

Física en la playa con *Google Earth*TM

Physics on the Beach with *Google Earth*TM

Enith Vanessa Yanez¹, Moisés Gualapuro¹, Alexander Tirira¹ y Fabrizio Logiurato^{1,2}

¹Departamento de Ciencia Básica, Universidad Regional Amazónica Ikiam, vía Muyuna Km 7, CP 150150, Tena. Ecuador.

²Departamento de Física, Universidad de Trento, vía Sommarive 14, CP38123, Povo, Trento. Italia.

REVISTA
DE
ENSEÑANZA
DE LA
FÍSICA

E-mail: fabrizio.logiurato@unitn.it

(Recibido el 20 de agosto de 2018, aceptado el 29 de octubre de 2018)

Resumen

En este artículo presentamos una propuesta para la enseñanza de las ondas en física, basada en el software gratuito de *Google Earth*. Aprovechando que éste es un gran repositorio de imágenes satelitales interesantes, utilizamos las fotografías de este recurso para ilustrar la física de las ondas del agua y el principio de Huygens en fenómenos naturales que ocurren en los ríos y el mar. Con física básica, explicamos algunas de las principales características de las playas y las propiedades de las ondas en las cercanías a las orillas. El objetivo de estas sugerencias es lograr que la física de ondas sea un tema más atractivo para los estudiantes de bachillerato y universidad, asimismo que el proceso de aprendizaje en el aula sea más participativo.

Palabras clave: Física educativa; Enseñanza de las ondas; *Google Earth*.

Abstract

In this paper, we present a proposal for teaching wave physics based on free software *Google Earth*. Taking advantage of its wide source of interesting satellite images, we use *Google Earth* photos to illustrate the physics of water waves and the Huygens principle in natural phenomena that occurs on sea and rivers. With basic physics, we explain the main characteristics of some beach structures and waves properties near the shore. The aim of this suggestion is to make wave physics a subject more attractive to high school and university students and the process of its learning more participative.

Keywords: Physics Education; Physics of Waves; *Google Earth*.

I. INTRODUCCIÓN

Google Earth es una amplia fuente de interesantes ilustraciones de varios fenómenos naturales. Sus imágenes son una valiosa herramienta para la educación, no solo para la enseñanza de la geografía y la geología, sino también de la física. En particular, en este artículo sugerimos cómo *Google Earth* se puede usar para introducir en una forma atractiva la física de las ondas y el principio de Huygens para estudiantes de escuela secundaria y los primeros años de universidad.

La física de las ondas en la superficie del agua, es generalmente muy complicada: las ondas en el agua son habitualmente usadas como ejemplos de propagación ondulatoria en los cursos básicos de física, pero como Feynman escribió “*ellas son el peor ejemplo posible, porque no se comportan como el sonido y la luz; tienen todas las complicaciones que las ondas pueden tener*” (Feynman y otros, 1989). De hecho, pese a todos los esfuerzos teóricos, hasta el momento no se tiene un único modelo matemático o una ecuación general que logre describir el comportamiento de las ondas del agua en cualquier situación. Se utilizan diferentes fórmulas dependiendo del caso.

Por ejemplo, el agua es un líquido incompresible a valores de presión del orden de una atmósfera, como en el espejo de los cuerpos de agua. Entonces, una onda en su superficie no puede ser completamente transversal. Mientras la onda se propaga, el agua debe moverse desde el valle a la cresta y las partículas de agua cerca de la superficie se mueven en círculos. A esto se debe que el perfil de la onda no sea completamente sinusoidal, sino semejante a una trocoide (figura 1) (Bascom, 1964).

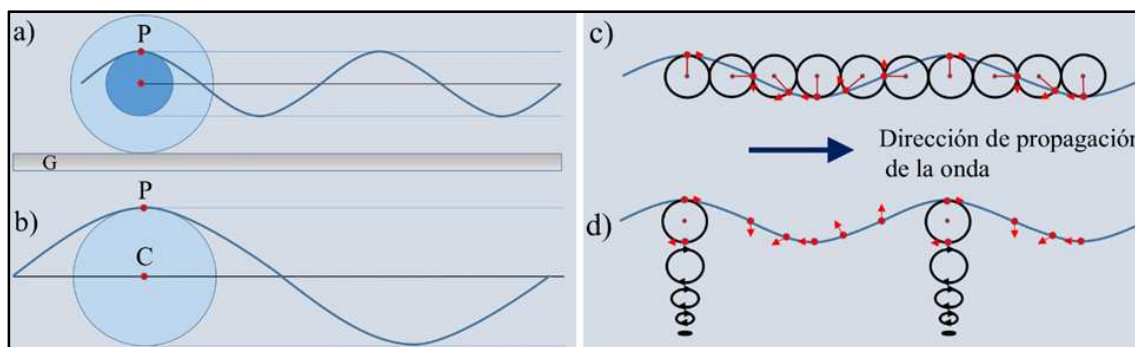


FIGURA 1. a) Un trocoide se puede representar como la curva trazada por un punto P en el círculo interno, a medida que el círculo exterior rueda a lo largo de la base G. **b)** Una curva sinusoidal es equivalente a la curva dibujada por un punto P sobre la circunferencia, cuando el punto se mueve con una frecuencia angular constante y su centro C se mueve con velocidad uniforme a lo largo de la línea recta. **c)** En la onda, las partículas de agua se mueven circularmente. En particular, cerca de la cresta, éstas se desplazan en el sentido de la dirección de propagación de la onda, y cerca del valle en la dirección opuesta. **d)** Incluso bajo la superficie, las partículas de agua se mueven en un círculo, con una amplitud que disminuye con la profundidad por efecto de la fricción entre las partículas y el fondo de la playa.

