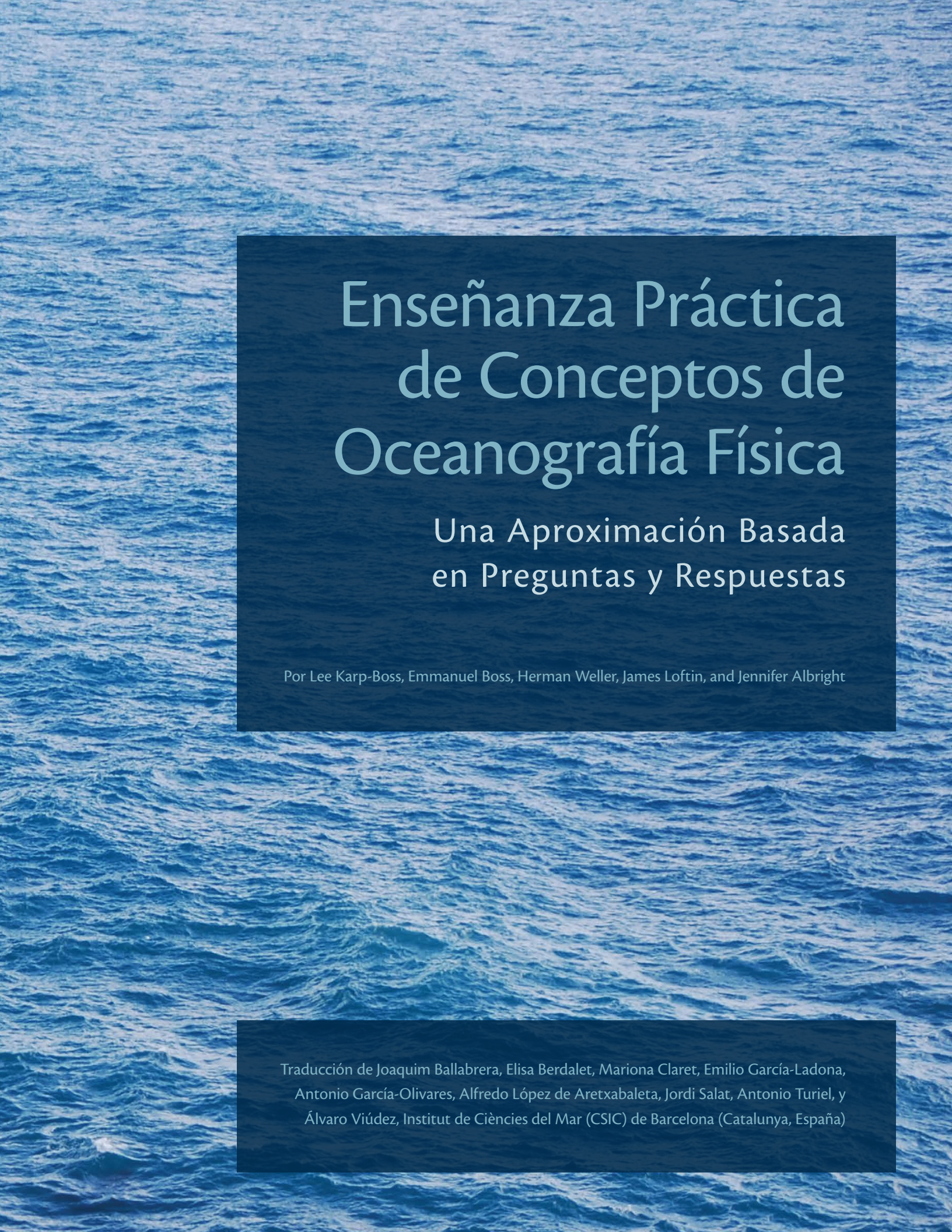




Enseñanza Práctica de Conceptos de Oceanografía Física

Una Aproximación Basada
en Preguntas y Respuestas

Por Lee Karp-Boss, Emmanuel Boss, Herman Weller, James Loftin, and Jennifer Albright

Traducción de Joaquim Ballabrera, Elisa Berdalet, Mariona Claret, Emilio García-Ladona,
Antonio García-Olivares, Alfredo López de Aretxabaleta, Jordi Salat, Antonio Turiel, y
Álvaro Viúdez, Institut de Ciències del Mar (CSIC) de Barcelona (Catalunya, España)

ÍNDICE

Introducción.....	1
Capítulo 1. Densidad.....	5
<i>Animar a los Estudiantes a Hacer Preguntas:</i>	
<i>Un Paseo por un Entorno Estimulante</i>	14
Capítulo 2. Presión	16
<i>Casos Discrepantes: Despertando la Curiosidad de los Estudiantes</i>	27
Capítulo 3. Fuerza de Flotación	28
<i>Evaluando el Aprendizaje del Alumno.....</i>	35
Capítulo 4. Calor y Temperatura.....	36
<i>Aprendizaje en Equipo</i>	47
Capítulo 5. Ondas de Gravedad.....	50

Lee Karp-Boss, Emmanuel Boss, y James Loftin pertenecen a la School of Marine Sciences, University of Maine, Orono, ME, USA. Herman Weller y Jennifer Albright trabajan en el College of Education and Human Development, University of Maine, Orono, ME, USA. Los autores son miembros del Center for Ocean Sciences Education Excellence-Ocean Systems (COSEE-OS), Darling Marine Center, University of Maine, Walpole, ME, USA.

El proyecto ha sido financiado por la National Science Foundation's Division of Ocean Sciences Centers for Ocean Sciences Education Excellence (COSEE, número OCE-0528702). Las opiniones, descubrimientos, conclusiones o recomendaciones expresadas en esta publicación no reflejan necesariamente los puntos de vista de la NSF. Se puede encontrar una versión PDF de este documento en la página web de la Oceanography Society, <https://tos.org/hands-on-oceanography>. Pueden solicitarse copias impresas individuales a info@tos.org.

©2009 The Oceanography Society
Editores: Ellen Kappel and Vicky Cullen
Diseño y composición: Johanna Adams

La reproducción parcial o total está permitida para usos educativos y no comerciales. La Oceanography Society solicita el reconocimiento de la fuente original.

INTRODUCCIÓN

Este suplemento de la revista *Oceanography* se centra en aspectos educativos destinados a hacer atractivo el estudio de conceptos fundamentales de física aplicados a la oceanografía. Con dicho objetivo, ofrece una colección de actividades para enseñar desde la práctica a la comprensión, “de las manos a la mente” (“hands-on/minds-on”, en inglés). Los conceptos clave considerados son: *densidad, presión, fuerza de flotación, calor y temperatura, y ondas de gravedad*. Nos centramos en conceptos físicos por dos motivos. En primer lugar, los estudiantes cuya principal atracción hacia las ciencias marinas nace de su interés por los organismos marinos, no son conscientes a menudo, de que la física es fundamental para comprender el funcionamiento del océano y de sus habitantes. En segundo lugar, los programas de educación y divulgación existentes tienden a poner su énfasis en los aspectos biológicos de las ciencias marinas. Así, la mayoría de las actividades para alumnos de secundaria se centran en la biología marina, y muy pocas se han elaborado para enseñar aspectos físicos y químicos del ambiente marino (p.e., Ford y Smith, 2000, y una colección de actividades de la Digital Library for Earth System Education, página web [DLESE; <http://www.dlese.org/library/index.jsp>]). El océano ofrece un estimulante contexto para la educación de la ciencia en general, y de la física en particular. Utilizar el océano como plataforma sobre la cual se aplican conceptos físicos clave pone de manifiesto la relevancia que tiene la física para el medio ambiente, algo que a menudo buscan los estudiantes de ciencias.

Las actividades descritas en este suplemento fueron elaboradas como parte de la colaboración entre científicos y especialistas de la educación de los Centers for Ocean Sciences Education Excellence (COSEE). Dichas actividades se impartieron a estudiantes de segundo, penúltimo y último año de las licenciaturas de Ciencias Marinas y de Ciencias de la Educación, especialidad en Ciencias, y en cuatro seminarios de una semana de duración dirigidos a profesores de secundaria y bachillerato. A continuación se resume nuestra aproximación educativa y se describe la organización de este volumen.

¿VERIFICACIÓN O DESCUBRIMIENTO?

Nuestra aproximación a la enseñanza de la ciencia se basa en tres *descubrimientos* realizados por nosotros mismos, como profesores. Hemos marcado *descubrimientos* en cursiva, porque en realidad muchas personas los descubrieron antes que nosotros. Sin embargo, hasta que no los *descubrimos* nosotros mismos, no nos percatamos de su significado. Este proceso es similar al que experimentan nuestros estudiantes, quienes descubren por ellos mismos cómo la física puede explicar el ambiente en el que viven.

Nuestra primera constatación fue que nuestra manera habitual de enseñar la ciencia a nivel universitario, a través de la entrega y exposición de material de texto, daba lugar a una mera transferencia de hechos científicos pero no reflejaban la manera de hacer ciencia. Con nuestra aproximación habitual, los estudiantes eran típicos observadores pasivos con muy poca implicación o hábito de cuestionar. La ciencia, sin embargo, no se constituye de “cuerpos de conocimiento”; la ciencia es una manera de pensar y de actuar, donde la formulación de preguntas es un proceso inherente. Cuando nosotros “hacemos” ciencia, proponemos predicciones, planteamos preguntas e hipótesis falseables, realizamos mediciones, hacemos generalizaciones y probamos conceptos experimentalmente. Según los “Estándares de la Educación Nacional de la Ciencia” (Consejo Nacional de la Ciencia, 1996)¹, “De la misma manera que los científicos desarrollan su conocimiento y comprensión a medida que buscan respuestas a preguntas sobre el medio natural, así los estudiantes desarrollan una comprensión del medio natural cuando están activamente implicados en la interpelación científica, tanto individualmente como en equipo”. Los estudiantes no están motivados a preguntar cuando son aleccionados sobre los productos de la ciencia (p.e., hechos, conceptos, principios, leyes y teorías) y las técnicas que utilizan los científicos. En nuestra manera habitual de enseñar la ciencia, los laboratorios se utilizaban generalmente para la verificación de la ciencia. Así, primero se presentan las leyes de la física y posteriormente son ilustradas en el laboratorio.

¹ N. del T.: National Science Education Standards (National Research Council, 1996)

Se incide en la obtención de los datos, su representación y la elaboración de informes. En tales ejercicios falta a menudo el elemento de “exploración”.

Hemos llegado a comprender que “preguntar” y “explorar” son esenciales para estimular la curiosidad y el interés de los estudiantes hacia la ciencia. Los resultados de los experimentos que se alejan de lo esperado son a menudo más interesantes que los que se ajustan a la teoría, ya que ellos requieren una explicación más allá de lo que se expone en los libros de texto. La aproximación explorativa puede aportar a los estudiantes una percepción mucho más profunda del proceso científico y puede ayudarles a desarrollar un espíritu crítico, espíritu que raramente se requiere en un enfoque verificativo.

Nuestra segunda constatación fue que la habilidad de un alumno en repetir el contenido y las fórmulas no indica necesariamente una comprensión de los principios físicos subyacentes. La física puede enseñarse utilizando descripciones matemáticas. Los estudiantes pueden aprender qué ecuaciones proporcionan determinadas cantidades, y dicho conocimiento puede ser constatado en exámenes escritos. Sin embargo, esta aproximación no desarrolla necesariamente la habilidad del alumno de reconocer cuándo los principios fundamentales pueden aplicarse a problemas ligeramente diferentes. Nosotros “descubrimos” que nuestros estudiantes alcanzaban un conocimiento más profundo y una comprensión más sólida de los conceptos físicos cuando ellos tomaban una parte activa en el aprendizaje, por ejemplo cuando ellos realizaban personalmente los experimentos y tenían la oportunidad de “ver y sentir” por ellos mismos qué representaban las descripciones matemáticas.

CREAR EXPERIENCIAS CON SENTIDO PARA ENSEÑAR Y APRENDER

Nuestra tercera constatación fue que cada estudiante tiene un conjunto diferente de modalidades de aprendizaje, es decir, alguna combinación de oír, leer, ver, tocar, o realizar (Dunn y Dunn, 1993). El supuesto de que “si este aprendizaje funcionó para mí, debe ser bueno para mis alumnos” puede no ser válido para todos los estudiantes; al fin y al cabo, los académicos somos la minoría que prosperó en este sistema educativo. Nosotros hemos “descubierto” un modo de enseñar que integra diversos modos de aprendizaje, lo cual hace efectiva la transmisión de conocimientos y mejora el aprendizaje de nuestros estudiantes. Fue decisivo tomar consciencia de que no todos los estudiantes son una versión joven de nosotros mismos. Algunos, sencillamente, no poseen la curiosidad, ni el interés, ni las actitudes que

motivan a los científicos. Solamente una minoría de estudiantes continuará la carrera científica. Sin embargo, todos ellos serán, eventualmente, consumidores del conocimiento científico, tanto los contribuyentes que subvencionan la investigación como quienes toman decisiones clave, ya sean salidos de las urnas o porque ocupan órganos de la administración. Por tanto, nosotros tenemos la responsabilidad de mejorar la formación de nuestros estudiantes, en cuestiones científicas en general y del océano en particular. Debemos ayudar a desarrollar el conocimiento y las habilidades necesarias para unos ciudadanos que inevitablemente se enfrentarán a retos científicos, ambientales y tecnológicos.

APRENDIZAJE Y ENSEÑANZA BASADOS EN LA INVESTIGACIÓN

En la enseñanza de la ciencia, *investigación* se refiere a la manera a través de la cual los estudiantes abordan las preguntas o problemas científicos, intentando resolverlos mediante pruebas y predicciones, buscando indicios e información, formulando posibles explicaciones, evaluando éstas frente a otras alternativas, y comunicando finalmente sus descubrimientos (National Research Council, 2000). La *investigación* es mucho más flexible que la rígida secuencia de pasos a menudo representada en los libros de texto como el “método científico”. Es mucho más que “realizar experimentos”, y no se encuentra restringida a los laboratorios (AAAS, 1993). Hay diversos métodos de aprendizaje y enseñanza basados en la investigación (p.e., Hassard, 2005). En nuestras clases, utilizamos actividades de laboratorio y explicaciones “de las manos a la mente”. Pero existen otras aproximaciones efectivas que no expondremos aquí, basadas en investigaciones factibles, entre las que se incluyen casos de estudio, elaboración de proyectos y aprendizaje-servicio.²

Es importante destacar que el simple hecho de realizar experimentos en el laboratorio con los alumnos no conlleva necesariamente que éstos aprendan a investigar. Por ejemplo, ejercicios clásicos de laboratorio, en los cuales los alumnos deben seguir paso a paso instrucciones típicas de un libro de cocina, pueden ilustrar un principio científico o un concepto, enseñar a los alumnos técnicas de laboratorio, y aportarles algunas experiencias manuales, pero no aportan los aspectos mentales de la investigación. Para que la aproximación “de las manos a la mente” favorezca realmente la investigación, los alumnos deben sentirse motivados a plantear preguntas, hacer predicciones y comprobarlas, formular posibles explicaciones y aplicar su conocimiento en una variedad de contextos.

² N. del T.: En inglés Service-learning, ver Wikipedia: <http://es.wikipedia.org/wiki/Aprendizaje-servicio>

Los alumnos no entran en nuestras clases como pizarras en blanco para absorber nueva información. Bien al contrario, llegan con diversos conjuntos de ideas (y a veces de errores) basados en sus experiencias previas. Aproximaciones basadas en la investigación permiten a los profesores sondear los conocimientos de sus alumnos e identificar ideas equivocadas que pueden interferir con el aprendizaje. La investigación ayuda a los alumnos a comprender que la ciencia es una manera de pensar y de actuar, los anima a cuestionar sus suposiciones, y crea un ambiente en el cual buscan soluciones alternativas y explicaciones.

Las habilidades desarrolladas *grosso modo* a través del proceso de la investigación -razonamiento, resolución de problemas y comunicación- serán utilizadas por los estudiantes a lo largo de sus vidas.

Una barrera en la aplicación del método educativo basado en la investigación fue la preocupación de que el método de instrucción no nos permitiese cubrir todo el material curricular en el tiempo establecido. Esta preocupación es válida considerando nuestro escaso tiempo de clase. Sin embargo, nosotros creímos que si el objetivo de la enseñanza es promover experiencias de aprendizaje con significado en la cual los estudiantes no sólo ganen conocimientos sino que también aprendan a aplicar e integrar conceptos, y crezcan al mismo tiempo como aprendices auto-dirigidos, debíamos considerar una aproximación basada en la investigación. En base a las constataciones posteriores de los alumnos sobre el beneficio de esta aproximación para su aprendizaje, nos dimos cuenta de que “menos” es a menudo “más”. Apostamos por la educación basada en la investigación, pero no creemos que todos los temas deban ser abordados desde la investigación o que todos los elementos de la investigación (generar preguntas, acumulando indicios, formulando explicaciones, aplicando conocimiento a otras situaciones, y comunicando y justificando las explicaciones [National Research Council, 2000]) estén siempre presentes. Una enseñanza efectiva requiere la utilización de una diversidad de estrategias y aproximaciones (p.e., Feller y Lotter, 2009) que deben ser adaptadas a cada clase concreta, a cada alumno concreto, a la medida y dinámica de cada clase, y a los objetivos educativos a medio y largo plazo, entre otros factores.

CÓMO UTILIZAR ESTE DOCUMENTO

Este documento está compuesto de cinco capítulos, cada uno de ellos centrado en uno de los siguientes conceptos: densidad, presión, fuerza de flotación, calor y temperatura, y ondas de gravedad. En cada capítulo, se proporcionan unos antecedentes y una información detallada de las actividades prácticas, las

cuales hacen hincapié en diferentes aspectos de cada concepto. Esta aproximación permite a los alumnos examinar cada concepto desde diferentes perspectivas, aplicar lo que han aprendido a nuevas situaciones, y desafiar su propio conocimiento. Finalmente, destacamos algunas aproximaciones pedagógicas que pueden mejorar la educación y favorecer el aprendizaje (ver también Feller y Lotter, 2009).

Las actividades prácticas se presentan en el formato que utilizamos en las aulas, donde teníamos alumnos de carreras de ciencias que habían seguido un curso de introducción a la oceanografía previamente. Algunos estudiantes de licenciatura y colegas nuestros también encuentran que ciertas actividades son particularmente exigentes. Según el nivel académico al que se dirijan, estas actividades pueden y deben ser adaptadas con los apropiados cambios en el contenido del contexto teórico, las discusiones en clase, la descripción de las actividades y las explicaciones. Los profesores de ciencias que participaron en los seminarios han adaptado con éxito algunas de sus actividades a los niveles de secundaria y bachillerato.

En nuestras clases, las actividades se llevan a cabo en grupos de tres o cuatro personas cuyos miembros van rotando. Algunas veces, los presentamos como una serie de actividades o demostraciones que la clase sigue colectivamente y luego sigue una discusión en pequeños grupos. Trabajar en pequeños grupos favorece pensar y aprender colectivamente. A menudo, promovemos una sana competitividad entre grupos (por ejemplo, con concursos entre grupos) para añadir un nivel de estímulo y esfuerzo. Durante la clase, utilizamos una aproximación socrática de la enseñanza, en el sentido de que los estudiantes se enfrentan a preguntas guiadas. No siempre se dará una respuesta directa a las preguntas de los estudiantes durante las actividades. Más bien realizamos preguntas adicionales, que les llevan a examinar sus propios puntos de vista e ideas. Se pide a los estudiantes que hagan predicciones, realicen medidas y encuentren posibles explicaciones a los fenómenos que observan. Una vez que los estudiantes completan las actividades, la clase se reúne para una discusión final, donde cada grupo presenta una explicación para una actividad concreta. Una parte esencial de nuestra aproximación es, por tanto, el dar tiempo a los alumnos para que se comuniquen oralmente sus puntos de vista y conocimientos. Ello ayuda a identificar los errores y las dificultades de los conceptos, a discutirlos y, finalmente, a resolverlos. Se subrayan las aplicaciones de un concepto y su relación con los procesos oceánicos durante la discusión y a través de deberes.

Una clase de 60 minutos es normalmente suficiente para que los estudiantes completen dos o tres actividades durante los primeros 40 minutos, y dediquen 20 minutos a la discusión. Nótese que cada actividad puede desarrollarse independientemente o incluso usarse para hacer un experimento en clase. El material necesario es en general sencillo y de bajo coste que puede estar disponible fácilmente en las clases o los hogares. Algún material puede adquirirse en tiendas especializadas en educación (p.e., sciencekit.com), y nosotros mismos construimos algún material.

REFERENCIAS Y LECTURAS RECOMENDADAS

- American Association for the Advancement of Science (AAAS). 1993. *Benchmarks for Science Literacy: Project 2061*. Oxford University Press, New York, NY, 448 pp.
- Driver, R., A. Squires, P. Rushworth, & V. Wood-Robinson. 1994. *Making Sense of Secondary Science: Research into Children's Ideas*. Routledge, New York, NY, 224 pp.
- Dunn, R., & K. Dunn. 1993. *Teaching Secondary Students Through Their Individual Learning Styles: Practical Approaches for Grades 7–12*. Allyn and Bacon, Boston, MA, 496 pp.
- Duschl, R.A. 1990. *Restructuring Science Education: The Importance of Theories and Their Development*. Teachers College Press, New York, NY, 155 pp.
- Feller, R.J., & C.R. Lotter. 2009. Teaching strategies that hook classroom learners. *Oceanography* 22(1):234–237. Disponible online en: http://tos.org/oceanography/issues/issue_archive/22_1.html (accesible desde el 18 de agosto de 2009).
- Ford, B.A., & P.S. Smith. 2000. *Project Earth Science: Physical Oceanography*. National Science Teachers Association, Arlington, VA, 220 pp.
- Hassard, J. 2005. *The Art of Teaching Science: Inquiry and Innovation in Middle School and High School*. Oxford University Press, 476 pp.
- Hazen, R.M., & J. Trefil. 2009. *Science Matters: Achieving Scientific Literacy*. Anchor Books, New York, NY, 320 pp.
- McManus, D.A. 2005. *Leaving the Lectern: Cooperative Learning and the Critical First Days of Students Working in Groups*. Anker Publishing Company Inc., 210 pp.
- National Research Council. 1996. *National Science Education Standards*. National Academy Press, Washington, DC, 262 pp.
- National Research Council. 2000. *Inquiry and the National Science Education Standards: A Guide for Teaching and Learning*. National Academy Press, Washington, DC, 202 pp.

PÁGINAS WEB RELACIONADAS

- Cooperative Institute for Research in Environmental Science (CIRES): Resources for Scientists in Partnership with Education (ReSciPE) <http://cires.colorado.edu/education/k12/rescipe/collection/inquirystandards.html#inquiry>
- Perspectives of Hands-On Science Teaching <http://www.ncrel.org/sdrs/areas/issues/content/cntareas/science/eric/eric-toc.htm>
- Teaching Science Through Inquiry <http://www.ericdigests.org/1993/inquiry.htm>
- Science as Inquiry <http://www2.gsu.edu/~mstjrh/mindsonscience.html>
- Science Education Resource Center (SERC), Pedagogy in Action, Teaching Methods <http://serc.carleton.edu/sp/library/pedagogies.html>

CAPÍTULO 1. DENSIDAD

OBJETIVO DE LAS ACTIVIDADES

La densidad es una propiedad fundamental de la materia, y aunque se enseña en las asignaturas de Física en los institutos de enseñanza secundaria, no todos los estudiantes de nivel universitario dominan bien el concepto. La mayoría de los estudiantes memorizan la definición sin prestarle mucha atención a su significado físico, y pueden olvidarla poco después del examen. En oceanografía, la densidad se usa para caracterizar y seguir masas de agua como un medio para estudiar la circulación oceánica. Muchos procesos son originados por o reflejan diferencias de las densidades de masas de agua adyacentes o de las diferencias de densidad entre líquidos y sólidos. La tectónica de placas y la formación de las cuencas oceánicas, la formación de aguas profundas y la circulación termohalina, y el transporte de carbono por medio de partículas que se hunden desde la superficie hasta las profundidades son unos pocos ejemplos de procesos debidos a la densidad. El siguiente conjunto de actividades ha sido diseñado para repasar el concepto de densidad, practicar con los cálculos relacionados y destacar las conexiones con los procesos oceánicos.

CONTEXTO TEÓRICO

La densidad (denotada por ρ) es una medida del grado de compacidad de un material — en otras palabras, cuánta masa está “empaquetada” en un cierto espacio. Es la masa por unidad de volumen ($\rho = \frac{m}{V}$; unidades en kg/m^3 o g/cm^3), y se trata de una propiedad que es independiente de la cantidad total de material que se estudie. La densidad del agua es alrededor de mil veces mayor que la del aire. La densidad del agua varía en un rango desde los 998 kg/m^3 del agua dulce a temperatura ambiente (ver, por ejemplo, http://www.pg.gda.pl/chem/Dydaktyka/Analityczna/MISC/Water_density_Pipet_Calibration_Data.pdf) hasta los casi 1.250 kg/m^3 de algunos lagos salados. La mayoría del agua de los océanos tiene una densidad comprendida en el rango de $1.020\text{--}1.030 \text{ kg/m}^3$. La densidad del agua no se mide directamente; en vez de ello, se calcula a partir de medidas de la temperatura del agua, la salinidad y la presión. Dado el pequeño margen de variación de la densidad en el océano, se expresa por conveniencia la densidad del agua del mar con la cantidad *sigma-t* (σ_t), que se define como $\sigma_t = \rho - 1000 \text{ kg/m}^3$.

La mayoría de la variabilidad en la densidad del agua del mar es debida a cambios en la salinidad y la temperatura. *Un cambio en salinidad refleja un cambio en la masa de sales disueltas en un volumen dado de agua.* A medida que la salinidad aumenta, debido a la evaporación o la expulsión de sal durante la formación de hielo, la densidad del fluido también aumenta. *Un cambio en temperatura resulta en un cambio en el volumen del paquete de fluido.* Un incremento en la temperatura de un fluido da lugar a un incremento en la distancia entre moléculas, lo que causa que el volumen del paquete de fluido se incremente y su densidad disminuya (su masa no cambia). Enfriar reduce la distancia entre moléculas, lo que causa que el volumen del paquete de fluido disminuya y que su densidad se incremente. La relación entre temperatura y densidad es no lineal, y el máximo de densidad del agua pura se alcanza cerca de los 4°C (ver Denny, 2007; Garrison, 2007; u otro texto general de oceanografía).

Densidad, Estratificación y Mezcla

Estratificación se refiere a la organización de masa de agua en capas de acuerdo con sus densidades. La densidad del agua aumenta con la profundidad, pero no a ritmo constante. En regiones de mar abierto (con la excepción de los mares polares), la columna de agua se caracteriza generalmente por tres capas diferenciadas: una *capa de mezcla superior* (una capa de agua caliente y menos densa con temperatura constante a todas las profundidades), la *termoclina* (una región en la que la temperatura decrece y la densidad crece rápidamente con la profundidad) y una *zona profunda* de agua densa y más fría en la que la densidad crece lentamente con la profundidad. Las variaciones de salinidad en las regiones de océano abierto generalmente tienen un efecto menor en la densidad que las variaciones de temperatura. En otras palabras, la densidad del agua del mar en océano abierto está principalmente controlada por las variaciones de temperatura. En contraste con esto, en las regiones costeras afectadas por la entrada de grandes aguas fluviales y en las regiones polares donde se forma y funde el hielo, la salinidad desempeña un papel importante para la determinación de la densidad del agua y su estratificación.

La estratificación forma una barrera efectiva para el intercambio de nutrientes y gases disueltos entre la bien iluminada capa superficial, donde el fitoplancton puede crecer, y las aguas profundas, ricas en nutrientes. La estratificación tiene por

tanto implicaciones importantes sobre los procesos biológicos y biogeoquímicos en el océano. Por ejemplo, los periodos de mayor estratificación se asocian con una menor biomasa de fitoplancton en la superficie, muy probablemente debido a la supresión del transporte de nutrientes hacia arriba (Behrenfeld et al., 2006; Doney, 2006). En las aguas costeras, donde el flujo de materia orgánica del sustrato es mayor, los periodos de estratificación prolongados pueden llevar a la hipoxia (falta de oxígeno), causando la mortalidad de peces, cangrejos y otros organismos marinos.

Mezclar las capas estratificadas requiere trabajo. Como analogía, pensemos en lo fuerte que necesitamos sacudir una botella de aliño para ensaladas para mezclar bien el aceite y el vinagre. Sin una mezcla energética (por ejemplo, debida al viento o olas rompientes), los intercambios de gases y nutrientes entre la superficie y las capas profundas ocurrirán por difusión molecular y por el efecto de arrastre local de los organismos, que son modos de transferencia lentos e ineficientes (Visser, 2007). La energía necesaria para mezclar es, como mínimo, la diferencia de energía potencial entre el fluido mezclado y el estratificado (algo de la energía, con frecuencia la mayoría, se pierde en forma de calor). Por tanto, cuanto más estratificada esté la columna de agua se requerirá más energía para la mezcla vertical (se puede pedir a los estudiantes más aventajados que estimen la energía requerida, usando el concepto de que el centro de gravedad de un fluido es más alto en el fluido mezclado que en el estratificado [por ejemplo, ver Denny, 1993]).

La densidad es de una importancia fundamental para la circulación oceánica de gran escala. Un incremento en la densidad del agua de la superficie, a través de un descenso de la temperatura (enfriamiento) o un incremento de la salinidad (formación de hielo y evaporación) da lugar a una inestabilidad gravitacional (esto es, agua densa sobrenadando agua menos densa) y al hundimiento de las aguas superficiales a la profundidades. Una vez que una masa de agua en hundimiento alcanza una profundidad a la que su densidad coincide con la densidad ambiente, la masa fluye horizontalmente, a lo largo de las “superficies” de igual densidad. Este proceso de formación de agua densa y subsiguiente hundimiento es el motor³ de la circulación termohalina en el océano. Se observa tanto en latitudes bajas (por ejemplo, el Golfo de Aqaba en el Mar Rojo, el Golfo de León en el Mar Mediterráneo) como en latitudes altas (por ejemplo, la formación de agua profunda en el Atlántico Norte). Dentro de la capa de mezcla superior, la mezcla convectiva ocurre debido a la pérdida

de calor de las aguas superficiales (mezcla inducida por el cambio de densidad) y debido al forzamiento por el viento y las olas (mezcla inducida mecánicamente).

