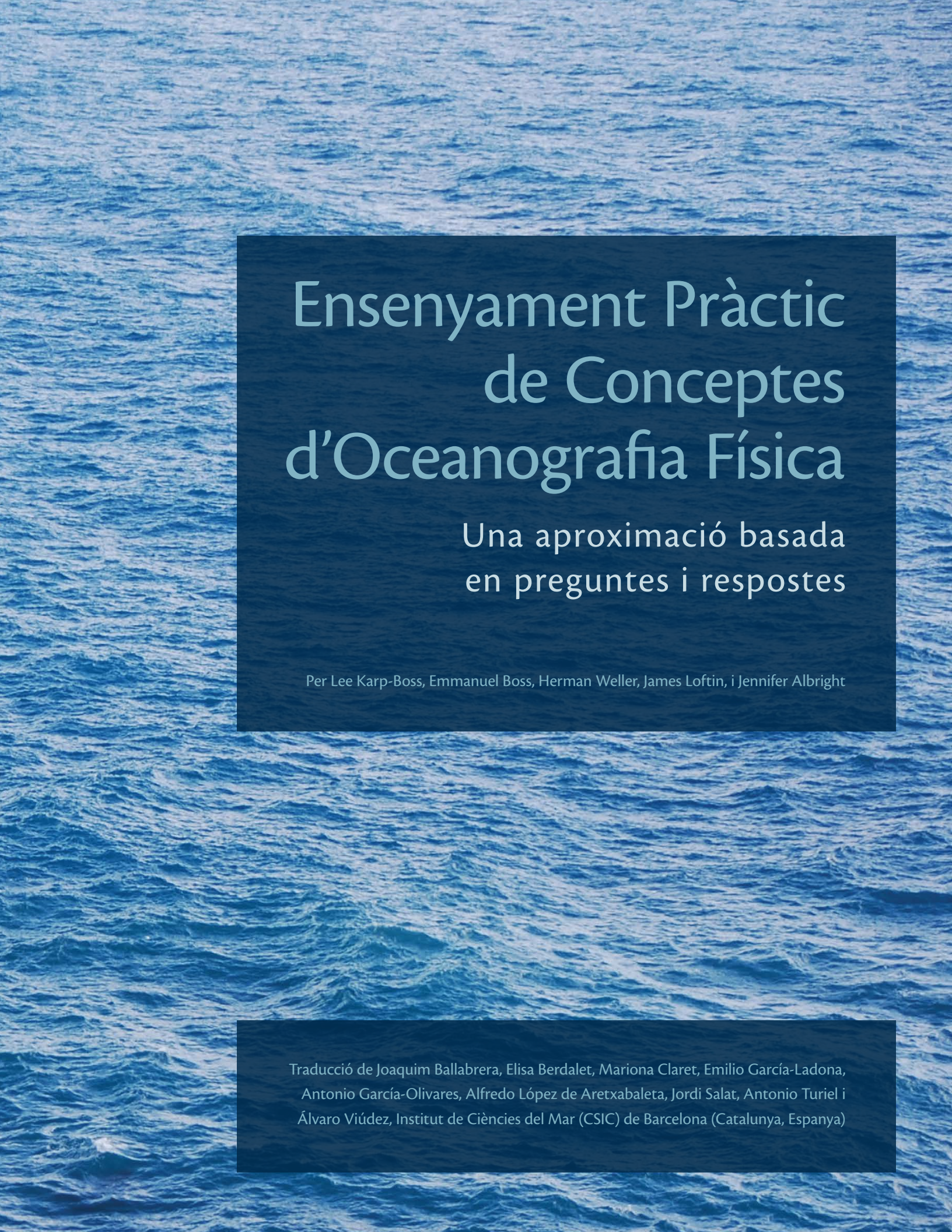




Ensenyament Pràctic de Conceptes d'Oceanografia Física

Una aproximació basada
en preguntes i respostes

Per Lee Karp-Boss, Emmanuel Boss, Herman Weller, James Loftin, i Jennifer Albright

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

ÍNDEX

Introducció.....	1
Capítol 1. Densitat.....	5
<i>Animar els estudiants a fer preguntes:</i>	
<i>Un passeig per un entorn estimulants</i>	14
Capítol 2. Pressió	16
<i>Casos discrepants: Tot despertant la curiositat dels estudiants</i>	27
Capítol 3. Força de Flotació.....	28
<i>Avaluant l'aprenentatge de l'alumne</i>	35
Capítol 4. Calor i Temperatura.....	36
<i>Aprenentatge en equip</i>	47
Capítol 5. Ones de Gravetat.....	50

Lee Karp-Boss, Emmanuel Boss, i James Loftin pertanyen a l'School of Marine Sciences, University of Maine, Orono, ME, USA. Herman Weller i Jennifer Albright treballen al College of Education and Human Development, University of Maine, Orono, ME, USA. Els autors són membres del Center for Ocean Sciences Education Excellence-Ocean Systems (COSEE-OS), Darling Marine Center, University of Maine, Walpole, ME, USA.

El projecte ha estat finançat per la National Science Foundation's Division of Ocean Sciences Centers for Ocean Sciences Education Excellence (COSEE, número OCE-0528702). Les opinions, descobriments, conclusions o recomanacions expressades en aquesta publicació no reflecteixen necessàriament els punts de vista de la NSF. Es pot trobar una versió PDF d'aquest document a la pàgina web de l'Oceanography Society, <https://tos.org/hands-on-oceanography>. Es poden sol·licitar còpies impreses individuals a info@tos.org.

©2009 The Oceanography Society
Editores: Ellen Kappel and Vicky Cullen
Disseny i composició: Johanna Adams

La reproducció parcial o total està permesa per a usos educatius i no comercials. L'Oceanography Society sol·licita el reconeixement de la font original.

INTRODUCCIÓ

Aquest suplement de la revista *Oceanography* es centra en aspectes educatius destinats a fer atractiu l'estudi de conceptes fonamentals de física aplicats en oceanografia. Amb aquest objectiu, ofereix una col·lecció d'activitats per a ensenyar des de la pràctica vers la comprensió: “de les mans a la ment”, “hands-on/minds-on”, en anglès. Els conceptes clau considerats són: *densitat, pressió, força de flotació, calor i temperatura, i ones de gravetat*. Ens centrem en conceptes físics per dos motius. En primer lloc, els estudiants per als quals la principal atracció cap a les ciències marines neix del seu interès pels organismes marins, no són conscients sovint, que la física és fonamental per a comprendre el funcionament de l'oceà i dels seus habitants. En segon lloc, els programes d'educació i divulgació existents tendeixen a posar l'èmfasi sobre els aspectes biològics de les ciències marines. Així, la majoria de les activitats per a alumnes de secundària es centren en la biologia marina, i molt poques se n'han elaborat per a ensenyar aspectes físics i químics de l'ambient marí (per exemple, Ford i Smith, 2000, i una col·lecció d'activitats de la Digital Library for Earth System Education, pàgina web [DLESE; <http://www.dlese.org/library/index.jsp>]). L'oceà ofereix un estimulant context per a l'educació de la ciència en general, i de la física en particular. Utilitzar l'oceà com a plataforma sobre la qual s'apliquen conceptes físics clau, posa de manifest la rellevància que té la física per al medi ambient, una cosa que sovint busquen els estudiants de ciències.

Les activitats descrites en aquest suplement van ser elaborades com a part de la col·laboració entre científics i especialistes de l'educació dels Centers for Ocean Sciences Education Excellence (COSEE). Aquestes activitats es van impartir a estudiants de segon, penúltim i últim any de les llicenciatures de Ciències Marines i de Ciències de l'Educació, especialitat en Ciències, i en quatre seminaris d'una setmana de duració dirigits a professors de Secundària i Batxillerat. A continuació es resumeix la nostra aproximació educativa i es discuteix l'organització d'aquest volum.

VERIFICACIÓ O DESCOBRIMENT?

La nostra aproximació a l'ensenyament de la ciència es basa en tres *descobriments* fets per nosaltres mateixos com a professors. Hem marcat *descobriments* en cursiva, perquè en realitat moltes persones els van *descobrir* abans que nosaltres. Tot i així, fins que no els *descobrim* per nosaltres mateixos, no ens adonem del seu significat. Aquest procés es similar al que experimenten el nostres estudiants, els quals descobreixen per ells mateixos com la física pot explicar l'ambient en el què viuen.

La nostra primera constatació va ser que la nostra manera habitual d'ensenyar la ciència a nivell universitari, a través de l'entrega i exposició de material de text, donava lloc a una mera transferència de fets científics però no reflectien la manera de fer ciència. Amb la nostra aproximació habitual, els estudiants eren típicament observadors passius amb molt poca implicació o poc costum de qüestionar. La ciència, tot i així, no es constitueix de “cossos de coneixement”; la ciència és una manera de pensar i d'actuar, on la formulació de preguntes és un procés inherent. Quan nosaltres “fem” ciència, fem prediccions, plantejem preguntes i hipòtesis falsejables, realitzem mesures, fem generalitzacions i provem conceptes experimentalment. Segons els “Estàndards de l'Educació Nacional de la Ciència” (Consell Nacional de la Ciència, 1996),¹ “De la mateixa manera que els científics desenvolupen el seu coneixement i comprensió a mesura que busquen respostes a preguntes sobre la natura, així els estudiants desenvolupen una comprensió del medi natural quan estan activament implicats en la interpel·lació científica, tant individualment com en equip”. Els estudiants no estan motivats a preguntar quan són alligats sobre els productes de la ciència (per exemple, fets, conceptes, principis, lleis i teories) i les tècniques que utilitzen els científics. En la nostra manera habitual d'ensenyar la ciència, els laboratoris s'utilitzaven generalment per a la verificació de la ciència. Així, primer es presentaven les lleis de la física i posteriorment eren il·lustrades al laboratori. S'incidí sobre l'obtenció de les dades i de llur representació i sobre l'elaboració d'informes. En tals exercicis hi faltava sovint l'element d'exploració.

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

Ara som conscients que “preguntar” i “explorar” són essencials per a estimular la curiositat i l'interès dels estudiants per la ciència. Els resultats dels experiments que s'allunyen de l'esperat són sovint més interessants que els que s'ajusten a la teoria, ja que aquests requereixen una explicació més enllà del que s'exposa als llibres de text. L'aproximació diguem-ne “explorativa” pot aportar als estudiants una percepció molt més profunda del procés científic i pot ajudar-los a desenvolupar un esperit crític, esperit que rarament es requereix en un enfocament del tipus “verificatiu”.

La nostra segona constatació va ser que l'habilitat d'un alumne per repetir el contingut i les fórmules no indica necessàriament una comprensió dels principis físics subjacents. La física pot ensenyar-se utilitzant descripcions matemàtiques. Els estudiants poden aprendre quines equacions proporcionen determinades quantitats, i tal coneixement pot ser constatat en exàmens escrits. Tot i així, aquesta aproximació no desenvolupa necessàriament l'habilitat de l'alumne de reconèixer quan els principis fonamentals poden aplicar-se a problemes lleugerament diferents. Nosaltres “*vam descobrir*” que els nostres estudiants assolien un coneixement més profund i una comprensió més sòlida dels conceptes físics quan ells prenen una part activa en l'aprenentatge, per exemple, quan ells realitzaven personalment els experiments i tenien l'oportunitat de “veure i sentir” per ells mateixos que representaven les descripcions matemàtiques.

CREAR EXPERIÈNCIES AMB SENTIT PER A ENSENYAR I APRENDRE

La nostra tercera constatació va ser que cada estudiant té un conjunt diferent de modalitats d'aprenentatge, és a dir, alguna combinació d'aprendre tot sentint, llegint, veient, tocant, o realitzant (Dunn i Dunn, 1993). El supòsit que “si aquest aprenentatge va funcionar per a mi, deu ser bo per als meus alumnes” pot no ser vàlid per a tots els estudiants; al cap i a la fi, nosaltres, els acadèmics, som la minoria que va prosperar en aquest sistema educatiu. Nosaltres hem “descobert” una manera d'ensenyar que integra diverses maneres d'aprendre, que fa efectiva la transmissió de coneixements i millora l'aprenentatge dels nostres estudiants. Va ser decisiu prendre consciència que no tots els estudiants són una versió jove de nosaltres mateixos. Alguns, senzillament, no posseeixen la curiositat, ni l'interès, ni les actituds que motiven als científics. Solament una minoria d'estudiants continuarà la carrera científica. Tot i així, tots ells seran eventualment consumidors del coneixement científic, o bé perquè seran els contribuents que subvencionen la recerca,

o perquè seran els que prendran decisions clau en haver estat escollits per les urnes o per ocupar òrgans de l'administració. Per tant, nosaltres tenim la responsabilitat de millorar la formació dels nostres estudiants en qüestions científiques en general, i de l'oceà en particular. Hem d'ajudar a desenvolupar el coneixement i les habilitats necessàries per a uns ciutadans que inevitablement s'enfrontaran a reptes científics, ambientals i tecnològics.

APRENTATGE I ENSENYAMENT BASATS EN LA INVESTIGACIÓ

En l'ensenyament de la ciència, *investigació* es refereix a la manera mitjançant la qual els estudiants aborden les preguntes o problemes científics tot intentant de resoldre'ls mitjançant proves i prediccions, buscant-ne indicis i informació, formulant-hi possibles explicacions que són avaluades davant d'altres alternatives, i comunicant finalment llurs descobriments (National Research Council, 2000). La *investigació* és molt més flexible que la rígida seqüència de passos sovint representada als llibres de text com a “mètode científic”. Es molt més que “realitzar experiments” i no es troba restringida als laboratoris (AAAS, 1993). Hi ha diversos mètodes d'aprenentatge i ensenyament basats en la investigació (per exemple, Hassard, 2005). A les nostres classes, utilitzem activitats de laboratori i explicacions “hands-on/minds-on”. Però existeixen altres aproximacions efectives, que no exposarem aquí, basades en investigacions factibles, entre les que s'inclouen els casos d'estudi, elaboració de projectes i aprenentatge-servei.²

És important de destacar que el simple fet de realitzar experiments en el laboratori amb els alumnes, no comportarà necessàriament que aprenenguin a investigar. Per exemple, exercicis clàssics de laboratori en els quals els alumnes han de seguir pas a pas instruccions típiques d'un llibre de cuina, poden il·lustrar un principi científic o un concepte, ensenyar als alumnes tècniques de laboratori i aportar-los algunes experiències manuals, però no aporten els aspectes mentals de la investigació. Per tal que l'aproximació “hands-on/minds-on” afavoreixi realment la investigació, els alumnes han de sentir-se motivats a plantejar preguntes, fer prediccions i comprovar-les, formular possibles explicacions i aplicar el seu coneixement en una varietat de contexts.

Els alumnes no entren a la nostres classes com a pissarres en blanc per a absorbir nova informació. Ben al contrari, arriben amb diversos conjunts d'idees (i a vegades d'errors) basats en llurs

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

experiències prèvies. Aproximacions basades en la investigació permeten als professors sondejar els coneixements dels seus alumnes i identificar idees equivocades que poden interferir amb l'aprenentatge. La investigació ajuda els alumnes a comprendre que la ciència és una manera de pensar i d'actuar, els anima a qüestionar els seus supòsits, i crea un ambient en el qual busquen solucions alternatives i explicacions.

Les habilitats desenvolupades *grosso modo* a través del procés de la investigació -raonament, resolució de problemes i comunicació- seran utilitzades pels estudiants tot al llarg de les seves vides.

Una barrera en la aplicació del mètode educatiu basat en la investigació va ser la preocupació que el mètode d'instrucció no ens permetés de cobrir tot el material curricular en el temps establert. Aquesta preocupació es vàlida considerant el nostre escàs temps de classe. Tot i així, nosaltres vam creure que si l'objectiu de l'ensenyament és promoure experiències d'aprenentatge amb significat en les quals els estudiants no només guanyin coneixements sinó que també aprenguin a aplicar i integrar conceptes, i creixin al mateix temps com a aprenents auto-dirigits, havíem de considerar una aproximació basada en la investigació. En base a les constatacions posteriors dels alumnes sobre el benefici d'aquesta aproximació per a llur aprenentatge, ens vam adonar que “menys” és sovint “més”. Vam apostar per l'educació basada en la investigació, però no creiem que tots els temes hagin de ser abordats des de la investigació o que tots els elements de la investigació (generar preguntes, acumular indicis, formular explicacions, aplicar coneixement a altres situacions, i comunicar i justificar les explicacions [National Research Council, 2000]) hagin d'estar sempre presents. Un ensenyament efectiu requereix la utilització d'una diversitat d'estratègies i aproximacions (per exemple, Feller i Lotter, 2009) que hauran de ser adaptades a cada classe en concret, a cada alumne en particular, a la mesura i dinàmica de cada classe, i als objectius educatius a mitjà i llarg termini, entre d'altres factors.

COM UTILITZAR AQUEST DOCUMENT

Aquest document està compost de cinc capítols, cadascun dels quals està centrat en un dels següents conceptes: densitat, pressió, força de flotació, calor i temperatura, i ones de gravetat. En cada capítol, es proporcionen context teòric i una informació detallada de les activitats pràctiques, les quals incideixen en diferents aspectes de cada concepte. Aquesta aproximació permet als alumnes examinar cada concepte des de diferents perspectives, aplicar el que han après a noves situacions, i desa-

fiar el seu propi coneixement. Finalment, destaquem algunes aproximacions pedagògiques que poden millorar l'educació i afavorir l'aprenentatge (veure també Feller i Lotter, 2009).

Les activitats pràctiques es presenten en el format que utilitzem a les aules, on hi ha alumnes de carreres de ciències que havien seguit prèviament un curs d'introducció a l'oceanografia. Alguns estudiants de llicenciatura i col·legues nostres també troben que certes activitats són particularment exigents. Segons el nivell acadèmic al què es dirigeixen, aquestes activitats poden i han de ser adaptades amb canvis adequats en el contingut del context teòric, en les discussions a classe, en la descripció de les activitats i en les explicacions. Els professors de ciències que van participar en els nostres seminaris han adaptat amb èxit algunes d'aquestes activitats als nivells de Secundària i Batxillerat.

A les nostres classes, les activitats es porten a terme en grups de tres o quatre persones els membres dels quals van rotant. Algunes vegades, els presentem com a una sèrie d'activitats o demostracions que la classe segueix col·lectivament i després segueix una discussió en petits grups. Treballar en petits grups afavoreix pensar i aprendre col·lectivament. Sovint, promovem una sana competitivitat entre grups per afegir un nivell d'estímul i esforç, per exemple, amb concursos entre grups. Durant la classe, fem servir una aproximació socràtica de l'ensenyament, en el sentit que els estudiants s'enfronten a preguntes guiades. No sempre es donarà una resposta directa a les preguntes dels estudiants durant les activitats. Més aviat realitzem preguntes addicionals, que els porten a examinar els seus propis punts de vista i idees. Es demana als estudiants que facin prediccions, realitzin mesures i trobin possibles explicacions als fenòmens que observen. Un cop els estudiants completen les activitats, la classe es reuneix per a una discussió final, on cada grup presenta una explicació per a cada activitat concreta. Una part essencial de la nostra aproximació és, per tant, el donar temps als alumnes perquè comuniquin oralment els seus punts de vista i coneixements. Això ajuda a identificar els errors i les dificultats dels conceptes, a discutir-los i, finalment, a resoldre'ls. Durant la discussió i a través de deures se subratllen les aplicacions d'un concepte i la seva relació amb els processos oceànics.

Una classe de 60 minuts és normalment suficient perquè els estudiants completen de dues a tres activitats durant els primers 40 minuts, i dediquin 20 minuts a la discussió. Noti's que cada activitat pot desenvolupar-se independentment o fins i tot utilitzar-se per fer un experiment a classe. El material necessari és en general senzill i de baix cost que pot estar disponible fàcilment

a les classes o a les llars. Algun material pot adquirir-se en botigues especialitzades en educació (per exemple, sciencekit.com), i nosaltres mateixos vam construir algunes coses.

REFERÈNCIES I LECTURES RECOMENDADES

- 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/isel/seues/isel_seue_archive/22_1.html (accessible des de 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.

PÀGINES WEB RELACIONADES

- 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/isel/seues/content/cntasques/science/eric/eric-toc.htm>
- Teaching Science Through Inquiry <http://www.ericdigests.org/1993/inquiry.htm>
- Science as Inquiry <http://www2.gel.seu.edu/~mstjrh/mindsonscience.html>
- Science Education Resource Center (SERC), Pedagogy in Action, Teaching Methods <http://serc.carleton.edu/sp/library/pedagogies.html>

CAPÍTOL 1. DENSITAT

OBJECTIU DE LES ACTIVITATS

La densitat és una propietat fonamental de la matèria, i tot i que s'ensenya a les assignatures de Física en els instituts d'ensenyament secundari, no tots els estudiants de nivell universitari dominen bé aquest concepte. La majoria dels estudiants memoritzen la definició sense posar molta atenció al seu significat físic, i poden oblidar-la poc després de l'examen. A oceanografia, la densitat es fa servir per a caracteritzar i seguir masses d'aigua, i estudiar així la circulació oceànica. Molts processos són originats per o reflecteixen diferències de les densitats de masses d'aigua adjacents o de les diferències de densitat entre líquids i sòlids. La tectònica de plaques i la formació de les conques oceàniques, la formació d'aigües profundes i la circulació termohalina, i el transport de carboni en forma de partícules que s'enfonsen des de la superfície fins a les profunditats, són uns pocs exemples de processos deguts a la densitat. El següent conjunt d'activitats ha estat dissenyat per a repassar el concepte de densitat, practicar amb els càlculs amb ella relacionats i destacar les connexions amb els processos oceànics.

CONTEXT TEÒRIC

La densitat (simbolitzada per ρ) és una mesura del grau de compacitat d'un material — en altres paraules, quanta massa està “empaquetada” en un cert espai. És la massa per unitat de volum ($\rho = \frac{m}{V}$; unitats en kg/m^3 o g/cm^3), i es tracta d'una propietat que és independent de la quantitat total de material que s'estudii. La densitat de l'aigua és al voltant de mil vegades més gran que la de l'aire i varia en un rang des dels 998 kg/m^3 de l'aigua dolça a temperatura ambient (veure, per exemple, http://www.pg.gda.pl/chem/Dydaktyka/Analityczna/MISC/Water_density_Pipet_Calibration_Data.pdf) fins als gairebé 1.250 kg/m^3 d'alguns llacs salats. La majoria de l'aigua dels oceans té una densitat compresa en el rang de $1.020\text{--}1.030 \text{ kg/m}^3$. La densitat de l'aigua no es mesura directament; en comptes d'això, es calcula a partir de mesures de la temperatura de l'aigua, la salinitat i la pressió. Donat el petit marge de variació de la densitat a l'oceà, s'expressa per conveniència la densitat de l'aigua de mar amb la quantitat *sigma-t* (σ_t), que es defineix com a $\sigma_t = \rho - 1000 \text{ kg/m}^3$.

La majoria de la variabilitat en la densitat de l'aigua del mar és deguda a canvis en la salinitat i la temperatura. *Un canvi en salinitat reflecteix un canvi en la massa de sals dissoltes en un volum*

donat d'aigua. A mesura que la salinitat augmenta, degut a l'evaporació o l'expulsió de sal durant la formació de gel, la densitat del fluid també augmenta. *Un canvi en temperatura resulta en un canvi en el volum del paquet de fluid*. Un increment en la temperatura d'un fluid dóna lloc a un increment en la distància entre molècules, la qual cosa fa que el volum de la massa de fluid s'incrementi i la seva densitat disminueixi (mentre que la seva massa no ha canviat). Refredar redueix la distància entre molècules, el que causa que el volum del paquet de fluid disminueixi i que la seva densitat s'incrementi. La relació entre temperatura i densitat és no lineal, i el màxim de densitat de l'aigua pura s'assoleix a prop dels 4°C (veure Denny, 2007; Garrison, 2007; o un altre text general d'oceanografia).

DENSITAT, ESTRATIFICACIÓ I BARREJA

Estratificació es refereix a l'organització de la massa d'aigua en capes segons llurs densitats. La densitat de l'aigua augmenta amb la profunditat, però no a ritme constant. En regions de mar obert (amb l'excepció dels mars polars), la columna d'aigua es caracteritza generalment per tres capes (“estrats”) ben diferenciades: una *capa de barreja superior* (una capa d'aigua calenta i menys densa amb temperatura constant a totes les profunditats), la *termoclina* (una regió en la que la temperatura disminueix i la densitat augmenta ràpidament amb la fondària) i una *capa profunda* d'aigua densa i més freda en la qual la densitat s'incrementa lentament amb la fondària. A les regions de mar obert, les variacions de salinitat generalment tenen un efecte menor en la densitat que les variacions de temperatura. En altres paraules, la densitat en mar obert està principalment controlada per les variacions de temperatura. En canvi, a les regions costaneres afectades per l'entrada d'aigües fluvials i a les regions polars on es forma i es fon el gel, la salinitat exerceix un paper important en la determinació de la densitat de l'aigua i la seva estratificació.

L'estratificació forma una barrera efectiva per a l'intercanvi de nutrients i gasos dissolts entre la capa superficial ben il·luminada on hi pot créixer el fitoplàncton, i les aigües profundes, riques en nutrients. L'estratificació té per tant implicacions importants sobre els processos biològics i biogeoquímics a l'oceà. Per exemple, els períodes de major estratificació s'associen a una menor biomassa de fitoplàncton a la superfície, molt probablement degut a la supressió del transport de nutrients cap a dalt (Behrenfeld et al., 2006; Doney, 2006). A les aigües costaneres,

on el flux de matèria orgànica des del substrat és més gran, els períodes d'estratificació perllongats poden menar a la hipòxia (falta d'oxigen) i causar mortalitat de peixos, crustacis i d'altres organismes marins.

Per a barrejar les capes estratificades cal energia, treball. Com a analogia, pensem com ens cal sacsejar per a fer una bona salsa vinagreta on l'oli i el vinagre estiguin ben barrejats. Sense una barreja enèrgica (per exemple, deguda al vent o onades trencants), els intercanvis de gasos i nutrients entre la superfície i les capes profundes tindran lloc per difusió molecular i per l'efecte d'arrossegament local dels organismes, que són modes de transferència molt lents i ineficients (Visser, 2007). L'energia necessària per a barrejar és, com a mínim, la diferència d'energia potencial entre el fluid barrejat i l'estratificat (la major part de l'energia es perd, sovint, en forma de calor). Per tant, com més estratificada estigui la columna d'aigua més energia caldrà per a la barreja vertical. Es pot demanar als estudiants més avantatjats que estimin l'energia requerida, usant el concepte que el centre de gravetat d'un fluid és més alt en el fluid barrejat que en l'estratificat [per exemple, veure Denny, 1993]).

La densitat és d'una importància fonamental per a la circulació oceànica de gran escala. Un increment en la densitat de l'aigua de la superfície, a través d'una davallada de la temperatura (refredament) o un increment de la salinitat (per formació de gel o per evaporació), dóna lloc a una inestabilitat gravitacional (és a dir, aigua densa surant sobre aigua menys densa) i a l'enfonsament de les aigües superficials cap a més fondària. Un cop una massa d'aigua que s'enfonsa arriba a una profunditat on la seva densitat coincideix amb la densitat ambient, la massa flueix horitzontalment al llarg de les "superfícies" de la mateixa densitat. Aquest procés de formació d'aigua densa i el subsegüent enfonsament és el motor³ de la circulació termohalina a l'oceà. S'observa tant en latituds baixes (per exemple, al Golf d'Aqaba al Mar Roig i al Golf de Lleó al Mar Mediterrani) com a latituds altes (per exemple, la formació d'aigua profunda a l'Atlàntic Nord). Dins de la capa de barreja superior, la barreja convectiva es produeix per la pèrdua de calor de les aigües superficials (barreja induïda pel canvi de densitat) i degut al forçament pel vent i les ones (barreja induïda mecànicament).

La densitat és també d'una importància fonamental en processos lacustres. A mesura que l'hivern avança a les latituds altes, per exemple, les aigües dels llacs són refredades des de dalt. A mesura que la temperatura de l'aigua de la superfície disminueix, la seva densitat augmenta, i quan aquestes aigües

superficials es tornen més denses que les que es troben per sota, s'enfonsen. L'aigua més càlida i menys densa just per sota de la capa superficial aflora llavors a la superfície per a reemplaçar les aigües que s'han enfonsat. Si les baixes temperatures de l'aire persisteixen, aquests processos de refredament i convecció acabaran per refredar tot el llac a 4°C (la temperatura de màxima densitat de l'aigua dolça a nivell del mar). Si el refredament a la superfície continua, la densitat de les aigües superiors seguirà disminuint. El llac es torna aleshores establement estratificat, amb l'aigua més densa al fons i l'aigua més freda però menys densa a sobre. Quan les aigües superficials es refreden encara més, fins als 0°C, comencen a gelar-se. Si el procés de refredament prossegueix, la capa gelada es va fent cada vegada més gruixuda i profunda.