Determinar solo la velocidad de una onda sobre la superficie del agua no es una cuestión teórica sencilla (Bascom, 1964; Barber, 1969). Por ejemplo, si la longitud de onda λ es grande (mayor a un metro), la velocidad de fase v_{fase} de una onda aproximadamente sinusoidal es:

$$v_{fase} = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi} \cdot \frac{e^{+2\pi d/\lambda} - e^{-2\pi d/\lambda}}{e^{+2\pi d/\lambda} + e^{-2\pi d/\lambda}}} = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi} \tanh\left(2\pi \frac{d}{\lambda}\right)} \text{ Onda de gravedad,} \quad (1)$$

donde la velocidad de fase se define como $v_{fase} = \lambda/T$, T es el periodo de la onda, g es la aceleración de la gravedad y d es la profundidad del agua. Este tipo de onda, donde la gravedad juega un papel importante, se llama onda de gravedad.

Si la profundidad d es mucho mayor que λ , la Ec. (1) se puede aproximar con una relación donde la velocidad de fase es proporcional a la raíz cuadrada de la longitud de onda:

$$v_{fase} = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi}} \text{ Ondade gravedad en agua profunda, } (d \gg \lambda) \quad (2)$$

Según la Ec. (2), la velocidad de la propagación depende de la longitud de onda: ondas con mayor λ avanzan con mayor rapidez respecto de las que tienen una menor longitud de onda. Entonces, cuando el viento o los barcos en mar abierto producen ondas, las ondas con una λ más grande llegan mucho antes a la playa, contrario a lo que ocurre con las ondas con menor longitud de onda.

Por ejemplo, en la figura 2a se pueden observar las ondas generadas por un barco que se aproximan a la orilla. La separación entre los frentes de ondas, que se producen por la perturbación causada por el bote, se incrementa con la distancia del origen de la perturbación, porque ondas con λ más grande viajan más rápidamente. El movimiento del bote crea una sucesión de ondas circulares, que por su superposición forman un disturbio en forma de “V” en la superficie del agua, una especie de onda de choque. Esta perturbación puede ser considerada como un paquete de ondas constituido por ondas con diferente longitud y velocidad, con frentes de onda que se separan con el tiempo, aumentando su mutua distancia. El característico patrón de estela que se forma (figura 2b) fue explicado por primera vez por Lord Kelvin y es conocido como la estela de Kelvin (Barber, 1969; Lighthill, 2001).

Para determinar la velocidad de fase de las ondas de gravedad con λ grande, cuando estas se propagan en aguas poco profundas, se puede utilizar otra fórmula aproximada de la Ec. (1). En particular, cuando la profundidad d es mucho menor que la longitud de onda y el efecto de la fricción del fondo del mar llega a ser importante, la velocidad de fase de la Ec. (1) se aproxima con la relación:

$$v_{fase} = \sqrt{gd} \text{ Ondas de gravedad en agua poco profunda, } (d \ll \lambda) \quad (3)$$

Por lo tanto, en aguas poco profundas, todas las ondas viajan con la misma velocidad, ya que esta depende únicamente de la profundidad del agua. Así, la velocidad de la onda disminuye cuando se aproxima a la orilla a medida que la profundidad del mar disminuye.

Si la onda es de λ pequeña, es decir menor de una longitud crítica $\lambda_c = 1.7 \text{ cm}$, como las que se pueden formar en una cubeta de ondas o en un tanque, la principal fuerza que gobierna la perturbación es la tensión superficial (Lamb, 1975). Para estas ondas, conocidas como ondas capilares, cuando el efecto de fricción con el fondo es despreciable, en general, cuando λ es mucho mayor que d , la velocidad de fase se puede aproximar con la siguiente relación:

$$v_{fase} = \sqrt{\frac{2\pi\tau}{\lambda\rho}} \quad \text{Ondas capilares, } (d \ll \lambda \leq 1.7 \text{ cm}) \quad (4)$$

donde τ es la tensión superficial y ρ la densidad del agua. En este tipo de ondas, la velocidad se incrementa cuando la longitud de onda disminuye. En la figura 3, se observa, por ejemplo, que los frentes de onda más cercanos entre ellos, se encuentran justo al frente de la perturbación. Esto indica que las ondas de λ pequeña viajan más rápidamente que ondas con λ más grande (Logiurato, 2014).

Sin embargo, en general, para una perturbación en la superficie del agua, las fuerzas que hacen que el sistema tienda a la posición de equilibrio son la fuerza de gravedad y la tensión superficial, por lo que realizar la descripción completa es aún más compleja, teniendo que incluir los dos efectos (Clark, 1959).

