor <i>Observaciones:</i> No se nota que la Tierra se mueve y se observa que todo (el Sol, la Luna, los planetas y las estrellas) giran alrededor de ella. No se observa el desplazamiento de las estrellas fijas debido al paralaje estelar. Si la Tierra se moviera, las formas de las constelaciones cambiarían considerablemente en el transcurso de un año. Si la Tierra se moviera debería dejar atrás a la Luna.		Argumentos a favor <i>Observaciones:</i> La paralaje estelar no se observa porque las estrellas están demasiado lejos. La retrogradación de los planetas.
En esa época no se podían observar las fases de Venus.	Las fases de Venus observadas cuadran con el modelo.	Las fases de Venus no se corresponden con las observadas a través del telescopio.
La retrogradación de los planetas se interpreta con movimientos circulares (epíclipsos) de los planetas.	La retrogradación de los planetas se interpreta como el movimiento de los planetas alrededor del Sol.	La retrogradación de los planetas se interpreta como un movimiento aparente visto desde la Tierra.
<i>Física en que se sustenta:</i> La tendencia natural de todos los objetos es el reposo. Para que algo se mueva es necesario aplicar una fuerza (motor). Debido a las dos premisas anteriores, si un objeto es lanzado en un sistema en movimiento este se retrasaría respecto al sistema. <i>Creencias filosóficas:</i> El círculo es la forma natural del movimiento. Por tanto, la retrogradación de los planetas debe ser producida por una suma de círculos (epíclipsos + deferente).		<i>Física en que se sustenta:</i> Principio de relatividad y de inercia de Galileo. <i>Creencias filosóficas:</i> El círculo es la forma natural del movimiento.

TABLA 3
Esquema modificado de la estructura de argumentación
propuesta por Toulmin (Domenech-Casal, 2019, p.133).

DATOS	Como...	
JUSTIFICACIÓN	y...	
GARANTÍA	...y se cumple de manera general que...	
CONCLUSIÓN	Entonces, concluimos que...	
REFUTACIÓN	A menos que...	

Cada grupo debe completar, guiados por el docente, el argumento correspondiente que posteriormente debería defender oralmente ante la clase. Los argumentos esperados para cada modelo son los siguientes:

TABLA 4
Comparación de argumentos según Ptolomeo, Copérnico y Tycho Brahe.

		Ptolomeo	Copérnico	Tycho Brahe
DATOS	Como...	...no se observa la paralaje estelar...	...el modelo coincide con las fases de Venus observadas aunque no se observe paralaje estelar debido a la distancia de las estrellas...	...se observan las fases de Venus pero no se observa paralaje estelar...
JUSTIFICACIÓN	y...	...se observa que todo gira alrededor de la Tierra...	...las fases de Venus corresponden con su distancia al Sol y a la Tierra...	...se observa que todo gira alrededor de la Tierra...
GARANTÍA	...y se cumple de manera general que...	...para que un objeto se mueva hay que empujarlo.	...para que un objeto esté en movimiento no es necesario ejercer ninguna fuerza (principio de inercia).	...para que un objeto se mueva hay que empujarlo.
CONCLUSIÓN	Entonces, concluimos que...	...la Tierra está en reposo y todo gira alrededor de ella.	...la Tierra se mueve alrededor del Sol...	...Venus gira alrededor del Sol pero la Tierra está en reposo.
REFUTACIÓN	A menos que...	...la paralaje sí se produzca aunque no se pueda medir debido a la distancia de las estrellas.	...el principio de inercia no sea aplicable al movimiento de la Tierra.	...ocurra el fenómeno de paralaje estelar pero no se pueda observar debido a que las estrellas están demasiado lejos para medir dicha paralaje.

Realización de maquetas y debate

Tras completar el esquema geométrico y el argumento, los grupos realizarán una maqueta de las fases de Venus. Es algo sencillo para el alumnado ya que no difiere demasiado de la representación habitual de las fases de la Luna realizadas en cursos anteriores. Los materiales de las maquetas son algo arbitrario. En este caso se han usado bolas de poliespán para representar el Sol, la Tierra y Venus y un corcho como base. Se han coloreado los astros con rotuladores y/o pinturas, pintando de negro las zonas sombrías de Venus. Esta representación da la oportunidad de observar tridimensionalmente las fases de Venus, vistas desde la Tierra, en los distintos modelos.



