



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

La Termodinámica en Sistemas Acuáticos

MATERIAL DIDÁCTICO

Que para obtener el título de

Ingeniera Geofísica

P R E S E N T A

Taidé Adela Rodríguez Mendoza

ASESORA DE MATERIAL DIDÁCTICO

Dra. Iza Canales García



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2021



Dirección General de Asuntos
del Personal Académico

Este trabajo se realizó con el apoyo de la Dirección General de Asuntos del Personal Académico (DGAPA), dentro de las actividades para la elaboración del libro: “Termodinámica para Ciencias de la Tierra: Fundamentos y Aplicaciones” para el proyecto PAPIME No. PE101920

Agradecimientos

A la Dra. Iza Canales García por invitarme a colaborar en este proyecto, por su orientación, paciencia, por compartir un poco de lo que más ama conmigo y esa chispa que tiene al alegrar cualquier situación.

A mis sinodales, gracias por su tiempo, comprensión, sus comentarios y correcciones. Me hubiera gustado conocerlos en persona y trabajar un poco más de cerca, pero atravesamos una situación complicada.

A mis padres, porque sin importar el día o la hora siempre han estado ahí. Sin ellos no estaría orgullosa de la persona que soy ahora. Los amo

Al bichito, por ser la persona a la que siempre puedo molestar, por estar ahí y hacerme reír y apoyarme, aunque nuestras carreras sean lo más opuestas. Te amo. Nunca te rindas ni dejes de sonreír sin importar nada.

A mi persona favorita, por siempre apoyarme y no dejar que me rindiera, desde mi deseo por cambiarme de carrera hasta el último día de ella. Sin ti el camino hubiera sido más difícil y no sé si hubiera terminado en la Facultad de Ingeniería. Te amo, tu sabes quién Luis eres.

A Laura y Beto porque sufrimos, nos levantamos y terminamos juntos. Porque más que compañeros de carrera se volvieron las personas más importantes en mi vida.

A la Facultad de Ingeniería y a la UNAM por brindarme las bases para mi formación profesional.

Gracias.

Contenido

Resumen	5
Abstract	5
Objetivos.....	6
Justificación	6
1. Introducción.....	6
2. Fundamentos teóricos	7
3. Parámetros de medición	11
3.1 Parámetros físicos.....	11
3.2 Parámetros químicos	15
3.3 Parámetros biológicos	16
3.4 Parámetros geológicos	17
4. Variables termodinámicas del océano	18
4.1 Temperatura del océano.....	18
4.2 Relación profundidad-presión en el océano	22
5. Zonas térmicas.....	23
5.1 Zonas térmicas del océano mundial	23
5.2 Zonas térmicas en mares mexicanos	28
6. Temperatura de lagos.....	34
7. La importancia de la medición de la temperatura en estos sistemas.....	40
8. Conclusiones	44
9. Cuestionario de autoevaluación.....	45
10. Soluciones	49
Referencias bibliográficas.....	52

Resumen

Una parte vital para comprender el sistema de la Tierra es el estudio de los sistemas acuáticos, por lo que en el presente trabajo se desarrolla de manera general las características principales de estos sistemas y el papel que toma la termodinámica para su estudio.

La oceanografía física es la principal encargada de involucrar la termodinámica en el estudio de los océanos debido al intercambio de calor, salinidad, entre otras sustancias con el medio circundante. La temperatura es una propiedad de suma importancia ya que su impacto se refleja en la vida de todos los ecosistemas debido a la función del océano como regulador del clima mundial. La temperatura es la principal propiedad física que se abordará en el presente capítulo.

Este capítulo pertenece al capítulo XV del libro digital "Termodinámica para Ciencias de la Tierra" del proyecto PAPIIME PE101920, de la Facultad de Ingeniería, UNAM. El capítulo desglosa los siguientes subtemas: fundamentos teóricos, parámetros de medición, variables termodinámicas del océano, zonas térmicas, temperatura de los lagos y la importancia de la medición de la temperatura en estos sistemas. En conjunto brindarán al estudiante las bases para el conocimiento de la oceanografía física.