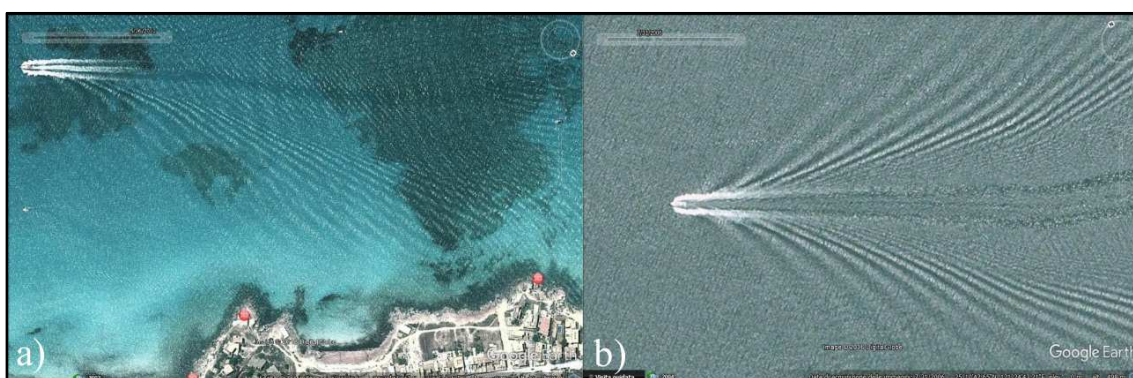


FIGURA 2. Estela de un bote. Si la fuerza de gravedad es la que domina el comportamiento de la onda, las ondas en agua profunda que tienen λ más grande viajan más rápidamente. Esto causa que la separación entre el frente de onda se incremente con la distancia de la perturbación original. a) Mallorca, España, 05/26/2012, coordenadas: $39^\circ 21' 07.76''\text{N}$, $2^\circ 58' 14.12''\text{E}$. b) Taiwán, 07/31/2006, coordenadas: $25^\circ 10' 42.65''\text{N}$, $121^\circ 24' 43.21''\text{E}$.

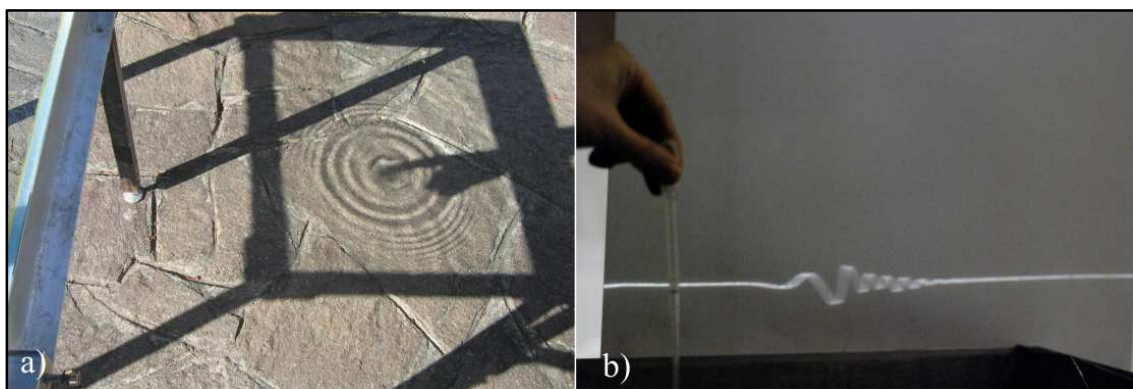


FIGURA 3. Cuando se produce una perturbación en la superficie de un tanque, las ondas con λ pequeñas se presentan al frente de la perturbación. Esto indica que, cuando las fuerzas de capilaridad dominan el comportamiento de las ondas, de acuerdo a la Ec. (4), aquellas con λ más pequeñas viajan más rápido. a) Frente de onda circular que proviene de una perturbación en una cubeta de ondas. b) Perfil de un paquete de ondas viajando en una cubeta de ondas.

Pese a la dificultad de la materia, muchos fenómenos que ocurren en la superficie del agua pueden ser descritos cualitativamente con los mismos principios de física de ondas enseñados en la escuela secundaria y con los conceptos introducidos anteriormente.

Como se sugiere en Ryder (2007), Aguiar (2009) y Logiurato (2012), el software libre *Google Earth* (<https://www.google.es/intl/es/Earth/index.html>) puede ser una valiosa herramienta en el aprendizaje de la física básica: los jóvenes estudiantes usualmente muestran un mayor interés en las imágenes de ondas

reales del mar, lagos y ríos, respecto de las que se observan en los libros, que generalmente son fotografías de experimentos en cubeta de ondas o ilustraciones gráficas.

Por esta razón, pensamos que las imágenes de *Google Earth* pueden ayudar a la introducción efectiva de algunos conceptos fundamentales de la física de ondas. Por ejemplo, se puede encontrar un sinnúmero de magníficas fotografías del fenómeno de reflexión, refracción, difracción e interferencia de ondas.

Una breve versión introductoria en inglés, de la presente propuesta de enseñanza, se puede encontrar en Logiurato (2012). Introducciones simples sobre la física de ondas en el agua se encuentran en las referencias de Bascom (1964) y Barber (1969). Para un estudio con un mayor grado de profundidad se pueden consultar los libros de Coulson (1977) y Stoker (1957). Presentaciones generales sobre las propiedades de las ondas están en los trabajos de Pierce (1981), Crowell (2006) Giambattista y otros, (2010) y Schiller (2011).