FIGURA 4
Realización de maquetas de las fases de Venus

Tras realizar las maquetas, cada grupo defiende su modelo ante el resto del alumnado, basándose en pruebas. Es importante el orden de actuación. En primer lugar, deben actuar los grupos que defienden el modelo ptolemaico. En segundo lugar, los copernicanos. Y en último lugar, los que defienden el de Tycho Brahe. El orden es relevante, ya que, al terminar con Tycho Brahe, el debate no queda cerrado del todo, dejando preguntas sin responder.



FIGURA 5
Defensa y debate de los modelos cosmológicos

ARGUMENTAR CON PRUEBAS A LA LUZ DE LA COSMOVISIÓN NEWTONIANA

Es interesante señalar que los dos movimientos que se enseñan en secundaria (rotación y traslación), aunque relacionados, son problemas distintos: el de rotación es un problema dinámico, de fuerzas; el de traslación alrededor del Sol es un problema geométrico, de sistemas de referencia (SR). Por tanto, las pruebas que los apoyan son diferentes. Quizás, el mayor error que se comete al introducir esta controversia no sea el relato histórico (algo comprensible por multitud de factores) sino dar el problema zanjado con Galileo. Tras Galileo, el debate sobre el movimiento relativo o absoluto continuó. Uno de los problemas que aún no tenía respuesta era el de la causa del movimiento. Newton, con su teoría de la gravitación, proporcionó una solución: el mecanismo del universo es la propia atracción entre las masas. No hace falta un motor inicial que lo mueva. Introduce un SR Inercial como un miembro del conjunto de sistemas que se mueve con MRU respecto a un SR absoluto (Pérez y Solbes, 2006). Consideraba que existía un espacio absoluto en reposo en el cual se movían los objetos. En este espacio absoluto, si bien no se podía distinguir el reposo del MRU, sí son distinguibles los movimientos acelerados. Dicho de otro modo, las aceleraciones no son relativas sino absolutas y, por tanto, un objeto que sufre una aceleración se podría afirmar que está en movimiento. Para puntualizar esto, Newton nos presenta el célebre experimento del cubo de agua. Como en la Tierra aparecían fuerzas de inercia, como la fuerza centrífuga, causante, por ejemplo, del achatamiento de los polos (solo unos 20 km), se podía afirmar con rotundidad que la Tierra estaba girando sobre sí misma.

Newton pensaba que, aunque desapareciera toda la materia que existía en el universo, el espacio absoluto permanecería. Estaría vacío, pero aún sería “espacio” real. Paradójicamente, las leyes de Newton presentes en los *Principia* daban un argumento a los geocentristas que aún estaban presentes en la época. Según Bersanelli (2016, p.144) el vínculo entre masa y movimiento, introducido por la ley de gravitación, redimensionaba de alguna manera la antigua controversia entre la centralidad del Sol y la Tierra. En la Física newtoniana, la mejor

forma para describir los giros de dos cuerpos bajo la acción de la gravedad recíproca era no fijar a uno como eje de la vuelta del otro, sino pensarlo como un doble giro de ambos alrededor de un punto indeterminado (el “centro de masas”), cuya posición depende de la relación entre las dos masas. Como la masa del Sol es mucho mayor que la de la Tierra, el centro de masa de la pareja está mucho más cercano al Sol, pero no coincide exactamente con este ^[4].

Desde este punto de vista, en el caso del Sol y la Tierra, si nos situamos en el Sol observaremos que la Tierra gira alrededor de este. Si nos situamos en la Tierra observaremos que el Sol gira alrededor de ella. Y visto desde un punto en el infinito, ambos giran alrededor del centro de masas. Entonces, ¿por qué elegir una de ellas entorno a la cual gira la otra? Si consideramos masas iguales, el centro de giro estaría en el punto medio de ambas. De este modo, no podríamos afirmar de manera absoluta que una gira alrededor de otra. Un caso llamativo es el de Júpiter que, debido a su gran masa, el centro de giro se encuentra fuera del Sol. De hecho, este movimiento de la estrella es lo que ayuda a los astrónomos a encontrar nuevos exoplanetas.