Abstract

A vital part of understanding the Earth's system is the study of aquatic systems, which is why the main characteristics of these systems and the role of thermodynamics for their study are generally developed in this paper.

Physical oceanography is the main one in charge of involving thermodynamics in the study of the oceans due to the exchange of heat, salinity among other substances with the surrounding environment. Temperature is a very important property since its impact is reflected in the life of all ecosystems due to the role of the ocean as a regulator of the world climate, this is the main physical property that will be addressed in this chapter.

This chapter belongs to chapter XV of the digital book "Thermodynamics for Earth Sciences" of the PAPIIME PE101920 project, of the School of Engineering, UNAM. The chapter breaks down the following subtopics: theoretical foundations, measurement parameters, ocean thermodynamic variables, thermal zones, lake temperatures, and the importance of temperature measurement in these systems. Together they will provide the student with the basis for the knowledge of physical oceanography.

Objetivos

Brindar a los estudiantes de ciencias de la Tierra un enfoque sobre cómo influye la termodinámica en los sistemas acuáticos mediante el desarrollo de un capítulo del libro de Termodinámica para ciencias de la Tierra con el fin de cubrir su formación como Ingeniero Geofísico.

Justificación

Una de las asignaturas más complicadas a los inicios de la licenciatura de Ingeniería Geofísica es la asignatura de *termodinámica*, cuyos fundamentos son la base para la comprensión de la dinámica de la Tierra. Sin pasar por alto que el océano también es un importante objeto de estudio para los profesionales de Ciencias de la Tierra. Es por eso por lo que se preparó este material didáctico para que el estudiante conozca las amplias áreas que se estudia con base en procesos termodinámicos y su objeto de estudio con la Tierra.

1. Introducción

La masa total del agua en la Tierra representa alrededor del 71% de la superficie de la Tierra, la distribución del agua se presenta aproximadamente de la siguiente manera: 96.54% de esta agua se encuentra en los océanos, mares y bahías, 1.691% en rocas y suelo, 1.76% hielo, lagos, pantanos y ríos y el 0.001% en la atmósfera. Esta masa representa aproximadamente tres cuartas partes de toda la superficie terrestre. La interacción de la atmósfera, la litósfera y la hidrósfera hacen posible el desarrollo de vida en estos ecosistemas, además de que contienen recursos naturales de gran relevancia para los seres humanos.

Este conjunto de cuerpos de agua conforma los sistemas o ecosistemas acuáticos en nuestro planeta y se diferencian entre sí por sus propiedades químicas y físicas, entre las cuales se incluye densidad, velocidad del sonido, capacidad calorífica, potencial químico, entre muchas otras.

De manera particular, el océano es considerado como un sistema disipativo abierto que intercambia calor, sal entre otras sustancias con el sistema circundante de toda la Tierra. En menor medida los lagos cumplen este mismo papel, pero en un ecosistema particular. Incluir el uso de la termodinámica brinda un enfoque holístico para estudiar la estructura, funcionamiento e historia natural y geológica de cada uno de los sistemas mencionados, lo cual es de suma relevancia para la comprensión de los fenómenos terrestres.

2. Fundamentos teóricos

Las grandes divisiones que representan a los sistemas acuáticos son: limnéticos (lagos), marinos marginales (estuarios, costas rocosas y lagunas) y marinos (océanos). Debido a la vasta distribución de estos sistemas, se han desarrollado ciencias que se encargan de su estudio y éstas son la *limnología* y la *oceanografía*.

La **limnología** que es una ciencia perteneciente a la ecología que se encarga del estudio de las interrelaciones estructurales y funcionales de los organismos de las aguas continentales que se ven afectados por sus entornos físicos, químicos y bióticos dinámicos y la manera en cómo afectan el ambiente. Podemos decir, que las bases de la limnología son delimitación, volumen y configuración de las aguas epicontinentales; el estudio del agua y las sustancias que lleva en solución, la energía radiante y mecánica en el agua, la ocupación de las aguas continentales y la proyección geográfica y ecológica de la evolución, al igual que la organización, teoría y modelos de los ecosistemas.

