

# ENSEÑANZA DE LAS ONDAS DE ROSSBY CON MODELOS SENCILLOS

Mauro Covi<sup>1</sup>, Lucia Curto<sup>1,2</sup>, Nadia Testani<sup>1,3</sup>, Rodrigo Merino<sup>1</sup>  
[mcovi@at.fcen.uba.ar](mailto:mcovi@at.fcen.uba.ar)

<sup>1</sup>Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos (FCEyN, UBA)

<sup>2</sup>Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)

<sup>3</sup>Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera (CONICET-UBA)

**Palabras clave:** dispersión de ondas, herramienta docente, TICs.

## 1) INTRODUCCIÓN

Las Ondas de Rossby (OR) presentan una naturaleza dispersiva, lo que implica que la velocidad a la que se desplaza el tren de ondas (i.e., que se propaga la energía o la señal,  $C_g$ ) es distinta a la velocidad de las perturbaciones individuales ( $C$ ) (Holton, 2012). Asimilar sus características cinemáticas es esencial para comprender su impacto en la propagación de los sistemas de tiempo y de la energía en escalas sinóptica y mayores.

Desde nuestra experiencia docente (auxiliares) en cursadas de la materia Ondas en la Atmósfera 1, del Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos (FCEN, UBA), observamos que la característica dispersiva de las OR resulta ser un concepto complejo de explicar (por parte de los/as docentes) y de asimilar (por parte de los/as estudiantes). Las herramientas tradicionales como la representación en figuras estáticas, número reducidos de ensayos en las guías de Trabajos Prácticos, entre otras, han mostrado limitaciones a la hora de que el/la estudiante genere una comprensión de éstos fenómenos. Entre las principales se pueden enumerar: inconvenientes al aplicar el concepto de dispersión de OR, dificultades al comprender los fundamentos de las herramientas utilizadas para analizar la cinemática de las OR (espectros, diagrama de Hovmöller, etc), limitaciones en el manejo de herramientas computacionales para generar modelos de este tipo, entre otras.

En este trabajo presentamos una herramienta de trabajo interactiva y visual que hemos desarrollado y probado para el proceso de aprendizaje de las OR y su característica dispersiva. Se trata de un conjunto de modelos sencillos que representan niveles de complejidad crecientes en lo relativo a la superposición de OR de distinto número de onda. Se implementó en dos cursadas de Ondas en la Atmósfera 1, con distintas aproximaciones metodológicas. El objetivo de dicha herramienta es ayudar a los/as estudiantes a facilitar y ampliar su comprensión de la dinámica de dichas ondas.

## 2) METODOLOGÍA

Se desarrollaron un conjunto de programas en Python para el tratamiento de la problemática por parte de los/as estudiantes. Se implementaron en la plataforma de Google Colab, de manera de tener un entorno online accesible para poder realizar las simulaciones correspondientes. El alumnado no precisó de conocimientos previos de programación para resolver la experiencia, pues interactuaron con los modelos mediante menús predefinidos. Los programas constan de distintas representaciones de OR, basadas en la solución lineal de las OR barotrópicas con propagación zonal, en un sistema de aguas someras de una capa (Vallis, 2017). Los programas permiten a el/la estudiante seleccionar la latitud, velocidad del flujo básico zonal, número de onda planetario y amplitud relativa de las ondas (en caso de

representar más de un número de onda). Se obtienen animaciones de las ondas, diagramas de Hövmöller y análisis armónicos zonales, que pueden corresponder, a priori, a cualquier anomalía de las variables asociadas a las OR (geopotencial, velocidad meridional, vorticidad). Además producen campos espaciales para las campos de alturas y movimiento, totales y de perturbaciones, para complementar la información de la propagación en tiempo de las OR.