DESCRIPCIÓ DE LES ACTIVITATS

Les Activitats 1.1–1.3 es fan servir per a revisar el concepte de densitat, i les Activitats 1.4–1.6 destaquen la connexió amb els processos oceànics. Les Activitats 1.1–1.3 emfatitzen la relació entre la massa, el volum i la densitat d'un objecte i el seu enfonsament o flotació. Aquestes activitats permeten també als estudiants practicar les seves habilitats per a fer mesures. Les mesures i conceptes relacionats (com ara precisió i exactitud) i alguns conceptes estadístics (tals com mitjana i desviació estàndard), poden ser introduïts durant la classe i/o proposats com a deures. A les Activitats 1.4–1.6, els estudiants examinen les relacions entre densitat, estratificació i barreja, i després discuteixen les aplicacions als processos oceànics.

Les activitats estaran disposades en pràctiques abans de començar la classe (típicament dues o tres pràctiques per cada període de 60 minuts de classe, escollint-ne les activitats, nivell de dificultat i detall de la discussió segons els coneixements previs dels estudiants). Es demanarà als estudiants que vagin canviant de pràctica fins a completar les activitats assignades. Durant aquest temps, els responsables de les activitats es mouran entre els grups i guiaran els estudiants tot fent preguntes clau. Els últims (aproximadament) 20 minuts de la classe s'empraran en resumir i discutir els resultats.

ACTIVITAT 1.1. SURARÀ? (Figura 1.1)

Materials

- Dos cubs sòlids de fusta, aproximadament d'igual volum, un fet de fusta de balsa i l'altre de fusta de guaiac⁴ (de sciencekit.com)

³ N. del T.: Aquest procés no és el motor energètic, però sí una part fonamental de la circulació termohalina

- Una bola de metall gran i buida (de sciencekit.com)
- Una bola petita de polioximetilè (conegut comercialment com a “delrin”) o una altra esfera sòlida de plàstic (es pot aconseguir en qualsevol ferreteria)
- Un recipient ple d'aigua de l'aixeta a temperatura ambient
- Regle o peu de rei
- Balança

Instruccions per als Estudiants

1. Feu una llista de les propietats que creieu que determinen si un objecte s'enfonsa o sura.
2. Preneu els objectes i tracteu de predir quins suraran en l'aigua i quins s'hi enfonsaran. En què us baseu per fer la vostra predicció? Discutihi la vostra predicció dins del grup.
3. Comproveu la vostra predicció. Coincideix allò que observeu amb el què heu predit? Si no és així, com ho expliqueu?
4. Basant-vos en les vostres observacions, com corregiríeu la vostra llista de propietats del pas 1?
5. Calculeu la massa i el volum de cada cub i cada bola. Podeu suggerir més d'un mètode per obtenir els volums de cubs i boles? (Si hi ha temps: Són comparables les densitats obtingudes pels diferents mètodes?)
6. Quina és la relació, si és que n'hi ha, entre les masses dels objectes i els comportaments d'enfonsament/flotació que heu observat? Quina és la relació, si és que n'hi ha, entre els volums dels objectes i els comportaments d'enfonsament/flotació que heu observat?
7. Calculeu les densitats dels cubs, boles i aigua de l'aixeta. Quina relació hi ha, si és que n'hi ha, entre les densitats que heu calculat i els comportaments d'enfonsament/flotació que heu observat?

Explicació

En aquesta activitat, els estudiants experimenten amb quatre objectes: dos tipus de cubs sòlids de fusta, una bola de metall buida i una esfera sòlida de plàstic. Hem fet servir dos tipus de fusta que són molt diferents en densitat: balsa, amb una densitat a l'interval 0,1-0,17 g/cm³ (el cub concret que fem servir nosaltres té una massa de 2,25 g i un volum de 16,7 cm³, i per tant una densitat de 0,13 g/cm³), i guaiac, amb una densitat a l'interval 1,17-1,29 g/cm³ (el cub concret que fem servir nosaltres té una massa de 19,6 g i un volum de 15,2 cm³, i per tant una densitat de 1,29 g/cm³). Les densitats de la bola petita de plàstic i de la bola de metall buida de mida més gran són 1,4 g/cm³ (massa de



Figura 1.1. Materials per a l'Activitat 1.1.

1,5 g i volum de 1,07 cm³) i 0,14 g/cm³ (massa de 144 g i volum de 1035 cm³), respectivament. Donat que la densitat de l'aigua de l'aixeta a temperatura ambient és aproximadament 1 g/cm³, el cub de balsa i la bola de metall suraran i el cub de guaiac i la bola de plàstic s'enfonsaran.

Aquesta activitat il·lustra dos punts clau: (1) El comportament de surar o enfonsar-se d'un objecte no depèn de la seva massa o del seu volum individualment sinó del quocient entre ambdues propietats, és a dir, de la seva densitat. Discutim la frase força comuna “les coses pesants s'enfonsen, les lleugeres suren” i destaquem el prejudici potencial que pot sorgir. (2) El comportament de flotació o enfonsament no depèn només del material del qual l'objecte està fet (per exemple, abordant l'error comú que la fusta sempre sura). Si hi ha temps, es pot conduir una discussió sobre les mesures de volum (basades en les dimensions mesurades o en el desplaçament de volum), conduint al concepte de força de flotació, que s'introdueix al Capítol 3.

ACTIVITAT 1.2. POT SURAR UNA LLAUNA?

(Figura 1.2)

Materials

- Un llauna de Mountain Dew i una llauna de Mountain Dew light⁵
- Un recipient gran (palangana, cubell) ple amb aigua de l'aixeta a temperatura ambient
- Regle o peu de rei
- Balança
- Un cilindre amb capacitat per a dos litres i graduat (proveta)

⁵N. del T.: Cal una fusta que sigui més densa que l'aigua, però és evident que la fusta de guaiac serà difícil d'obtenir. Fusta d'alzina ben seca podria servir (densitat de fins a 1,20 g/cm³).

Instruccions per als Estudiants

1. Examineu les dues llaunes. Feu una llista de les similitats i diferències entre elles.
2. Quin creieu que serà el comportament de flotació o enfonsament de cada llauna quan se les col·loqui en aigua a temperatura ambient? Escriviu les raons que justifiquen la vostra predicció.
3. Col·loqueu les dues llaunes a la palangana. Assegureu-vos que no hi hagi bombolletes enganxades a les llaunes. La vostra observació es correspon amb la vostra predicció? Com explicàreu aquesta observació?
4. Com determinaríeu la densitat de cada llauna? Proveu amb el vostre mètode. Com es comparen les densitats de les llaunes amb les de l'aigua de l'aixeta?
5. Són les vostres mesures de densitat coherents amb les vostres observacions? Per què pot ser que hi hagi una diferència en densitat entre les llaunes i/o l'aigua?

Explicació

Quan els estudiants col·loquen les dues llaunes en un recipient amb aigua dolça, la llauna de beguda gasosa ordinària s'enfonsa i la llauna de beguda light sura (Figura 1.2). Les densitats calculades de les llaunes que nosaltres fem servir de Mountain Dew i Mountain Dew light són de $1,0245 \text{ g/cm}^3$ i de $0,998 \text{ g/cm}^3$, respectivament. La diferència en densitat és deguda a les diferències de massa dels edulcorants afegits a la beguda normal i a la dietètica (sense sucre). Una llauna de Mountain Dew conté 46 g de sucre! Causarem una gran impressió en els estudiants si pesem 46 g de sucre per demostrar la quantitat de sucre afegit (veure la imatge de la dreta a la Figura 1.2). Hi ha variacions d'aquesta activitat disponibles a Internet. Cal advertir que existeix una gran variabilitat entre marques comercials de begudes gasoses i entre llaunes de la mateixa beguda; en alguns casos, tant la beguda normal com la light suraran (o s'enfonsaran totes dues). Els supervisors haurien d'haver verificat sempre el comportament de les llaunes abans de la classe. Alternativament, el cas que una llauna que hauria de flotar no ho fa pot ser molt instructiu per a posar a prova la comprensió dels estudiants. Aquesta activitat és un exemple d'un esdeveniment discrepant (veure la discussió a la p. 35). Donat que les llaunes semblen similars, els estudiants no esperen que siguin diferents quant als seus comportaments d'enfonsament o flotació. Durant l'activitat, els estudiants sovint plantegen la qüestió de com mesurar el volum de les



Figura 1.2. Diferència en densitats i, per tant, en enfonsament i flotació entre una llauna de beguda gasosa ordinària (dreta) i una llauna de beguda gasosa sense sucre (esquerra).

llaunes (per desplaçament de volum o mesurant les dimensions de la llauna i calculant el volum d'un cilindre). Hem de deixar que ells escullin un mètode i donat que cada grup fa servir les mateixes llaunes compararem les estimacions obtingudes per cadascú. Si hi ha temps, demanarem a cada grup que faci servir totes dues aproximacions i comparin les seves estimacions de densitat. Hom podria desenvolupar encara més aquesta activitat per incloure estimacions de la precisió de cada mètode, així com discussions sobre l'exactitud de la mesura i la propagació de errors.

ACTIVITAT 1.3. DENSITATS DE LES ESCORCES OCEÀNICA I CONTINENTAL (Figura 1.3)

Aquesta activitat ha estat modificada a partir d'una dissenyada per en Donald F. Collins, Warren-Wilson College.

Materials

- Mostra de roca basàltica (representativa de l'escorça oceànica) i granit (representativa de l'escorça continental)
- Un recipient amb sobreeixidor i una aixeta, i una proveta de 50 ml per mesurar l'aigua desplaçada (o com alternativa un recipient amb línees de graduació servirien)
- Balança

Instruccions per als Estudiants

1. Determineu les densitats de les dues mostres de roca de la Terra. Són les densitats del granit i del basalt comparables?
2. L'elevació mitjana de la Terra sobre el nivell del mar és de 875 m. La profunditat mitjana del llit oceànic és de 3.794 m

⁵ N. del T.: Mountain Dew és un refresc de llimona molt popular als EUA. Molt probablement la experiència proposta podria funcionar igualment amb llaunes de Coca-cola i Coca-cola Light, per exemple.

sota el nivell del mar. Apliqueu els vostres càlculs de densitat i el vostre coneixement de l'estructura de la Terra per a explicar aquesta gran diferència en elevació entre continents i conques oceàniques.

3. Els valors de densitat recollits als llibres de text per a l'escorça oceànica i la continental són de $2,9\text{--}3,0\text{ g/cm}^3$ i $2,7\text{--}2,8\text{ g/cm}^3$, respectivament. Són aquests valors comparables a les vostres mesures? Si difereixen, què podria explicar les diferències entre els valors que heu obtingut i els dels llibres de text?
4. Donat que la massa de la Terra és de $5,9742 \times 10^{24}\text{ kg}$ i que el radi de la Terra mesura 6.378 km , calculeu la densitat del planeta. (*Repte:* Com determinariem la massa de la Terra?). Es comparable la densitat de la Terra amb la densitat de les roques? Què diu això sobre l'estructura de la Terra?

Explicació

Les densitats de les mostres de roca que fem servir són de $2,8\text{ g/cm}^3$ per al basalt i $2,6\text{ g/cm}^3$ per al granit. Aquestes dues roca són originàries, respectivament, de l'escorça oceànica i de l'escorça continental. Tots dos tipus d'escorça recobreixen el mantell terrestre, de densitat superior ($3,3\text{--}5,7\text{ g/cm}^3$). El conjunt de l'escorça oceànica i l'aigua que hi ha al seu damunt, tenen una densitat més gran que la de l'escorça continental, tot i que aquesta és més gruixuda. Per tant, l'escorça continental sura sobre el mantell, per damunt d'on ho fa l'escorça oceànica. Durant l'activitat i la subsegüent discussió de classe, destacarem tres punts. El primer es refereix a la mesura del volum de formes irregulars per desplaçament d'aigua. Aquest concepte està lligat a una lliçó posterior sobre força de flotació (Capítol 3). Després, discutirem la qüestió de les mesures i la variabilitat associada

amb les mesures. Els estudiants de ciències estan acostumats a veure valors de quantitats que representen mitjanes, sovint sense cap informació estadística sobre les incerteses associades o la variància natural. Més encara, alguns estudiants creuen que si no obtenen el valor exacte dels llibres de text és que s'han equivocat. Al final de la classe, compararem les mesures de densitat i els mètodes dels diferents grups, i discutirem les fonts potencials de variabilitat en les mesures i què és el que els valors dels llibres de text representen en realitat (es pot discutir aquí conceptes estadístics com ara la mitjana i la desviació estàndard). Per últim, destacarem les aplicacions de tot això: les diferències en densitat i gruix de l'escorça continental i oceànica modelen la topografia de la Terra, i estan relacionats amb els processos de tectònica de plaques. Respecte a la derivació de la massa mitjana de la Terra i la seva densitat, veieu el Quadre 1.1.

ACTIVITAT 1.4. EFECTES DE LA TEMPERATURA I LA SALINITAT SOBRE LA DENSITAT I L'ESTRATIFICACIÓ (Figura 1.4)

Materials

- Tanc rectangular amb un envà divisor (de sciencekit.com)
- Botella que contingui una solució preparada de sal (aproximadament 75 g de sal dissolts en 1 L d'aigua: la sal grossa dona una solució clara mentre que una solució amb sal de taula, a altes concentracions, sembla llet)
- Dos colorants alimentaris (de dos colors diferents)
- Gel
- Vasos de precipitats

Instruccions per als Estudiants

1. Ompliu el vas de precipitats amb aigua de l'aixeta.
2. Col·loqueu aigua del vas de precipitats en un compartiment del tanc i aigua de la botella amb solució salina a l'altre. Afegiu unes gotes d'un colorant alimentari en un compartiment i unes gotes de l'altre colorant a l'altre. Què prediu que passarà quan s'elimini l'envà divisor entre els dos compartiments? Expliqueu el vostre raonament.
3. Mesureu les densitats de l'aigua de l'aixeta i la solució salina a temperatura ambient.
4. Comproveu la vostra predicció eliminant l'envà divisor. Què passa? Són les vostres observacions consistents amb les densitats que heu mesurat?
5. Buideu el tanc i ompliu un vas de precipitats amb aigua calenta de l'aixeta i l'altre vas amb aigua refredada amb gel. Afegiu unes gotes d'un colorant alimentari en un vas i unes gotes de l'altre colorant a l'altre.

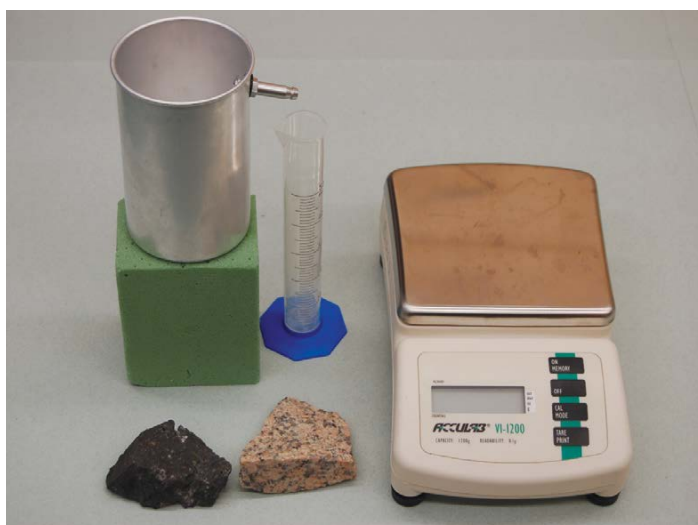


Figura 1.3. Materials per a l'Activitat 1.3.

QUADRE 1.1. CÀLCUL DE LA MASSA I DENSITAT DEL PLANETA TERRA

La massa de la Terra pot calcular-se a partir de les lleis de Newton:

1. La Llei de la Gravitació Universal de Newton afirma que la força (força atractiva) que dos cossos exerceixen cadascun sobre l'altre és directament proporcional al producte de les seves masses (m_1 , m_2) i inversament proporcional al quadrat de la distància entre ells (L):
 $F = Gm_1m_2/L^2$, on G és la constant gravitatòria ($G = 6.7 \times 10^{-11} \text{ N m}^2/\text{kg}^2$). Si assumim que el cos està a prop de la superfície de la Terra, llavors el radi del planeta es pot fer servir com a la distància entre el cos i la Terra.
2. La Segona Llei de Newton estableix que la força que atrau un cos cap a la Terra és igual a la seva massa (m) per l'acceleració de la gravetat (g): $F = mg$, on, damunt la superfície de la Terra, $g = 980 \text{ cm/s}^2$ (la pròpia g pot calcular-se, per exemple, a partir del valor del període d'un pèndul).

Sigui m_1 la massa de la Terra i sigui m_2 la massa d'un cos:

$F = m_2g = Gm_1m_2/L^2$. La massa de la Terra és per tant $m_1 = gL^2/G \approx 6 \times 10^{24} \text{ kg}$. Dividint pel volum de la Terra ($4/3\pi r^3$, on r es el radi de la Terra amb un valor mitjà de 6.373 km), obtenim la densitat de la Terra (5.515 kg/m^3 o 5.515 g/cm^3).

⁶ N. del T.: Assumint en primera aproximació que la Terra té una densitat que només depèn de la profunditat, la força gravitatòria en qualsevol punt exterior a la Terra és igual a la que exerciria una massa puntual igual a la de tota la Terra i estigués col·locada al seu centre. Per tant la força sobre una massa a la superfície és igual que la força exercida per la massa puntual a una distància igual al radi de la Terra.

6. Col·loqueu l'aigua calenta en un compartiment del tanc i l'aigua refredada amb gel a l'altre. Repetiu els passos 3 a 5. Després de treure l'envà i observar el nou estat d'equilibri al tanc, fiqueu-hi els dits a la part de dalt del fluid i lentament baixeu la mà fins al fons del tanc. Podeu sentir el canvi de temperatura?
7. Com podrien els efectes del canvi climàtic, tals com l'escalfament i fusió del gel marí, afectar l'estructura vertical de la

columna d'aigua? Discutiu els possibles escenaris dins del grup (alternativament, es pot proposar aquesta pregunta com una tasca per a casa).

Explicació

Aquesta activitat demostra que els fluids es disposen en capes d'acord amb la seva densitat. Les dues "masses d'aigua" (Figura 1.4)—salada (blau) *versus* dolça (groc), o freda (blau) *versus* calenta (groc)—estan inicialment separades per l'envà divisor. Quan s'elimina l'envà, l'aigua més densa (salada o freda [blau]) s'enfonsa al fons del recipient i l'aigua menys densa (dolça o calenta [groc]) sura per dalt, tot formant una columna estratificada. En el procés, es genera una ona interna al tanc (que discutirem en més detall al Capítol 5, Ones de gravetat).

ACTIVITAT 1.5. EFECTE DE L'ESTRATIFICACIÓ SOBRE LA BARREJA (Figura 1.5)

Aquesta activitat es basa en l'experiment que ens va comunicar el Dr. Peter Franks, de la Universitat de Califòrnia, San Diego. Per als detalls d'aquesta simulació física, veieu Franks & Franks (2009).

Materials

- Tanc amb aigua de l'aixeta
- Tanc que contingui fluid estratificat*

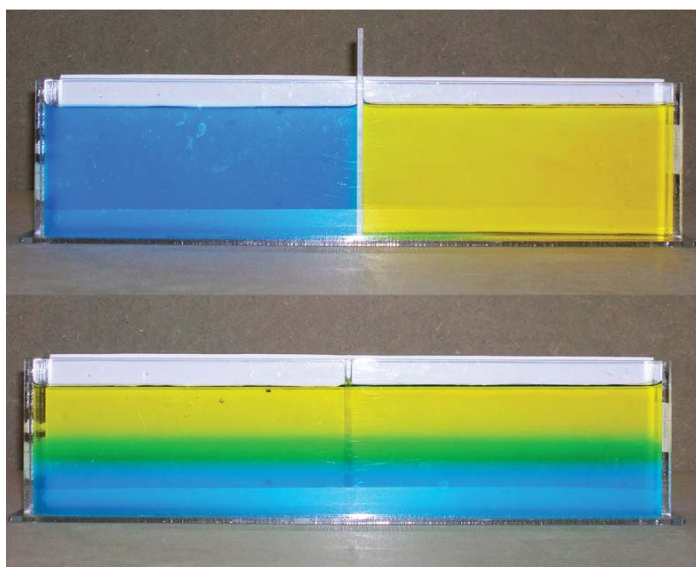


Figura 1.4. Tanc abans (a dalt) i després (a baix) de eliminar el panel de divisió.

- Assecador del cabell
- Colorant alimentari (dos colors diferents)
- Pipetes llargues

*Per a preparar un tanc amb fluid estratificat en dues capes, empleu el tanc amb una solució fortament salina fins a la seva meitat o tres quartes parts (veure Activitat 1.4). Col·loqueu una capa d'escuma sintètica (de la mateixa amplada del tanc) sobre l'aigua i amb cura vesseu aigua calenta sobre l'escuma. Després, treieu suaument la capa d'escuma, sense agitar ni barrejar els fluids. Podeu trobar una altra tècnica a Franks & Franks (2009).

Instruccions per als Estudiants

1. Suggeriu en quin tanc un colorant introduït a la superfície es barrejarà més fàcilment per tot el tanc.
2. Al tanc amb la columna d'aigua no estratificada, feu servir una pipeta llarga per injectar amb cura unes poques gotes de colorant a la superfície de l'aigua. Fent servir l'assecador, genereu un "vent" que flueixi aproximadament de manera paral·lela a la superfície del fluid, i observeu com es barreja el colorant.
3. Amb el tanc que conté el fluid de dues capes, feu servir la pipeta llarga per a injectar amb cura unes poques gotes d'un colorant en la superfície i unes poques gotes de l'altre en el fons del tanc. Fent servir l'assecador, genereu un vent similar al del pas 2. Compareu les vostres observacions amb el que heu vist que passava en el tanc no estratificat.
4. En base a les vostres observacions, predigueu i discutiu en el grup alguns efectes potencials de l'escalfament global sobre l'estratificació i barreja en oceans i llacs. Quines podrien ser les conseqüències per als organismes marins?

Explicació

En la columna d'aigua no estratificada (Figura 1.5, banda esquerra), el colorant vermell afegit en la superfície del fluid s'enfonsa inicialment perquè la seva densitat és lleugerament superior a la de l'aigua (Figura 1.5, imatge superior esquerra). Després d'un breu temps d'exposició a una tensió a la superfície (el "vent" generat per l'assecador de cabell), el colorant es barreja a través de la columna d'aigua (Figura 1.5, a baix a l'esquerra). Al tanc estratificat (Figura 1.5, banda dreta), la picnolina (la regió de canvi sobtat de la densitat entre capes) forma una barrera efectiva a la barreja (Figura 1.5, a dalt a la dreta). Es requereix més energia per a barrejar les dues capes, i el "vent" generat per l'assecador de cabell ja no és prou per a barrejar tota la columna d'aigua. Com a resultat, el colorant vermell es barreja només a la capa superior, que és anàloga a la capa de barreja superior en oceans i llacs (Figura 1.5, a baix a la dreta).

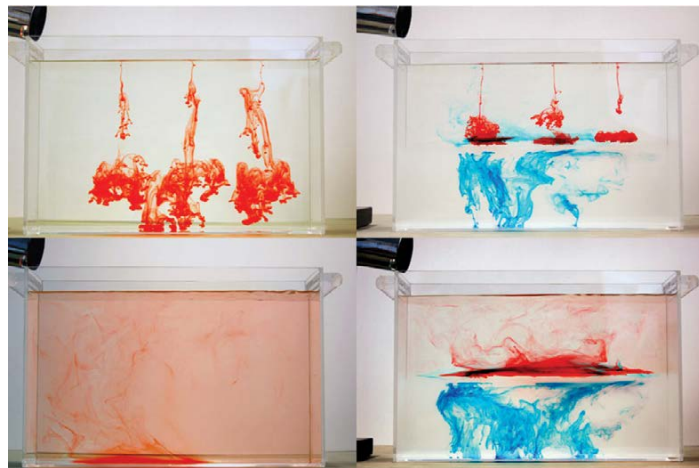


Figura 1.5. Tancs amb colorant abans (a dalt) i després (a baix) de l'aplicació de forçament mecànic (bufant amb un assecador paral·lelament a la superfície superior). Costat esquerre: tanc no estratificat, costat dret: tanc estratificat en densitat.

Es poden usar càlculs de l'energia requerida per a incrementar la profunditat de la picnolina a través de la barreja, elevant el centre de gravetat del fluid, en conjunció amb aquesta activitat (per exemple, Denny, 2007).

ACTIVITAT 1.6. CONVECCIÓ SOTA EL GEL

(Figura 1.6)

Materials

- Com a mínim quatre glaçons acolorits (afegint colorant alimentari a l'aigua i després congelant-los en glaçoneres)
- Dos recipients grans transparents: un ple amb aigua de l'aixeta i l'altre ple amb aigua salada (tots dos a temperatura ambient)*

*Cal substituir l'aigua dels recipients cada vegada que arriba un grup nou d'estudiants a la pràctica. A mesura que el gel es fon, el color es barreja amb l'aigua i al cap d'una estona es fa difícil observar el patró del flux.

Instruccions per als Estudiants

1. Col·loqueu un glaçó al contenidor amb aigua de l'aixeta. A mesura que el gel es fon, observeu i expliqueu el comportament dels fluids.
2. Col·loqueu l'altre glaçó acolorit al recipient amb aigua salada. A mesura que el gel es fon, observeu i expliqueu el comportament dels fluids. Compareu aquestes observacions amb el que heu vist al pas 1.

Nota per a l'instructor: Es pot demanar als estudiants més avançats que observin si el comportament del fluid als tancs depèn de si el gel està a prop de les parets del tanc o al centre del tanc

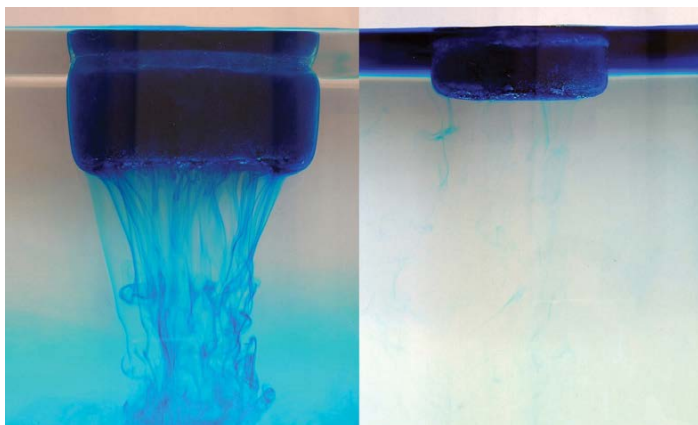


Figura 1.6. Convecció associada a la fusió d'un bloc de gel acolorit en aigua de l'aixeta (esquerra) i aigua de mar (dreta).

i que relacionin aquestes observacions amb escenaris oceànics semblants (per exemple, xemeneies de convecció a l'oceà obert *versus* convecció en la plataforma).

Explicació

Figura 1.6, imatge esquerra: En aigua de l'aixeta, el glaç s'ura perquè la densitat del gel és més petita que la de l'aigua dolça. Tot i així, a mesura que es fon el gel, l'aigua freda acolorida s'enfonsa al fons perquè és més densa que l'aigua de l'aixeta. L'aigua més calenta del fons és aleshores desplaçada i aflora, resultant en un flux convectiu visible gràcies als patrons que dibuixa el colorant. El gel que es fon al centre del tanc és anàleg a una "xemeneia" convectiva de les que es formen a l'oceà obert, en tant que el gel que es fon a la vora del tanc és anàleg a una xemeneia a la plataforma continental (a prop de terra). Tals xemeneies a l'oceà, creades i sostingudes per processos convectius, es presenten com a "columnes" d'aigua barrejada que flueixen cap al fons. Sota determinades condicions oceàniques i meteorològiques, la convecció en aigües obertes tendeix a arrossegar una quantitat d'aigües circumdants més gran del que fa la convecció prop d'una massa de terra. Per tant, en oceà obert l'aigua submergida que es forma és menys densa que quan el procés passa prop de la Terra.

Figura 1.6, imatge dreta: El glaç s'ura en aigua salada i densa. A mesura que el gel es fon, només una petita quantitat de colorant s'enfonsa perquè la densitat de l'aigua del mar és més gran que la de l'aigua dolça resultat de la recent fusió del gel. La majoria de l'aigua fosa s'acumula a dalt de la superfície de la capa salada més densa.

ACTIVITAT SUPLEMENTÀRIA (Figura 1.7)

Si hi ha temps, la comprensió dels estudiants del concepte de densitat pot ser comprovat donant-los un termòmetre de Galileu (Figura 1.7; és barat i disponible online), un recipient amb aigua calenta i un recipient amb aigua freda, i demanant-los que expliquin com funciona el termòmetre. Un termòmetre de Galileu està fet d'un tub de vidre segellat que conté un fluid clar i boles de vidre calibrades que contenen fluid i hi porten adherides etiquetes de metall. Les boles, cadascuna d'elles amb densitat lleugerament diferent, suren en el fluid. Estan segellades i per tant tenen volum i massa constant, i per tant, densitat constant. El que canvia com a conseqüència de l'escalfament o refredament és la densitat del fluid que les envolta. El canvi de densitat relativa entre les boles de vidre i el fluid fa que les boles pugin o baixin i es reordenin d'acord amb les seves densitats d'equilibri. Normalment les boles se separen en dos grups, un a prop del fons i l'altre a prop de la part de dalt de la columna. La temperatura es llegeix llavors a partir dels discs de metall adherits a les boles: la lectura del disc de la bola situada en la posició més inferior dins del grup que està a prop de la part de dalt ens indica la temperatura. Advertim que el termòmetre de Galileu triga una bona estona en enregistrar canvis en la temperatura després de canviar-lo d'un bany amb aigua calenta a un altre amb aigua freda (o viceversa), degut al ritme lent amb què el líquid intern canvia la temperatura. Aquesta lenta dinàmica és especialment pronunciada quan el termòmetre es col·loca en un bany de gel, perquè el líquid fred (dens) es queda prop del fons. Girar



Figura 1.7. Un termòmetre de Galileu.

periòdicament el termòmetre pot reduir el temps d'espera. Per a un experiment amb breu temps assignat, es recomana comparar dos termòmetres, un col·locat en un bany d'aigua calenta i a l'altre en un bany d'aigua freda.