II. EL PRINCIPIO DE HUYGENS EN *GOOGLE EARTH*

De acuerdo al principio de Huygens (French, 1971), un frente de onda, que se propaga en un medio, durante su avance golpea nuevos puntos de éste. Estos puntos se transforman en nuevos lugares de disturbio, originando otras ondas de tipo circular llamadas secundarias. La amplitud de una onda secundaria es máxima en la dirección de propagación del frente de la perturbación principal y disminuye a cero cuando alcanza una dirección perpendicular a ésta. Podemos imaginar que el frente de una onda se forma por la suma de muchas ondas secundarias de Huygens.

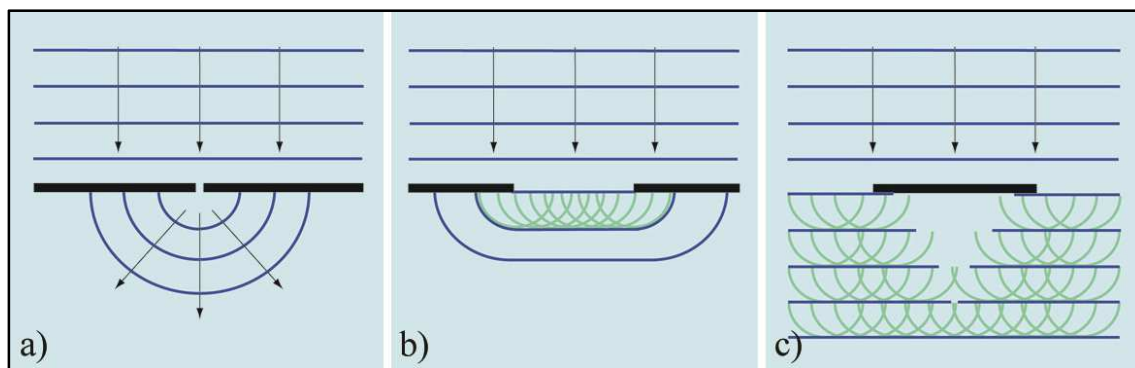


FIGURA 4. Aplicación del principio de Huygens para ilustrar la difracción de una ranura, en a) y b); y un obstáculo en c). Un frente de onda se puede considerar como la envolvente de las ondas secundarias de Huygens.

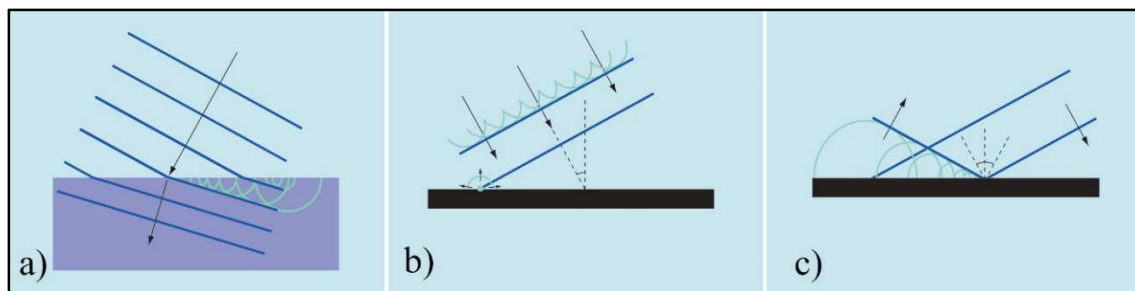


FIGURA 5. El principio de Huygens empleado para describir la refracción a), y reflexión, b) y c), de ondas.

Así, podemos describir el fenómeno de difracción de las ondas cuando éstas atraviesan una abertura o cuando superan un obstáculo, como en la figura 4. Observamos este fenómeno cuando la longitud de onda es comparable con las dimensiones del obstáculo.

Con el principio de Huygens se pueden, también, describir los fenómenos de refracción y reflexión de las ondas. Cuando las ondas secundarias de Huygens entran en diferente medio o, en el caso de las ondas de la superficie del agua, entran en una región donde la profundidad es diferente, cambian su velocidad, causando una variación de dirección en el frente de onda. Este efecto se conoce como refracción (figura 5a).

En la reflexión, los puntos del medio cercanos a un obstáculo se transforman en fuentes de ondas secundarias, que se propagan hacia atrás, creando por superposición la reflexión de la onda (figura 5b y 5c).

En la figura 6 observamos ejemplos de difracción que nos recuerda el experimento de la ranura en la cubeta de ondas: las barreras de protección en los puertos y en las playas transforman ondas con frente

rectilíneo en ondas circulares. Por lo tanto, las ondas difractadas distribuyen su energía y cantidad de movimiento en frentes circulares. Esta es la causa de la erosión de forma circular que se encuentran en algunas playas, como se observa en las figuras 6b y 6c. Las imágenes en la figura 7 son otros ejemplos sobre cómo las ondas pueden superar obstáculos por el efecto de la difracción.

Si las ondas alcanzan una zona donde el agua es menos profunda, la fricción con el fondo hace que sus velocidades disminuyan. De hecho, según la Ec. (3), las ondas en aguas con menos profundidad se propagan más lentamente, los frentes se acercan unos de otros y sus λ decrecen. Esto hace que las ondas, pasando en regiones con diferente d , puedan cambiar de dirección y estar sujetas a refracción (figura 4a). Así, cuando los frentes de onda se aproximan a una línea costera en un cierto ángulo, éstos, por refracción, se curvan y tienden a ser paralelos a la playa. Algunos ejemplos de refracción se muestran en la figura 8.



