

María Villa Alfageme

Descifrando los océanos: el secreto está en la física

LECCIÓN INAUGURAL
DE LA E.T.S. DE INGENIERÍA DE EDIFICACIÓN
UNIVERSIDAD DE SEVILLA

Curso Académico 2023-2024



Descifrando los océanos:
el secreto está en la física

MARÍA VILLA ALFAGEME

Departamento de Física Aplicada II
Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Edificación

Descifrando los océanos: el secreto está en la física

Lección inaugural leída en la apertura
del curso académico 2023-2024
en la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Edificación.
Universidad de Sevilla



Escuela Técnica Superior de
Ingeniería de Edificación



Sevilla 2023

Colección: **Textos institucionales**

Núm.: 116

Reservados todos los derechos. Ni la totalidad ni parte de este libro puede reproducirse o transmitirse por ningún procedimiento electrónico o mecánico, incluyendo fotocopia, grabación magnética o cualquier almacenamiento de información y sistema de recuperación, sin permiso escrito de la Editorial Universidad de Sevilla.

© Editorial Universidad de Sevilla 2023

Porvenir, 27 - 41013 Sevilla.

Tlfs.: 954 487 447; 954 487 451; Fax: 954 487 443

Correo electrónico: info-eus@us.es

Web: <https://editorial.us.es>

© María Villa Alfageme 2023

Impreso en papel ecológico

Impreso en España-Printed in Spain

DOI: <https://dx.doi.org/10.12795/9788447225231>

Maquetación: Editorial Universidad de Sevilla

The ocean's Twilight Zone is the dimly lit region extending from a few hundred metres depth to 1,000m. It is poorly understood from almost any perspective.

JETZON – Joint Exploration of the Twilight Zone Ocean Network.

Índice

Saluda	7
Introducción.....	8
Fluidos, convección y corrientes oceánicas para definir el clima en la Tierra.....	10
Ecuación de Stokes, el flujo, el almacenamiento de carbono en el océano y cambio climático	25
Epílogo.....	40
Biografía	41

*Señor Rector Magnífico de la Universidad de Sevilla,
Señora Directora de la Escuela Técnica Superior de
Ingeniería de Edificación de la Universidad de Sevilla,
Señora Directora Académica de Ulyseus
Señor Presidente de la Autoridad Portuaria de Sevilla
Señor Presidente del Consejo Andaluz de Colegios Oficiales de
Aparejadores, Arquitectos Técnicos e Ingenieros de Edificación,
Autoridades Académicas,
Profesorado,
Personal de Administración y Servicios,
Alumnos,
Señoras y Señores.*

La Real Academia Española¹ define la física como la «ciencia que estudia las propiedades de la materia y de la energía, y las relaciones entre ambas». Podemos encontrar otras definiciones, como la que Paul A. Tipler da en su libro *Física para la ciencia y la tecnología*², referencia obligada de los primeros cursos universitarios de Física e Ingeniería: «La física es la ciencia natural que estudia la naturaleza de los componentes y fenómenos más fundamentales del universo, como lo son la energía, la materia, la fuerza, el movimiento, el espacio-tiempo, las magnitudes físicas, las propiedades físicas y las interacciones fundamentales».

Es posible que tras este comienzo el público esté cuestionándose su (sabia) decisión de asistir a este acto, siempre ilusionante, de apertura de curso en nuestra escuela, ya que vamos a hablar de física y esta no es precisamente la

1. RAE, *Diccionario de la lengua española*, 23.^a ed. [en línea] www.rae.es.

2. P. A. Tipler & G. Mosca (2023), *Physics for Scientists and Engineers*. Nueva York: W. H. Freeman.

asignatura más popular. No desespere, querido oyente, pues vamos a hablar del mundo que conocemos, de la sociedad en la que vivimos, de nuestros problemas más acuciantes, de nuestros mejores amigos los océanos y de cómo, quizás de manera inesperada, el secreto está en la física.

Repasaremos conceptos impartidos en las asignaturas de Física general³ de esta y otras escuelas técnicas superiores, pero los observaremos desde otra perspectiva, quizás más llamativa. Y es que hay algo mágico en mirar la naturaleza y, además de describirla, ser capaces de comprenderla y explicarla⁴. Ya sea en nuestras aulas, en una clase de Física en el Grado en Edificación, desde los laboratorios o los artículos de investigación, la física es siempre fascinante.

3. En la Universidad de Sevilla, los profesores de esta asignatura pertenecen al Departamento de Física Aplicada II. Véanse asimismo los apuntes de la asignatura Física II: Fundamentos de las Instalaciones, del Grado en Edificación, en la web de la asignatura de 2023: <http://edifica.us.es/fii/apuntes.htm>.

4. Cf. K. Llaneras, «El premio Nobel por entender el vuelo hipnótico de una bandada de pájaros» *El País*, 8 de octubre de 2021 [en línea].

Fluidos, convección y corrientes oceánicas para definir el clima en la Tierra

Dentro de la mecánica de fluidos, las ecuaciones de Navier-Stokes son las ecuaciones diferenciales en derivadas parciales que describen el movimiento de sustancias fluidas y viscosas⁵ Fueron desarrolladas por el ingeniero y físico francés Claude-Louis Navier y el físico y matemático irlandés George Gabriel Stokes en el s. XIX. Estas ecuaciones se aplican a los llamados fluidos newtonianos describen matemáticamente el balance de la cantidad de movimiento y la conservación de la masa en estos fluidos. Consisten en una ecuación de continuidad, para describir la conservación

5. R. Periañez (2010), *Fundamentos de oceanografía dinámica*. Sevilla: Editorial Universidad de Sevilla.



Busto de Claude-Louis Navier (1785-1836).

Fuente: Wikimedia Commons

de la masa, una ecuación vectorial para la conservación de la cantidad de movimiento y una ecuación de conservación de energía, todas ellas dependientes del tiempo.