REFERÈNCIES

- Behrenfeld, M.J., R. O'Malley, D. Siegel, C. McClain, J. Sarmiento, G. Feldman, A. Milligan, P. Falkowski, R. Letelier, & 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. & 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.

D'ALTRES RECURSOS

- <http://cosee.umaine.edu/cfuser/index.cfm>. Aquesta pàgina web oceà-clima de COSEE-OS proporciona imatges de perfils de densitat i de circulació termohalina, vídeos de convecció oceànica, una col·lecció d'activitats pràctiques i enllaços a conceptes relacionats.
- Ford, B.A., and P.S. Smith. 2000. *Project Earth Science: Physical Oceanography*. National Science Teachers Association, Arlington, VA, 220 pp.

ANIMAR ELS ESTUDIANTS A FER PREGUNTES: UN PASSEIG PER UN ENTORN ESTIMULANT

BASAT EN WELLER, 1988

Fer-se preguntes és una part integral de la recerca científica (National Research Council, 2000) i té molts mèrits educatius. El National Research Council (2000, p. 29) descriu la manera d'abordar "preguntes orientades científicament" de l'alumne com a una de les cinc característiques essencials de la investigació a classe. Les preguntes dels estudiants poden revelar molt sobre la seva comprensió i raciocini, i descobrir marcs conceptuals alternatius i errors de concepte. Les preguntes dels estudiants poden estimular la seva curiositat i motivació, ajudar-los a desenvolupar habilitats de pensament crític i independent, i fer-los participants actius. Tot i així, en una classe típica, els estudiants rarament fan preguntes; és principalment l'instructor qui les fa. Quan se'ls va preguntar als estudiants del nostre programa a punt de graduar-se per què rarament feien preguntes a classe, les dues respostes més comunes van ser: (1) la por de semblar estúpid i (2) una atmosfera de classe que no era propícia a fer preguntes. Molts estudiants comentaven que les seves experiències en l'educació convencional els havien portat a desenvolupar la noció que el que se n'esperava era que fossin presents a classe, prenguessin notes i fessin els seus deures i exàmens. Fer preguntes no era una capacitat que s'hagués emfatitzat com a part de llur educació formal.

Descrivim aquí un enfocament que fem servir per a animar als estudiants a fer preguntes.

Durant el primer període d'un curs, portem als estudiants a passejar per un entorn estimulant. L'objectiu del passeig és exposar-los a un entorn ric en objectes que els inciti a fer preguntes espontànies. Aquesta perspectiva es deriva d'un enfocament paral·lel a l'escola primària destinat a obtenir preguntes de joves estudiants (Jelly, 2001).

Com a entorn ric i estimulant, fem servir la instal·lació d'aqüicultura de la Universitat de Maine, on s'hi crien peixos tropicals amb propòsits d'investigació i comercials. No expliquem als estudiants res sobre aquest ambient abans del passeig. Només els demanem que anotin les preguntes que els vinguin al cap a mesura que l'explorem, i que se centrin en qüestions

que realment els interessin (més que en preguntes que es podrien trobar a un llibre de text). Després d'uns 30 minuts d'exploració lliure, es demana a cada estudiant que esculli de tres a cinc preguntes preferides per a confeccionar la llista de tota la classe. Es pot elaborar la llista general electrònicament o manual (a la pissarra), de manera que els estudiants perceben visualment la quantitat, qualitat i diversitat de les preguntes que han generat tots plegats. Alguns exemples de les preguntes dels estudiants durant el passeig d'aqüicultura van ser: "Juguen els peixos?" "Les algues afavoreixen o limiten la seva reproducció?" "Com es transporta un peix tropical en condicions meteorològiques extremes i quina és la mortalitat en aquest procés?"

A continuació, demanem als estudiants que formin equips, i es demana a cada equip que classifiqui les preguntes basant-se en característiques similars. Un representant de cada equip explica a la classe el raonament que han seguit per a escollir les categories. Aquestes tècniques d'aprenentatge cooperatiu per a l'organització de la classe anima als estudiants a considerar totes les qüestions acuradament i eliminar les categories més forasenyades que sempre proposaran alguns estudiants. Per exemple, l'any 2007 les categories desenvolupades pels tres grups petits van ser: Grup A—biologia, instal·lació, medi ambient, negoci; Grup B—medi ambient, cicle vital del peix, instal·lació/màrqueting; i Grup C—exploració, biologia/ecosistema, tècnica, instal·lació/economia. Aquesta activitat pot ser que sigui, per a alguns estudiants, la primera ocasió que han tingut per a classificar dades brutes sense la indicació de cap instructor.

Per a concloure, demanem als estudiants que comparteixin la seva visió de com el passeig, les preguntes i la classificació poden semblar-se al que els científics fan a la fase inicial exploratòria d'una investigació que comença. Demanem també als estudiants que descriguin què creuen que fa d'una pregunta una bona pregunta científica. Discutim aquest assumpte amb tota la classe, referint-nos a les preguntes que han generat, per a il·lustrar les característiques de les bones

preguntes científiques. Els estudiants sovint responen que una bona pregunta científica hauria de ser tan específica com sigui possible i no implicar aspectes no científics com ara la creença, la política i l'ètica. Aspectes addicionals que traiem durant la discussió són, per exemple: una bona pregunta científica hauria de (1) ser tan específica com sigui possible, aïllant les qüestions essencials d'un problema; (2) no pressuposar una resposta (Sagan, 1996), sinó que creï hipòtesis alternatives i falsejables a la possible resposta a la pregunta; (3) no fer intervenir la pseudociència (Derry, 1999; Sagan, 1996); i (4) no implicar alguna cosa sobre la que no podem aconseguir informació (Sagan, 1996). Per a una discussió en més profunditat d'aquests aspectes del qüestionar científic, recomanem Derry (1999), Sagan (1996, Capítol 12, pàgines 201–218), i Atkins (2003, pàgines 3–4). Finalment, discutim el poder de preguntar en l'aprenentatge i els demanem als estudiants que comparteixin les seves sensacions sobre fer preguntes a classe. Fem servir aquesta oportunitat per a recordar als estudiants que preguntar serà una part integral de la classe.

Aquest exercici marca el to del nostre curs, incrementarà la comoditat dels estudiants respecte a fer preguntes, i en última instància millorarà l'aprenentatge dels estudiants. Com a extensions d'aquest enfocament, es pot demanar als estudiants que busquin respostes a les seves pròpies preguntes com a deures o treballs. Es podria fer servir l'exercici cap a la meitat del curs per a captar l'interès dels estudiants quan s'introdueix un tema nou. Noti's que un entorn ric no té per què ser una instal·lació especialitzada. Experiments a classe, vídeos, simulacions per ordinador i/o fotos i imatges podrien servir adequadament per a estimular la capacitat de preguntar dels estudiants.

REFERÈNCIES

- 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.

CAPÍTOL 2. PRESSIÓ

OBJECTIU DE LES ACTIVITATS

Aquest grup d'activitats intenta ajudar els estudiants a entendre el concepte de pressió. Ensenyar aquest concepte a partir de les seves expressions matemàtiques (per exemple, les equacions hidrostàtica i de Bernoulli) pot no ser el més adient pels estudiants menys familiaritzats en matemàtiques. Per això proposem una sèrie d'activitats que permeten als estudiants examinar el concepte de pressió a partir de diferents punts de vista. Començarem per repassar la definició física de pressió introduint exemples de la vida quotidiana. Això proporciona als estudiants un punt de partida més familiar per a un concepte que sovint no s'entén correctament i, a la vegada, ajuda a motivar els estudiants a fer l'aprenentatge més rellevant. Després, utilitzant activitats interactives, il·lustrarem els conceptes de pressió hidrostàtica, la compressibilitat de gasos sota pressió (Llei de Boyle) i la pressió dels fluids en moviment (Principi de Bernoulli). També destacarem el paper d'aquests principis en aspectes oceànics tan diversos com la circulació marina i les adaptacions més comunes, fruit de l'evolució, que veiem en els organismes marins actuals.

CONTEXT TEÒRIC

La pressió (P) es defineix com la força (F) per unitat d'àrea (A) en la direcció perpendicular a aquesta àrea:

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

Així, la pressió depèn de l'àrea sobre la qual una determinada força es distribueix. La pressió és un escalar i no té direcció. Quan la pressió varia a través d'un objecte, aquest pateix una força direccional orientada des de la pressió més alta a la més baixa. La unitat de pressió més comuna és el Pascal (Pa), on $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2 = \text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s}^2)$ ($\text{N} = \text{Newton}$). Unitats com la lliure per polzada quadrada (psi), bars (per exemple, milibar) i atmosferes (atm) també s'utilitzen en aplicacions oceàniques i atmosfèriques.

Molts fenòmens amb els que ens trobem a diari estan associats al concepte de pressió. Entre ells hi trobem el vent, les diferències de rendiment entre un ganivet o destrat esmolats o no, o el fet de beure amb una palleta. La pressió atmosfèrica a nivell del mar té un valor de quasi 10^5 Pa . Els nostres cossos no col·lapsen sota els efectes d'aquesta pressió perquè en realitat no hi ha una força neta que hi actuï (pel fet que una pressió igual existeix dins del

nostre cos). Els nostres sentits no detecten la pressió absoluta però sí canvis de pressió (per exemple, canvis de pressió que tenen lloc dins de cavitats plenes de gasos quan ens submergim dins de l'aigua o en volar).

Malgrat els estudiants poden no adonar-se'n, la pressió canvia d'un lloc a l'altre, tant a l'oceà com a l'atmosfera. La variació geogràfica de la pressió és el mecanisme que força els corrents oceànics i els vents. Per exemple, els vents alisis es dirigeixen des de les altes pressions subtropicals vers les baixes pressions equatorials. Però, per raons encara no compreses del tot, a l'oceà Pacífic aquests patrons canvien cada tres a vuit anys, la qual cosa ocasiona un afebliment dels vents alisis i, fins i tot, un canvi de direcció. Aquest canvi en pressió atmosfèrica s'anomena l'Oscil·lació del Sud. Els canvis en la circulació oceànica al Pacífic equatorial, associats a l'oscil·lació del Sud, donen com a resultat el fenomen conegut pel nom d'El Niño, que té greus conseqüències a escala global.

La pressió en l'oceà augmenta de manera quasi lineal amb la profunditat. Diferents organismes s'han adaptat a viure en un rang de fondàries determinat. Diversos tipus d'organismes disposen de cavitats plenes de gas les quals es comprimeixen sota pressió (veieu a continuació). A més, la solubilitat dels gasos es veu afectada per la pressió, la qual cosa té importants conseqüències en la fisiologia del busseig (tant dels éssers humans com dels organismes marins). Malgrat el fet que la pressió posa límits als organismes marins, aquests també els pot aportar avantatges. Per exemple, els canvis de pressió associats al flux d'aigua sobre monticles i altres obstacles submarins n'augmenten la velocitat del flux i, alhora, incrementen la disponibilitat d'aliment dels organismes filtradors (per exemple, els musclos, els peus de cabra o percebes) i d'aigua saturada d'oxigen per a organismes que viuen en el sediment marí (veieu a continuació).

Pressió Hidrostàtica (Fluids en Repòs)

La pressió a una determinada profunditat de l'oceà és el resultat d'una força (el pes) exercida per la columna d'aigua i d'aire sobre aquesta fondària. Aquesta pressió, en un fluid en repòs, és anomenada "pressió estàtica" o "pressió hidrostàtica". La pressió hidrostàtica (P_h) és funció de la densitat del fluid i de l'alçada de la columna de fluid (profunditat). La relació és definida per l'equació hidrostàtica $P = \rho gz$, on ρ és la densitat mitjana a la columna d'aigua, g és l'acceleració gravitatòria i z és l'alçada

QUADRE 2.1. CALCULANT LA PRESSIÓ HIDROSTÀTICA

Suposem que tenim una columna d'aigua amb una secció transversal d'àrea, A , i una profunditat (altura), z . El volum de la columna d'aigua és Az . La força que aquesta columna exerceix sobre una determinada secció transversal és $F = \text{pes} = mg$, on m és la massa d'aigua sobre la secció transversal i g és l'acceleració gravitatòria. La massa pot ser convenientment expressada en funció de la densitat (aquí s'assumeix constant) i del volum d'aigua: $m = \rho V$. Així, $F = \rho Vg$. La força per unitat d'àrea (la pressió, P) és, aleshores, $P = \rho Vg/A = \rho(Az)g/A = \rho gz$. Si la densitat canvia amb la profunditat (un canvi que a l'oceà és inferior a l'1%), en lloc de la densitat local s'utilitza la mitjana vertical de la densitat (calculada mitjançant una integral de la densitat en la vertical i dividida per la profunditat de la columna d'aigua). L'equació hidrostàtica és molt útil per a mesurar la pressió en els fluids. S'utilitzen instruments com els manòmetres (Activitat 2.4) per a mesurar la pressió relativa a una pressió de referència (generalment la pressió atmosfèrica).

de la columna d'aigua (per a la derivació, veure Quadre 2.1). L'equació hidrostàtica és fonamental per a estudiar la circulació oceànica. Per exemple, els corrents geostrofics (com ho són els girs oceànics o els anells del Corrent del Golf) vénen determinats pel balanç entre el gradient de pressió horitzontal i l'acceleració de Coriolis (deguda a la rotació terrestre). Diferències de pressió hidrostàtica entre dos punts donen lloc a una força per unitat de volum exercida sobre el fluid (aire o aigua) actuant des de la regió d'alta pressió cap a la regió de baixa pressió. Degut a la rotació terrestre, el moviment resultant no és "cap avall" des de les altes a les baixes pressions (com seria el cas en un marc de referència sense rotació) sinó que segueix les línies de pressió constant. A l'equador, on l'efecte de l'acceleració de Coriolis és petit, els vents i els corrents segueixen predominantment els gradients de pressió.

La mesura exhaustiva dels canvis horitzontals de pressió en el si de superfícies de fondària constant a l'oceà no resulta pràctica donat que pressió i profunditat són dues versions d'una mateixa coordenada vertical a diferent escala (si més no, en una primera aproximació). Com alternativa, els oceanògrafs utilitzen el mètode de les alçades dinàmiques segons el qual s'escullen dos punts de referència de pressió i es calculen i comparen les sumes verticals de la densitat de les dues columnes d'aigua sobre els punts de referència. Se suposa que els punts de referència es troben en una superfície isobàrica (una superfície imaginària en la qual la pressió és constant en tots els seus punts) i per tant no existeix cap moviment horitzontal de fluid a aquella profunditat.

Si ρ_1 i ρ_2 són diferents (on ρ_1 i ρ_2 són les densitats mitjanes en la vertical pels punts de referència 1 i 2, respectivament), aleshores z_1 i z_2 (l'alçada de la columna d'aigua sobre els punts de referència 1 i 2) han de ser diferents. La diferència d'alçada de les columnes d'aigua per sobre de la profunditat de referència s'utilitza per al càlcul del pendent de la superfície del mar; per exemple, a través del Corrent del Golf (prop de 70 km d'amplada) la superfície del mar cau més d'un metre. El pendent calculat és proporcional al gradient de pressió i s'utilitza per a estimar la velocitat dels corrents geostrofics (per exemple, veieu la Figura 10.7 de http://oceanworld.tamu.edu/resources/ocng_textbook/chapter10/chapter10_04.htm). Avui en dia, el pendent de la superfície del mar pot determinar-se mitjançant l'altimetria per satèl·lit.

Dos detalls addicionals s'han de tenir en compte respecte a la pressió hidrostàtica. El primer és la transmissió de la pressió a través del fluid. La pressió aplicada sobre una part del fluid es transmet a través de tot el fluid (fet que es coneix com el Principi de Pascal). La informació sobre un canvi de pressió dins d'un fluid es propaga mitjançant ones sonores (ones de pressió) a la velocitat del so en l'aigua (~ 1500 m/s), que en els nostres experiments de laboratori (per exemple, el bussejador cartesià en el Capítol 3) sembla instantània. Si es pren un globus ple d'aigua i es submergeix sota l'aigua, la pressió hidrostàtica fora del globus és la mateixa que dins i el globus manté la seva mida i forma. Aquest principi és la raó per la qual no sentim pressió en el nostre cos (excepte en les nostres cavitats gasoses; veieu a continuació) quan bussegem. La transmissió de la pressió en un fluid és el

principi que utilitzen els mecanismes hidràulics (per exemple, els ascensors de cotxes en els tallers de reparació, els gats hidràulics, i la maquinària de construcció que s'utilitza per a aixecar càrregues pesades).

Compressibilitat de Gasos Sota Pressió

A l'oceà la pressió augmenta a un ritme d'una atmosfera (1 atm, 10^5 Pa) cada 10 metres. Els organismes que viuen o es submergeixen a grans profunditats estan sotmesos a grans forces de compressió degut al pes de la columna d'aigua sobre ells. Una de les principals diferències entre l'aigua i els gasos és que mentre l'aigua és un fluid altament incompressible, els gasos són compressibles. El volum d'una quantitat fixa de gas és inversament proporcional a la pressió dins del volum (fet conegut com la Llei de Boyle); si la pressió es duplica, el volum de gas disminueix a la meitat. Com el cos humà es compon majoritàriament d'aigua, no es comprimeix significativament quan s'hi submergeix. La pressió només se sent en les cavitats gasoses com les fosses nasals, l'oïda i els pulmons. Aquesta és la raó per la qual l'oïda ens pot fer mal quan ens submergim en només uns pocs metres en una piscina. Els mamífers marins

que se submergeixen a grans profunditats han desenvolupat adaptacions per a superar els danys potencials per als seus pulmons o altres cavitats. De la mateixa manera, la Llei de Boyle també il·lustra els perills dels gasos en expansió quan la pressió es redueix en desplaçar-nos a profunditats més somes. Quan un bussejador respira aire comprimit a una profunditat de deu metres (on la pressió total és de dues atmosferes) i després puja a la superfície mentre conté la respiració, l'aire dels seus pulmons s'expandeix al doble del seu volum original. Una part de l'aire ha de ser expulsat, si no els pulmons reventarien. Danys similars poden produir-se en les bufetes natatòries de moltes espècies de peixos si ascendeixen massa de pressa. Per això, certes espècies de peixos bentònics tenen restringits els seus desplaçaments verticals i poden morir quan són pescats. Altres espècies han desenvolupat vies per a ventilar ràpidament les seves bufetes natatòries i així no restringir els seus moviments verticals.

En la discussió anterior, s'assumia que la temperatura era constant. Pot ser útil preguntar els estudiants com els canvis de temperatura poden afectar els canvis del volum d'un objecte submergit. La Llei dels Gasos Ideals diu que, per a un volum de gas donat, la pressió augmenta amb la temperatura (una

QUADRE 2.2. EL PRINCIPI DE BERNOULLI

Suposem que tenim un fluid incompressible que es desplaça amb un flux continu i constant en el temps, en el qual les forces viscoses es consideren insignificants (no hi ha pèrdues per fricció). Varies formes d'energia són presents: (1) l'energia potencial gravitacional associada a la massa del fluid, $E_p = mgz$, (2) l'energia potencial compressiva del fluid, PV , i (3) l'energia mecànica cinètica que creix amb la velocitat del fluid, $E_k = mv^2/2$. L'energia total és la suma de totes les anteriors. Pel principi de conservació de l'energia, si no hi ha un treball exercit sobre el fluid, l'energia total en dos punts al llarg de la trajectòria del flux⁸ ha de ser la mateixa:

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

Si z i la densitat són constants al llarg del fluid (el mateix fluid viatjant en un tub horitzontal), podem cancel·lar els termes de l'energia potencial gravitatòria. Fent això i dividint pel volum:

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

Per tant, canvis en la velocitat del fluid (acceleració) estan associats a canvis de pressió.

El Principi de Bernoulli té implicacions significatives per al càlcul de la sustentació aerodinàmica, s'utilitza per a estimar la velocitat d'avions (el tub de Pitot que s'observa als costats de la cabina dels avions de propulsió petits) i permet als vehicles propulsats pel vent el poder viatjar a velocitats més grans que les del vent.

⁸ N. del T.: Es refereix a l'energia total que té un petit volum de fluid quan passa de la posició 1 a la posició 2. Cal considerar que m_1 significa "massa del volum en el punt 1" i que $m_1 = m_2$ si la densitat és constant al llarg del fluid.

discussió sobre l'energia cinètica molecular pot ser adient). En qualsevol cas, a l'oceà, el canvi de temperatura amb la profunditat té un rang de variació molt menor (al voltant del 10% en unitats Kelvin per a tota la fondària de l'oceà) que el canvi de pressió amb la profunditat (una atmosfera cada 10 metres). Així, els canvis de volum en funció de la profunditat en les cavitats plenes de gasos vénen dominats per la pressió.

Fluids Accelerats: el Principi de Bernoulli

Quan la velocitat d'un fluid canvia, es produeixen simultàniament canvis en la pressió tot al llarg de la seva trajectòria. La relació entre la pressió d'un fluid i la seva velocitat, conegut com el Principi de Bernoulli (Quadre 2.2), pot ser derivada a partir del principi de conservació de l'energia o a partir de la Segona Llei de Newton ($F = ma$). Molts organismes, com les esponges, ascídies i altres filtradors, semblen aprofitar-se del flux al seu voltant per a complementar la seva activitat de bombeig (Vogel, 1978). Per exemple, la gamba perforadora *Callinassa filholi* construeix grans monticles al voltant d'una obertura a l'exterior. De manera similar al que passa en una xemeneia, el flux que passa sobre els monticles s'accelera (ajustant-se a una menor secció transversal); coincidint amb aquesta acceleració hi ha una pressió menor sobre l'obertura i es crea així un flux ascendent dins del tub de ventilació.

DESCRIPCIÓ DE LES ACTIVITATS

Sovint comencem l'explicació de la pressió mostrant una ballarina en equilibri sobre un peu i un elefant dempeus sobre les quatre potes i demanant als estudiants quin dels dos exerceix una pressió més gran sobre el terra. Es demana als estudiants que facin la seva votació i després que calculin les pressions (assumint que la massa d'un elefant i d'una ballarina són, respectivament, de 6000 kg i 45 kg, i que el radi d'una pota d'elefant i de la punta d'un sabatilla de ballet mesuren 30 cm i 1 cm, respectivament). Recordem que la força (F) és igual al pes (no ha de ser confós amb la massa) de l'objecte: $F = \text{pes} = mg$, on m és la massa i g és l'acceleració gravitatòria, 9.8 m/s^2 .

Utilitzem les Activitats 2.1 i 2.2 per a il·lustrar el concepte de pressió. La pressió hidrostàtica es mostra a las Activitats 2.3 i 2.4. Els estudiants sovint comenten que el fet de realitzar dues activitats que fan referència al mateix principi, els suposa una millora considerable en la seva comprensió de la pressió hidrostàtica. Les activitats els obliguen a transferir coneixement d'una situació a una altra, i els motiven a reavaluar el seu coneixement. L'ús de múltiples activitats per a mostrar el mateix principi també proporciona a l'instructor noves oportunitats per a l'avaluació.

Les Activitats 2.5 i 2.6 estan pensades per a il·lustrar el concepte de la compressibilitat dels gasos sota pressió, la Llei de Boyle. L'Activitat 2.5 en proporciona una aproximació qualitativa mentre que l'Activitat 2.6 ho fa de manera quantitativa. Per a demostrar el principi de Bernoulli, utilitzem l'Activitat 2.7. Les activitats es proposen com pràctiques separades, com es descriu en el Capítol 1, i poden ser alternativament utilitzades per a demostracions a classe.

ACTIVITAT 2.1. LLIT DE CLAUS (Figura 2.1)

Materials

- Dos trossos quadrats de fusta (de la mateixa mida): un amb un clau únic al mig i l'altre amb un conjunt de claus, a mode de "llit de claus" (15 per 15 claus)
- Peu universal (suport universal de laboratori)
- Conjunt de globus del mateix material, mida i forma
- Un aro (o alguna altra cosa que es pugui fixar al peu universal) que faci de pes

Instruccions per als Estudiants

1. Poseu un globus damunt de cadascuna de les fustes i apliqueu-los aproximadament la mateixa força, mitjançant l'aro (o un altre pes). Imagineu què li passarà a cada globus. Expliqueu el vostre raonament.
2. Comproveu la vostra predicció.

Explicació

Quan es col·loca un globus sobre un llit de claus (Figura 2.1, imatge superior esquerra), la força exercida es distribueix sobre una gran àrea (la suma de tots els caps dels claus en contacte

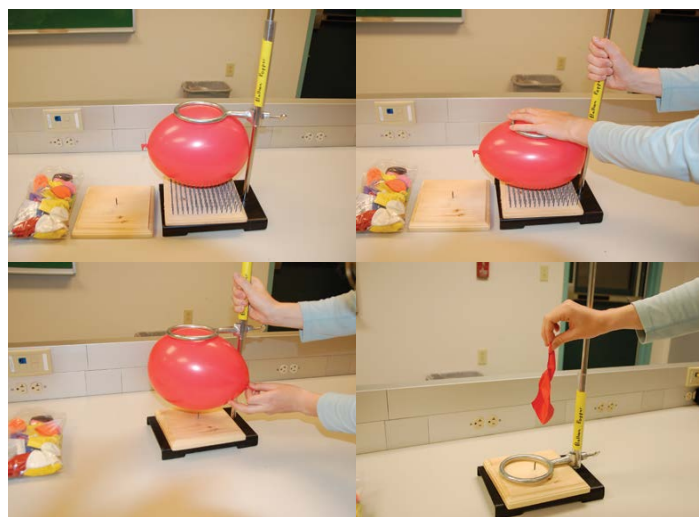


Figura 2.1. Activitat 2.1 experiment amb el llit de claus (superior) i amb un sol clau (inferior).

amb el globus). La pressió resultant no és suficient per a causar l'explosió del globus (Figura 2.1, imatge superior dreta). Quan el globus es col·loca damunt d'un clau aïllat, es necessita només una petita força per tal que el globus exploti, ja que la força està ara distribuïda sobre una àrea menor (l'àrea en contacte amb un sol clau; Figura 2.1, imatge inferior esquerra) i la major pressió causa l'explosió del globus (Figura 2.1, imatge inferior dreta). Per la mateixa raó, en estirar-nos damunt d'un llit de claus pot ser que sentim unes punxades però no ens faran cap mal, mentre que al trepitjar un clau podem fer-nos un forat al peu. El mateix raonament es pot utilitzar per a explicar per què esmolant un ganivet o una destrat es millora la seva capacitat de tall.

2.2. PERCEPCIÓ DEL PES (Figura 2.2)

Materials

- Bola d'acer gran i buida (diàmetre: 12,5 cm; massa: 144 g; de sciencekit.com)
- Bola d'acer petita i plena (diàmetre: 3,2 cm; massa: 129 g; de sciencekit.com)
- Dos embuts idèntics
- Una balança per a pesar cada bola

Instruccions per als Estudiants

1. Subjecteu ambdues boles alhora a la palma de la mà. Quina us sembla més pesada?
2. Escolliu un voluntari que haurà de tancar els ulls. Col·loqueu cada bola a l'embut i demaneu al voluntari que subjecti els embuts agafant-los per sota del conus. Pregunteu al voluntari quina bola és la més pesada i apunteu la seva resposta. Repetiu l'experiment amb altres voluntaris.
3. Teniu la mateixa percepció del pes quan se subjecta l'embut que quan es mantenen les boles a la mà? Per què?
4. Peseu las boles per a determinar quina és la més pesada. Expliqueu les vostres observacions.



Figura 2.2. Materials per a l'Activitat 2.2 (esquerra) i experiment (dreta).

Explicació

En subjectar cada bola sobre la palma de la mà, la bola gran sembla més lleugera que la bola més petita. La bola gran exerceix en realitat una força ($F = mg$) més gran que la que fa la petita. Malgrat això, com la força està distribuïda sobre una àrea més gran, la pressió ($P = F/A$) és menor i sembla més lleugera. Quan las boles es col·loquen en els embuts subjectats pel coll, la superfície sobre la qual s'aplica la força és igual per a ambdues boles i es pot notar que la bola gran és lleugerament més pesada, la qual cosa es pot confirmar amb la balança.

2.3. PREPARATS, A PUNT, A RAJAR! (Figura 2.3)

Materials

- Un tub amb un petit orifici prop de la part inferior i set forats grans al llarg del tub tapats amb taps de goma (Figura 2.3, superior). La separació entre els forats centrals ha de ser de 5 cm (pot canviar). Una versió simplificada d'aquesta activitat pot realitzar-se utilitzant la secció central d'ampolles de plàstic (com les de refresc) de 2 litres unides amb cinta adhesiva (Sharon Franks, UCSD, comunicació personal, Juny 2009)
- Un tub amb tres forats de diferents mides a la mateixa alçada (Figura 2.3, centre)
- Recipient gran
- Regle
- Garrafa amb aigua
- Rotllo de paper

Instruccions per als Estudiants

Abans de l'activitat, anirà bé que revisem las equacions hidrostàtiques i proporcionem als estudiants les següents instruccions (en alguns casos pot ser preferible explicar las equacions hidrostàtiques després de la Part A).