La construcción del conocimiento es progresiva, desde casos más simples a dinámicas más complejas. La primera representación (más simple) consiste en una OR monocromática, la segunda a dos ondas monocromáticas superpuestas. En los siguientes casos se presenta una onda portadora monocromática cuya amplitud es modulada por una envolvente, simulando el paquete de ondas: en la tercera representación el tren de ondas no se deforma (pese a ser dispersivas), pero permite distintas velocidades para la onda portadora ( $C$ ) y el tren de ondas ( $C_g$ ), y en la cuarta permite la propagación de un tren de ondas que sí se deforma.

En la materia Ondas de la Atmósfera 1, se trabajó en las cursadas de 2019 y 2021, en distinto formato. En ambas se implementó el trabajo con los modelos luego de explicar la dinámica de las OR. En la primera (modalidad presencial) se planteó un Trabajo Práctico específico para esta experiencia, con entrega de informe. Se priorizó la exploración del material por parte de los/as estudiantes. Su tratamiento fue en paralelo a las clases prácticas, y se asignó tiempo de consulta posterior. En la segunda cursada (modalidad virtual) se trabajaron los modelos como parte de un ejercicio incluido en los Trabajos Prácticos de la materia, y se le asignó el tiempo específico de una clase. Se propusieron las simulaciones a realizar, y se dirigió la discusión hacia los resultados esperados. No se incluyeron los campos, y se incorporaron los análisis armónicos. En ambos casos se elaboraron encuestas a fin de obtener un retorno por parte de los/as estudiantes acerca de la pertinencia y utilidad de la herramienta desarrollada, y su metodología de implementación.

### **3) RESULTADOS**

En la modalidad presencial los/as estudiantes resolvieron el Trabajo Práctico fuera de los tiempos de las clases, y consultando en las mismas. La entrega de los informes se propuso para un estado avanzado de la materia, en el que ya las temáticas tratadas con los modelos se habían abordado en las clases. De la encuesta al alumnado sobre la actividad, hicieron hincapié en que la herramienta virtual en Colab les resultó útil, particularmente a quienes no tenían conocimientos de programación. Les resultó tedioso el generar numerosas corridas del programa, y en un principio necesitaron del apoyo de los/as docentes, pero se volvió menos dificultoso al ser sistemático. Se destaca la visualización de conceptos trabajados en la materia como gran logro de la herramienta.

En la modalidad virtual se utilizó una clase completa, en la que los/as estudiantes fueron guiados hacia resultados significativos en términos de interpretación de los procesos estudiados. Un ejemplo de este trabajo se muestra en la Tabla 1. El tiempo fue insuficiente para completar el trabajo. Se sentaron las bases para que pudieran completarlo independientemente. Sin embargo, no se pudo completar un cierre de actividad dentro del tiempo de la clase, como se había planteado en un principio.