Busto de Sir
Georges Gabriel
Stokes (1819-
1903). Fuente:
Wikimedia
Commons

Estas ecuaciones son extremadamente útiles porque describen la física de muchos fenómenos de interés en ciencia e ingeniería, y pueden usarse para modelar la atmósfera, las corrientes oceánicas, el flujo de agua en una tubería o el

flujo de aire alrededor del ala de un avión. Las ecuaciones de Navier-Stokes, tanto en su forma completa como simplificada, tienen multitud de aplicaciones ingenieriles, médicas o medioambientales, por ejemplo, en el diseño de aviones y automóviles, el estudio del flujo sanguíneo, el diseño de centrales eléctricas o el análisis de la dispersión de contaminantes en el medio ambiente.

Mecánica de fluidos es una asignatura fundamental en Ingeniería y Arquitectura. Las ecuaciones de Navier-Stokes en su forma más simplificada se usan en las asignaturas de Introducción a la física e Instalaciones en ingeniería y arquitectura (por ejemplo, en la asignatura Física II en nuestra escuela⁶) para describir, entre otras muchas cosas, el flujo de agua a través de tuberías, la energía y potencias necesarias para conseguir este movimiento, o las pérdidas que pueden tener lugar durante el proceso.

En muchas ocasiones estas ecuaciones van acompañadas de una ecuación de estado que relaciona presión, temperatura y densidad y que puede usarse, por ejemplo, para modelar las corrientes oceánicas y el movimiento de masas de agua en océanos, mares, lagos o ríos.

Una corriente oceánica se define como el movimiento continuo y conducido del agua marina debido al efecto de fuerzas que actúan sobre ella (gravedad, viento), el efecto

6. *Cf.*, de nuevo, la nota 3.

Coriolis y las variaciones en la densidad del agua, entre otros factores. Sus movimientos son principalmente horizontales (ocurren de derecha a izquierda y en menor medida de arriba abajo), y fluyen por grandes distancias. Aunque son impulsadas principalmente por los vientos y por los cambios en la densidad del agua de mar, dependen de muchos otros factores, incluida la forma y la configuración de la cuenca oceánica por la que fluyen, las mareas, la mezcla de distintas masas de agua o los gradientes de temperatura y salinidad.

Esto genera dos tipos principales de corrientes: las corrientes superficiales, impulsadas principalmente por las corrientes debidas al viento y el efecto Coriolis, y las de aguas profundas, producidas por gradientes de salinidad y temperatura, que forman la denominada corriente termohalina (del griego, *termo* = ‘temperatura’ y *halina* = ‘salinidad’).

Este conjunto de corrientes oceánicas es determinante para definir zonas y patrones climáticos por todo el mundo, e influyen en la temperatura de las regiones adyacentes. Ejemplos típicos son las corrientes cálidas que viajan a lo largo de costas más templadas y aumentan la temperatura del área, como la corriente del Golfo que describiremos a continuación.

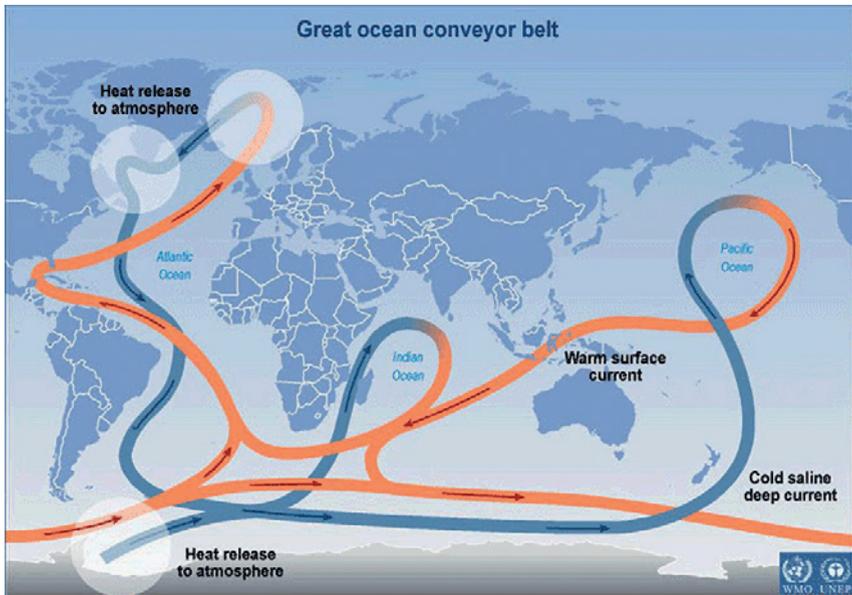
El conjunto de las corrientes oceánicas conforma, en última instancia, la denominada en inglés *Global Meridional Overturning Circulation* (GMOC), también llamada Gran cinta transportadora oceánica (*Great Oceanic Conveyor Belt* en inglés), y juega un papel fundamental en la definición del

clima de muchas regiones de la Tierra. Esta cinta transportadora se define principalmente por la circulación termohalina, aunque veremos que no exclusivamente.

¿Cómo se forma esta cinta transportadora (la llamaremos por sus siglas, GMOC a partir de ahora) y cómo fluye a lo largo de los océanos? ¿Cómo puede influir para establecer patrones climáticos? El secreto para entender su comportamiento está en la física.

Para explicar los fundamentos físicos que subyacen detrás del movimiento de la cinta transportadora debemos introducir un concepto adicional, relacionado con la termodinámica, que es el proceso de transferencia de calor. Esta transferencia describe el flujo de calor (es decir, energía térmica) que aparece con las diferencias de temperatura entre los cuerpos, cómo se realizan su distribución y transporte y cómo son los cambios de temperatura que resultan de este transporte. En el estudio de estos fenómenos intervienen las ecuaciones físicas relacionadas con el intercambio de cantidad de movimiento, energía y masa y con tres posibles mecanismos de intercambio de calor (y, por tanto, de energía) entre los cuerpos.