Part A

1. Teniu un tub amb un petit forat prop de la part inferior i diversos forats grans tapats amb taps de goma. Podeu fixar l'alçada de la columna d'aigua sobre el forat inferior tapant aquest forat amb el dit mentre ompliu el tub fins que l'aigua surti per un dels forats grans de la part de dalt (després de treure el tap corresponent). Assegureu-vos de col·locar el regle perpendicular a la base del tub.
2. Abans d'usar aquest aparell: Què creieu que passarà quan ompliu el tub amb aigua fins l'alçada del primer forat gran (des de la base) i traieu el dit del forat petit? Expliqueu les vostres expectatives en termes de les forces que actuen sobre el fluid.

Què espereu que succeeixi quan augmenteu l'alçada d'aigua sobre el forat de sortida? Per què?

3. Comproveu les vostres prediccions. Comenceu traient el tap del forat gran més proper a la base. Al mateix temps mantingueu el dit sobre el forat petit i ompliu el tub fins que l'aigua surti pel forat que s'acaba de destapar. (Reflexió: per què volem mantenir un nivell constant d'aigua dins del tub?) Utilitzant un regle, mesureu l'alçada de l'aigua sobre el forat de sortida. Ara, traieu el dit del forat de sortida deixant que surti l'aigua mentre seguiu afegint aigua contínuament per a mantenir el mateix nivell d'aigua dins del tub. Indiqueu la distància a la que arriba el raig d'aigua quan surt del forat. Torneu a col·locar el tap en el seu forat i repetiu el procés anterior amb cadascun dels altres quatre forats, un cada vegada.
4. Dibuixeu en una gràfica la distància a la què arriba l'aigua en funció de l'alçada de la columna d'aigua per a cada forat. Són consistents els vostres resultats amb les vostres prediccions en el pas 2?
5. Canviaria la distància fins a la què l'aigua arriba per cada forat si aquest fos més gran? Per què?

Part B

1. Utilitzant el segon tub (amb tres forats de diàmetres diferents), cobriu els tres forats amb els dits i ompliu el tub amb aigua. Col·loqueu el regle perpendicularment a la base del tub. Destapeu un forat cada vegada i mesureu la distància fins a la que l'aigua arriba quan comença a sortir. Coincideixen les vostres observacions amb les vostres expectatives del pas 5 anterior (Part A)?

Aquesta activitat es pot ampliar per a il·lustrar el concepte de pantà (un gran dipòsit d'emmagatzematge d'aigua amb sortides i entrades que canvien de nivell [volum] en funció de la diferència entre les entrades i sortides d'aigua).

Explicació

Part A

El pes de la columna d'aigua exerceix una pressió sobre l'aigua que es troba a nivell del forat de sortida (imaginem-nos una secció transversal del tub a l'altura del forat). Aquesta pressió és més gran que la pressió fora del forat (la qual està exercida únicament per la pressió atmosfèrica), cosa que fa que l'aigua surti a raig quan es treu el dit del forat. Quan l'alçada de la columna d'aigua sobre el forat de sortida augmenta, la diferència de pressió entre dins i fora del forat també augmenta, i així el raig d'aigua arriba més lluny. Recordem que la pressió

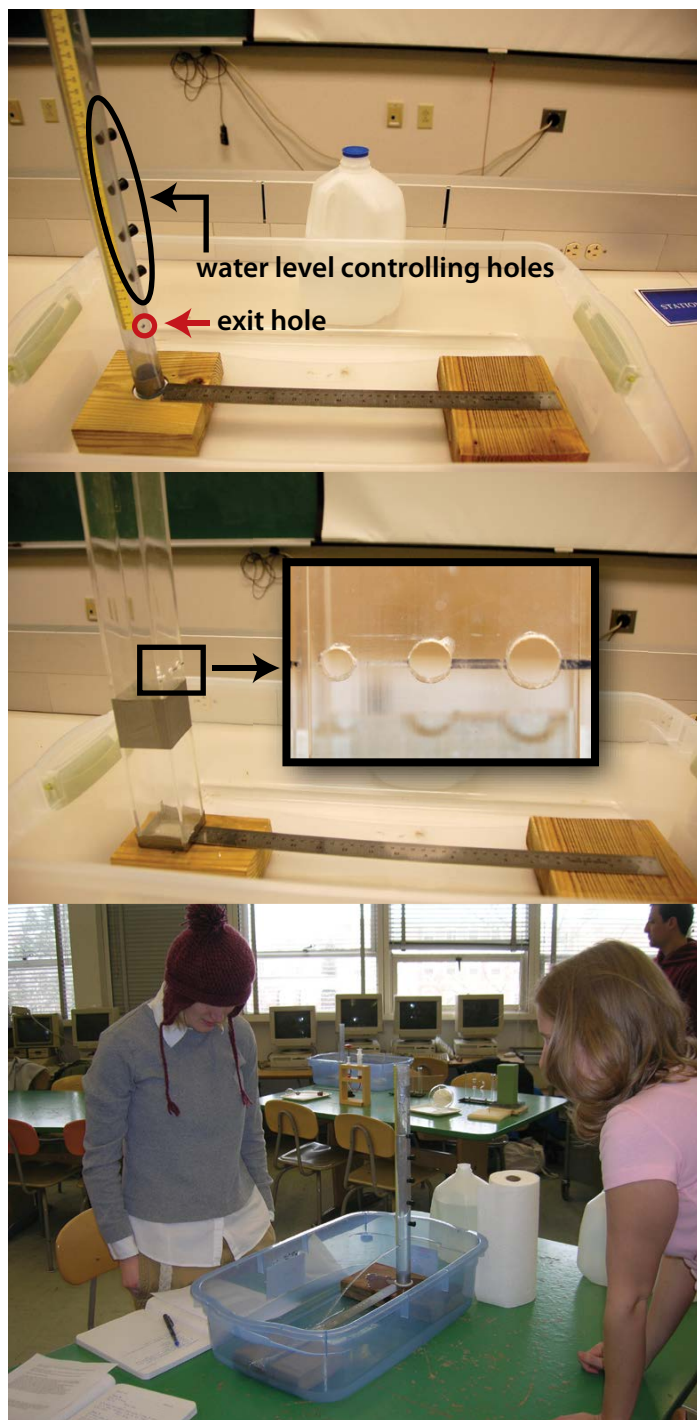


Figura 2.3. Materials per a l'Activitat 2.3, Part A (superior) i Part B (centre). A la figura superior, l'expressió "water level controlling holes" assenyalava els forats grans al llarg del tub obstruïts amb taps de goma; "exit hole" indica el petit forat per a la sortida del líquid. Estudiants portant a terme la Part A (inferior).

hidrostàtica és proporcional a l'altura de la columna d'aigua sobre el forat (la contribució de la pressió atmosfèrica és la mateixa a ambdós costats del forat).

Part B

Excepte per a forats molt petits (per als què la fricció esdevé important), la mida del forat no influeix significativament a la distància a la que arriba el raig d'aigua. Una manera de resoldre aquest problema de manera matemàtica (per als estudiants més avançats) és escriure la pressió ($P = \rho gz$) com l'energia potencial ($PE = mgz$, on m és la massa) per unitat de volum, V . Així, $PE/V = mgz/V = \rho gz$. Quan un raig d'aigua surt de la columna, la major part de la seva energia es transforma en energia cinètica ($KE/V = \rho v^2/2$, on v és la velocitat en la direcció perpendicular al tub). Pel principi de conservació de l'energia, $\rho v^2/2 = \rho gz$, i $v = (2gz)^{1/2}$, d'aquesta manera, la velocitat, i per tant la distància que recorre un fluid, no depenen de la mida del forat i són només funció de l'altura de la columna (z). La distància que el raig d'aigua assoleix pot ser anticipada utilitzant una simple justificació que pot resultar familiar als estudiants amb una formació en mecànica. El fluid arribarà a terra després d'un temps igual a $t = (2H/g)^{1/2}$ segons després de sortir del forat, on H és l'alçada del forat de sortida sobre la base i arribarà a una distància $L = vt$, on $v = (2gz)^{1/2}$. A la pràctica, la distància mesurada és menor que la distància teòrica degut a la fricció amb les parets del forat i amb l'aire a través del qual el fluid viatja abans d'arribar a terra.

2.4. MANÒMETRE I TUBS D'EQUILIBRI

(Figura 2.4)

Materials

- Manòmetre en forma d'U (construït utilitzant materials que es poden trobar en qualsevol ferreteria: tub de plàstic transparent tallat en tres segments i dos colzes per a connectar les peces de tub)
- Aigua
- Oli
- Tub d'equilibri #1: braços de diferents formes (sciencekit.com)
- Tub d'equilibri #2: braços de diferents diàmetres (sciencekit.com)

Instruccions per als Estudiants

Abans de realitzar aquestes activitats els estudiants han de repassar la Segona Llei de Newton que, quan s'aplica a fluids, implica que en absència d'altres forces els fluids es desplacen des de les altes vers les baixes pressions.

Part A

1. Predigieu què passarà quan s'ompli d'aigua el manòmetre en forma d'U. Quina alçada tindrà l'aigua en cada braç? Per què?

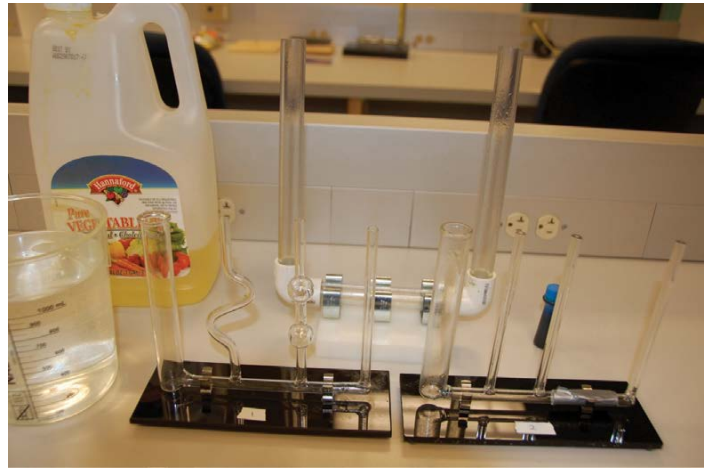


Figura 2.4. Materials utilitzats en l'Activitat 2.4. El manòmetre en forma d'U (Part A) es veu al fons. En la Part davantera es veu el tub d'equilibri amb braços de diferents formes (esquerra) i el tub de equilibri amb braços de diferents diàmetres (dreta).

Dibuixeu la secció transversal del manòmetre, indicant la vostra predicció i expliqueu els vostres raonaments. (Pista: Si l'aigua està en repòs [no hi ha flux al llarg del tub], què podeu dir sobre les diferències de pressió a la base de cada braç?). Ompliu el manòmetre fins que es pugui veure clarament el nivell d'aigua en cada braç i compareu el que observeu amb la vostra predicció.

2. Què creieu que passaria amb el nivell de fluid a cada braç si afegíssiu oli (el suficient per a formar una capa d'uns 5 cm) a un dels braços? Per què? Si sospiteu un canvi, dibuixeu un diagrama qualitatiu del nou equilibri.
3. Afegiu-hi l'oli. Coincideixen les observacions amb la vostra predicció? Expliqueu-ho.

Part B

1. Estudieu el tub d'equilibri amb braços de diferents formes. Feu una predicció de quin serà el nivell d'aigua en cada braç (en relació als altres braços) quan l'aparell s'ompli parcialment d'aigua. Dibuixeu un diagrama qualitatiu de la vostra predicció i expliqueu el vostre raonament.
2. Comproveu la vostra predicció.
3. Estan d'acord les vostres observacions i prediccions? Si no fos així, com modificariu les vostres explicacions?

Part C

1. Estudieu el tub d'equilibri amb braços de diferents diàmetres. Indiqueu quin serà el nivell d'aigua en cada braç (en relació als altres braços) quan l'aparell s'ompli d'aigua. Dibuixar un diagrama de la vostra predicció i expliqueu el vostre raonament.

2. Comproveu la vostra predicció.
3. Estan d'acord les vostres observacions i prediccions? Si no fos així, com modificaríeu les vostres explicacions?

Explicació

Part A

Un manòmetre és una eina que mesura la pressió a partir del nivell d'un fluid. La versió més senzilla de manòmetre és un tub en forma d'U ple de fluid. El nivell d'aigua en cada braç del manòmetre ve determinat per la pressió que exerceix sobre la base de cada braç la suma de la columna d'aire i la columna d'aigua. Quan un braç del manòmetre s'omple, l'aigua flueix cap a l'altre braç fins que el sistema assoleix l'equilibri i deixa d'haver cap flux dins del manòmetre, cosa que implica que les pressions sobre la base d'ambdós braços són iguals ($P_1 = P_2$ i $P_1 = g\rho_{\text{aigua}}z_1 + P_{\text{aire}}$; $P_2 = g\rho_{\text{aigua}}z_2 + P_{\text{aire}}$, de manera que $z_1 = z_2$). L'altura de la columna d'aigua en cada braç ha de ser la mateixa. Quan s'afegeix oli sobre un dels braços, el manòmetre assoleix un nou equilibri: $P_1 = P_2$ on $P_1 = g(\rho_{\text{aigua}}z_{\text{aigua1}} + \rho_{\text{oli}}z_{\text{oli}})$ i $P_2 = g\rho_{\text{aigua}}z_{\text{aigua2}}$. Com $\rho_{\text{oli}} < \rho_{\text{aigua}}$, la columna de fluid en el braç amb l'aigua i l'oli ha de ser més alta que en el braç amb només aigua (la pressió de l'aire és la mateixa en ambdós braços).

Aquesta activitat pot ser utilitzada com analogia del mètode de l'alçada dinàmica per a calcular pendents de la superfície del mar i per a examinar la relació entre la densitat mitjana en la vertical i l'alçada de la columna d'aigua. La base del manòmetre en forma d'U és equivalent a la capa de referència de no moviment. A qualsevol alçada per sobre de la transició oli-aigua, existeix una diferència de pressió entre els dos braços de l'aparell (per tant, si connectéssim els braços sobre la base, el fluid es desplaçaria des del braç que conté aigua i oli cap al que només conté aigua fins arribar a un nou equilibri).

Part B

La forma o àrea d'una secció transversal dels braços no té cap efecte sobre el nivell d'aigua. L'altura de la columna d'aigua (o qualsevol altre fluid) en cada braç és funció de la pressió i de la densitat del fluid ($z = P/\rho g$). D'aquesta manera, després d'introduir el fluid en la columna i deixar que el sistema assoleixi el seu estat d'equilibri, la pressió a la base de cada braç és la mateixa (no hi ha moviment) i l'altura serà la mateixa per a cada braç, independentment de la seva forma. Aquesta observació explica el fet que la pressió sigui la mateixa a una mateixa profunditat tant si és una piscina com si és un llac (suposant que la pressió atmosfèrica és igual sobre la piscina i el llac).

Part C

El mateix principi s'aplica al tub d'equilibri amb braços amb diferent diàmetres. L'alçada de la columna d'aigua serà la mateixa per a cada braç. L'única excepció d'aquest resultat és per al braç més estret del tub d'equilibri número 2, per al qual una segona força esdevé important: la tensió superficial a la vora del vidre, la qual fa pujar el nivell de l'aigua (aquesta observació pot utilitzar-se com "trencaclosques" que podria portar a una altra classe centrada en els processos capil·lars i la tensió superficial).

2.5. GLOBUS ENCONGITS (Figura 2.5)

Materials

- Contenidor de buit dels que s'utilitzen per a preservar aliments (es pot trobar en botigues d'electrodomèstics i parament de la llar)
- Instrument a pressió (ampolla de refresc de 2 litres a la què hi muntem una bomba de mà de les que s'utilitzen per mantenir els refrescos carbonatats)
- Dos globus de la mateixa mida (un ple d'aire i l'altre ple d'aigua)
- Llaminadures (del tipus núvols o "marshmallows") o qualsevol altre producte que es vulgui provar (per exemple, mandarina, tomàquet tipus cherry)

Instruccions per als Estudiants

1. Predigueu quin efecte tindria reduir la pressió exercida sobre cada globus.
2. Col·loqueu el globus ple d'aire en el recipient de buit i extraieu l'aire del recipient mitjançant la bomba manual. Què li passa al globus? Obriu la vàlvula i deixeu entrar l'aire en el recipient. Què li passa ara al globus?
3. Repetiu l'experiment amb el globus ple d'aigua. L'efecte de la pressió és diferent en un cas i en l'altre? Per què?
4. D'acord amb les vostres observacions, què penseu que li passarà a una llaminadura com el núvol (o a qualsevol objecte amb el que vulgueu provar) quan feu el buit en el recipient?
5. Comproveu les vostres prediccions.
6. Obriu la vàlvula i observeu la llaminadura. Expliqueu les vostres observacions.
7. Exploreu el segon instrument a pressió. Compareu les vostres observacions del comportament del globus ple d'aire en l'instrument a pressió amb el que succeeix amb la màquina de buit. Quina és la diferència entre aquest aparell i la cambra de buit?

Un repte:

1. Com introduiríeu un globus ple d'aire dins de l'ampolla de refresc?
2. Com utilitzaríeu aquest aparell per a demostrar que l'aire pesa?

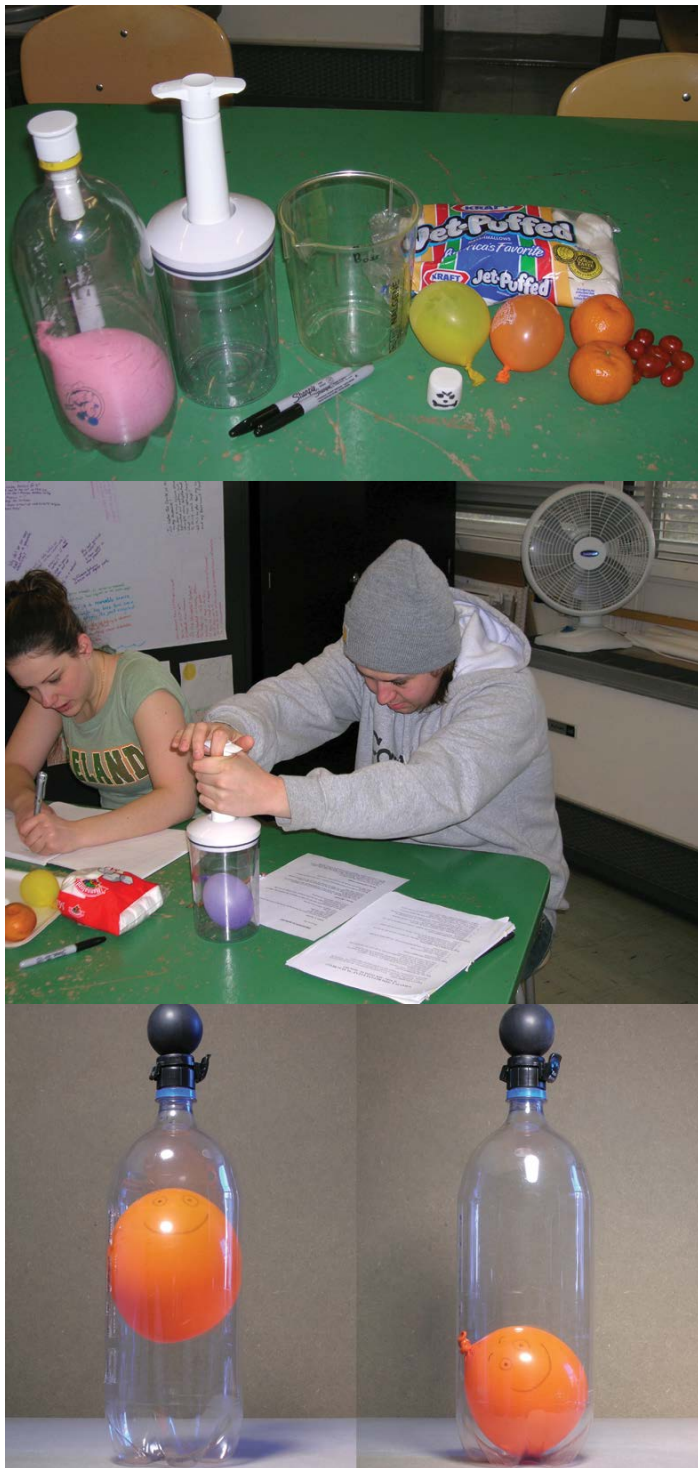


Figura 2.5. (superior) Materials per a l'Activitat 2.5. (centre) Comprovant un recipient de buit ple d'aire. (inferior) Un globus ple d'aire a pressió atmosfèrica (esquerra) i després de treure l'aire cap a l'ampolla (pressió augmentada; dreta).

Explicació

Els objectes que contenen cavitats plenes d'aire s'expandeixen quan la pressió al seu voltant disminueix, com en el cas en que traïem l'aire d'un recipient de buit (Figura 2.5, imatge superior esquerra). Com l'aigua és, en bona part, un fluid incompressible, la mida del globus amb aigua serà quasi igual en condicions de baixa i d'alta pressió atmosfèrica. Un tomàquet tipus cherry es comportarà de manera similar al globus d'aigua donat que no conté bombolles d'aire. Mandarines o llimonades del tipus núvol, per contra, contenen bombolles d'aire i per tant s'expandeixen en el buit. Quan la vàlvula s'obre, l'aire entra de nou en el recipient i augmenta la pressió (fins a assolir la pressió atmosfèrica), i mandarina i llimonada s'encongeixen, encara que no necessàriament retornen a la seva mida original donat que l'estructura dels materials es pot haver modificat durant el procés (per exemple, mitjançant la fusió de cavitats dins del núvol).

Quan pressuritzem l'ampolla de refresc introduint-hi aire, la pressió al voltant del globus augmenta i per això s'encongeix (de fet, augmenta la seva pressió interior; compareu les imatges inferiors dreta i esquerra de la Figura 2.5). En obrir la vàlvula, el globus ple d'aire recupera la seva mida original.

Repte: com introduir un globus ple d'aire dins de l'ampolla. Introduïu un globus desinflat dins l'ampolla i fixeu la boca del globus al voltant del forat de l'ampolla tot deixant-hi un petit espai per on hi introduïreu una palleta (entre el globus i la paret de l'ampolla). En bufar per a inflar el globus, l'aire pot escapar de l'ampolla a través de la palleta, i així permet que el globus s'expandeixi. Feu un petit nus i empenyeu el globus cap a l'interior de la botella. Aquest "aparell" pot ser utilitzat per a demostrar que l'aire té una massa que no és menyspreable. Primer es pesa l'ampolla a pressió atmosfèrica, a continuació s'hi bombeja aire dins i es pesa de nou l'ampolla (la massa es calcula dividint el pes per g, cosa que es fa automàticament mitjançant processadors a l'interior de les balances).

2.6. COMPRESSIBILITAT DELS GASOS (Figura 2.6)

Materials

- Aparell de compressió de gasos (Arbor Scientific, o una versió casolana que es pot construir fàcilment o una xeringa de 60-ml té una secció transversal d' $1 \text{ in}^2 = 6,5 \text{ cm}^2$)
- Pesos de masses conegudes (els autors utilitzen pesos de 2,5 lliures [1,14 kg])

Instruccions per als Estudiants

1. Apunteu el volum d'aire dins de la xeringa sota condicions de pressió atmosfèrica.

2. Quin penseu que serà el volum d'aire dins de la xeringa quan hi poseu un pes de 2,5 lliures (1,14 kg)? Quina és la pressió dins de la xeringa?
3. Què li passarà al volum d'aire de la xeringa si continueu afegint-hi pes? Quin serà el percentatge de canvi quan haureu col·locat 15 lliures (6,8 kg) sobre la xeringa?
4. Comproveu les vostres prediccions. Col·loqueu un pes sobre la xeringa (2,5 lliures) i apunteu el volum d'aire. Col·loqueu pesos addicionals (fins un total de 5, 10 i 15 lliures) i apunteu els canvis de volum d'aire amb cada addició. Què observeu?
5. Dibuixeu una gràfica del pes afegit respecte al volum d'aire de la xeringa. Com depèn el volum en relació a la massa afegida? Està d'acord amb les vostres prediccions? Sentiu un canvi en temperatura en comprimir l'aire? Hauríeu d'esperar-ne?
6. En quin percentatge ha augmentat la pressió dins de la xeringa en comparació amb la pressió atmosfèrica (14,7 psi; la pressió aplicada per una massa de 14,7 lliures (6,67 kg) sobre una polzada quadrada [6,5 cm²] de superfície terrestre), quan tots els pesos s'han posat sobre la xeringa (15 lliures [6,8 kg]; tenint en compte que la secció transversal de la xeringa té una àrea d'aproximadament una polzada quadrada [6,5 cm²])? Quin ha estat el percentatge de canvi del volum de la xeringa quan s'hi ha afegit el pes de 15 lliures (suposant que no hi hagués hagut cap canvi de temperatura)?
7. Utilitzant les vostres dades, com esperaríeu que el volum dels pulmons d'un bussejador canviï quan es submergeixi a 10 metres? (La pressió augmenta una atmosfera cada 10 metres d'aigua).

Nota: És complicat trobar pesos del sistema mètric internacional apropiats per a aquest experiment. Aquesta activitat pot proporcionar una oportunitat per a practicar la conversió d'unitats⁷.

Explicació

En aquesta activitat, en condicions de pressió atmosfèrica normal el volum de la xeringa és de 46 ml. Per a un gas ideal a temperatura constant, T , el volum, V , de gas varia de manera inversa a la pressió aplicada sobre el gas (Llei de Boyle: en condicions de temperatura constant, el producte de la pressió, P , i el volum d'un gas, V , és constant $\rightarrow PV = \text{constant}$ i $P = \text{constant}/V$). Així, a l'afegir els pesos (augment de pressió) es reduirà el volum d'aire dins de la xeringa. A l'afegir 15 lliures de massa a la xeringa, es duplica la pressió (comparada amb la pressió atmosfèrica normal) i el volum d'aire en la xeringa es redueix a la meitat, com s'esperaria per la Llei de Boyle. De



Figura 2.6. (superior) Materials per a l'Activitat 2.6. (inferior) L'instrument quan s'hi han posat al damunt 15 lliures (6,8 kg).

manera semblant, quan un bussejador es submergeix a 10 metres de profunditat experimenta una pressió doble de la que hi ha en la superfície. Com a resultat, el volum dels seus pulmons es redueix a la meitat. Malgrat el fet que esperem un augment de la temperatura del gas en la xeringa, els intercanvis de temperatura amb l'ambient circumdant donen com a resultat petits canvis gairebé imperceptibles; de manera que suposar que la temperatura roman constant és vàlid. Aquesta activitat demostra adequadament que l'atmosfera té pes, malgrat no ens n'adonem en la nostra vida quotidiana.

ACTIVITAT 2.7

Per a demostrar el principi de Bernoulli, proporcionem als estudiants una bossa de plàstic allargada (Bossa de Bernoulli; Arbor Scientific; Figura 2.7). Demanem a un estudiant que

⁷ N. del T.: Aquesta Nota ha estat traduïda per fidelitat al text original, però manca de sentit en català.



Figura 2.7. (superior) Un estudiant intentant omplir la bossa mentre la té enganxada als seus llavis (inferior); quan es manté la bossa completament oberta i es bufa des d'una distància cap a l'obertura, la bossa pot omplir-se amb una única bufada.

en subjecti l'extrem obert i a un altre que en subjecti l'extrem tancat de tal forma que la bossa romanguí horitzontal, paral·lela al terra. Després demanem els estudiants que intentin omplir la bossa bufant. La major part dels estudiants tenen tendència de posar-se la bossa contra els llavis i bufar repetidament, per la qual cosa els cal més d'una bufada per a omplir-la (Figura 2.7, imatge superior). Una tècnica molt més eficient és la de bufar cap a l'obertura de la bossa des d'una distància (Figura 2.7, imatge inferior). Això crea una baixa pressió prop de l'obertura, en la zona en la què la velocitat és més gran. Aquesta zona local de baixa pressió introdueix aire de l'atmosfera dels voltants (on la pressió és més gran) i tot l'aire flueix ràpidament dins de la bossa. La bossa no es elàstica i proporciona poca resistència al corrent d'aire (mentre no estigui plena).

REFERÈNCIES I ALTRES LECTURES RECOMENADES

- Denny, M.W. 1993. Capítols 3 i 4 d'*Air and Water*, Princeton University Press, Princeton, NJ.
- Faber, T.E. 1995. Capítol 1 de *Fluid Dynamics for Physicists*, Cambridge University Press.
- Hewitt, P.G. 2008. Capítol 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. Capítol 3 i 4 de *Life in Moving Fluids*. Princeton University Press, Princeton, NJ, 484 pp.

ALTRES RECURSOS

Sorbian, Z. 1996. *Hands-On Meteorology: Stories, Theories, and Simple Experiments*. American Meteorological Society, Washington, DC. Una col·lecció d'experiments interactius dissenyats per a conceptes de meteorologia. El Capítol 3 es centra en la pressió. Amés d'experiments, el llibre conté narracions històriques, referències a descobriments importants i diverses històries sobre científics famosos i infames.

