

## Visualización experimental y numérica de ondas de Kelvin como herramienta de divulgación y enseñanza en oceanografía

Eliana Burgart<sup>1</sup>, Solana M. Gomes<sup>1</sup>, Federico N. Lillo<sup>1</sup>, Candela López Fidel<sup>1</sup>, Rocío C. Marquez<sup>1</sup>, Nina Reches<sup>1</sup>, Marcos Remotti<sup>1</sup>, Valentina Toscano Zárate<sup>1</sup>, Victoria Varni<sup>1</sup>,  
Diego Moreira<sup>1,2</sup>  
[eli.burgart2@gmail.com](mailto:eli.burgart2@gmail.com)

<sup>1</sup>Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires, DCAO-FCEN-UBA.

<sup>2</sup>Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera, CIMA/CONICET-UBA. Buenos Aires, Argentina.

**Palabras clave:** mareas, experimentación, simulaciones numéricas.

### 1) INTRODUCCIÓN

Las ondas de Kelvin son un tipo de ondas de gravedad que se desarrollan en presencia de rotación y una frontera lateral. Partiendo de las ecuaciones de Navier-Stokes, y considerando un océano incompresible, de densidad  $\rho$  y profundidad  $H$  constantes, no viscoso, hidrostático y homogéneo, bajo la aproximación del plano-f y de aguas someras (escala horizontal mucho mayor que su profundidad), se pueden obtener las ecuaciones linealizadas de movimiento para describir este fenómeno:

$$\frac{\partial u'}{\partial t} - f_0 v' = -g \frac{\partial \eta'}{\partial x} \quad (1)$$

$$\frac{\partial v'}{\partial t} - f_0 u' = -g \frac{\partial \eta'}{\partial y} \quad (2)$$

$$\frac{\partial \eta'}{\partial t} + H \left( \frac{\partial u'}{\partial x} + \frac{\partial v'}{\partial y} \right) = 0 \quad (3)$$

Donde las variables primadas refieren a una perturbación del estado de reposo;  $u$  y  $v$  son las componentes zonal y meridional de la velocidad respectivamente;  $f_0$  es el parámetro de Coriolis para un plano tangente de referencia; y  $\eta$  es la superficie libre del mar. Suponiendo una frontera sólida en  $y = 0$ , de modo que allí la velocidad meridional  $v' = 0$ , una solución posible del sistema es una solución oscilatoria. Descartando la solución que crece exponencialmente al alejarse de la frontera, se obtiene:

$$u' = e^{-y/R} G(x - ct) \quad (4)$$

$$\eta' = \sqrt{H/g} e^{-y/R} G(x - ct) \quad (5)$$

$$v' = 0 \quad (6)$$

Estas expresiones corresponden a las ondas de Kelvin, donde  $R = \sqrt{gH}/f_0$  es el radio de deformación de Rossby barotrópico, que define la escala espacial de decaimiento de la onda hacia el interior, y  $c = \sqrt{gH}$  es la velocidad de fase. Si  $f_0 > 0$ , la onda se propaga dejando la frontera a su derecha, por lo que en una cuenca cerrada sigue una trayectoria ciclónica en ambos hemisferios (Vallis, 2006). Este tipo de ondas tiene una gran importancia dado que son el mecanismo dominante de propagación de la marea a lo largo de las costas. En Argentina, la marea se propaga de sur a norte con un decaimiento hacia el este (Simionato et al., 2004), lo que es consistente con una onda de Kelvin que avanza dejando la costa a su izquierda en el Hemisferio Sur.

Es por este motivo que se propone el diseño de un experimento físico de bajo costo que permita visualizar el comportamiento de estas ondas en un entorno controlado. Esta iniciativa no sólo se enmarca en actividades de docencia, sino que también puede ser utilizada para divulgación científica y extensión universitaria, con el objetivo de acercar conceptos oceanográficos complejos a estudiantes de nivel medio y superior, así como al público general.

## 2) METODOLOGÍA

Para recrear la propagación de ondas de Kelvin se diseñó un experimento físico utilizando una mesa rotante de 12 V de potencia, sobre la cual se montó una pecera de acrílico cuadrada de  $45 \times 45 \times 25$  cm. La pecera se llenó con agua de red hasta aproximadamente 20 cm. Para generar ondas en la superficie del agua, se colocó un motor de 60 rpm solidario a la estructura, el cual excitó de forma constante una de las esquinas del recipiente (*Figura 1*). Se utilizó colorante como trazador para facilitar la visualización del movimiento del fluido.



*Figura 1: Esquema del experimento.*

Además de la experiencia física, se desarrolló una simulación numérica con el objetivo de comparar los resultados observados. Para ello, se utilizó el modelo hidrodinámico “Coastal and Regional Ocean Community model” ([CROCO](#)), una herramienta de libre acceso ampliamente utilizada en estudios regionales, que permite incorporar diversos componentes físicos, atmosféricos y biogeoquímicos.

