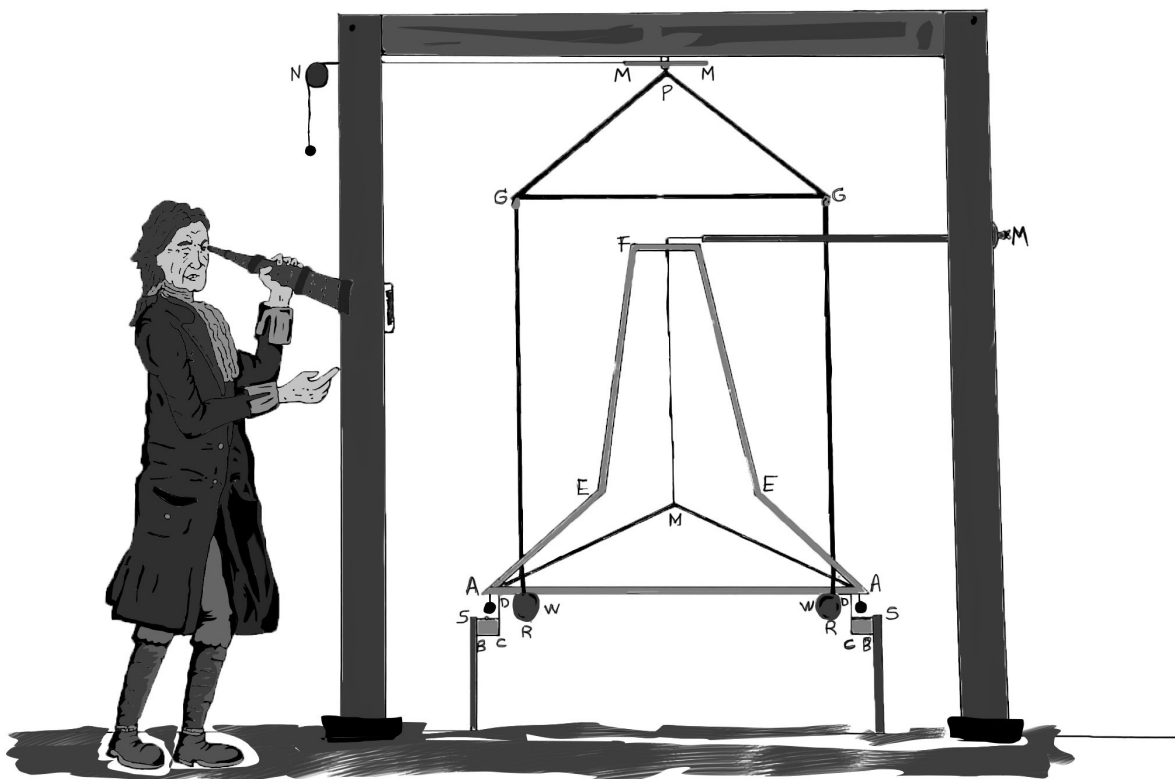


Pre·Impresos **18**

Estudiantes

Facultad de Ciencia y Tecnología. Departamento de Física - 2020-II • ISSN-E: 2323-0193 - ISSN 2539-0945



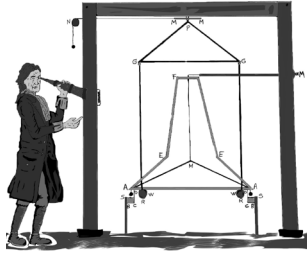
Reconstrucción histórica y experimental de la balanza de torsión de Cavendish

William Andrés Ovalle Ortiz
Licenciatura en Física



**UNIVERSIDAD PEDAGOGICA
NACIONAL**

Educadora de educadores



Pre·Impresos **18** Estudiantes

Leonardo Fabio Martínez Pérez
Rector

John Harold Córdoba
Vicerrector Académico

Maria Isabel González Terreros
Vicerrectora de Gestión Universitaria

Fernando Méndez Díaz
Vicerrector Administrativo y Financiero

Helberth Augusto Choachí González
Secretario General

Facultad de Ciencia y Tecnología
Departamento de Física

Steiner Valencia Vargas
Director Departamento

Sandra Milena Forero Díaz
Coordinadora Licenciatura

Juan Carlos Orozco Cruz
Supervisión de Contenido

Juan Carlos Bustos Gómez
Director Revista

© Universidad Pedagógica Nacional
© William Andrés Ovalle Ortiz

Portada
William Andrés Ovalle Ortiz

ISSN-E: 2323-0193
ISSN: 2539-0945

Diseño y Preparación editorial
Universidad Pedagógica Nacional
Grupo Interno de Trabajo Editorial 2022

Alba Lucía Bernal Cerquera
**Coordinadora Grupo Interno
de Trabajo Editorial**

Viviana Vásquez
Editora de Revistas

Bogotá, Colombia

Reconstrucción histórica y experimental de la balanza de torsión de Cavendish

Contenido

| | |
|---|----|
| Editorial | 3 |
| Resumen | 4 |
| Abstract | 4 |
| Introducción | 5 |
| Los fundamentos de la filosofía newtoniana en el experimento de Cavendish | 5 |
| ¿En qué consistió el experimento? | 6 |
| ¿Cómo realizó Cavendish el cálculo? | 7 |
| Reconstrucción experimental de la balanza de Cavendish | 8 |
| Cálculos para determinar la densidad de la tierra | 9 |
| Registro de datos y mediciones | 10 |
| Reflexiones y conclusiones | 12 |
| Referencias | 13 |

Presentación

La serie Pre·Impresos Estudiantes es una iniciativa editorial del Proyecto Comunicación y Publicaciones de la Facultad de Ciencia y Tecnología (FCT), cuya idea central es trabajar por la cualificación de la escritura, para dar visibilidad a la producción intelectual de los maestros en formación y en ejercicio. Con esta publicación se busca tender puentes entre los saberes especializados y la cultura en general, además de contribuir al fortalecimiento de la docencia y la investigación en educación.