Una pel·lícula de YouTube que conté una sèrie de demostracions sobre el principi de Bernoulli (Julius Sumner Miller — Physics — Bernoulli):

Part 1: <http://www.youtube.com/watch?v=KCcZyW-6-5o>

Part 2: <http://www.youtube.com/watch?v=wwuffpiYxQU&feature=related>

CASOS DISCREPANTS: TOT DESPERTANT LA CURIOSITAT DELS ESTUDIANTS

Per a atraure l'atenció dels estudiants, provocar-hi la reflexió i incitar-los a la investigació, els educadors sovint utilitzen el mètode de *casos discrepants* (Hassard, 2005; Chiapetta and Koballa, 2006). Aquests casos representen sorpreses que porten a l'estudiant a demanar-se "Què està passant?" Un exemple de cas discrepant és l'Activitat 2.2. Els estudiants senten que la bola més petita és "més pesada", però després de mesurar les masses de cada bola es sorprenen al descobrir que la bola gran és la més pesada. Aquest descobriment els fa reflexionar sobre els conceptes de pressió i pes, a la vegada que els ajuda a diferenciar entre força i pressió (força per unitat d'àrea). Un compendi de casos discrepants relacionats amb diversos conceptes científics es troba disponible en algunes pàgines a Internet i en llibres de text sobre ciència. Per exemple, Liem (1987) ha compilat més de 400 casos discrepants que utilitzen materials senzills (amb diagrames, preguntes i explicacions) per a l'ensenyament de les ciències des de l'escola primària fins a la universitat.

Un cas discrepant efectiu ha de requerir molt poca explicació. Per exemple, al començament d'una classe l'instructor pot omplir en silenci una ampolla de 2 litres de refresc transparent buida fins a un quart de la seva capacitat amb aigua molt calenta, moure l'aigua uns segons fins que l'ampolla sencera s'escalfi, extreure l'aigua de l'ampolla, tapar bé l'ampolla i després col·locar l'ampolla al davant dels estudiants. Mentre l'instructor passa llista, l'ampolla es comprimeix cap endins en diversos punts. Gairebé sempre, els estudiants es senten intrigats i comencen a preguntar sobre l'ampolla i l'aigua. L'instructor pot dinamitzar el procés de preguntes i hipòtesis dels estudiants per a explicar el col·lapse de l'ampolla, dirigint la discussió cap a la Llei dels Gasos Ideals i la relació entre temperatura, pressió i volum.

Al presentar als estudiants un trencaclosques en forma d'un esdeveniment inesperat, s'aconsegueix desafiar les seves idees preconcebudes, tant si es basen en el coneixement com en la intuïció, i es fa saltar la seva curiositat i augmentar la seva motivació per a trobar una solució. A través del procés d'investigació, que porta al descobriment, els estudiants

poden arribar a assolir nous nivells d'enteniment cognitiu i desenvolupar una millor capacitat de resolució de problemes (Piaget, 1971). Els casos discrepants no tenen per què ser activitats pràctiques; poden ser introduïdes mitjançant pel·lícules, descripció d'esdeveniments o observacions de camp (per exemple, el magnetisme invers en roques) que representen paradoxes intrigants. Els casos discrepants es poden utilitzar per a assolir objectius pedagògics específics: obtenir l'atenció dels estudiants a l'inici d'una lliçó, provocar preguntes dels estudiants, identificar i resoldre conceptes erronis dels estudiants, generar una reflexió contínua sobre un procés o un problema en acabar una classe, comprovar si els estudiants poden aplicar el que han après a processos similars però inesperats o, fins i tot, servir com a part de l'avaluació formal de la lliçó. Quan es presenta un cas discrepant és important proporcionar suficient temps als estudiants per a què puguin pensar, discutir i tractar d'explicar el fenomen.

REFERÈNCIES

- Chiapetta, 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.

CAPÍTOL 3. FORÇA DE FLOTACIÓ

OBJECTIU DE LES ACTIVITATS

Aquest conjunt d'activitats va ser pensat per a ajudar els estudiants a entendre millor els principis subjacents a la força de flotació o flotabilitat. La majoria dels estudiants han sentit parlar del terme *flotació* i l'han experimentat quan han entrat en el mar, una piscina o una banyera. Alguns estudiants poden, fins i tot, enunciar el Principi d'Arquímedes. Malgrat tot, la nostra experiència ens ha demostrat que els estudiants sovint se senten incòmodes quan se'ls demanen qüestions relacionades amb la flotabilitat. Una investigació realitzada per la Universitat de Washington va trobar que a molts estudiants graduats en ciència i enginyeria els faltava una comprensió de la flotabilitat, fins i tot després d'assistir a classes d'introducció a la física en les que se'ls ensenyava hidrostàtica (utilitzant els mitjançant habituals d'ensenyament), i no eren capaços de predir ni d'explicar el comportament de flotació o d'enfonsament de diferents objectes (Loverude *et al.*, 2003).

Aquí explicarem la flotació als nostres alumnes després d'haver fet les pràctiques sobre la densitat (Capítol 1) i la pressió (Capítol 2). En la lliçó sobre la densitat, els alumnes examinaven comportaments de flotació i d'enfonsament de diferents objectes en funció de les seves densitats, però sense investigar els principis subjacents que governen aquests comportaments. Les activitats que segueixen permeten als estudiants aplicar els coneixements guanyats en les dues lliçons prèvies per a explorar una mica més enllà els factors que governen la flotació i l'enfonsament.

CONTEXT TEÒRIC

Quan un objecte se submergeix en un fluid, el fluid és desplaçat per a "fer lloc" a l'objecte. Per exemple, quan s'entra en una banyera, el nivell de l'aigua puja. La quantitat d'aigua que un objecte desplaça quan és completament submergit és igual al seu propi volum (recordar, per exemple, les mesures del volum de roques en l'Activitat 1.3). L'objecte submergit està sotmès a dues forces: (1) una força cap a baix, **la força de gravetat**, que creix amb la massa del cos, i (2) una força cap a dalt, **la força de flotació**, que s'incrementa amb la densitat del fluid. Quan la força de la gravetat, cap a baix, sobre un objecte és més gran que la força de flotació, cap a dalt, l'objecte s'enfonsa; en cas contrari, l'objecte flota.

La força de flotació resulta d'un desequilibri en les pressions exercides pel fluid sobre l'objecte. Pel fet que la pressió augmenta amb la profunditat, la base de l'objecte submergit experimenta una pressió més gran que la que experimenta la seva part superior; per tant, l'objecte experimenta una força cap amunt. La força cap a dalt que en resulta és igual al pes del fluid desallotjat (Principi d'Arquímedes). Si el pes d'un objecte (en l'aire) és més gran que el pes del fluid desallotjat, s'enfonsarà; si és menor, surarà.

En termes matemàtics, les dues forces oposades poden ser escrites (fent servir la Segona Llei de Newton) com a

$$F_{\text{flotació}} = m_{\text{fluid}} g = \rho_{\text{fluid}} V_{\text{desplaçat}} g$$
$$\text{i}$$
$$F_{\text{gravetat}} = m_{\text{objecte}} g = \rho_{\text{objecte}} V_{\text{objecte}} g.$$

On m_{fluid} i m_{objecte} són les masses del fluid desplaçat i de l'objecte, respectivament; g és la constant d'acceleració de la gravetat; ρ_{fluid} i ρ_{objecte} són les densitats del fluid i de l'objecte, respectivament; i $V_{\text{desplaçat}}$ i V_{objecte} són els volums de l'aigua desplaçada i de l'objecte, respectivament. Quan l'objecte està completament submergit, $V_{\text{desplaçat}} = V_{\text{objecte}}$. Per la definició de densitat, $m = \rho V$. La diferència entre les dues forces determina si el cos s'enfonsa, sura o es manté flotant neutralment.

$$\Delta F = F_{\text{gravetat}} - F_{\text{flotació}} = V_{\text{objecte}} g (\rho_{\text{objecte}} - \rho_{\text{fluid}})$$

Quan $\Delta F > 0$, l'objecte se enfonsa. Quan $\Delta F < 0$, l'objecte flota. i quan $\Delta F = 0$, l'objecte roman a la seva profunditat original (és neutralment flotant; és a dir, $\rho_{\text{objecte}} = \rho_{\text{fluid}}$). Així, la clau per a mantenir un vaixell a flor d'aigua, ja sigui de fusta, acer o ciment, és fer-lo que desplaci un volum d'aigua que pesi més que el propi vaixell.

Aplicacions en Oceanografia

La flotació és una de les quatre forces dominants en la dinàmica oceànica (les altres tres són la gravetat, esforç del vent i la fricció), i entendre la força de flotació és clau per a comprendre la circulació induïda per la densitat. La circulació termohalina oceànica a les grans escales, per exemple, s'atribueix a diferències latitudinals en les forces de flotació, que alhora són degudes a la diferència de temperatura de l'aigua entre les altes i les baixes latituds. Refredament i evaporació fan que l'aigua

marina sigui més densa, de manera que l'aigua de la superfície sotmesa a aquestes condicions es torna menys flotant, i tendeix a enfonsar-se. L'escalfament i la pluja, al contrari, disminueixen la densitat de l'aigua marina, de manera que les aigües superficials sotmeses a aquestes condicions es tornen més flotants, i tendeixen a pujar fins a la superfície oceànica.

L'altura a la què un objecte flota en un líquid (per exemple, aigua marina o magma) depèn del balanç entre les forces gravitacional i de flotació a les què l'objecte està sotmès. Les plaques litosfèriques de la Terra, per exemple, floten sobre l'astenosfera (el mantell superior) en un nivell d'equilibri (un equilibri de la flotació anomenat "isostàsia"). Quan l'equilibri flotant es perd, l'objecte s'enfonsa o ascendeix fins que un nou equilibri de flotació s'assoleix. Aquest procés s'anomena "anivellació isostàtica". Els efectes de l'anivellació isostàtica es poden veure prop de les dorsals centrals oceàniques on la recentment formada litosfera es refreda i afegeix pes a la dorsal que està dessota (la força de gravetat augmenta), i també sobre les plaques continentals que hagin experimentat recentment la fusió de grans glaceres (la força de gravetat ha disminuït). Canvis en l'equilibri flotant de les plaques litosfèriques causen una pujada o baixada del nivell del mar relatiu a la costa associada amb la placa.

Molts organismes marins han d'afrontar el repte de regular la seva flotabilitat. Proteïnes, teixits connectius, esquelets i closques tenen densitats més grans que la de l'aigua de mar. Els organismes amb altes densitats corporals poden enfonsar-se per sota de les regions on el seu creixement és òptim (per exemple, enfonsament del fitoplàncton per dessota de la zona fòtica), amb la qual cosa s'exposen a canvis de pressió, llum i temperatura. En resposta a aquests reptes, els organismes marins han desenvolupat diferents estratègies per a controlar la seva flotabilitat. Entre altres opcions, hi trobem intercanvis selectius dels ions més pesats per d'altres més lleugers, canvis en la capacitat d'emmagatzemar greixos i lípids, o l'ús de cavitats plenes de gas.

A més, la flotació és un principi fonamental en el disseny de vaixells, submarins i vehicles autònoms subaquàtics (AUVs en anglès), els quals constitueixen (sobretot aquests últims) l'avantguarda en tecnologia i exploració oceànica. Lliscadors autònoms i boies que porten múltiples sensors (per exemple, de temperatura, salinitat o òptics) es mouen amunt i avall de la columna d'aigua modificant llur volum i, d'aquesta manera, la força de

flotació que actua sobre ells. El principi d'operació és l'intercanvi de fluid entre un tanc incompressible intern i una bufeta exterior inflable. Un exemple de boia que usa aquesta manera de regular la seva flotabilitat, es pot trobar a: http://www.argo.ucsd.edu/FrHow_Argo_floats.html.

DESCRIPCIÓ DE LES ACTIVITATS

Comencem la lliçó amb una curta introducció o revisió de les forces que actuen sobre un objecte submergit, a partir de les quals els estudiants s'involucren en les activitats que segueixen, treballant en petits grups. Dues de les activitats (3.1 i 3.2) són representacions quantitatives del Principi d'Arquímedes, que permeten als estudiants explorar les relacions entre la massa d'un objecte, la massa del volum que desplaça (que es troba en proporció amb la força de flotació) i la seva tendència a enfonsar-se o surar. Demanem als alumnes que portin a terme ambdues activitats (l'ordre no importa). En fer això, intentem remarcar els principis de la flotació, permetre que els alumnes practiquin la transferència de coneixements apresos d'una situació a l'altra, i comprovar el seu nivell de comprensió. Les altres dues activitats (3.3 i 3.4) són el que anomenem d'"indagació oberta": no es proporcionen totes les instruccions als alumnes i s'espera que sintetitzin i apliquin el coneixement après en les lliçons prèvies sobre densitat i pressió (Capítols 1 i 2 d'aquest document) per a explicar un fenomen donat i construir un flotador. Durant la revisió i sessió de discussió al final de la lliçó, es discuteixen algunes aplicacions en el medi ambient aquàtic. Les activitats s'organitzen en pràctiques tal com es descriu en el Capítol 1.

ACTIVITAT 3.1. S.O.S. (Figura 3.1)

Materials

- Caixa d'Arquímedes (una caixa amb marques graduades horitzontals a cada centímetre)
- Dinamòmetre
- Pesos de 5 g i de 10 g
- Contenidor amb aigua
- Suport d'anella
- Regle
- Balança

Nota: La caixa especial, dinamòmetre i els pesos es poden obtenir a sciencekit.com.

Instruccions per als Estudiants

1. Supposeu que la caixa és un vaixell de càrrega. Com a membres de la tripulació, necessiteu determinar el màxim pes de càrrega (en grams) que podem carregar en el vaixell sense enfonsar-lo. En el punt de càrrega màxima, la caixa (el vostre vaixell) estarà completament - però amb prou feines- enfonsat. És a dir, la vora superior es troba arran de la superfície de l'aigua. Basant-vos en el que ja coneixeu sobre la flotabilitat i el Principi d'Arquímedes, com determinaríeu la màxima quantitat de càrrega? Expliqueu el vostre raonament (Pista: Penseu en el pes d'un objecte [completament immers] en l'aire i en l'aigua i en el volum que desplaça. Feu servir el dinamòmetre i el regle per a obtenir qualsevol mesura que pugui ajudar-vos en la vostra predicció. Per a utilitzar el dinamòmetre, fixeiu-lo en el suport d'anella i feu servir el ganxo per a penjar-hi la caixa.
2. Afegiu la quantitat de càrrega màxima que heu predit dins de la vostra caixa (vaixell), tanqueu la tapa i comproveu la validesa de la vostra predicció col·locant el vaixell carregat en el contenidor d'aigua i mireu si està completament immers però sense enfonsar-se.
3. Si la vostra predicció ha estat correcta, quina és la massa del vaixell més la càrrega en l'aire? Quina és la massa del vaixell més la càrrega en l'aigua? Quin és el volum i massa desplaçats?
4. Si la vostra predicció no ha estat correcta (és a dir, si el vostre vaixell s'ha enfonsat o sura per sobre de la superfície de l'aigua), corregiu la vostra predicció i comproveu-la de nou.
5. Una vegada trobeu el màxim pes de càrrega permesa, afegiu 25 g addicionals a la vostra càrrega i col·loqueu la caixa en l'aigua. Què li passa al vostre vaixell ara? Per què?

6. Quin és el nou pes del vaixell més la càrrega en l'aire? Predigueu el pes del vaixell més la càrrega en l'aigua. Feu servir el dinamòmetre per a mesurar el pes del vaixell més la càrrega en l'aigua. Està d'acord la vostra mesura amb la vostra predicció?
7. Quin és el pes de l'aigua desplaçada? Com es compara amb el pes del vaixell més la càrrega en l'aire i el pes del vaixell més la càrrega en l'aigua?
8. Podeu ara explicar per què un objecte submergit en aigua "es nota" menys pesat?

Nota pels instructors: Si els vostres alumnes tenen dificultats per a predir el valor de càrrega màxima amb el Principi d'Arquímedes, se'ls ha de suggerir que intentin realitzar el problema seguint les següents etapes:

1. Mesurar i calcular la massa i el volum de la caixa sense cap pes afegit. Afegiu-hi pesos en increments de 25 g. Després de cada pes afegit, mesurar:
 - a. El pes de la caixa fora de l'aigua (fent servir el dinamòmetre)
 - b. El pes de la caixa dins de l'aigua
 - c. L'altura de la caixa que està submergida en aigua (cada marca a la caixa és 1 cm)Per a cada increment de pes, calcular el volum de l'aigua desplaçada per la caixa.
2. Dibuixar el valor de l'altura de caixa submergida en funció del pes de la caixa més els pesos afegits. Es detecta alguna relació entre la massa de caixa més els pesos (en l'aire) i el volum desplaçat? Quin és el pes de la caixa en aigua en cada cas? Una vegada els alumnes han completat aquestes etapes, han de fer els Passos 3-4 indicats a dalt.



Figura 3.1. Materials per a l'Activitat 3.1 en l'aire (Esquerra, amb dos pesos reposant sobre la taula) i en l'aigua (dreta).

Explicació

La caixa que utilitzem en aquesta activitat té una base de $5\text{ cm} \times 5\text{ cm} = 25\text{ cm}^2$ i una alçada de 4 cm. Així, el seu volum és de 100 cm^3 (incloent-hi la seva tapa). La caixa buida pesa 25 g; així, la seva densitat és de $0,25\text{ g/cm}^3$. Quan la caixa està completament submergida, desplaça el seu volum (100 cm^3); i el pes de l'aigua desplaçada és 100 g (1 cm^3 pesa aproximadament 1 g). Segons el Principi d'Arquímedes, quan la caixa no està ni enfonsant-se ni ascendint, $F_{\text{flotació}} = F_{\text{gravetat}}$, on $F_{\text{flotació}} = \rho_{\text{aigua}} V_{\text{desplaçat}} g$. Com en aquest cas ρ_{aigua} i g són constants, aleshores $F_{\text{flotació}}$ és proporcional al volum desplaçat. La massa màxima que pot ser afegida a la caixa, sense enfonsar-la, és 75 g ($m_{\text{caixa}} + m_{\text{pesos}} = 25\text{ g} + 75\text{ g} = 100\text{ g}$). Quan la caixa està a punt de desaparèixer sota l'aigua, F_{gravetat} és igual a $F_{\text{flotació}}$ (recordem que $F_{\text{gravetat}} = mg$).

Quan els estudiants realitzen aquesta activitat per etapes, afegint increments de massa de 25 g, tenen la possibilitat d'examinar d'aprop la relació entre la massa d'un objecte en l'aire, el desplaçament d'aigua (profunditat d'immersió) i la massa aparent d'un objecte en l'aigua, com mostra la següent taula:

Massa afegida (g)	Pes total (caixa + pesos) en l'aire (g)	Pes total (caixa + pesos) en l'aigua (g)	Profunditat d'immersió (cm)	Volum desplaçat (cm ³)
0	25	0	1	25
25	50	0	2	50
50	75	0	3	75
75	100	0	4	100

Pel Principi d'Arquímedes, la caixa s'enfonsa quan el seu pes sobrepassa el de l'aigua desplaçada. Així, quan s'afegeixen els 25 g addicionals que fan que la massa total de la caixa, més els pesos en aire, arribi als 125 g, el "vaixell" s'enfonsa ja que el pes del vaixell és més gran que la massa del volum desplaçat (100 g). El pes de la caixa més els pesos en l'aigua és 25 g, que és proporcional a la diferència entre les forces gravitatòria i de flotació.

Com g és constant, considerem només les masses de la caixa i de l'aigua desplaçada, però insistirem en el fet que massa i pes no s'han de confondre ($\text{pes} = mg$). És important també discutir explícitament amb els estudiants la diferència entre el cas d'un objecte flotant i el cas d'un objecte submergit. En ambdós casos, la magnitud de la força de flotació és igual al pes de l'aigua desplaçada. Tot i així, per a un objecte que sura, el volum que és desplaçat (que provoca la força de flotació) es determina dividint el **pes** de l'objecte per la densitat del fluid; per a un objecte completament submergit, el volum desplaçat és igual al **volum** de l'objecte (la densitat no hi juga cap paper).

ACTIVITAT 3.2. PILOTA D'ARQUÍMEDES

(Figura 3.2)

Materials

- Pilota d'Arquímedes (de sciencekit.com)
- Xeringa de 60 ml
- Troç de canonada
- Balança
- Peu de rei
- Recipient amb aigua
- Contenidor amb una solució de sucre, etiquetada com a "líquid desconegut"

Instruccions per als Estudiants

1. Imagineu que la pilota de plàstic és un submarí. Voleu mantenir-lo sota l'aigua de manera que el tap estigui lleugerament por sobre de l'aigua (això és, que el submarí suri neutralment). Calculeu quanta aigua de llast es necessita afegir al submarí per a que suri neutralment (Pista: si no esteu segurs de per on començar, dibuixeu el submarí i les forces que actuen sobre ell quan està submergit en l'aigua).
2. Comproveu la vostra predicció (càlcul) col·locant la pilota en un recipient d'aigua i omplint-lo amb aigua dolça amb la xeringa. Les marques sobre la xeringa indicaran quanta aigua s'està afegint a la pilota. Coincideix el volum calculat amb el que obteniu experimentalment?
3. Col·loqueu el vostre "submarí" en el "líquid desconegut" i ompliu-lo amb líquid desconegut fins que el submarí floti neutralment. D'acord amb el volum de líquid de llast desconegut que heu d'introduir, quina creieu que és la densitat del líquid desconegut en comparació amb la de l'aigua dolça?

Explicació

La pilota que utilitzem per a aquesta activitat té una densitat de $0,7 \text{ g/cm}^3$, que és menor que la densitat de l'aigua (1 g/cm^3) i, per tant, la pilota sura. Com que el volum de la pilota roman constant, l'única manera de convertir aquest "submarí" en neutralment flotant (completament submergit) és afegir massa empenyent l'aire fora (amb la xeringa) i substituir-lo per aigua. La massa de la pilota és 124,5 g i el seu volum és 176 cm^3 . Quan la pilota està completament submergida, desplaça $176 \text{ ml (cm}^3)$ d'aigua, que pesen 176 g. Per tant, per tal que la densitat de la pilota sigui igual a la de l'aigua (i convertir la pilota en neutralment flotant), s'ha d'afegir uns 52 g (sobre 52 ml) d'aigua. Quan



Figura 3.2. Materials per a l'Activitat 3.2.

els alumnes posen la pilota en el “líquid desconegut”, troben que es necessita un volum de líquid més gran per aconseguir la flotació neutra, cosa que indica que la solució desconeguda (per exemple, aigua amb sucre) és més densa que l’aigua dolça, la qual cosa augmenta la força de flotació que actua sobre el submarí.

ACTIVITAT 3.3. DISENY DE BOIES (Figura 3.3)

Materials

- Dos recipients, un amb aigua dolça i l’altre amb solució salina
- Dos vasos de precipitats o envasos fondos
- Pots de pel·lícula fotogràfica o vials petits
- Pesos (volanderes metàl·liques, monedes, etc)
- Diversos complements addicionals: pilotes, gomes elàstiques, palletes per a beure, tubs de plàstic, pistola per a segellar i pegament, clips de papereria, cinta adhesiva, paper plàstic amb bombolles, netejador de canonades, xeringues, espuma d’embalatge (no es necessita tot; aquests són només exemples)
- Balança
- Calibre o regle o peu de rei
- Cilindre graduat (proveta)
- Aquari amb fluid estratificat (aigua salada i aigua dolça)

Nota: La solució salina de l’aquari hauria de ser la mateixa que en el recipient d’aigua salada mencionat al principi de la llista.



Figura 3.3. Un estudiant comprovant l'Activitat 3.3 “flota” en un tanc estratificat.

Instruccions per als Estudiants

Heu estat contractats per a dissenyar dues boies autònomes que portaran sensors (volanderes metàl·liques) per a mesurar varies propietats hidrogràfiques (per exemple, temperatura, salinitat) i propietats biogeoquímiques (per exemple, oxigen, fluorescència de la clorofil·la, terbolesa) a la Badia dels Alfacs. Una boia hauria de ser capaç de derivar en la superfície. És a dir, ha de surar de manera que el seu punt més alt estigui just sobre la superfície de l’aigua. L’altra hauria de mantenir-se en la picnoclina (la profunditat on la densitat canvia més ràpidament) sense tocar el fons del tanc.

El vostre primer objectiu es dissenyar un prototip de les boies, com a prova del concepte, per a ser presentat als vostres gestors del programa (companys de classe). Teniu a la vostra disposició un gibrell amb aigua de superfície (aigua dolça) i un altre amb aigua profunda (solució salina). En la vostra presentació, heu de descriure el disseny de les vostres boies i les vostres aproximacions per a determinar els seus comportaments d’enfonsament i de flotació. Al final de la classe, se us demanarà que demostreu que efectivament un dels vostres prototips roman a la superfície mentre que l’altre se sosté en la picnoclina en l’aquari estratificat.

Explicació

Utilitzem aquesta activitat per a afegir un saludable component competitiu a la lliçó. Segons la nostra experiència, la major part dels estudiants primer es plantegen aquest problema mitjançant el mètode d’assaig i error. Per tant, els estimularem, fent servir qüestions perspicaces, per a intentar que facin servir el Principi d’Arquímedes. Al final de la lliçó i com a part del grup de discussió, cada equip comprova les boies en un gran aquari amb una columna d’aigua estratificada (Cal assegurar-se que s’utilitza la mateixa solució d’aigua salada que han utilitzat els alumnes en els seus experiments).

ACTIVITAT 3.4. BUS DE DESCARTES (Figura 3.4)

Aquest clàssic experiment científic rep el seu nom de René Descartes, el filòsof, matemàtic i científic francès. Demostra la força de flotació (Principi d’Arquímedes) i la relació entre pressió i volum en gasos (Llei dels Gasos Ideals).

Materials

- Una ampolla de plàstic, tancada i plena d’aigua de l’aixeta (l’aigua acolorida funciona millor)
- Una pipeta de plàstic amb un llast amb rosques i/o volanderes metàl·liques

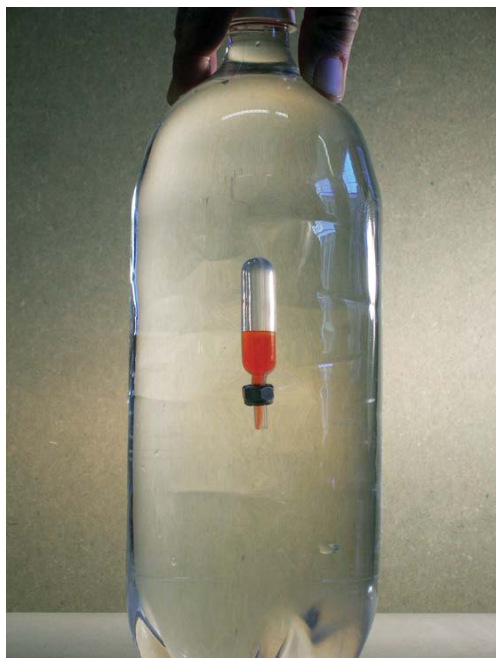


Figura 3.4. Un bus de Descartes.

Nota: Per a Instruccions sobre com construir un bus de Descartes veieu, per exemple, <http://www.raft.net/ideas/Pipette%20Diver.pdf>.

Instruccions per als Estudiants

1. Comprimeu l'ampolla. Per què s'enfonsa la pipeta mig tancada que està dins de l'ampolla? Per què puja la pipeta quan deixeu de prémer?
2. Expliqueu el comportament de la pipeta en termes de la pressió i el Principi de Arquímedes.

Explicació

Segons la Llei de Pascal, la pressió aplicada a un fluid es transmet a través de tot el fluid. Quan premem l'ampolla, augmentem la pressió dins de l'ampolla i en la pipeta que es troba dins. La pipeta conté aire. En augmentar la pressió, el volum d'aire atrapat dins de la pipeta disminueix, i l'aigua entra reemplaçant l'espai que l'aire ocupava abans (recordem la Llei dels Gasos Ideals: $PV = nRT$, on P és la pressió, V el volum, n el número de mols del gas i R la constant universal dels gasos. A temperatura constant, un increment de la pressió resulta en una reducció del volum). Donat que la densitat de l'aigua és més gran que la de l'aire, la densitat del sistema pipeta (pipeta + bombolla de aire + aigua) puja prou com a per a què la pipeta s'enfonsi.

ACTIVITAT SUPLEMENTÀRIA (Figura 3.5)

Com a avaluació, realitzem un concurs (veieu “Avaluant l'aprenentatge de l'alumne”, més endavant) sobre els conceptes introduïts en aquesta lliçó, i els de les lliçons precedents sobre densitat i pressió, així com el repte de resoldre un problema. Com a problema, presentem als alumnes una pregunta molt coneguda: “Tenim una gran roca sobre un vaixell flotant en un embassament. Si llencem la roca per la borda i s'enfonsa, què li passa al nivell de l'embassament: pujarà, baixarà o romandrà igual?”