La densidad es también de una importancia fundamental en procesos lacustres. A medida que el invierno avanza en las latitudes altas, por ejemplo, las aguas de los lagos son enfriadas desde arriba. A medida que la temperatura del agua de la superficie decrece, su densidad crece, y cuando las aguas superiores se vuelven más densas que las aguas bajo ellas, se hunden. El agua más cálida y menos densa justo debajo de la capa superficial aflora entonces a la superficie para remplazar las aguas que se han hundido. Si las bajas temperaturas del aire persisten, estos procesos de enfriamiento y convección acabarían por enfriar todo el lago a 4°C (la temperatura de máxima densidad del agua dulce a nivel del mar). Si el enfriamiento en la superficie continúa aún, la densidad de las aguas superiores decrecerá a partir de este momento. El lago se vuelve entonces establemente estratificado, con el agua más densa en el fondo y el agua más fría pero menos densa encima. Cuando las aguas superficiales se enfrían aún más, hasta 0°C, comienzan a helarse. Si el proceso de enfriamiento prosigue, la capa helada se va haciendo cada vez más profunda.

DESCRIPCIÓN DE LAS ACTIVIDADES

Las Actividades 1.1–1.3 se usan para revisar el concepto de densidad, y las Actividades 1.4–1.6 destacan la conexión con los procesos oceánicos. Las Actividades 1.1–1.3 enfatizan la relación entre la masa, el volumen y la densidad de un objeto y su hundimiento o flotación. Estas actividades permiten también a los estudiantes practicar sus habilidades de medición. Las mediciones y conceptos relacionados como precisión y exactitud, y conceptos estadísticos como promedio y desviación estándar, pueden ser introducidos durante la clase y/o propuestos como deberes. En las Actividades 1.4–1.6, los estudiantes examinan las relaciones entre densidad, estratificación y mezcla, y después discuten las aplicaciones a los procesos oceánicos.

Las actividades estarán dispuestas en prácticas antes de comenzar la clase (típicamente dos o tres prácticas por cada periodo de 60 minutos de clase, eligiendo las actividades, nivel de dificultad y detalle de la discusión dependiendo de los conocimientos previos de los estudiantes). Se pedirá a los estudiantes que vayan cambiando de práctica hasta completar las actividades asignadas. Durante este tiempo, los responsables de las actividades se moverán entre los grupos y guiarán a los estudiantes haciendo cuestiones clave. Los últimos (aprox.) 20 minutos de la clase se usarán para resumir y discutir los resultados.

³ N. del T.: Este proceso no es el motor energético, pero sí una parte fundamental de la circulación termohalina

ACTIVIDAD 1.1. ¿FLOTARÁ? (Figura 1.1)

Materiales

- Dos cubos de madera sólidos, aproximadamente de igual volumen, uno hecho de madera de balsa y el otro de madera de guayacán⁴ (de sciencekit.com)
- Una bola de metal grande y hueca (de sciencekit.com)
- Una bola pequeña de polioximetileno (conocido comercialmente como “delrin”) u otra esfera sólida de plástico (se puede conseguir en cualquier ferretería)
- Un recipiente lleno de agua del grifo a temperatura ambiente
- Regla o pie de rey
- Balanza

Instrucciones para los Estudiantes

1. Haced una lista de las propiedades que creéis que determinan si un objeto se hunde o flota.
2. Tomad los objetos y tratad de predecir cuáles flotarán en el agua y cuáles se hundirán. ¿En qué os basáis para hacer vuestra predicción? Discutid vuestra predicción dentro del grupo.
3. Comprobad vuestra predicción. ¿Coincide lo que observáis con lo que predijisteis? Si no es así, ¿cómo lo explicáis?
4. Basándoos en vuestras observaciones, ¿cómo corregiríais vuestra lista de propiedades del paso 1?
5. Calculad la masa y el volumen de cada cubo y cada bola. ¿Podéis sugerir más de un método para obtener los volúmenes de cubos y bolas? (Si hay tiempo: ¿Son las densidades obtenidas por los diferentes métodos comparables?)
6. ¿Cuál es la relación, si es que hay una, entre las masas de los objetos y los comportamientos de hundimiento/flotación que has observado? ¿Cuál es la relación, si la hay, entre los volúmenes de los objetos y los comportamientos de hundimiento/flotación que habéis observado?
7. Calculad las densidades de los cubos, bolas y agua del grifo. ¿Qué relación hay, si es que hay una, entre las densidades que habéis calculado y los comportamientos de hundimiento/flotación que habéis observado?

Explicación

En esta actividad, los estudiantes experimentan con cuatro objetos: dos tipos de cubos sólidos de madera, una bola de metal hueca y una esfera de plástico sólida. Hemos usado dos tipos de madera que son muy diferentes en densidad: balsa, con una densidad en el intervalo $0,1\text{--}0,17\text{ g/cm}^3$ (el cubo concreto que usamos nosotros tiene una masa de 2,25 g y un volumen de



Figura 1.1. Materiales para la Actividad 1.1.

$16,7\text{ cm}^3$, y por tanto una densidad de $0,13\text{ g/cm}^3$), y guayacán, con una densidad en el intervalo $1,17\text{--}1,29\text{ g/cm}^3$ (el cubo concreto que usamos nosotros tiene una masa de 19,6 g y un volumen de $15,2\text{ cm}^3$, y por tanto una densidad de $1,29\text{ g/cm}^3$). Las densidades de la pequeña bola de plástico y de la bola de metal hueca de mayor tamaño son $1,4\text{ g/cm}^3$ (masa de 1,5 g y un volumen de $1,07\text{ cm}^3$) y $0,14\text{ g/cm}^3$ (masa de 144 g y un volumen de 1035 cm^3), respectivamente. Dado que la densidad del agua del grifo a temperatura ambiente es aproximadamente 1 g/cm^3 , el cubo de balsa y la bola de metal flotarán y el cubo de guayacán y la bola de plástico se hundirán.

Esta actividad ilustra dos puntos clave: (1) El comportamiento de flotar o hundirse de un objeto no depende de su masa o de su volumen individualmente sino de su cociente éste es, de su densidad. Discutimos la frase común “las cosas pesadas se hunden, las ligeras flotan” y destacamos el error potencial que puede surgir. (2) El comportamiento de flotación o hundimiento no depende sólo del material del que el objeto está hecho (por ejemplo, abordando el prejuicio común de que la madera siempre flota). Si el tiempo lo permite, se puede conducir una discusión sobre las medidas de volumen (basadas en las dimensiones medidas o en el desplazamiento de volumen), conducente al concepto de fuerza de flotación, que se introduce en el Capítulo 3.

⁴N. del T.: Se necesita una madera que sea más densa que el agua, pero evidentemente la de guayacán es difícil de conseguir. Madera de encina bien seca podría servir (densidad de hasta $1,20\text{ g/cm}^3$).

ACTIVIDAD 1.2. ¿PUEDE FLOTAR UNA LATA?

(Figura 1.2)

Materiales

- Un lata de Mountain Dew y una lata de Mountain Dew light.⁵
- Un recipiente grande lleno con agua del grifo a temperatura ambiente
- Pie de rey o regla
- Balanza
- Un cilindro con capacidad para dos litros y graduado

Instrucciones para los Estudiantes

1. Examinad las dos latas. Haced una lista de las similitudes y diferencias entre ellas.
2. ¿Cuál creéis que será el comportamiento de flotación o hundimiento de cada lata cuando se las coloque en agua a temperatura ambiente? Escribid las razones que justifican vuestra predicción.
3. Colocad las dos latas en el tanque. Aseguraos de que no haya burbujitas pegadas a las latas. ¿Vuestra observación se corresponde con vuestra predicción? ¿Cómo explicaríais esta observación?
4. ¿Cómo determinaríais la densidad de cada lata? Probad con vuestro método. ¿Cómo se comparan las densidades de las latas a las del agua del grifo?
5. ¿Son vuestras medidas de densidad coherentes con vuestras observaciones? ¿Por qué puede que haya una diferencia en densidad entre las latas y/o el agua?

Explicación

Cuando los estudiantes colocan las dos latas en un recipiente con agua dulce, la lata de bebida gaseosa ordinaria se hunde y la lata de bebida light flota (Figura 1.2). Las densidades calculadas de las latas que nosotros usamos de Mountain Dew y Mountain Dew light son de $1,0245 \text{ g/cm}^3$ y de $0,998 \text{ g/cm}^3$, respectivamente. La diferencia en densidad es debida a las diferencias de masa en los edulcorantes añadidos a la bebida normal y a la dietética. ¡Una lata de Mountain Dew contiene 46 g de azúcar! Causaremos una gran impresión en los estudiantes si pesamos 46 g de azúcar para demostrar la cantidad de azúcar añadido (ver el lado derecho de la Figura 1.2). Hay variaciones de esta actividad disponibles en Internet. Hay que advertir que existe una gran variabilidad entre variedades de bebidas gaseosas y entre latas de la misma variedad; en algunos casos, tanto la bebida normal y la light flotarán (o se hundirán ambas). Los supervisores deberían



Figura 1.2. Diferencia en densidades y, por tanto, en hundimiento y flotación entre una lata de gaseosa ordinaria (derecha) y una lata de gaseosa sin azúcar (izquierda).

siempre haber verificado el comportamiento de las latas antes de la clase. Alternativamente, un caso en el que una lata que se supone que flota no lo hace puede convertirse en un momento muy instructivo en el que la comprensión de los estudiantes será puesta a prueba. Esta actividad es un ejemplo de un evento discrepante (ver discusión en p. 35). Puesto que las latas parecen similares, los estudiantes no esperan que sean diferentes en cuanto a sus comportamientos de hundimiento o flotación. Durante la actividad, los estudiantes a menudo plantean la cuestión de cómo medir el volumen de las latas (por desplazamiento de volumen o midiendo las dimensiones de la lata y calculando el volumen de un cilindro). Hemos de dejar que ellos escojan un método y dado que cada grupo usa las mismas latas compararemos las estimaciones obtenidas por cada uno. Si el tiempo lo permite, pediremos a cada grupo que use ambas aproximaciones y comparen sus estimaciones de densidad. Uno podría desarrollar aún más esta actividad para incluir estimaciones de la precisión de cada método, así como discusiones sobre la exactitud de la medida y la propagación de errores.

ACTIVIDAD 1.3. DENSIDADES DE LAS CORTEZAS OCEÁNICA Y CONTINENTAL

(Figura 1.3)

Esta actividad ha sido modificada a partir de una diseñada por Donald F. Collins, Warren-Wilson College.

Materiales

- Muestra de roca basáltica (representativa de la corteza oceánica) y granito (representativa de la corteza continental)

⁵ N. del T.: Mountain Dew es un refresco de limón muy popular en EE.UU. Muy probablemente la experiencia propuesta podría funcionar igualmente con latas de Coca-cola y Coca-cola Light, por ejemplo.

- Un recipiente con rebosadero y una espita, y un cilindro de 50 ml graduado para medir el agua desplazada (o como alternativa, un cilindro grande graduado o un recipiente con líneas de graduación servirían).
- Balanza

Instrucciones para los Estudiantes

1. Determinad las densidades de las dos muestras de roca. ¿Son las densidades del granito y del basalto comparables?
2. La elevación media de la tierra sobre el nivel del mar es de 875 m. La profundidad promedio del lecho oceánico es de 3.794 m bajo el nivel del mar. Aplicad vuestros cálculos de densidad y vuestro conocimiento de la estructura de la Tierra para explicar esta gran diferencia en elevación entre continentes y cuencas oceánicas.
3. Los valores de densidad recogidos en los libros de texto para la corteza oceánica y la continental son 2,9–3,0 g/cm³ y 2,7–2,8 g/cm³, respectivamente. ¿Son estos valores comparables a vuestras medidas? Si difieren, ¿qué podría explicar las diferencias entre los valores que habéis obtenido y los de los libros de texto?
4. Dado que la masa de la Tierra es $5,9742 \times 10^{24}$ kg y que el radio de la Tierra es 6.378 km, calculad la densidad del planeta. (*Reto*: ¿Cómo determinaríamos la masa de la Tierra?). ¿Es comparable la densidad de la Tierra con la densidad de las rocas? ¿Qué dice esto sobre la estructura de la Tierra?

Explicación

Las densidades de las muestras de roca que usamos son de 2,8 g/cm³ para el basalto (originario de la corteza oceánica) y 2,6 g/cm³ para el granito (originaria de la corteza continental). Ambos tipos de cortezas recubren el (más denso) manto terrestre (3,3–5,7 g/cm³). La corteza continental es más gruesa y menos densa que el promedio de la corteza oceánica más el agua que tiene encima y por tanto flota más arriba sobre el manto que la corteza oceánica. Durante la actividad y la subsiguiente discusión de clase, destacaremos tres puntos. El primero se refiere a la medición del volumen de formas irregulares por desplazamiento de agua. Este concepto está ligado a una lección posterior sobre fuerza de flotación (Capítulo 3). Después, discutimos la cuestión de las medidas y la variabilidad asociada con las medidas. Los estudiantes de ciencia están acostumbrados a ver valores de cantidades que representan promedios, a menudo sin ninguna información estadística sobre las incertidumbres asociadas o la variancia natural. Más aún, algunos estudiantes creen que si uno no obtiene el valor exacto de los libros de texto es que uno



Figura 1.3. Materiales para la Actividad 1.3.

se equivoca. Al final de la clase, compararemos las medidas de densidad y los métodos de los diferentes grupos, y después discutiremos las fuentes potenciales de variabilidad en las medidas y qué es lo que los valores de los libros de textos representan en realidad (se puede discutir aquí conceptos estadísticos como el promedio y la desviación estándar). Por último, destacaremos las aplicaciones o cómo las diferencias en densidad y grosor de la corteza continental y oceánica modela la topografía de la Tierra, y así mismo su relación con los procesos de tectónica de placas. Respecto a la derivación de la masa promedio de la Tierra y su densidad, ver Cuadro 1.1.

ACTIVIDAD 1.4. EFECTOS DE LA TEMPERATURA Y LA SALINIDAD SOBRE LA DENSIDAD Y LA ESTRATIFICACIÓN (Figura 1.4)

Materiales

- Tanque rectangular con un tabique divisor (de sciencekit.com)
- Botella que contenga una solución preparada de sal (aproximadamente 75 g de sal disueltos en 1 L de agua: la sal gorda da una solución clara mientras que una solución con sal de mesa, a altas concentraciones, parece leche)
- Colorantes alimentarios (de dos colores diferentes)
- Hielo
- Vasos de precipitados

Instrucciones para los Estudiantes

1. Llenad el vaso de precipitados con agua del grifo.
2. Colocad agua del vaso de precipitados en un compartimento del tanque y agua de la botella con solución salina en el otro. Añadid unas gotas de un colorante alimentario en un compartimento y unas gotas del otro colorante en el otro

CUADRO 1.1. OBTENCIÓN DE LA MASA Y DENSIDAD DEL PLANETA TIERRA

La masa de la Tierra puede calcularse a partir de las leyes de Newton:

1. La Ley de la Gravitación Universal de Newton afirma que la fuerza (fuerza atractiva) que dos cuerpos ejercen cada uno sobre el otro es directamente proporcional al producto de sus masas (m_1 , m_2) e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre ellos (L):

$F = Gm_1m_2/L^2$, donde G es la constante gravitatoria ($G = 6.7 \times 10^{-11} \text{ N m}^2/\text{kg}^2$). Si asumimos que el cuerpo está cerca de la superficie de la tierra, entonces el radio del planeta puede usarse como la distancia entre el cuerpo y la Tierra⁶.

2. La Segunda Ley de Newton establece que la fuerza que atrae un cuerpo hacia la Tierra es igual que su masa (m) por la aceleración de la gravedad (g): $F = mg$, donde, para la superficie de la Tierra, $g = 980 \text{ cm/s}^2$ (la propia g puede calcularse, por ejemplo, a partir del valor del periodo de un péndulo).

Sea m_1 la masa de la Tierra y sea m_2 la masa de un cuerpo:

$F = m_2g = Gm_1m_2/L^2$. La masa de la Tierra es por tanto $m_1 = gL^2/G \approx 6 \times 10^{24} \text{ kg}$. Dividiendo por el volumen de la Tierra ($4/3 \pi r^3$, donde r es el radio de la Tierra y donde usamos un radio promedio de 6.373 km), obtenemos la densidad de la Tierra (5.515 kg/m^3 o $5,515 \text{ g/cm}^3$).

⁶ N. del T.: Suponiendo que, aproximadamente, la Tierra tiene una densidad que sólo depende de la profundidad, la fuerza gravitatoria en cualquier punto exterior a la Tierra es igual que la que ejercería una masa puntual igual a la de toda la Tierra que estuviese colocada en el centro de la misma. Por tanto la fuerza sobre una masa en la superficie es igual que a la fuerza ejercida por la masa puntual a una distancia igual al radio de la Tierra.

compartimento. ¿Qué predecís que pasará cuando se elimine el tabique divisorio entre los dos compartimentos? Explicad vuestro razonamiento.

3. Medid las densidades del agua del grifo y la solución salina a temperatura ambiente.
4. Comprobad vuestra predicción eliminando el tabique divisorio. ¿Qué pasa? ¿Son vuestras observaciones consistentes con las densidades que habéis medido?
5. Vacíad el tanque y rellena un vaso de precipitados con agua caliente del grifo y el otro vaso con agua enfriada con hielo. Añadid unas gotas de colorante en cada vaso (cada uno de diferente color).
6. Colocad el agua caliente en un compartimento del tanque y el agua enfriada con hielo en el otro. Repetid los pasos 3 a 5. Después de eliminar el divisor y observar el nuevo estado de equilibrio en el tanque, meted los dedos en la parte de arriba del fluido y lentamente bajad la mano hasta el fondo del tanque. ¿Podéis sentir el cambio de temperatura?
7. ¿Cómo podrían los efectos del cambio climático, tales como el calentamiento y fusión del hielo marino, afectar a la estructura vertical de la columna de agua? Discutid los posibles escenarios dentro del grupo (alternativamente, se puede proponer esta pregunta como un tarea para casa).

Explicación

Esta actividad demuestra que los fluidos se disponen en capas de acuerdo con su densidad. Las dos “masas de agua” (Figura 1.4) salada (azul) *versus* dulce (amarillo), o frío (azul) *versus* caliente (amarillo) están inicialmente separadas por el tabique divisorio. Cuando se elimina el tabique, el agua más densa (salada o fría [azul]) se hunde al fondo del recipiente y el agua menos

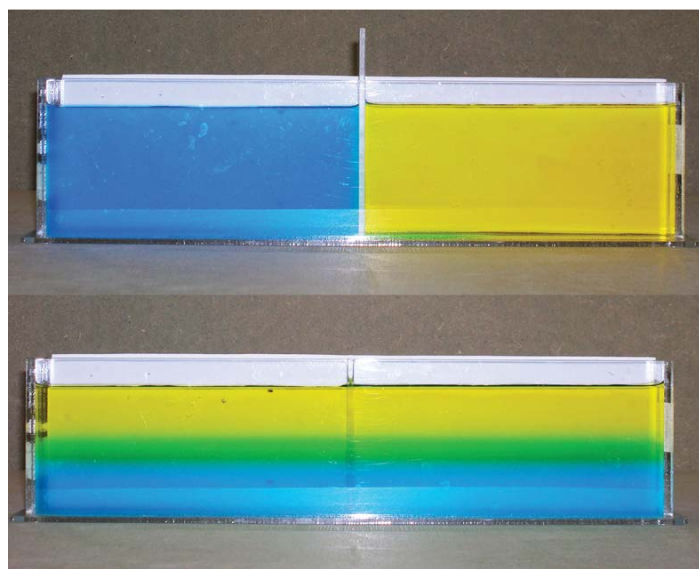


Figura 1.4. Tanque antes (arriba) y después (abajo) de eliminar el panel de división.

densa (dulce o caliente [amarillo]) flota encima, formando una columna estratificada. En el proceso, se genera una onda interna en el tanque (que discutiremos en más detalle en el Capítulo 5, Ondas de gravedad).

ACTIVIDAD 1.5. EFECTO DE LA ESTRATIFICACIÓN SOBRE LA MEZCLA (Figura 1.5)

Esta actividad se basa en el experimento que nos comunicó Peter Franks, de la Universidad de California, San Diego. Para los detalles de esa simulación física, ver Franks & Franks (2009).

Materiales

- Tanque con agua del grifo
- Tanque que contenga fluido estratificado*
- Secador del pelo
- Colorante alimentario (dos colores diferentes)
- Pipetas largas

*Para preparar un tanque con fluido estratificado en dos capas, llene el tanque con una solución fuertemente salina hasta su mitad o tres cuartas partes (ver Actividad 1.4). Coloque una capa de espuma sintética (de la misma anchura del tanque) sobre el agua y cuidadosamente vierta agua caliente sobre la espuma. Después, quite la capa de espuma cuidadosamente, sin agitar ni mezclar los fluidos. Se puede encontrar otra técnica en Franks & Franks (2009).

Instrucciones para los Estudiantes

1. Predecid en qué tanque un colorante introducido en la superficie se mezclará más fácilmente por todo el tanque.
2. En el tanque con la columna de agua no estratificada, usad una pipeta larga para inyectar cuidadosamente unas pocas gotas de colorante en la superficie del agua. Usando el secador, generad un “viento” que fluya aproximadamente paralelo a la superficie del fluido, y observad cómo se mezcla el colorante.
3. Con el tanque que contiene el fluido de dos capas, usad la pipeta larga para inyectar cuidadosamente unas pocas gotas de colorante en la superficie y unas pocas gotas de un colorante diferente en el fondo del tanque. Usando el secador, generad un viento similar al del paso 2. Comparad vuestras observaciones con lo que visteis que pasaba en el tanque no estratificado.
4. A la luz de vuestras observaciones, predecid y discutid en el grupo algunos efectos potenciales del calentamiento global sobre la estratificación y mezcla en océanos y lagos. ¿Cuáles podrían ser las consecuencias para los organismos marinos?

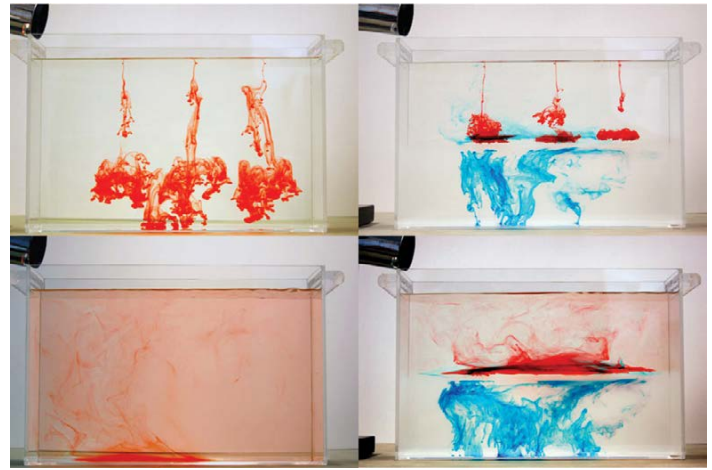


Figura 1.5. Tanques con colorante antes (arriba) y después (abajo) de la aplicación de forzamiento mecánico (soplando con un secador paralelamente a la superficie superior). Lado izquierdo: tanque no estratificado, lado derecho: tanque estratificado en densidad.

Explicación

En la columna de agua no estratificada (Figura 1.5, panel de la izquierda), el colorante rojo añadido en la superficie del fluido se hunde inicialmente porque su densidad es ligeramente superior a la del agua (Figura 1.5, arriba a la izquierda). Después de un breve tiempo de exposición a una tensión en la superficie (el “viento” generado por el secador de pelo), el colorante se mezcla a través de la columna de agua (Figura 1.5, abajo a la izquierda). En el tanque estratificado (panel derecho), la picnoclina, la región de cambio brusco de la densidad entre capas, forma una barrera efectiva a la mezcla (Figura 1.5, arriba a la derecha). Se requiere más energía para mezclar las dos capas, y el “viento” generado por el secador de pelo ya no es suficiente para mezclar la columna de agua entera. Como resultado, el colorante rojo se mezcla sólo en la capa superior, que es análoga a la capa de mezcla superior en océanos y lagos (Figura 1.5, abajo a la derecha). Se pueden usar cálculos de la energía requerida para incrementar la profundidad de la picnoclina a través de la mezcla, elevando el centro de gravedad del fluido, en conjunción con esta actividad (por ejemplo, Denny, 2007).

ACTIVIDAD 1.6. CONVECCIÓN BAJO EL HIELO (Figura 1.6)

Materiales

- Como mínimo cuatro cubitos de hielo coloreado (añadiendo colorante alimentario al agua y luego congelándolos en cubiteras de hielo)
- Dos recipientes grandes transparentes uno lleno con agua del grifo y otro lleno con agua salada (ambos a temperatura ambiente)*

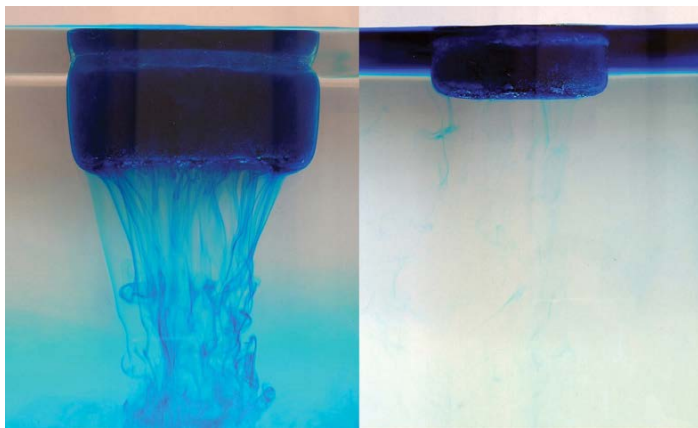


Figura 1.6. Convección asociada con la fusión de un bloque de hielo coloreado en agua del grifo (izquierda) y agua de mar (derecha).

*Es necesario reemplazar el agua de los recipientes cada vez que llega un grupo nuevo de estudiantes a la práctica. A medida que el hielo se funde, el color se mezcla con el agua y al cabo de un rato se hace difícil observar el patrón del flujo.

Instrucciones para los Estudiantes

1. Colocad un cubito de hielo en el contenedor lleno de agua del grifo. A medida que el hielo se funde, observad y explicad el comportamiento de los fluidos.
2. Colocad el otro cubito de hielo coloreado en el recipiente lleno con agua salada. A medida que el hielo se funde, observad y explicad el comportamiento de los fluidos. Comparad estas observaciones con lo que visteis en el paso 1.

Nota para el instructor: Se puede pedir a los estudiantes más aventajados que observen si el comportamiento del fluido en los tanques depende de si el hielo está cerca de las paredes del tanque o en el centro del tanque y que relacionen estas observaciones con escenarios oceánicos semejantes (por ejemplo, chimeneas de convección en el océano abierto *versus* convección en la plataforma).

Explicación

Figura 1.6, panel izquierdo: En agua del grifo, el cubito de hielo flota porque la densidad del hielo es más pequeña que la del agua dulce. A medida que se funde el hielo, sin embargo, el agua fría coloreada se hunde al fondo porque es más densa que el agua del grifo. El agua más caliente del fondo es entonces desplazada y aflora, resultando en un flujo convectivo visible gracias a los patrones que dibuja el colorante. El hielo que se funde en el centro del tanque es análogo a una “chimenea” convectiva de las que se forman en el océano abierto, mientras que el hielo que se funde en el borde del tanque es análogo a una chimenea en

la plataforma continental (cerca de tierra). Tal chimenea en el océano, creada y sostenida por procesos convectivos, se presenta como “columnas” de agua mezclada que fluye hacia abajo. Para un conjunto dado de condiciones oceánicas y meteorológicas, la convección en aguas abiertas tiende a arrastrar (mezclarse con) una cantidad mayor de aguas circundantes de lo que hace la convección cerca de una masa de tierra. Por tanto, en océano abierto el agua sumergida que se forma es menos densa que cuando el proceso tiene lugar cerca de la tierra.

Figura 1.6, panel derecho: El cubito de hielo flota en agua salada y densa. A medida que el hielo se funde, sólo una pequeña cantidad de colorante se hunde porque la densidad del agua del mar es mayor que la del agua dulce recientemente fundida del hielo. La mayoría del agua fundida se acumula en lo alto de la superficie de la capa salada más densa.

ACTIVIDAD SUPLEMENTARIA (Figura 1.7)

Si el tiempo lo permite, se puede comprobar la comprensión de los estudiantes acerca del concepto de densidad dándoles un termómetro de Galileo (Figura 1.7; es barato y disponible online), un recipiente con agua caliente y un recipiente con agua fría, y pidiéndoles que expliquen cómo funciona el termómetro. Un termómetro de Galileo está hecho de un tubo de cristal sellado que contiene un fluido claro y bolas de cristal calibradas que contienen fluido con etiquetas de metal adheridas a ellas. Las bolas, cada una de ellas con densidad ligeramente diferente, flotan en el fluido claro. Están selladas y por tanto



Figura 1.7. Un termómetro de Galileo.

tienen volumen y masa constante y, consecuentemente, densidad constante. Lo que cambia como consecuencia del calentamiento o enfriamiento es la densidad del fluido que las rodea. El cambio de densidad relativa entre las bolas de cristal y el fluido claro hace que las bolas suban o bajen y se reordenen de acuerdo con sus densidades de equilibrio. Normalmente las bolas se separan en dos grupos, uno cerca del fondo y otro cerca de la parte de arriba de la columna. La temperatura se lee entonces de los discos de metal adheridos a las bolas: la lectura del disco de la bola más baja dentro del grupo que está cerca de la parte de arriba nos indica la temperatura. Advertimos que el termómetro de Galileo tarda un buen rato en registrar cambios en la temperatura después de cambiarlo de un baño con agua caliente a otro con agua fría (o viceversa), debido al ritmo lento con el que el líquido interno cambia la temperatura. Este equilibrado lento es especialmente pronunciado cuando el termómetro se coloca en un baño de hielo, porque el líquido frío (denso) se queda cerca del fondo. Girar periódicamente el termómetro puede reducir el tiempo de espera. Para un experimento con breve tiempo asignado, lo mejor es comparar dos termómetros, uno colocado en un baño de agua caliente y el otro en un baño de agua fría.