Asimismo, constituye una estrategia de comunicación que posibilita la circulación adecuada de información y promueve la reflexión sobre temas y actividades inherentes a las ciencias, la matemática, la tecnología y su enseñanza. Con ella también se espera favorecer la integración de los equipos de trabajo y la construcción de relaciones de cooperación entre los diferentes miembros de la comunidad académica de la Facultad.

Estos aspectos, relacionados con los fines misionales de la Universidad Pedagógica Nacional, resultan pertinentes y significativos en la formación de nuevas generaciones de maestros e investigadores en pedagogía, que en su futura práctica profesional afrontarán diversos retos y circunstancias que el entorno social del país le plantea a la educación.

Información:

pre_impresos@pedagogica.edu.co
Facultad de Ciencia y Tecnología
Teléfonos: (57) (1) 3471190 / 5941894 Ext. 242

Editorial

Socialización del conocimiento científico

Si asumimos que la condición fundamental para aprender radica en tener motivos vitales para hacerlo, comprenderemos que la cuestión del saber también pasa por la construcción de sentido, a través de las palabras, pues el lenguaje es uno de los aspectos esenciales sobre los que se funda toda relación social. Así, gracias a la naturaleza dialógica y al potencial epistemológico del lenguaje, el conocimiento es en sí mismo una elaboración discursiva que se desarrolla a través del intercambio.

De suerte que podemos comunicarnos porque poseemos un mundo compartido que se desarrolló en una relación profunda con el lenguaje, al punto que no existe lo uno sin lo otro. Razón por la cual el lenguaje es inherente a la organización de toda la sociedad y ocupa una posición central en la vida social, por lo que está presente en todas las operaciones cognitivas, comunicativas y prácticas (Morin, 1992).

En este orden de ideas, la comunicación y el lenguaje tienen un papel relevante en la educación y, en particular, en el ámbito de la enseñanza de las ciencias, en relación con los procesos de explicación y comprensión de los fenómenos naturales. De ahí que las prácticas de enseñanza y aprendizaje de las ciencias entrañen el desarrollo de habilidades lingüísticas y comunicativas que, sin duda, aportan al fortalecimiento de la actividad pedagógica.

Ahora bien, en la voluntad de comunicar, se pone de manifiesto el reconocimiento del otro, ya que la comunicación es un proceso complejo, en el que la reciprocidad de la recepción es una condición indispensable. En consecuencia, cuando interactuamos no solo intercambiamos información, sino que construimos representaciones de nosotros mismos, de los otros y de las cosas que "hacemos", dando forma al mundo (Wolton,

2007). En otras palabras, la comunicación construye relaciones de fuerza e identificación entre las personas y define el lugar de cada individuo en un grupo (Sfez, 1991).

De esta forma, todo proceso de comprensión pasa por el lenguaje, ya que comunicación y lenguaje son aspectos fundamentales de los procesos de cognición, por lo que todos los problemas de la expresión lingüística también son problemas de la comprensión (Holton, 1985). La ciencia al ser una actividad social conlleva una intención comunicativa que se manifiesta en el interés por generar comprensión. Aspecto que pone de relieve el valor y pertinencia del conocimiento científico para la vida social y cultural de las colectividades en las que se produce y circula.

En este sentido, nos reafirmamos en la convicción de que la cualificación del dominio lingüístico es un aspecto constitutivo de la vida académica, porque la capacidad de interacción social se potencia a través del lenguaje. Aspecto relevante en la formación de futuros maestros de ciencias capaces de promover la comprensión a través de la interlocución y el debate de razones; de pensar su trabajo de manera autónoma y de proponer soluciones creativas a los retos que el entorno social le plantea al sistema educativo.

Juan Carlos Bustos Gómez
Director Pre-Impresos Estudiantes

Referencias

- Holton, G. (1985). *La imaginación científica*. Fondo de Cultura Económica.
- Morin, E. (1992). *El método 4. Las ideas*. Cátedra.
- Sfez, L. (1991). *Crítica de la comunicación*. Amorrortu Editores.
- Wolton, D. (2007). *Pensar la comunicación*. Prometeo.

Reconstrucción histórica y experimental de la balanza de torsión de Cavendish

William Andrés Ovalle Ortiz
dfwovalle064@gmail.com

Resumen

La curiosidad acerca de los movimientos celestes fue uno de los principales incentivos movilizados de la física que dio origen al desarrollo de diferentes experimentos que sentaron las bases de la física newtoniana. Con *Principia* de Newton se establece una ley de atracción general para explicar las causas del movimiento. Un siglo después, Cavendish se basa en esta ley para obtener el valor de la densidad de la Tierra y en ese proceso, de manera implícita, determina la constante fundamental de la gravitación. En este artículo se presenta una reconstrucción histórica y experimental de la balanza de torsión para determinar la densidad de la Tierra, comparando los datos obtenidos por Cavendish de manera experimental con los datos actualmente verificados y aprobados por la comunidad científica.

Palabras clave: Reconstrucción histórica, Montaje experimental, Balanza de torsión, Densidad de la Tierra.

Abstract

Curiosity about celestial motions was one of the main mobilizing incentives of physics that gave rise to the development of different experiments that laid the foundations of Newtonian physics. Newton's *Principia* establishes a general law of attraction to explain the source of motion. A century later, Cavendish relies on this law to obtain the value of the density of the earth, and in the process, he determines the fundamental constant of gravitation. This article presents a historical and experimental reconstruction of the torsion balance to determine the density of the earth, comparing the data obtained by Cavendish experimentally with the data currently verified and approved by the scientific community.