Per a resoldre aquest problema, s'ha de comparar el volum de l'aigua desplaçada quan la roca està en el vaixell ($V_{\text{desplaçada}_v}$) amb el volum desplaçat quan la roca està completament submergida ($V_{\text{desplaçada}_s}$). Quin és més gran? Considerem primer la roca dins del vaixell. Pel Principi d'Arquímedes, el pes de la roca (que ni puja ni baixa) iguala el pes de l'aigua desplaçada: $m_{\text{objecte}} g = m_{\text{desplaçada}_v} g$. A més, per la definició de densitat, $m_{\text{objecte}} = \rho_{\text{objecte}} V_{\text{objecte}}$, $m_{\text{desplaçada}_v} = \rho_{\text{fluid}} V_{\text{desplaçada}_v}$. Combinant aquestes dues expressions s'obté el volum desplaçat quan la roca està en el vaixell: $V_{\text{desplaçada}_v} = V_{\text{objecte}} \rho_{\text{objecte}} / \rho_{\text{fluid}}$. Considerant ara el cas de la roca submergida, el volum de l'aigua desplaçada és igual al propi volum de la roca: $V_{\text{desplaçada}_s} = V_{\text{objecte}}$. Finalment, per a predir el que li passa al nivell de l'aigua quan llencem la roca per la borda, els dos volums desplaçats són comparats calculant la seva raó: $V_{\text{desplaçada}_v} / V_{\text{desplaçada}_s} = \rho_{\text{objecte}} / \rho_{\text{fluid}}$. Donat que la roca s'enfonsa en l'aigua, sabem que $\rho_{\text{objecte}} > \rho_{\text{fluid}}$, que ens indica que $V_{\text{desplaçada}_v} > V_{\text{desplaçada}_s}$: el volum d'aigua desplaçat per la roca en el vaixell és més gran que el volum desplaçat per la roca submergida. Així, quan es llença la roca per la borda, el nivell d'aigua de l'embassament disminuirà. *Nota:* el volum d'aigua desplaçada degut al pes del vaixell és el mateix, tant si la roca està dins o fora i, per tant, no afecta el resultat.

Primer donem als estudiants uns minuts perquè pensin el problema individualment, després els demanem que votin si creuen que el nivell de l'aigua pujarà, baixarà o romandrà igual. Les tres opcions sempre reben vots. Aleshores ajuntem els estudiants d'acord amb el seu “vot”. Cada grup ha de contribuir amb un argument (explicació física) que defensi la seva predicció (o descobrir, en el procés, que la seva predicció necessita ser revisada) i presentar-la a tota la classe.

Després que cada grup faci la seva presentació, comprovem les seves prediccions (necessitem un vaixell de joguina, un pes o pedra gran i un gibrell ple d'aigua). Col·loquem el vaixell de joguina en el gibrell ple d'aigua i el carreguem amb el pes o pedra. Demanem a un estudiant que marqui el nivell de l'aigua en el gibrell, que deixi caure el pes (pedra) a l'aigua, i que aleshores marqui el nou nivell de l'aigua (Figura 3.5).

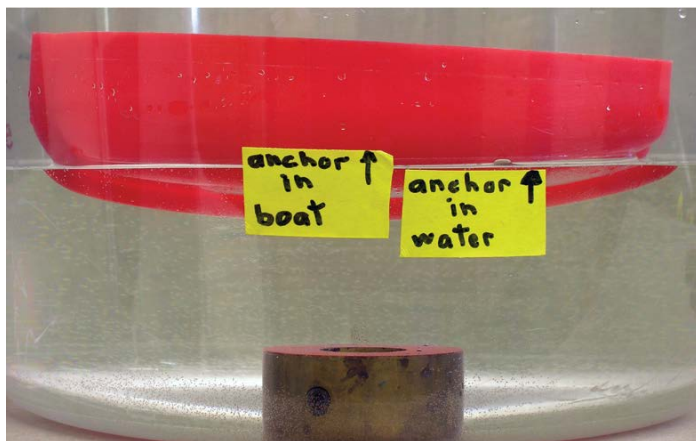


Figura 3.5. El nivell de l'aigua quan el pes es col·loca sobre el vaixell (etiquetat com a “àncora al vaixell” — “anchor in boat”) i quan el pes és submergit sota de l'aigua (etiquetat com a “àncora a l'aigua” — “anchor in water”).

Amb aquest tipus d'avaluació, els alumnes no senten la pressió de ser “examinats”, tot i que són obligats a aplicar el seu coneixement, identificar llacunes en la seva comprensió, i buscar explicacions més adients per a omplir aquestes llacunes. L'instructor o els instructors es mouen entre els grups mentre construeixen les seves explicacions, avaluen el nivell d'implicació de cada estudiant, i identifiquen les àrees de dificultat. Qualsevol concepte identificat com a problemàtic és revisat més tard, durant la demostració. Com a avaluació alternativa, utilitzem el problema de cinc blocs descrit a Loverude et al. (2003).

REFERÈNCIES I ALTRES LECTURES RECOMENADES

- 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 Fonamentals*. Pearson Addison-Weslei.
- Loverude, M.E, C.H. Kautz, & 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. Capítols 3 i 4 de *Life in Moving Fluids*. Princeton University Press, Princeton, NJ.

ALTRES RECURSOS

- Sorbjan, Z. 1996. *Hands-On Meteorology: Stories, Theories, and Simple Experiments*. American Meteorological Society. Washington, DC. Es una col·lecció d'experiments pràctics dissenyats sobre conceptes de meteorologia. El Capítol 7 aborda la flotabilitat. A més dels experiments, el llibre conté narracions històriques, referències a descobriments importants i històries sobre científics famosos i infames.

AVALUANT L'APRENTATGE DE L'ALUMNE

Avaluar l'aprenentatge del alumne és un aspecte essencial i exigent, de l'ensenyament. Els exàmens amb llapis i paper són una forma habitual d'avaluació, tot i que tendeixen a comprovar més aviat la memorització que la comprensió profunda, la síntesi i l'aplicació del coneixement. Pressionats per les administracions, la societat i els mateixos estudiants per tal que generin títols, els educadors sovint cauen en formes simples d'exàmens objectius (per exemple, l'elecció entre diverses respostes). Tot i això, els resultats d'aquestes avaluacions poden no desvetllar per què els alumnes han aprovat o han suspès. Si l'objectiu és avaluar la qualitat i l'abast del què han après els estudiants, hi ha raons per a utilitzar mètodes d'avaluació que reflecteixin el rang complet dels nostres objectius educatius (veure Fink, 2003). Això no significa que no hi hagi lloc per als exàmens de paper i llapis en la educació formal; nosaltres utilitzem exàmens escrits i de tipus test en la nostres pròpies classes. Tot i així, defensem que s'ha de considerar, i usar, un rang més ample de mètodes d'avaluació, no només per a valorar l'aprenentatge de l'alumne sinó també la nostra efectivitat com a professors. Aquests mètodes inclouen tant l'avaluació formal (per exemple, escrits d'investigació, activitats de laboratori, presentacions i exàmens orals) i l'avaluació informal (per exemple, observar el comportament dels estudiants a classe i la seva participació en les discussions) (Hassard, 2005; Feller i Lotter, 2009). El nostre objectiu en aquest curt assaig no és el de proporcionar una revisió exhaustiva de les eines d'avaluació o indicar el mètode perfecte d'avaluació. Més aviat es tracta de compartir la nostra experiència i estimular el lector a reflexionar sobre el valor de l'avaluació i de com es pot utilitzar més eficaçment en la pràctica docent per tant de millorar l'aprenentatge. Els mètodes haurien de variar segons els objectius de l'aprenentatge, el nombre d'estudiants a classe, la seva formació i el context de la classe. La fiabilitat de l'examen i l'avaluació es pot augmentar fent servir mètodes diferents per a mesurar els resultats esperats de l'aprenentatge.

Quan les classes són molt grans, les activitats pràctiques, d'investigació, i els mètodes d'avaluació diferents als exàmens de resposta curta i de tipus test són més difícils d'implementar. Però hi ha maneres en què les avaluacions tradicionals com les que hem citat, poden formar part d'un procés d'aprenentatge actiu. Seguint a Fink (2003), cada setmana donem als estudiants un examen de tipus test amb múltiples respostes i els demanem que, en primer lloc, el realitzin individualment. Després de recollir els exàmens, els demanem que el tornin a fer però en equips de tres o quatre estudiants. L'equip ha d'arribar a un consens per a

cada resposta. Per a l'autocorrecció directa, donem a cada equip una plantilla prefabricada amb les respostes correctes (similars a algunes paperetes de loteria; veure <http://www.epsteineducation.com/multichoice.php>). Els estudiants rasquen la superfície per a descobrir si la seva elecció és la correcta (apareix una estrella) o incorrecta (apareix un quadrat blanc). En aquest procés, els alumnes re-avaluen la seva comprensió i són estimulats a comunicar les seves idees en un marc menys "estressant" i més col·laboratiu. Intentem mantenir els mateixos equips al llarg del semestre. Per a fomentar una competició saludable, registrem el nombre de punts que cada equip guanya cada setmana (d'acord amb el nombre de respostes correctes), i l'equip guanyador és premiat amb un pisolabis al final del semestre.

Una altra eina que utilitzem és un diari reflexiu en el què els estudiants avaluen el seu propi aprenentatge. Primer vàrem intentar l'aproximació tradicional, fent servir una llibreta de laboratori com a diari, però els estudiants no respongueren bé; els diaris es convertiren en col·leccions d'informacions i esdevinements més que en reflexions sobre l'aprenentatge. En canvi, els alumnes respongueren molt bé quan vàrem canviar per blogs a la Xarxa. Cada estudiant creà un blog (per exemple, a www.blogger.com), un medi en el què els estudiants es mostren més còmodes i familiars. Cada setmana, els estudiants havien de respondre a qüestions guia que els encoratjaven a fer comentaris sobre els nous conceptes que havien après, identificar punts febles en la seva comprensió, plantejar qüestions, i assenyalar quins aspectes de la lliçó havien estat útils i quins no. En el nostre cas, només els instructors tenim accés als blogs per a proporcionar, setmanalment, respostes a cada estudiant. Els blogs reflexius donen als professors informació immediata que pot utilitzar-se per a adequar les seves estratègies didàctiques, i els resultats que s'esperen de l'aprenentatge, amb la comprensió real de l'alumne. Els blogs estimulen els estudiants a pensar críticament sobre el material de cada lliçó i proporcionen un medi d'avaluar la seva comprensió de forma regular en lloc d'únicament a final de curs.

REFERÈNCIES I LECTURES RECOMENADES

- 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 a: http://www.tos.org/oceanography/isel/seues/isel/seue_archive/22_1.html (accessible des d'Agost de 2009).
- Fink, L.D. 2003. *Creating Significant Learning Experiences: An Integrated Approach to Designing College Courses*. Jossey-Bass, San Francisco, CA, 320 pp.

CAPÍTOL 4. CALOR I TEMPERATURA

OBJECTIU DE LES ACTIVITATS

Comprendre com funciona l'oceà i el seu impacte en el clima requereix un bon coneixement dels principis bàsics de la termodinàmica. Malgrat la termodinàmica és un dels temes científics que resulten més familiars als estudiants a través de la seva experiència diària, sovint arriben a classe amb una barreja de conceptes erronis que cal identificar i corregir (Carlton, 2000). Com a exemples d'idees falses es podrien citar: incapacitat per a distingir entre calor i temperatura, la idea que la transferència de calor sempre produirà un augment de temperatura, o una mala interpretació del concepte de calor latent (Thomaz et al., 1995). Un altre error comú consisteix a confondre quan es produeix el màxim flux de calor i quan es dona la màxima temperatura — per exemple, el moment del dia en el qual el flux de calor de la Terra és màxim en relació a l'hora en la que s'enregistra la temperatura mitjana de l'aire més alta, o l'època de l'any de màxim flux de calor respecte a la màxima temperatura mitjana de l'aigua a l'oceà o a un llac. L'objectiu d'aquest conjunt d'activitats és revisar conceptes bàsics de termodinàmica i destacar la seva aplicació als processos oceànics. La termodinàmica és un camp molt ampli, de manera que no intentarem abastar tots els seus aspectes. Ens centrarem en els conceptes de transferència de calor (conducció, radiació i convecció), calor latent, i expansió tèrmica. Les activitats de laboratori estan pensades per a ser realitzades en dues sessions de classe.

CONTEXT TEÒRIC

La **temperatura** és una magnitud que indica el grau de calor o fred d'un objecte en relació a algun estàndard de referència. El seu valor és proporcional a l'energia cinètica mitjana associada al moviment dels àtoms i les molècules d'un cos. Per a mesurar la temperatura es fa servir normalment l'escala Celsius ($^{\circ}\text{C}$), calibrada d'acord amb les propietats físiques de l'aigua pura. El punt de congelació a la pressió del nivell del mar es va fixar arbitràriament a 0°C i el punt d'ebullició en les mateixes condicions es va fixar en 100°C . L'escala Fahrenheit ($^{\circ}\text{F}$) popular als Estats Units d'Amèrica es va calibrar de manera que el punt d'ebullició de l'aigua fos de 212°F i el seu punt de congelació de 32°F . Per a convertir graus Celsius a graus Fahrenheit: es multiplica per 1,8 i s'hi suma 32 ($^{\circ}\text{F} = 1,8 \times ^{\circ}\text{C} + 32$). L'escala Kelvin (identificada com a K) es coneix com a escala de temperatura

absoluta, amb el mateix espaiat que els graus Celsius però amb el zero fixat a $-273,16^{\circ}\text{C}$ (és a dir, $\text{K} = ^{\circ}\text{C} + 273,16$). Es diu així perquè l'energia cinètica molecular a 0 K és nul·la i per tant no pot registrar-se'n cap temperatura inferior. La temperatura no es mesura directament sinó a través dels seus efectes en diferents materials. Els termòmetres més sovint utilitzats mesuren la temperatura mitjançant canvis del volum d'un líquid (per exemple, els termòmetres amb bulb ple de mercuri o alcohol) o de canvis a la resistència elèctrica d'un material (per exemple, de ceràmica o termistors basats en polímers).

La **calor** es defineix com a l'energia interna (cinètica i potencial) que es transfereix d'un cos a un altre (veieu per exemple, Hewitt, 2008). La transferència de calor entre dos cossos en contacte tèrmic sempre es dirigeix del cos amb temperatura més gran al de temperatura més baixa. Aquesta regla no significa, tot i així, que la calor es transfereixi del cos amb més energia interna al que en té menys. Cal recordar que la temperatura no és directament proporcional a tota l'energia interna d'una substància, sinó només la part cinètica (i no la potencial) de la seva energia interna. El principi de conservació de l'energia implica que quan es transfereix calor entre dos sistemes, l'energia perduda per un és guanyada per l'altre. La calor té unitat d'energia, que en el sistema SI (mètric) s'anomenen a joule (J). Altres unitats utilitzades popularment per a la calor són les BTU (unitats tèrmiques britàniques) o les calories (1 caloria = 4,18 joules). (Nota: les Calories relacionades amb els aliments [amb C majúscula] equivalen a 1000 calories, o una kilocaloria.)

La capacitat calorífica d'una substància es defineix com la quantitat de calor necessària per a elevar la seva temperatura en 1°C . Aquesta capacitat tèrmica per a l'emmagatzematge de calor és diferent per a cada substància. La capacitat calorífica específica d'un material (Q_s) és la capacitat calorífica per unitat de massa. L'aigua té un dels valors més elevats de capacitat calorífica específica respecte a qualsevol altre líquid: $Q_s = 4186 \text{ J}/(\text{kg}^{\circ}\text{C}) = 1000 \text{ calories}/(\text{kg}^{\circ}\text{C})$. La capacitat calorífica específica de l'aire és aproximadament una quarta part de la de l'aigua: $Q_{s_{\text{air}}} = 1006 \text{ J}/(\text{kg}^{\circ}\text{C})$. Aquesta diferència entre les capacitats calorífiques de l'aigua i de l'aire és encara més sorprenent si es té en compte que la calor específica depèn de la massa, i que la densitat de l'aigua és al voltant de 1000 veges més gran que la de l'aire. Així, per elevar la temperatura d'un volum determinat d'aigua en 1°C es

necessita una energia (calor) aproximadament 4000 vegades més gran que la que cal per al mateix volum d'aire. Alhora, quan l'aigua es refreda, allibera 4000 vegades més calor que el mateix volum d'aire (veure el vídeo demostració de la diferència entre les capacitats calorífiques de l'aigua i de l'aire a <http://www.jpl.nasa.gov/video/index.cfm?id=827>). La calor específica de l'aigua és també molt superior a la calor específica de les roques o de la Terra.

La més gran capacitat calorífica de l'aigua permet a l'oceà absorbir o alliberar grans quantitats de calor amb canvis relativament petits de temperatura en relació a l'atmosfera o a la terra, les capacitats calorífiques dels quals són molt més baixes. L'oceà, per tant, actua com a esmorteïdor de calor per a mantenir la temperatura de la Terra davant d'augmentos o disminucions ràpids de calor. A aquest efecte esmorteïdor es deu el fet que les zones costaneres experimentin canvis més suaus de temperatura entre el dia i la nit, o entre estacions, que les zones continentals. Així doncs, sota les mateixes condicions de radiació solar, el terra s'escalfa i es refreda més ràpid que l'oceà.

Les variacions latitudinals en els fluxos d'energia solar són les responsables de les variacions latitudinals de temperatura. L'oceà juga un paper clau en la moderació del clima de la Terra, no només per l'emmagatzematge o l'alliberament de grans quantitats de calor (degut a l'alta capacitat calorífica de l'aigua), sinó també pel transport de calor des de regions equatorials, amb temperatura més alta, cap a regions polars de menor temperatura (per exemple, a través de corrents com la del Golfo; Gill, 1982). Sense el transport de calor per part dels corrents oceànics i els vents, la diferència de temperatures segons la latitud seria molt més alta. Els mecanismes de transport de calor s'analitzaran amb més detall més endavant, juntament amb les activitats previstes per a evidenciar-los.

Mecanismes de Transferència de Calor

Quan hi ha una diferència de temperatura entre dos cossos, la calor es transfereix d'un a l'altre per *radiació*, *conducció*, *advecció* o *convecció*. En general, els diferents mecanismes de transferència de calor actuen de forma simultània.

La **radiació** consisteix en la transferència de calor per emissió d'ones electromagnètiques que transporten energia des de l'emissor al receptor, que l'absorbeix. Qualsevol cos pot absorbir o emetre energia. La taxa d'absorció de calor depèn de les

propietats del material i de les seves característiques geomètriques superficials per a captar la radiació entrant (veure Activitat 4.1). Si la taxa d'absorció d'energia entrant d'un objecte és més gran que la seva taxa d'emissió, la seva temperatura s'eleva (en absència d'altres mecanismes de transferència de calor). Contràriament, si la seva taxa d'absorció d'energia és inferior a la d'emissió, la temperatura de l'objecte baixarà. Un determinat objecte, doncs, assolirà la temperatura d'equilibri quan la taxa d'absorció d'energia sigui igual a la de radiació.

La quantitat i qualitat (longitud d'ona) de l'energia irradiada depèn únicament de la temperatura de l'objecte. Per a descriure la relació entre la temperatura d'un cos i l'energia irradiada s'utilitza un model conceptual anomenat "cos negre". Es defineix com a cos negre un objecte que absorbeix completament (100%) tota la radiació electromagnètica que arriba a la seva superfície. No hi ha radiació electromagnètica que es reflecteixi o que el traspassi, i per això sembla com de color negre. L'energia, E , irradiada per unitat de superfície, i per unitat de temps, d'un cos negre és proporcional a la quarta potència de la seva temperatura absoluta, T (en K): $E = \sigma T^4$ on $\sigma = 5.7 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$ (Llei d'Stefan-Boltzmann). Aquesta relació implica que quan la temperatura absoluta d'un cos és doble, la quantitat de calor que irradiarà augmentarà setze vegades.

La radiació que emet un cos no es produeix a una sola longitud d'ona, sinó a través de tot un espectre de longituds d'ona. El pic de l'espectre (és a dir, la longitud d'ona amb intensitat de radiació més gran) és inversament proporcional a la temperatura de l'emissor (Llei de Wien). Així, quan la temperatura d'un cos augmenta, el pic de longitud d'ona de la radiació emesa es desplaça cap a longituds d'ona més curtes. Per exemple, com que la transferència d'energia del Sol a la superfície de la Terra es realitza principalment per radiació i com que la temperatura de la superfície del Sol és d'uns 6000K, la radiació màxima es troba en el rang de longituds d'ona visibles (longituds d'ona relativament curtes). La superfície de la Terra i l'atmosfera també emeten la radiació, però com les seves temperatures són bastant inferiors a la del Sol (~300 K), la longitud d'ona del pic de radiació serà més llarga (infraroig). Aquest és un concepte clau per a entendre l'efecte hivernacle. L'atmosfera és transparent a l'entrada o reflexió de la radiació solar d'ona curta, però no a la radiació d'ona llarga (infrarojos) emesa des de la superfície de la

Terra o de l'atmosfera. Així, l'energia del Sol arriba la superfície de la Terra, on és absorbida per la terra, l'oceà i l'aire. Tot i així, l'energia irradiada d'ona llarga és absorbida per alguns dels gases atmosfèrics i per tant es queda atrapada a l'atmosfera, que actua com una manta.⁹

La **conducció** significa la transferència de calor entre dos cossos a diferents temperatures en contacte físic l'un amb l'altre. En aquest cas la calor es transfereix per les vibracions i col·lisions entre les seves molècules. Les molècules del cos més calent vibren més ràpid i toparan amb les del cos més fred que vibren més lentament, de manera que es produeix una transferència neta d'energia des de les molècules que vibren ràpidament cap a les més lentes. La taxa de transferència de calor per conducció és proporcional a l'àrea a través de la qual flueix la calor (àrees més grans permeten taxes de transferència més grans), i al gradient de temperatura (diferències més grans causen taxes de transferència més grans). La taxa de transferència també depèn de la conductivitat tèrmica dels materials (és dir, de la seva capacitat per a conduir la calor).

La **convecció** i l'**advecció** són els principals modes de transferència de calor entre l'oceà i l'atmosfera. La convecció només es produeix en fluids i implica moviments verticals dins del líquid o fluid, i no interaccions a escala molecular. És conseqüència de diferències en densitat —flotabilitat— dins del fluid. Com a exemples de processos convectius es poden mencionar: els corrents al mantell de la Terra que impulsen el sistema tectònic com a resultat de l'escalfament i refredament del magma, la circulació atmosfèrica resultant de l'escalfament solar desigual (entre els pols i l'equador), la cinta transportadora de l'oceà i la formació de masses d'aigües profundes, provocades per refredament d'aigües superficials en altes latituds, i la barreja vertical a la capa superficial de l'oceà, degut a variacions d'escalfament entre el dia i la nit (per a més detalls, vegeu Garrison, 2007, o qualsevol altre llibre de text d'oceanografia general). L'advecció fa referència generalment a la transferència horitzontal de calor deguda al flux d'aigua (per exemple, el Corrent del Golf).

Calor latent

Quan un cos guanya calor, poden passar dues coses: que augmenti la seva temperatura, o que canviï el seu estat sense variar la temperatura (per exemple, és el que passa en la conversió del gel en aigua líquida). La majoria dels materials

tenen dues transicions d'estat: de sòlid a líquid i de líquid a gas. La calor necessària per a canviar l'estat d'un material s'anomena calor latent de fusió (si canvia de sòlid a líquid) i calor latent de vaporització (si passa de líquid a gas). La calor latent de fusió i de vaporització de l'aigua són relativament altes (al voltant de 334J/g, i 2260J/g, respectivament). Aquests valors tan alts tenen diverses conseqüències importants per al clima de la Terra, en particular les següents:

(1) A les regions polars, on l'aigua es congela durant l'hivern, la calor latent passa a l'atmosfera i a la resta de l'aigua circumdant. A l'estiu, al fondre's el gel, recull calor de l'oceà circumdant i de l'atmosfera. Donat que l'addició o eliminació de calor latent només produeix un canvi de fase de l'aigua congelada i no un canvi en la seva temperatura, els canvis estacionals de la temperatura superficial de l'oceà (i per tant de la temperatura de l'aire) són relativament petits en aquestes regions. Penseu en els glaçons que es fan servir per mantenir una beguda freda. La temperatura de la beguda només començarà a augmentar després d'haver-se desfet tot el gel.

(2) L'aigua que s'evapora dels oceans transfereix calor latent a l'atmosfera. Aquesta calor latent s'allibera quan l'aigua es condensa per a formar núvols, i escalfa així l'atmosfera. L'evaporació, doncs, és també la principal raó per la qual els grans llacs i el mar poques vegades estan a més de 28–30°C.

El cos humà aprofita l'alt valor de calor latent de vaporització de l'aigua per a regular la seva pròpia temperatura. L'evaporació d'una petita quantitat d'aigua pot refredar substancialment el cos. Quan suem, l'aigua que s'evapora sobre la nostra pell obté l'energia necessària per a evaporar-se de la pròpia pell, i en redueix així la temperatura. Aquest fenomen també explica per què sentim fred quan sortim fora de la piscina en un dia calorós d'estiu. Una mala interpretació del tema seria pensar que per a evaporar aigua calgui escalfar-la fins a 100°C, malgrat tothom és conscient que les tovalloles esteses o les basses de pluja s'assequen a temperatures menors. En un líquid, les molècules es mouen a l'atzar amb velocitats variables i topen les unes amb les altres. En aquest procés, n'hi ha que guanyen energia cinètica mentre que d'altres en perden. Per a algunes molècules, el guany d'energia cinètica és suficient perquè puguin "escapar-se" del líquid i transformar-se en gas. Les molècules que es queden enrere són les que es mouen més lentament. Així, l'energia cinètica mitjana de les molècules en el líquid disminueix quan les ràpides "s'escapen"

⁹ En el context de l'efecte hivernacle s'han d'aclarir dues concepcions errònies. (1) El propi terme d'efecte hivernacle és ja enganyós per sí mateix. Un hivernacle roman calent degut principalment a la inhibició de la convecció i no a causa de l'emissió i absorció de la radiació d'ona llarga per l'aire de l'hivernacle (seria com comparar la calor dins d'un cotxe estacionat en un lloc assoleiat amb les finestres tancades amb la d'un altre amb les finestres obertes). (2) L'efecte hivernacle no és un fenomen intrínsecament nociu; sense ell, la Terra seria un lloc fred. Tot i així, els factors antropogènics augmenten significativament les propietats naturals d'aïllament de l'atmosfera terrestre, i causen l'augment continuat de la temperatura de la superfície de la Terra, més enllà dels valors naturals.

i així el líquid es refreda. L'escalfament provoca una energia cinètica mitjana més gran de les molècules del líquid i, estadísticament, hi ha més molècules que guanyen energia suficient per a "escapar-se". És possible fins i tot que es produeixi evaporació directament des de la fase sòlida (anomenada sublimació), com pot observar-se amb freqüència en llocs freds com l'Estat de Maine (i llocs freds semblants) durant l'hivern quan la neu "desapareix" malgrat que les temperatures es mantinguin per sota del punt de fusió de la neu.

Expansió tèrmica o dilatació

La majoria de materials es dilaten quan s'escalfen i es contrauen quan es refreden. Quan la temperatura d'un cos augmenta, a la majoria de materials, les seves molècules vibren més ràpid, se separen i ocupen més espai. Quan aquests mateixos materials es refreden, les seves molècules vibren més lentament i romanen més a prop les unes de les altres. S'ha d'assenyalar no obstant, que l'aigua dolça s'expandeix quan es refreda per sota de 4°C, un fenomen conegut com a "l'anomalia de l'aigua". L'expansió tèrmica és el principi pel qual funciona un termòmetre de líquids. En l'oceà, s'estima que l'expansió tèrmica contribueix significativament a l'augment del nivell del mar en escales de temps llargues, de dècades a segles. Tot i així, resulta difícil estimar la contribució de l'expansió tèrmica a la pujada del nivell del mar a llarg termini, donat que els efectes tèrmics semblen estar influïts per fluctuacions climàtiques a escales de dècades (Lombard et al., 2005). Les estimacions actuals suggereixen que l'expansió tèrmica és responsable del 25% al 50% de l'augment observat del nivell del mar.

DESCRIPCIÓ DE LES ACTIVITATS

Començarem la lliçó demanant als estudiants (distribuïts en petits grups de tres a quatre persones) definir calor i temperatura. Després, es reuniran per discutir les seves definicions i revisar els mecanismes de transport de calor (com flueix la calor?). A continuació, a través del treball manual i experimental amb activitats basades en preguntes, s'il·lustraran els conceptes de: absorció i emissió de calor (Activitat 4.1), transferència de calor (Activitats 4.1-4.3), calor latent (Activitats 4.4 i 4.5), relació entre evaporació i temperatura (Activitat 4.6), i expansió tèrmica (Activitats 4.7 i 4.8). Durant les activitats i les sessions de discussió a classe, anirem transmetent els principis subjacents en cadascun d'aquests conceptes i ressaltarem la seva importància en els processos oceànics i climàtics.

ACTIVITAT 4.1. TRANSFERÈNCIA RADIATIVA DE CALOR I ABSORCIÓ DE LA RADIACIÓ

(Figura 4.1)

Materials

- Dues llaunes de la mateixa mida, una negra i una altra brillant (cada una ha de tenir un forat a la tapa per a què s'hi pugui inserir un termòmetre)
- Dos termòmetres
- Un llum incandescent (utilitzarem una bombeta blanca de 150 W)

Nota: Hi ha un kit de radiació disponible a sciencekit.com.