El proceso de transferencia de calor e introducción a la termodinámica es otro de los temas imprescindibles tratados en las clases de Fundamentos de física en cualquier escuela de Ingeniería y Arquitectura. En concreto, en nuestra escuela nos sirve para establecer las bases de las reglas básicas para



Esquema simplificado de la Global Meridional Overturning Circulation (GMOC) también conocida como la Gran cinta transportadora oceánica.

Fuente: National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)

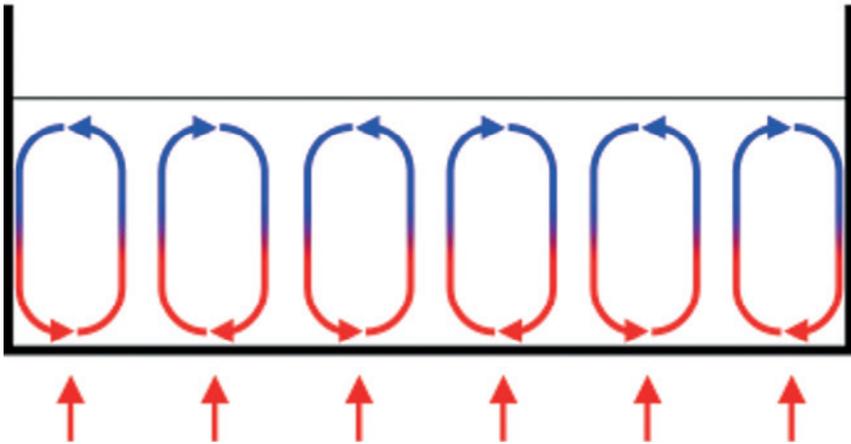
un aislamiento correcto de recintos y edificios. También es básica en las asignaturas sobre eficiencia energética en la construcción.

El calor es transporte (flujo) de energía térmica de un punto a otro debido a una diferencia de temperatura entre ellos, de acuerdo con las leyes de la termodinámica. Existen tres mecanismos de transmisión del calor:

La conducción, que consiste en transferencia de calor por medio de agitación molecular dentro de un material sin que exista transporte de masa dentro de él. Este proceso se rige por la ley de Fourier (dato curioso: Joseph Fourier fue profesor del antes mencionado Claude-Louis Navier).

La radiación, que se emite como resultado de los movimientos aleatorios de átomos y moléculas en la materia, cuya amplitud depende de la temperatura. Dado que estos átomos y moléculas están compuestos de partículas cargadas (protones y electrones), su movimiento provoca la emisión de radiación electromagnética. La radiación térmica es radiación electromagnética infrarroja que transporta la energía hacia fuera de la superficie del cuerpo. Todos los objetos absorben y emiten radiación térmica.

Por último, hablaremos de la convección, que es la que se relaciona con las corrientes termohalinas. Es un proceso de transferencia de calor en el que este se mueve a través de un fluido debido al movimiento del propio fluido. A nivel molecular, la convección tiene su origen en la variación de densidad en un fluido causada por diferencias de temperatura. Cuando una región de un fluido se calienta, las moléculas en esa región tienden a separarse un poco más debido al aumento de la energía cinética, lo que hace que esa región sea menos densa en comparación con una región más fría del fluido. Debido a la diferencia de densidad (causada por la diferencia de temperatura), la región menos densa y más



Esquema de la transferencia de calor por mecanismo de convección.
Fuente: Wikimedia commons

caliente del fluido tiende a subir, mientras que la región más densa y más fría tiende a bajar. A medida que la región caliente y menos densa se eleva, desplaza a la región más fría. Este proceso continúa en un ciclo, con fluido caliente ascendiendo y fluido frío descendiendo, creando corrientes convectivas que facilitan la transferencia de calor.

Un buen ejemplo cotidiano de convección es el agua hirviendo en una olla. Las regiones calientes del agua, cerca de la fuente de calor en la base de la olla, se elevan hacia la superficie debido a su menor densidad. Al llegar a la superficie, el agua libera calor al ambiente y se enfría, lo que la hace más densa y la lleva a descender nuevamente hacia la fuente de calor. Es precisamente por estas corrientes de convección

que los procesos de calentamiento y enfriamiento de un recinto mediante bombas de frío y calor son tan rápidos.

El gran movimiento global de masas en los océanos está causado por una combinación de las corrientes termohalinas en el océano profundo y las corrientes derivadas del viento en su superficie. En pocas palabras, cuando se forman masas de agua fría y salada, más densas, en la superficie, estas se hunden hasta el fondo del océano, mientras que las masas de agua caliente, menos densas, afloran y/o permanecen en la superficie. Así, se forman corrientes termohalinas que producen, mediante el procedimiento de convección que hemos explicado, transmisión de calor de unas zonas a otras del océano.

Esta cinta transportadora forma un ciclo cerrado. Para describir su formación lo más sencillo es comenzar por los mares Nórdicos y el mar del Labrador. Situados en el océano Ártico, son lugares principales de formación en el norte de las llamadas aguas profundas, donde las masas de agua densas (y frías) se hunden en las cuencas oceánicas. En estos puntos de formación el agua de mar en la superficie del océano se enfría intensamente por el viento y las bajas temperaturas del aire ambiental. El viento, al soplar sobre el agua, produce además gran cantidad de evaporación de una manera muy rápida, lo que hace que disminuya la temperatura del agua superficial (enfriamiento evaporativo). Dado que la evaporación elimina solo las moléculas de agua,

