

ESTRUCTURA VERTICAL DE LOS OCEÁNOS: DE LA PRÁCTICA A LA COMPRENSIÓN

Alejandro Estradas-Romero ^{1*} y Ana Margarita Hermoso-Salazar ¹

¹ Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México. Circuito Exterior s/n, Ciudad Universitaria, Alcaldía Coyoacán, C.P. 04510. Ciudad de México, México.

*estradas@ciencias.unam.mx (autor para correspondencia)

RESUMEN

Los océanos se encuentran estratificados verticalmente debido a diferencias de densidad del agua. Estas diferencias ocurren como resultado de la temperatura y/o la salinidad del agua. Este documento describe cómo representar de manera práctica y sencilla la estratificación y formación de masas de agua en el océano, causadas por las diferencias de densidad. Los experimentos aquí descritos pueden ser realizados en grupos de tres o cuatro personas. El material requerido es simple, de bajo costo y de fácil acceso.

Palabras clave: Oceanografía, masas de agua, salinidad, temperatura, densidad, estratificación, mezcla.

ABSTRACT

The oceans are vertically stratified due to differences in the water density. These differences occur as a result of water temperature and/or salinity. This document describes how to represent in a practical and simple way, the stratification and formation of water masses in the ocean caused by the differences in water density. The experiments here described can be conducted by groups of three or four people. The required material is simple, inexpensive, and easily accessible.

Keywords: Oceanography, water masses, salinity, temperature, density, stratification, mixing.

INTRODUCCIÓN

Los océanos se encuentran divididos verticalmente en diferentes zonas y capas debido a las diferencias de densidad, que se presentan como resultado de la temperatura y la salinidad (Pabón *et al.*, 1998). De tal manera que, en relación con la temperatura, siempre tendremos agua menos densa (más caliente y ligera) en la superficie y, por debajo de ella, una capa de mezcla donde se presentan variaciones de temperatura seguida de una zona de transición llamada termoclina, que es el resultado de un fuerte gradiente de temperatura que, junto con la salinidad, gobiernan la densidad del agua de mar (The Open University, 1999). El agua más densa (fría, salada) se encuentra en promedio por debajo de los 2000 m de profundidad (Figura 1). Al estar estratificado el mar durante períodos largos, se pueden afectar los procesos biológicos en la zona costera. La zona de contacto entre dos masas de agua actúa como una barrera física que va a impedir que la capa superior se renueve provocando hipoxia (falta de oxígeno) debido a la respiración, lo que produce la muerte de peces y otros organismos. También puede asociarse una baja densidad en la biomasa del fitoplancton debido a la eliminación del transporte de nutrientes a capas superficiales (Behrenfeld *et al.*, 2006; Doney, 2006).

Una masa de agua se define como un cuerpo de agua con una historia de formación común, que tiene su origen en una región física del océano. Son entidades físicas con un volumen medible y por lo tanto ocupan un cuerpo finito en el océano (Tomczak, 1999).

Existen muchos procesos en el mar controlados por la densidad como, por ejemplo, la formación de masas de agua; su caracterización y seguimiento permite el estudio de la circulación oceánica (circulación termohalina). En su zona de formación, las masas de agua ocupan una región determinada del océano; en otras regiones se localizan varias masas de agua, las cuales se pueden mezclar generando en algunos casos nuevas masas de agua, como, por ejemplo, la capa de la masa de agua denominada Agua Común del Golfo (GCW, por sus siglas en inglés) en el Golfo de México. Esta masa de agua se origina a partir de la mezcla de dos masas de agua, una superficial y otra capa más profunda, la primera llamada Agua Superficial del Caribe (CSW, por sus siglas en inglés) y la segunda Subsuperficial Subtropical del Atlántico Norte (NASUW, por sus siglas en inglés).

Existen dos factores principales que hacen que el agua de los océanos sea más o menos densa: la temperatura del agua y la salinidad del agua. Cuando se incrementa la temperatura el agua se hace más ligera disminuyendo así su densidad y, por el contrario, al disminuir la temperatura el agua aumenta su densidad debido a que la distancia entre sus moléculas se reduce. Con respecto a la salinidad, ésta se va a incrementar con la formación de hielo o cuando la tasa de evaporación es alta (Denny, 2007; Garrison, 2007).