REFERENCIAS

- Behrenfeld, M.J., R. O'Malley, D. Siegel, C. McClain, J. Sarmiento, G. Feldman, A. Milligan, P. Falkowski, R. Letelier, and E. Boss. 2006. Climate-driven trends in contemporary ocean productivity. *Nature* 444:752–755.
- Denny, M.W. 1993. *Air and Water: The Biology and Physics of Life's Media*. Princeton University Press, Princeton, NJ, 360 pp.
- 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.
- Franks, P.J.S., and S.E.R. Franks. 2009. Mix it up, mix it down: Intriguing implications of ocean layering. *Oceanography* 22(1):228–233. Available online at: <https://tos.org/hands-on-oceanography> (accessed April 23, 2021).
- Garrison, T.S. 2007. *Oceanography: An Invitation to Marine Science*. Sixth edition. Thomson Brooks/Cole, 608 pp.
- Visser, A. 2007. Biomixing of the oceans? *Science* 316:838.

OTROS RECURSOS

- <http://cosee.umaine.edu/cfuser/index.cfm>. Esta página web océano-clima de COSEE-OS proporciona imágenes de perfiles de densidad y de circulación termohalina, videos de convección oceánica, una colección de actividades prácticas y enlaces a conceptos relacionados.
- Ford, B.A., and P.S. Smith. 2000. *Project Earth Science: Physical Oceanography*. National Science Teachers Association, Arlington, VA, 220 pp.

ANIMAR A LOS ESTUDIANTES A HACER PREGUNTAS: UN PASEO POR UN ENTORNO ESTIMULANTE

BASADO EN WELLER, 1988

Hacerse preguntas es una parte integral de la investigación científica (National Research Council, 2000) y tiene muchos méritos educativos. El National Research Council (2000, p. 29) describe la manera de abordar “preguntas orientadas científicamente” del alumno como una de las cinco características esenciales de la investigación en clase. Las preguntas de los estudiantes pueden revelar mucho acerca de su entendimiento y raciocinio, y descubrir marcos conceptuales alternativos y errores de concepto. Las preguntas de los estudiantes pueden estimular su curiosidad y motivación, ayudarles a desarrollar habilidades de pensamiento crítico e independiente, y hacerles participantes activos. Sin embargo, en una clase típica, los estudiantes raramente hacen preguntas; es principalmente el instructor el que hace las preguntas. Cuando se les preguntó a los estudiantes a punto de graduarse de nuestro programa por qué raramente hacían preguntas en clase, las dos respuestas más comunes fueron: (1) el miedo de parecer estúpido y (2) una atmósfera de clase que no era propicia a hacer preguntas. Muchos estudiantes comentaban que sus experiencias en la educación convencional les habían llevado a desarrollar la noción de que lo que se esperaba de ellos era estar presentes en clase, tomar notas y completar sus deberes y exámenes. El hacer preguntas no era una capacidad que se hubiese enfatizado como parte de su educación formal.

Describimos aquí un enfoque que usamos para animar a los estudiantes a hacer preguntas.

Durante el primer periodo de un curso, llevamos a los estudiantes a pasear por un entorno rico y estimulante. El propósito del paseo es exponerles a un entorno rico en objetos que les incite a hacer preguntas espontáneas. Esta perspectiva deriva de un enfoque similar de la escuela primaria, destinado a obtener preguntas de jóvenes estudiantes (Jelly, 2001).

Como entorno estimulante, usamos la instalación de acuicultura de la Universidad de Maine, donde se crían peces tropicales con propósitos de investigación y comerciales. No les contamos a los estudiantes nada sobre este entorno antes del paseo. Sólo les pedimos que anoten las preguntas que

les vengan a la cabeza a medida que exploremos el entorno, centrándose en cuestiones que realmente les interesen (más que en preguntas que se podrían encontrar en un libro de texto). Después de alrededor de 30 minutos de exploración libre, se pide a cada estudiante que escoja entre tres y cinco preguntas favoritas de su lista para contribuir a la lista de la clase. Se puede compilar la lista de la clase electrónicamente o manualmente usando la pizarra, lo que permite a los estudiantes apreciar visualmente la cantidad, calidad y diversidad de las preguntas que han generado. Algunos ejemplos de las preguntas de los estudiantes durante el paseo de acuicultura: “¿Juegan los peces?” “¿Las algas favorecen o limitan su reproducción?” “¿Cómo se transporta un pez tropical con condiciones meteorológicas extremas y cuál es la mortalidad en este proceso?”

A continuación, pedimos a los estudiantes que formen equipos, y se pide a cada equipo que clasifique las preguntas basándose en características similares. Un representante de cada equipo explica a la clase el razonamiento que han seguido para escoger las categorías. Estas técnicas de aprendizaje cooperativo para la organización de la clase anima a los estudiantes a considerar todas las cuestiones cuidadosamente y a eliminar las categorías más descabelladas que siempre propondrán algunos estudiantes. Por ejemplo, en 2007 las categorías desarrolladas por los tres grupos pequeños fueron: Grupo A—biología, instalación, medio ambiente, negocio; Grupo B—medio ambiente, ciclo vital del pez, instalación/marketing; y Grupo C—exploración, biología/ecosistema, técnica, instalación/economía. Esta actividad puede que sea la primera ocasión que algunos estudiantes han tenido para clasificar datos brutos sin la indicación de algún instructor.

Para concluir, pedimos a los estudiantes que compartan su visión de cómo el paseo, las preguntas y la clasificación pueden parecerse a lo que los científicos hacen en la fase inicial exploratoria de una investigación que comienza. Pedimos también a los estudiantes que describan lo que creen que hace de una pregunta una buena pregunta científica. Discutimos

este asunto con toda la clase, refiriéndonos a las preguntas que han generado, para ilustrar las características de las buenas preguntas científicas. Los estudiantes a menudo responden que una buena pregunta científica debería ser tan específica como sea posible y no implicar aspectos no científicos como la creencia, la política y la ética. Aspectos adicionales que sacamos durante la discusión son, por ejemplo: Una buena pregunta científica debería (1) ser tan específica como sea posible, aislando las cuestiones esenciales de un problema; (2) no presuponer una respuesta (Sagan, 1996), sino que cree hipótesis alternativas y falsables de lo que pueda ser la respuesta a la pregunta; (3) no hacer intervenir pseudociencia (Derry, 1999; Sagan, 1996); y (4) no introducir algo sobre lo que no podamos conseguir información (Sagan, 1996). Para una discusión en más profundidad de estos aspectos del cuestionar científico, recomendamos Derry (1999), Sagan (1996, Capítulo 12, páginas 201–218), y Atkins (2003, páginas 3–4). Finalmente, discutimos el poder de preguntar en el aprendizaje y les pedimos a los estudiantes que compartan sus sensaciones acerca del hacer preguntas en clase. Usamos esta oportunidad para recordar a los estudiantes que el preguntar será una parte integral de la clase.

Este ejercicio marca el tono de nuestro curso, incrementará la comodidad de los estudiantes respecto a hacer preguntas, y en última instancia mejorará el aprendizaje de los estudiantes. Como extensiones de este enfoque, se puede pedir a los estudiantes que busquen respuestas a sus propias preguntas como deberes o trabajos. Se podría usar el ejercicio en medio del curso para captar el interés de los estudiantes cuando se introduce un tema nuevo. Nótese que un entorno rico no tiene por qué ser una instalación especializada. Experimentos en clase, vídeos, simulaciones por ordenador y/o fotos e imágenes podrían servir adecuadamente para estimular la capacidad de los estudiantes para preguntar.

REFERENCIAS

- Atkins, P. 2003. *Galileo's Finger: The Ten Great Ideas of Science*. Oxford University Press, 400 pp.
- Derry, G.N. 1999. *What Science Is and How It Works*. Princeton University Press, Princeton, NJ, 328 pp.
- Jelly, S. 2001. Helping children raise questions—and answering them. Pp. 36–47 in *Primary Science: Taking the Plunge*. W. Harlen, ed, Heinemann, London, UK.
- National Research Council. 2000. *Inquiry and the National Science Education Standards: A Guide for Teaching and Learning*. National Academy Press, Washington, DC, 202 pp.
- Sagan, C. 1996. *The Demon-Haunted World: Science as a Candle in the Dark*. Ballantine Books, New York, NY, 480 pp.
- Weller, H.G. 1998. A running inquiry—Nature asked the questions during this jog. *Journal of College Science Teaching* 27:389–392.

CAPITULO 2. PRESIÓN

OBJETIVO DE LAS ACTIVIDADES

Este grupo de actividades tiene la intención de ayudar a los estudiantes con el concepto de presión. Enseñar este concepto usando sus expresiones matemáticas (por ejemplo, las ecuaciones hidrostática y de Bernoulli) puede no llegar a los estudiantes con una orientación menos matemática. Por tanto, utilizamos una serie de actividades que permitan a los estudiantes examinar el concepto de presión desde múltiples ángulos. Empezamos por repasar la definición física de presión y por introducir ejemplos de la vida cotidiana. Esta estructura proporciona a los estudiantes un punto de partida familiar para un concepto que a menudo es entendido deficientemente y ayuda a motivar a los estudiantes al hacer el aprendizaje más relevante. Luego, usando actividades interactivas, ilustramos los conceptos de presión hidrostática, la compresibilidad de gases bajo presión (ley de Boyle) y la presión en fluidos en movimiento (Principio de Bernoulli). Destacamos cuán significativos son estos principios para los procesos oceánicos, desde la circulación oceánica a la evolución de las adaptaciones comúnmente encontradas en organismos marinos en la actualidad.

CONTEXTO TEÓRICO

La presión (P) se define como la fuerza (F) por unidad de área (A) en la dirección perpendicular a ese área:

$$P = \frac{F}{A}.$$

Por tanto, la presión depende del área sobre la que una determinada fuerza está distribuida. La presión es un escalar y por tanto no tiene direccionalidad. Cuando la presión varía a través de un objeto, éste sufre una fuerza direccional orientada desde la alta hacia la baja presión. La unidad de presión más común es el Pascal (Pa), donde $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2 = \text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s}^2)$ ($\text{N} = \text{Newton}$). Unidades tales como libras por pulgada cuadrada (psi), bares (por ejemplo, milibar) y atmósferas estándar (atm) también se usan en aplicaciones oceánicas y atmosféricas.

Muchos fenómenos que nos encontramos diariamente están asociados con el concepto de presión. Entre ellos encontramos el viento, las diferencias de rendimiento entre un cuchillo o un hacha afilados o no y el hecho de beber con una pajita. La presión atmosférica a nivel del mar tiene una magnitud de casi 10^5 Pa . Nuestros cuerpos no colapsan como resultado de esta presión porque no se aplica ninguna fuerza neta sobre ellos (una presión

igual existe dentro del cuerpo). Nuestros sentidos no detectan presión absoluta, sino que detectan cambios en presión (por ejemplo, cambios de presión generados dentro de cavidades llenas de gases cuando nos sumergimos en el agua o al volar).

A pesar de que los estudiantes pueden no darse cuenta, la presión varía de sitio en sitio, tanto en el océano como en la atmósfera. Cambios espaciales de presión son los mecanismos que fuerzan las corrientes oceánicas y los vientos. Por ejemplo, los vientos alisios se dirigen desde las altas presiones subtropicales a las bajas presiones ecuatoriales. Pero, por razones no totalmente entendidas, en el Océano Pacífico estos patrones de presión cambian cada tres a ocho años, causando un debilitamiento de los vientos alisios e incluso un cambio de dirección. Este cambio en presión atmosférica se denomina Oscilación del Sur. Los cambios de la circulación oceánica en el Pacífico Ecuatorial asociados con la Oscilación del Sur dan como resultado el fenómeno conocido como El Niño, que causa graves consecuencias a escala global.

La presión en el océano se incrementa casi linealmente con la profundidad. Diferentes organismos se han adaptado a la vida en un rango de profundidades determinado. Las cavidades llenas de gas dentro de animales y otros organismos se comprimen bajo presión (ver a continuación). Adicionalmente, la solubilidad de los gases se ve afectada por la presión, con severas consecuencias para la fisiología del buceo tanto de los seres humanos como de los organismos marinos. La presión no sólo impone límites a los organismos marinos, sino que también puede ser utilizada por estos. Por ejemplo, cambios de presión asociados con el flujo de agua sobre montículos y otros obstáculos incrementa la velocidad del flujo y al mismo tiempo incrementa la disponibilidad de alimento para organismos filtradores (por ejemplo, mejillones y percebes) y de agua saturada en oxígeno para organismos que moran en el sedimento marino (ver a continuación).

Presión Hidrostática (Fluidos en Reposo)

La presión a una determinada profundidad en el océano es el resultado de una fuerza (el peso) ejercida por la columna de agua y de aire sobre esa profundidad. Esta presión, en fluidos en reposo, se denomina “presión estática” o “presión hidrostática”. La presión hidrostática (P_h) es función de la densidad del fluido y de la altura de la columna de fluido (profundidad). La relación viene definida por la ecuación hidrostática $P = \rho g z$, donde ρ es

CUADRO 2.1. CALCULANDO LA PRESIÓN HIDROSTÁTICA

Supongamos que tenemos una columna de agua con una sección transversal de área, A , y una profundidad (altura), z . El volumen de la columna de agua es Az . La fuerza que esta columna ejerce sobre una determinada sección transversal es $F = \text{peso} = mg$, donde m es la masa de agua sobre la sección transversal y g es la aceleración gravitatoria. La masa puede ser convenientemente expresada en términos de la densidad (aquí se supone constante) y del volumen de agua: $m = \rho V$. Así, $F = \rho Vg$. La fuerza por unidad de área (la presión, P) es por tanto, $P = \rho Vg/A = \rho(Az)g/A = \rho gz$. Si la densidad cambia con la profundidad (un cambio que en el océano es inferior al 1%), en lugar de la densidad se utiliza la densidad media en la vertical (calculada mediante una integral de la densidad en la vertical y dividida por la profundidad de la columna de agua). La ecuación hidrostática es muy útil para la medición de la presión en los fluidos. Se usan instrumentos como los manómetros (Actividad 2.4) para medir la presión relativa a una presión de referencia (generalmente la presión atmosférica).

la densidad media en la vertical, g es la aceleración gravitatoria y z es la altura de la columna de agua (para la derivación, ver Caja 2.1). La ecuación hidrostática es fundamental para estudiar la circulación oceánica. Por ejemplo, las corrientes geostróficas (como los giros oceánicos o los anillos de la Corriente del Golfo) vienen determinadas por el balance entre los gradientes de presión horizontal y la aceleración de Coriolis (una aceleración resultante de la rotación terrestre). Diferencias en la presión hidrostática entre dos puntos dan como resultado a una fuerza por unidad de volumen ejercida sobre el fluido (aire o agua) actuando desde la región de altas presiones a la región de bajas presiones. Debido a la rotación terrestre, el movimiento resultante no es “cuesta abajo” desde altas a bajas presiones (como ocurriría en un marco de referencia sin rotación) sino a lo largo de líneas de presión constante. En el Ecuador, donde el efecto de la aceleración de Coriolis es pequeño, los vientos y las corrientes siguen predominantemente los gradientes de presión.

La medición exhaustiva de los cambios horizontales de presión a lo largo de superficies de profundidad constante en el océano no resulta práctica ya que la presión y la profundidad son versiones a distinta escala de una misma coordenada vertical (al menos en primera aproximación). En su lugar, los oceanógrafos usan el método de las alturas dinámicas por el cual se eligen dos puntos de referencia de presión y se calculan y comparan las integrales en la vertical de las densidades de las dos columnas de agua sobre estos puntos de referencia. Se supone que estos puntos de referencia se encuentran en una superficie isobárica

(una superficie imaginaria en la cual la presión es constante en todos sus puntos) y por tanto no existe movimiento horizontal de fluido a esa profundidad. Si ρ_1 es distinto de ρ_2 (donde ρ_1 y ρ_2 son las densidades promediadas en la vertical para los puntos de referencia 1 y 2, respectivamente), entonces z_1 y z_2 (la altura de la columna de agua sobre los puntos de referencia 1 y 2) deben ser diferentes. Las diferencias de altura de la columna de agua sobre una profundidad de referencia se usan para calcular la pendiente de la superficie del mar; por ejemplo, a través de la Corriente del Golfo (alrededor de 70 kilómetros de anchura), la superficie del mar cae más de un metro. La pendiente calculada es proporcional al gradiente de presión que se requiere para la estimación de las velocidades de corrientes geostróficas (véase por ejemplo, la Figura 10.7 de http://oceanworld.tamu.edu/resources/ocng_textbook/chapter10/chapter10_04.htm). En la actualidad, se puede determinar la pendiente de la superficie del mar mediante altimetría por satélite.

Otros dos puntos importantes deben ser mencionados con respecto a la presión hidrostática. El primero es la transmisión de la presión a través del fluido. La presión aplicada sobre una parte del fluido se transmite a través de todo el fluido (lo cual se conoce como Principio de Pascal). La información sobre un cambio de presión dentro de un fluido se propaga mediante ondas sonoras (ondas de presión) a la velocidad del sonido en el agua (~ 1500 m/s), lo que en nuestros experimentos de laboratorio (por ejemplo, el buceador cartesiano del Capítulo 3) parece instantáneo. Si se toma un globo lleno de agua y se

sumerge bajo agua, la presión hidrostática fuera del globo es la misma que dentro y el globo mantiene su tamaño y forma. Este principio es la razón por la que no sentimos presión en nuestro cuerpo (excepto en nuestras cavidades gaseosas; véase abajo) cuando buceamos. La transmisión de la presión en un fluido es el principio que usan los mecanismos hidráulicos (por ejemplo, los ascensores de coches en los talleres de reparación, los gatos hidráulicos, la maquinaria de construcción que se usa para levantar cargas pesadas).

Compresibilidad de Gases Bajo Presión

En el océano la presión se incrementa a razón de una atmósfera (1 atm, 10^5 Pa) por cada 10 metros. Los organismos que viven o se sumergen a grandes profundidades se someten a grandes fuerzas de compresión debido al peso de la columna de agua sobre ellos. Una de las principales diferencias entre el agua y los gases es que mientras el agua es un fluido altamente incompresible, los gases son compresibles. El volumen de una cantidad fija de gas es inversamente proporcional a la presión dentro de ese volumen (conocida como la Ley de Boyle); si la presión se dobla, el volumen de gas disminuye a la mitad. Como

el cuerpo humano se compone predominantemente de agua, no se comprime significativamente cuando es sumergido en agua. La presión solo se siente en las cavidades gaseosas como fosas nasales, oídos y pulmones. Esta es la razón por la que los oídos pueden doler cuando nos sumergimos incluso sólo unos pocos metros en una piscina. Los mamíferos marinos que se sumergen a grandes profundidades han desarrollado adaptaciones para superar los daños potenciales a sus pulmones u otras cavidades. Del mismo modo, la Ley de Boyle también ilustra los peligros de los gases en expansión cuando la presión se reduce al desplazarnos a profundidades más someras. Cuando un buceador respira aire comprimido a una profundidad de diez metros (donde la presión total es de dos atmósferas) y después asciende a la superficie mientras contiene la respiración, el aire de sus pulmones se expande al doble de su volumen original. Una parte del aire debe ser expulsado o los pulmones reventarían. Daños similares pueden ocurrir en las vejigas natatorias de muchas especies de peces si ascienden con demasiada rapidez. Por ello, ciertas especies de peces bentónicos tienen restringidos sus desplazamientos verticales y pueden morir cuando son

CUADRO 2.2. EL PRINCIPIO DE BERNOULLI

Supongamos que tenemos un fluido incompresible desplazándose en un flujo continuo y constante en el tiempo, en el cual las fuerzas viscosas se consideran insignificantes (no hay pérdidas por fricción). Varias formas de energía están presentes: (1) la energía potencial gravitacional asociada a la masa del fluido, $E_p = mgz$, (2) la energía potencial compresiva del fluido, PV , y (3) la energía mecánica cinética que crece con la velocidad del fluido, $E_k = mv^2/2$. La energía total es la suma de todas las anteriores. Por el principio de conservación de la energía, si no hay un trabajo ejercido sobre el fluido, la energía total en dos puntos a lo largo de la trayectoria del flujo⁸ debe ser la misma:

$$m_1 \frac{v_1^2}{2} + m_1 gz + P_1 V_1 = m_2 \frac{v_2^2}{2} + m_2 gz + P_2 V_2.$$

Si z y la densidad son constantes a lo largo del fluido (mismo fluido viajando en un tubo horizontal), podemos cancelar los términos de energía potencial gravitatoria. Haciendo esto y dividiendo por el volumen:

$$\rho_1 \frac{v_1^2}{2} + P_1 = \rho_2 \frac{v_2^2}{2} + P_2.$$

Por tanto, cambios en la velocidad del fluido (aceleración) están asociados a cambios de presión.

El Principio de Bernoulli tiene implicaciones significativas para el cálculo de la sustentación aerodinámica siendo usado para el cálculo de la velocidad de aviones (el tubo de Pitot que se observa a los lados de la cabina de los aviones de propulsión pequeños) y permite a los vehículos propulsados por el viento el poder viajar a velocidades mayores que las del viento.

⁸ N. del T.: Se refiere a la energía total que tiene un pequeño volumen de fluido cuando pasa de la posición 1 a la posición 2. Debe entenderse que m_1 significa "masa del volumen en el punto 1" y que $m_1 = m_2$ si la densidad es constante a lo largo del fluido.

pescados. Otras especies han desarrollado vías para ventilar rápidamente sus vejigas natatorias y así no restringir sus movimientos verticales.

En el argumento anterior, se asumía que la temperatura era constante. Puede ser útil preguntar a los estudiantes cómo los cambios de temperatura pueden afectar a los cambios del volumen de un objeto sumergido. La Ley de los Gases Ideales dice que para un volumen de gas dado, la presión se incrementa con la temperatura (una discusión de la energía cinética molecular puede ser adecuada). En cualquier caso, en el océano, los cambios de temperatura con la profundidad tienen un rango de variación mucho menor (en torno al 10% en unidades Kelvin para toda la profundidad del océano) que los cambios de presión con la profundidad (una atmósfera cada 10 metros). Por tanto, los cambios de volumen en función de la profundidad en las cavidades llenas de gases están dominados por la presión.

Fluidos Acelerados: el Principio de Bernoulli

Cuando la velocidad de un fluido cambia a lo largo de su trayectoria simultáneamente ocurren cambios en la presión. La relación entre la presión de un fluido y su velocidad, conocido como el Principio de Bernoulli (Caja 2.2), puede ser derivada a partir del principio de conservación de la energía o desde la Segunda Ley de Newton ($F = ma$). Muchos organismos, tales como esponjas, ascidias y otros filtradores, parecen aprovecharse del flujo en las áreas que les rodean para complementar su actividad de bombeo (Vogel, 1978). Por ejemplo, la gamba perforadora *Callianassa filholi* construye grandes montículos en los alrededores de la apertura exterior de su pozo. De forma similar a una chimenea, el flujo que pasa sobre los montículos tiene que acelerarse (acomodándose a una sección transversal menor); coincidiendo con esta aceleración hay una menor presión sobre la apertura, lo cual crea un flujo ascendente dentro del tubo de ventilación.

DESCRIPCIÓN DE LAS ACTIVIDADES

A menudo comenzamos la explicación de la presión mostrando una bailarina en equilibrio sobre un pie y un elefante de pie sobre las cuatro patas y preguntando a los estudiantes cuál ejerce mayor presión sobre el suelo. Se pide a los estudiantes que voten y después que calculen las presiones (suponiendo que la masa de un elefante es 6000 kg, la masa de una bailarina es 45 kg, el radio de una pata de elefante es 30 cm y el radio de la punta de un zapato de ballet es 1 cm). (Recordar que la fuerza (F) es igual al peso (no ha de ser confundido con la masa) del objeto: $F = \text{peso} = mg$, donde m es la masa y g es la aceleración gravitatoria, 9.8 m/s^2).

Usamos las Actividades 2.1 y 2.2 para ilustrar el concepto de presión. La presión hidrostática se muestra con las Actividades 2.3 y 2.4. A pesar de que estas dos actividades resaltan el mismo principio, los estudiantes a menudo comentan que hacer ambas actividades mejoró considerablemente su comprensión sobre la presión hidrostática. Fueron “forzados” a transferir conocimiento desde una situación a la otra y el proceso les motivó a reevaluar su conocimiento. El uso de múltiples actividades para mostrar el mismo principio también proporciona al instructor oportunidades adicionales para la evaluación. Las Actividades 2.5 y 2.6 están diseñadas para ilustrar el concepto de la compresibilidad de los gases bajo presión, con la Actividad 2.5 proporcionando una aproximación cualitativa mientras que la Actividad 2.6 es una presentación cuantitativa de la Ley de Boyle. Para demostrar el principio de Bernoulli, usamos la Actividad 2.7. Las actividades se colocan como prácticas separadas, como se describe en el Capítulo 1, y pueden ser alternativamente usadas para demostraciones en clase.

ACTIVIDAD 2.1. LECHO DE CLAVOS (Figura 2.1)

Materiales

- Dos tablas de madera cuadradas (del mismo tamaño): una tiene un solo clavo en el centro y la otra tiene una malla de clavos (15 por 15 clavos), a modo de “lecho de clavos”.
- Pie universal (soporte universal de laboratorio)
- Globos del mismo material, tamaño y forma
- Un aro (u otra cosa que pueda ser fijada al pie universal) que sirva de peso.

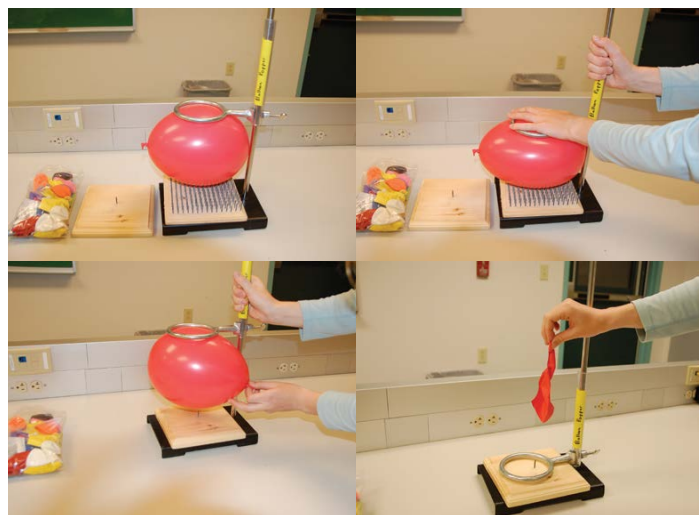


Figura 2.1. Actividad 2.1 experimento con cama de clavos (superior) y con un solo clavo (inferior).

Instrucciones para los Estudiantes

1. Predicid qué pasará con cada globo al ser depositado sobre cada una de las tablas y ser sometidos a aproximadamente la misma fuerza. Explicad vuestro razonamiento.
2. Comprobad vuestra predicción.

Explicación

Cuando se coloca un globo sobre una cama de clavos (Figura 2.1, panel superior izquierdo), la fuerza ejercida se distribuye sobre un gran área (la suma de todas las cabezas de los clavos en contacto con el globo). La presión resultante no es suficiente para causar la explosión del globo (Figura 2.1, panel superior derecho). Cuando el globo se coloca sobre un clavo aislado, se necesita sólo una pequeña fuerza para que el globo explote ya que la fuerza está distribuida en estos momentos sobre un área menor (el área en contacto con un solo clavo; Figura 2.1, panel inferior izquierdo) y la mayor presión causa la explosión del globo (Figura 2.1, panel inferior derecho). Por la misma razón, al tumbarse sobre una cama de clavos puede que sintamos unas punzadas pero no nos causará daños, mientras que pisar un clavo puede abrirnos un agujero en el pie. El mismo razonamiento puede ser utilizado para explicar el hecho de que al afilar un cuchillo o un hacha estos mejoren su capacidad para cortar.

2.2. PERCEPCIÓN DEL PESO (Figura 2.2)

Materiales

- Bola de acero grande y hueca (diámetro: 12,5 cm y masa: 144 g; de sciencekit.com)
- Bola de acero pequeña y rellena (diámetro: 3,2 cm y masa: 129 g; de sciencekit.com)
- Dos embudos idénticos
- Una balanza para pesar cada bola

Instrucciones para los Estudiantes

1. Sujeta ambas bolas a la vez en la palma de tus manos. ¿Cuál parece más pesada?
2. Elige a un voluntario para que mantenga sus ojos cerrados. Coloca cada bola en el embudo y pide al voluntario que sujete cada embudo por la parte de abajo del cuello. Pregunta al voluntario qué bola es más pesada y apunta su respuesta. Repite el experimento con otros voluntarios.
3. ¿Fue la percepción del peso diferente mientras se sujetaba el embudo que cuando se mantenían las bolas en la mano? ¿Por qué?
4. Pesad las bolas para determinar cuál es la más pesada. Explicad vuestras observaciones.



Figura 2.2. Materiales para la Actividad 2.2 (izquierda) y experimento (derecha).