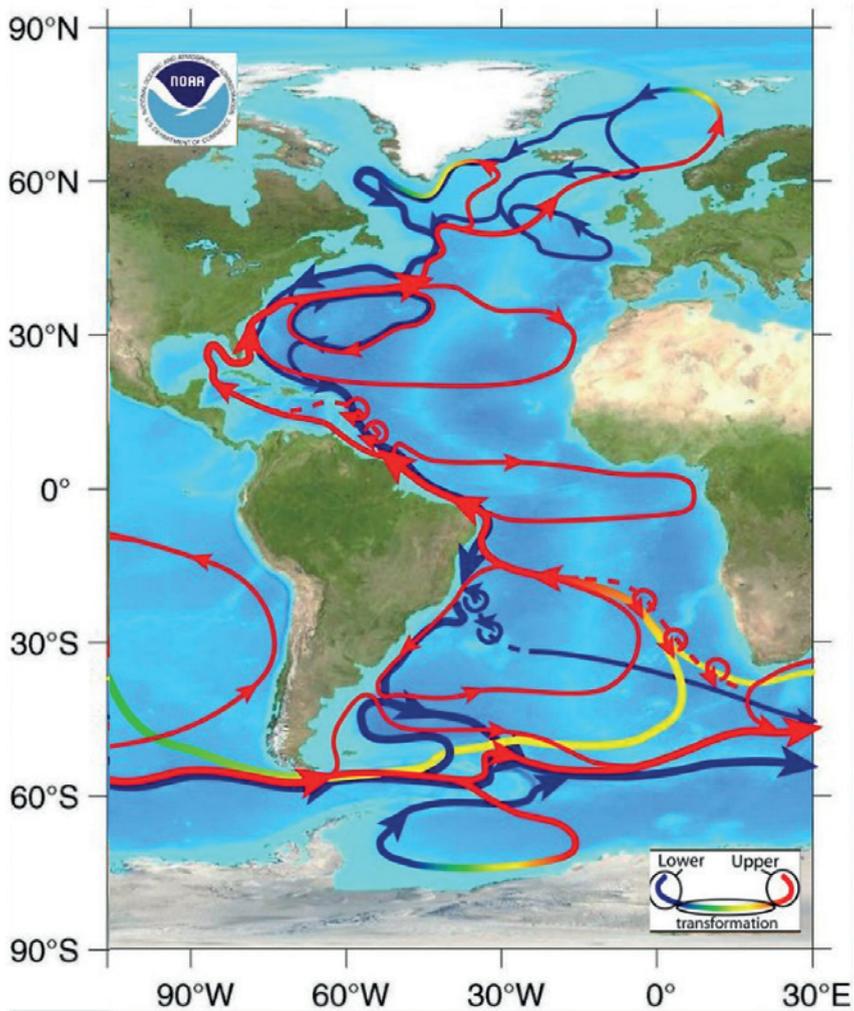
se produce un aumento en la salinidad del agua superficial y, por lo tanto, un aumento en la densidad de la masa de agua, además del producido por la disminución de la temperatura. En estas zonas donde predomina el enfriamiento evaporativo, las masas de agua más densas se hunden, llenando la cuenca y fluyendo en profundidad hacia el sur a través de las conexiones entre Groenlandia, Islandia y Gran Bretaña. Luego fluyen muy lentamente hacia las profundas llanuras abisales del Atlántico, siempre en dirección sur. En el océano Antártico, procesos similares de rápido enfriamiento y aumento de la densidad del agua superficial producen zonas específicas de aguas profundas, que en este caso recorren el continente antártico hacia el este y norte.

El modelo de cinta transportadora explica cómo, para cerrar el circuito termohalino, es preciso que haya lo que se denomina afloramiento (*upwelling*) de las aguas que se hundieron en los océanos Ártico y Antártico, además de un transporte de masas de agua menos densas y cálidas, y por tanto superficiales, hacía el norte. Así, parte de las aguas profundas árticas afloran en el océano Antártico, donde vuelven al océano Atlántico de sur a norte. El resto de las aguas profundas fluyen a través de la cuenca del océano Antártico alrededor de Sudáfrica, donde se dividen en dos rutas: una hacia el océano Índico, y otra hacia el Pacífico Sur, más allá de Australia, donde afloran las aguas más antiguas.

La corriente del Golfo contribuye en gran medida al transporte de masas de agua y calor de sur a norte, en una poderosa corriente de agua caliente que atraviesa el océano Atlántico. Comenzando en el golfo de México, la corriente viaja alrededor de Florida y se acelera por la costa este de los Estados Unidos y Canadá, antes de cruzar el océano Atlántico. Posteriormente, se divide en dos: la rama norte cruza hacia el norte de Europa, mientras que la rama sur recircula frente a África occidental.

De esta manera, la corriente del Golfo influye en el clima de la costa este de América del Norte desde Florida hasta Terranova, y en la costa oeste de Europa. Hay cierto debate sobre la magnitud de la influencia de dicha corriente en el clima de Europa y Norteamérica, aunque existe consenso en que el clima de Europa occidental es más cálido de lo que sería sin la deriva de la corriente del Golfo en el Atlántico Norte y, en general, el Atlántico Norte es mucho más cálido que las latitudes comparables en el Pacífico Norte⁷. Otro ejemplo sería el caso de Lima, Perú, con un clima subtropical más frío del que correspondería a su latitud tropical debido al efecto de la corriente de Humboldt, que es un afloramiento de aguas frías procedente de la Antártida, en el Pacífico.

7. S. Rahmstorf, «Ocean circulation and climate during the past 120,000 years», *Nature*. 419 (2002) 207-214. <https://doi.org/10.1038/nature01090>.



Esquema simplificado de la formación de aguas profundas en el océano Ártico, y su transporte a lo largo del océano Atlántico. Fuente: modificado Rick Lumpkin de National Oceanic and Atmospheric Administration (AOML-NOAA)

Mostrando este ejemplo del funcionamiento de la circulación global en el Atlántico, se pone de manifiesto cómo la GMOC es una gigantesca transmisora no solo de masas de agua sino de energía, ya que transfiere aguas frías al fondo del océano y aguas cálidas a su superficie, con el consiguiente transporte de calor de unos puntos a otros. Así, el océano se puede entender como un motor de fluido accionado mecánicamente a través del viento y las mareas, capaz de importar, exportar y transportar grandes cantidades de calor y agua dulce⁸. Es precisamente por esta razón por la que juega un papel tan fundamental en el clima de muchas regiones de la Tierra.