Por otro lado, contempla la delimitación, tipología y productividad de los lagos y las aguas fluyentes de los ríos como sistema ecológico, la ordenación de comunidades fluviales y la contaminación del agua, además los embalses (entre los ríos y los lagos), su incidencia y los rasgos distintivos de la limnología (Colmenar, 2002).

La limnología es una ciencia relativamente reciente, sin embargo, siglos antes de que se introdujera el término, la humanidad conocía el valor del agua dulce como fuente indispensable. Se utilizaba como suministro de agua, evacuación de residuos, obtención de cosechas y medio de transporte. Los asentamientos humanos cercanos a ríos o lagos se desarrollaron exponencialmente. En conjunto todos los puntos mencionados generaron gran interés por conocer todo cuanto se refiere a ríos y lagos.

En el siglo XVII a partir de la invención del microscopio se abrió un nuevo mundo al conocimiento de la vida en el agua. Se hicieron así descripciones detalladas y se realizaron las primeras publicaciones sobre organismos acuáticos. El primer concepto limnológico se debe a Forbes en 1887, quien publicó un artículo llamado "El lago como un microcosmos". Fue su obra *Le Léman* publicada en tres volúmenes entre 1892 a 1904 que marcaron el comienzo de la limnología como ciencia.

El primer laboratorio dedicado a estudios limnológicos es el Instituto de Limnología de Plön, hoy llamado Instituto Max Planck de Limnología, fundado en Alemania en 1891. Es un sitio que hasta nuestros días es uno de los de mayor reputación en el mundo. Años más tarde fue August Thienemann, limnólogo alemán, quien se encargó de estructurar la limnología como ciencia. La

influencia germánica se extendió rápidamente por todo Europa, se crearon institutos y se comenzaron a realizar investigaciones de organismos acuáticos y sus respectivas publicaciones.

En el continente americano, la limnología tuvo su auge a inicios del siglo XX, Edward Asahel Birge junto con su discípulo Chancey Judar sentaron las bases de la limnología moderna.

A partir de la década de los noventa del siglo XX, la limnología se ha desarrollado de manera acelerada a nivel mundial, ante la preocupación por la contaminación y el agotamiento del recurso hídrico (Roldán & Ramírez, 2008).

Por otro lado, la ***oceanografía*** es una rama de las Ciencias de la Tierra que mediante procesos geológicos, físicos, químicos y biológicos estudia los procesos naturales que acontecen en el *océano, mares y sus costas*, así como la manera en que estos intervienen sobre los medios próximos, con énfasis en su carácter como medio ambiente. Dichos procesos originaron las cuatro disciplinas que se describen a continuación.

1. La *oceanografía física* se basa en las matemáticas, la mecánica de fluidos y la termodinámica para el estudio de la distribución de las propiedades físicas y su dinámica de fenómenos como el oleaje, mareas, corrientes, etc., así como la relación del océano con los fenómenos atmosféricos. Este tipo de fenómenos pueden ser monitoreados por sensores remotos reconociendo variaciones en la temperatura, clorofila, dando seguimiento a cambios en el tamaño y desplazamiento de giros ciclónicos o anticiclónicos. También se encarga de diseñar instrumentos oceanográficos y de navegación, por ejemplo, para mejorar las condiciones dinámicas de sistemas de baja circulación, que resulta de condiciones de hipoxia, otro ejemplo son los sensores que miden la posición de la termoclina (capa de agua que cambia bruscamente de temperatura con la profundidad).
2. La *oceanografía química* estudia las propiedades de los elementos del agua de mar y sus procesos químicos, así como su relación con la contaminación. Dentro de la amplia gama de temas que interesan a esta materia, se incluyen el origen y distribución de nutrientes (C, N, P, Si, O, etc.), el carácter químico de las productividades primarias y secundarias, los materiales radioactivos en agua y sedimentos, tiempos de residencia de elementos químicos y masas de agua, lo que conlleva al problema crucial del control de la contaminación, especialmente en ambientes costeros (Academia Nacional de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, 2015).
3. La *oceanografía biológica* se enfoca en el estudio de los organismos que habitan en los mares, conociendo los cambios que se producen sobre la biota por alteraciones en los parámetros físicos y químicos o en los propios organismos. También aborda la interacción del hombre con los recursos vivos del mar, por ejemplo, la pesca y su relación con la sobreexplotación de los organismos vulnerables.