FIGURA 6. Difracción de ondas a través de una abertura: a) Mar del Plata, Argentina, 02/25/2018, coordenadas: $38^{\circ} 07' 02.57''S$, $57^{\circ} 35' 18.31''O$; b) Campo di Mare, Italia 07/18/2015, coordenadas: $40^{\circ} 32' 29.96''N$, $18^{\circ} 04' 06.72''E$. c) Erosión circular de la playa causada por la difracción de ondas: Campo di Mare, Italia, 4/17/2010, coordenadas: $40^{\circ} 32' 26.87''N$, $18^{\circ} 04' 12.69''E$.

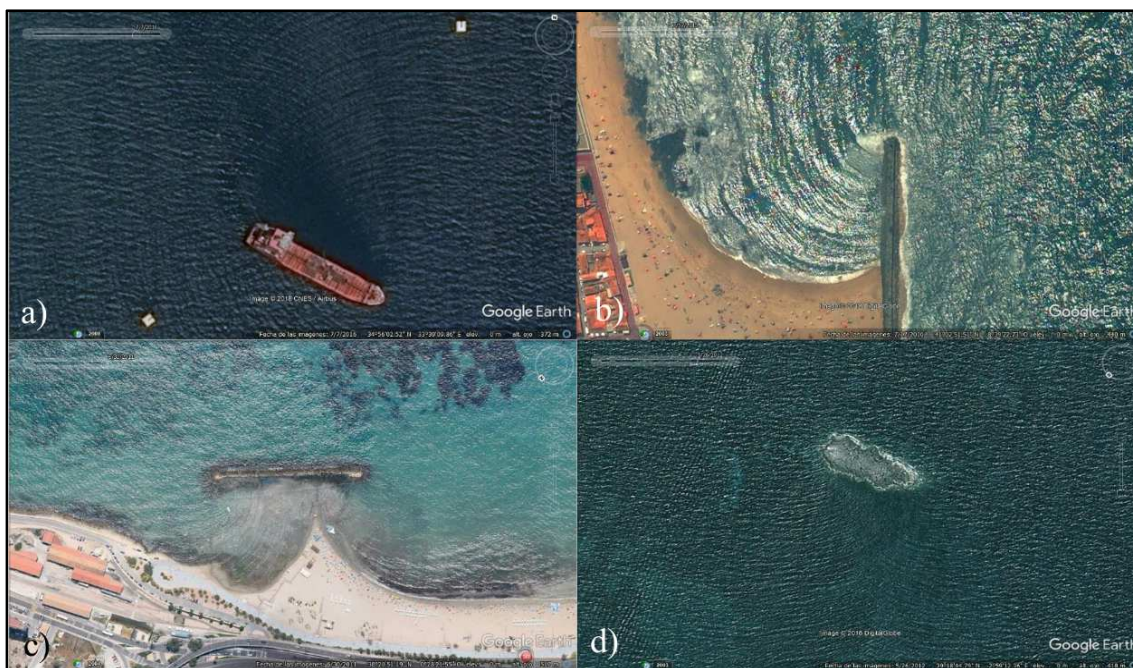


FIGURA 7. a) Difracción de ondas de un barco: Chipre 7/7/2016, coordenadas: $34^{\circ} 56' 02.52''\text{N}$, $33^{\circ}39' 09.86''\text{E}$. b) y c) Difracción de ondas contra una barrera de protección: Arcozelo, Portugal, 7/17/2010, coordenadas: $41^{\circ} 02' 51.51''\text{N}$, $8^{\circ} 39' 22.73''\text{E}$; Alicante, España, 6/30/2011, coordenadas: $38^{\circ} 20' 51.19''\text{N}$, $0^{\circ} 28' 21.55''\text{E}$ d) Difracción de las olas contra una isleta: Mallorca, España, 05/26/2012, coordenadas: $39^{\circ} 18' 44.79''\text{N}$, $2^{\circ} 59' 12.36''\text{E}$.



FIGURA 8.Ejemplos de refracción de ondas: los frentes de onda cambian de dirección cuando se aproximan a la playa: a) Mar del Plata, Argentina, 5/30/2015, coordenadas: $38^{\circ} 04' 47.16''\text{S}$, $57^{\circ} 32' 17.01''\text{O}$. b) Mallorca, España, 6/29/2013, coordenadas: $38^{\circ} 26' 36.20''\text{N}$, $0^{\circ} 22' 25.43''\text{O}$. c) Manta, Ecuador, 10/14/2010, coordenadas: $0^{\circ} 56' 29.49''\text{S}$, $80^{\circ} 45' 27.93''\text{O}$.