Esta sección termina planteando una de las cuestiones claves que más preocupan actualmente con relación al cambio climático y a la que se puede dar respuesta a través de los modelos físicos complejos esbozados en estas líneas. ¿Con qué fuerza podrían los cambios en la circulación termohalina afectar al clima? ¿Hasta qué punto los inviernos suaves de Europa dependen del transporte de calor por la corriente del Golfo y la corriente del Atlántico Norte? Las simulaciones en las que se disminuye el transporte de calor del océano a través de la corriente termohalina muestran un gran enfriamiento invernal sobre el Atlántico Norte y las

8. C. Wunsch, «What Is the Thermohaline Circulation?», *Science* (80-.). 298 (2002) 1179-1181. <https://doi.org/10.1126/science.1079329>

áreas terrestres adyacentes, disminuyendo varios grados en el interior de Europa⁹. A medida que el océano se calienta y las capas de hielo polar se derriten debido al aumento del carbono en la atmósfera, la estratificación cerca de la superficie (la separación de un cuerpo de agua en capas según su densidad) también aumenta. Una mayor estratificación cerca de la superficie inhibiría el hundimiento de las aguas superficiales cálidas en las profundidades del océano. Como resultado, se esperaría que el GMOC cambiara significativamente, lo que representa un grave riesgo para la redistribución del calor actual. Además, por supuesto, estos cambios pueden tener impactos sociales directos en los niveles del mar costero, los ecosistemas marinos, los fenómenos meteorológicos extremos y los cambios en el clima regional y global.

9. S. Rahmstorf, «Ocean circulation and climate during the past 120,000 years», *Nature*. 419 (2002) 207-214. <https://doi.org/10.1038/nature01090>.

Ecuación de Stokes, el flujo, el almacenamiento de carbono en el océano y cambio climático

El siguiente fenómeno que vamos a describir también influye poderosamente en la descripción de nuestro clima actual.

Toneladas de fitoplancton y zooplancton aparecen anualmente cada primavera en la superficie del océano, formando sugerentes y evocadoras imágenes de la superficie de la Tierra. Cuando estos pequeños seres vivos mueren y se hunden en el mar, crean la denominada poéticamente *nieve marina*. Esta nieve se describe como una lluvia de partículas formada por restos de animales, fitoplancton, agregados, productos fecales o arena. Las imágenes subacuáticas que han captado este proceso muestran cómo, por efecto de esta nieve marina, parece como si literalmente nevara bajo la superficie del mar.

Nos situamos en el comienzo de la primavera en la superficie del océano, concretamente en la *zona eufótica* o productiva, que es aquella que está iluminada por la luz del sol. El aumento de la temperatura y el número de horas de sol, junto con el incremento de los nutrientes aportados durante el invierno a la superficie, provocan un drástico aumento de la producción de materia orgánica por plantas unicelulares: el fitoplancton (del griego *phyton*, ‘planta’ y *plánktos*, ‘el que vaga’). Se forman los llamados *blooms* (florecimientos) marinos y dan lugar a las fabulosas fotos satélite de la superficie del océano, en azul y verde, que parecen más propias de un libro de arte que de ciencia. Cuando esta nieve marina se hunde en el océano se consigue, mediante el procedimiento denominado bomba biológica de carbono, retirar grandes cantidades de CO₂ de la atmósfera y transportarlas al fondo del océano, donde el CO₂ puede permanecer almacenado durante cientos o miles de años¹⁰.

El fitoplancton está conformado por organismos que sintetizan el carbono atmosférico y lo incorporan a sus tejidos biológicos mediante la fotosíntesis, introduciéndolo en el océano. Se encuentra en la base de la cadena alimentaria de

10. R. Sanders, S.A. Henson, M. Koski, C.L. De La Rocha, S.C. Painter, A.J. Poulton, J. Riley, B. Salihoglu, A. Visser, A. Yool, R. Bellerby, A.P. Martin, «The Biological Carbon Pump in the North Atlantic», *Prog. Oceanogr.* 129 (2014) 200–218. <https://doi.org/10.1016/J.POCEAN.2014.05.005>.



Imágenes satélite de *blooms* primaverales de fitoplancton sobre el océano Atlántico. Fuente: National Aeronautics and Space Administration (NASA)

los ecosistemas acuáticos y sirve de alimento a organismos mayores como zooplancton y otros animales marinos que van poblando la superficie conforme el *bloom* avanza en el tiempo. Al alimentarse del fitoplancton, los distintos animales marinos van incorporando el carbono atmosférico a la cadena trófica. Al morir, los organismos que pueblan la superficie se hunden en el mar, por efecto de la gravedad, llevando consigo el carbono atmosférico al fondo del océano. Esta lluvia de variados organismos orgánicos es lo que hemos llamado previamente *nieve marina*.



Imágenes satélite de *blooms* primaverales de fitoplancton sobre el océano Atlántico. Fuente: National Aeronautics and Space Administration (NASA)

Comprender los impulsores y los cambios potenciales de esta bomba biológica es crucial para predecir el futuro almacenamiento de carbono en los océanos durante las próximas décadas y cómo eso afectará al ciclo global del

carbono, es decir, al cambio climático. La física interviene en esta disciplina científica de primer nivel proporcionando las herramientas físicas y matemáticas que permiten no solo parametrizar los procesos biológicos, sino modelarlos y cuantificarlos.

Para cuantificar este proceso y la eficiencia de la bomba de carbono es preciso introducir el concepto de flujo, básico en física y matemáticas.