Key words: Historical reconstruction, Experimental setup, Torsion balance, Earth density.

Introducción

Este trabajo surgió en el contexto del seminario *Experimentos importantes en la historia de la física* que tenía por objetivo profundizar y reconstruir algunos experimentos que se han considerado importantes en el desarrollo de las ciencias y que sientan las bases de la física newtoniana, con el fin de poner de relieve el papel del experimento en la construcción de las leyes físicas y su rol en la práctica científica.

La decisión de estudiar el experimento de Cavendish tiene como motivación personal mi interés por la ciencia de los siglos XVII y XVIII, periodo en el cual hay una transición de un pensamiento religioso y místico hacia verdades generales basadas en la ciencia y la razón, contexto en el cual se inscribe la perspectiva del pensamiento newtoniano, que, por primera vez, plantea la posibilidad de entender el mundo a partir de principios universales, tema central de mi trabajo de grado.

El experimento de Cavendish dio respuesta al gran reto de medir la densidad de la Tierra, un tema recurrente en las reuniones de los científicos de la Royal Society en el siglo XVIII en Inglaterra. De igual modo, determinó el valor de la constante gravitacional G a partir de los datos obtenidos en su experimento. Constante de proporcionalidad que Newton mencionó en su tratado de los *Principia* y que, gracias a las observaciones de los científicos de la época, permitió establecer una ley general que develaba el secreto de la fuerza de atracción que mantiene en órbita a los planetas y que por primera vez relacionaba el movimiento de los cuerpos celestes con los terrestres. Esta ley de gravitación que explica la interacción entre los cuerpos fue fundamental para determinar la densidad de la Tierra. Debido a la gran precisión de los datos obtenidos por Cavendish, muy cercanos a los valores certificados por la comunidad científica en la actualidad, su experimento es considerado como muy importante en la historia de la física.

Con la intención de reconstruir la balanza de Cavendish, se hace una revisión histórica del estudio que dio origen a su experimento, se dedica un apartado a la construcción del montaje experimental y a los cálculos que le permitieron obtener el valor de la densidad de la Tierra y el valor de la constante gravitacional G . Luego, se describe cómo se realizó la reconstrucción de la balanza de torsión, la obtención de datos, la comparación entre los datos obtenidos en la reconstrucción de la balanza y los datos actuales certificados por la comunidad científica. Por último, se presentan las reflexiones y conclusiones obtenidas de esta experiencia, así como algunos aspectos a considerar en la reconstrucción de experimentos canónicos de la física con un propósito pedagógico.

Es importante mencionar que los cálculos que se muestran en este artículo no son los originales de Cavendish, su método estaba fundamentado en lenguaje geométrico, “se trata de un procedimiento de cálculo que podemos considerar característico de la época en que se hizo y que se basa en relacionar las magnitudes que se miden con las mismas magnitudes en otras situaciones similares” (Moreno, 2011, p. 5). Los cálculos que se realizan en este artículo se fundamentan en las ecuaciones establecidas en la física newtoniana y la relación que existe entre las variables que se presentan en el experimento.

Los fundamentos de la filosofía newtoniana en el experimento de Cavendish

La curiosidad por entender el movimiento de los cuerpos celestes ha sido uno de los temas más notorios en la historia de la física, en su libro *Principia*, Newton explica dichos movimientos a través de leyes universales. A propósito de este asunto —controversial para los filósofos naturales del siglo XVII—, en el año 1684, en una de las reuniones de la Royal Society, Edmund Halley,

Robert Hooke y el arquitecto Christopher Wren discutían acerca del problema de la trayectoria de los planetas y la fuerza que los mantenía girando alrededor del sol. En dicha conversación, Hooke les prometió establecer una ley matemática que mostrara la relación entre fuerza y distancia y la trayectoria elíptica de los planetas, tiempo después y sin obtener respuesta alguna de Hooke, Halley decidió visitar a su colega Isaac Newton en la Universidad de Cambridge para indagar acerca de la expresión matemática de esta relación. Al enterarse de la inquietud de Halley, Newton decidió compartirle una ecuación desarrollada entre los años 1665 y 1666, que atribuía el orden y la sincronía en el movimiento de los cuerpos celestes a la gravitación.

En el corolario II de los *Principia*, Newton menciona: “La fuerza de la gravedad que tiende hacia cualquier planeta es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia de los lugares al centro de dicho planeta” (Newton, 2016, p. 478). Hablar de dinámica celeste y perfección en la armonía de los planetas girando alrededor del sol también invitaba a pensar y a cuestionarse acerca de la forma de la Tierra, en relación con lo cual Newton plantea que toda la masa de la Tierra está concentrada hacia su centro, debido a la fuerza gravitatoria, lo que explicaba su forma esferoide achatada en sus polos.

Ahora bien, habiendo señalado algunos aspectos relevantes de la filosofía newtoniana, cabe preguntar por qué traemos a colación la ley de gravitación universal, cuál es su relación con el experimento de Cavendish y por qué resulta relevante la forma geométrica que Newton atribuye a la Tierra. Indudablemente, el experimento de Cavendish tuvo sus fundamentos en la filosofía newtoniana, ya que para realizar los cálculos de la densidad de la Tierra era necesario conocer su volumen o forma geométrica (como se verá más adelante en el análisis algebraico) y el principio de la acción a distancia entre cuerpos —atracción para el cuerpo que es atraído y de gravitación por el que lo atrae—.