4. La *oceanografía geológica* analiza cómo afectan los procesos de la dinámica de placas al fondo marino y las zonas costeras. Incluye el estudio de la morfología del fondo marino, la interacción de los sedimentos y rocas con el agua de mar y la acción que sobre ellos ejercen las olas y corrientes, el origen de las cuencas oceánicas, las formaciones geomorfológicas como montañas y colinas submarinas, dorsales, cañones y conos abisales. Esta disciplina ha comprobado teorías sobre la tectónica de placas y su comparación con otros planetas.

Dado que la oceanografía estudia tanto mares como océanos, definiremos la diferencia entre cada uno, un *océano* se define como un conjunto de masas de agua que se encuentran sobre la corteza oceánica ocupa más de 10 millones de km² y una profundidad mayor de 3 km; a diferencia de los *mares*, los cuales se ubican en la corteza continental o basáltica, tienen una extensión menor a los 10 millones de km² y su profundidad es de menos de 3 km (Gío Argáez, 1999).

El ser humano es una especie terrestre y el océano representa un reto de exploración e investigación por lo que a lo largo de la historia la humanidad ha desarrollado instrumentos para estudiarlo. Como toda ciencia, desde tiempos remotos se comenzó por la observación de las corrientes, mareas y el oleaje, así como las épocas ideales para la pesca y la navegación.

La oceanografía como ciencia nació con la primera expedición oceanográfica de la historia en el buque británico *Challenge* que durante cuatro años (1872-1876) recopiló datos por los océanos de todo el mundo, tomando medidas y observando sistemáticamente la temperatura, la química marina, las corrientes, la vida oceánica y la geología del fondo. Anteriormente existieron trabajos significativos como los de Darwin (1842) con teorías sobre el origen de los atolones submarinos, y los estudios de Benjamín Franklin (1786) y Louis Antoine de Bougainville (~1767) que observaron con atención las corrientes marinas en el Atlántico Norte y Sur, respectivamente.

Las expediciones oceánicas comenzaron a desarrollarse en otros países durante las siguientes décadas concentrándose gradualmente en ciertas regiones. Sin embargo, la segunda guerra mundial forzó el estudio del océano y mares hacia una diferente dirección, en acciones de defensa y de ataque. A partir de esto se descubrió la importancia del estudio del oleaje, la propagación del sonido en el mar, morfología y dinámica de las playas, entre otros. Por ejemplo, los pronósticos de olas de Svedrup y Munk (los padres de la Oceanografía Física) fueron claves para los desembarcos aliados en Sicilia y Normandía (Academia Nacional de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, 2015).

A partir de 1945, junto con el Año Geofísico Internacional (AGI) de 1957, los avances en Oceanografía comenzaron a ser más significativos. La AGI estableció que el estudio del océano no podría ser en particular de un país, sino que debería ser una cooperación entre las naciones.

El territorio mexicano está conformado por un 65% de superficie oceánica y 35% terrestre. Las regiones marinas comprenden: el Pacífico mexicano que incluye los golfos de California y Tehuantepec, y la región del Atlántico con el Golfo de México y el Mar Caribe.

Esta ubicación geográfica entre dos vertientes oceánicas otorga una enorme biodiversidad tanto biológica como ecosistémica que se caracteriza por una amplia gama de recursos y ecosistemas marinos (Naturales, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos, 2018).

Las aguas internacionales constituyen todas las partes del mar u océanos no incluidas en la zona económica exclusiva, mar territorial o aguas interiores de un estado o archipiélago. También son denominadas “alta mar”.