El flujo describe cualquier efecto que parezca viajar o pasar a través de una superficie. Es un concepto matemático con múltiples aplicaciones en la física. En los fenómenos de transporte (transferencia de calor, transferencia de masa y dinámica de fluidos), el flujo se define como la tasa de paso de una propiedad por un área unitaria, y tiene dimensiones de $[\text{cantidad}] \times [\text{tiempo}]^{-1} \times [\text{área}]^{-1}$. El área corresponde a la superficie a través de la cual pasa la propiedad. Un ejemplo típico sería el caudal de un río, que es la cantidad de agua que fluye a través de la sección transversal del río por unidad de tiempo.

Es un concepto muy necesario en los cursos de Fundamentos de la física en Ingeniería, también en la asignatura de Introducción a la física de nuestra escuela¹¹. Sirve tanto para describir el paso del fluido a través de una tubería, la transferencia de calor por conducción a través de una

11. *Cf.*, una vez más, la nota 3 *supra*.

superficie o la corriente eléctrica, midiendo la cantidad de fluido, energía o electrones que atraviesan una superficie en la unidad de tiempo.

Para definir el hundimiento de las partículas en el océano utilizamos simplemente el flujo de partículas, es decir, el número de partículas que atraviesan la unidad de área en la unidad de tiempo. Recurrimos además a la ecuación de continuidad, que es clave para definir el comportamiento del flujo. Es una expresión que representa la idea de que la materia se conserva en un flujo: la suma de todas las masas que entran y salen por unidad de tiempo por una superficie cerrada debe ser igual al cambio de masa por unidad de tiempo en el volumen que encierra esa superficie. Si asumimos un estado estacionario, es decir, aquel que es constante en el tiempo, la ecuación de continuidad nos dice que la cantidad de masa (partículas) que pasa a través de una superficie con un cierto espesor debe ser igual que la cantidad de masa que sale.

Tenemos, por tanto, un flujo de partículas formado por organismos de muy distinto tipo, que arrastran el carbono atmosférico hacia el fondo del océano para su almacenamiento.

En principio, imaginaríamos un flujo que permanece constante a lo largo de la columna de agua. Sin embargo, al realizar medidas del flujo de carbono a lo largo de esta columna de agua, es decir, si calculamos el número de partículas que se transportan por unidad de área y tiempo, nos



Lanzamiento de un conjunto de trampas de sedimento (surface-tethered drifting sediment traps) en el océano Atlántico durante la campaña francesa APERO. Fuente: María Villa Alfageme

encontramos con que el flujo de carbono disminuye con la profundidad. Para entenderlo fácilmente podemos pensar en uno de los métodos más directos para su medida: las trampas de sedimentos. Son un tipo de embudos que se colocan a distintas profundidades durante un número conocido de días y



Nieve marina recogida por una trampa de sedimento, durante la campaña APERO. Fuente: María Villa Alfageme

que tienen en su extremo final un depósito donde recogen todo el material particulado que llueve de la superficie¹². Lo que se observa experimentalmente es que el número de partículas recogido en los embudos disminuye a medida que nos adentramos en el océano.

Podríamos pensar que en este caso no se está cumpliendo la ecuación de continuidad, ya que la masa de partículas que atraviesa la superficie superior por segundo es

12. M. Villa-Alfageme, N. Briggs, E. Ceballos-Romero, F.C. de Soto, C. Manno, S.L.C. Giering, «Seasonal variations of sinking velocities in Austral diatom blooms: Lessons learned from COMICS», *Deep Sea Res. Part II Top. Stud. Oceanogr.* (2023).

mayor que el número de partículas que salen 100 m por debajo. Sin embargo, de nuevo el secreto está en la física. Lo que este experimento pone de manifiesto es que, además de un término fuente de producción de partículas en la superficie, existe un término de pérdida, un sumidero de partículas, que no hemos tenido en cuenta inicialmente.

Nuestro planeta está poblado de microorganismos (por ejemplo, bacterias o protozoos) que, para realizar sus funciones metabólicas, consumen carbono orgánico y obtienen



Imagen ampliada de nieve marina, recogida en gel en una trampa de sedimento de durante la campaña SOLACE, en el océano Antártico.

Fuente: campaña SOLACE

así la energía y los nutrientes que necesitan para vivir. El carbono que necesitan para realizar sus funciones metabólicas lo obtienen de la nieve marina al hundirse y lo transforman en CO_2 al respirar. Es lo que se llama remineralización del carbono, que pasa de estar en forma orgánica a reconvertirse en CO_2 . Este mecanismo es de hecho común a todos los ecosistemas, marinos o terrestres, de manera que la materia orgánica se descompone por la acción bacteriana cerrando el ciclo biológico. En nuestro caso actúa como un término adicional de la ecuación de continuidad, eliminando partículas que entran en nuestro volumen de agua, y disminuyendo el número de partículas que salen¹³.

Este mecanismo afecta decisivamente a la bomba de carbono¹⁴, dado que el flujo de carbono se atenúa conforme avanza a través de la columna de agua por el efecto de degra-

13. I. Wiedmann, E. Ceballos-Romero, M. Villa-Alfageme, A.H. Renner, C. Dybwad, H. van der Jagt, C. Svensen, P. Assmy, J.M. Wiktor, A. Tatarek, M. Róžańska-Pluta, M.H. Iversen, «Arctic Observations Identify Phytoplankton Community Composition as Driver of Carbon Flux Attenuation», *Geophys. Res. Lett.* 47 (2020) 1-10. <https://doi.org/10.1029/2020GL087465>

14. K.O. Buesseler, C.H. Lamborg, P.W. Boyd, P.J. Lam, T.W. Trull, R.R. Bidigare, J.K.B. Bishop, K.L. Casciotti, F. Dehairs, M. Elskens, M. Honda, D.M. Karl, D.A. Siegel, M.W. Silver, D.K. Steinberg, J. Valdes, B. Van Mooy, S. Wilson, «Revisiting Carbon Flux Through the Ocean's Twilight Zone», *Science* (80-.). 316 (2007) 567-570. <https://doi.org/10.1126/science.1137959>

dación de las bacterias, y no todas las partículas producidas en la superficie y que han retirado enormes cantidades de CO₂ atmosférico alcanzan el fondo marino. De hecho, solo entre un 2 y un 10 % de este material consigue ser almacenado eficientemente. Esto es así porque las partículas que se hunden se reconvierten en gas CO₂ por efecto de las bacterias, y si se encuentra cerca de la superficie, el CO₂ gaseoso puede retornar a la atmósfera por simple difusión (otro fenómeno de transporte de materia que por falta de espacio no podemos explicar aquí). Para que el almacenamiento de carbono sea lo más eficiente posible, el flujo de carbono debe conseguir llegar al menos a varios centenares de metros por debajo de la *zona eufótica*, dentro de lo que se denomina poéticamente *zona crepuscular* o *mesopelágica*. Y son múltiples los factores que hacen que esta situación pueda llegar a producirse.