Por otra parte, para realizar su montaje experimental y lograr medir la fuerza de atracción de cuerpos esféricos, por efecto de su gravedad, Cavendish se basó en la balanza de torsión utilizada por Charles Coulomb, diseñada en 1777, para medir la fuerza electrostática entre cargas eléctricas. Jhon Michell, profesor de Geología, filósofo natural de la Universidad de Cambridge y amigo cercano a Cavendish, tuvo la iniciativa de diseñar el experimento para medir la densidad de la Tierra, pero una enfermedad y su muerte posterior truncó su trabajo, por esta razón, Francis J. Hyde, miembro de la Royal Society, retomó el montaje y después de un tiempo se lo cedió a Cavendish (Moreno, 2000).

El experimento para pesar el mundo o, lo que es igual, la determinación de la densidad de la tierra tenía un inmenso atractivo para Cavendish, unía el principio de la gravitación universal con las ciencias de la geología y astronomía, que llegaron, muy probablemente por su amistad con Jhon Michael, a ocupar el primer plano en sus investigaciones de finales de 1780 en adelante. (McCormach, 1968, citado en Moreno, 2000, p. 5)

¿En qué consistió el experimento?

A partir del experimento original propuesto por Jhon Michell, Cavendish realiza algunas modificaciones en agosto de 1797: construyó su balanza para medir la densidad de la Tierra con una vara que pendía de un hilo muy delgado, en cada extremo colgaba una esfera pequeña, cada una de una masa aproximadamente de 0,70 kg; en su parte superior, la balanza tenía un eje que permitía girar dos brazos, cada uno sostenía una masa de plomo más grande que las anteriores, de aproximadamente 170 kg. También aisló su montaje de movimientos y fuerzas externas producidas por corrientes de aire y por la manipulación de la balanza, además, para lograr mayor precisión en la toma de las medidas dejó dos aberturas que le permitían observar el compor-

tamiento de la acción a distancia de las esferas pequeñas con relación a las esferas grandes, tal como se observa en la figura 1.

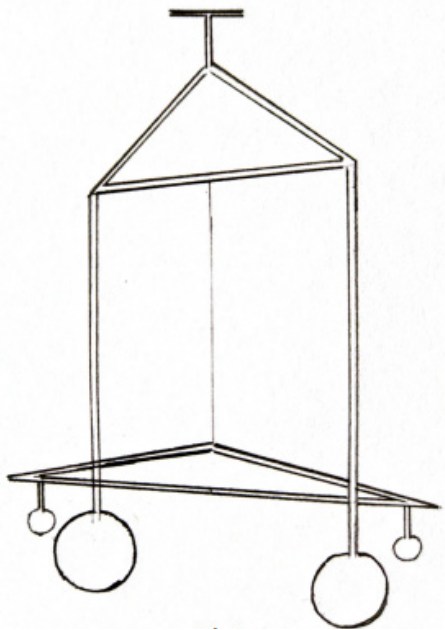


Figura 1. Balanza de torsión de Cavendish

Fuente: elaboración propia.

Después de varios experimentos, Cavendish agregó un espejo al centro de la varilla que sostiene las masas pequeñas, esto para medir con mayor precisión las diferentes posiciones angulares que barre la varilla al girar (ver figura 2).

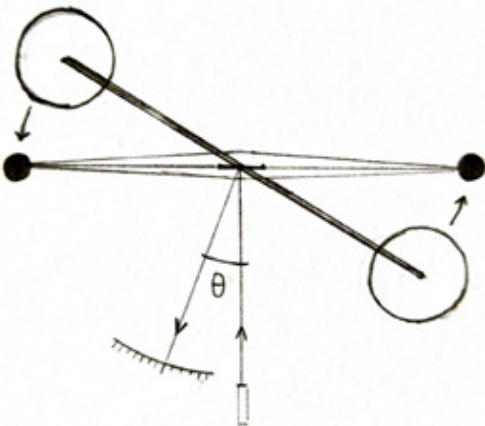


Figura 2. Balanza de torsión vista desde arriba

Fuente: elaboración propia.

Después de varias observaciones, concluyó que cuando las dos esferas grandes se encontraban cerca de las esferas pequeñas, estas eran atraídas y viceversa; debido a ese efecto la vara giraba. Igualando la fuerza de torsión con la fuerza de atracción entre las esferas y midiendo el ángulo que se desplazaba la vara desde su posición de equilibrio, obtuvo datos suficientes para calcular la masa de la Tierra. Teniendo la masa y el volumen de la esfera pudo calcular la densidad de esta.

¿Cómo realizó Cavendish el cálculo?

Recordemos que el objetivo era medir la densidad de la tierra, para esto era necesario hallar la masa del planeta Tierra. Así que los datos con los que contaba para hallarla era el radio de la Tierra y el valor de la gravedad. Partiendo de la aceleración g de un cuerpo al caer y de la ley gravitacional de Newton, Cavendish igualó estas dos ecuaciones y al despejar la masa de la tierra le surge una inquietud, ¿cuál es el valor de la constante de proporcionalidad de gravitación que Newton menciona en los *Principia*?

Teniendo el valor de la masa de plomo, la masa metálica pequeña y conociendo la distancia a la que se encontraban separadas una de otra, hallaría la fuerza de atracción entre ellas, dicha fuerza debía ser calculada con sumo cuidado, puesto que la atracción de las masas de tamaño normal es muy pequeña, "Cavendish estima, sin embargo, que la fuerza de atracción entre las pesas y las bolas es tan pequeña como la cincuenta millonésima parte de su peso" (Moreno, 2011, p. 2.), aproximadamente el peso de un grano de arena.