La simulación consistió en dos etapas: primero se reprodujeron condiciones similares a las del experimento físico, y luego se escaló el modelo a una cuenca representativa de la Plataforma Continental Argentina. Se configuraron los archivos de parametrización con las coordenadas geográficas correspondientes, activando los componentes de marea y fricción. Los contornos fueron definidos como cerrados, a excepción del contorno este, donde se aplicó el forzante ondulatorio, emulando así la entrada de una onda de Kelvin.

### 3) RESULTADOS Y CONCLUSIONES

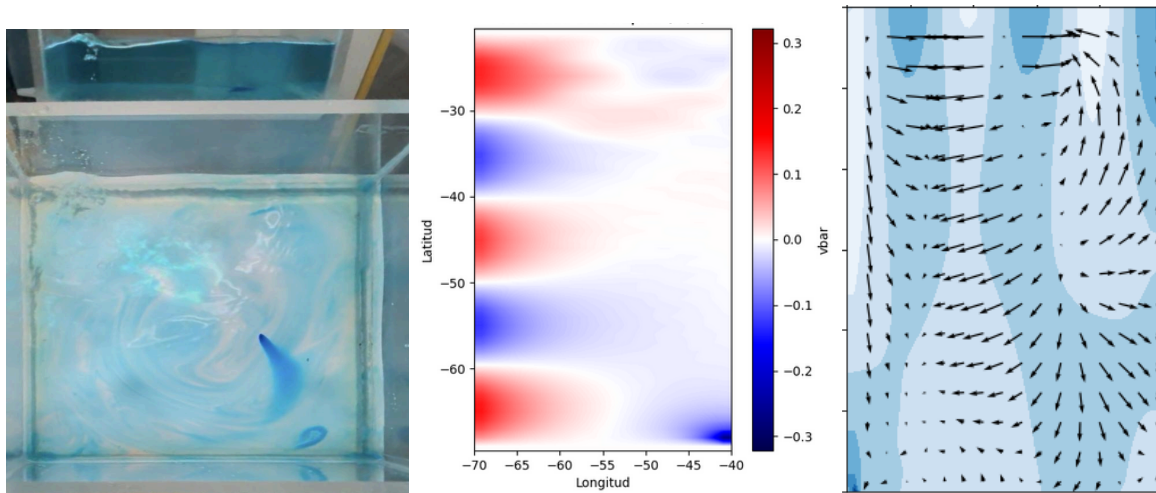


Figura 2. Izquierda: fotografía del experimento en funcionamiento. Centro: Resultado de la modelación de una onda de Kelvin en CROCO. Derecha: esquema teórico de las ondas de Kelvin (las flechas indican la intensidad y dirección del movimiento).

Como primer paso, se observó que al perturbar la superficie del agua con la mesa estática (sin rotación), la onda generada presentaba un frente circular simétrico que se propagaba uniformemente en todas las direcciones dentro de la pecera, como era esperable en ausencia del efecto de Coriolis. Sin embargo, al activar la rotación de la mesa (en sentido antihorario), se evidenciaron diferencias significativas en el comportamiento del fluido. El trazador permitió visualizar cómo parte de la energía del frente circular se concentraba cerca de las paredes, y en particular en las esquinas de la pecera. Allí se generaban patrones de propagación que guardan similitud con las ondas de Kelvin, es decir, movimientos que se adherían a la frontera y mostraban una atenuación hacia el interior del recipiente, con un frente que avanzaba dejando la “costa” a su izquierda en este caso, consistente con el comportamiento esperado para el Hemisferio Sur.

Este experimento de bajo costo y fácil implementación permitió reforzar la comprensión de un fenómeno teórico complejo a través de una visualización concreta. Resultó especialmente útil para estudiantes en formación, ya que permitió vincular el desarrollo matemático de las ecuaciones con una experiencia tangible. En este sentido, se destaca el valor pedagógico de los experimentos físicos para complementar el aprendizaje teórico en oceanografía y meteorología, y su potencial para ser utilizados en espacios de divulgación y extensión universitaria.

### 4) REFERENCIAS

**Vallis, G. K., 2006:** Atmospheric and Oceanic Fluid Dynamics: Fundamentals and Large-Scale Circulation, Princeton University, New Jersey, Cambridge University Press.

**Simionato, C. G., Dragani, W., Nuñez, M., y Engel, M., 2004:** A set of 3-D nested models for tidal propagation from the argentinean continental shelf to the Río de la Plata estuary—part I. M2. Journal of Coastal Research, 20(3), 893-912.