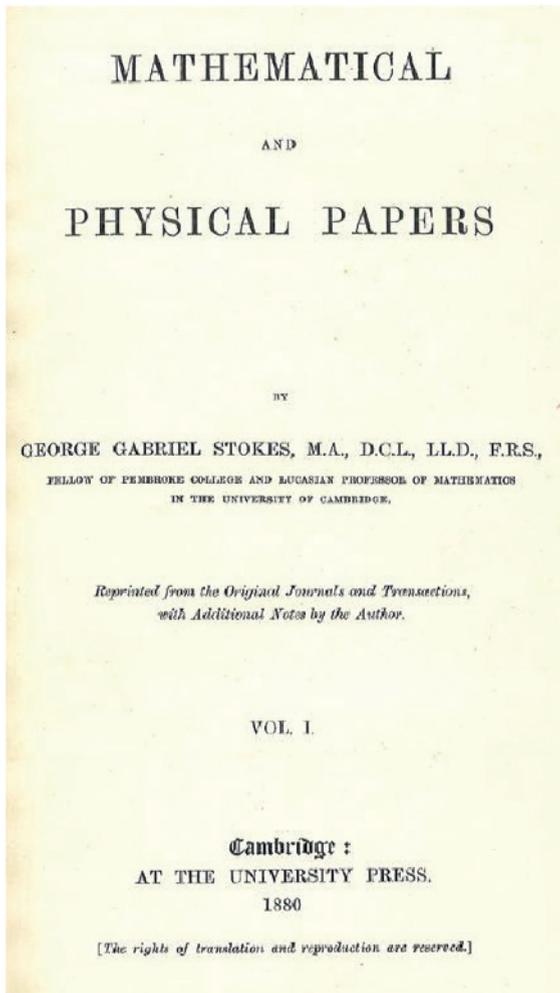
La bomba de carbono se establece sobre un delicado equilibrio cuya importancia para modular la cantidad de carbono atmosférico se ha puesto de manifiesto recientemente¹⁵ y existen todavía muchos interrogantes sobre cuáles son los factores biológicos, químicos o físicos más influyentes en la

15. A. Martin, P. Boyd, K. Buesseler, I. Cetinic, H. Claustre, S. Giering, S. Henson, X. Irigoien, I. Kriest, L. Memery, C. Robinson, G. Saba, R. Sanders, D. Siegel, M. Villa-Alfageme, L. Guidi, «The oceans' twilight zone must be studied now, before it is too late», *Nature*. 580 (2020) 26–28. <https://doi.org/10.1038/d41586-020-00915-7>

eficiencia de este proceso, desde la formación de las partículas orgánicas, hasta su almacenamiento definitivo. Un almacenamiento eficiente del carbono por parte del océano requiere, por tanto: una gran productividad de partículas orgánicas en la superficie del océano, junto con una degradación pequeña del flujo de partículas que se hunden. Cuáles son los mecanismos más determinantes para que se produzcan ambas situaciones o al menos una de ellas es una pregunta científica de primerísima magnitud todavía por resolver.

Mostramos un último ejemplo de cómo la física nos ayuda a comprender los comportamientos de la naturaleza. Se recurre a modelos que utilizan las ecuaciones antes mencionadas para estudiar el transporte de las partículas al océano profundo, así como su degradación, y poder así cuantificar con precisión cuánto del carbono producido en la superficie llega realmente al fondo marino. Sin embargo, el movimiento individual de las partículas que conforman el flujo de carbono a través de la columna de agua es complejo, ya que se ven afectadas no solo por la fuerza de la gravedad, sino también, como bien conocen nuestros alumnos de Edificación, por lo que se denomina fricción del fluido.

Para describir el movimiento de una partícula en el agua bajo la acción de la gravedad y la fricción del fluido recurrimos a la ley de Stokes (cuyo autor es el mismo precisamente de las antes mencionadas ecuaciones de Navier-Stokes). Esta ley tiene múltiples aplicaciones en ingeniería y nos permite



Portada del libro de Stokes *Mathematical and Physical Papers*

describir y modelar el hundimiento de partículas individuales en la columna de agua. Se trata de una aproximación en la que asumimos partículas esféricas, cumpliendo con el estereotipo

[52] PROFESSOR STOKES, ON THE EFFECT OF THE INTERNAL FRICTION

$-F = \frac{4}{3} \pi g (\sigma - \rho) a^3$, where g is the force of gravity, and σ , which is supposed greater than ρ , the density of the sphere. Substituting in (126) we get

$$V = \frac{2g}{9\mu'} \left(\frac{\sigma}{\rho} - 1 \right) a^2. \quad \dots \dots \dots (127)$$

Let us apply this equation to determine the terminal velocity of a globule of water forming part of a cloud. Putting $g = 386$, $\mu' = (.116)^2$, an inch being the unit of length, and supposing $\sigma\rho^{-1} - 1 = 1000$, in order to allow a little for the rarity of the air at the height of the cloud, we get $V = 6372 \times 1000 a^2$. Thus, for a globule the one thousandth of an inch in diameter, we have $V = 1.593$ inch per second. For a globule the one ten thousandth of an inch in diameter, the terminal velocity would be a hundred times smaller, so as not to amount to the one sixtieth part of an inch per second.