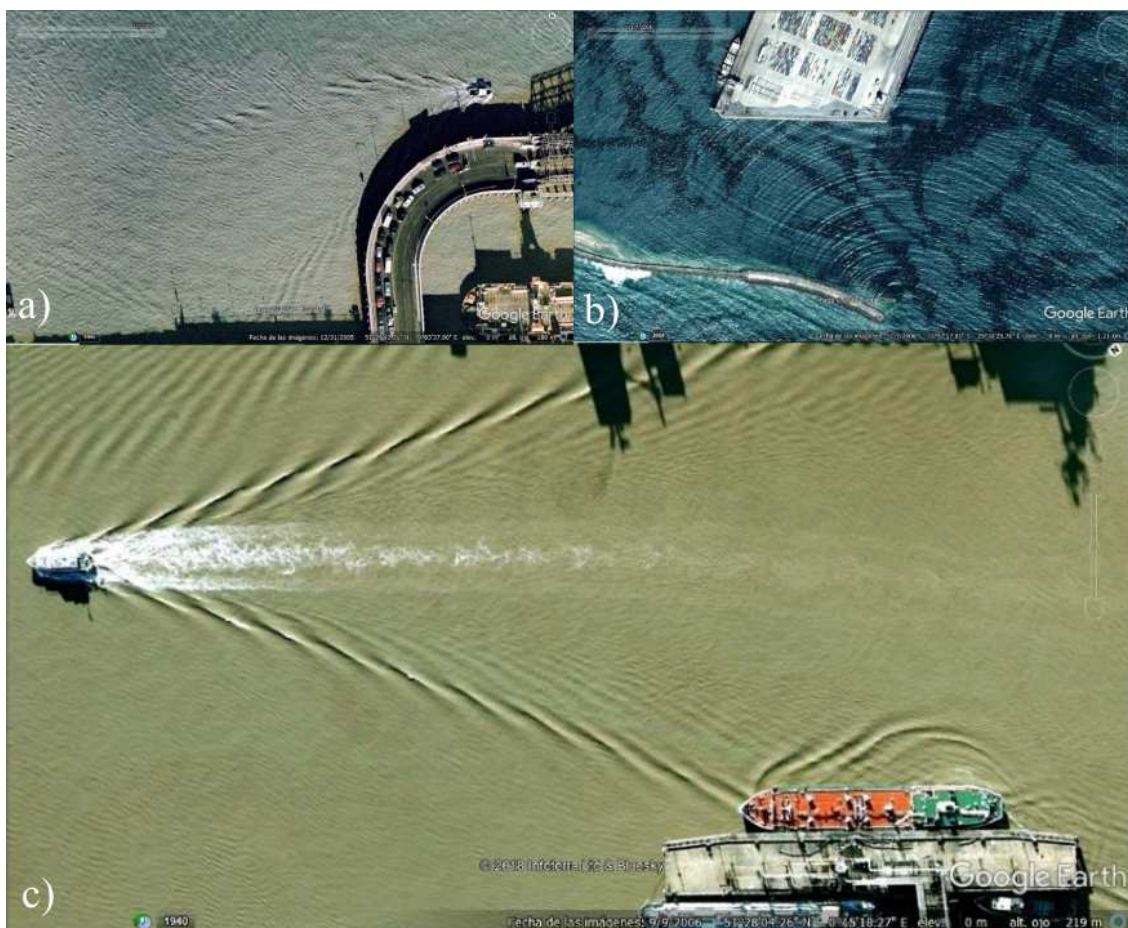


FIGURA 9. Ejemplos de reflexión de ondas: a) Río Támesis, Londres, Inglaterra, 12/31/2005, coordenadas: $51^{\circ} 29' 42.31''\text{N}$, $0^{\circ} 03' 37.90''\text{E}$. b) Port Elizabeth, Sudáfrica 11/7/2006, coordenadas: $33^{\circ} 57' 17.81''\text{S}$, $25^{\circ} 38' 15.76''\text{E}$. Reflexión: c) Río Támesis, Londres, Inglaterra, 09/09/2006, coordenadas: $51^{\circ} 28' 04.26''\text{N}$, $0^{\circ} 15' 18.27''\text{E}$.

También tenemos la posibilidad de analizar cuantitativamente algunas propiedades de las ondas. Una herramienta de *Google Earth* nos permite medir la distancia entre dos puntos geográficos. Entonces, los estudiantes pueden medir la longitud de onda y calcular la rapidez de una onda en aguas profundas utilizando la Ec. (2). Por ejemplo, para $\lambda = 100\text{ m}$, como en la figura 10a tenemos que $v_{fase} = 12.5\text{ m/s}$. Si es posible estimar la profundidad del agua, los estudiantes también pueden calcular la velocidad en aguas poco profundas con la Ec. (3). Por ejemplo, para $d = 1\text{ m}$ obtenemos $v_{fase} = 3.1\text{ m/s}$.

Cuando una onda se encuentra con un obstáculo como un acantilado o una pared, ésta se refleja sobre sí misma. En la figura 9 tenemos ejemplos de estas reflexiones. Los alumnos examinando las imágenes de *Google Earth*, como en la figura 10b, pueden verificar la ley de la reflexión: el ángulo de incidencia de las ondas es igual a sus ángulos de reflexión (figura 5c). A veces, las ondas reflejadas interfieren con las ondas incidentes, como se ilustra en la fotografía de la figura 9c.

En la superposición de dos ondas, cuando en un punto una cresta se encuentra con otra cresta o un valle con otro valle, la onda resultante tiene una cresta más alta o un valle más bajo. En este caso, se habla de interferencia constructiva de las ondas (figura 11). Al contrario, la superposición de una cresta con un valle provoca una cancelación de la perturbación de la onda; este es un efecto de interferencia destructiva. La interferencia entre ondas en *Google Earth* se puede observar en la figura 12a y 12b. En la interferencia constructiva es posible que una cresta se rompa en su parte superior generando espuma. La luz difundida por la espuma se observa en la foto de la figura 12c como pequeñas regiones blancas. Por lo tanto, estas representan áreas donde las crestas son más altas y la interferencia de las ondas es constructiva. La figura 12c es una ilustración muy interesante de interferencia entre frentes de ondas circulares, análoga al experimento de las dos ranuras que se realiza en la cubeta de ondas.