Estas no se encuentran bajo el control de ningún estado, por lo que existe libertad para navegar, pescar, sobrevolar o realizar investigaciones científicas, entre otras actividades. Se regulan en la Convención de las Naciones Unidas sobre el Derecho del Mar, que fue aprobada en 1982. Las aguas internacionales son consideradas patrimonio común de la humanidad y está abierta a todos los estados (ACNUR Comité Español, 2019).

Durante los últimos 55 años el grado de conocimiento de los océanos ha avanzado significativamente, actualmente un porcentaje representativo de la investigación oceanográfica mundial se lleva a cabo en las costas y plataforma interior debido al incremento del turismo y del comercio marítimo. La pesca, como una de las principales actividades económicas también fue responsable del avance de la investigación marina. En la actualidad todas las especialidades de la Oceanografía cumplen un rol importante en la mitigación de los cambios que se prevén en un futuro y también es esencial para la búsqueda de nuevas fuentes de energía renovable y alimentos.

Dejando a un lado al océano como fuente de alimentos, las aguas oceánicas conservan recursos importantes para el ser humano como el petróleo y gas. Por otro lado, también se obtienen recursos como son las plantas transformadoras de la energía solar en proteínas, fuente de energía generada por mareas y olas, así como por las corrientes oceánicas y, en el suelo marino se encuentra un cúmulo de sedimentos y rocas que contienen grandes depósitos minerales como níquel, cobre, cobalto, magnesio, sodio, azufre, boro, entre muchos otros.

Como se observa, la limnología y la oceanografía son ciencias estrechamente relacionadas que se han desarrollado en paralelo, comparten gran parte de su historia y sus investigaciones convergen, aunque los ecosistemas pueden diferir cuantitativamente. Trabajan con un objetivo en común, el aprovechamiento del agua, ya que en la actualidad se ha vuelto prioridad buscar soluciones ante el agotamiento de este recurso y ante el incremento de la contaminación ocasionado por el aumento de la población y de la industria.

3. Parámetros de medición

Para la oceanografía y limnología el agua es un factor determinante en cualquiera de sus estados sólido, líquido y vapor que, mezclado con la sal marina (océanos) y con el aire de la atmósfera establecen la inercia térmica del sistema climático y la capacidad de ese sistema para redistribuir y transformar el calor, la energía y el momento.

La composición del agua en los océanos es de:

- 96.5% agua.
- 3.5% sales, incluidas las que contienen magnesio, bromuro y cloruro de sodio así como pequeñas cantidades de partículas entre las que se encuentra materia orgánica e inorgánica y sedimentos.

En términos de termodinámica, los cuerpos de agua como objeto de estudio, se determinan como un sistema disipativo abierto que intercambia calor y sal (en el caso de los océanos) con el sistema circundante.

El conocimiento de estas ciencias se basa en la observación y la descripción de fenómenos en los que intervienen variables temporales y espaciales. Por otro lado, el océano es un medio donde existen complejas conexiones entre los procesos físicos, químicos, biológicos y geológicos, que controlan su conducta y evolución, por lo que su estudio es interdisciplinario.

3.1 *Parámetros físicos*

Las propiedades físicas del agua son diferentes en el agua dulce que en agua salada y varían de acuerdo con la cantidad de sales. La adición de sal al agua altera las propiedades termodinámicas en varias maneras, algunas de las cuales tienen importantes efectos tanto cualitativos como cuantitativos.

Refiriéndonos a la física en el océano, la dinámica, que es la encargada del estudio de los movimientos oceánicos forma una parte importante en la física del agua. El estudio del océano es complejo debido a que éste se encuentra estratificado donde cada capa o zona se caracteriza por una dinámica en particular, teniendo una dinámica superficial y profunda completamente distintas.

A continuación, se formularán los principios físicos que controlan los procesos oceánicos, que requieren de una comprensión de la termodinámica del agua de mar.

La **energía radiante** o flujo de luz solar, genera circulación del *calor* en el océano y la circulación por el viento a través de la evaporación del agua en los trópicos y subtrópicos, regula la temperatura del planeta. Proviene de dos fuentes principales: i) el sol como fuente externa, esta energía radiante en los océanos llega a una determinada profundidad según sea el ángulo de incidencia de los rayos luminosos y la cantidad de materia disuelta; y ii) el decaimiento de energía radiante en el interior de la Tierra, debido al material debajo de la corteza. Esta última fuente de energía solo influye parcialmente en la temperatura del fondo marino ya que no es la fuente principal de los efectos dinámicos.