Posteriormente se realizaron multitud de observaciones que, analizadas desde el paradigma newtoniano, se consideraban pruebas del movimiento de rotación de la Tierra sobre su eje:

- La variación del período del péndulo a lo largo del meridiano (Jean Richer en 1679) y el achatamiento de los polos (20 km, en cada polo) que verifica la existencia de una fuerza centrífuga debida a la rotación terrestre.
- La experiencia de Reich en 1831.
- Efecto Coriolis (descrito en 1836 por el científico francés Gaspard-Gustave Coriolis).
- El desplazamiento del péndulo de Foucault en 1850.

También surgieron observaciones que apoyaban el movimiento de traslación alrededor del Sol:

- La demostración de James Bradley basada en la aberración de la luz (1728).
- Friederich Bessel midió, en 1838, la paralaje de la estrella 61 Cygni, es decir, el cambio aparente de su posición debido al desplazamiento de la Tierra respecto del Sol.
- El desajuste Doppler-Fizeau de la luz de las estrellas.

Es interesante hacer hincapié en el péndulo de Foucault, ya que se trata de una demostración muy llamativa presente en multitud de museos científicos (que el alumnado visita habitualmente) y, por tanto, es la única realmente accesible al alumnado, al menos visualmente. Así, tomando el péndulo de Foucault como ejemplo (Tabla 5), a la luz de esta observación y utilizando el esquema de Toulmin, el argumento del movimiento de la Tierra sería el siguiente:

TABLA 5
Ejemplo de argumentación. Adaptación de Jiménez-Aleixandre (2010).

DATOS	Como...	se observa que el plano de oscilación del péndulo parece oscilar
JUSTIFICACIÓN	y...	el plano de oscilación no se mueve, tiene que ser la Tierra la que gira
GARANTÍA	...y se cumple de manera general...	la ley del péndulo (ley de conservación del momento angular).
CONCLUSIÓN	Entonces, concluimos que...	la Tierra gira sobre su propio eje.
REFUTACIÓN	A menos que...	exista otra fuerza no considerada (mecánica, magnética, etc.) que actúe sobre el péndulo.

Pero, aunque las pruebas del movimiento de la Tierra se iban acumulando y, por tanto, los geocentristas no tenían más remedio que abandonar su modelo, dichas pruebas no eran definitivas y siempre se podían asociar a un movimiento relativo. Como describe Krivine (2012, p. 247), ninguna prueba científica es indiscutible, incluidas las del movimiento de la Tierra. Si la Tierra no girase en torno al Sol:

- la aberración de las estrellas podría estar causada por un mismo movimiento de todas las estrellas perpendiculares a la eclíptica y de un período de un año;
- la paralaje podría ser debida a un desplazamiento de las estrellas de un período de un año, desplazamiento tanto más importante cuanto más próximas están a la Tierra;
- el efecto Doppler-Fizeau podría ser creado por un movimiento periódico de las estrellas, sobre todo de las situadas en la eclíptica.

En cuanto a las pruebas de la rotación de la Tierra sobre ella misma, se apela a la violación aparente del principio de inercia, debido al hecho de que el marco de referencia terrestre no es galileano. Es este principio el que, precisamente, se modifica en el siglo XX.

REFLEXIONES DESDE LA COSMOLOGÍA ACTUAL

Este artículo ha tratado el problema del movimiento de la Tierra hasta la visión newtoniana, que es la que se estudia en los niveles de la ESO. Sin embargo, un análisis en cursos superiores (bachillerato o universidad) debe abordarse teniendo en cuenta los avances en física y cosmología de los siglos XX-XXI. En el paradigma actual se eliminan las distancias absolutas y los intervalos de tiempo absolutos (Relatividad Especial, 1905) y se establece una nueva teoría del movimiento y de la gravedad (Relatividad General, 1916), donde se eliminan también las aceleraciones absolutas y se destierra la idea de un SR absoluto. Respecto al movimiento de la Tierra, cabe resaltar el resultado fallido del experimento de Michelson-Morley (1887), que fueron incapaces de detectar ninguna velocidad de la Tierra respecto al supuesto éter. En cuanto a la cosmología, tras hallazgos como la teoría del Big Bang, la expansión del universo y el fondo cósmico de microondas (CMB), entre otros descubrimientos, se establece un modelo del Universo regido por el Principio Cosmológico que afirma que, en escalas suficientemente grandes (del orden de cientos de megapársecs), el Universo es isótropo y homogéneo. Estos hallazgos llevan a nuevas implicaciones respecto al movimiento y a la posición de la Tierra en el Universo. La cosmología actual establece que no existe un centro del universo, por lo que refuerza la idea del principio copernicano: la Tierra no está en el centro del universo, por el simple hecho de que no existe ningún centro ^[5]. Esta visión ya la defendió Giordano Bruno (1548-1600) que, al proponer un universo infinito, consideró que no tenía centro. En palabras de Battaner (2021, p. 134): “Ni geocentrismo ni heliocentrismo: acentrismo”. Al mismo tiempo, cualquier observador en el universo puede considerarse el centro de una esfera espacio-temporal que corresponde a su universo observable (figura 6).