Explicación

Al sujetar cada bola sobre la palma de la mano, la bola grande parece más ligera que la bola más pequeña. La fuerza ($F = mg$) ejercida por la bola grande es en realidad mayor que la ejercida por la pequeña. Pese a ello, como la fuerza está distribuida sobre un área mayor la presión ($P = F/A$) es menor y parece más ligera. Cuando las bolas son colocadas sobre los embudos y sujetadas por el cuello, la superficie sobre la que la fuerza es aplicada es similar para ambas bolas y se puede notar que la bola grande es ligeramente más pesada, lo cual puede ser confirmado al usar la balanza.

2.3. PREPARADOS, LISTOS, A CHORRO (Figura 2.3)

Materiales

- Un tubo con un pequeño orificio cerca de la parte inferior y siete agujeros grandes a lo largo del tubo obstruidos con tapones de goma (Figura 2.3, superior). La separación entre los agujeros centrales debe ser 5 cm (puede cambiar). Una versión simplificada de esta actividad puede ser llevada a cabo usando la sección central de botellas de plástico de 2 litros unidas con cinta adhesiva (Sharon Franks, UCSD, *comunicación personal.*, Junio 2009)
- Un tubo con tres agujeros de distintos tamaños a la misma altura (Figura 2.3, centro)
- Recipiente grande
- Regla
- Garrafa con agua
- Rollo de papel

Instrucciones para los Estudiantes

Antes de la actividad, revisamos las ecuaciones hidrostáticas y proporcionamos a los estudiantes las siguientes instrucciones (en algunos casos puede ser preferible explicar las ecuaciones hidrostáticas después de la Parte A).

Parte A

1. Tenéis un tubo con un pequeño orificio cerca de la parte inferior y varios orificios grandes obstruidos con tapones de goma. Podéis fijar la altura de la columna de agua sobre el orificio inferior cubriendo ese orificio con el dedo y al mismo tiempo llenando el tubo hasta que el agua salga por uno de los orificios grandes de la parte de arriba (tras quitar uno de los tapones de su agujero). Aseguraos de colocar la regla perpendicular a la base del tubo.
2. Antes de usar este aparato: ¿Qué esperáis que ocurra cuando llenáis el tubo con agua hasta la altura del primer gran orificio (desde la base) y quitáis el dedo del orificio pequeño? Explicad vuestras expectativas en base a las fuerzas que actúan sobre el fluido. ¿Qué esperáis que ocurra cuando incrementáis la altura de agua sobre el orificio de salida? ¿Por qué?
3. Comprobad vuestras predicciones. Empezad quitando el tapón del agujero grande más próximo a la base. Al mismo tiempo mantened el dedo sobre el orificio pequeño y llenad el tubo hasta que el agua salga por el agujero que acabas de destapar. (Reflexión: ¿Por qué queremos mantener un nivel constante de agua dentro del tubo?) Usando una regla, mide la altura del agua sobre el orificio de salida. Ahora, quitad el dedo del orificio de salida dejando salir el agua mientras seguís añadiendo continuamente agua para mantener el mismo nivel de agua dentro del tubo. Indicad la distancia a la que llega el chorro de agua cuando primero sale del agujero. Volved a colocar el tapón en su agujero y repetid los pasos anteriores con cada uno de los otros cuatro agujeros, uno cada vez.
4. Graficad la distancia hasta la que el agua llega en la regla como función de la altura de la columna de agua para cada uno de los agujeros. ¿Son vuestros resultados consistentes con vuestras predicciones en el paso 2?
5. ¿Cambiaría la distancia hasta la que el agua llega para un agujero específico si éste fuera mayor? ¿Por qué?

Parte B

1. Utilizando el segundo tubo (con tres agujeros de diámetros diferentes), cubrid los tres agujeros con los dedos y rellenad el tubo con agua. Colocad la regla perpendicularmente a la base del tubo. Destapad un agujero cada vez y medid la distancia a la que el agua llega cuando empieza primero a salir. ¿Coinciden vuestras observaciones con vuestras expectativas del paso 5 anterior (Parte A)?

Esta actividad puede ser ampliada para ilustrar el concepto de embalse (un gran contenedor con salidas y entradas cuyo nivel [volumen] cambia dependiendo de las diferencias entre entradas y salidas de agua).

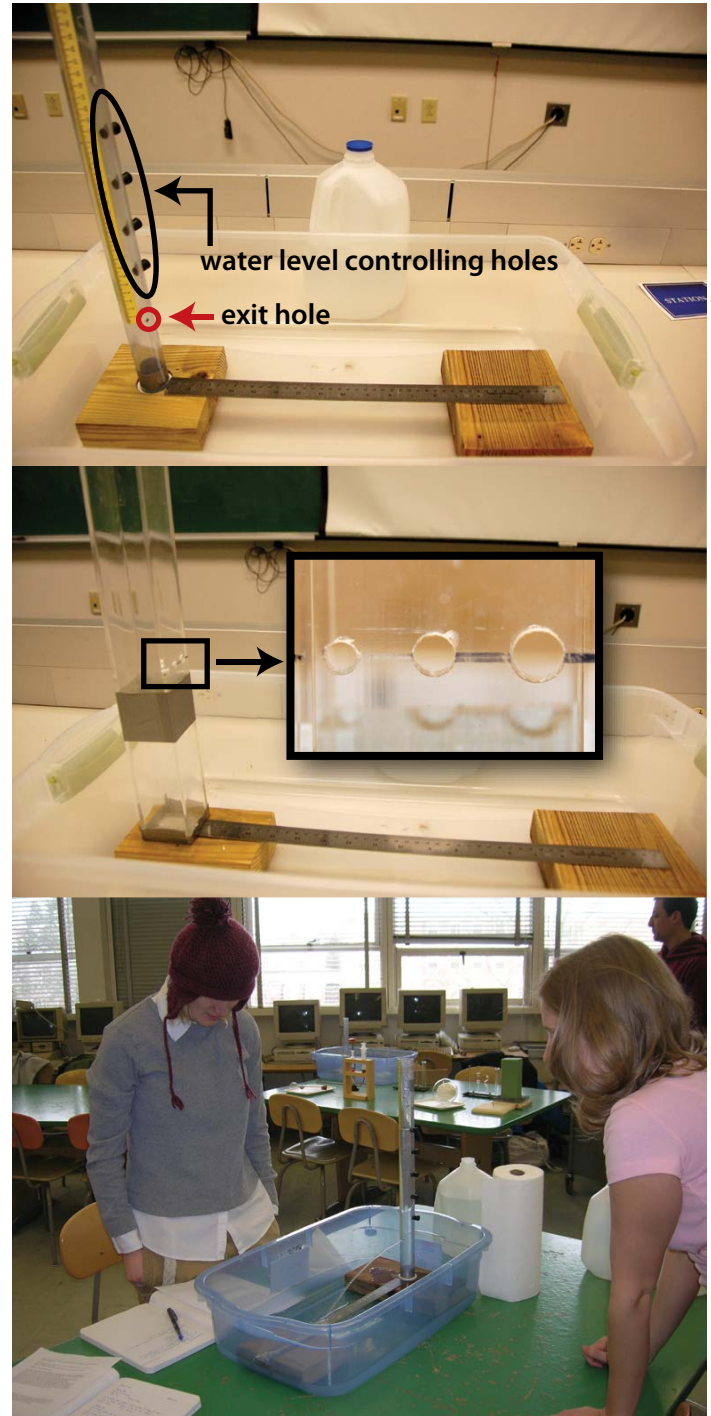


Figura 2.3. Materiales para la Actividad 2.3, Parte A (superior) y parte B (centro). En la figura superior, la expresión “water level controlling holes” señala los agujeros grandes a lo largo del tubo obstruidos con tapones de goma; “exit hole” indica el pequeño orificio para la salida del líquido. Estudiantes ejecutando la Parte A (inferior).

Explicación

Parte A

El peso de la columna de agua ejerce una presión en el agua a la altura del orificio de salida (imaginemos una sección transversal del tubo a la altura del agujero). Esta presión es mayor que la presión fuera del agujero (la presión atmosférica), lo que causa que el agua salga a chorro cuando el dedo se quita del orificio. Cuando la altura de la columna de agua sobre el orificio de salida se incrementa, la diferencia de presión entre dentro y fuera del agujero también aumenta, causando que el chorro de agua llegue a una distancia mayor. Recordemos que la presión hidrostática es proporcional a la altura de la columna de agua sobre el orificio (la contribución de la presión atmosférica es la misma en ambos lados del orificio).

Parte B

Excepto para orificios muy pequeños (para los que la fricción se convierte en importante), el tamaño del orificio no hace variar significativamente la distancia a la que llega el chorro de agua. Una manera de resolver este problema de manera matemática (para los estudiantes más avanzados) es considerar la presión ($P = \rho gz$) como la energía potencial ($PE = mgz$, donde m es la masa) por unidad de volumen, V . Así, $PE/V = mgz/V = \rho gz$. Cuando un paquete de agua sale a chorro de la columna, la mayor parte de su energía se transforma en energía cinética ($KE/V = \rho v^2/2$, donde v es la velocidad en la dirección perpendicular al tubo). Por el principio de conservación de la energía, $\rho v^2/2 = \rho gz$, y $v = \sqrt{2gz}$, de esta forma, la velocidad y por tanto la distancia que alcanza el fluido no dependen del tamaño del agujero y son sólo función de la altura de la columna (z).

La distancia que el chorro de agua alcanza puede ser predicho usando una simple justificación que puede resultar familiar para estudiantes con una formación en mecánica. El fluido llegará al suelo en un tiempo igual a $t = \sqrt{2H/g}$ segundos tras dejar el orificio, donde H es la altura del orificio de salida sobre la base y llegará a una $L = vt$, donde $v = \sqrt{2gz}$. En la práctica, la distancia disminuye algo cuando se compara con la distancia calculada debido a la fricción con las paredes del orificio y con el aire por el que el fluido viaja antes de llegar al suelo.

2.4. MANÓMETRO Y TUBOS DE EQUILIBRIO (Figura 2.4)

Materiales

- Manómetro en forma de U (construido a base de materiales que pueden ser encontrados en cualquier ferretería: tubo de plástico transparente cortado en tres pedazos y dos codos para conectar las piezas de tubo)
- Agua
- Aceite
- Tubo de equilibrio #1: brazos de diferentes formas (sciencekit.com)
- Tubo de equilibrio #2: brazos de diferentes diámetros (sciencekit.com)

Instrucciones para los estudiantes

Con anterioridad a estas actividades los estudiantes han repasado la Segunda Ley de Newton, la cual cuando se aplica a fluidos implica que en ausencia de otras fuerzas los fluidos se desplazan desde altas a bajas presiones.

Parte A

1. Predécid que pasará cuando llenéis de agua el manómetro en forma de U. ¿Qué altura tendrá el agua en cada brazo? ¿Por qué? Dibujad la sección transversal del manómetro, mostrando vuestra predicción y explicad vuestros razonamientos. (Pista: Si el agua está en reposo [no hay flujo a lo largo del tubo], ¿qué podéis decir acerca de las diferencias de presión en la base de cada brazo?). Rellenad el manómetro hasta que podáis ver claramente el nivel de agua en cada brazo y comparad lo que observáis con vuestra predicción.
2. ¿Qué creéis que ocurriría con el nivel de fluido en cada brazo si añadiríais aceite (suficiente para formar una capa de unos 5 cm) a uno de los brazos? ¿Por qué? Si predécis un cambio, dibujad un diagrama cualitativo del nuevo equilibrio.
3. Añadid el aceite. ¿Están de acuerdo vuestras observaciones con vuestra predicción? Explicadlo.

Parte B

1. Estudiad el tubo de equilibrio con brazos de diferentes formas. Predécid cuál será el nivel de agua en cada brazo (en relación a los otros brazos) cuando rellenáis parcialmente de agua el aparato. Dibujad un diagrama cualitativo de vuestra predicción y explicad vuestro razonamiento.
2. Comprobad vuestra predicción.
3. ¿Está de acuerdo vuestra observación con vuestra predicción? Si no es así, ¿cómo revisaríais vuestra explicación?

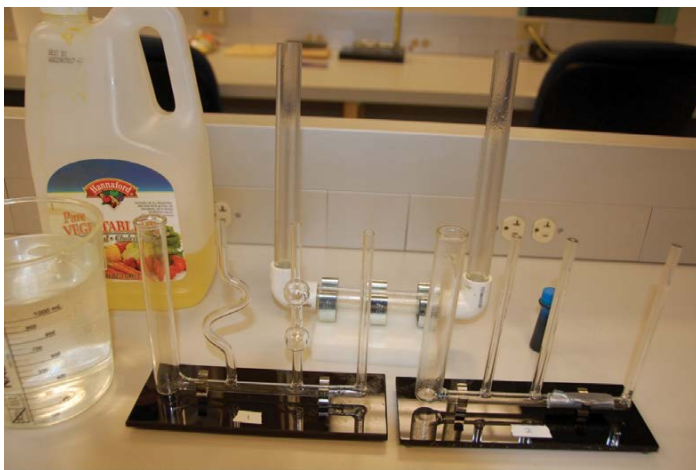


Figura 2.4. Materiales usados en la Actividad 2.4. El manómetro en forma de U (Parte A) se ve al fondo. En la parte delantera se ve el tubo de equilibrio con brazos de diferentes formas (izquierda) y el tubo de equilibrio con brazos de diferentes diámetros (derecha).

Parte C

1. Estudiad el tubo de equilibrio con brazos de diferentes diámetros. Prededid cuál será el nivel de agua en cada brazo (en relación a los otros brazos) cuando rellenáis el aparato con agua. Dibujad un diagrama de vuestra predicción y explicad vuestro razonamiento.
2. Comprobad vuestra predicción.
3. ¿Concuerdan vuestras observaciones con vuestras predicciones? Si no es así, ¿cómo revisaríais vuestra explicación?

Explicación

Parte A

Un manómetro es una herramienta que mide la presión en base a la altura de un fluido. La versión más simple de manómetro es un tubo en forma de U lleno de fluido. El nivel de agua en cada brazo del manómetro viene determinado por la presión que ejerce sobre la base de cada brazo la suma de la columna de aire y la columna de agua. Cuando un brazo del manómetro se rellena, el agua fluye hacia el otro brazo hasta que el sistema alcanza el equilibrio y deja de haber flujo dentro del manómetro, lo cual implica que las presiones sobre la base de ambos brazos son iguales ($P_1 = P_2$ y $P_1 = g\rho_{\text{agua}}z_1 + P_{\text{aire}}$; $P_2 = g\rho_{\text{agua}}z_2 + P_{\text{aire}}$, luego $z_1 = z_2$). La altura de la columna de agua en cada brazo debe ser la misma. Cuando el aceite se añade sobre el agua de uno de los brazos, el manómetro alcanza un nuevo equilibrio: $P_1 = P_2$ donde $P_1 = g(\rho_{\text{agua}}z_{\text{agua1}} + \rho_{\text{aceite}}z_{\text{aceite}})$ y $P_2 = g\rho_{\text{agua}}z_{\text{agua2}}$. Como $\rho_{\text{aceite}} < \rho_{\text{agua}}$, la columna de fluido en el brazo que contiene agua y aceite debe ser más alta que en el brazo que sólo tiene agua (siendo la presión del aire la misma en ambos).

Esta actividad puede ser utilizada como una analogía del método de altura dinámica para calcular pendientes de la superficie del mar y para examinar la relación entre densidad media en la vertical y altura de la columna de agua. La base del manómetro en forma de U es análogo a la capa de referencia de no movimiento. A cualquier altura sobre la transición aceite-agua, existe una diferencia de presión entre los dos brazos del aparato (por tanto, si conectáramos los brazos sobre la base, el fluido se desplazaría desde el brazo que contiene agua y aceite hacia el que contiene sólo agua hasta que un nuevo equilibrio se alcanzara).

Parte B

La forma o el área de una sección transversal de los brazos no tiene ningún efecto sobre el nivel de agua. La altura de la columna de agua (o cualquier otro fluido) en cada brazo es función de la presión y de la densidad del fluido ($z = P/\rho g$). De esta forma, tras introducir el fluido en la columna y dejar que el sistema alcance un equilibrio, la presión en la base de cada brazo es la misma (no hay movimiento) y la altura será la misma para cada brazo independientemente de su forma. Esta observación explica el hecho de que la presión sea la misma a una misma profundidad tanto si es una piscina como si es un lago (suponiendo que la presión atmosférica es igual sobre la piscina y el lago).

Parte C

El mismo principio se aplica al tubo de equilibrio con brazos de diferentes diámetros. La altura de la columna de agua será la misma para cada brazo. La única excepción a este resultado es para el brazo más estrecho del tubo de equilibrio número 2, para el que otra fuerza se convierte en importante: la tensión superficial en el borde de cristal, la cual actúa haciendo subir el nivel de agua (esta observación puede usarse como “rompecabezas” que puede conducir a otra clase centrada en los procesos capilares y la tensión superficial).

2.5. GLOBOS ENCOGIDOS (Figura 2.5)

Materiales

- Contenedor de vacío usado para preservar alimentos (se encuentra en tiendas de electrodomésticos y menaje del hogar)
- Instrumento a presión (botella de soda de dos litros a la que se añade una bomba manual que se usa para mantener la carbonatación en botellas de soda y que puede ser encontrada en tiendas de alimentación).
- Dos globos del mismo tamaño (uno lleno de aire y el otro de agua)

- Malvaviscos (nubes, marshmallows) y cualquier otro producto que se quiera probar (por ejemplo, mandarina, tomate cherry)

Instrucciones para los Estudiantes

1. Predecid qué efecto tendría reducir la presión ejercida sobre cada globo.
2. Colocad el globo lleno de aire en el recipiente de vacío y extraed el aire del recipiente usando la bomba manual. ¿Qué le ocurre al globo? Abrid la válvula dejando entrar el aire en el recipiente. ¿Qué le ocurre al globo ahora?
3. Repetid el experimento con el globo lleno de agua. ¿El efecto de la presión es diferente en un caso y en otro? ¿Por qué?
4. Basándoos en vuestras observaciones, ¿qué creéis que le ocurrirá al malvavisco (o a cualquier otro objeto que queráis probar) cuando hagáis el vacío en el recipiente?
5. Comprobad vuestras predicciones.
6. Abrid la válvula y observad el malvavisco. Explicad vuestras observaciones.
7. Explorad el segundo instrumento a presión. Comparad y contrastad vuestras observaciones del comportamiento del globo lleno de aire en el instrumento a presión con lo ocurrido con la máquina de vacío. ¿Cuál es la diferencia entre este aparato y la cámara de vacío?

Un reto:

1. ¿Cómo meteríais un globo lleno de aire dentro de la botella de soda?
2. ¿Cómo utilizaríais este aparato para demostrar que el aire tiene peso?

Explicación

Los objetos que contienen cavidades llenas de aire se expanden cuando la presión a su alrededor disminuye, como ocurre cuando extraemos aire de un recipiente de vacío (Figura 2.5, panel superior izquierda). Como el agua es, en gran parte, un fluido incompresible, el tamaño del globo que contiene agua será casi igual en condiciones de baja presión y bajo presión atmosférica. Un tomate cherry se comportará de manera similar al globo de agua ya que no contiene burbujas de aire. Una mandarina o un malvavisco, por el contrario, contienen burbujas de aire y por tanto se expanden en el vacío. Cuando la válvula se abre, el aire entra de nuevo en el recipiente incrementando la presión (hasta alcanzar la presión atmosférica), y la mandarina y el malvavisco se encogen, aunque no necesariamente hasta sus tamaños originales ya que la estructura de los materiales ha sido alterada durante el proceso (por ejemplo, mediante la fusión de cavidades dentro del malvavisco).

Cuando presurizamos la botella de soda al añadir aire dentro de ella, la presión alrededor del globo se incrementa y se encoge hasta un volumen menor (se incrementa su presión



Figura 2.5. (superior) Materiales para la Actividad 2.5. (centro) Comprobando un recipiente de vacío relleno de aire. (inferior) Un globo lleno de aire bajo presión atmosférica (izquierda) y tras extraer el aire hacia la botella (presión incrementada; derecha).

interior; compara los paneles inferiores derecho e izquierdo de la Figura 2.5). Al abrir la válvula, el globo lleno de aire regresa a su tamaño original.

Reto: Para introducir un globo lleno de aire dentro de la botella, introducir el globo deshinchado dentro de la botella con la apertura del globo alrededor del agujero de la botella, dejando un pequeño espacio para introducir una pajita entre el globo y la pared de la botella. Al soplar dentro del globo, el aire puede escapar de la botella a través de la pajita, permitiendo que el globo se expanda dentro. Haced un pequeño nudo en la boca del globo y empujadlo hacia el interior de la botella. Este aparato puede ser utilizado para demostrar que el aire tiene una masa que no es despreciable pesando la botella a presión atmosférica y después bombeando aire dentro de la botella y pesándola de nuevo (la masa se calcula dividiendo el peso por g , lo cual ocurre automáticamente mediante chips en el interior de las balanzas).

2.6. COMPRESIBILIDAD DE LOS GASES

(Figura 2.6)

Materiales

- Aparato de compresión de gases (Arbor Scientific, o una versión casera que puede ser construida con facilidad o una jeringuilla de 60-ml tiene una sección transversal de $1 \text{ in}^2 = 6,5 \text{ cm}^2$)
- Pesos de masas conocidas (ellos usan pesos de 2,5 libras [1,14 kg])

Instrucciones para los Estudiantes

1. Apuntad el volumen del aire dentro de la jeringuilla bajo condiciones de presión atmosférica.
2. ¿Cuál creéis que será el volumen de aire dentro de la jeringuilla cuando coloquéis un peso de 2,5 libras (1,14 kg) sobre el aparato? ¿Cuál es la presión dentro de la jeringuilla?
3. ¿Qué le ocurrirá al volumen de aire en la jeringuilla si continuáis añadiendo pesos? ¿Cuál será el porcentaje de cambio cuando hayáis colocado 15 libras (6,8 kg) sobre la jeringuilla?
4. Comprobad vuestras predicciones. Colocad un peso sobre la jeringuilla (2,5 libras) y apuntad el volumen de aire. Colocad pesos adicionales (hasta un total de 5, 10 y 15 libras) y apuntad los cambios de volumen de aire con cada adición ¿Qué observáis?
5. Graficad el peso añadido frente al volumen de aire de la jeringuilla. ¿Cómo depende el volumen de la masa añadida? ¿Está de acuerdo con vuestras predicciones? ¿Sentís un cambio en temperatura al comprimir el aire? ¿Deberíais esperar uno?



Figura 2.6. (superior) Materiales para la Actividad 2.6. (inferior) El instrumento cuando se han colocado encima 15 libras (6.8kg).

6. ¿En qué porcentaje se incrementó la presión dentro de la jeringuilla en comparación con la presión atmosférica (14,7 psi; la presión aplicada por una masa de 14,7 libras (6,67 kg) sobre una pulgada cuadrada [$6,5 \text{ cm}^2$] de superficie terrestre), cuando todos los pesos son puestos sobre la jeringuilla (15 libras [6,8 kg]; teniendo en cuenta que la sección transversal de la jeringuilla tiene un área de alrededor de una pulgada cuadrada [$6,5 \text{ cm}^2$])? ¿Cuál fue el porcentaje de cambio del volumen de la jeringuilla cuando el peso de 15 libras fue añadido (asumiendo que no hubo cambio de temperatura)?
7. Usando vuestros datos, ¿cómo esperaríais que el volumen de los pulmones de un buceador cambie cuando se sumerge a 10 metros? (La presión se incrementa una atmósfera cada 10 metros de agua).

Nota: Es complicado encontrar pesos del sistema métrico internacional que sean apropiados para este experimento. Esta actividad puede proporcionar una oportunidad para practicar la conversión de unidades⁷.

Explicación

En esta actividad, bajo condiciones de presión atmosférica normal, el volumen de la jeringuilla es 46 ml. Para un gas ideal a temperatura constante, T , el volumen, V , de gas varía inversamente con la presión aplicada sobre el gas (Ley de Boyle: bajo condiciones de temperatura constante, el producto de la presión, P , y el volumen de un gas, V , es constante $\rightarrow PV = \text{constante}$ y $P = \text{constante}/V$). Así, al añadir los pesos (incremento de presión) se reducirá el volumen de aire dentro de la jeringuilla. Al añadir 15 libras de masa a la jeringuilla, se dobla la presión (comparada con la presión atmosférica normal) y el volumen de aire en la jeringuilla decrece a la mitad, como se esperaría por la Ley de Boyle. De igual manera, cuando un buceador se sumerge a 10 metros de profundidad experimenta una presión del doble de la presente en la superficie. Como resultado de ello, el volumen de sus pulmones se reduce a la mitad. Pese a que esperamos que la temperatura del gas en la jeringuilla se caliente, los intercambios de temperatura con el ambiente circundante dan como resultado cambios pequeños y casi imperceptibles; por lo que suponer que la temperatura permanece constante es válido. Esta actividad demuestra adecuadamente que la atmósfera tiene peso, aunque nos suele pasar desapercibido en la vida cotidiana.

ACTIVIDAD 2.7

Para demostrar el principio de Bernoulli, proporcionamos a los estudiantes una bolsa de plástico alargada (Bolsa de Bernoulli; Arbor Scientific; Figura 2.7). Pedimos a un estudiante que sujete el lado abierto y a otro que sujete el lado cerrado de tal forma que permanezca horizontal, paralela al suelo. Después pedimos a los estudiantes que intenten llenar la bolsa de un soplo. La tendencia de la mayor parte de los estudiantes es la de sellar la bolsa contra sus labios y soplar repetidamente requiriendo múltiples soplos para llenarla. (Figura 2.7, panel superior). Una técnica mucho más eficiente es la de soplar hacia la apertura de la bolsa desde una distancia (Figura 2.7, panel inferior), lo que crea una baja presión cerca de la apertura en la zona en la que la velocidad es mayor. Esta zona local de baja presión introduce aire de la atmósfera de alrededor (donde la presión es mayor) y



Figura 2.7. (superior) Un estudiante intentando llenar la bolsa mientras la tiene pegada a sus labios (inferior) Cuando se mantiene la bolsa completamente abierta y se sopla desde una distancia hacia la apertura, la bolsa puede llenarse con un solo soplo.

todo el aire fluye rápidamente dentro de la bolsa. La bolsa no es elástica y proporciona muy baja resistencia a la corriente de aire (mientras no esté llena).

REFERENCIAS Y OTRAS LECTURAS RECOMENDADAS

- Denny, M.W. 1993. Capítulos 3 y 4 de *Air and Water*, Princeton University Press, Princeton, NJ.
- Faber, T.E. 1995. Capítulo 1 de *Fluid Dynamics for Physicists*, Cambridge University Press.
- Hewitt, P.G. 2008. Capítulo 7 de *Conceptual Physics Fundamentals*. Addison Wesley.
- Richardson, D., ed. 2005. *The Encyclopedia of Recreational Diving*, 3rd ed. PADI, Santa Margarita, CA.
- Vogel, S. 1996. Capítulo 3 y 4 de *Life in Moving Fluids*. Princeton University Press, Princeton, NJ, 484 pp.

OTROS RECURSOS

- Sorbján, Z. 1996. *Hands-On Meteorology: Stories, Theories, and Simple Experiments*. American Meteorological Society, Washington, DC. Una colección de experimentos interactivos diseñados para conceptos de meteorología. En el Capítulo 3 se centran en la presión. Además de experimentos, el libro contiene narraciones históricas, referencias a descubrimientos importantes y varias historias sobre científicos famosos e infames.
- Una película de YouTube que contiene una serie de demostraciones sobre el principio de Bernoulli (Julius Sumner Miller – Physics – Bernoulli):
Parte 1: <http://www.youtube.com/watch?v=KCcZyW-6-5o>
Parte 2: <http://www.youtube.com/watch?v=wuffpiYxQU&feature=related>

⁷ N. del T.: Esta Nota ha sido traducida por fidelidad con el texto estadounidense, pero no tiene ningún sentido en España.

CASOS DISCREPANTES: DESPERTANDO LA CURIOSIDAD DE LOS ESTUDIANTES

Para atraer la atención de los estudiantes, provocar la reflexión e iniciar la investigación, los educadores a menudo utilizan el método de *casos discrepantes* (Hassard, 2005; Chiappetta and Koballa, 2006). Estos casos representan sorpresas que llevan al estudiante a preguntarse “¿Qué está pasando?” Un ejemplo de caso discrepante es la Actividad 2.2. Los estudiantes sienten que la bola más pequeña es “más pesada”, pero tras medir las masas de cada bola se sorprenden al descubrir que la bola mayor es la más pesada. Este descubrimiento les hace reflexionar sobre los conceptos de presión y peso y les ayuda a diferenciar entre fuerza y presión (fuerza por unidad de área). Un compendio de casos discrepantes relacionados con varios conceptos científicos se encuentra disponible en varios sitios de Internet y en libros de texto sobre ciencia. Por ejemplo, Liem (1987) ha compilado más de 400 casos discrepantes que usan materiales sencillos (con diagramas, preguntas y explicaciones) para la enseñanza de las ciencias desde la escuela primaria hasta la universidad.

Un caso discrepante efectivo requiere muy poca explicación. Por ejemplo, al inicio de una clase un instructor puede llenar en silencio una botella de 2 litros de soda vacía y transparente hasta un cuarto de su capacidad con agua muy caliente, mover el agua por unos segundos hasta calentar la botella entera, extraer el agua de la botella, taponar bien la botella y después colocar la botella en frente de los estudiantes. Mientras el instructor pasa lista, la botella se comprime hacia dentro en varios puntos. Sin falta, los estudiantes se sienten intrigados y empiezan a preguntar sobre la botella y el agua. El instructor puede dinamizar el proceso de preguntas e hipótesis de los estudiantes para explicar el colapso de la botella, dirigiendo la discusión hacia la Ley de los Gases Ideales y la relación entre temperatura, presión y volumen.