FIGURA 10. a) Medida de longitud de onda con la herramienta de *Google Earth*: Hong Kong 01/13/2015, coordenadas: 22° 11' 49.43" N, 114° 01' 49.83" E. b) Verificación de la ley de reflexión en la figura 9c: las líneas amarillas indican los frentes de onda, las líneas rojas la dirección de propagación de la onda incidente y la onda reflejada.

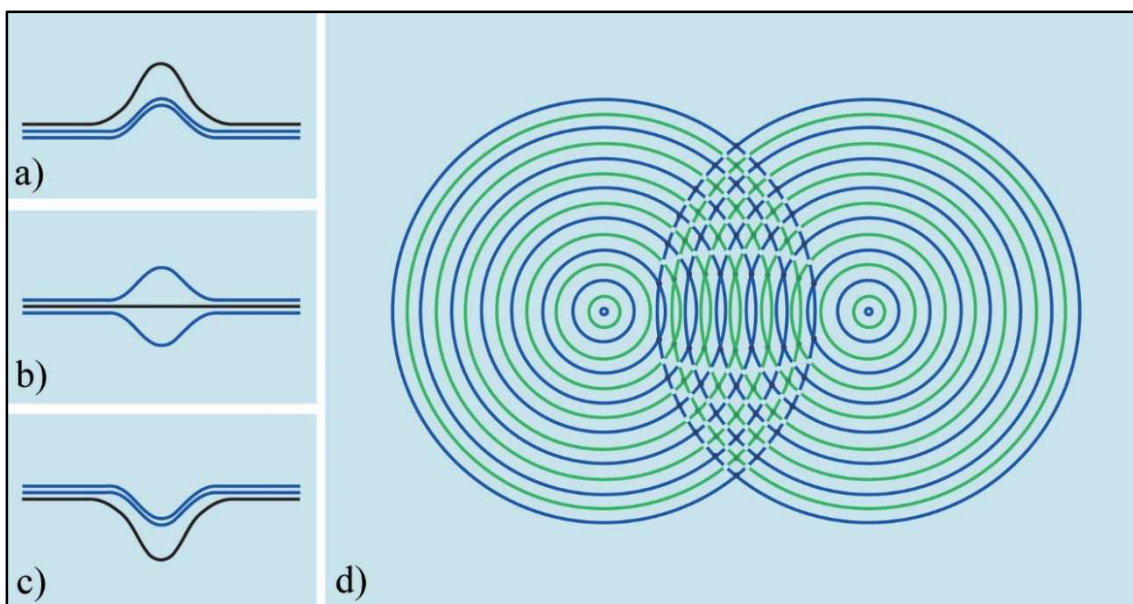


FIGURA 11. Ilustraciones de interferencia: a) y c) interferencia constructiva, b) interferencia destructiva y d) interferencia entre frentes de ondas circulares.

Las fotografías en la figura 13 son otro ejemplo de interferencia entre frentes de ondas circulares, en este caso desde dos aberturas. En general, llegan a las dos brechas, ondas con diferentes longitud λ y dirección. Como consecuencia, se generan continuamente diferentes patrones de interferencia, con diferentes direcciones de los máximos y mínimos de interferencia constructiva y destructiva. Entonces, con el tiempo, podemos pensar que la energía y la cantidad de movimiento de las ondas se distribuyen en promedio uniformemente, como en el frente de onda circular que viene desde una sola abertura. Por lo tanto, podemos deducir que la interferencia de varias ondas, también generan en este caso una erosión circular y uniforme de la playa.