FIGURA 6

Ilustración a escala logarítmica del universo observable con el Sistema Solar en el centro y la radiación de fondo de microondas y el plasma invisible del Big Bang en el borde.

Autor: Pablo Carlos Budassi. Fuente: Wikimedia Commons.

Así, se puede tratar el debate desde un punto de vista actual empleando mediciones recientes, como la velocidad relativa de la Tierra respecto al CMB que, usando la técnica del efecto Doppler, se ha establecido en unos 600 km/s, y planteando preguntas como: ¿Se puede considerar que el CMB es el SR absoluto (el nuevo “éter”) respecto al cual medir la velocidad de los demás objetos del universo o es, como apunta Gardner (1986, p.197), igualmente legítimo “suponer que la Tierra está fija y que el Universo entero, con toda su gran nube esférica de radiación de cuerpo negro, es el que se está moviendo”? Con este tipo de preguntas se puede tratar el debate desde un punto de vista moderno, en el marco de la Relatividad General, donde se disuelve la aparente oposición entre modelos y la elección de uno u otro está basada más en la simplicidad y estética matemática (¿quizás una buena guía hacia la “verdad”?) que en una razón puramente conceptual. De este modo, la elección de un SR resulta arbitraria y el más apropiado será aquel que facilite la comprensión de un fenómeno físico, el estudio del movimiento y la unificación y universalidad de los fenómenos y explicaciones.

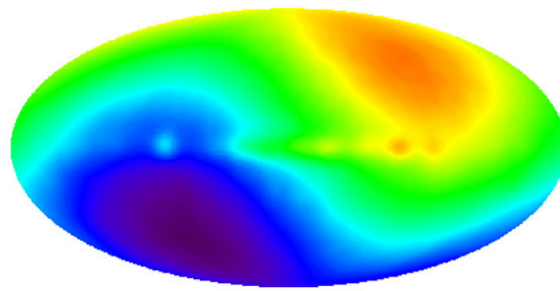


FIGURA 7
Efecto Doppler del CMB detectado por COBE debido
al movimiento de nuestro sistema solar respecto al CMB

Como se ha expuesto, el movimiento de la Tierra es un tema que impregna todo el currículum de física y astronomía, desde primaria hasta la universidad. No se debe considerar un debate banal, sencillo, ni que se zanjó en la Revolución Científica. Es más, exige un análisis crítico y exhaustivo de las pruebas que apoyan los distintos modelos históricos. En la controversia geocentrismo-heliocentrismo es muy tentador cometer el error de interpretar el pasado con los ojos del presente, lo que se conoce como *historiografía whig*, donde se resuelve con demasiada facilidad quiénes son los buenos y los villanos de la historia (Butterfield, 1951). El conocer la Física y la cosmología actuales nos debe servir precisamente para lo contrario, para analizar críticamente qué pruebas se podían aportar en cada época y plantear las preguntas y problemas que quedaron necesariamente sin resolver, situación que motivará el seguir aprendiendo. En cada etapa habrá que tratarlo adaptándolo al nivel de conocimientos y al contexto, sabiendo que, en una enseñanza habitual, sin perspectiva histórica, se transmitirá una visión sesgada de la forma como se construyen y evolucionan los conceptos y las teorías científicas (Chade, 2014) y que se debe evitar transmitir una concepción individualista y elitista de la ciencia (Fernández *et. al.*, 2002). Resulta complicado conseguir este equilibrio, pero si queremos ser rigurosos a la hora de hablar sobre el movimiento de la Tierra (o del movimiento en general), más allá de la profundidad con la que lo tratemos, simplemente debemos añadir *siempre* el calificativo “relativo” tras las palabras “reposo” o “movimiento”.