Para estimar la fuerza gravitatoria entre las dos masas, calculó el periodo de oscilación, así que consideró al péndulo, que forma la balanza de torsión, como un péndulo simple: "Un péndulo simple vertical no se parece mucho a una viga oscilante horizontal, pero resulta que

los dos 'péndulos' se describen matemáticamente de la misma manera al ser dos cuerpos que realizan un movimiento armónico simple" (Moreno, 2011, p. 3).

La barra suspendida del hilo fino sosteniendo las masas en cada extremo se aproximaría a las masas de plomo, la fuerza de gravedad haría que la barra oscilase y al cronometrar la oscilación de la barra se podría deducir la rigidez del hilo. Así obtuvo la información necesaria para calcular la fuerza de atracción gravitacional entre las masas. Además, Cavendish cambió la posición de las masas grandes, con el fin de que la barra girara en sentido contrario, para corregir asimetrías en el experimento y así lograr mayor precisión en sus mediciones.

Obteniendo el valor de la fuerza gravitacional entre las masas, encontró el valor de la constante gravitacional de Newton y, en consecuencia, pudo determinar el valor de la masa de la Tierra. Posterior a esto y asumiendo la forma esférica de la Tierra hallaría su volumen y el cociente entre estas le daría el valor aproximado de la densidad de la Tierra.

Así plantea Cavendish su tarea, tras 17 tomas de medidas, iniciadas el 5 de agosto de 1798 y finalizadas el 30 de mayo de 1799 y, hechos los cálculos pertinentes incluidos en el apartado "On the method of computing the Density of the Earth from these Experiments", concluyó que: "la densidad de la tierra es unas 5,48 veces mayor que la del agua". (Moreno, 2000, p. 7)

Las mediciones actuales, según el Sistema Internacional de Medidas, confirman el valor de la densidad de la tierra obtenida por Cavendish: $5,45 \text{ g/cm}^3$.

Reconstrucción experimental de la balanza de Cavendish

Los materiales que se utilizaron para reconstruir el experimento de Cavendish fueron dos esferas macizas de cemento de masa 4,5 kg, dos pelotas de espuma de masa 0,046 kg, un alambre de bisutería de 1,20 m de largo, un palo de balsa redondo de 0,325 m de largo, un soporte universal, una varilla adicional de soporte, una doble nuez (material de laboratorio para sujetar), papel periódico y un transportador.

En la reconstrucción del montaje, las dos esferas de cemento hacen referencia a las esferas de plomo, las pelotas de espuma a las esferas metálicas pequeñas y el palo de balsa a la varilla que suspende del hilo de bisutería. Se utilizó un palo de balsa, ya que al ser más ligero que una varilla de aluminio o metal no ejercería una atracción sensible hacia las pelotas de espuma y estas solo interactuarían con las masas de cemento.

Una vez relacionados los materiales del montaje al diseño original de Cavendish, se procede a reconstruir el experimento. En la superficie de la varilla de soporte colocamos la nuez doble para unir la otra varilla de manera horizontal y suspendimos el hilo de bisutería de ella aproximadamente a unos 0,2 metros, que estaría sujetado de manera segura y consistente al palo de balsa, y justo en el centro de este, permitiendo que se comporte como el eje de rotación del palo (el menor desplazamiento del hilo al centro del palo generará un desequilibrio en la balanza, se debe asegurar el hilo lo mejor posible), las pelotas de espuma deberán estar sujetas a los extremos del palo, todo esto, tal cual como se muestra en la figura 3.

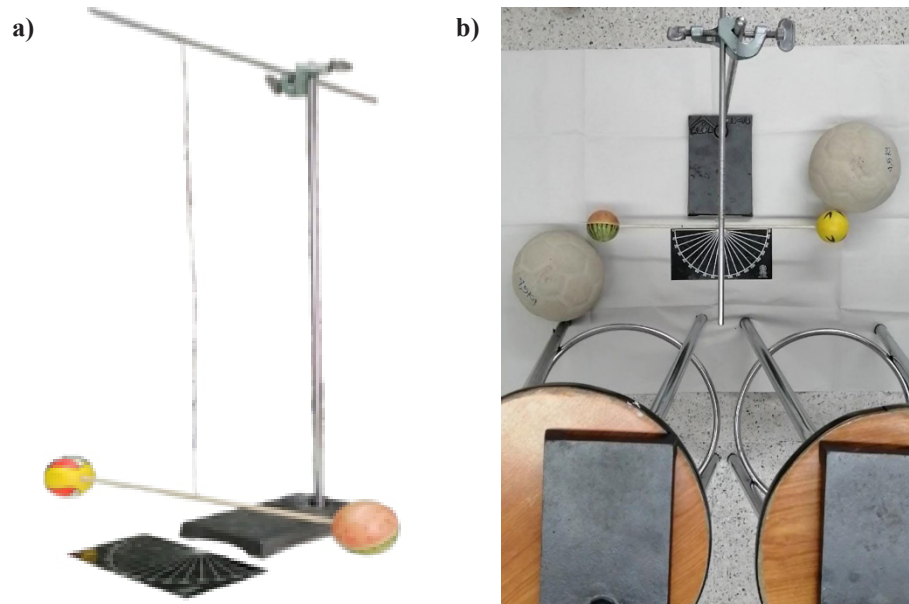


Figura 3. a) Reconstrucción de la barra de torsión de Cavendish. b) Vista desde arriba de la barra e interacción de las esferas de cemento

Fuente: elaboración propia.