Al presentar a los estudiantes un puzzle en forma de evento inesperado, se consigue desafiar sus ideas preconcebidas, tanto basadas en conocimiento como en intuición, haciendo saltar su curiosidad e incrementando

su motivación para encontrar una solución. A través del proceso de investigación, que lleva al descubrimiento, los estudiantes pueden llegar a alcanzar nuevos niveles de entendimiento cognitivo y desarrollar una mejor capacidad de resolución de problemas (Piaget, 1971). Los casos discrepantes no tienen por qué ser actividades físicas; pueden ser introducidas mediante películas, descripción de acontecimientos u observaciones de campo (por ejemplo, el magnetismo inverso en rocas) que representan paradojas intrigantes. Los casos discrepantes pueden usarse para alcanzar objetivos pedagógicos específicos: obtener la atención de los estudiantes al inicio de una lección, provocar preguntas por parte de los estudiantes, identificar y resolver conceptos erróneos de los estudiantes, generar una reflexión continua sobre un proceso o un problema tras terminar una clase, comprobar si los estudiantes pueden aplicar lo que han aprendido a procesos similares pero inesperados e incluso servir como una parte de la evaluación formal de la lección. Cuando se presenta un caso discrepante es importante proporcionar suficiente tiempo a los estudiantes para que puedan pensar, discutir y tratar de explicar el fenómeno.

REFERENCIAS

- Chiappetta, E.L., and T.R. Koballa Jr. 2006. *Science Instruction in the Middle and Secondary Schools: Developing Fundamental Knowledge and Skills for Teaching*, 3rd ed. Pearson/Merrill Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 320 pp.
- Hassard, J. 2005. *The Art of Teaching Science*. Oxford University Press, 496 pp.
- Liem, T.L. 1987. *Invitations to Science Inquiry*, 2nd ed. Science Inquiry Enterprise, Chino Hills, CA, 488 pp.
- Piaget, J. 1971. *Biology and Knowledge*. University of Chicago Press, Chicago, IL.

CAPÍTULO 3. FUERZA DE FLOTACIÓN

PROPÓSITO DE LAS ACTIVIDADES

Este conjunto de actividades fue diseñado para ayudar a los estudiantes a entender mejor los principios subyacentes a la fuerza de flotación o flotabilidad. La mayoría de los estudiantes han oído hablar del término *flotación* y lo han experimentado cuando han entrado en el mar, una piscina o una bañera. Algunos son capaces incluso de enunciar el Principio de Arquímedes. Sin embargo, nuestra experiencia ha demostrado que los estudiantes a menudo se sienten incómodos cuando se les enfrenta a cuestiones relacionadas con la flotabilidad. Una investigación realizada por la Universidad de Washington encontró que a muchos estudiantes graduados en ciencia e ingeniería les faltaba una comprensión de la flotabilidad incluso habiendo cursado clases de introducción a la física en las que se enseñaba hidrostática (mediante los procedimientos habituales de enseñanza) y no fueron capaces de predecir ni explicar los comportamientos de flotación o hundimiento de distintos objetos (Loverude *et al.*, 2003).

Explicamos la flotación a nuestros alumnos después de que hayan hecho las prácticas sobre la densidad (Capítulo 1) y la presión (Capítulo 2). En la lección sobre la densidad, los alumnos examinaban comportamientos de flotación y hundimiento de varios objetos en función de sus densidades, pero no investigaban los principios subyacentes que gobiernan estos comportamientos. Las actividades que siguen permiten a los estudiantes aplicar el conocimiento ganado en las dos lecciones previas para explorar un poco más allá los factores que gobiernan la flotación y el hundimiento.

CONTEXTO TEÓRICO

Cuando un objeto se sumerge en un fluido, el fluido es desplazado para “hacer sitio” al objeto. Por ejemplo, cuando usted entra en una bañera, el nivel del agua asciende. La cantidad de agua que un objeto desplaza cuando es sumergido completamente es igual a su propio volumen (recuerde, por ejemplo, las medidas del volumen de rocas en la Actividad 1.3). El objeto sumergido está sometido a dos fuerzas: (1) una fuerza hacia abajo, la fuerza de gravedad, que crece si la masa del cuerpo crece, y (2) una fuerza hacia arriba, la fuerza de flotación, que se incrementa si la densidad del fluido se incrementa. Cuando la

fuerza gravitacional, hacia abajo, sobre un objeto es mayor que la fuerza de flotación, hacia arriba, el objeto se hunde; en caso contrario, el objeto flota.

La fuerza de flotación resulta de un desbalance en las presiones ejercidas sobre el objeto por el fluido. Debido a que la presión se incrementa con la profundidad, la base del objeto sumergido experimenta una presión mayor que la que experimenta su parte superior; por tanto, el objeto experimenta una fuerza hacia arriba. La fuerza hacia arriba resultante es igual al peso del fluido desalojado (Principio de Arquímedes). Si el peso de un objeto (en el aire) es mayor que el peso del fluido desalojado, se hundirá; si es menor, flotará.

En términos matemáticos, las dos fuerzas opuestas pueden ser escritas (usando la Segunda Ley de Newton) como

$$F_{\text{flotación}} = m_{\text{fluido}} g = \rho_{\text{fluido}} V_{\text{desplazado}} g$$
$$\text{y}$$
$$F_{\text{gravedad}} = m_{\text{objeto}} g = \rho_{\text{objeto}} V_{\text{objeto}} g.$$

Donde m_{fluido} y m_{objeto} son las masas del fluido desplazado y del objeto, g es la constante de aceleración de la gravedad, ρ_{fluido} y ρ_{objeto} son las densidades del fluido y del objeto, respectivamente, y $V_{\text{desplazado}}$ y V_{objeto} son los volúmenes del agua desplazada y del objeto, respectivamente. Cuando el objeto está completamente sumergido, $V_{\text{desplazado}} = V_{\text{objeto}}$. Por la definición de densidad, recuérdese que $m = \rho V$. La diferencia entre las dos fuerzas determina si el cuerpo se hunde, flota o permanece neutralmente flotante.

$$\Delta F = F_{\text{gravedad}} - F_{\text{flotación}} = V_{\text{objeto}} g (\rho_{\text{objeto}} - \rho_{\text{fluido}})$$

Cuando $\Delta F > 0$, el objeto se hunde. Cuando $\Delta F < 0$, el objeto flota. Y cuando $\Delta F = 0$, el objeto permanece en su profundidad original (es neutralmente flotante; esto es, $\rho_{\text{objeto}} = \rho_{\text{fluido}}$). Así, la clave para mantener un barco a flote, ya esté hecho de madera, acero o cemento, es hacerle que desplace un volumen de agua que pese más que el propio barco.

Aplicaciones en el Océano

La flotación es una de las cuatro fuerzas dominantes en la dinámica oceánica (las otras tres son la gravedad, el esfuerzo del viento y la fricción), y entender la fuerza de flotación es clave

para comprender la circulación conducida por la densidad. La circulación termohalina de gran escala en el océano, por ejemplo, se atribuye a diferencias latitudinales en las fuerzas de flotación, debidas a la diferencia en la temperatura del agua de latitudes altas y bajas. El enfriamiento y la evaporación hacen al agua de mar más densa, de modo que el agua de la superficie sometida a estas condiciones se vuelve menos flotante, tendiendo a hundirse. El calentamiento y la lluvia, por contraste, disminuye la densidad del agua marina, así que las aguas superficiales sometidas a estas condiciones se vuelven más flotantes, tendiendo a ascender hasta la superficie oceánica.

La altura a la que un objeto flota en un líquido (por ejemplo, agua marina o magma) depende del balance entre las fuerzas gravitacional y de flotación a las que el objeto está sometido. Las placas litosféricas de la Tierra, por ejemplo, flotan sobre la astenósfera (el manto superior) en un nivel de equilibrio (un equilibrio de la flotación llamado isostasia). Cuando un equilibrio flotante es desbaratado, el objeto se hundirá o ascenderá hasta que un nuevo equilibrio de flotación sea alcanzado. Este proceso se llama “nivelación isostática”. Los efectos de la nivelación isostática pueden verse cerca de las dorsales centro-oceánicas donde la litosfera recién formada se enfría y añade peso a la dorsal que está debajo (la fuerza de gravedad aumenta) y sobre las placas continentales que han sufrido recientemente la fusión de grandes glaciares (la fuerza de gravedad ha decrecido). Cambios en el equilibrio flotante de las placas litosféricas causarán una subida o bajada del nivel del mar relativo a la costa asociada con la placa.

Muchos organismos marinos tienen que afrontar el reto de regular su flotabilidad. Proteínas, tejidos conectivos, esqueletos y conchas tienen densidades mayores que la del agua marina. Los organismos con altas densidades corporales pueden hundirse por debajo de sus regiones de crecimiento óptimo (por ejemplo, hundimiento del fitoplancton por debajo de la zona fótica), siendo expuestos a cambios de presión, luz y temperatura. En respuesta a estos retos, los organismos marinos han desarrollado distintas estrategias para controlar su flotabilidad. Entre otras están el intercambio selectivo de los iones más pesados por los más ligeros, almacenamiento de grasas y lípidos y el uso de cavidades llenas de gas.

La flotación es además un principio fundamental en el diseño de barcos, submarinos y vehículos autónomos subacuáticos (AUVs en inglés), constituyendo sobretodo estos últimos la vanguardia en tecnología y exploración oceánica. Deslizadores autónomos y boyas, los cuales llevan múltiples sensores (por ejemplo, de temperatura, salinidad y ópticos), se mueven arriba y abajo en la columna de agua modificando su volumen y, de este modo, la fuerza de flotación que actúa sobre ellos. El principio de operación es el intercambio de fluido entre un tanque incompresible interno y una vejiga exterior inflable. Para un ejemplo de boya que usa este modo de regular la flotabilidad, visite: http://www.argo.ucsd.edu/FrHow_Argo_floats.html.

DESCRIPCIÓN DE LAS ACTIVIDADES

Comenzamos la lección con una corta introducción o revisión de las fuerzas que actúan sobre un objeto sumergido, tras la cual los estudiantes se implican en las actividades que siguen, trabajando en pequeños grupos. Dos de las actividades (3.1 y 3.2) son representaciones cuantitativas del Principio de Arquímedes, que permiten a los estudiantes explorar las relaciones entre la masa de un objeto, la masa del volumen que desplaza (que guarda proporcionalidad con la fuerza de flotación) y su tendencia a hundirse o flotar. Pedimos a los alumnos que lleven a cabo ambas actividades (el orden no importa). Al hacer esto, tratamos de remarcar los principios de la flotación, permitir que los alumnos practiquen la transferencia de conocimientos aprendidos en una situación a la otra y comprobar su comprensión. Las otras dos actividades (3.3 y 3.4) son lo que denominamos “indagación abierta”: no se proporciona demasiada instrucción a los alumnos y se espera que sintetizen y apliquen el conocimiento aprendido en las lecciones previas sobre densidad y presión (Capítulos 1 y 2 en este documento) para explicar un fenómeno dado y construir un flotador. Durante la revisión y sesión de discusión al final de la lección, se discuten algunas aplicaciones en el medio ambiente acuático. Las actividades se montan en prácticas tal como se describe en el capítulo 1.

ACTIVIDAD 3.1. S.O.S. (Figura 3.1)

Materiales

- Caja de Arquímedes (una caja con marcas graduadas horizontales cada centímetro)
- Dinamómetro
- Pesos de 5 g y de 10 g
- Contenedor con agua
- Soporte de anillo
- Regla
- Balanza

Nota: La caja especial, dinamómetro y los pesos fueron todos obtenidos de sciencekit.com.

Instrucciones para los Estudiantes

1. Suponed que la caja es un barco de carga. Como miembros de la tripulación, necesitáis determinar el máximo peso de carga (en gramos) que puede cargar en el barco sin hundirlo. En la punto de máxima carga, la caja (vuestro barco) estará completamente (justo hasta el borde superior) hundido, de modo que su parte alta toca justo la superficie del agua. Basándoos en lo que sabéis sobre la flotabilidad y el Principio de Arquímedes, ¿cómo determinaríais la máxima cantidad de carga? Explicad vuestro razonamiento (Pista: Pensad en el peso de un objeto (completamente inmerso) en aire y en agua y en el volumen que desplaza. Usad el dinamómetro y la regla para obtener cualquier medida que pueda ayudaros en su predicción. Para usar el dinamómetro, fijadlo al soporte de anillo y usad el gancho para colgar la caja.
2. Añadid la máxima cantidad predicha de carga a vuestra caja (barco), cerrad la tapa y comprobad vuestra predicción colocando el barco cargado en la cuba de agua y observando si está completamente inmerso pero sin hundirse.
3. Si vuestra predicción ha sido correcta, ¿cuál es la masa del barco más la carga en aire? ¿Cuál es la masa del barco más la carga en agua? ¿Cuáles son los valores de volumen y masa que fueron desplazados?
4. Si vuestra predicción no ha sido correcta (esto es, si el barco se hundió o bien flotó por encima de la superficie del agua), corregid vuestra predicción y comprobadla de nuevo.
5. Una vez encontrasteis el máximo peso de carga admisible, añadid 25 g adicionales a vuestra carga y colocad la caja en el agua. ¿Qué le ocurre a vuestro barco ahora? ¿Por qué?
6. ¿Cuál es el nuevo peso del barco más la carga en aire? Prededid el peso del barco más la carga en agua. Usad el dinamómetro para medir el peso del barco más la carga en agua. ¿Concuerdia vuestra medida con vuestra predicción?

7. ¿Cuál es el peso del agua que es desplazada? ¿Cómo se compara con el peso del barco más la carga en aire y el peso del barco más la carga en agua?
8. ¿Podéis explicar ahora por qué un objeto sumergido en agua “se nota” menos pesado?

Nota para los instructores: Si los alumnos tienen dificultades para predecir el nivel de máxima carga con el Principio de Arquímedes, se les debe sugerir que aborden el problema siguiendo los pasos siguientes:

1. Medid y calculad la masa y el volumen de la caja sin los pesos. Añadid pesos en incrementos de 25 g. Después de cada peso añadido, medid:
 - a. El peso de la caja fuera del agua (usando el dinamómetro)
 - b. El peso de la caja en el agua
 - c. La altura de la caja que está sumergida en agua (cada marca sobre la caja es 1 cm)

Para cada incremento, calculad el volumen del agua desplazada por la caja.

2. Dibujad el valor de la altura de caja sumergida en función del peso de la caja más los pesos añadidos. ¿Detectáis alguna relación entre la masa de caja más los pesos (en aire) y el volumen desplazado? ¿Cuál es el peso de la caja en agua en cada caso?

Una vez los alumnos hayan completado estos pasos, deben hacer los Pasos 3-4 arriba indicados

Explicación

La caja que usamos en esta actividad tiene una base de $5\text{ cm} \times 5\text{ cm} = 25\text{ cm}^2$ y una altura de 4 cm. Así, su volumen es de 100 cm^3 (incluyendo su tapa). La caja vacía pesa 25 g; por tanto, su densidad es de $0,25\text{ g/cm}^3$. Cuando la caja está

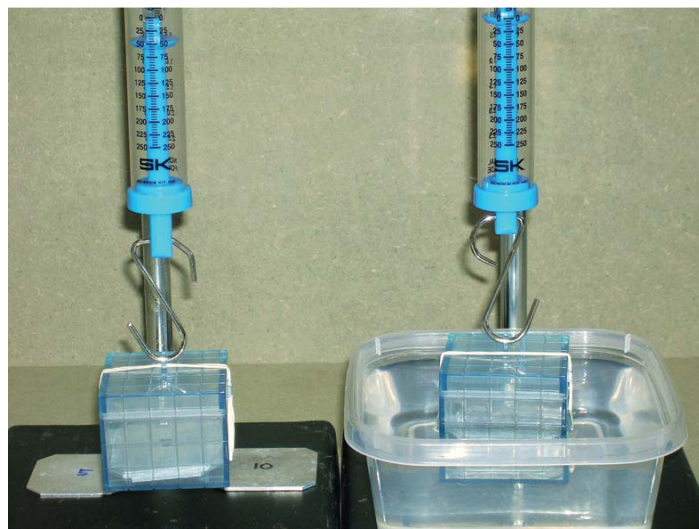


Figura 3.1. Materiales para la Actividad 3.1 en aire (Izquierda, con dos pesos reposando sobre la mesa) y en agua (derecha).

completamente sumergida, desplaza su volumen (100 cm³); por tanto, el peso del agua desplazada es 100 g (1 cm³ pesa aproximadamente 1 g). Según el Principio de Arquímedes, cuando la caja no está ni hundiéndose ni ascendiendo, $F_{\text{flotación}} = F_{\text{gravedad}}$, donde $F_{\text{flotación}} = \rho_{\text{agua}} V_{\text{desplazado}} g$. Dado que ρ_{agua} y g son constantes en este caso, $F_{\text{flotación}}$ es proporcional al volumen desplazado. La masa máxima que puede ser añadida a la caja sin hundirla es 75 g ($m_{\text{caja}} + m_{\text{pesas}} = 25 \text{ g} + 75 \text{ g} = 100 \text{ g}$). Cuando la caja está a punto de desaparecer bajo el agua, F_{gravedad} es igual a $F_{\text{flotación}}$ (recordemos que $F_{\text{gravedad}} = mg$).

Cuando los estudiantes realicen esta actividad en pequeños pasos, añadiendo incrementos de masa de 25 g, ellos pueden examinar de cerca la relación entre la masa de un objeto en aire, el desplazamiento de agua (profundidad de inmersión) y la masa aparente de un objeto en agua, como muestra la tabla siguiente.

Masa añadida (g)	Peso total (caja + pesos) en aire (g)	Peso total (caja + peso) en agua (g)	Profundidad de inmersión (cm)	Volumen desplazado (cm ³)
0	25	0	1	25
25	50	0	2	50
50	75	0	3	75
75	100	0	4	100

Por el Principio de Arquímedes, la caja se hunde cuando su peso excede al del agua desplazada. Así, cuando se añaden 25 g adicionales para llevar la masa total (de la caja más los pesos) en el aire hasta 125 g, que es mayor que la masa del volumen desplazado (100 g), el “barco” se hunde. El peso de la caja más las pesas en agua es 25 g, lo cual es proporcional a la diferencia entre las fuerzas gravitacional y de flotación.

Dado que g es constante, consideramos sólo las masas de la caja y del agua desplazada, pero subrayamos a los alumnos que no se deberían confundir la masa y el peso (peso = mg). Es importante también discutir explícitamente con los estudiantes la diferencia entre el caso de un objeto flotante y el caso de un objeto sumergido. En ambos casos, la magnitud de la fuerza de flotación iguala al peso del agua desplazada. Sin embargo, para un objeto flotante, el volumen que es desplazado (que provoca la fuerza de flotación) se determina dividiendo el **peso** del objeto por la densidad del fluido; para un objeto completamente sumergido, el volumen desplazado es igual al **volumen** del objeto (la densidad no juega ningún papel).

ACTIVIDAD 3.2. BALÓN DE ARQUÍMEDES (Figura 3.2)

Materiales

- Balón de Arquímedes (de sciencekit.com)
- Jeringa de 60 ml
- Trozo de tubería
- Balanza
- Pie de rey
- Recipiente con agua
- Recipiente con una solución de azúcar, etiquetada como “líquido desconocido”

Instrucciones para los Estudiantes

1. Imaginaos que el balón de plástico es un submarino. Queréis mantenerlo bajo el agua de modo que el tapón esté sólo ligeramente por encima del agua (esto es, el submarino es neutralmente flotante). Calculad cuánta agua de lastre necesitáis añadir al submarino para que sea neutralmente flotante (pista: si no estáis seguros de por dónde empezar, dibujad el submarino y las fuerzas que actúan sobre él cuando está sumergido en el agua).
2. Comprobad vuestra predicción (cálculo) colocando el balón en un recipiente de agua y rellenándolo con agua dulce con la jeringa. Las marcas sobre la jeringa indicarán cuánta agua está siendo añadida al balón. ¿Concuerda con vuestros cálculos el volumen que obtuvisteis experimentalmente?
3. Colocad vuestro “submarino” en el “líquido desconocido” y rellenad con líquido desconocido hasta que el submarino sea neutralmente flotante. Basándoos en el volumen de líquido desconocido de lastre que necesitasteis introducir, ¿cuál creéis que es la densidad del líquido desconocido en comparación con la del agua dulce?



Figura 3.2. Materiales para la Actividad 3.2.

Explicación

El balón que usamos para esta actividad tiene una densidad de $0,7 \text{ g/cm}^3$, que es menor que la densidad del agua (1 g/cm^3); por tanto, el balón flota. Ya que el volumen del balón permanece constante, la única manera de convertir a este “submarino” en neutralmente flotante (completamente sumergido) es añadir masa empujando fuera el aire (con la jeringa) y reemplazándolo con agua. La masa del balón es de $124,5 \text{ g}$ y su volumen es 176 cm^3 . Cuando el balón está completamente sumergido, desplaza $176 \text{ ml (cm}^3\text{)}$ de agua, que pesa 176 g . Por tanto, para convertir la densidad del balón en igual a la del agua (y convertir al balón en neutralmente flotante), deben añadirse aproximadamente 52 g (sobre 52 ml) de agua. Cuando los alumnos ponen el balón en el “líquido desconocido”, encuentran que se requiere un mayor volumen de líquido para conseguir la flotación neutra, lo cual indica que la solución desconocida (por ejemplo, agua con azúcar) es más densa que el agua dulce, lo cual aumenta la fuerza de flotación que actúa sobre el submarino.

ACTIVIDAD 3.3. DISEÑO DE BOYAS (Figura 3.3)

Materiales

- Dos recipientes, uno con agua dulce y el otro con solución salina
- Dos vasos de precipitados o envases hondos
- Botes de película fotográfica o viales pequeños
- Pesas (arandelas metálicas, monedas, etc.)
- Complementos adicionales varios: balones, gomas elásticas, pajitas para beber, tubitos de plástico, pistola selladora y pegamento, clips de papelería, cinta adhesiva, papel plástico con burbujas, limpiador de tuberías, jeringas, espuma de embalaje (no se necesita todo; son sólo ejemplos)
- Balanza
- Regla o pie de rey
- Cilindro graduado (probeta)
- Acuario con fluido estratificado (agua salda y agua dulce)

Nota: La solución salina del acuario debería ser la misma que en el recipiente de agua salada mencionado al principio de la lista.

Instrucciones para los Estudiantes

Habéis sido contratados para diseñar dos boyas autónomas que llevarán sensores (arandelas metálicas) para medir varias propiedades hidrográficas (por ejemplo, temperatura, salinidad) y propiedades biogeoquímicas (por ejemplo, oxígeno, fluorescencia de la clorofila, turbidez) en la Bahía dels Alfacs (Delta del Ebro). Una boya debería de ser capaz de derivar en superficie. Debería de flotar de modo que su punto más alto esté justo sobre



Figura 3.3. Un estudiante comprobando la Actividad 3.3 “flota” en un tanque estratificado.

la superficie del agua. La otra debería flotar en la picnoclina (la profundidad donde la densidad cambia más rápidamente) sin tocar el fondo del tanque.

Vuestro primer objetivo es diseñar un prototipo de las boyas, como prueba del concepto, para ser presentado a vuestros gestores de programa (compañeros de clase). Tenéis a vuestra disposición un cubo con agua de superficie (agua dulce) y otro con agua profunda (solución salina). En vuestra presentación, describid el diseño de vuestras boyas y vuestra aproximación para determinar sus comportamientos de hundimiento y flotación. Al final de la clase, se os solicitará que demostréis que efectivamente uno de vuestros prototipos permanece en la superficie mientras que el otro se sostiene en la picnoclina en un tanque estratificado.

Explicación

Utilizamos esta actividad para añadir un saludable componente competitivo a la lección. Según nuestra experiencia, la mayor parte de los estudiantes primero se aproximan a este problema mediante prueba y error. Por tanto, les estimulamos, usando cuestiones sagaces, a aproximarse usando el Principio de Arquímedes. Al final de la lección, como parte del grupo de discusión, cada equipo comprueba las boyas en un gran acuario con una columna de agua estratificada. (Asegúrese de usar la misma solución de agua salada que los alumnos usaron en sus recipientes).

ACTIVIDAD 3.4. BUZO DE DESCARTES

(Figura 3.4)

Este experimento científico clásico recibe su nombre de René Descartes, el filósofo, matemático y científico francés. Muestra la fuerza de flotación (Principio de Arquímedes) y la relación entre presión y volumen en gases (Ley de los Gases Ideales).

Materiales

- Una botella cerrada de plástico llena con agua del grifo (agua coloreada funciona mejor).
- Una pipeta de plástico lastrada con tuercas y/o arandelas

Nota: Para instrucciones sobre cómo construir un buzo de Descartes véase, por ejemplo, <http://www.raft.net/ideas/Pipette%20Diver.pdf>.

Instrucciones para los Estudiantes

1. Apretad la botella. ¿Por qué se hunde la pipeta medio cerrada que está dentro de la botella? ¿Por qué asciende la pipeta cuando dejáis de apretar?
2. Explicad el comportamiento de la pipeta en términos de la presión y el Principio de Arquímedes.

Explicación

Según la Ley de Pascal, la presión aplicada a un fluido se transmite a través de todo el fluido. Cuando apretamos la botella, incrementamos la presión dentro de la botella y en la pipeta que está dentro. La pipeta contiene aire. Al aumentar la presión,

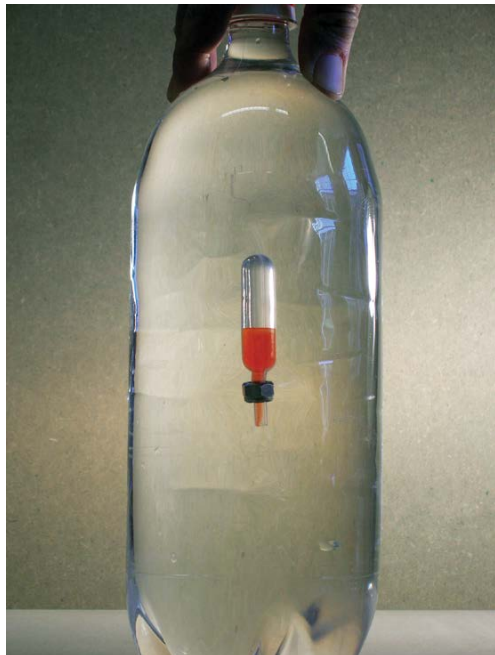


Figura 3.4. Un buzo de Descartes.

el volumen del aire atrapado dentro de la pipeta disminuye y el agua sube dentro de la pipeta reemplazando al aire que antes ocupaba ese espacio (Recordemos la Ley del Gas Ideal: $PV = nRT$, donde P es la presión, V el volumen, n el número de moles del gas y R la constante universal de los gases. Para temperatura constante, un incremento de la presión resulta en un decrecimiento del volumen). Dado que la densidad del agua es mayor que la del aire, la densidad del sistema pipeta (pipeta + burbuja de aire + agua) sube lo suficiente como para que la pipeta se hunda.

ACTIVIDAD SUPLEMENTARIA (Figura 3.5)

Como evaluación, realizamos una concurso (ver “Evaluando el aprendizaje del alumno”, más adelante) sobre conceptos tratados en esta lección y las previas sobre densidad y presión, así como el reto de resolver un problema. Como problema, presentamos a los alumnos una pregunta muy conocida: “Tenemos una gran roca sobre un barco flotando en un embalse. Cuando echemos la roca por la borda y se hunda, ¿el nivel del embalse ascenderá, disminuirá o permanecerá igual?”

Para resolver este problema, uno debería comparar el volumen del agua desplazada debido a que la roca está en el barco ($V_{\text{desplazada}_b}$) con el volumen desplazado cuando la roca está completamente sumergida ($V_{\text{desplazada}_s}$). ¿Cuál es mayor? Consideremos primero la roca en el barco. Por el Principio de Arquímedes, el peso de la roca (que ni asciende ni desciende) iguala el peso del agua desplazada: $m_{\text{objeto}} g = m_{\text{desplazada}_b} g$. Además, por la definición de densidad, $m_{\text{objeto}} = \rho_{\text{objeto}} V_{\text{objeto}}$, $m_{\text{desplazada}} = \rho_{\text{fluido}} V_{\text{desplazada}}$. Combinando estas dos expresiones se obtiene el volumen desplazado cuando la roca está en el barco: $V_{\text{desplazada}_b} = V_{\text{objeto}} \rho_{\text{objeto}} / \rho_{\text{fluido}}$. Considerando ahora el caso de la roca sumergida, este volumen de agua desplazada es igual al propio volumen de la roca: $V_{\text{desplazada}_b} = V_{\text{objeto}}$. Finalmente, para predecir lo que le ocurre al nivel del agua cuando arrojamus la roca por la borda, los dos volúmenes desplazados son comparados escribiendo su razón: $V_{\text{desplazada}_b} / V_{\text{desplazada}_s} = \rho_{\text{objeto}} / \rho_{\text{fluido}}$. Dado que la roca se hunde en el agua, sabemos que $\rho_{\text{objeto}} > \rho_{\text{fluido}}$, lo cual nos dice que $V_{\text{desplazada}_b} > V_{\text{desplazada}_s}$: el volumen de agua desplazado por la roca en el barco es mayor que el volumen desplazado por la roca sumergida. Así, cuando usted arroja la roca por la borda, el nivel de agua del embalse bajará. *Nota:* el volumen de agua desplazada debido al peso del barco es la misma esté la roca en él o no y, por tanto, no afecta al resultado.

Primero damos a los estudiantes unos minutos para que piensen individualmente en el problema, luego les pedimos que voten si creen que el nivel del agua subirá, bajará o permanecerá

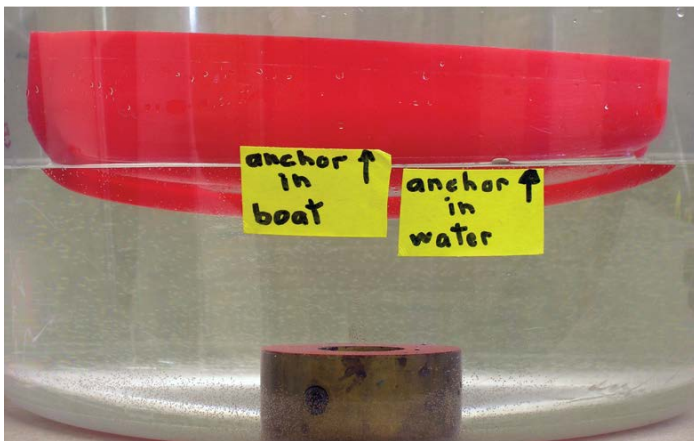


Figura 3.5. El nivel del agua cuando el peso es colocada sobre el barco (etiquetado como “ancla en el barco” – “anchor in boat”) y cuando la pesa está sumergida bajo el agua (etiquetado como “ancla en el agua” – “anchor in water”).

igual. Siempre hay votos para las tres opciones. Entonces agrupamos a los estudiantes de acuerdo con su “voto”. Cada grupo debe contribuir con un argumento (explicación física) que sustente su predicción (o descubrir en el proceso que su predicción necesita ser revisada) y presentarla a toda la clase.