CONCLUSIONES

La experiencia didáctica desarrollada ha permitido que, a través de la Historia de la Ciencia, el alumnado se enfrente a una de las controversias científicas más conocidas. Ante la complejidad de introducirlas en el aula de secundaria, en esta intervención didáctica se ha optado por la modelización ya que en el proceso de enseñanza-aprendizaje de las ciencias experimentales se presenta como una estrategia capaz de asegurar un aprendizaje significativo (Solbes, Tuzón y Palomar, 2019, p.15) y es un recurso importante puesto que así lo es también en el desarrollo de las investigaciones científicas (Solbes y Jiménez-Liso, 2019, p.12.). La construcción de maquetas, entendidas como representaciones de modelos didácticos, goza de multitud de ventajas como la identificación de ideas previas o de las dificultades conceptuales del alumnado sobre el tema tratado. Otro aspecto por destacar es la observación de que este tipo de propuestas son de gran utilidad para el análisis crítico de controversias científicas y puede actuar como enlace, mejorando la comprensión del problema científico tratado, entre la controversia y el uso de modelos argumentativos basados en pruebas que fomentan el debate abierto en el aula.

REFERENCIAS

- Acevedo-Díaz, J. A. y García-Carmona, A. (2017). *Controversias en la historia de la ciencia y cultura científica*. Madrid: Los Libros de la Catarata.
- Alvarez Suárez, R. M. (1996). Las controversias científicas. Sus implicaciones didácticas y su utilidad mediante un ejemplo: la controversia sobre la edad de la Tierra. *Alambique: didáctica de las ciencias experimentales*, 8, 63-68.
- Battaner, E. (2021). *Historia de la física del universo: Cómo la astronomía se hizo física*. Guadalmazán.
- Bersanelli, M. (2016). *El gran espectáculo del cielo. Ocho visiones del universo desde la antigüedad a nuestros días*. Ediciones Encuentro.
- Butterfield, H (1951), *The Whig Interpretation of History*, G. Bell and Sons, Londres, 1951.
- Butterfield, H (1981). *Los orígenes de la ciencia moderna*. Madrid: Taurus Ediciones. Edición 2019.
- Campanario, J. M. (1998). Ventajas e inconvenientes de la Historia de la Ciencia como recurso en la enseñanza de las ciencias. *Revista De Enseñanza De La Física*, 11(1), 5–14.
- Chade Vergara, P. O. (2013). Superación de las visiones deformadas de las ciencias a partir de la incorporación de la historia de la física a su enseñanza. *Revista Eureka sobre enseñanza y divulgación de las ciencias*, 11(1), pp-34. <http://hdl.handle.net/10498/15711>
- DeWitt, R. (2010). *Cosmovisiones: una introducción a la historia ya la filosofía de la ciencia*. Biblioteca Buridán.
- Domènech-Casal, J. (2019). *Aprendizaje Basado en Proyectos, trabajos prácticos y controversias.: 28 propuestas y reflexiones para enseñar Ciencias*. Octaedro.
- Domènech-Casal, J. (2019). Proyecto de astronomía Howlin'Wolves: Observación, modelo científico y experiencia cultural. *Alambique: Didáctica de las ciencias experimentales*, (95), 53-58.
- Driver, R. (1986). Psicología cognoscitiva y esquemas conceptuales de los alumnos. *Enseñanza de las ciencias: revista de investigación y experiencias didácticas*, 3-15.
- Fernández, I., Gil, D., Carrascosa, J., Cachapuz, A. y Praia, J. (2002). Visiones Deformadas de la Ciencia Transmitidas por la Enseñanza. *Enseñanza de las Ciencias*, 20, 3, 477-488.
- Gardner, M. (1986). *La explosión de la relatividad*. Salvat.
- Grau, V., Amat, A. y Martí Feixas, J. (2019). *Investigamos los fenómenos astronómicos*. https://www.researchgate.net/publication/339988743_Investigamos_los_fenomenos_astronomicos.
- Jimenez-Aleixandre, M. P. (2010). *10 ideas clave. Competencias en argumentación y uso de pruebas*. Barcelona: Graó Editorial.
- Jiménez-Liso, M. R., López-Gay, R. y Martínez Chico, M. (2012). Cómo trabajar en el aula los criterios para aceptar o rechazar modelos científicos. ¿Tirar piedras contra nuestro propio tejado? *Alambique: Didáctica de Las Ciencias Experimentales*, 72, 47–54.
- Jiménez-Liso, M. R., López-Banet, L. y Dillon, J. (2020). Changing How We Teach Acid-Base Chemistry. *Science & Education*, 29(5), 1291–1315. <http://doi.org/10.1007/s11191-020-00142-6>
- Krivine, H. (2012). *La Tierra, de los mitos al saber*. Biblioteca Buridán.
- Meléndez, S. J. (2013). *De Tales a Newton. Ciencia para personas inteligentes*. Ellago ediciones.
- Pérez, H. y Solbes, J. (2006). Implicaciones de la evolución histórica de algunos conceptos en la enseñanza de la relatividad. *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias*, 2006, vol. 3, num. 3, p. 408-430. <http://revistas.uca.es/index.php/eureka/article/view/3848>
- Peña, J. Z. (2016). Contexto en la enseñanza de las ciencias: análisis al contexto en la enseñanza de la física. *Góndola, enseñanza y aprendizaje de las ciencias*, 11(2), 193-211. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.gdla.2016.v11n2.a3>
- Pozo, J. I. (1987). La historia se repite: las concepciones espontáneas sobre el movimiento y la gravedad. *Infancia y aprendizaje*, 10(38), 69-87.