Cálculos para determinar la densidad de la tierra

En el análisis inicial para determinar la masa de la tierra, según el razonamiento de Cavendish, descrito anteriormente, se considera la aceleración g de un cuerpo de masa m que cae, por la ley de gravitación universal:

$$F_g = mg \quad (1) \quad \text{y} \quad F_g = G \frac{M_T m}{R_T^2} \quad (2)$$

Igualando (1) y (2)

$$\frac{R_T^2 g}{G} = M_T \quad (3)$$

Donde M_T es la masa de la tierra, R_T el radio de la tierra y G la constante gravitación.

la ecuación (3) muestra que, conocidos los valores del numerador, haría falta la constante G para poder hallar a M_T . Así que es necesario determinar en el montaje experimental la fuerza F' de atracción entre las esferas y relacionarla con M_T .

Conociendo el valor de las masas (esfera de cemento y pelota de espuma) y la distancia que las separa, se obtiene la fuerza F' . El movimiento que experimenta el palo de balsa, se considera un movimiento armónico simple, así que es necesario calcular la *constante k de la torsión del hilo*. Para ello se realiza el siguiente proceso: se suspende el hilo con una masa m' (en el montaje se utilizó una masa de forma cilíndrica de 1003,5 g), de manera que la única fuerza que actúa sobre la masa en su posición de equilibrio sea su peso.

Para un movimiento armónico simple el periodo está dado por:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m'}{k}} \quad (4)$$

entonces, k :

$$k = \frac{4\pi^2 m'}{T^2} \quad (5)$$

El proceso para obtener el periodo del péndulo de torsión se halla al hacer girar la masa m' cierto ángulo, luego se suelta y el sistema "hilo-masa" tiende a ir a su posición de equilibrio haciendo rotar la masa y realizando un movimiento contrario al inicial.

Para determinar las oscilaciones de rotación de la masa, se marca en la parte superior una línea que respecto a otra línea dibujada en una hoja ubicada en la parte inferior y alejada de la masa m' para que no perturbe el movimiento de rotación y permita contar las veces que pasa por la línea, cronometrando el tiempo hasta que quede en equilibrio.

Registrando los datos y repitiendo el experimento hasta obtener el periodo promedio de oscilación del péndulo, se obtiene que $k = 2,2 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-2}$ (tabla 2).

Para la balanza de torsión la fuerza F' entre las masas está dada por:

$$F' = \frac{k\theta}{l} \quad (6)$$

Donde k es la constante de torsión, θ es el ángulo de rotación del palo de balsa, l es la distancia del eje al centro de la pelota de espuma.

En términos de la ley de gravitación universal F' estará dada por:

$$F' = G \frac{m_1 m_2}{r^2} \quad (7)$$

Donde m_1 y m_2 corresponden al valor de la esfera de cemento y a la pelota de espuma respectivamente y r a la distancia que las separa, despejando G de (7), se obtiene:

$$G = \frac{r^2 F'}{m_1 m_2} \quad (8)$$

Sustituyendo valores en la ecuación (3), obtenemos M_T y considerando la Tierra de forma esférica, la densidad de la Tierra, lo que es igual a ρ_T , estará dada por la expresión:

$$\rho_T = \frac{3M_T}{4\pi R_T^3} \quad (9)$$

Registro de datos y mediciones

Tabla 1.

Constantes para la medición de masa y la densidad de la Tierra

| Gravedad en la Tierra g | Radio de la Tierra R_T |
|---------------------------|-------------------------------|
| 9,8 m/s^2 | 6,371 $\times 10^6 \text{ m}$ |

Tabla 2.

Datos para determinar la constante k de la torsión del hilo

| 3 vueltas | | | | |
|--|------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------|
| Ángulo (radianes) | Tiempo (s) | Oscilaciones | Frecuencia (s ⁻¹) | Periodo (s) |
| 4π | 41 | 11 | 0,26 | 3,72 |
| | 40 | 10 | 0,25 | 4 |
| | 41 | 9 | 0,21 | 4,55 |
| | Promedio | | | |
| | 40,66 | 10 | 0,24 | 4,094 |
| 5 vueltas | | | | |
| Ángulo (radianes) | Tiempo (s) | Oscilaciones | Frecuencia (s ⁻¹) | Periodo (s) |
| 10π | 41 | 9 | 0,22 | 4,44 |
| | 40 | 10 | 0,24 | 4,1 |
| | 41 | 9 | 0,22 | 4,44 |
| | Promedio | | | |
| | 40,66 | 9,33 | 0,24 | 4,32 |
| 7 vueltas | | | | |
| Ángulo (radianes) | Tiempo (s) | Oscilaciones | Frecuencia (s ⁻¹) | Periodo (s) |
| 14π | 40 | 9 | 0,225 | 4,44 |
| | 41 | 10 | 0,24 | 4,1 |
| | 41 | 9 | 0,21 | 4,55 |
| | Promedio | | | |
| | 40,66 | 9,33 | 0,22 | 4,36 |
| Promedio general | | | | |
| Tiempo (s) | Oscilación | Frecuencia (s ⁻¹) | Periodo (s) | |
| 40,5 | 9,55 | 0,23 | 4,26 | |
| Constante de torsión k: $2,2 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{s}^2$ | | | | |

Tabla 3.

Datos para determinar la fuerza F' de atracción entre m_1 y m_2

| Fuerza F' (N) | Ángulo de rotación θ |
|----------------------|-----------------------------|
| $1,6 \cdot 10^{-3}$ | 0,12 |
| $2,30 \cdot 10^{-3}$ | 0,17 |
| $1,76 \cdot 10^{-3}$ | 0,13 |
| $1,6 \cdot 10^{-3}$ | 0,12 |
| $1,6 \cdot 10^{-3}$ | 0,12 |
| Promedio | |
| $1,78 \cdot 10^{-3}$ | 0,132 |

$$m_1 = 4,5 \text{ kg}, m_2 = 0,046 \text{ kg},$$

$$l = 0,1625 \text{ m}, r = 0,015 \text{ m}$$

Nota: Anteriormente, se mencionó que, en el diseño original de Cavendish, el ángulo de rotación se mide por la desviación de un haz de luz reflejado de un espejo unido a la suspensión vertical. En el montaje de reconstrucción, se ubicó en la base del soporte universal un transportador (utilizado en laboratorios de óptica, ver figura 3) y con ayuda del dispositivo móvil, se graba la torsión de la balanza para registrar el ángulo desde la superficie del soporte universal.¹

Tabla 4.