Después de lo que cada grupo presente, comprobamos sus predicciones (necesitará un barco de juguete, una pesa o una piedra grande y una cuba llana de agua). Colocamos el barco de juguete en la cuba llena de agua y lo cargamos con una pesa o una piedra grande. Pedimos a un estudiante que marque el nivel del agua en la cuba, que deje caer la pesa (piedra) al agua, y que marque entonces el nuevo nivel del agua (Figura 3.5).

Con esta clase de evaluación, los alumnos no sienten la presión de estar siendo “examinados”, aunque son obligados a aplicar su conocimiento, identificar lagunas en su comprensión, y buscar mejores explicaciones para llenar esas lagunas. El instructor o los instructores se mueven entre los grupos mientras ellos construyen sus explicaciones, evalúan el nivel de implicación de cada estudiante, e identifican áreas de dificultad. Cualesquiera conceptos identificados como problemáticos son luego revisados durante la demostración. Como evaluación alternativa, utilizamos el problema de cinco bloques descrito en Loverude *et al.* (2003).

REFERENCIAS Y OTRAS LECTURAS RECOMENDADAS

- Denny, M.W. 1995. Chapters 3 and 4 in *Air and Water*. Princeton University Press, Princeton, NJ.
- Hewitt, P.G. 2008. Chapter 7 in *Conceptual Physics Fundamentals*. Pearson Addison-Wesley.
- Loverude, M.E, C.H. Kautz, and P.R.I. Heron. 2003. Helping students develop an understanding of Archimedes' Principle. I. Research on student understanding. *American Journal of Physics* 71(1):178–1,187.
- Vogel, S. 1996. Chapters 3 and 4 in *Life in Moving Fluids*. Princeton University Press, Princeton, NJ.

OTROS RECURSOS

- Sorbjan, Z. 1996. *Hands-On Meteorology: Stories, Theories, and Simple Experiments*. American Meteorological Society. Washington, DC. Es una colección de experimentos prácticos diseñados sobre conceptos de meteorología. El capítulo 7 aborda la flotabilidad. Además de los experimentos, el libro contiene narraciones históricas, referencias a descubrimientos importantes y historias sobre científicos famosos e infames.

EVALUANDO EL APRENDIZAJE DEL ALUMNO

Evaluar el aprendizaje del alumno es un aspecto esencial y exigente, de la enseñanza. Los exámenes con lápiz y papel son una forma habitual de evaluación, aunque tienden a comprobar más la memorización que la comprensión profunda, la síntesis y la aplicación del conocimiento. Presionados por las administraciones, la sociedad y los mismos estudiantes para que generen títulos, los educadores a menudo caen en formas simples de exámenes objetivos (por ejemplo, la elección entre varias respuestas). Sin embargo, los resultados de estas evaluaciones pueden no revelar por qué los alumnos aprobaron o suspendieron. Si el objetivo es evaluar la calidad y lo que han aprendido los estudiantes, entonces hay razones para utilizar métodos de evaluación que reflejen el rango completo de nuestros objetivos educacionales (véase: Fink, 2003). Esto no significa que no haya sitio para los exámenes de papel y lápiz en la educación formal; nosotros utilizamos exámenes escritos y de “tipo test” en nuestras propias clases. Sin embargo, sostenemos que deberíamos considerar y usar un rango más amplio de métodos de evaluación, para valorar no sólo el aprendizaje del alumno sino también nuestra efectividad como profesores. Estos métodos incluyen tanto la evaluación formal (por ejemplo, escritos de investigación, actividades de laboratorio, presentaciones y exámenes orales) como la evaluación informal (por ejemplo, observar el comportamiento de los estudiantes en clase y su participación en las discusiones) (Hassard, 2005; Feller y Lotter, 2009). Nuestro objetivo en este corto ensayo no es proporcionar una revisión exhaustiva de las herramientas de evaluación o indicar la práctica de la evaluación perfecta. Más bien se trata de compartir nuestra experiencia y estimular al lector a reflexionar sobre el valor de la evaluación y cómo puede ser utilizada más eficazmente en la práctica docente para mejorar el aprendizaje. Los métodos deberían variar según los objetivos del aprendizaje, el número de estudiantes en clase, su formación y el contexto de la clase. La fiabilidad del examen y la evaluación puede ser incrementada usando varios métodos diferentes para medir los resultados esperados del aprendizaje.

Con clases muy grandes, es más difícil realizar actividades prácticas y de investigación, y aplicar métodos de evaluación diferentes a los exámenes de respuesta corta y de tipo test. Pero existe la posibilidad de que las evaluaciones tradicionales, como las citadas, puedan formar parte de un proceso de aprendizaje activo. Siguiendo a Fink (2003), les damos semanalmente a los estudiantes un examen de tipo test con múltiples respuestas y les pedimos que lo completen individualmente. Tras recoger los exámenes, se les pide a los alumnos que los repitan, esta vez en equipos de tres o cuatro estudiantes. El equipo ha de llegar

a un consenso para cada respuesta. Para la autocorrección directa, les damos a cada equipo una plantilla prefabricada con las respuestas correctas (similares a algunas papeletas de lotería; véase <http://www.epsteineducation.com/multichoice.php>). Los estudiantes rascan la superficie para revelar si su elección es correcta (aparece una estrella) o incorrecta (aparece un cuadrado blanco). En este proceso, los alumnos re-evalúan su comprensión y son estimulados a comunicar sus ideas en un marco menos estresante y más colaborativo. Tratamos de mantener los mismos equipos a lo largo del semestre. Para fomentar la competición saludable, registramos el número de puntos que cada equipo acumula cada semana (basándonos en el número de sus respuestas correctas), y el equipo ganador es premiado con un pisco al final del semestre.

Otra herramienta que utilizamos es un diario reflexivo en el que los estudiantes evalúan su propio aprendizaje. Primero intentamos la aproximación tradicional, usando una libreta de laboratorio como diario, pero los estudiantes no respondieron bien; los diarios se convirtieron en colecciones de informaciones y acontecimientos más que en reflexiones sobre aprendizaje. Los alumnos respondieron muy bien, sin embargo, cuando cambiamos a blogs en la Red. Cada estudiante crea un blog (por ejemplo, en www.blogger.com), que es un medio que demostró ser más cómodo y familiar. Cada semana, los estudiantes responden a cuestiones guía que les incentivan a comentar nuevos conceptos que han aprendido, identificar puntos débiles en su comprensión, plantear cuestiones, e identificar aquellos aspectos de la lección que fueron útiles y los que no lo fueron. Sólo los profesores tienen acceso a los blogs, para proporcionar semanalmente respuestas a cada estudiante. Los blogs reflexivos dan a los instructores información inmediata que puede ser usada para adecuar sus estrategias didácticas y los resultados esperables del aprendizaje con la comprensión real del alumno. Los blogs estimulan a los estudiantes a pensar críticamente sobre el material de cada lección y proporciona un medio de evaluar su comprensión de forma regular en lugar de solamente al final del curso.

REFERENCIAS Y LECTURAS RECOMENDADAS

- Hassard, J. 2005. *The Art of Teaching Science*. Oxford University Press, 476 pp.
- Feller, R.J., and C.R. Lotter. 2009. Teaching strategies that hook classroom learners. *Oceanography* 22(1):234–237. Disponible online en: http://www.tos.org/oceanography/issues/issue_archive/22_1.html (accesible desde Agosto de 2009).
- Fink, L.D. 2003. *Creating Significant Learning Experiences: An Integrated Approach to Designing College Courses*. Jossey-Bass, San Francisco, CA, 320 pp.

CAPÍTULO 4. CALOR Y TEMPERATURA

OBJETIVO DE LAS ACTIVIDADES

Comprender cómo funciona el océano y su impacto en el clima requiere un buen conocimiento de los principios básicos de la termodinámica. A pesar de que la termodinámica es uno de los temas científicos que resultan más familiares a los estudiantes a través de su experiencia diaria, a menudo llegan a clase con una mezcla de conceptos erróneos que deben ser identificados y corregidos (Carlton, 2000). Como ejemplos de ideas falsas se podrían citar: incapacidad para distinguir entre calor y temperatura, la idea de que la transferencia de calor siempre producirá un aumento de temperatura, o una mala interpretación del concepto de calor latente (Thomaz et al., 1995). Otro error común consiste en confundir cuándo se produce el máximo flujo de calor y cuándo se da la máxima temperatura — por ejemplo, el momento del día en que el flujo de calor de la Tierra es máximo frente a la hora en que se registra la temperatura media del aire más alta, o la época del año de máximo flujo de calor respecto a la máxima temperatura media del agua en el océano o en un lago. El objetivo de este conjunto de actividades es revisar conceptos básicos de termodinámica y destacar su aplicación a los procesos oceánicos. La termodinámica es un campo muy amplio por lo que no intentaremos abarcar todos sus aspectos. Nos centraremos en los conceptos de transferencia de calor (conducción, radiación y convección), calor latente, y expansión térmica. Las actividades de laboratorio están pensadas para realizarse en dos sesiones de clase.

CONTEXTO TEÓRICO

La **temperatura** es una magnitud que indica lo caliente o frío que está un objeto en relación con algún estándar de referencia. Su valor es proporcional a la energía cinética media asociada al movimiento de los átomos y las moléculas de un cuerpo. Para medir la temperatura se utiliza comúnmente la escala Celsius ($^{\circ}\text{C}$), calibrada de acuerdo con las propiedades físicas del agua pura. El punto de congelación a la presión del nivel del mar se fijó arbitrariamente en 0°C y el punto de ebullición en las mismas condiciones se fijó en 100°C . La escala Fahrenheit ($^{\circ}\text{F}$), utilizada en los Estados Unidos de América, se calibró de forma que el punto de ebullición del agua fuera de 212°F y su punto de congelación de 32°F . Para convertir grados Celsius a grados Fahrenheit se multiplica por 1,8 y se suma

32 ($^{\circ}\text{F} = 1,8 \times ^{\circ}\text{C} + 32$). La escala Kelvin (identificada como K) se conoce como escala de temperatura absoluta, con el mismo espaciado que los grados Celsius pero cuyo cero se fija en $-273,16^{\circ}\text{C}$ (es decir, $\text{K} = ^{\circ}\text{C} + 273,16$). Se llama así porque la energía cinética molecular a 0 K es nula y por tanto no puede registrarse ninguna temperatura inferior a ella. La temperatura no se mide directamente sino a través de sus efectos en distintos materiales. Los termómetros más comúnmente utilizados miden la temperatura mediante cambios en el volumen de un líquido (por ejemplo, los termómetros de bulbo rellenos de mercurio o alcohol) o de cambios en la resistencia eléctrica de un material (por ejemplo, de cerámica o termistores basados en polímeros).

El **calor** se define como la energía interna (cinética y potencial) que se transfiere de un cuerpo a otro (véase por ejemplo, Hewitt, 2008). La transferencia de calor entre dos cuerpos en contacto térmico siempre se dirige del cuerpo con mayor temperatura al de temperatura más baja. Esta regla no significa, sin embargo, que el calor se transfiera desde un cuerpo con más energía interna a uno con menos. Recuérdate que la temperatura no es directamente proporcional a toda la energía interna de una sustancia, sino solamente la parte cinética (y no la potencial) de su energía interna. El principio de conservación de la energía implica que cuando se transfiere calor entre dos sistemas, la energía perdida por uno se gana por el otro. El calor tiene unidades de energía, que en el sistema SI (métrico) se llaman julios. Otras unidades utilizadas popularmente para el calor son BTU (unidades térmicas británicas) o las calorías ($1 \text{ caloría} = 4,18 \text{ julios}$). (Nota: las Calorías relacionadas con los alimentos [con C mayúscula] equivalen a 1000 calorías, o una kilocaloría.)

La capacidad calorífica de una sustancia se define como la cantidad de calor necesaria para elevar su temperatura en 1°C . Esta capacidad térmica para el almacenamiento de calor es distinta para cada sustancia. La capacidad calorífica específica de un material (Q_s) es la capacidad calorífica por unidad de masa. El agua tiene uno de los valores más altos de capacidad calorífica específica respecto a cualquier otro líquido: $Q_s = 4186 \text{ J}/(\text{kg}^{\circ}\text{C}) = 1000 \text{ calorías}/(\text{kg}^{\circ}\text{C})$. La capacidad calorífica específica del aire es aproximadamente una cuarta parte de la del agua: $Q_{s_{\text{air}}} = 1006 \text{ J}/(\text{kg}^{\circ}\text{C})$. Esta diferencia entre las capacidades caloríficas del agua y del aire es aún más sorprendente si se tiene en cuenta que el calor específico depende de la masa, y que la

densidad del agua es alrededor de 1000 veces mayor que la del aire. Así, para elevar la temperatura de un volumen determinado de agua en 1°C se necesita una energía (calor) aproximadamente 4000 veces mayor que la que requiere el mismo volumen de aire. Asimismo, cuando el agua se enfría, libera 4000 veces más calor que un mismo volumen de aire (véase el vídeo demostración de la diferencia entre las capacidades caloríficas del agua y del aire en <http://www.jpl.nasa.gov/video/index.cfm?id=827>). El calor específico del agua es también muy superior al calor específico de las rocas o del suelo.

La mayor capacidad calorífica del agua permite al océano absorber o liberar grandes cantidades de calor con cambios relativamente pequeños de temperatura con relación a la atmósfera o el suelo, cuyas capacidades caloríficas son mucho más bajas. El océano, por lo tanto, actúa como amortiguador de calor para mantener la temperatura de la Tierra frente a aumentos o disminuciones rápidas de calor. A este efecto amortiguador se debe el que las zonas costeras experimenten cambios más suaves de temperatura entre el día y la noche, o entre estaciones, que las zonas continentales. Así pues, bajo las mismas condiciones de radiación solar, el suelo se calienta y se enfría más deprisa que el océano.

Las variaciones latitudinales en los flujos de energía solar son los responsables de las variaciones latitudinales de temperatura. El océano desempeña un papel clave en la moderación del clima de la Tierra, no sólo por almacenamiento o liberación de grandes cantidades de calor (debido a la alta capacidad calorífica del agua), sino también por el transporte de calor desde regiones ecuatoriales, con temperatura más alta, hacia regiones polares de menor temperatura (por ejemplo, a través de corrientes como la del Golfo (Gill, 1982). Sin el transporte de calor por las corrientes oceánicas y los vientos, la diferencia de temperaturas según la latitud sería mucho más alta. Los mecanismos de transporte de calor se analizarán con más detalle más adelante, junto con las actividades previstas para ponerlos en evidencia.

Mecanismos de Transferencia de Calor

Cuando hay una diferencia de temperatura entre dos cuerpos, el calor se transfiere de uno a otro por *radiación*, *conducción*, *advección* o *convección*. Por lo general, los distintos mecanismos de transferencia de calor actúan de forma simultánea.

La **radiación** consiste en la transferencia de calor por emisión de ondas electromagnéticas que transportan energía desde el emisor al receptor, que la absorbe. Cualquier cuerpo puede absorber o emitir energía. La tasa de absorción de calor depende de las propiedades del material y de sus características geométricas superficiales para captar la radiación entrante (ver Actividad 4.1). Si la tasa de absorción de energía entrante de un objeto es mayor que su tasa de emisión, su temperatura se elevará (en ausencia de otros mecanismos de transferencia de calor). Por el contrario, si su tasa de absorción de energía es inferior a la de emisión, la temperatura del objeto bajará. Un determinado objeto, pues, alcanzará la temperatura de equilibrio cuando la tasa de absorción de energía sea igual a la de emisión.

La cantidad y calidad (longitud de onda) de la energía irradiada depende únicamente de la temperatura del objeto. Para describir la relación entre la temperatura de un cuerpo y la energía irradiada se utiliza un modelo conceptual denominado “cuerpo negro”. Se define como cuerpo negro un objeto que absorbe completamente (100%) toda la radiación electromagnética que llega a su superficie. No hay radiación electromagnética que se refleje o que lo atraviese; por lo que aparece como de color negro. La energía, E , irradiada por unidad de superficie, y por unidad de tiempo, de un cuerpo negro es proporcional a la cuarta potencia de su temperatura absoluta, T (en K): $E = \sigma T^4$ donde $\sigma = 5.7 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ (ley de Stefan-Boltzmann). Esta relación implica que cuando la temperatura absoluta de un cuerpo se doble, la cantidad de calor que irradiará aumentará dieciséis veces.

La radiación que emite un cuerpo no se produce en una sola longitud de onda, sino a través de todo un espectro de longitudes de onda. El pico del espectro (es decir, longitud de onda con mayor intensidad de radiación) es inversamente proporcional a la temperatura del emisor (Ley de Wien). Así, cuando la temperatura de un cuerpo aumenta, el pico de longitud de onda de la radiación emitida se desplaza hacia longitudes de onda más cortas. Por ejemplo, como la transferencia de energía del Sol a la superficie de la Tierra se lleva a cabo principalmente por radiación y como la temperatura de la superficie del Sol es de unos 6000 K, el máximo de radiación se encuentra en el rango de longitudes de onda visibles (longitudes de onda relativamente cortas). La superficie de la Tierra y la atmósfera también emiten la radiación, pero como sus temperaturas son bastante inferiores

a la del sol (~ 300 K), la longitud de onda del pico de radiación será más larga (infrarrojo). Este es un concepto clave para entender el efecto invernadero. La atmósfera es transparente a la entrada o reflexión de la radiación solar de onda corta, pero no a la radiación de onda larga (infrarrojos) emitida desde la superficie de la Tierra o de la atmósfera. Así, la energía del sol alcanza la superficie de la Tierra, donde es absorbida por el aire, el suelo y el océano. Sin embargo, la energía irradiada de onda larga es absorbida por algunos de los gases atmosféricos y por lo tanto se queda atrapada en la atmósfera, que actúa como una manta.⁹

La **conducción** indica la transferencia de calor entre dos cuerpos a distintas temperaturas en contacto físico el uno con el otro. En este caso el calor se transfiere por las vibraciones y colisiones entre sus moléculas. Las moléculas del cuerpo más caliente vibran más rápido y chocarán con las del cuerpo más frío que vibran más lentamente, por lo que se produce una transferencia neta de energía desde las moléculas que vibran rápidamente hacia las más lentas. La tasa de transferencia de calor por conducción es proporcional al área a través de la cual fluye el calor (áreas mayores permiten tasas de transferencia mayores) y al gradiente de temperatura (diferencias más grandes causan mayores tasas de transferencia). La tasa de transferencia también depende de la conductividad térmica de los materiales (es decir, su capacidad para conducir el calor).

La **convección** y la **advección** son los principales modos de transferencia de calor entre el océano y la atmósfera. La convección sólo se produce en fluidos e implica movimientos verticales dentro del líquido o fluido, y no interacciones a escala molecular. Es consecuencia de las diferencias de densidad—flotabilidad—dentro del fluido. Como ejemplos de procesos convectivos se pueden mencionar: las corrientes en el manto de la Tierra, que impulsan el sistema tectónico como resultado del calentamiento y enfriamiento del magma, la circulación atmosférica resultante del calentamiento solar desigual (entre los polos y el ecuador), la cinta transportadora del océano y la formación de masas de aguas profundas, provocadas por enfriamiento de aguas superficiales en altas latitudes, y la mezcla vertical en la capa superficial del océano, debido a variaciones de calentamiento entre el día y la noche (para más detalles véase Garrison, 2007, o cualquier otro libro de texto de oceanografía en general).

La advección generalmente hace referencia a la transferencia horizontal de calor debida al flujo de agua (por ejemplo, la Corriente del Golfo).

Calor latente

Cuando un cuerpo gana calor, pueden ocurrir dos cosas: que aumente su temperatura, o que cambie su estado sin variar la temperatura (por ejemplo, la conversión del hielo en agua líquida). La mayoría de los materiales tienen dos transiciones de estado: de sólido a líquido y de líquido a gas. El calor necesario para cambiar el estado de un material se denomina calor latente de fusión (para el cambio de sólido a líquido) y calor latente de vaporización (para pasar de líquido a gas). El calor latente de fusión y de vaporización del agua son relativamente altos (alrededor de 334 J/g, y 2260 J/g, respectivamente). Estos valores tan altos tienen diversas consecuencias importantes para el clima de la Tierra, en particular las siguientes:

(1) En las regiones polares, donde el agua se congela durante el invierno, el calor latente pasa a la atmósfera y al resto del agua circundante. En verano, al derretirse el hielo, recoge calor del océano circundante y de la atmósfera. Dado que la adición o eliminación de calor latente sólo produce un cambio de fase del agua congelada y no un cambio en su temperatura, los cambios estacionales de la temperatura superficial del océano (y por lo tanto de la temperatura del aire) son relativamente pequeños en estas regiones. Piénsese en los cubitos de hielo que se usan para mantener una bebida fría. La temperatura de la bebida sólo empezará a aumentar después de haberse derretido todo el hielo.

(2) El agua que se evapora de los océanos transfiere calor latente a la atmósfera. Este calor latente se libera cuando el agua se condensa para formar nubes, calentando la atmósfera. La evaporación, pues, es también la principal razón por la que los grandes lagos y el mar raras veces están a más de 28 — 30°C.

El cuerpo humano aprovecha el alto valor de calor latente de vaporización del agua para regular su temperatura. La evaporación de una pequeña cantidad de agua puede enfriar sustancialmente el cuerpo. Cuando sudamos, el agua que se evapora sobre nuestra piel obtiene la energía necesaria para evaporarse de la propia piel, reduciendo la temperatura de ésta. Este fenómeno también explica por qué uno siente frío cuando sale fuera de la piscina en un día caluroso de verano. Una mala interpretación del tema sería pensar que para evaporar agua debamos calentarla

⁹ En el contexto del efecto invernadero hay que aclarar dos concepciones erróneas. (1) El propio término de efecto invernadero es ya engañoso por sí mismo. Un invernadero permanece caliente debido principalmente a la inhibición de la convección y no a causa de la emisión y absorción de la radiación de onda larga por el aire del invernadero (sería como comparar el calor dentro de un coche estacionado en un lugar soleado con las ventanas cerradas frente a otro con las ventanas abiertas). (2) El efecto invernadero no es un fenómeno intrínsecamente nocivo; sin él, la Tierra sería un lugar frío. Sin embargo, los factores antropogénicos aumentan significativamente las propiedades naturales de aislamiento de la atmósfera terrestre, causando que la temperatura de la superficie de la Tierra siga aumentando por encima del nivel natural.

hasta 100°C, a pesar de que todo el mundo es consciente de que las toallas tendidas o los charcos de lluvia se secan a temperaturas menores. En un líquido, las moléculas se mueven al azar con velocidades variables y chocan unas con otras. En este proceso, algunas de ellas ganan energía cinética mientras que otras pierden. Para algunas moléculas, la ganancia de energía cinética es suficiente para que puedan “escaparse” del líquido y convertirse en gas. Las moléculas que se quedan detrás son las que se mueven más despacio. Así, la energía cinética promedio de las moléculas en el líquido disminuye cuando las rápidas “se escapan” y el líquido se enfría. El calentamiento provoca una mayor energía cinética media de las moléculas del líquido y, estadísticamente, hay más moléculas que ganan energía suficiente para “escaparse”. Es posible incluso que se produzca evaporación directamente desde la fase sólida (denominada sublimación), como puede observarse con frecuencia en sitios fríos como el Estado de Maine (y lugares parecidos) durante el invierno cuando la nieve “desaparece” a pesar de que las temperaturas se mantengan por debajo del punto de fusión de la nieve.

Expansión térmica o dilatación

La mayoría de materiales se dilatan cuando se calientan y se contraen cuando se enfrían. Cuando la temperatura de un cuerpo aumenta, en la mayoría de materiales, sus moléculas vibran más rápido y se separan, ocupando más espacio. Cuando estos mismos materiales se enfrían, sus moléculas vibran más lentamente y permanecen más cerca unas de otras. Hay que señalar, no obstante, que el agua dulce se expande cuando se enfría por debajo de 4°C, un fenómeno conocido como la anomalía del agua. La expansión térmica es el principio por el cual funciona un termómetro de líquidos. En el océano, se estima que la expansión térmica contribuye significativamente al aumento del nivel del mar en escalas de tiempo largas, de décadas a siglos. Sin embargo, resulta difícil estimar la contribución de la expansión térmica en la subida del nivel del mar a largo plazo, pues los efectos térmicos parecen estar influidos por fluctuaciones climáticas a escalas de décadas (Lombard et al., 2005). Las estimaciones actuales sugieren que la expansión térmica es responsable del 25% al 50% del aumento observado del nivel del mar.

DESCRIPCIÓN DE LAS ACTIVIDADES

Empezaremos la lección pidiendo a los estudiantes definir calor y temperatura, en pequeños grupos de tres a cuatro personas cada uno. Después, se reunirán para discutir sus definiciones y revisar los mecanismos de transporte de calor (¿cómo fluye

el calor?). A continuación, a través del trabajo manual y experimental con actividades basadas en preguntas, se ilustrarán los conceptos de: absorción y emisión de calor (Actividad 4.1), transferencia de calor (Actividades 4.1–4.3), calor latente (Actividades 4.4 y 4.5), relación entre evaporación y temperatura (Actividad 4.6), y la expansión térmica (Actividades 4.7 y 4.8). Durante las actividades y las sesiones de discusión en clase, iremos transmitiendo los principios subyacentes en cada uno de estos conceptos y resaltaremos su importancia en los procesos oceánicos y climáticos.

ACTIVIDAD 4.1. TRANSFERENCIA RADIATIVA DE CALOR Y ABSORCIÓN DE LA RADIACIÓN (Figura 4.1)

Materiales

- Dos latas del mismo tamaño, una negra y otra brillante (cada una debe tener un agujero en la tapa por el que se pueda insertar un termómetro)
- Dos termómetros
- Una lámpara incandescente (utilizaremos una bombilla blanca de 150 W)

Nota: Hay un kit de radiación disponible en sciencekit.com.

Instrucciones para los Estudiantes

1. Tenéis dos latas: una brillante y la otra, negra. Si la misma fuente de luz ilumina ambas latas por igual, ¿habrá la misma temperatura dentro de ellas? ¿Por qué o por qué no?
2. Registrad la temperatura inicial de los termómetros insertados en las latas.

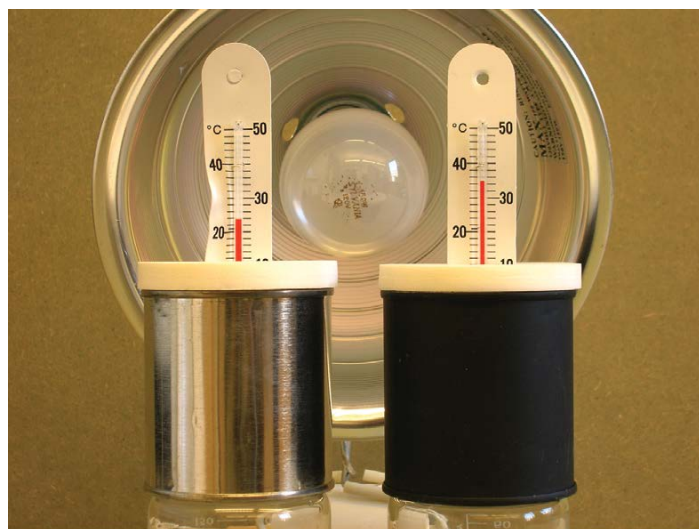


Figura 4.1. Materiales para la Actividad 4.1. Los termómetros muestran la diferencia en temperatura entre la lata negra y la lata brillante después de haber sido expuestas a una fuente de luz.

3. Aseguraos de que las latas están a la misma distancia de la fuente de luz. Encended la luz y observad los termómetros. ¿Qué se ve? ¿Cómo se pueden explicar las observaciones? ¿Cómo se está transfiriendo el calor en el sistema?
4. Si mantenéis la luz encendida durante mucho tiempo, ¿continuará aumentando la temperatura mientras la luz está encendida? ¿Por qué o por qué no? ¿Mediante qué mecanismo(s) se transfiere el calor en este sistema?
5. ¿Cómo se aplican los principios que habéis aprendido en esta actividad a la absorción de la radiación electromagnética en la superficie de la Tierra y la regulación de la temperatura de la Tierra?

Esta actividad puede modificarse (por ejemplo, para servir como herramienta de evaluación) poniendo una lata con agua y otra vacía, o utilizando un ventilador para favorecer la convección. (Cuidado: Hay que asegurarse que el agua no toque nunca la lámpara caliente).

Explicación

Aunque las dos latas están expuestas a la misma fuente de luz, los dos termómetros no muestran la misma temperatura (Figura 4.1). La lata brillante refleja más energía radiante que la negra y por lo tanto absorbe menos calor. La negra puede calentarse más rápidamente. Las temperaturas de las latas no aumentarán de forma indefinida sino que alcanzarán una temperatura final estable cuando el calor recibido por la radiación de onda corta sea igual al perdido por radiación de onda larga, más la cesión de calor al aire circundante por conducción.

ACTIVIDAD 4.2. CONDUCCIÓN (Figura 4.2)

Materiales

- Tres tipos de material a temperatura ambiente: madera, metal y tela



Figura 4.2. Materiales para la Actividad 4.2.