- Saltiel, E. y Viennot, L. (1985). ¿Qué aprendemos de las semejanzas entre las ideas históricas y el razonamiento espontáneo de los estudiantes? *Enseñanza de las ciencias: revista de investigación y experiencias didácticas*.
- Sánchez Ron, J. M. (1988). Usos y abusos de la historia de la Física en la enseñanza. *Enseñanza de las Ciencias*, V. 6 (2), 179-188.
- Solbes, J., Fons, R. P. y Tuzón, P. (2019). Modelos físicos y químicos usando corporeización en la enseñanza de las ciencias. *Propuestas de educación científica basadas en la indagación y modelización en contexto* (pp. 15-38). Tirant Humanidades.
- Solbes, J. y Jiménez-Liso (2019). *Propuestas de educación científica basadas en la indagación y modelización en contexto* (pp. 15-38). Tirant Humanidades.
- Solbes, J. y Traver, M. J. (1996). La utilización de la historia de las ciencias en la enseñanza de la física y la química. *Enseñanza de las ciencias: revista de investigación y experiencias didácticas*, 103-112.
- Solbes, J. y Traver, M. J. (2001). Resultados obtenidos introduciendo historia de la ciencia en las clases de física y química: mejora de la imagen de la ciencia y desarrollo de actitudes positivas. *Enseñanza de las ciencias: revista de investigación y experiencias didácticas*, 151-162.
- Wandersee, J. H. (1986). Can the history of science help science educators anticipate students' misconceptions? *Journal of Research in Science Teaching*, 23(7), 581–597. <http://doi.org/10.1002/tea.3660230703>
- Wootton, D. (2017). *La invención de la ciencia*. Madrid: Crítica.

NOTAS

- [1] Aunque en este artículo, para simplificar, se hará mención a la Revolución Científica de los siglos XVI y XVII, se trata de una categoría muy discutida por la actual historiografía de la ciencia. Los historiadores de la ciencia han ido abandonando paulatinamente la idea de una revolución científica, para considerar la ciencia de dichas épocas como un conglomerado mucho más complejo de prácticas y saberes.
- [3] Un dato curioso es que realmente la Tierra está achatada tan solo 20 km por cada polo. Eso equivale a un error relativo de su esfericidad de 0,31 % que es muy parecido al de una bola de billar (0,22 %).
- [4] Obviamente, la gravedad de todos los planetas (y demás cuerpos), no solo la Tierra, contribuye simultáneamente al centro de masa común del Sistema Solar, respecto al cual incluso el Sol se mueve ligeramente.
- [5] Esta idea se visualiza de manera adecuada con la analogía del globo, propuesta por primera vez por Eddington en 1931.

INFORMACIÓN ADICIONAL

Para citar este artículo: Hernández Villalobos, L. (2022) Las fases de Venus como prueba para argumentar sobre el movimiento de la Tierra: el paradigma newtoniano y la cosmología actual. *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias* 19(3), 3202. doi: 10.25267/Rev_Eureka_ensen_divulg_cienc.2022.v19.i3.3202