Aproximadamente la mitad de la energía radiante proveniente de la luz solar que llega a la Tierra es absorbida por los océanos y la superficie sólida, donde se almacena temporalmente en la superficie. La quinta parte de la luz solar disponible es absorbida por la atmósfera directamente. De la energía almacenada por el océano, parte es liberada hacia la atmósfera, principalmente por evaporación y radiación infrarroja. La energía radiante almacenada en el océano está disponible para regular el clima en la Tierra.

La **temperatura** es la magnitud en función de la energía radiante o calor presente en el sistema. En el océano la temperatura varía tanto en sentido de la latitud como de la longitud terrestre. Varía según la estación del año y la latitud a la que se encuentra el cuerpo de agua, ya sea en el océano o en un lago, es decir, entre más cerca del Ecuador mayor será la temperatura debido al ángulo de incidencia de la energía radiante sobre la superficie y entre más cercano a los polos la temperatura será menor.

La variación de la temperatura también se mide con respecto a la profundidad, esto implica que decrece gradualmente desde la superficie hacia el fondo, ya que la energía solar se refleja en la superficie o se absorbe rápidamente con la profundidad, lo que significa que, entre mayor profundidad menos luz solar hay, dando como resultado un menor calentamiento del agua (NOAA, 2018).

Este parámetro no se mide directamente, sino mediante su efecto en diversos medios utilizando básicamente termómetros de mercurio, los termómetros eléctricos y los batitermógrafos. A lo largo de la historia, medir la temperatura del océano consiste en muestras de agua tomadas por barcos que cuelgan sensores o recolectores. Este método requiere mucho tiempo y solo proporciona muestras de lugares puntuales del océano. Posteriormente, para obtener una cobertura global se comenzó a recurrir a los satélites que miden la temperatura superficial del mar (Dahlman & Lindsey, 2020).

Para obtener una imagen más completa de la distribución de la temperatura del océano, actualmente se emplean entre otros métodos “flotadores” robóticos que miden la temperatura en todo el mundo. Estos flotadores son sensores que se mueven a través del océano a diferentes

profundidades. Constantemente se comparan los datos de satélites, flotadores y sondas para calcular una estimación del contenido de calor oceánico promedio mundial. Con el fin de conocer la distribución de la temperatura de las aguas oceánicas se construyen mapas, que han establecido las relaciones de la temperatura en diferentes áreas del océano, uniendo los puntos que presentan la misma temperatura con líneas continuas llamadas isotermas.

La temperatura depende de la energía radiante, de la salinidad que a su vez depende de la evaporación, precipitación y aporte de agua de los ríos y de la presión que depende de la profundidad. La temperatura y la densidad tienen una relación inversa debido a que, al aumentar la temperatura, aumenta el espacio entre las moléculas de agua también conocido como densidad que por lo tanto disminuye.

La **densidad** en los océanos está en función de la temperatura T , la presión p y la salinidad S , y se expresa como $\rho = \rho(p, T, S)$. Por ejemplo, si la salinidad cambia significa que hay un cambio en la masa de sales disueltas en determinado volumen de agua; por el contrario, un cambio en la temperatura refleja un cambio en el volumen del fluido.

El agua dulce alcanza un máximo de densidad de $1000 \text{ [kg/m}^3\text{]}$ o $1 \text{ [g/cm}^3\text{]}$ a los 4°C , esto quiere decir que entre los 0° y 4°C el valor de la densidad aumenta con la temperatura, pero pasando los 4°C la densidad comenzará a disminuir, como se puede observar en la Figura 1. Como el agua es más densa cercana al punto de congelación crea un aislante para que el agua a mayor profundidad no se congele. Es por eso por lo que las aguas de mayor densidad suelen encontrarse en regiones polares, debido a que el aire es más frío y hay hielo flotante.