We may form a very good judgment of the magnitude of that part of the resistance which varies as the square of the velocity, and which is the only kind of resistance that could exist if the pressure were equal in all directions, by calculating the numerical value of the resistance according to the common theory, imperfect though it be. It follows from this theory that if h be the height due to the velocity V , the resistance is to the weight as $3\rho h$ to $8\sigma a$. For $V = 1.593$ inch per second, the resistance is

Detalle de página que muestra la ley de Stokes para el arrastre viscoso, del artículo de George Gabriel Stokes, *Transactions of the Cambridge Philosophical Society*, vol. 9, 1851. Fuente: Linda Hall Library

del físico que considera todas las vacas redondas. La ley de Stokes nos muestra cómo la velocidad de la partícula en el fluido dependerá de su densidad, pero también de la densidad y viscosidad del fluido y, principalmente, del volumen de la partícula, ya que depende del radio de la partícula elevado al cubo.

Aunque Stokes funciona únicamente como primera aproximación y factores como la forma, la rugosidad y porosidad influyen en el hundimiento de la partícula, esta ley es capaz

de explicar resultados que se han medido experimentalmente en el océano en multitud de ocasiones. Y es que son los organismos y agregados de mayor tamaño los que se exportan más eficientemente por debajo de la *zona eufótica*. Esto es así porque, al tener el mayor radio, y estar este elevado al cubo, estas partículas tienen una velocidad significativamente mayor y por tanto tardan menos en llegar al fondo del océano, librándose así de la acción y degradación de las bacterias. Se trata de un resultado fundamental para entender el almacenamiento de las partículas y, si bien resulta muy intuitivo, es la física la que consigue darle respuesta.

Puede verse cómo entender y cuantificar este fascinante proceso de la bomba biológica de carbono y de qué factores depende es esencial para estimar cómo evolucionarán las concentraciones de CO_2 en la Tierra en los próximos años. ¿De qué manera los cambios que se produzcan en el proceso de almacenamiento de carbono por parte de los océanos van a modificar las concentraciones de carbono en la atmósfera? ¿Y cómo estas variaciones de carbono en la atmósfera van a influir en la evolución de la temperatura del planeta? Estas son algunas de las cuestiones científicas más relevantes en la actualidad, a las que hay que dar respuesta en los próximos años usando un enfoque multi e interdisciplinar. Para resolver muchas de ellas... el secreto está en la física.

Como breve reflexión final, aúno algunas de las preguntas más repetidas por los alumnos a lo largo de mis años de docencia: ¿Por qué impartimos Física en estas aulas? ¿Por qué es necesaria la investigación? ¿Por qué invertir tantos esfuerzos y recursos económicos en ella? Existen muchas respuestas válidas para estas preguntas. Recordemos un par de ellas: la física nos proporciona el contexto para entender el mundo prácticamente desde cualquier disciplina científica y técnica, y ser capaces de predecir el comportamiento de la naturaleza es tarea fundamental de la ciencia actual. En estos tiempos cruciales, donde ya se habla de la Era del Antropoceno¹ para describir los dramáticos cambios climáticos que nos acontecen, es clave disponer de una ciencia donde física, biología, química, geología o ingeniería fundan sus conocimientos y esfuerzos para conseguir datos más amplios, modelos más exactos y predicciones más precisas que nos permitan cuidar y preservar nuestro maltrecho planeta.

1. D. A. Goldstein, M. I. Dellasala (2018), *Encyclopedia of the Anthropocene*. Ámterdam: Elsevier.

MARÍA VILLA ALFAGEME nació en Valladolid en 1976. Licenciada en Física por la Universidad de Sevilla en 1999, se doctoró en Física por la misma universidad en 2004. Fue estudiante postdoctoral en la Universidad Autónoma de Barcelona y profesora asociada en la Universidad Pablo de Olavide. Ha sido investigadora visitante en el National Oceanography Centre (NOC) de Southampton en el Reino Unido, en la ETH (Eidgenössische Technische Hochschule) de Zúrich, Suiza, en la Universidad de Columbia en Nueva York y en el Harbin Institute of Technology, China. Desde el año 2022 es catedrática de Física Aplicada en el departamento de Física Aplicada II de la Universidad de Sevilla.

Ha sido subdirectora de Internacionalización de la ETS de Ingeniería de Edificación, directora académica de la Escuela de Posgrado de la Universidad de Sevilla y directora de la Oficina General de Proyectos Internacionales de la Universidad de Sevilla.

Ha realizado campañas oceanográficas con el RRS Discovery y el RRS James Cook, del Reino Unido, también a bordo del buque español Hespérides y del buque oceanográfico francés Pour Quoi Pas? Es miembro del Programa de Formación del Organismo Internacional de Energía Atómica de Naciones Unidas (OIEA) y del Ocean's Decade Program JetZon (Joint Exploration of the Twilight Zone Ocean Network) de la ONU y revisora de proyectos para la Agencia Estatal de

Investigación Española, la Comisión Europea y las Naciones Unidas. Es también miembro de la Asociación de Mujeres Investigadoras y Tecnólogas.

Ha dirigido proyectos europeos, nacionales y autonómicos y es líder de varios proyectos relacionados con el uso de trazadores radiactivos como trazadores del océano. Sus intereses van desde el estudio de la bomba biológica de carbono, con especial atención a la evaluación de flujos de carbono, a fin de generar predicciones globales y locales de la evolución del carbono en los océanos; a la biogeoquímica de los radionucleidos artificiales, centrándose en su aplicación como trazadores de la circulación oceánica. Es autora de más de 60 artículos científicos relacionados y ha colaborado en más de cien presentaciones en congresos internacionales.



Escuela Técnica Superior de
Ingeniería de Edificación