INCISO A Dos simulaciones de ondas planas monocromáticas con número de onda planetario distinto						
	Longitud de onda	Período	Velocidad de fase	Número de onda planetario	Ondas progresivas	Distribución de la energía
Grupo/Proceso 1:	Figuras animadas: identifican la distancia entre dos crestas consecutivas. Luego se visualiza en el diagrama de Hövmöller.	Figuras animadas: Frecuencia: se posicionan en un punto fijo, y estiman el tiempo que transcurre entre dos mínimos/máximos consecutivos. A partir de ella estiman el período. Diagrama de Hövmöller: Marcan el período uniendo máximos en dos tiempos distintos.	Figuras animadas: siguen un el desplazamiento de un mínimo/máximo en la animación, para ver cuánto tarda en desplazarse una distancia dada.  Diagrama de Hövmöller: confunden velocidad de fase con velocidad de grupo y no logran interpretar cómo visualizarlas sin ayuda de docente.	Figuras animadas: cuentan las crestas en todo el dominio. Diagrama de Hovmoller: se posicionan en un tiempo fijo y cuentan la cantidad de mínimos/máximos.	Figuras animadas: Interpretan que son progresivas porque se desplazan hacia el este.	No logran responder a "¿Cómo está distribuida la energía entre los distintos números de onda planetario?"
Grupo/Proceso 2:	Diagrama de Hövmöller: se posicionan en un punto fijo en el tiempo para ver la longitud de onda, cómo es la distancia entre dos mínimos/máximos consecutivos.	Diagrama de Hövmöller: se posicionan en un punto X fijo (una longitud fija), e identifican a través del tiempo entre dos mínimos/máximos consecutivos.	Diagrama de Hövmöller: identifican la diagonal que forma en el diagrama una perturbación (máximo/mínimo), para asociarla a la velocidad de fase.	Diagrama de Hövmöller: se posicionan en un tiempo fijo y cuentan cantidad de máximos (o mínimos) a lo largo de las longitudes.	Diagrama de Hövmöller: Interpretan que son progresivas porque se desplazan hacia el este.	No logran responder a "¿Cómo está distribuida la energía entre los distintos números de onda planetarios?"
Dificultades:	Entender que la longitud de onda que miran es la longitud de onda en el eje X del gráfico, que representa la dirección zonal.		Entender cómo identificar la velocidad de fase visualmente en el Diagrama de Hövmöller. Asociar identificación de una perturbación (máximo/mínimo) con la velocidad de fase.	Visualizar que el dominio es todo un círculo de latitud. El eje X del gráfico representa la dirección zonal, es decir, la longitudinal.		Relacionar el concepto de energía en función de la longitud de onda.

En la encuesta sobre el ejercicio los y las alumnas destacaron las figuras de diagrama Hovmoller y animación de la onda para interpretar los conceptos. Estas fueron las únicas dos figuras que usaron ambos grupos en clase para desarrollar el ejercicio.

*Tabla 1: Implementación de la experiencia con el alumnado en la modalidad virtual (año 2021). Ejemplo para simulaciones de dos ondas monocromáticas. Resultados para dos grupos de trabajo. Se indica lo que fue resuelto por el alumnado sin mayor dificultad (verde), con dificultad media (naranja) y elevada (rojo).*

#### 4) CONCLUSIONES

La implementación de la herramienta permitió que el alumnado pueda visualizar conceptos trabajados en la materia, por lo que su evaluación en ese aspecto es positiva. Las animaciones ayudaron a la comprensión de los conceptos de longitud de onda, período,  $C$ , y a identificar si las OR son progresivas. En general hay dificultad en asociar  $C_g$  al desplazamiento de la energía, y cómo es la distribución de la misma. Se trabaja con diagramas de Hövmöller en profundidad, para identificar las variables en este tipo particular de representación gráfica.

A su vez, se destaca la falta de tiempo para profundizar en los conceptos trabajados a través de esta herramienta, en ambas modalidades. Desde el desarrollo de la herramienta, se incorporarán opciones para que las animaciones sean opcionales, reduciendo notablemente los tiempos de procesamiento. En modalidad presencial, los/as estudiantes destacan la falta de una instancia de discusión final integradora, con los/as docentes pero también con sus compañeros/as. En modalidad virtual hubo más instancias de discusión en clase, sin embargo recalcan la falta de tiempo para profundizar en todos los conceptos planteados. Concluimos que sería conveniente plantear previamente el trabajo. Los modelos no requieren conocimientos formales previos de OR para su utilización. Los/as estudiantes ya han cursado la materia Física 2 (Departamento de Física FCEN, UBA), donde aprenden sobre el tratamiento a las ondas, por lo que disponen de los conceptos generales para tratar la temática. Esto permitiría una síntesis de los conocimientos al llegar a las instancias de la materia Ondas en la Atmósfera 1, en que se estudia la dinámica de las OR formalmente.

#### REFERENCIAS

**Holton, J. R., Hakim, G. J., 2012:** An introduction to dynamic meteorology. Academic Press.

**Vallis, G. K., 2017:** Atmospheric and oceanic fluid dynamics. Cambridge University Press.