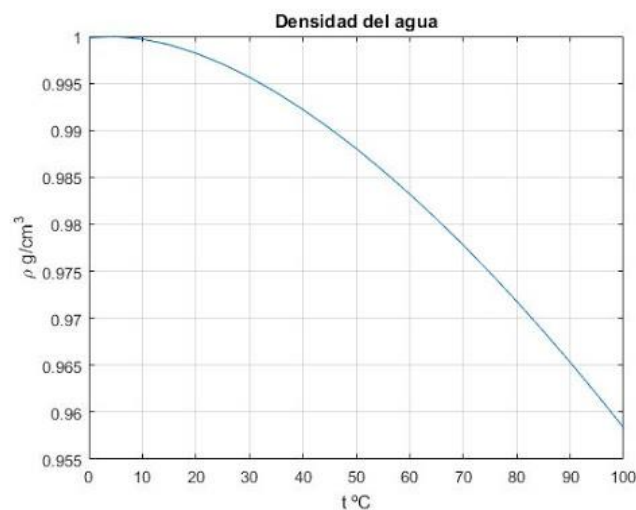


Figura 1. Gráfico que ilustra el comportamiento de la densidad al variar la temperatura Recuperado de http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica3/calor/vapor/vapor_1.html.

La densidad del agua varía en un rango desde los 998 [kg/m³] del agua dulce a temperatura ambiente hasta los 1,250 [kg/m³] de ciertos lagos salados. El valor de la densidad del agua de mar se encuentra en un rango de 1020-1030 [kg/m³]. Estos valores se obtienen a partir de la temperatura del agua, la salinidad y la presión. Debido a la variación de la densidad en el océano y por razones prácticas se estableció expresar la densidad del agua de mar con el parámetro *sigma-t* (σ_t), que se define como $\sigma_t = \rho - 1000$ [kg · m⁻³].

La **presión** es proporcional a la profundidad, a mayor profundidad la presión incrementa. La presión en el océano o en un lago es el resultado de una fuerza (el peso) ejercida por la columna de agua y de aire a una determinada profundidad.

A la presión de fluidos en reposo se le denomina *presión hidrostática* (P_h) que está en función de la densidad del fluido y la altura de la columna (profundidad), esta se define mediante la ecuación hidrostática $P = \rho gz$, donde ρ es la densidad media en la vertical, g la aceleración gravitacional y z la altura de la columna de agua.

La unidad de la presión en SI es el pascal [Pa], sin embargo, los oceanógrafos normalmente registran la presión en decibares [dbar], donde: $1 \text{ dbar} = 104 \text{ Pa}$; porque la presión en decibares es casi exactamente igual a la profundidad en metros. Esto se refiere a que 1000 [dbar] es la presión a una profundidad de unos 1000 [m]. En el océano la presión se incrementa a razón de una atmósfera (1 atm, 10⁵ Pa) por cada 10 metros de profundidad (Karp-Boss, Boss, Weller, Loftrin, & Albright, 2009).

La presión se mide de manera rutinaria con diferentes tipos de instrumentos, entre los más usados en oceanografía destacan los siguientes: a) *Strain Gage* es el instrumento más simple y económico, se usa ampliamente ya que mide la deformación que se ejerce sobre el dispositivo debido a una fuerza, en este caso la presión; b) *Vibratron* que mide de manera más precisa mediante la frecuencia natural de un cable de tungsteno vibrante estirado en un campo magnético entre diafragmas que cierran los extremos de un cilindro, que a la vez éstos diafragmas se distorsionan por la presión; c) *crystal de cuarzo* puede realizar mediciones muy precisas de la presión midiendo la frecuencia natural de un cristal de cuarzo cortado para una dependencia mínima de la temperatura y c) *Quartz Bourdon Gauge* que tiene una precisión y estabilidad comparable a los cristales de cuarzo (Stewart, 2008).