Instrucciones para los Estudiantes

1. Los tres materiales han estado a temperatura ambiente durante un cierto tiempo. Sin tocarlos, predecid su temperatura. ¿Estarán todos a la misma temperatura o será distinta? ¿Por qué o por qué no?
2. Brevemente colocad la mano sobre cada material. ¿Coincide la sensación con lo que esperábais? ¿Cómo explicáis las diferencias, si todos los materiales han estado sometidos a temperatura ambiente?
3. ¿Qué es lo que revelan vuestras observaciones acerca de la detección de la temperatura a través del sistema nervioso humano (y el de otros organismos)?
4. ¿Cuándo y dónde creéis que la conducción del calor entra en juego en el océano?

Explicación

Siempre que tocamos algo que está más caliente o más frío que nuestra piel experimentamos la transferencia de calor por conducción. Los materiales que son buenos conductores (por ejemplo, una pieza de metal) a temperatura ambiente se notan más fríos al tacto, porque nuestro calor se transfiere rápidamente a todo el material evitando que el área que tocamos se caliente a la temperatura de nuestro cuerpo. Los malos conductores (por ejemplo, un trozo de tela) se notan más calientes porque la transferencia de calor de nuestras manos es más lenta y sólo se calientan localmente. Los sólidos, en general, son mejores conductores que los líquidos, y los líquidos mejores que los gases. Los metales son buenos conductores del calor, mientras que el aire y los aceites (grasa) son muy malos. Un suelo de baldosas se nota más frío que un piso alfombrado, aunque ambos estén a temperatura ambiente. Un azulejo es mejor conductor de calor que la lana, por lo que el calor se transfiere más rápidamente de los pies descalzos sobre las baldosas que sobre una alfombra. La conducción no es un proceso dominante de transferencia de calor en el océano. Sin embargo, siempre se presenta en la interfaz entre materiales de distintas propiedades (por ejemplo, líquidos y sólidos, como entre organismos marinos y el agua circundante, y líquidos y gases, como entre los océanos y la atmósfera).

ACTIVIDAD 4.3. CONVECCIÓN (Figura 4.3)

Materiales

- Equipo para convección (de fabricación casera o de sciencekit.com)
- Colorante alimentario (dos colores)

- Recipiente con agua helada
- Recipiente con agua caliente

Instrucciones para los Estudiantes

1. Llenad todo el dispositivo con agua (aseguraos de que no haya burbujas en los tubos horizontales).
2. Si calentáis la columna de la derecha y enfriáis la de la izquierda, ¿en qué dirección esperaríais ver fluir el agua a través de los tubos horizontales?
3. Colocad la columna de la derecha en el recipiente de agua caliente y la columna de la izquierda en el recipiente con el hielo. Añadid unas gotas de un colorante a las dos columnas (de color distinto para cada columna) y observad si la circulación horizontal del agua está de acuerdo con vuestra anterior predicción.
4. ¿Qué pasa si calentáis (o enfriáis) sólo una columna del dispositivo? Intentadlo.
5. ¿Qué procesos del océano y de la atmósfera se pueden ilustrar con esta actividad?

Explicación

Cuando una de las columnas del aparato se calienta y la otra se enfría, se crean diferencias de densidad en el fondo de cada tubo vertical, provocando el establecimiento de un gradiente de presión. Las diferencias de densidad hacen que las masas de agua se hundan o se eleven hasta alcanzar el nivel de densidad de equilibrio. Una vez la masa de agua alcanza este nivel de equilibrio, comienza a moverse horizontalmente como respuesta al gradiente de presión. (*Nota:* los gradientes de presión son consecuencia de las diferencias en la distribución vertical de densidades, y por tanto de la presión hidrostática, entre las regiones donde el agua es más o menos densa). Debido a que el agua fría es más densa, se moverá a lo largo del tubo de conexión inferior, mientras que el agua caliente lo hará a lo largo del tubo que conecta la parte superior (Figura 4.3). Si enfriamos o calentamos sólo una columna, se podrá ver el mismo efecto pero puede que no parezca tan espectacular puesto que los gradientes de presión serán más pequeños. Esta actividad proporciona un buen ejemplo de las corrientes oceánicas generadas por densidad (circulación termohalina) – por ejemplo, la cinta transportadora global. Aquí es importante, como en cualquier otra actividad de demostración, dirigir la atención de los estudiantes hacia donde falla la analogía para evitar malentendidos. Por ejemplo, la cinta

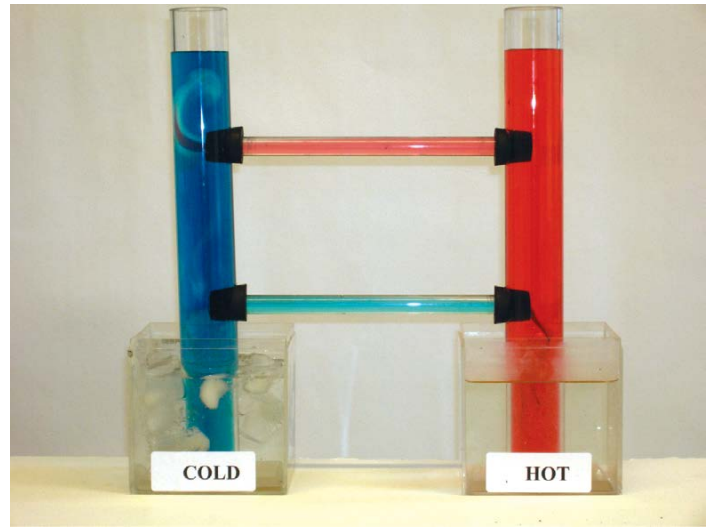


Figura 4.3. Aparato de convección. Nótese que el agua caliente (en rojo) fluye por la parte superior mientras que el agua fría (en azul) fluye por el fondo debido a la diferencia de densidad entre los fluidos en los lados opuestos.

transportadora global funciona debido al enfriamiento del agua en superficie¹⁰, mientras que en esta demostración enfriamiento y calentamiento se producen por debajo (la atmósfera, por otro lado, sí se calienta por debajo de modo que la analogía resulta mejor para la circulación atmosférica forzada por flotabilidad). Esta actividad se puede hacer conjuntamente con el capítulo 1.

ACTIVIDAD 4.4. BOLSA DE CALOR (Figura 4.4)

Materiales

- Dos recipientes con agua
- Una bolsa térmica reutilizable (de Arbor Scientific) a temperatura ambiente
- Dos termómetros
- Un reloj o cronómetro

Nota: Por lo general, esta actividad se hace con toda la clase. Si se pretende realizar con varios grupos, habrá que obtener varias bolsas térmica (son baratas). Una vez que una bolsa se activa y el material solidifica, hay que calentarla durante unos 20 minutos para volverla a la fase líquida.

Instrucciones para los Estudiantes

1. Observad, tocad y describid la bolsa de calor (por ejemplo, el material y la temperatura).
2. Llenad los recipientes con agua a temperatura ambiente y registrad la temperatura inicial en cada uno de ellos.

¹⁰ N. del T: Y a la simultánea inyección de calor hacia las profundidades oceánicas por mezcla turbulenta. Para que haya un movimiento vertical permanente en un fluido estratificado es necesaria la presencia de mezcla turbulenta. La circulación termohalina es mantenida por la acción combinada de: (i) mezcla turbulenta vertical y (ii) esfuerzo de los vientos en algunas latitudes del planeta, como las del Paso de Drake, entre la Antártida y América del Sur.

3. Activad la bolsa de calor pulsando el botón (con la yema de los dedos -no con las uñas, ya que se podría dañar) y sumergidla en uno de los recipientes. El otro recipiente servirá de control.
4. Registrad inmediatamente la temperatura inicial de los dos recipientes.
5. Continúad registrando la temperatura de cada recipiente, una vez por minuto durante 10 minutos.
6. ¿Observásteis diferencias de temperatura del agua entre ambos tratamientos? ¿Qué causa el cambio de la temperatura del agua? ¿Cómo funciona esta bolsa de calor? (Sugerencia: ¿Tiene el material de la bolsa el mismo aspecto antes y después de haberla activado?)
7. ¿Qué procesos en el océano y la atmósfera son análogos a los que acabáis de observar en esta actividad (un cambio de fase seguido de un cambio de temperatura en las aguas circundantes)?

Explicación

Cuando la bolsa de calor está activada y se coloca en el agua, la temperatura del agua empieza a subir mientras que la temperatura del agua del recipiente de control (sin la bolsa de calor) se mantiene constante. La bolsa de calor contiene una solución acuosa sobresaturada de acetato de sodio. Cuando se activa, se forma un centro de nucleación y el acetato de sodio empieza a cristalizarse, liberando la energía almacenada en forma de calor. El calor liberado pasa por conducción al agua del recipiente, y los movimientos del fluido (convección y advección) distribuyen el calor dentro del agua en el recipiente. Para devolver el contenido de la bolsa a la fase líquida, habrá que calentarla (es decir, “invertir” energía en ella). Esta actividad muestra la emisión de

calor que acompaña a un cambio de fase y puede ser discutida en clase en el contexto del calor latente que se libera durante la formación del hielo o la condensación del vapor en las nubes.

ACTIVIDAD 4.5. FLUJO DE CALOR LATENTE Y DE CALOR (Figura 4.5)

Materiales

- Un recipiente de plástico con tapa, suficientemente pequeño como para caber dentro de un vaso de Porexpan (poliestireno expandido). En la parte superior del recipiente, se hará un agujero lo suficientemente grande como para meter la varilla de un termómetro digital.
- Vasos de Porexpan, colocados uno dentro de otro para obtener un mejor aislamiento. Debe marcarse una línea en el vaso que indique el nivel del agua que deberá añadirse para que haya el mismo volumen en el recipiente de plástico y en el vaso de Porexpan.
- Dos termómetros digitales.
- Un pie (soporte) de laboratorio con aro y un brazo con pinza.
- Agua caliente del grifo, agua helada y hielo.

Instrucciones para los Estudiantes

1. Dibujad un esquema del dispositivo experimental (Figura 4.5) e indicad con flechas la dirección de la transferencia de calor, si el recipiente pequeño de plástico contuviera agua fría (sin hielo) y el vaso contuviera agua caliente. ¿Qué pasaría con la temperatura del agua en el recipiente pequeño de plástico? ¿Qué pasaría con la temperatura del agua en el vaso?
2. Llenad el recipiente de plástico hasta la parte superior con agua helada (¡sin hielo!). Apuntad la temperatura inicial de este agua. Fijad este recipiente al pie de laboratorio.
3. Llenad ahora el vaso con agua caliente del grifo hasta la línea marcada (por lo que habrá el mismo volumen de agua en el recipiente y en el vaso). Anotad también su temperatura inicial.
4. Deslizad el brazo de la pinza hacia abajo y colocad el recipiente pequeño en el interior del vaso de forma que se sumerja en el agua caliente. Anotad la temperatura en el recipiente y en el vaso cada 30 segundos durante cuatro minutos. Utilizando la varilla del termómetro, removed el agua del vaso y del recipiente al tiempo que hacéis las mediciones para eliminar cualquier gradiente de temperatura que pudiera formarse (en otras palabras, evitad que el agua caliente y ligera se acumule y flote por encima del agua fría, más densa).
5. Representad gráficamente la temperatura en el recipiente y en el vaso en función del tiempo. ¿Concuerdan vuestras



Figura 4.4. Materiales para la Actividad 4.4.



Figura 4.5. Materiales para la Actividad 4.5.

observaciones con vuestra predicción? ¿Cómo esperaríais que fuese el gradiente de temperatura después de un tiempo prolongado?

6. Supongamos que repetís el experimento, pero esta vez llenamos el recipiente de plástico con hielo y agua y llenamos el vaso con agua caliente (¡no lo hagáis todavía!). ¿Esperaríais observar cambios similares de temperatura con este nuevo montaje? ¿Por qué o por qué no?
7. Llenad totalmente el recipiente pequeño con hielo y agua (aproximadamente un 60% de hielo y un 40% de agua). Anotad la temperatura inicial del agua en el recipiente.
8. Repetid los pasos 4 y 5. ¿Observáis la misma tendencia que se vió en el Paso 5? ¿Por qué o por qué no?

Explicación

El calor se transfiere por conducción de la sustancia con temperatura más alta a la que tiene temperatura inferior. En este experimento, el calor se transfiere del agua caliente del vaso al agua fría del interior del recipiente de plástico. Como resultado, la temperatura del agua en el vaso disminuye (pierde calor), mientras que la temperatura en el recipiente de plástico del interior aumenta (gana calor). Después de un largo periodo de tiempo, el sistema alcanzará el equilibrio, y no habrá gradiente de temperatura entre el agua del vaso y la del recipiente. Cuando se añade agua con hielo al recipiente de plástico y se añade agua caliente al vaso, la transferencia de calor se hará en la misma dirección que antes, pero ahora, mientras que la temperatura del agua caliente disminuye, no se observa ningún cambio en

la temperatura del agua con hielo, ya que el calor se invierte fundiendo el hielo. Sólo después de haberse derretido todo el hielo la temperatura del agua en el recipiente de plástico empezará a aumentar.

ACTIVIDAD 4.6. PSICRÓMETRO GIRATORIO (HIGRÓMETRO) (Figura 4.6)

Materiales

- Un psicrómetro giratorio (sciencekit.com)

Instrucciones para los Estudiantes

1. Un psicrómetro es un dispositivo que nos permite medir la humedad relativa mediante la comparación de la temperatura medida por un termómetro con el bulbo envuelto en un paño húmedo (termómetro húmedo) con la temperatura de otro con el bulbo seco (termómetro seco). ¿Cómo esperaríais que varíe la temperatura de los dos termómetros en función de la humedad? ¿Por qué podría haber una diferencia entre las dos lecturas?
2. Girad el psicrómetro durante 20 segundos y luego observad si hay alguna diferencia de temperatura entre los dos termómetros (pediremos a los estudiantes que tomen al menos tres lecturas y calculen la media. Utilizaremos estos datos para una discusión posterior sobre las mediciones).

Después de la actividad, los estudiantes deben discutir el concepto de humedad y describir las relaciones esperadas entre humedad (sensación de bochorno), evaporación y temperatura ambiente. Tras el debate, los estudiantes deberían ser capaces de explicar (posiblemente como evaluación) cómo se podría utilizar el psicrómetro para determinar la humedad a una temperatura ambiente dada (tal y como se hace con la tabla que proporciona el fabricante; Figura 4.6).

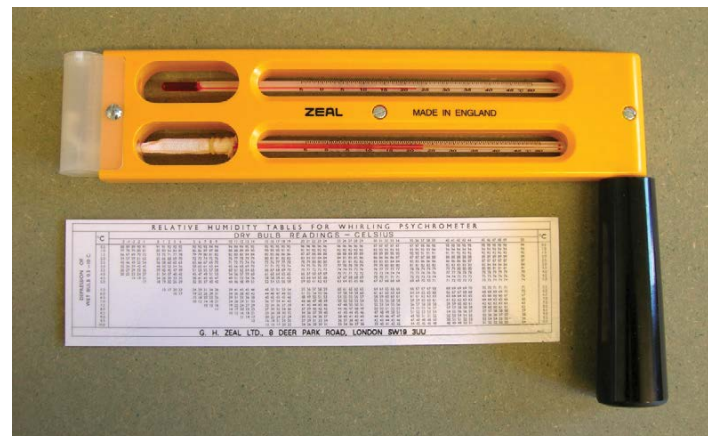


Figura 4.6. Un psicrómetro giratorio y su tabla de conversión.

Explicación

El psicrómetro está constituido por dos termómetros. Uno de ellos es un termómetro normal o de “bulbo seco”, y el otro es un termómetro “de bulbo húmedo”, por estar envuelto en una muselina o gasa humedecida con agua, por ejemplo; dicha tela a su vez se extiende hasta el interior de un depósito de agua destilada, consiguiendo de esta manera que el bulbo de ese termómetro esté húmedo. Al girar el instrumento, se evapora el agua del paño húmedo (en contacto con el aire circulante), enfriando el termómetro de bulbo húmedo. La temperatura del termómetro húmedo alcanza el equilibrio al enfriarse debido a que la evaporación del líquido (que depende de la humedad relativa en la habitación) estará en equilibrio con la ganancia de calor por conducción a partir del aire circundante. Si el ambiente es seco, la evaporación será alta, y la diferencia de temperaturas entre los dos termómetros será mayor. Si el aire está saturado de vapor de agua, no habrá enfriamiento por evaporación y no se observará ninguna diferencia de temperatura entre los dos termómetros.

ACTIVIDAD 4.7. EXPANSIÓN TÉRMICA

(Figura 4.7)

Materiales

- Un frasco
- Un tapón de goma (con agujero) que encaje en el cuello del frasco
- Un tubo delgado de vidrio que pueda pasar (de manera ajustada) por el agujero del tapón (puede facilitarse el ajuste mediante cinta de teflón o film de cocina)
- Un recipiente lleno de agua caliente
- Colorante alimentario
- Cinta adhesiva de laboratorio

Instrucciones para los Estudiantes

1. Llenad el frasco con agua coloreada y tapadlo. Introducid el tubo de vidrio por el agujero del tapón de goma y empujad éste hacia abajo para que el líquido suba por el tubo de vidrio hasta un tercio de la parte que queda por encima del tapón. Marcad el nivel del agua con cinta adhesiva.
2. ¿Qué esperáis que pase con el nivel de agua en el tubo al colocar el frasco en un recipiente con agua caliente? ¿Por qué?
3. Colocad el frasco en el recipiente lleno de agua caliente. Observad el nivel de agua en el tubo de vidrio al menos durante tres minutos. Marcad el nuevo nivel de agua. ¿Está de acuerdo con vuestra predicción?
4. Aplicad lo aprendido en esta actividad para predecir y explicar qué sucederá con el volumen del océano, si las aguas de los

océanos se calientan más. ¿Qué consecuencias tendrá en el nivel del mar?

5. ¿Qué otros procesos influyen en el nivel del mar? *Reto:* ¿Tendrían los mismos efectos sobre el nivel del mar la fusión del hielo terrestre que la del hielo que se encuentra sobre el mar? ¿Por qué o por qué no? ¿Cómo lo podríamos comprobar?

Explicación

Cuando se calienta un fluido, por lo general se expande; cuando se enfría, habitualmente se contrae (con algunas excepciones importantes, por ejemplo, H_2O por debajo de $4^\circ C$). Este es el principio en el que se basan los termómetros de mercurio o etanol. El aumento de temperatura de los océanos debido al calentamiento global, producirá una expansión del agua, y este aumento de volumen del agua en las cuencas del océano provocará la subida del nivel del mar. Otros procesos que contribuyen a cambios del nivel del mar son los aportes de agua del deshielo de los glaciares y de las cubiertas terrestres de hielo, y las subidas o bajadas de las placas litosféricas, debidas al ajuste isostático. La fusión del hielo del mar no cambia el nivel del mar porque el volumen de agua desplazado por un témpano de hielo es igual al volumen añadido cuando se derrite. Para demostrar este concepto, podemos pedir a los estudiantes que coloquen un gran bloque de hielo en un acuario y registren el nivel del agua antes y después de que el hielo se derrita. *Nota:* Se podrían observar algunos cambios del “nivel del mar” si el hielo enfriase el agua lo suficiente como para provocar una contracción significativa.



Figura 4.7. Materiales de la Actividad 4.7 después de la inmersión del frasco en agua caliente.

ACTIVIDAD 4.8. RODILLOS REVERSIBLES

(Figura 4.8)

Materiales

- Dos vasos de vidrio (vasos de precipitados): uno lleno con agua fría (por debajo de 20°C) y uno con agua caliente (~ 40°C)
- Un par de cilindros de densidad reversible: uno de aluminio y el otro de plástico (PVC, de Arbor Scientific)
- Termómetro
- Hielo (puede hacer falta para enfriar el agua)
- Placa caliente (es opcional; el agua caliente del grifo también sirve)

Instrucciones para los Estudiantes

1. ¿Qué pasará con los cilindros (se hunden o flotan) si los colocáis en un vaso con agua fría? ¿En qué razonamiento se basa vuestra predicción?
2. Colocad los cilindros en el vaso con agua fría. Hay que asegurarse de que no hay burbujas de aire pegadas a la superficie de los cilindros.
3. ¿Concuerda vuestra observación con vuestras predicciones? Observad las barras al menos durante cinco minutos.
4. Repetid ahora el experimento, usando el vaso lleno de agua caliente. Observad los cilindros al menos durante tres minutos. ¿Qué pasa?
5. ¿Cómo explicáis los comportamientos distintos de los cilindros en el agua fría y en la caliente? Con vuestro grupo, discutid las posibles explicaciones de lo que se ha observado.

Explicación

En esta actividad, un cilindro es de aluminio y el otro de PVC. Cuando se colocan los cilindros en agua fría, al principio flotan porque sus densidades son inferiores a la del agua fría. Con el tiempo, el cilindro de PVC se enfría y se contrae produciéndose un cambio de su densidad (disminuye su volumen, pero su masa sigue siendo la misma). Cuando la densidad del cilindro excede a la del agua, el de PVC se hunde. El cilindro de aluminio también se enfría, pero el aluminio se expande y contrae mucho menos que el PVC cuando experimenta el mismo cambio de temperatura que éste (es decir, que tiene un menor “coeficiente de expansión térmica”). Por tanto, la densidad del cilindro de aluminio está menos afectada por el cambio de temperatura, y el cilindro de aluminio permanece flotando. Cuando colocamos los cilindros en agua caliente, la densidad del agua es ahora menor que la del cilindro de aluminio, y el cilindro se hundirá. El cilindro de PVC también es al principio más denso que el



Figura 4.8. Rodillos de aluminio y plástico sumergidos en agua fría y caliente.

agua y también se hunde, pero a medida que va calentándose se expande considerablemente. Como resultado, su densidad disminuye (de nuevo, la masa es constante, pero su volumen aumenta). Cuando su densidad es menor que la del agua, flota. Esta actividad también puede utilizarse en el Capítulo 1.

ACTIVIDAD SUPLEMENTARIA

Hemos observado que muchos alumnos confunden el momento del día en que la radiación solar es máxima (al mediodía) con el momento en el que la temperatura es máxima (por la tarde, unas horas después). Asimismo, los alumnos confunden los días más cortos o más largos del año, cuando el flujo solar entrante está cerca de sus valores mínimos o máximos anuales, con la época del año en que la temperatura del aire, o la temperatura del agua en el océano o en los lagos es (en promedio) más fría o más cálida (ignorando procesos no radiativos que afectan a la temperatura del agua, como el afloramiento). Este problema proviene de la confusión entre temperatura y tasa de cambio de la temperatura. La tasa de cambio de la temperatura es proporcional al flujo de calor (en ausencia de una transición de fase). Podemos proponer a los estudiantes que hagan, como actividad de clase, un croquis del aspecto que tendría un gráfico de la temperatura del agua a lo largo del año. A continuación, les pediremos que vayan a la página web del GOMOOS (<http://www.gomoos.org/gnd/> o cualquier otra página web que proporcione datos de temperatura de la superficie del mar en tiempo presente) para representar la temperatura superficial del mar (promediada semanal o diariamente) a lo largo del año, y observar cuándo la temperatura del agua o la del aire es máxima (esta actividad se puede realizar como tarea para hacer en casa). En clase, hablaremos de la diferencia entre la temperatura y la tasa de cambio de temperatura asociada al flujo de calor. Por

ejemplo, el flujo de calor por radiación en el Estado de Maine (es decir, la tasa de cambio de la temperatura) es, en promedio, más bajo en Diciembre y más alto en Junio (asociado con el día más corto y más largo del año, respectivamente). El océano y la atmósfera, sin embargo, continúan perdiendo calor a partir de Diciembre (o ganando calor a partir de Junio), a pesar de que el flujo de calor por radiación no está en su valor mínimo (o máximo) anual. Así, la temperatura del agua sigue bajando después de Diciembre y sigue en aumento después de Junio. La temperatura dejará de cambiar (alcanzando un valor máximo o mínimo) cuando la ganancia de calor sea igual a la pérdida. En el Golfo de Maine, la máxima temperatura promedio de la superficie del mar se da en Septiembre, no en Junio. Un argumento similar puede servir para explicar por qué el momento más caliente del día no es mediodía, cuando el flujo de radiación solar entrante está cerca de su máximo valor, sino unas horas más tarde. Una analogía con la que algunos estudiantes están quizás más familiarizados es el desfase temporal que hay entre la aceleración máxima de un coche cuando pisamos el acelerador y cuando la velocidad del coche es máxima (que ocurre más tarde, cuando las fuerzas que aceleran y las que desaceleran son iguales). En términos de movimiento, la aceleración (tasa de cambio de velocidad) es el análogo, en términos de calor, al flujo de calor (proporcional a la tasa de variación de la temperatura, suponiendo que no hay transiciones de fase).

REFERENCIAS

- Carlton, K. 2000. Teaching about heat and temperature. *Physics Education* 35:101–105.
- Garrison, T.S. 2007. *Oceanography: An Invitation to Marine Science*, 6th ed. Thomson Brooks/Cole, 608 pp.
- Gill, A.E. 1982. *Atmosphere-Ocean Dynamics*. Academic Press, 662 pp.
- Hewitt, P.G. 2008. Chapters 8 and 9 in *Conceptual Physics Fundamentals*. Pearson Addison-Wesley.
- Lombard, A., A. Cazenave, P.Y. Le Traon, and M. Ishii. 2005. Contribution of thermal expansion to present-day sea level rise revisited. *Global and Planetary Change* 47:1–16.
- Thomaz, M.F., I.M. Malaquias, M.C. Valente, and M.J. Antunes. 1995. An attempt to overcome alternative conceptions related to heat and temperature. *Physics Education* 30:19–26.

OTROS RECURSOS

- Sorbján, Z. 1996. *Hands-On Meteorology: Stories, Theories, and Simple Experiments*. American Meteorological Society, Washington, DC. Una colección de experimentos prácticos diseñados sobre conceptos de meteorología. El capítulo 4 se ocupa del calor. Además de los experimentos, el libro contiene narrativa histórica, referencias a descubrimientos importantes e históricos sobre científicos famosos e infames.
- <http://cosee.umaine.edu/cfuser/index.cfm>. La interficie web de océano-clima COSEE-OS proporciona imágenes, videos, noticias y recursos asociados con el almacenamiento de calor en el océano, la temperatura de la superficie del mar, los procesos de transporte de calor convectivo y advectivo, el calentamiento global y el efecto invernadero.

APRENDIZAJE EN EQUIPO

El *aprendizaje en equipo*, también conocido como aprendizaje cooperativo, es un enfoque pedagógico en el que los estudiantes trabajan en pequeños grupos para alcanzar los objetivos del aprendizaje. El enfoque ofrece a los estudiantes la oportunidad de conversar y realizar “lluvias de ideas” (“brain storming”, en inglés) con los compañeros, presentar y defender sus ideas, y poner en cuestión referencias conceptuales. El profesor actúa para facilitar el proceso, como moderador y experto de contenidos en lugar de enseñar. El aprendizaje en equipo permite desarrollar aptitudes para resolver problemas, comunicarse y estimula el pensamiento crítico. Además, puede aumentar la autoestima de los estudiantes y su capacidad para trabajar con otros, así como mejorar su actitud hacia el proceso de aprendizaje (Slavin, 1981). Se ha escrito mucho sobre esta estrategia; en particular recomendamos un libro sobre aprendizaje cooperativo, escrito por un oceanógrafo (McManus, 2005). En la página web de la Universidad de Oklahoma se puede encontrar también gran cantidad de información sobre el tema (<http://teambasedlearning.apsc.ubc.ca/>). Nuestro objetivo aquí es destacar algunos elementos clave del aprendizaje cooperativo, pues esta estrategia se integra bien con la enseñanza basada en preguntas y los enfoques de aprendizaje que proponemos aquí.

El aprendizaje en equipo se puede aplicar tanto en el aula como en el laboratorio o fuera de ellos, para ayudar a los estudiantes a perfeccionar los deberes de clase. Se puede plantear de diversas formas (por ejemplo, Hassard, 2005; Joyce y Weil, 2009), como las siguientes:

- *Pensar en pareja*. Primero se pide individualmente a cada estudiante pensar en una pregunta o un problema de forma independiente y, a continuación, debe discutirlos con el estudiante sentado a su lado. Cada pareja comparará posteriormente sus ideas con el resto de la clase.
- *Mesa redonda o círculo de conocimiento*. Un grupo de tres o más estudiantes llevan a cabo una “lluvia de ideas” sobre un problema asignado y anotan sus ideas. Posteriormente, cada grupo presenta sus ideas al resto de la clase.
- *Rompecabezas*. A cada estudiante del equipo se le asigna que investigue uno de los aspectos del tema que se está

estudiando. Los estudiantes que tengan asignada la misma cuestión en los distintos equipos, formarán “grupos de expertos” para reflexionar y discutir sobre la cuestión antes de presentarla a sus propios equipos. Al final, cada “experto” mostrará sus resultados al resto de los miembros de su equipo.

- *Controversia constructiva*. Se asignan aspectos contrarios de un mismo problema a equipos o parejas de estudiantes. Cada equipo hará sus investigaciones y preparará y presentará sus argumentos. El problema se discutirá en clase cuando todos los equipos hayan presentado sus argumentos.

ELEMENTOS ESENCIALES

Independientemente de la estrategia específica utilizada para el aprendizaje en equipo, se requieren algunos elementos esenciales para el éxito de este enfoque. En primer lugar, el instructor debe promover la disposición individual y del grupo para el aprendizaje, asegurándose de que el equipo esté mentalizado de que su objetivo es el aprendizaje en grupo y no una actividad meramente social. En segundo lugar, el instructor debe conseguir que haya interdependencia entre todos los estudiantes del equipo, transmitiéndoles que “ir a remolque” de otros es inaceptable. Los compañeros de equipo deben saber que el éxito del equipo depende del aprendizaje individual de cada miembro y todos deben sentir que se necesitan unos a otros, a fin de cumplir con la tarea encomendada al equipo (es decir, que “van todos en el mismo barco y navegan o se hunden juntos”). Estos dos primeros elementos se pueden lograr repartiendo las tareas, asignando roles, proporcionando retroalimentación, y valorando los resultados del aprendizaje individual. Para evitar una situación problemática (“ir a remolque”), los miembros del equipo deben saber que pueden ser designados al azar para asumir funciones de dirección y representación de sus equipos durante las discusiones en clase.