Valores obtenidos en la reconstrucción del experimento de Cavendish

| $G \left(\frac{Nm^2}{kg^2} \right)$ | M_T (kg) | P_T (g/cm ³) |
|--------------------------------------|----------------------|----------------------------|
| $9,5 \times 10^6$ | $4,9 \times 10^{21}$ | $4,0 \times 10^3$ |

Tabla 5.

Constantes universales aceptadas y avaladas por la comunidad científica

| $G \left(\frac{Nm^2}{kg^2} \right)$ | M_T (kg) | P_T (g/cm ³) |
|--------------------------------------|----------------------|----------------------------|
| $6,5 \times 10^{-11}$ | $5,9 \times 10^{24}$ | 5.515 |

Reflexiones y conclusiones

Este artículo se fundamentó en la comprensión de conceptos de la física newtoniana, entre los que se asume como protagonista a la gravitación para calcular el “peso” de la Tierra. Asimismo, se mencionan situaciones relevantes del contexto social de la época, con la intención de evidenciar que la ciencia es una actividad humana, influenciada por los eventos y sucesos históricos, y que estos han tenido una influencia significativa en los modelos explicativos planteados para la comprensión del mundo. Por otra parte, la reconstrucción del experimento de Cavendish en el salón de clase es una manera de mostrar que la ciencia es interesante y de despertar la curiosidad por conocer y descubrir el mundo que nos rodea.

La reconstrucción y diseño de este experimento muestra los parámetros, procesos y materiales que hicieron posible calcular la densidad de la tierra e invita a los docentes de ciencias a utilizar este artículo para diseñar una práctica de laboratorio que se ajuste a los cursos de física en secundaria y nivel universitario. La actividad experimental permite poner de manifiesto diferentes habilidades y razonamientos que intervienen en el quehacer científico. Igualmente, se espera que proporcione al profesor una estrategia para abordar experimentos que han sido claves en el estudio de la física clásica y que al estudiante le permita inferir juicios a partir de situaciones históricas de la ciencia, formular preguntas específicas sobre aplicaciones de teorías científicas y su relación con la experimentación, así como utilizar las matemáticas para modelar

¹ El montaje experimental se realizó en el laboratorio de física del colegio Madre Matilde ubicado en Bogotá, Colombia. Para ver el montaje y el efecto de las fuerzas entre las esferas puede ir al siguiente enlace: https://drive.google.com/file/d/1b2Us0xj_2Jm9wBY93xniYIV9ZI3WeH/view?usp=sharing, la reproducción del video esta 400% velocidad original del clip ya que el efecto de giro entre las esferas no es evidente en reproducción normal.

en forma de ecuaciones los fenómenos o experimentos de un cierto nivel de complejidad y de abstracción como los que son objeto de estudio en las ciencias.

También es importante mencionar las dificultades que surgieron durante la realización de la experiencia descrita en este artículo, la reconstrucción del experimento de Cavendish. Entre ellas se cuentan dificultades técnicas en la construcción del montaje relacionadas con el tiempo en el que se desarrolló.

Aunque se situó un dispositivo electrónico para grabar los efectos transcurridos en el experimento y la manipulación del montaje (la posición del hilo en la ubicación del eje de simetría de la barra, la determinación de la constante de torsión, la medida del ángulo de rotación, entre otros), se encontró que factores externos como corrientes de aire, movimientos bruscos, cambios de presión o temperatura alteraban el movimiento de torsión de la balanza durante el procedimiento de obtención de los datos.

Por otra parte, la diferencia en los materiales y el tiempo también generaron alteraciones (perceptibles en las imágenes del artículo) que no corresponden a las condiciones particulares de cada montaje del contexto (dadas la época y los recursos). Las consideraciones anteriores explican por qué razón a Cavendish le tomó aproximadamente dos años obtener los datos por medio de observaciones de prueba y error de su balanza de torsión, aunque los registros disponibles no especifican qué cambios pudo haber realizado para introducirle mejoras. Esto permite concluir que la reconstrucción de un montaje experimental siempre estará sujeta a mejoras para lograr una mayor precisión, no solo en aparatos que pueden arrojar un dato más fiable que el anterior, sino también en la

modificación del montaje experimental mismo. Por estas razones, queda la intención de plantear un nuevo montaje que permita mayor exactitud en la toma de las respectivas medidas.

Para finalizar, los datos que muestran las tablas 4 y 5 permiten realizar la comparación de los valores obtenidos en la reconstrucción del experimento de Cavendish y los valores aceptados y avalados por la comunidad científica en la actualidad. Se obtiene que el valor calculado de la masa de la tierra M_T en el experimento es de $3,45 \times 10^{-5}$ veces la masa de la tierra, con un error por defecto de 0,9%, la constante gravitacional obtenida con los datos del montaje experimental es de 29.692,3 veces el valor de G y la relación entre la densidad obtenida y la densidad de la tierra es de 34,4 veces la densidad real de la tierra, lo cual corrobora un error absoluto por defecto de 33,45% debido a las incertidumbres generadas en la medición y a los recursos utilizados, por esto, se invita a reconsiderar las ecuaciones utilizadas en el artículo y, si es posible, llegar a los resultados reales por medio de otros cálculos matemáticos.