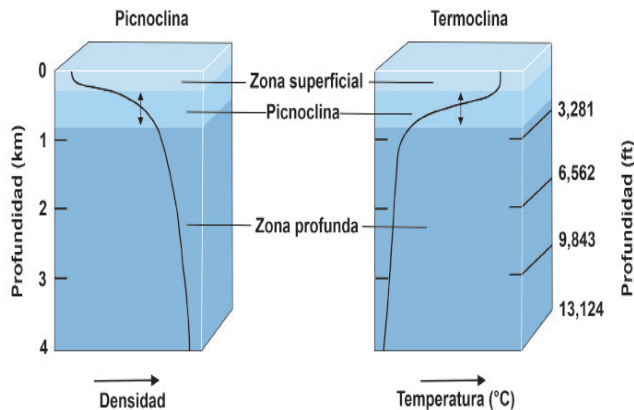


Figura 1. Estructura vertical del océano en función de la profundidad, densidad y temperatura. Modificada de: <https://cmapspublic.ihmc.us/rid=1LHPRFL1Y-1LT98JY-TH4/Estructura%20vertical%20de%20masa%20marina.jpg>.

METODOLOGÍA

Actividad 1. Evaluar el efecto de los cambios de la salinidad y la temperatura sobre la densidad y la estratificación de un volumen de agua.

Materiales

- 1 pecera rectangular con una placa que lo divida en dos,
- colorantes comestibles o anilina (tres colores diferentes),
- agua,
- hielo,
- sal de grano o de mesa,
- 2 recipientes de 1 litro.

Instrucciones

a) La salinidad como variable

1. Preparar una solución salina saturada y teñida con alguno de los colorantes (p. ej. azul) y depositarla en uno de los compartimentos de la pecera.
2. Teñir agua de la llave con un color diferente (p. ej. naranja) y colocarla en el segundo compartimento de la pecera.
3. Retirar la pared divisoria de la pecera con cuidado y observar lo que ocurre.

b) La temperatura como variable

1. Calentar agua (~60 °C), teñirla con alguno de los colorantes (p. ej. naranja) y depositarla en uno de los compartimentos de la pecera. En el segundo compartimento colocar agua fría (agua enfriada previamente con hielo) teñida de algún color diferente (p. ej. azul).
2. Estimar la temperatura con los dedos en cada uno de los compartimentos.
3. Retirar la pared divisoria de pecera con cuidado. Una vez

equilibrada el agua en el tanque, introducir la mano muy lentamente, iniciando con los dedos (para no perturbar el agua), hasta el fondo de la pecera. ¿Se puede sentir el cambio de temperatura entre las dos capas de agua?

Explicación

En esta actividad, los estudiantes observarán y comprobarán que los fluidos se distribuyen en capas de acuerdo con su densidad (como cuando juntamos agua con aceite). Cuando se retira la barrera divisoria de la pecera que contiene las dos “masas de agua”, la más densa (salada o fría, azul) se hunde al fondo del tanque y el agua menos densa (dulce o caliente, naranja) se mantiene en la capa superior, formando una columna estratificada (Figura 2).

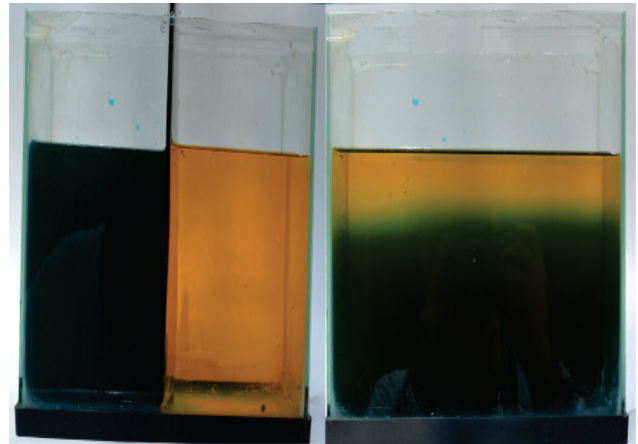


Figura 2. La fotografía de la izquierda muestra la pecera antes de retirar la división: los dos cuerpos de agua tienen diferentes densidades. La fotografía derecha muestra el resultado de retirar la división: el agua más densa (color azul) se va al fondo y la menos densa queda en la superficie. La zona de color verde representa la piconoclina.

Actividad 2. Evaluar los efectos de la estratificación sobre la mezcla.

Materiales

- 1 pecera rectangular con agua de la llave,
- 1 pecera rectangular que contenga un fluido estratificado,
- secadora de cabello,
- colorantes comestibles o anilina (dos colores diferentes, por ejemplo rojo y azul),
- pipetas largas o goteros,

Instrucciones

1. Antes de empezar, responder la siguiente pregunta ¿En cuál de las dos peceras el colorante puesto en la superficie se mezclará más fácilmente?
2. En la pecera no estratificada agregar, con cuidado, unas cuantas gotas de colorante en la superficie del agua.
3. Con la secadora de cabello generar una corriente superficial cuidando que fluya únicamente cerca de la superficie y observar cómo se mezcla el colorante.
4. Preparar una pecera con fluido estratificado. Para preparar la pecera estratificada, verter una solución fuertemente salina hasta la mitad del tanque. Con mucho cuidado, verter agua caliente sobre la capa salina sin provocar turbulencia para evitar que haya mezcla entre las dos capas.
5. Con la pecera estratificada, agregar con cuidado unas cuantas gotas de uno de los colorantes en la superficie del estrato

superior y, por medio de una pipeta o gotero largo, también agregar unas cuantas gotas de un colorante diferente en la parte superficial del estrato inferior.