Instruccions per als Estudiants

1. Teniu dues llaunes: una brillant i l'altra negra. Si la mateixa font de llum il·lumina totes dues llaunes per igual, hi haurà la mateixa temperatura dins de cadascuna d'elles? Per què o per què no?
2. Registreu la temperatura inicial dels termòmetres inserits en les llaunes.
3. Assegureu-vos que les llaunes estan a la mateixa distància de la font de llum. Enceneu el llum i observeu els termòmetres. Què es veu? Com es poden explicar les observacions? Com s'està transferint la calor dins del sistema?
4. Si manteniu el llum encès durant molt de temps, continuarà augmentant la temperatura mentre el llum està encès? Per què o per què no? Mitjançant quin mecanisme(s) es transfereix la calor en aquest sistema?

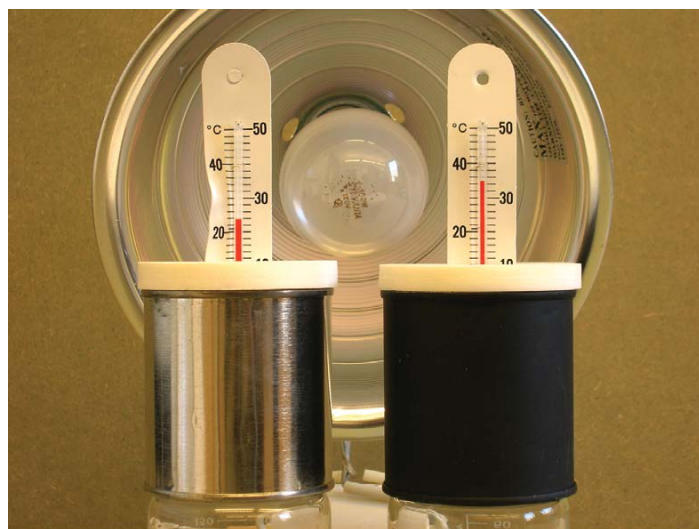


Figura 4.1. Materials per a l'Activitat 4.1. Els termòmetres mostren la diferència en temperatura entre la llauna negra i la llauna brillant després d'haver estat exposades a una font de llum.

5. Com s'apliquen els principis que heu après en aquesta activitat a l'absorció de la radiació electromagnètica a la superfície de la Terra i la regulació de la temperatura de la Terra?

Aquesta activitat es pot modificar (per exemple, per a servir com a eina d'avaluació) posant una llauna amb aigua i una altra buida, o utilitzant un ventilador per a afavorir la convecció. (Compte: S'ha d'assegurar que l'aigua no toqui mai el llum calent).

Explicació

Tot i que les dues llaunes estan exposades a la mateixa font de llum, els dos termòmetres no mostren la mateixa temperatura (Figura 4.1). La llauna brillant reflecteix més energia radiant que la negra i per tant absorbeix menys calor. La negra pot escalfar-se més ràpidament. Les temperatures de les llaunes no augmentaran de forma indefinida sinó que assoliran una temperatura final estable quan la calor rebuda per la radiació d'ona curta sigui igual a la perduda per radiació d'ona llarga, més la cessió de calor a l'aire circumdant per conducció.

ACTIVITAT 4.2. CONDUCCIÓ (Figura 4.2)

Materials

- Tres tipus de material a temperatura ambient: fusta, metall i tela

Instruccions per als Estudiants

1. Els tres materials han estat a temperatura ambient durant un cert temps. Sense tocar-los, predigueu la seva temperatura. Estaran tots a la mateixa temperatura o serà diferent? Per què o per què no?
2. Breument col·loqueu la mà sobre cada material. Coincideix la sensació amb el que esperàveu? Com expliqueu les diferències, si tots els materials han estat sotmesos a temperatura ambient?



Figura 4.2. Materials per a l'Activitat 4.2.

3. Què és el que revel·len les vostres observacions sobre la detecció de la temperatura a través del sistema nerviós humà (i el d'altres organismes)?
4. Quan i on creieu que la conducció de la calor entra en joc a l'oceà?

Explicació

Sempre que toquem alguna cosa que està més calenta o més freda que la nostra pell experimentem la transferència de calor per conducció. Els materials que són bons conductors (per exemple, una peça de metall) a temperatura ambient es noten més freds al tacte, perquè la nostra calor es transfereix ràpidament a tot el material i això evita que l'àrea que toquem s'escalfi a la temperatura del nostre cos. Els conductors dolents (per exemple, un tros de tela) es noten més calents perquè la transferència de calor de les nostres mans és més lenta i només s'escalfen localment. Els sòlids, en general, són millors conductors que els líquids, i els líquids millors que els gasos. Els metalls són bons conductors de la calor, mentre que l'aire i els olis (greix) són molt dolents. Un terra de rajoles es nota més fred que un pis amb catifa, tot i que tots dos estiguin a temperatura ambient. Una rajola és millor conductora de calor que la llana, perquè la calor es transfereix més ràpidament dels peus nus cap a les rajoles que cap a la catifa. La conducció no és un procés dominant de transferència de calor a l'oceà. Tot i així, sempre es presenta a la interfície entre materials de diferents propietats (per exemple, líquids i sòlids, com entre organismes marins i l'aigua circumdant, i líquids i gasos, com entre els oceans i l'atmosfera).

ACTIVITAT 4.3. CONVECCIÓ (Figura 4.3)

Materials

- Equip per a convecció (de fabricació casera o de sciencekit.com)
- Colorant alimentari (dos colors)
- Recipient amb aigua gelada
- Recipient amb aigua calent

Instruccions per als Estudiants

1. Empleneu del tot el dispositiu amb aigua (assegureu-vos que no hi hagi bombolles als tubs horitzontals).
2. Si escalféssiu la columna de la dreta i refredéssiu la de l'esquerra, en quina direcció esperaríeu veure fluir l'aigua a través dels tubs horitzontals?
3. Col·loqueu la columna de la dreta en el recipient d'aigua calenta i la columna de l'esquerra en el recipient amb el gel.

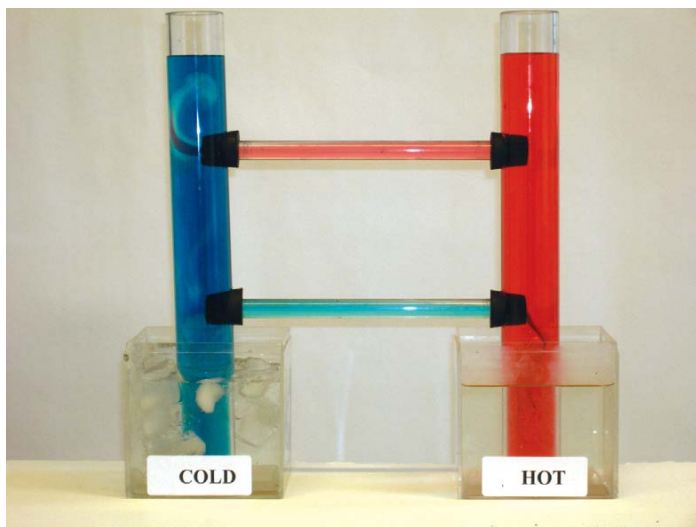


Figura 4.3. Aparell de convecció. Noteu que l'aigua calenta (en vermell) flueix per la part superior mentre que l'aigua freda (en blau) flueix pel fons degut a la diferència de densitat entre els fluids als costats oposats.

Afegiu unes gotes d'un colorant a les dues columnes (de color diferent per a cada columna) i observeu si la circulació horitzontal de l'aigua està d'acord amb la vostra anterior predicció.

4. Què passa si escalfeu (o refredeu) només una columna del dispositiu? Intenteu-ho.
5. Quins processos de l'oceà i de l'atmosfera es poden mostrar amb aquesta activitat?

Explicació

Quan una de les columnes del aparell s'escalfa i l'altre es refreda, es creen diferències de densitat als fons dels tubs verticals, provocant l'establiment d'un gradient de pressió. Les diferències de densitat fan que les masses d'aigua s'enfonsin o surin fins a assolir el nivell de densitat d'equilibri; una vegada la massa d'aigua assoleix aquest nivell d'equilibri, comença a moure's horitzontalment com resposta al gradient de pressió. (Nota: els gradients de pressió són conseqüència de les diferències en la distribució vertical de densitats, i per tant de la pressió hidrostàtica, entre les regions on l'aigua és més o menys densa). Degut a què l'aigua freda és més densa, es mourà al llarg del tub de connexió inferior, mentre que l'aigua calenta ho farà al llarg del tub que connecta la part superior (Figura 4.3). Si refredem o escalfem només una columna, es podrà veure el mateix efecte però potser que no sembli tan espectacular donat que els gradients de pressió seran més petits. Aquesta activitat proporciona un bon exemple dels corrents oceànics generats

per densitat (circulació termohalina) – per exemple, la cinta transportadora global. Aquí és important, com a qualsevol altra activitat de demostració, dirigir l'atenció dels estudiants cap a on falla l'analogia per a evitar malentesos. Per exemple, la cinta transportadora global funciona degut al refredament de l'aigua a la superfície¹⁰, mentre que en aquesta demostració refredament i escalfament es fan per sota (l'atmosfera, per una altra banda, sí s'escalfa per sota de manera que l'analogia resulta millor per a la circulació atmosfèrica forçada per flotabilitat). Aquesta activitat es pot fer conjuntament amb el Capítol 1.

ACTIVITAT 4.4. BOSSA DE CALOR (Figura 4.4)

Materials

- Dos recipients amb aigua
- Una bossa de calor reutilitzable (d'Arbor Scientific) a temperatura ambient
- Dos termòmetres
- Un rellotge o cronòmetre

Nota: En general, aquesta activitat es fa amb tota la classe. Si es vol realitzar amb diversos grups, s'hauran de tenir diverses bosses tèrmiques (són barates). Un cop s'activa la bossa i el material solidifica, cal escalfar-la durant uns 20 minuts per tornar-la a la fase líquida.

Instruccions per als Estudiants

1. Observeu, toqueu i descriviu la bossa de calor (per exemple, el material i la temperatura).
2. Empleneu els recipients amb aigua a temperatura ambient i registreu-ne la temperatura inicial.
3. Activeu la bossa de calor prement el botó (amb el tou dels dits -no amb les ungles, ja que es podria fer malbé) i submergiu-la en un dels recipients. L'altre recipient servirà de control.
4. Registreu immediatament la temperatura inicial dels dos recipients.
5. Continueu registrant la temperatura de cada recipient, una vegada per minut durant 10 minuts.
6. Heu observat diferències de temperatura de l'aigua entre tots dos tractaments? Què causa el canvi de la temperatura de l'aigua? Com funciona aquesta bossa de calor? (Pista: té el material de la bossa el mateix aspecte abans i després d'haver-la activat?)

¹⁰ N. del T.: I a la simultània injecció de calor cap a les profunditats oceàniques per mescla turbulenta. Per tal que es produeixi moviment vertical permanent en un fluid estratificat cal la presència de mescla turbulenta. La circulació termohalina és mantinguda per l'acció combinada de: (i) mescla turbulenta vertical i (ii) esforç dels vents en algunes latituds del planeta, com les del Passatge de Drake, entre l'Antàrtida i Amèrica del Sud.



Figura 4.4. Materials per a l'Activitat 4.4.

7. Quins processos a l'oceà i l'atmosfera són anàlegs als que acabeu d'observar en aquesta activitat (un canvi de fase seguit d'un canvi de temperatura a les aigües circumdants)?

Explicació

Quan la bossa de calor està activada i es col·loca a l'aigua, la temperatura de l'aigua comença a pujar mentre que la temperatura de l'aigua del recipient control (sense la bossa de calor) es manté constant. La bossa de calor conté una solució aquosa sobresaturada d'acetat de sodi. Quan s'activa, es forma un centre de nucleació i l'acetat de sodi comença a cristal·litzar-se, alliberant l'energia emmagatzemada en forma de calor. El calor alliberat passa per conducció a l'aigua del recipient, i els moviments del fluid (convecció i advecció) distribueixen la calor per l'aigua del recipient. Per tornar el contingut de la bossa a la fase líquida, se l'haurà de escalfar (és a dir, "invertir"-hi energia). Aquesta activitat demostra l'emissió de calor que acompanya a un canvi de fase i pot ser discutit a classe en el context de calor latent que s'allibera durant la formació del gel o la condensació del vapor als núvols.

ACTIVITAT 4.5. FLUX DE CALOR LATENT I DE CALOR (Figura 4.5)

Materials

- Un potet de plàstic amb tapa, prou petit com per a encabir-lo dins d'un vas de Porexpan. A la part superior del potet, s'ha de fer un forat prou gros com per ficar-hi la vareta d'un termòmetre digital.
- Vastos de Porexpan, col·locats un dins de l'altre per obtenir un aïllament més bo. S'ha de marcar el vas amb una línia que

indiqui el nivell de l'aigua que s'haurà d'afegir per tal que hi hagi el mateix volum al potet de plàstic i al vas de Porexpan

- Dos termòmetres digitals
- Un peu de laboratori amb anell i un braç amb pinça
- Aigua calent de l'aixeta, aigua gelada i gel

Instruccions per als Estudiants

1. Dibuixeu un esquema del dispositiu experimental (Figura 4.5) i indiqueu amb fletxes la direcció de la transferència de calor, si el petit potet de plàstic contingués aigua freda (sense gel) i el vas contingués aigua calenta. Què passaria amb la temperatura de l'aigua al potet de plàstic? Què passaria amb la temperatura de l'aigua al vas de Porexpan?
2. Empleneu el potet de plàstic fins a la part superior amb aigua gelada (sense gel!). Apunteu la temperatura inicial d'aquesta aigua. Fixeu aquest potet al suport.
3. Empleneu ara el vas de Porexpan amb aigua calenta de l'aixeta fins a la línia marcada (per tant hi haurà el mateix volum d'aigua al potet i al vas). Anoteu també la seva temperatura inicial.
4. Feu lliscar el braç de la pinça cap a baix i col·loqueu el potet petit a l'interior del vas de forma que se submergeixi a l'aigua calenta. Anoteu la temperatura al potet i al vas cada 30 segons durant quatre minuts. Utilitzant la vareta del termòmetre, removeu l'aigua del vas i del recipient al (mentre seguiu fent mesures) per eliminar qualsevol gradient de temperatura que pugués formar-s'hi (en altres paraules, evitar que l'aigua calenta i lleugera s'acumuli i suri per sobre de l'aigua freda, més densa).



Figura 4.5. Materials per a l'Activitat 4.5.

5. Representeu gràficament la temperatura al potet i al vas en funció del temps. Concordeu les vostres observacions amb la vostra predicció? Com esperaríeu que fos el gradient de temperatura després d'un temps perllongat?
6. Si suposem que repetiu l'experiment, però aquesta vegada emplenem el potet de plàstic amb gel + aigua i emplenem el vas amb aigua calenta (no ho feu encara!). Esperaríeu observar canvis similars de temperatura amb aquest nou muntatge? Per què o per què no?
7. Empleneu totalment el potet petit amb gel i aigua (aproximadament un 60% de gel i un 40% d'aigua). Anoteu la temperatura inicial de l'aigua al recipient.
8. Repetiu els passos 4 i 5. Observeu la mateixa tendència que es va veure al pas 5? Per què o per què no?

Explicació

La calor es transfereix per conducció de la substància amb temperatura més alta a la que té temperatura inferior. En aquest experiment, la calor es transfereix de l'aigua calenta del vas a l'aigua freda del potet de plàstic. Com a resultat, la temperatura de l'aigua en el vas disminueix (perd calor), mentre que la temperatura al potet de plàstic augmenta (guanya calor). Després d'un llarg període de temps, el sistema assolirà l'equilibri, i no hi haurà gradient de temperatura entre l'aigua del vas i la del potet. Quan s'afegeix gel + aigua al potet de plàstic i s'afegeix aigua calenta al vas, la transferència de calor es farà en la mateixa direcció que abans, però ara, mentre que la temperatura de l'aigua calenta disminueix, no s'observa cap canvi a la temperatura de l'aigua + gel (ja que la calor s'inverteix fonent el gel). Només després d'haver-se fos tot el gel la temperatura de l'aigua al recipient de plàstic començarà augmentar.

ACTIVITAT 4.6. PSICRÒMETRE D'ESLINGA O GIRATORI (HIGRÒMETRE) (Figura 4.6)

Materials

- Un psicròmetre giratori (sciencekit.com)

Instruccions per als Estudiants

1. Un psicròmetre és un dispositiu que ens permet de mesurar la humitat relativa mitjançant la comparació de la temperatura mesurada per un termòmetre amb el bulb embolcallat en una tela de cotó humitejada ("termòmetre humit"; la tela s'estén cap a l'interior d'un dipòsit d'aigua destil·lada, per tal que el bulb estigui sempre humit) amb la temperatura de l'altre amb el bulb sec ("termòmetre sec"). Com espereu que variï la



Figura 4.6. Un psicròmetre giratori i la seva taula de conversió.

- temperatura dels dos termòmetres en funció de la humitat? Per què podria haver una diferència entre les dues lectures?
2. Feu giravoltar el psicròmetre durant 20 segons i després observeu si hi ha alguna diferència de temperatura entre els dos termòmetres (demanarem als estudiants que prenguin un mínim de tres lectures i en calculin el valor mitjà. Utilitzarem aquestes dades per a una discussió posterior sobre les mesures).

Després de l'activitat, els estudiants han de discutir el concepte d'humitat i descriure les relacions esperades entre humitat (sensació de xafogor), evaporació i temperatura ambient. Després del debat, els estudiants haurien de ser capaços d'explicar (possiblement com a avaluació) com es podria utilitzar el psicròmetre per a determinar la humitat a una temperatura ambient donada (tal i com es fa amb la taula que proporciona el fabricant; Figura 4.6).

Explicació

El psicròmetre consta de dos termòmetres, anomenats "sec" i "humit", i la diferència de temperatures entre ambdós s'utilitza en combinació amb unes taules per a calcular la humitat. El termòmetre normal ("sec") mesura la temperatura de l'aire. En fer girar el termòmetre "humit", s'evapora l'aigua del drap humit (en contacte amb l'aire circulant) i per tant, es refreda el termòmetre. La temperatura del termòmetre humit assoleix l'equilibri en refredar-se perquè l'evaporació del líquid (que depèn de la humitat relativa a l'habitació) estarà equilibri amb el guany de calor per conducció a partir de l'aire circumdant. Si l'ambient és sec, l'evaporació serà alta, i la diferència de temperatures entre els dos termòmetres serà més gran. Si l'aire està saturat de vapor d'aigua, no hi haurà refredament per evaporació i no s'observarà cap diferència de temperatura entre els dos termòmetres.

ACTIVITAT 4.7. EXPANSIÓ TÈRMICA (Figura 4.7)

Materials

- Un flascó
- Un tap de goma foradat que encaixi en el coll del flascó
- Un tub prim de vidre que pugui passar pel forat del flascó
- Un recipient ple d'aigua calenta
- Colorant alimentari
- Cinta adhesiva de laboratori

Instruccions per als Estudiants

1. Empleneu el flascó amb aigua acolorida i tapeu-lo. Introduïeu el tub de vidre pel forat del tap de goma i enfonsau-lo. Ha de quedar ben ajustat (es pot facilitar l'ajust, amb cinta de tefló o film de cuina). Cal que el líquid pugi pel tub de vidre fins a un terç de la part que sobresurt per damunt del tap. Marqueu el nivell de l'aigua amb cinta adhesiva.
2. Què espereu que passi al nivell d'aigua al tub quan col·loqueu el flascó dins un recipient amb aigua calenta? Per què?
3. Col·loqueu el pot al recipient ple d'aigua calenta. Observeu el nivell d'aigua al tub de vidre durant uns tres minuts. Marqueu el nou nivell d'aigua. Està d'acord amb la vostra predicció?
4. Apliqueu el que heu après en aquesta activitat per predir i explicar què passarà amb el volum de l'oceà, si les aigües dels oceans s'escalfen més. Quines conseqüències tindrà sobre el nivell del mar?



Figura 4.7. Materials de l'Activitat 4.7 després de la immersió del pot en aigua calenta.

5. Quins altres processos influeixen sobre el nivell del mar?

Repte: Tindrien els mateixos efectes sobre el nivell del mar la fusió del gel terrestre i la del gel que es troba sobre el mar? Per què o per què no? Com ho podríem comprovar?

Explicació

Quan s'escalfa un fluid, en general, s'expandeix; quan es refreda, habitualment es contrau (amb algunes excepcions importants, com per exemple, H_2O per sota de $4^{\circ}C$). Aquest és el principi en el que es basa el funcionament dels termòmetres de mercuri o etanol. L'augment de temperatura dels oceans produït per l'escalfament global, comportarà una expansió de l'aigua, i aquest augment de volum de l'aigua a les conques de l'oceà provocarà la pujada del nivell del mar. Altres processos que contribueixen a canvis del nivell del mar són els aportos d'aigua del desgel dels glaciers i de les cobertes terrestres de gel, i les pujades o baixades de les plaques litosfèriques, degudes a l'ajustament isostàtic. La fusió del gel del mar no canvia el nivell del mar perquè el volum d'aigua desplaçat per un iceberg és igual al volum que s'afegirà en fondre's. Per a demostrar aquest concepte, podem demanar als estudiants que col·loquin un gran bloc de gel en un aquari i registrin el nivell de l'aigua abans i després que el gel es fongui. *Nota:* Es podrien observar alguns canvis del "nivell del mar" si el gel refredés prou l'aigua com per provocar una contracció significativa.

ACTIVITAT 4.8. CORRONS REVERSIBLES

(Figura 4.8)

Materials

- Dos vasos de vidre (vasos de precipitats): un ple d'aigua freda (per sota de $20^{\circ}C$) i un amb aigua calenta ($\sim 40^{\circ}C$)
- Un parell de cilindres de densitat reversible: un d'alumini i l'altre de plàstic (PVC, de Arbor Scientific)
- Termòmetre
- Gel (pot caldre per a refredar l'aigua)
- Placa calefactora (es opcional; l'aigua calenta de l'aixeta també serveix)

Instruccions per als Estudiants

1. Què passarà amb els cilindres (s'enfonsen o suren) si els col·loqueu dins d'un vas amb aigua freda? En quin raonament es basa la vostra predicció?
2. Col·loqueu els cilindres en el vas amb aigua freda. Cal assegurar-se que no hi ha bombolles d'aire enganxades a la superfície dels cilindres.



Figura 4.8. Corrons d'alumini i plàstic submergits en aigua freda i calenta.

3. Coincidex la vostra observació amb les vostres prediccions?
Observeu les barres durant cinc minuts, com a mínim.
4. Repetiu ara l'experiment fent servir el vas ple d'aigua calenta.
Observeu els cilindres durant tres minuts, com a mínim.
Què passa?
5. Com expliqueu els comportaments diferents dels cilindres en l'aigua freda i en la calenta? Amb el vostre grup, discuteix les possibles explicacions del que s'ha observat.

Explicació

En aquesta activitat, un cilindre és d'alumini i l'altre de PVC. Quan es col·loquen els cilindres en aigua freda, al començament suren perquè les seves densitats són inferiors a la de l'aigua freda. Amb el temps, el cilindre de PVC es refreda i es contrau i per tant la seva densitat canvia. (Disminueix el seu volum, però la seva massa segueix sent la mateixa). Quan la densitat del cilindre excedeix la de l'aigua, el de PVC s'enfonsa. El cilindre d'alumini també es refreda, però l'alumini s'expandeix i contrau molt menys que el PVC quan experimenta el mateix canvi de temperatura (és a dir, que té un "coeficient d'expansió tèrmica" més petit). Per tant, la densitat del cilindre d'alumini està menys afectada pel canvi de temperatura, i queda surant. Quan col·loquem els cilindres en aigua calenta, la densitat de l'aigua és ara menor que la del cilindre d'alumini, i el cilindre s'enfonsa. El cilindre de PVC també és, al començament, més dens que l'aigua i també s'enfonsa, però a mesura que va escalfant-se s'expandeix considerablement. Com a resultat d'això, la seva densitat disminueix (de nou, la massa és constant, però el seu volum augmenta). Quan la seva densitat és més petita que la de l'aigua, sura. Aquesta activitat també es pot fer servir al Capítol 1.

ACTIVITAT SUPLEMENTÀRIA

Hem observat que molts alumnes confonen el moment del dia en el què la radiació solar és màxima (el migdia) amb el moment en el qual la temperatura és màxima (a la tarda, unes hores després). Igualment, els alumnes confonen els dies més curts o més llargs de l'any, quan el flux solar entrant està a prop dels seus valors mínims o màxims anuals, amb l'època de l'any en la què la temperatura de l'aire, o la temperatura de l'aigua a l'oceà o als llacs és (en mitjana) més freda o més càlida (ignorant processos no radiatius que afecten la temperatura de l'aigua, com l'aflorament). Aquest problema prové de la confusió entre temperatura i taxa de canvi de la temperatura. La taxa de canvi de la temperatura és proporcional al flux de calor (en absència d'una transició de fase). Podem proposar als estudiants que facin, com a activitat de classe, un croquis de l'aspecte que tindria un gràfic de la temperatura de l'aigua al llarg de l'any. A continuació, els demanarem que vagin a la pàgina web del GOMOOS (<http://www.gomoos.org/gnd/> o qualsevol altra pàgina web que proporcioni dades de temperatura de la superfície del mar en temps present) per a representar la temperatura superficial del mar (amb valors mitjans setmanals o diaris) al llarg de l'any, i observar quan la temperatura de l'aigua o la de l'aire és màxima (aquesta activitat es pot realitzar com a tasca per fer a casa). A classe, parlarem de la diferència entre la temperatura i la taxa de canvi de temperatura associada al flux de calor. Per exemple, el flux de calor per radiació a l'Estat de Maine (és a dir, la taxa de canvi de la temperatura) és, de mitjana, més baix al desembre i més alt a juny (associat al dia més curt i més llarg de l'any, respectivament). L'oceà i l'atmosfera, tot i així, continuen perdent calor a partir de desembre (o guanyant calor a partir de juny), malgrat que el flux de calor per radiació no està al seu valor mínim (o màxim) anual. Així, la temperatura de l'aigua segueix baixant després de desembre i segueix en augment després de juny. La temperatura deixarà de canviar (assolint un valor màxim o mínim) quan el guany de calor sigui igual a la pèrdua. Al Golf de Maine, la màxima temperatura mitjana de la superfície del mar es dona a setembre, no a juny. Un argument semblant pot servir per explicar per què el moment més calent del dia no és a les 12 del migdia, quan el flux de radiació solar entrant està a prop del seu màxim valor, sinó unes hores més tard. Una analogia amb la què alguns estudiants estan potser més familiaritzats és el desfasament temporal que hi ha entre l'acceleració màxima d'un cotxe quan trepitgem l'accelerador i quan la velocitat del cotxe es màxima (la qual cosa succeeix més tard, quan els processos d'acceleració i de desacceleració són iguals). En termes de moviment,

l'acceleració (taxa de canvi de velocitat) és l'anàleg, en termes de calor, al flux de calor (proporcional a la taxa de variació de la temperatura, suposant que no hi ha transicions de fase).

REFERÈNCIES

- 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. Capítols 8 i 9 a *Conceptual Physics Fundamentals*. Pearson Addison-Wesley.
- Lombard, A., A. Cazenave, P.Y. Le Traon, & 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, & M.J. Antunes. 1995. An attempt to overcome alternative conceptions related to heat and temperature. *Physics Education* 30:19–26.

D'ALTRES RECURSOS

- Sorbján, Z. 1996. *Hands-On Meteorology: Stories, Theories, and Simple Experiments*. American Meteorological Society, Washington, DC. Una col·lecció d'experiments pràctics dissenyats sobre conceptes de meteorologia. El Capítol 4 s'ocupa de la calor. A més dels experiments, el llibre conté narrativa històrica, referències a descobriments importants i històrics sobre científics famosos i infames.
- <http://cosee.umaine.edu/cfuser/index.cfm>. La interfície web d'oceà-clima COSEE-OS proporciona imatges, vídeos, notícies i recursos associats a l'emmagatzematge de calor a l'oceà, la temperatura de la superfície del mar, els processos de transport de calor convectiu i advection, l'escalfament global i l'efecte hivernacle.

APRENTATGE EN EQUIP

L'aprenentatge *en equip*, també conegut com a aprenentatge cooperatiu, és un enfocament pedagògic en el qual els estudiants treballen en petits grups per tal d'assolir els objectius de l'aprenentatge. L'enfocament ofereix als estudiants l'oportunitat de conversar i portar a terme “pluges d'idees” amb els companys, presentar i defensar les seves idees, i posar en qüestió referències conceptuals. El professor actua facilitant-ne el procés, com a moderador i expert de continguts, en lloc d'ensenyar. L'aprenentatge en equip permet desenvolupar aptituds per a resoldre problemes, comunicar-se i estimula el pensament crític. A més, pot augmentar l'autoestima dels estudiants i la seva capacitat per a treballar amb d'altres, així com per a millorar la seva actitud cap al procés d'aprenentatge (Slavin, 1981). S'ha escrit molt sobre aquesta estratègia; en particular recomanem un llibre escrit per un oceanògraf (McManus, 2005). A la pàgina web de la Universitat d'Oklahoma es pot trobar també gran quantitat d'informació sobre el tema (<http://teambasedlearning.apsc.ubc.ca/>). El nostre objectiu aquí és destacar alguns elements clau de l'aprenentatge cooperatiu, ja que aquesta estratègia s'integra bé en l'ensenyament basat en preguntes i els enfocaments d'aprenentatge que proposem aquí.