CONTINÚA EN LA PÁGINA SIGUIENTE...

APRENDIZAJE EN EQUIPO, CONTINUADO...

Otro elemento importante es que los estudiantes deben aprender y desarrollar habilidades de cooperación. Entre estas habilidades se incluyen aquéllas que permiten trabajar juntos de manera eficaz (por ejemplo, mantener la atención, no salirse de la tarea, resumir e ir anotando las ideas), así como las que ayudan a mantener el espíritu de grupo (por ejemplo, animar a los compañeros, proporcionando retroalimentación). Por último, los estudiantes deben tener la oportunidad de reflexionar sobre su nivel de eficacia funcionando como equipo. La evaluación del funcionamiento del grupo y de cómo están utilizando sus habilidades de colaboración puede ser evaluada tanto de forma individual como global, a nivel de grupo o de toda la clase.

Nuestra experiencia es que este enfoque no gusta inicialmente a los estudiantes que no han estado nunca involucrados en el aprendizaje cooperativo, ya que les preocupa si sus calificaciones se verán afectadas por los otros miembros del equipo. Así pues, decimos a los estudiantes que la evaluación del proyecto del grupo y de su funcionalidad, realizada por sus propios compañeros de equipo, contribuirá en una cierta fracción a la nota final. Esta evaluación del equipo por parte de cada uno de sus miembros se realiza individualmente, y se informa a los estudiantes que sus evaluaciones se compartirán entre los otros miembros del equipo. Se propone a los estudiantes que evalúen la buena colaboración del equipo mediante preguntas (por ejemplo, Angelo y Cruz, 1993) como las siguientes:

- ¿Qué tal trabajó el grupo en conjunto en esta tarea?
- ¿Cuántos miembros del grupo participaron activamente durante la mayor parte del tiempo?
- ¿Cuántos miembros del grupo estaban plenamente preparados para el trabajo en grupo durante la mayor parte del tiempo?
- Da un ejemplo concreto de algo que aprendiste del grupo y que probablemente no habrías aprendido trabajando solo.
- Da un ejemplo concreto de algo que el resto de miembros aprendió de ti y que probablemente no habrían aprendido de otra manera.

A cada estudiante también se le pedirá una autoevaluación, a través de preguntas tales como:

- ¿Te sentiste a gusto trabajando con el grupo?
- ¿Fuiste un participante activo?
- ¿Cuánta atención prestaste a los otros miembros del equipo?
- ¿Hasta qué punto ayudaste a otros miembros del equipo a comprender mejor la materia?
- ¿Has pedido ayuda a algún miembro del equipo cuando no entendías alguna idea o concepto?

Por último, a cada estudiante se le pide una evaluación razonada de la contribución porcentual (de 100 %) de cada miembro del equipo, excepto la suya, a la tarea asignada. Se puede encontrar más información sobre fórmulas para calificar las evaluaciones por los compañeros en la página web sobre Aprendizaje Basado en Equipo: <http://teambasedlearning.apsc.ubc.ca/?pageid=176>.

Los equipos pueden estar organizados por los propios estudiantes (autoselección) o por el instructor (al azar o con alguna finalidad). Tanto equipos autoseleccionados como equipos asignados de forma dirigida o al azar pueden dar lugar a grupos que no sean heterogéneos o con similar capacidad total. Como regla general, los grupos deben permanecer juntos durante tiempo suficiente para experimentar el éxito como grupo, pero no excesivo, para evitar la entrada en una dinámica de equipo contraproducente (por ejemplo, cuando los miembros del equipo se instalan en papeles fijos). El tamaño de los equipos también puede variar. En pequeños grupos, cada miembro en general, participa más, y se requieren menos habilidades sociales, y los grupos pueden trabajar más rápidamente. En grupos más grandes, se generan más ideas y se produce un menor número de informes de grupo.

Proponer simplemente a los estudiantes que trabajen juntos no basta para que el trabajo en equipo funcione. Los incentivos y un sano sentido de la competencia pueden mejorar la motivación de los estudiantes, su compromiso y sus contribuciones al equipo. Las recompensas pueden estar basadas en puntos del equipo (el equipo con más puntos gana), en alcanzar una determinada meta (un equipo que

llegue a una calificación determinada, por ejemplo, que todos los miembros del equipo alcancen una puntuación del 85% o más, recibe una recompensa), o en un progreso del equipo (los estudiantes contribuyen a su equipo mejorando los resultados de sus actuaciones anteriores). En el progreso del equipo, tanto aquéllos que consiguen resultados altos, como medios o bajos resultan estimulados de la misma forma para mejorar, y se valoran las contribuciones de todos los miembros del equipo.

REFERENCIAS

- Angelo, T.A., and K.P. Cross. 1993. *Classroom Assessment Techniques: A Handbook for College Teachers*, 2nd ed. Jossey-Bass, San Francisco, CA, 448 pp.
- Hassard, J. 2005. *The Art of Teaching Science*. Oxford University Press, 476 pp.
- Joyce, B.R., and M. Weil. 2009. *Models of Teaching*, 8th ed. Allyn and Bacon, 576 pp.
- Michaelsen, L.K., and R.H. Black. 1994. Building learning teams: The key to harnessing the power of small groups in higher education. Pp. 65–81 in *Collaborative Learning: A Sourcebook for Higher Education*, vol. 2. S. Kadel and J. Keehner, eds, National Center on Postsecondary Teaching, Learning, & Assessment, University Park, PA.
- McManus, D.A. 2005. *Leaving the Lectern: Cooperative Learning and the Critical First Days of Students Working in Groups*. Anker Publishing Company Inc., 210 pp.
- Slavin, R.E. 1981. Synthesis of research on cooperative learning. *Educational Leadership* 38(8):655–660.

CAPÍTULO 5. ONDAS DE GRAVEDAD

OBJETIVO DE LAS ACTIVIDADES

El objetivo de estas actividades es que los estudiantes se familiaricen, en general, con el movimiento ondulatorio y, en particular, con las ondas de gravedad. Se muestran conceptos tales como resonancia, frecuencia natural y *seiche*. Otros temas que se enfatizan durante la discusión en la clase son las mediciones y sus estadísticas, y el análisis dimensional.

CONTEXTO TEÓRICO

Las ondas son ubicuas en océanos y lagos; en particular, las ondas de gravedad superficiales son una estampa común en las playas. Las ondas de gravedad tienen importancia en un gran número de procesos oceánicos, incluyendo la transferencia de momento del viento al océano, el aumento de mezcla causado por la rotura de las olas, la erosión de la línea de costa, y la acumulación de desechos y detritos en las playas. La importancia que han adquirido en la cultura popular y de ocio (surfing) y su potencia destructiva (tsunamis) han hecho que resulten familiares incluso a aquellos estudiantes de tierra adentro. Sin embargo, estas ondas se usan raramente para enseñar sobre movimiento armónico a nivel de universidad y bachillerato.

DESCRIPCIÓN DE LAS ACTIVIDADES

Comenzamos la lección solicitando a los estudiantes que describan aquellas ondas con las que están familiarizados y que estén asociadas al océano. La mayoría de estudiantes están familiarizados con las ondas de gravedad superficiales, tsunamis, sonido y luz. Empleamos un Slinky¹¹ para demostrar las diferencias entre ondas transversales y longitudinales (por ejemplo, Hewitt, 2008). Discutimos descriptores de onda tales como la longitud de onda, frecuencia, amplitud, periodo, velocidad de propagación (o de fase), y la dirección del movimiento de partículas en el medio. Discutimos lo que es transportado por las ondas (energía, información) en contraposición con lo que no es transportado (componentes del medio; por ejemplo, un pedazo de espuma se balancea arriba y abajo cuando las olas pasan pero no se propaga de manera significativa con ellas durante un periodo de onda). Como una analogía, proporcionamos el ejemplo de una ola generada por el público de un estadio y

producida cuando los espectadores se ponen en pie y alzan sus brazos consecutivamente. La onda viaja a través de la multitud, y resulta fácil observar cómo se transfiere la información mientras los espectadores permanecen en sus lugares. Se puede ganar tiempo si, con anterioridad a la clase, se proporciona material de lectura (por ejemplo, Capítulo 13 de Denny, 1993), familiarizando a los estudiantes con las ondas y permitiendo que en clase se puedan explorar temas adicionales tales como las ondas de capilaridad y las ondas internas. Presentamos las siguientes actividades como una secuencia que la clase debe seguir de manera colectiva, con los estudiantes sentados formando pequeños grupos de tres o cuatro miembros, para facilitar la discusión.

ACTIVIDAD 5.1. VELOCIDAD DE LA ONDA Y PROFUNDIDAD DEL AGUA (Figura 5.1)

Material

- Tanques de agua rectangulares con marcas situadas a 1,5 cm y a 6 cm por encima del fondo (de sciencekit.com)
- Cronómetros
- Recipiente con agua

Procedimiento y explicación

Primero pedimos a los estudiantes que sugieran qué características podrían afectar a la velocidad de una onda de pequeña amplitud (“pequeña” se refiere a que la altura $\ll$ longitud). Las propiedades que los estudiantes suelen indicar son la gravedad (g , la aceleración de la gravedad [fuerza de recuperación]; dimensiones L/T^2), la longitud de onda (λ ; dimensión L), la profundidad (H , dimensiones L), y la densidad (ρ ; dimensión ML^{-3}). Utilizando únicamente el análisis dimensional (Cuadro 5.1) obtenemos que la velocidad de propagación de la onda debe ser proporcional a $\sqrt{gH}$ o $\sqrt{g\lambda}$ multiplicado por cualquier función de H/λ . Hablando de forma general, las ondas con una longitud de onda menor que la profundidad sobre la que viajan (i.e., ondas de aguas profundas, $\lambda \ll H$) no interactúan con el fondo, y su velocidad depende de la longitud de onda (se denominan ondas “dispersivas”). Las ondas con una longitud de onda mayor que la profundidad sobre la que viajan ($\lambda \gg H$) interactúan con el fondo, y por lo tanto ya esperamos que la profundidad sea un factor importante en su propagación (estas

¹¹ Un Slinky® es un juguete simple y tradicional. Se trata de un muelle fabricado de plástico o metal, que cuando está enrollado sólo tiene unos pocos centímetros de grosor, pero al desenrollar sus bucles puede llegar a estirarse varios metros.

CUADRO 5.1. ANÁLISIS DIMENSIONAL

El análisis dimensional es una técnica poderosa usada para explorar posibles relaciones entre un fenómeno observado con sus variables físicas asociadas. La mayoría de las magnitudes físicas se pueden expresar en términos de alguna combinación de cinco dimensiones físicas: longitud (L), masa (M), tiempo (T), intensidad de la corriente eléctrica (I), y temperatura (t).

Por ejemplo, digamos que nos gustaría conocer qué atributos físicos determinan el periodo de un péndulo. Las características físicas del péndulo son su masa (m , $[M]$) y la longitud de la cuerda (l , $[L]$). La fuerza de recuperación que actúa sobre el péndulo es la gravedad (asociada con la aceleración gravitacional g $[L/T^2]$). ¿Cómo podemos usar todas estas variables para obtener la dimensión física de tiempo asociada con el periodo del péndulo? La única combinación que proporciona esta dimensión es $\sqrt{l/g}$. Sorprendentemente (para algunos), este simple análisis sugiere que la masa del péndulo no tiene ningún papel en el periodo. Es fácil verificar empíricamente este resultado.

El análisis dimensional ha sido muy útil en la dinámica de fluidos en general y en la dinámica de fluidos geofísicos en particular, dada la complejidad y la no-linealidad de las descripciones matemáticas que gobiernan estos fenómenos. El uso de las dimensiones físicas y del escalado ayuda a simplificar las ecuaciones (mediante la desestimación de términos) para estudiar un fenómeno en particular.

son ondas “no-dispersivas”). Ondas con longitud de onda larga penetran más profundamente (tanto la profundidad de penetración de la onda como la disminución de su amplitud desde la superficie hasta el fondo tienen la misma escala que su longitud de onda). La onda está en la interfaz, pero el movimiento asociado a la onda se siente en la profundidad. Realizamos la siguiente actividad para comprobar si la velocidad de onda depende de la profundidad del fluido.

Cada grupo de estudiantes recibe un pequeño tanque rectangular (de largo $L = 30$ cm). Los tanques se llenan con agua hasta una profundidad de 1,5 cm. Se pide a los estudiantes que produzcan una onda elevando uno de los lados del tanque y dejándolo a continuación de nuevo sobre la mesa, a la vez que se registra el número de veces que la perturbación rebota hacia atrás y hacia delante de las paredes del tanque durante un intervalo temporal de unos 5 s (hay aproximadamente unos 6 vaivenes durante este intervalo temporal; Figura 5.1). Se solicita entonces a los estudiantes que piensen cómo esta información se puede transformar en una medida de la velocidad (longitud del tanque multiplicado por el número de vaivenes por unidad de tiempo = $30 \text{ cm} \times 6/5 \text{ s} \approx 0,36 \text{ m/s}$; confrontada con la velocidad calculada a partir del análisis dimensional: $\sqrt{gH} = 0,38 \text{ m/s}$). La incertidumbre esperada es del orden del 10-20% (debido al tiempo

de reacción y a la precisión con que se localiza la posición de la perturbación al final del intervalo temporal del experimento). Seguidamente los tanques se llenan hasta una profundidad de 6 cm. La repetición de las medidas de la propagación de la onda muestra que la onda rebota unas 12 veces en 5 s (velocidad $\approx 0,72 \text{ m/s}$; confrontado con la velocidad calculada a partir del análisis dimensional: $\sqrt{gH} = 0,76 \text{ m/s}$). Nótese que los resultados



Figura 5.1. Velocidad de onda y profundidad de onda. Los estudiantes miden el número de vaivenes en una cubeta con agua hasta una altura de 1.5 cm.

no dependen de la amplitud inicial de la onda (que varía entre los diferentes grupos de estudiantes). La onda en el tanque tiene una longitud de onda de unos 60 cm ($\lambda \gg H$). Comentamos el hecho de que si la predicción teórica es correcta (la velocidad depende de $\sqrt{H}$), si la profundidad se cuadruplica la velocidad de la onda debe duplicarse, y de aquí que también deba duplicarse la distancia recorrida en 5 s (tal como se observa). En el caso en que participen varios grupos o si se repiten los mismos experimentos se pueden explicar y calcular descriptores estadísticos de los resultados, tales como las velocidades media y mediana, y medidas de la varianza y de su incertidumbre.

Una vez hecho lo anterior preguntamos a los estudiantes si un tsunami es una onda de aguas profundas o someras. Debido a que la extensión lateral de un tsunami viene determinada por la longitud de la zona de ruptura de la falla durante el terremoto (~ 100.000 m) y debido a que la profundidad máxima del océano es significativamente más pequeña (~ 11.000 m), un tsunami se clasifica como una onda de aguas someras. ¿Entonces, por qué es tan destructivo? Debido a que la velocidad depende de la profundidad ($\sim \sqrt{H}$) las ondas de gravedad superficiales se desaceleran a medida que la batimetría se hace menos profunda y la longitud de onda decrece. Es decir, el “frente” de la onda de aguas someras se propaga más despacio que su “parte trasera” cuando la profundidad disminuye. El descenso de la profundidad de la onda produce un aumento de la pendiente de la onda (a medida que se acercan los valles y crestas de la onda), hasta que llega un momento en que la onda rompe. Un tsunami, en el mar abierto, puede llegar a tener una velocidad de varios cientos de kilómetros por hora y una altura de sólo unos pocos centímetros, pero a medida que la onda se aproxima a la costa, su velocidad disminuye y su altura aumenta significativamente, a veces hasta alcanzar muchos metros.

La desaceleración de las ondas en aguas someras también provoca la refracción de la onda cuando las ondas inciden en la playa oblicuamente. La refracción de onda, bien conocida para algunos por la Ley de Snell, se refiere al cambio en la dirección del frente de onda debido al cambio en la velocidad de propagación. A medida que una onda se acerca a la orilla formando cierto ángulo con la costa y “siente” el fondo marino, la parte del “tren de ondas” que entra en aguas someras se desacelera en comparación con la parte que todavía permanece en aguas profundas, provocando que el tren de ondas se alinee más aproximadamente con los contornos de batimetría. Se pueden encontrar muy buenas imágenes de refracción de ondas en la Web usando la búsqueda de imágenes de Google.

ACTIVIDAD 5.2. ONDAS INTERNAS (Figura 5.2)

Material

- Tanques de agua rectangulares con un divisor (disponibles en sciencekit.com)
- Cronómetros
- Dos cubetas: una con agua dulce y otra con agua salada (o azucarada) coloreada (con 75 g de sal gruesa disuelta en 1 L de agua del grifo)

Procedimiento y explicación

Se usan los mismos tanques rectangulares de la Actividad 1.4 (capas de fluidos estratificadas en el océano) para demostrar y explicar las ondas internas que se forman en la interfaz entre fluidos de diferentes densidades. Los tanques se pueden separar en dos compartimientos insertando un divisor de plástico. Se les pide a los estudiantes que llenen un compartimiento con agua fresca y el otro con agua salada (o azucarada) coloreada, y se les pide que predigan qué sucederá cuando se quite la barrera (ver también Actividad 1.4). Al quitar la barrera, el fluido más denso fluye por debajo del menos denso. Cuando el fluido de cada compartimiento alcanza el lado opuesto del tanque, una onda interna se propaga hacia atrás y hacia delante a lo largo de la interfaz entre los dos fluidos de diferente color (Figura 5.2). Se pide a los estudiantes que midan la velocidad de la onda, que es significativamente más lenta que las dos ondas de gravedad superficiales de la Actividad 5.1.

En el océano, la rotura de ondas internas es responsable de la mezcla de calor y nutrientes que tiene lugar en la base de la capa de mezcla y en la vecindad de topografías empinadas (por ejemplo, Kunze y Llewellyn Smith, 2003). Las ondas internas también pueden elevar aguas desde profundidades oscuras a otras iluminadas por el sol más cercanas a la superficie y donde poblaciones de fitoplancton puedan tener suficiente luz para crecer. Para una misma energía de excitación y longitud de onda, la amplitud de las ondas de gravedad internas es significativamente más grande que la de las ondas de gravedad superficiales, debido a que la fuerza de recuperación gravitacional (y la energía potencial asociada a estas ondas) para la misma altura de onda, es más pequeña en el caso de ondas internas, dada la pequeña diferencia de densidad entre las capas de agua en comparación con la diferencia de densidad entre el agua y el aire de las ondas de gravedad superficiales. Para una descripción alternativa de las ondas internas véase Franks y Franks, 2009.

En este momento introducimos los conceptos de *seiche*¹² y resonancia. Al perturbar el sistema de dos capas cuando levantamos el divisor del tanque se generaron inicialmente muchas

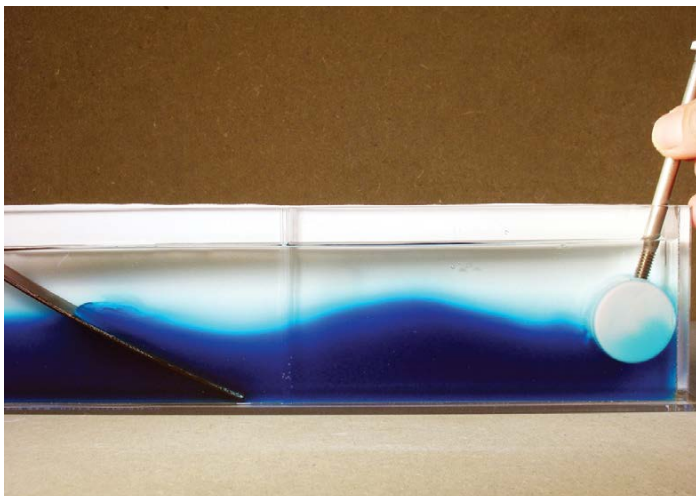


Figura 5.2. Ondas internas. Una onda interna en la interfaz entre dos fluidos de diferente densidad (el agua azul es densa, y el agua clara es menos densa). Se puede usar una paleta de ondas (en el lado derecho de la cubeta) para mostrar la resonancia (véase explicación en el texto), y se puede usar una pieza de plástico (en el lado izquierdo de la cubeta) para simular una topografía cambiante.

ondas. Sin embargo sólo permanecen aquellas ondas que cuadran (resuenan) con la geometría del recipiente. Al final sólo queda una única onda que se propaga hacia delante y hacia atrás a un ritmo concreto. De manera similar a lo que sucede en un instrumento musical donde se genera un tono primario diferente según el tamaño de la cuerda o de la cavidad de aire, la geometría del recipiente de agua (por ejemplo, el tanque experimental, un lago, o una bahía) determina qué ondas se excitan cuando se aplica y cesa cierto forzamiento (por ejemplo, debido al paso de una tormenta). Estas ondas son los modos “naturales” de la cuenca, se denominan *seiche* y su frecuencia se describe como la frecuencia “natural”. El forzamiento de un tanque en su frecuencia natural excita estas ondas, fenómeno denominado “resonancia”. Para explicar la resonancia usamos una pala de ondas (una pieza ancha de plástico con unos 2 cm de alto, con una anchura similar a la del tanque; Figura 5.2). Subimos y bajamos la pala dentro del tanque con agua estratificada de forma que su movimiento tenga un periodo coincidente con el periodo de las ondas excitadas anteriormente. Es decir, cuando aplicamos un forzamiento de periodo corto (es decir, subiendo y bajando la pala con un periodo de ~ 1 s), se forman ondas de gravedad superficiales (téngase cuidado de no derramar agua). Cuando se aplica un periodo de forzamiento más largo (es decir, subiendo y bajando la pala con un periodo de ~ 10 s), se forman ondas internas. Se puede simular una reducción de la topografía insertando una

pieza de plástico con cierto ángulo en uno de los extremos del tanque, lo que permite observar la rotura de ondas internas (Figura 5.2).

ACTIVIDAD 5.3. OSCILACIONES DE FLOTABILIDAD (Figura 5.3)

Material

- Un cilindro alto graduado (una probeta) con un fluido estratificado (agua salada en el fondo y agua dulce arriba)
- Una bola de ping-pong con barro adherido a modo de lastre (o un tubo de ensayo relleno con arandelas [pesos] a modo de lastre) de tal forma que la bola (o el tubo de ensayo) permanezca cerca de la interfaz entre los dos fluidos

Procedimiento y Explicación

Las oscilaciones de flotabilidad, las ondas internas de mayor frecuencia que tienen lugar en el océano, se pueden mostrar usando un cilindro graduado y un flotador calibrado (Figura 5.3, lado izquierdo) o una bola de ping-pong lastrada con barro adherido a modo de lastre (Figura 5.3, lado derecho). Se introduce el agua salada (densa) y se cubre con agua dulce. Se introduce el flotador en la interfaz entre las dos capas y se le perturba dándole un empujón hacia abajo con una fina barra. La frecuencia de oscilación (denominada frecuencia de flotabilidad o de Brunt-Väisälä) es función de la diferencia de densidad entre las dos capas. Esta frecuencia es proporcional a la raíz cuadrada del gradiente de densidad, tal como se espera del análisis dimensional. Los estudiantes pueden comprobar esta dependencia midiendo el tiempo de las oscilaciones que suceden en cilindros graduados conteniendo diferentes gradientes de densidad. Se puede introducir la descripción matemática de este problema a estudiantes avanzados. Las matemáticas son relativamente sencillas (dando lugar a una ecuación de ondas unidimensional) y muy provechosas (por ejemplo, Gill, 1982).

El tema de las ondas en fluidos es vasto y fascinante a la vez (véase, por ejemplo, los libros de texto avanzados de LeBlond y Mysak, 1978, y Lighthill, 1978). Los fluidos son capaces de producir una amplia variedad de ondas, abarcando conceptos físicos que van desde la tensión superficial hasta el sonido, luz, y desde las ondas de gravedad hasta ondas de vórtice planetarias (ondas de larga escala que poseen una cantidad significativa de momento angular y que están afectadas por la rotación terrestre.) Debido a que las ondas son las portadoras de información en un fluido, todo cambio en el forzamiento (por ejemplo, un cambio

¹² *Seiche*: oscilación periódica de la superficie de una masa de agua en un lugar cerrado o semi-cerrado (lago, bahía, ría, etc.) causada por fenómenos tales como un cambio en la presión atmosférica, corrientes de marea, y terremotos. El término proviene del francés, fondo de un lago seco, probablemente de *sèche*, femenino de seco.



Figura 5.3. Oscilaciones de flotabilidad. Un objeto de densidad intermedia permanece entre una capa de fluido denso situada en el fondo y una capa de fluido menos denso situada en la superficie. Si se le empuja hacia abajo, el objeto comenzará a oscilar con una frecuencia que depende de la diferencia entre las densidades de los fluidos.

en el patrón de viento sobre el océano) provoca la excitación de ondas. Un ejemplo es la transición de La Niña/El Niño, cuando los vientos alisios se debilitan significativamente sobre la región del Pacífico ecuatorial. Este cambio excita ondas de Kelvin que se propagan de Oeste a Este a lo largo del ecuador, como puede observarse en imágenes de la altura de la superficie de los océanos captadas por sensores remotos (por ejemplo, <http://oceanmotion.org/html/impact/el-nino.htm>). También se puede observar el impacto sobre la biología de los océanos observando las imágenes/datos del color del océano captadas por sensores remotos (por ejemplo, http://svs.gsfc.nasa.gov/stories/el_nino/index.html).

REFERENCIAS

- Denny, M.W. 1993. *Air and Water: The Biology and Physics of Life's Media*. Princeton University Press, Princeton, NJ, 360 pp.
- Franks, P.J.S., and S.E.R. Franks. 2009. Mix it up, mix it down: Intriguing implications of ocean layering. *Oceanography* 22(1):228–233. Accesible online en: <https://tos.org/hands-on-oceanography> (accedido el April 23, 2021).
- Gill, A.E. 1982. *Atmosphere-Ocean Dynamics*. Academic Press, Orlando, FL, 662 pp.
- Hewitt, P.G. 2008. Chapter 12 in *Conceptual Physics Fundamentals*. Pearson Addison-Wesley.
- Kunze, E., and S.G. Llewellyn Smith. 2003. The role of small-scale topography in turbulent mixing of the global ocean. *Oceanography* 17(1):55–64. Accesible online en: http://www.tos.org/oceanography/issues/issue_archive/17_1.html (accesible desde Agosto de 2009).
- LeBlond, P.H., and L.A. Mysak. 1978. *Waves in the Ocean*. Elsevier Oceanography Series, 20. Elsevier, Amsterdam, 602 pp.
- Lighthill, J. 1978. *Waves in Fluids*. Cambridge University Press, 504 pp.

RECURSOS ADICIONALES

- Duxbury, A.C., A.B. Duxbury, and K.A. Sverdrup, 2000. Chapter 9 in *An Introduction to the World's Oceans*, McGraw-Hill.
- Garrison, T., 2009. Capítulo 9 en *Essentials of Oceanography*, 5th ed., Brooks/Cole Publishing Company, Pacific Grove, CA.
- Pinet, R. 2000. Chapter 7 en *Invitation to Oceanography*. Jones and Bartlett Publishers Inc., Sudbury, MA.
- Pond, S., and G.L. Pickard, 1983. Chapter 12 en *Introductory Dynamical Oceanography*. Pergamon Press.
- Thurman, H.V. 1997. Chapter 9 in *Introductory Oceanography*. Prentice Hall.
- Waves, Tides and Shallow-water Processes*. The Open University, Pergamon Press.
- Videos de ondas internas en fluidos continuamente estratificados: http://www.gfd-dennou.org/library/gfd_exp/exp_e/exp/iw/index.htm
- Videos sobre la rotura de ondas internas debido a la cizalladura (inestabilidad de Kelvin-Helmholz): http://www.gfd-dennou.org/library/gfd_exp/exp_e/exp/kh/1/res.htm

AGRADECIMIENTOS

Nuestra propuesta para la enseñanza práctica de la ciencia surgió y fue alimentada por un esfuerzo de cooperación que implicó a científicos, expertos en educación y profesores de ciencias con los que habíamos trabajado a lo largo de los años. Como en cualquier otra colaboración interdisciplinar, llevó tiempo y tesón establecer un esfuerzo de colaboración educativa bien integrado. Nos exigió abrirnos a culturas profesionales con las que no estábamos familiarizados e informarnos sobre términos para nosotros desconocidos. Los innumerables beneficios para nuestros estudiantes y para nosotros mismos, sin embargo, ha demostrado que el esfuerzo, sin duda, mereció la pena. Agradecemos al programa COSEE de la National Science Foundation por facilitar y apoyar esta colaboración y por subvencionar este suplemento de *Oceanography*. También agradecemos a todos los estudiantes y profesores que han tomado parte en el desarrollo de estas actividades y proporcionaron una retroalimentación muy útil. Asimismo, queremos agradecer a Annette deCharon su apoyo y ánimo y a John Thompson por las discusiones inspiradoras que con él mantuvimos. Estamos agradecidos a Sharon Franks, Robert Feller y Tonya Clayton por sus revisiones exhaustivas y sus excelentes comentarios que han mejorado enormemente el manuscrito. Finalmente, la publicación de este documento no habría sido posible sin el apoyo y entusiasmo de Ellen Kappel. Le agradecemos a ella y a Vicky Cullen el dedicado y sobresaliente trabajo de edición, y a Johanna Adams por el maquetado y diseño.

—Lee Karp-Boss, Emmanuel Boss, Herman Weller,
James Loftin, y Jennifer Albright

[HTTPS://TOS.ORG/HANDS-ON-OCEANOGRAPHY](https://tos.org/hands-on-oceanography)



THE OCEANOGRAPHY SOCIETY

SPANISH VERSION | APRIL 2021