6. Repetir el paso 3.
7. Comparar los resultados de las dos peceras.

Explicación

Al realizar este experimento, los estudiantes observarán que el colorante que se añade al agua de la pecera no estratificada se hunde porque es ligeramente más denso que el agua (Figura 3). Cuando se expone la superficie del agua a la fricción creada por la secadora de cabello por corto tiempo, el colorante se mezcla a través de la columna de agua (Figura 3), mientras que, en la pecera estratificada, la pycnoclina formará una barrera que va a impedir la mezcla (Figura 4). Al aplicar fricción en la superficie en ambas peceras, no va a ser suficiente para mezclar la columna entera (se requerirá más energía para mezclar las dos capas), por lo que el colorante rojo sólo se mezclará en la capa superior del agua: esto es similar a la capa de mezcla superficial en los océanos (Figura 4). Los resultados observados en el experimento serían equivalentes a los que se producen cuando se prepara un aderezo a la vinagreta que se utiliza en las ensaladas, donde el vinagre y el aceite tienen diferentes densidades y para mezclar ambas sustancias hay que agitarlas.

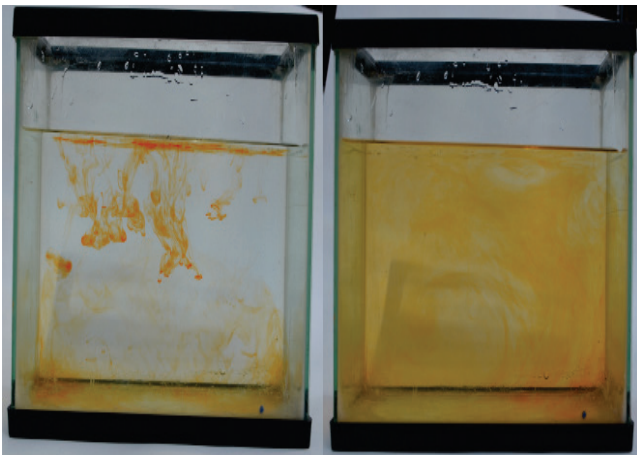


Figura 3. Pecera con la columna de agua no estratificada. La fotografía izquierda muestra el estado antes de aplicar fricción en la superficie del agua con la secadora de pelo; la fotografía de la derecha, después de aplicar la fricción, lo que genera la mezcla en la columna de agua.

PROPUESTA PEDAGÓGICA

Esta actividad puede ser adaptada según el nivel académico al que sea dirigido (secundaria, preparatoria o licenciatura) con los cambios apropiados en el contenido del contexto teórico-práctico y las discusiones en clase. Este experimento está diseñado para realizarse en una hora de clase, tiempo suficiente para que los alumnos desarrollen las actividades indicadas en esta práctica. Se sugiere que durante los primeros 40 minutos se realice la parte experimental y el tiempo restante se dedique a la discusión de los resultados.

Puede ser realizada en grupos de tres o cuatro personas, ya que el material que se utiliza es simple, de bajo costo y de fácil acceso.

Al final de la clase teórico-práctica, se puede proponer de tarea contestar las siguientes preguntas:

1. ¿Cómo podrían los efectos del cambio climático, tales como el calentamiento y la fusión del hielo marino, afectar a la estructura vertical de la columna de agua? Discutir y predecir algunos efectos potenciales sobre la estratificación y mezcla en los océanos.
2. ¿Cuáles podrían ser las consecuencias para los organismos marinos?