L'aprenentatge en equip es pot aplicar tant a dins com a fora de l'aula i del laboratori, per tal d'ajudar els estudiants a perfeccionar els deures de classe. Es pot plantejar de diverses formes (veureu per exemple, Hassard, 2005; Joyce i Weil, 2009), com ara:

- *Pensar per parelles*. Primer es demana individualment a cada estudiant que pensi en una pregunta o un problema de forma independent i, a continuació, que ho comentí amb l'estudiant assegut al seu costat. Cada parella compartirà posteriorment les seves idees amb la resta de la classe.
- *Taula rodona o cercle de coneixement*. Un grup de tres o més estudiants fan una “pluja d'idees” sobre un problema assignat i les anoten. Posteriorment, cada grup presenta les seves idees a la resta de la classe.
- *Trencaclosques*. A cada estudiant de l'equip se li assigna que investigui un dels aspectes del tema que s'està estudiant. Els estudiants que tinguin assignat el mateix

aspecte del tema en els diferents equips, formaran “grups d'experts” per reflexionar i discutir sobre la qüestió.

Després cadascun d'aquests “experts” mostrarà les seves troballes a la resta de membres del seu equip.

- *Controvèrsia constructiva*. S'assignen aspectes contraris d'un mateix problema a equips o parelles d'estudiants. Cada equip farà les seves investigacions i prepararà i presentarà els seus arguments. El problema es discutirà en classe quan tots els equips hi hagin presentat els seus arguments.

ELEMENTS ESSENCIALS

Independentment de l'estratègia específica utilitzada per a l'aprenentatge en equip, l'èxit d'aquesta metodologia de treball depèn d'alguns elements essencials. En primer lloc, l'instructor ha de promoure la disposició individual i del grup per a l'aprenentatge, i s'ha d'assegurar que l'equip estigui mentalitzat que el seu objectiu és l'aprenentatge en grup i no una activitat merament social. En segon lloc, l'instructor ha d'aconseguir que hi hagi interdependència entre tots els estudiants de l'equip i transmetre'ls que “anar a remolc” dels altres és inacceptable. Els companys d'equip han de saber que l'èxit de l'equip depèn de l'aprenentatge individual de cada membre i tots han de sentir que es necessiten els uns als altres, per tal d'assolir la tasca encomanada a l'equip (és a dir, que “són tots dins del mateix vaixell i naveguen o s'enfonsen plegats”). Aquests dos primers elements es poden aconseguir repartint les tasques, assignant rols, proporcionant retroalimentació, i valorant els resultats de l'aprenentatge individual. Per evitar una situació problemàtica (“anar a remolc”), els membres de l'equip han de saber que poden ser designats a l'atzar per a assumir funcions de direcció i representació dels seus equips durant les discussions a classe.

Un altre element important és que els estudiants han d'aprendre i desenvolupar habilitats de cooperació. Entre aquestes habilitats s'inclouen aquelles que permeten treballar junts de manera eficaç (per exemple, mantenir l'atenció, no sortir-se de la tasca, resumir i anar anotant les idees),

CONTINÚA EN LA PÁGINA SIGUIENTE...

APRENTATGE EN EQUIP, CONTINUACIÓ...

així com les que ajuden a mantenir l'esperit de grup (per exemple, animar els companys, proporcionar retroalimentació). Per últim, els estudiants han de tenir l'oportunitat de reflexionar sobre el seu nivell d'eficàcia funcionant com a equip. L'avaluació del funcionament del grup i de com estan utilitzant les seves habilitats de col·laboració pot ser avaluada tant de forma individual com global, a nivell de grup o de tota la classe.

La nostra experiència és que aquest enfocament no agrada inicialment als estudiants que no han estat mai involucrats en l'aprenentatge cooperatiu, ja que estan més preocupats en com les seves qualificacions es veuran afectades pels altres membres de l'equip. Així doncs, els diem que l'avaluació que han fet els companys de grup sobre el projecte de l'equip i la seva funcionalitat, contribuirà com a una certa fracció de la nota final. Aquesta avaluació de l'equip es realitza per cada membre de l'equip de forma individual, i s'informa que les avaluacions es compartiran entre els altres membres de l'equip. Es proposa als estudiants que avaluïn la bona col·laboració de l'equip mitjançant preguntes (per exemple, Angelo i Cruz, 1993) com ara:

- Quina va ser la qualitat del treball del grup en conjunt en aquesta tasca?
- Quants membres del grup van participar activament durant la major part del temps?
- Quants membres del grup estaven plenament preparats per al treball en grup durant la majoria del temps?
- Dóna un exemple concret d'alguna cosa que vas aprendre del grup i que probablement no hauries après treballant tot sol.
- Dóna un exemple concret d'alguna cosa que la resta de membres va aprendre de tu i que probablement no haurien après d'una altra manera.

A cada estudiant també se li demanarà una autoavaluació, a través de preguntes com ara:

- Et vas sentir a gust treballant amb el grup?
- Vas ser un participant actiu?
- Quanta atenció vas posar als altres membres de l'equip?
- Fins a quin punt vas ajudar a d'altres membres de l'equip a comprendre millor la matèria?

- Has demanat ajut a algun membre de l'equip quan no entenes alguna idea o concepte?

Per últim, a cada estudiant se li demana una avaluació raonada de la contribució en tant per cent (%) de cada membre de l'equip, excepte la seva pròpia, a la tasca assignada. Es pot trobar més informació sobre fórmules per qualificar les avaluacions pels companys a la pàgina web sobre Aprenentatge Basat en Equip: <http://teambasedlearning.apsc.ubc.ca/?pageid=176>.

Els equips poden organitzar-se per part dels propis estudiants (autoselecció) o per l'instructor (a l'atzar o amb alguna finalitat). Tant equips autoseleccionats com equips assignats de forma dirigida o a l'atzar poden donar lloc a grups que no siguin heterogenis o amb capacitat total semblant. Com a regla general, els grups han de romandre junts durant el temps suficient per a experimentar l'èxit com a grup, però no excessiu, per tal d'evitar una dinàmica d'equip contraproduent (per exemple, quan els membres del equip s'encasellen en papers fixos). La mida dels equips també pot variar. En petits grups, cada membre participa més, en general, es requereixen menys habilitats socials, i els grups poden treballar més ràpidament. En grups més grans, es generen més idees i es produeix un menor nombre d'informes de grup.

No n'hi ha prou en proposar simplement als estudiants que treballin junts, perquè el treball en equip reeixi. Els incentius i un sentit de la competència poden millorar la motivació dels estudiants, el compromís i les seves contribucions a l'equip. Les recompenses poden estar basades en els punts de l'equip (l'equip amb més punts guanya), en assolir una determinada meta (un equip que arribi a una qualificació determinada, com per exemple, que tots els membres de l'equip assoleixin una puntuació del 85% o més, rep una recompensa), o en un progrés de l'equip (els estudiants contribueixen al seu equip millorant els resultats de llurs actuacions anteriors). En el progrés de l'equip, tant aquells que aconsegueixen resultats alts, com mitjans o baixos resulten estimulats de la mateixa forma per a millorar, i es valoren les contribucions de tots els membres de l'equip.

REFERÈNCIES

- 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.

CAPÍTOL 5. ONES DE GRAVETAT

OBJECTIU DE LES ACTIVITATS

L'objectiu d'aquestes activitats és que els estudiants es familiaritzin, en general, amb el moviment ondulatori i, més particularment, amb les ones de gravetat. En aquest capítol, es demostraran conceptes com els de ressonància, freqüència natural i *seiche*. Altres temes que s'emfatitzaran a classe són les mesures i els seus estadístics, i l'anàlisi dimensional.

ANTECEDENTS

Les ones són ubiqües en els oceans i els llacs; les ones de gravetat superficials, en particular, esdevenen una imatge molt comuna a les platges. Les ones de gravetat són importants en una gran diversitat de processos oceànics, com la transferència de moment del vent a l'oceà, l'augment de mescla causat pel trencament d'ones, l'erosió de la línia de costa, i l'acumulació de residus i deixalles a les platges. La importància que les ones han adquirit en la cultura popular i d'esbarjo (surf) i la seva potència destructiva (tsunamis), fa que hagin esdevingut un fenomen molt familiar, fins i tot, per aquells estudiants de terra endins. No obstant això, aquestes ones són rarament utilitzades per ensenyar el moviment harmònic als instituts i universitats.

DESCRIPCIÓ DE LES ACTIVITATS

La lliçó s'inicia demanant als estudiants que descriguin les ones oceàniques que els siguin més familiars. La gran majoria coneixeran les ones de gravetat superficials, els tsunamis, el so i la llum. S'utilitza un Slinky¹¹ per demostrar les diferències existents entre ones transversals i longitudinals (per exemple, Hewitt, 2008). Es debat sobre descriptors d'ona com la longitud d'ona, freqüència, amplitud, període, velocitat de propagació (o de fase), i la direcció del moviment de les partícules en el medi. S'explica allò que transporten les ones (energia, informació) en oposició al què no transporten (components del medi; per exemple, l'escuma oscil·la amunt i avall al pas de les ones, però no es propaga significativament amb elles al llarg d'un període d'ona). S'estableix una analogia amb l'ona generada pels espectadors d'un estadi quan s'aixequen i alcen els braços consecutivament. L'ona viatja a través de la multitud, per la qual cosa resulta fàcil observar com la informació es transfereix mentre el públic roman al seu lloc. Es pot guanyar temps si, amb anterioritat a

la classe, es proporciona als alumnes material de lectura (per exemple, Capítol 13 de Denny, 1993) per tal de familiaritzar els estudiants amb les ones, i així poder explorar a la classe temes addicionals tals com les ones de capil·laritat i internes. Les activitats que es citen a continuació es presenten com una seqüència que la classe ha de seguir de manera col·lectiva, amb els estudiants asseguts en petits grups de tres o quatre membres per a facilitar el debat.

ACTIVITAT 5.1. VELOCITAT DE L'ONA I PROFUNDITAT DE L'AIGUA (Figura 5.1)

Materials

- Tancs rectangulars amb marques 1,5 cm i 6 cm sobre el fons (disponibles en sciencekit.com)
- Cronòmetres
- Recipient amb aigua

Procediment i explicació

Primer es demana als estudiants que suggereixin quines característiques podrien modificar la velocitat d'ones de petita amplitud (per "petita", s'entén que la seva alçària $\ll$ longitud d'ona). Quantitats freqüentment suggerides són la gravetat (g , acceleració gravitacional [la força recuperadora], de dimensions L/T^2), la longitud d'ona (λ , de dimensions L), profunditat (H , de dimensions L), i la densitat (ρ , de dimensions ML^{-3}). Si es considera únicament l'anàlisi dimensional (Quadre 5.1), s'obté que la velocitat de propagació de l'ona ha de ser proporcional a $\sqrt{gH}$ o $\sqrt{g\lambda}$ multiplicat per qualsevol funció d' H/λ . En termes generals, les ones amb una longitud d'ona més petita que la profunditat per sobre de la qual viatgen (és a dir, ones d'aigües profundes, $\lambda \ll H$) no interactuen amb el fons, i la seva velocitat depèn de la longitud d'ona (s'anomenen ones dispersives). Per contra, les ones amb una longitud d'ona més gran que la profunditat per sobre de la qual viatgen (és a dir, ones d'aigües somes, $\lambda \gg H$) interactuen amb el fons marí, i en conseqüència esperem que la profunditat sigui un factor important en la seva propagació (aquestes són ones "no-dispersives"). Ones amb una longitud d'ona llarga penetren a major profunditat (tant la profunditat de penetració de l'ona com la disminució de la seva amplitud des de la superfície fins al fons tenen la mateixa escala que la seva

¹¹ Un Slinky® és una joguina simple i tradicional. Es tracta d'una molla fabricada de plàstic o metall. Quan està comprimida només té uns pocs centímetres de gruix, però al dsecomprimir-la es pot arribar a estirar-se diversos metres.

QUADRE 5.1. ANÀLISI DIMENSIONAL

L'anàlisi dimensional és una tècnica poderosa utilitzada per a explorar les possibles relacions existents entre un fenomen observat i les seves variables físiques associades. La majoria de quantitats físiques es poden expressar en termes d'alguna combinació de cinc dimensions: longitud (L), massa (M), temps (T), intensitat del corrent elèctric (I), i temperatura (t).

Per exemple, suposem que ens agradés conèixer quins atributs físics determinen el període d'un pèndol. Les característiques físiques del pèndol són la seva massa (m , $[M]$) i la longitud de la corda (l , $[L]$). La força de recuperació que actua sobre el pèndol és la gravetat (associada a l'acceleració gravitacional g $[L/T^2]$). Com podem utilitzar totes aquestes variables per a obtenir la dimensió física del temps associada al període del pèndol? L'única combinació que proporciona aquesta dimensió és $\sqrt{l/g}$. Sorprenentment (per a alguns), aquesta simple anàlisi suggereix que el període d'un pèndol és independent de la seva massa. Aquests resultats es poden comprovar empíricament amb facilitat.

Les anàlisis dimensionals han estat molt útils en la dinàmica de fluids en general i, particularment, en la dinàmica de fluids geofísics, donada la complexitat i no-linealitat de les descripcions matemàtiques que governen aquests fenòmens. L'ús de les dimensions físiques i de l'escalat ajuda a simplificar les equacions (mitjançant la desestimació de termes) per a investigar un fenomen determinat.

longitud d'ona). L'ona està en una interfase, però el moviment associat a l'ona es percep en la profunditat. Per comprovar que la velocitat de l'ona depèn de la profunditat del fluid, es du a terme la següent activitat.

Cada grup d'estudiants rep un tanc rectangular (de llargada $L = 30$ cm) que s'omple d'aigua fins a una fondària de 1,5 cm. Es demana als estudiants que generin una ona aixecant un dels costats del tanc i retornant-lo tot seguit sobre la taula, i que anotin el nombre de vegades que la pertorbació rebota cap endavant i cap enrere de les parets del tanc durant un interval de temps de 5 s (hi ha aproximadament uns 6 oscil·lacions en aquest període, Figura 5.1). Seguidament es convida els estudiants a reflexionar com convertirien aquesta informació en una mesura de velocitat (longitud del tanc multiplicat pel nombre d'oscil·lacions per unitat de temps = $30 \text{ cm} \times 6/5 \text{ s} \approx 0,36 \text{ m/s}$, comparat amb la velocitat calculada a partir de l'anàlisi dimensional: $\sqrt{gH} = 0,38 \text{ m/s}$). La incertesa esperada és de l'ordre de 10-20% (degut al temps de reacció i a la precisió amb què es localitza la posició de la pertorbació al final de l'experiment). A continuació s'omplen els tancs fins a una profunditat de 6 cm. La repetició de les mesures de propagació de l'ona mostra que aquesta rebota unes 12 vegades en 5 s (velocitat $\approx 0,72 \text{ m/s}$, comparada a la velocitat calculada a

partir de l'anàlisi dimensional: $\sqrt{gH} = 0,76 \text{ m/s}$). És convenient clarificar que els resultats no depenen de l'amplitud inicial de l'ona (que varia entre els diferents grups d'estudiants). L'ona en el tanc té una longitud d'ona de 60 cm ($\lambda \gg H$). Es comenta el fet que, en cas que la predicció teòrica fos correcta (dependència en $\sqrt{H}$), si la profunditat es quadruplica la velocitat de l'ona s'hauria de doblar i, en conseqüència, també la distància



Figura 5.1. Velocitat i profunditat de l'ona. Estudiants mesurant el nombre d'oscil·lacions en el tanc omplert amb aigua fins a una profunditat de 1,5 cm.

recorreguda en 5 s (tal i com s'observa). En el cas que participessin diversos grups o es fessin rèpliques dels experiments, es podrien explicar i calcular descriptors estadístics dels resultats, com la velocitat mitjana i mediana, i mesures de la variància i la seva incertesa.

Arribats a aquest punt, es pregunta als estudiants si un tsunami és una ona d'aigües profundes o somes. Com que l'extensió lateral d'un tsunami ve determinada per la longitud de la zona de ruptura de la falla durant el terratrèmol (~ 100.000 m), i la profunditat màxima de l'oceà és significativament més petita (~ 11.000 m), aleshores un tsunami es classifica com una ona d'aigües somes. Però llavors, perquè és tan destructiu? Degut al fet que la velocitat depèn de la profunditat ($\sim \sqrt{H}$), les ones de gravetat superficials es desacceleren a mesura que la batimetria esdevé menys profunda i la seva longitud d'ona decreix. És a dir, el "front" de l'ona d'aigües somes es propaga més lentament que la seva "part posterior" quan la profunditat disminueix. El descens de la profunditat produeix un increment de la pendent de l'ona (a mesura que les valls i les crestes de l'ona s'apropen), fins que, en un moment donat, l'ona trenca. Un tsunami a alta mar, pot tenir una velocitat de cents de quilòmetres per hora, mentre que la seva alçària pot ser de només pocs centímetres. No obstant això, a mesura que l'ona s'apropa a la costa la seva velocitat disminueix i la seva alçària s'incrementa significativament, a vegades assolint molts metres d'altura.

La desacceleració de les ones en aigües somes també causa la refracció de l'ona quan incideix sobre la platja obliquament. La refracció d'ona, ben coneguda per alguns com la llei de Snell, atribueix el canvi en la direcció del front de l'ona a un canvi en la velocitat de propagació. A mesura que una ona s'apropa al litoral formant un cert angle amb la costa i "percep" el fons marí, la part del "tren d'ona" que entra en aigües somes es desaccelera en comparació a la part que encara roman en aigües profundes, i provoca que el tren d'ones s'alineï estretament amb els contorns batimètrics. Es poden trobar molt bones imatges de refracció d'ones a la Xarxa si s'utilitza la recerca d'imatges de Google.

ACTIVITAT 5.2. ONES INTERNES (Figura 5.2)

Materials

- Tancs rectangulars d'aigua amb una paret divisòria de plàstic (disponibles a sciencekit.com)
- Cronòmetres
- Dues cubetes, una amb aigua dolça i l'altra amb aigua salada (o ensucrada) acolorida (amb 75 g de sal grossa diluïda en 1L d'aigua de l'aixeta)

Procediment i Explicació

S'utilitzen els mateixos tancs rectangulars de l' Activitat 1.4 (capes de fluids estratificades a l'oceà) per demostrar i explicar les ones internes que es formen a la interfície entre fluids de diferent densitat. Els tancs es poden dividir en dos compartiments introduint-hi un separador de plàstic. Es demana als estudiants que omplin un compartiment amb aigua dolça i l'altre amb aigua salada (o ensucrada) acolorida, i se'ls pregunta què succeirà quan es tregui la barrera (veure també Activitat 1.4). Aleshores es retira la paret divisòria i el fluid més dens flueix per sota del menys dens. Quan el fluid de cada compartiment arriba al costat oposat del tanc, una ona interna es propaga cap enrere i cap endavant, al llarg de la interfície entre els dos fluids de diferent color (Figura 5.2). Es sol·licita als estudiants que mesurin la velocitat de l'ona, que és significativament més lenta que la de les dues ones de gravetat superficials de l'Activitat 5.1.

A l'oceà, el trencament d'ones internes és el responsable de la mescla de calor i nutrients que té lloc a la base de la capa de mescla i en la proximitat de topografies inclinades (veure per exemple, Kunze & Llewellyn Smith, 2003). Les ones internes també poden fer pujar aigües des de les capes fosques profundes fins a zones més il·luminades properes a la superfície, on les poblacions de fitoplàncton poden captar llum suficient per a créixer. L'amplitud de les ones internes de gravetat és significativament més gran per a una mateixa energia d'excitació i longitud d'ona que la de les ones de gravetat superficials, degut al fet que la força de recuperació gravitacional (i l'energia potencial associada a aquestes ones) per a una alçària de l'ona equivalent és més



Figura 5.2. Ones internes. Una ona interna en la interfície entre dos fluids de diferent densitat (l'aigua blava és més densa que l'aigua clara). Al costat dret del tanc es mostra la pala d'ones que es pot utilitzar per comprovar la ressonància (veieu explicació en el text), mentre que al costat esquerre s'ensenya una peça de plàstic que simula una topografia canviant.

petita que per a les ones internes, donada la petita diferència de densitat que hi ha entre les capes d'aigua, en comparació amb la diferència de densitat entre l'aigua i l'aire de les ones de gravetat superficials. (Per a una descripció alternativa de les ones internes veure Franks & Franks, 2009).

En aquest moment s'introdueixen els conceptes de *seiche*¹² i *ressonància*. Al pertorbar el sistema de dues capes quan s'aixeca la paret divisòria del tanc, moltes ones es generen inicialment. No obstant això, només romanen aquelles ones que encaixen (o ressonen) amb la geometria de la cubeta. Al final només en queda una de sola que es propaga cap endavant i cap enrere a un ritme determinat. De manera similar al que succeeix en un instrument musical on es produeix un to primari diferent segons la mida de la corda o de la cavitat d'aire, la geometria de la cubeta d'aigua (per exemple, el tanc experimental, un llac o una badia) determina quines ones s'exciten quan s'aplica i s'atura un forçament (per exemple, el que es genera degut al pas d'una tempesta). Aquestes ones són modes "naturals" de la conca i s'anomenen "seiche", la freqüència de les quals es descriu com la freqüència "natural". Quan es força un tanc a la seva freqüència natural s'exciten aquestes ones, fenomen anomenat "ressonància". Per a explicar la ressonància s'utilitza una pala d'ones (una peça ampla de plàstic d'uns 2 cm d'alçada, amb una amplada similar a la del tanc; Figura 5.2). S'enfonsa i s'aixeca la pala dins el tanc amb aigua estratificada durant un període coincident amb el de les ones excitades anteriorment. És a dir, quan s'aplica un forçament de període curt (per exemple, enfonsant i aixecant la pala a una freqüència de ~1 s), es formen ones de gravetat superficials (cal anar en compte en no vessar l'aigua). Quan s'aplica un forçament de període més llarg (per exemple, enfonsant i aixecant la pala a una freqüència de ~10 s), es formen ones internes. Es pot simular una topografia de poca profunditat introduint amb un cert angle una peça de plàstic en un dels extrems del tanc, la qual cosa permet observar el trencament de les ones internes (Figura 5.2).

ACTIVITAT 5.3. OSCIL·LACIONS DE FLOTABILITAT (Figura 5.3)

Materials

- Una cilindre graduat (proveta) que contingui un fluid estratificat (aigua salada al fons i aigua dolça a la superfície)
- Una pilota de ping-pong amb fang adherit com a llast (o un tub d'assaig ple de volanderes [pesos] com a llast) de tal manera que la pilota (o el tub d'assaig) se situï prop de la interfície entre els dos fluids



Figura 5.3. Oscil·lacions de flotabilitat. Un objecte de densitat intermèdia roman en repòs entre una capa de fluid més densa al fons i menys densa a la superfície. Si l'objecte és empès cap avall, aquest oscil·larà amb una freqüència que dependrà de la diferència entre les dues densitats.

Procediment i explicació

Les oscil·lacions de flotabilitat, les ones internes de major freqüència existents a l'oceà, es poden explicar fàcilment utilitzant una proveta graduada i un flotador calibrat (Figura 5.3, costat esquerre) o bé una pilota de ping-pong amb fang adherit a mode de llast (Figura 5.3, costat dret). Primer s'introdueix l'aigua salada densa i es cobreix amb aigua dolça. Seguidament s'endinsa el flotador a la interfície entre les dues capes i se'l pertorba prement-lo cap avall amb una barra prima. La freqüència d'oscil·lació (denominada freqüència de flotabilitat o de Brunt-Väisälä) és funció de la diferència de densitat entre les dues capes. Aquesta freqüència és proporcional a l'arrel quadrada del gradient de densitat, tal i com s'espera a partir de l'anàlisi dimensional. Els estudiants poden examinar aquesta dependència cronometrant les oscil·lacions en provetes que continguin diferents gradients de densitat. Es pot explicar la descripció matemàtica d'aquest problema als alumnes més avançats. Les matemàtiques són relativament senzilles (donen lloc a una equació ondulatoria unidimensional) i molt gratificants (per exemple, Gill, 1982).

El tema de les ones en fluids és ampli i fascinant alhora (veieu, per exemple, els llibres de text avançats de LeBlond i Mysak, 1978, i Lighthill, 1978). Els fluids són capaços de produir un gran ventall d'ones, abastant conceptes físics que comprenen des de la tensió superficial fins al so i la llum, i des de les ones de gravetat fins a ones de vòrtex planetàries (ones de gran escala que posseeixen una quantitat considerable d'un moment angular,

¹² *Seiche*: Oscil·lació periòdica de la superfície d'una massa d'aigua en un lloc tancat o semitancat (llac, badia, ria, etc.) causada per fenòmens tals com un canvi en la pressió atmosfèrica, corrents de marea o terratrèmols. El terme prové del francès, fons d'un llac sec, probablement de *sèche*, femení de sec.

essent afectades per la rotació terrestre). Donat que les ones són les portadores d'informació en un fluid, tot canvi en el forçament (per exemple, un canvi en el patró de vents sobre l'oceà) provoca l'excitació d'ones. Un bon exemple és la transició de La Niña/El Niño, quan els vents alisis es debiliten significativament sobre la regió del Pacífic equatorial. Aquest canvi excita ones de Kelvin que es propaguen d'oest a est al llarg de l'equador, tal i com es pot observar en imatges de l'altura de la superfície oceànica captades per sensors remots (per exemple, <http://oceanmotion.org/html/impact/el-nino.htm>). També es pot observar el seu impacte en la biologia oceànica en imatges/dades de color de l'oceà captades per sensors remots (per exemple, http://svs.gsfc.nasa.gov/stories/el_nino/index.html).

REFERÈNCIES

- 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., & S.E.R. Franks. 2009. Mix it up, mix it down: Intriguing implications of ocean layering. *Oceanography* 22(1):228-233. Disponible online a: <https://tos.org/hands-on-oceanography> (accessible des del 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., & S.G. Llewellyn Smith. 2003. The role of small-scale topography in turbulent mixing of the global ocean. *Oceanography* 17(1):55-64. Available online at: http://www.tos.org/oceanography/issues/issue_archive/17_1.html (accessible des del 13 d'Agost de 2009).
- LeBlond, P.H., & 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 ADDICIONALS

- Duxbury, A.C., A.B. Duxbury, & K.A. Sverdrup, 2000. Capítol 9 in *An Introduction to the World's Oceans*, McGraw-Hill.
- Garrison, T., 2009. Capítol 9 in *Essentials of Oceanography*, 5th ed., Brooks/Cole Publishing Company, Pacific Grove, CA.
- Pinet, R. 2000. Capítol 7 in *Invitation to Oceanography*. Jones and Bartlett Publishers Inc., Sudbury, MA.
- Pond, S., & G.L. Pickard, 1983. Capítol 12 in *Introductory Dynamical Oceanography*. Pergamon Press.
- Thurman, H.V. 1997. Capítol 9 in *Introductory Oceanography*. Prentice Hall.
- Waves, Tides and Shallow-water Processes*. The Open University, Pergamon Press.
- Pel·lícules sobre ones internes en fluids contínuament estratificats: http://www.gfd-dennou.org/library/gfd_exp/exp_e/exp/iw/index.htm
- Pel·lícules sobre cizallament induït pel trencament d'ones internes (inestabilitat de Kelvin-Hemholz): http://www.gfd-dennou.org/library/gfd_exp/exp_e/exp/kh/1/res.htm

AGRAÏMENTS

La nostra aproximació a l'ensenyament de la ciència va sorgir i va ser alimentada per un esforç de cooperació que va implicar a científics, experts en educació i professors de ciències amb els que havíem treballat a llarg dels anys. Com en qualsevol altra col·laboració interdisciplinària, va portar temps i perseverança establir un esforç ben integrat de col·laboració educativa. Ens va exigir obrir-nos a cultures professionals que no ens eren familiars i informar-nos sobre termes que desconexíem. Els innumerables beneficis obtinguts per als nostres estudiants i per a nosaltres mateixos, tot i així, demostren la vàlua de tot l'esforç. Agraïm al programa COSEE de la National Science Foundation per facilitar i donar suport a aquesta col·laboració i per subvencionar aquest suplement d'*Oceanography*. També agraïm a tots els estudiants i professors que han pres part en el desenvolupament d'aquestes activitats i que van proporcionar una retroalimentació molt útil. També volem agrair a l'Annette deCharon el seu suport i encoratjament i a en John Thompson, les seves discussions inspiradores. Donem les gràcies també a la Sharon Franks, en Robert Feller i la Tonya Clayton per les seves revisions exhaustives i els seus excel·lents comentaris que han millorat enormement el manuscrit. Finalment, la publicació d'aquest document no hauria estat possible sense el suport i entusiasme de l'Ellen Kappel. A ella i a la Vicky Cullen els agraïm llur dedicat i excel·lent treball d'edició, i a la Johanna Adams, el maquetat i disseny.

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

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



THE OCEANOGRAPHY SOCIETY

CATALAN VERSION | APRIL 2021