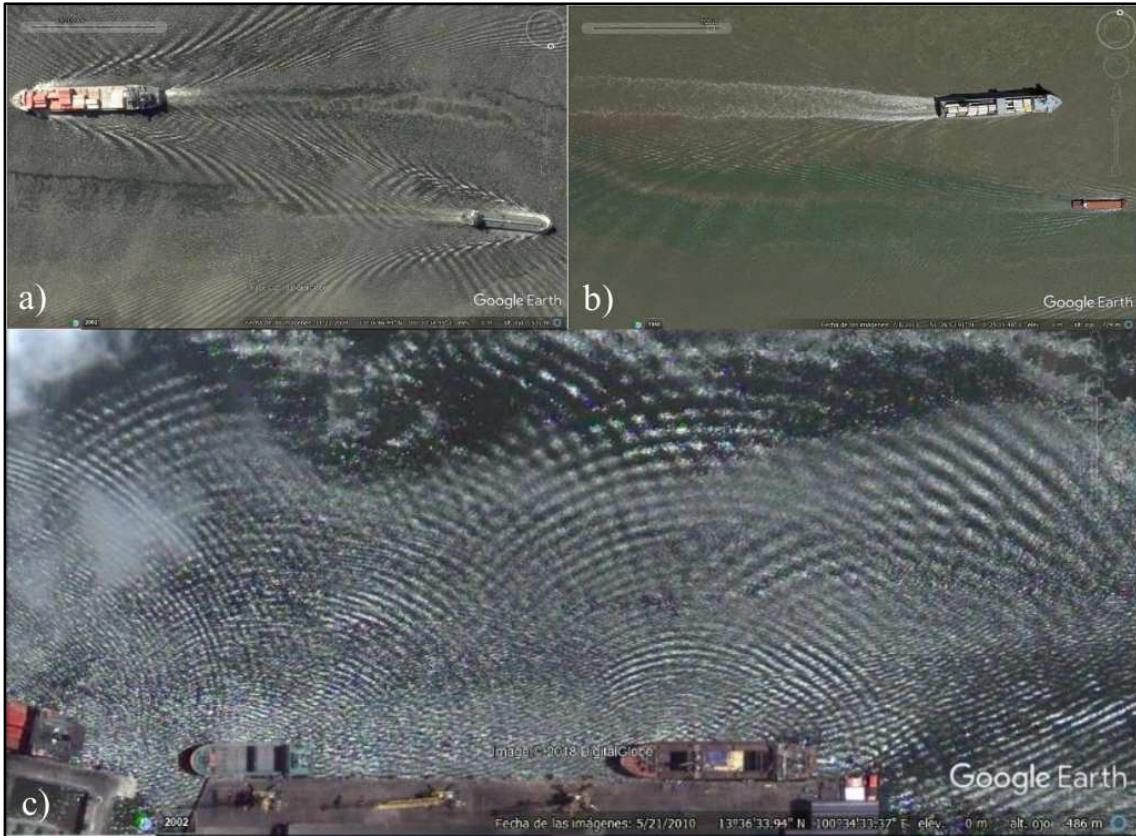


FIGURA 12. Interferencia de frentes de ondas, ocasionadas por las estelas de dos barcos: a) Río Chao Phraya, Bangkok, Tailandia, 11/21/2004, coordenadas: $13^{\circ} 36' 46.49''\text{N}$, $100^{\circ} 33' 38.95''\text{E}$; b) Río Támesis, Londres, Inglaterra, 7/08/2013, coordenadas: $51^{\circ} 26' 53.91''\text{N}$, $0^{\circ} 25' 05.48''\text{E}$. Interferencia por frentes de ondas circulares: c) Río Chao Phraya, Bangkok, Tailandia, 5/21/2010, coordenadas: $13^{\circ} 36' 33.94''\text{N}$, $100^{\circ} 34' 33.37''\text{E}$.



FIGURA 13. Interferencia de ondas circulares originadas por dos aberturas en una barrera de protección de la playa: Rímìni, Italia, 5/27/2002 (a la izquierda), 04/29/2017 (a la derecha), coordenadas: $44^{\circ} 05' 39.64''\text{N}$, $12^{\circ} 31' 57.03''\text{E}$,

III. CONCLUSIONES

Con *Google Earth*, los estudiantes tienen la posibilidad de buscar sus propios ejemplos de ondas en situaciones reales. Esto resulta muy instructivo y entretenido para ellos: con la guía del profesor pueden comparar sus fotografías con las ilustraciones que se encuentran en los libros de texto. Podemos sugerir que los alumnos busquen ondas cerca de las grandes ciudades costeras, puertos, lagos y ríos. En los últimos años hemos probado esta propuesta de enseñanza con muchos estudiantes y docentes de escuelas secundarias; siempre encontrando una participación activa en la clase y una mejor comprensión y retención de los conceptos involucrados.

REFERENCIAS

- Aguiar, C.E. y Souza A.R.(2009).Google Earth Physics. *Physics Education*, 44(6), 624-626.
- Barber, N.F.(1969).*Water Waves*. London: Wykeham Publications.
- Bascom, W.(1964).*Waves and Beaches*. Garden City, New York: Anchor Books.
- Clark, C. B.(1959). Speed of Straight Waves in a Ripple Tank. *American Journal of Physics*, 27, 478-483.
- Coulson, C.A.(1977).*Wave– A Mathematical Account of the Common Types of Wave Motion*. New York: Longman Inc.
- Crowell, B.(2008).*Vibrations and Waves – Light and Matter*, Vol. 3. [en línea] Disponible en www.lightandmatter.com Consultado en 2018:
- Feynman, R.P. Leighton, R.B. y Sands, M.(1989).*The Feynman Lectures on Physics*, Vol. 1. Reading MA: Addison-Wesley.
- French, A.P.(1971).*Vibrations and Waves*. London: Thomas Nelson and Sons.
- Giambattista, A. Richardson, B. y Richardson, R.C.(2010).*College Physics*. New York: McGraw-Hill.
- Lamb H. (1975). *Hydrodynamics*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Lighthill, J.(2001).*Waves in Fluids*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Logiurato, F. (2014). New Experiments on Wave Physics with a Simply Modified Ripple Tank. *The Physics Teacher*, 52, 228-231.
- Logiurato F.(2012).Teaching Waves with Google Earth. *Physics Education*, 47(1), 73-77.
- Pierce, J.R.(1981).*Almost All About Waves*. Massachusetts: The MIT Press.
- Ryder, B.A.(2007). Journey to the Ends of the Earth. *Physics Education*, 42, 435-437.
- Schiller, C.(2018).*Motion Mountain - The Adventure of Physics*. Disponible en <http://www.motionmountain.net/bienvenida.html> Consultado en 2018.
- Stoker, J.J.(1957). *Water Waves*. New York: Publishers LTD.