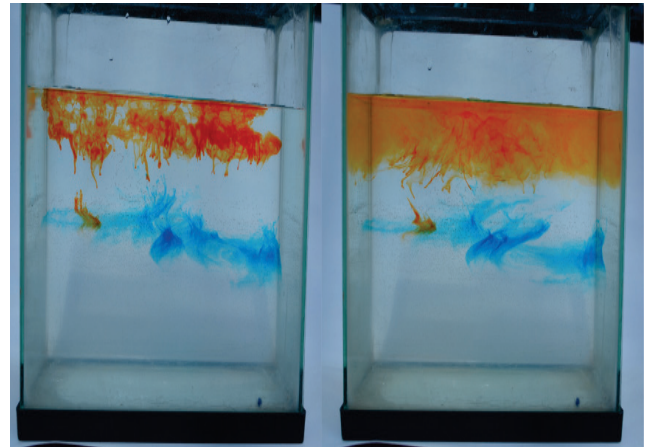


Figura 4. Pecera con el agua estratificada en dos capas. En la fotografía de la izquierda se muestran los dos colorantes antes de aplicar la fricción en la superficie. En la fotografía derecha, sólo la capa superficial se mezcla con la fricción en la superficie. Se requiere de más fuerza en la superficie para poder mezclar las dos capas.

CONCLUSIÓN

Con los cambios apropiados incluidos en esta propuesta, los alumnos, ya sean de secundaria, preparatoria o universidad, comprenderán y visualizarán de manera práctica los factores que controlan la estratificación vertical de los océanos y entenderán los principales procesos físicos que experimentan las masas de agua. Los estudiantes comprobarán la distribución de los fluidos en capas debido a su densidad. En el primer experimento, los estudiantes detectarán la separación de las dos masas de agua con diferentes temperaturas o salinidades: la más pesada o densa se irá al fondo de la pecera mientras que la menos pesada o densa se situará por encima de la anterior formando una columna de agua estratificada. En el segundo y tercer experimento, cuando se añade un colorante al agua, los estudiantes observarán que éste se hunde por ser ligeramente más denso que el agua; al aplicar fricción con el aire de la secadora sobre la superficie del agua se detectará el proceso de mezcla.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento a C. Illescas-Monterroso del Laboratorio de Ecología Bentónica de la Universidad Nacional Autónoma de México por darnos la facilidad de utilizar el laboratorio y el material para realizar los experimentos propuestos. Así mismo, a los revisores anónimos por sus comentarios y sugerencias que mejoraron su contenido.

GLOSARIO

Biomasa. Cantidad total de materia viva presente en una comunidad o ecosistema.

Circulación termohalina. Circulación oceánica global generada por diferencias en la densidad del agua en los océanos debido a variaciones de temperatura (termo) o salinidad (halina).

Densidad. Cantidad de materia que hay en un determinado espacio. Se define como la cantidad de masa de una sustancia por unidad de volumen.

Fitoplancton. Seres vivos de origen vegetal que viven flotando en la columna de agua, y cuya capacidad natatoria no logra nunca superar la inercia de las mareas, las olas o las corrientes. Son organismos autótrofos capaces de realizar la fotosíntesis. Su importancia es fundamental dado que son los productores primarios más importantes en el océano.

Hipoxia. Un estado de deficiencia de oxígeno en el agua de mar.

Picnoclina. Capa de agua en la que se evidencia un cambio brusco en su densidad vinculado con la profundidad; puede ser causado tanto por cambios en la temperatura como por cambios en la salinidad del agua.

Termoclina. Capa o rango de profundidad en el que la temperatura del agua disminuye muy rápidamente a medida que descendemos.

REFERENCIAS

- Behrenfeld, M.J., OíMalley, R., Siegel, D., McClain, C. Sarmiento, J., Feldman, G., Milligan, A., Falkowski, P., Letelier, R. y Boss, E. (2006). Climate-driven trends in contemporary ocean productivity. *Nature*, 444, 752–755.
<https://doi.org/10.1038/nature05317>
- Denny, M. (2007). *How the Ocean Works: An Introduction to Oceanography*. Princeton University Press, Princeton, NJ, 344 pp
- Doney, S. (2006). Plankton in a warmer world. *Nature*, 444, 695–696.
<https://doi.org/10.1038/444695a>
- Garrison, T.S. (2007). *Oceanography: An Invitation to Marine Science*. Sixth edition. Thomson Brooks/Cole, 608 pp.
- Pabón Caicedo, J.D., Rojas, P.J., Montealegre Bocanegra, J.E., Robertson, K., Ceballos Lievano, J.L., Martínez Ardila, N.J., y Ñañez, E. (1998). *El océano*.
- The Open University. (1999). *Waves*. In *Open University Oceanography* (Eds.) *Waves, Tides and Shallow-Water Processes*, Chapter 1 *Waves*. Butterworth-Heinemann. Oxford.
<https://doi.org/10.1016/B978-008036372-1/50002-7>
- Tomczak M. (1999). Some historical, theoretical, and applied aspects of quantitative water mass analysis. *Journal of Marine Research*, 57 (2): 275–303.

Manuscrito recibido: 15 de marzo de 2023

Manuscrito corregido recibido: 15 de mayo de 2023

Manuscrito aceptado: 22 de mayo de 2023