Referencias

- Moreno, F. (2011). Un experimento para pesar el mundo. *Los Lagartos Terribles. Apuntes, Escritos y Ensayos Científicos*. <http://www.escritoscientificos.es/trab21a40/pesotierra/pesotierra.htm>
- Moreno, A. (2000). "Pesar" la Tierra: test newtoniano y origen de un anacronismo. *Enseñanza de las Ciencias*, 18(2), 319-332. <https://ensciencias.uab.cat/article/view/v18-n2-moreno/1956>
- Newton, I. (2016). *Principios matemáticos de la filosofía natural* [Trad. Eloy Rada]. Editorial CASC.

ACERCA DE LA SERIE PRE•IMPRESOS

La serie *Pre-Impresos Estudiantes* es un proyecto de la Facultad de Ciencia y Tecnología (FCT) de la Universidad Pedagógica Nacional que divulga a través de la comunicación escrita la producción intelectual de los autores, destacando sus experiencias y reflexiones respecto de los temas inherentes a sus campos disciplinares específicos y su enseñanza. Por tanto, configura un espacio de visibilidad y reconocimiento público del trabajo de los maestros en formación y en ejercicio adscritos a la FCT.

La escritura en el ámbito de las ciencias y la tecnología

La comunicación es un aspecto fundamental de los procesos de cognición que construye relaciones de fuerza e identificación entre las personas y define el lugar de cada individuo en un grupo. Así, toda relación social se funda en el intercambio de ideas, pues cuando hablamos y escribimos también damos forma al mundo. Por tanto, la conformación de comunidades académicas tiene un carácter social y comunicativo, proceso en el que la palabra escrita contribuye a la socialización de las ideas; dado que, la comunicación de la ciencia se realiza en lengua natural.

¿Qué es un preimpreso?

Los Pre-impresos son una publicación previa que se utilizan en comunidades académicas para difundir el trabajo de sus miembros y contribuir a la formación de futuros investigadores.

Origen

Este proyecto editorial también constituye un espacio académico de formación y cualificación docente, que se inspiró en un trabajo similar que realiza el grupo *Física y Cultura* del Departamento Física de la FCT, con trabajos de profesores, desde principios de la década de 1990, con el fin de promover la circulación de las ideas de los profesores adscritos a este grupo de investigación.

Objetivos

Pre-Impresos Estudiantes promueve el fortalecimiento de la actividad académica en dos dimensiones; como **proceso de formación escritural** de los futuros maestros de ciencias, matemática y tecnología, y como **iniciativa editorial** que se traduce en una publicación seriada que divulga la producción intelectual de los estudiantes de la FCT.

El carácter del proceso realizado y el acompañamiento escritural que se brinda desde el proyecto hacen de esta experiencia una actividad académica de formación docente, con proyección en la práctica pedagógica e investigativa que contribuye a:

- Apoyar los fines misionales de la Universidad de investigar, producir y difundir conocimiento profesional docente, educativo, pedagógico y didáctico, además de propiciar una interacción con la sociedad para aportar a la construcción de nación.
- Propiciar una mayor consciencia lingüística, al poner de relieve la relación entre ciencia y lenguaje en el proceso de construcción textual, que requiere el desarrollo de la capacidad discursiva y habilidades comunicativas.
- Fortalecer la comunidad académica de la Facultad, al visibilizar las líneas de trabajo de los grupos de investigación de las diferentes unidades académicas.

Características

Pre-Impresos Estudiantes es un proyecto institucional de carácter extra curricular en el que pueden participar los estudiantes y egresados de los diferentes programas de la Facultad que quieran vincularse, ya sea, de manera individual o en grupo. El proceso de acompañamiento que se brinda exige compromiso y disciplina de los participantes, para la cualificación de su proceso escritural. Los temas a trabajar pueden cobijar una amplia gama de aspectos relacionados con las disciplinas —las ciencias, la matemática, la tecnología— y su enseñanza, así como, con la educación en general, ya sean reflexiones de carácter epistemológico o pedagógico, entre otras posibilidades.

Se puede participar con un amplio tipo de formatos de escritura, como por ejemplo: artículos, ponencias, módulos didácticos, cartillas, ensayos, crónicas, experiencias de aula, diarios, informes de investigación, por solo mencionar algunos. El proceso de elaboración, edición y publicación final de cada documento se ajusta al tiempo requerido por los autores para culminar esta labor. La publicación se hace en forma de cuadernillos en formato digital e impreso. La convocatoria es permanente.

Sobre el autor



William Andrés Ovalle Ortiz. Licenciado en Física, línea de investigación "Enseñanza de las ciencias desde una perspectiva cultural", de la Universidad Pedagógica Nacional (2020). En su ejercicio profesional ha participado en diferentes proyectos de investigación acerca de la relación entre la física y el lenguaje matemático de las ciencias, enfocado en la educación media. Participó en el Segundo Congreso Internacional de Ciencias Naturales, organizado por el Gimnasio San Ángelo (2017), con la ponencia *Simulación de una reacción en cadena de una fisión nuclear*. Así como en el IV Coloquio de Posgrados en Docencia de las Ciencias: la Sistematización de Experiencias de Aula en la Enseñanza de las Ciencias Naturales (septiembre del 2020), Universidad Pedagógica Nacional. Es autor del libro *Movimiento y gravitación: fragmentos de la vida de un genio*, próximo a publicarse. Sus trabajos de investigación en el aula los realiza desde la perspectiva de la enseñanza de las ciencias como actividad humana que pone de relieve el papel de la historia en la recontextualización de saberes para la enseñanza de las temáticas y conceptos de la física. Actualmente, labora como docente de física y matemáticas en el nivel de educación media del sector privado en Bogotá, Colombia.