El **sonido** se origina por los cambios de presión en un medio elástico, en este caso es un medio líquido. La energía acústica es una forma más de movimiento de las olas en el océano, por lo que es de gran importancia y de características suficientemente variadas en el estudio de la física del mar. Las ondas sonoras y ultrasonoras penetran la superficie del mar alcanzando grandes profundidades, por lo que se aplica para la señalización y detección submarina, el control de torpedos, las mediciones batimétricas de precisión, el perfilado del subsuelo, la detección de

plancton y el análisis de peces, así como su uso para la medición de la velocidad de la corriente aplicando el efecto Doppler.

Para su conocimiento o estudio se han desarrollado aparatos como los hidrófonos, los cuales captan sonidos del mar producidos por fenómenos físicos del agua, los organismos marinos e incluso las embarcaciones. La velocidad del sonido en el agua es de aproximadamente 1,500 m/s que varía en función de la salinidad, temperatura y presión. En geofísica, los hidrófonos se utilizan para la detección de energía sísmica que se manifiesta como cambios de presión durante la adquisición de sísmica marina, otras aplicaciones que se les da son en estudios biológicos subacuáticos, estudio de ruido de barcos, estudio de bombas y maquinaria.

3.2 Parámetros químicos

Una molécula de agua está formada por dos átomos de hidrógeno unidos a un átomo de oxígeno por enlaces débiles de hidrógenos, H₂O. Como se ha visto anteriormente, el aumento de la temperatura hace que las moléculas de agua se muevan. Cuanto mayor es la temperatura, más rápido se mueven ocasionando que los enlaces de hidrógeno se rompan convirtiendo el agua líquida en vapor a 100°C. Por el contrario, el frío disminuye el movimiento de las moléculas y el agua comienza a cristalizar a 0°C, disminuyendo su densidad lo que hace que el hielo flote.

En los océanos existe interacción química entre las rocas de la Tierra, la atmósfera y los seres vivos. Los parámetros químicos más relevantes para el estudio de las ciencias del mar y limnología son los gases, la salinidad y clorinidad.

Los **gases** presentes en la atmósfera al disolverse en los lagos u océanos forman un factor importante dentro de su estudio químico. El oxígeno, nitrógeno y dióxido de carbono (CO₂) están presentes en el agua oceánica y continental. La vida marina depende del oxígeno y del dióxido de carbono para procesos metabólicos, por ejemplo, es utilizado por el fitoplancton para producir materia vegetal. De manera contraria, el océano también libera estos gases hacia la atmósfera.

La temperatura también es un factor que regula la disolución de los gases; sin embargo, la velocidad de disolución es diferente ya que en el agua fría se retienen mejor los gases que en el agua caliente.

En los 20 metros superiores del océano se concentra la mayor cantidad de oxígeno dando lugar a la fotosíntesis y donde se presenta la mayor diversidad de vida marina. Alrededor de los 500 metros se encuentra una capa de oxígeno mínima; sin embargo, a medida que aumenta la profundidad, el océano se vuelve a oxigenar a partir del agua fría rica en oxígeno que se ha hundido de la superficie.

Por otro lado, el dióxido de carbono es un gas del efecto invernadero que contribuye al calentamiento global, el cual comienza a tener un impacto en el planeta. Al aumentar la cantidad de CO₂ en la atmósfera el océano puede exceder su capacidad para absorberlo y procesarlo, ocasionando un desequilibrio de la química en el océano interrumpiendo procesos biológicos como las redes tróficas y la productividad de la vida marina a gran escala por otro lado también se modifica la dinámica oceánica y atmosférica por el incremento de calor.

La **salinidad** se constituye en mayor parte por minerales en forma de iones, que son partículas cargadas eléctricamente. La sal del agua de mar se compone principalmente de cloruro de sodio con el 85% del total, el 15% restante pertenece a sulfatos, magnesio, calcio, potasio, bicarbonato, bromuro, borato, estroncio, fluoruro, entre otros componentes. La vida marina depende de esta propiedad, pocas especies pueden vivir tanto en agua dulce como en agua salada, y las que sí se caracterizan por mecanismos especiales para enfrentar las fluctuaciones de salinidad.

En el caso de la oceanografía física, conocer la salinidad junto con la temperatura en un determinado lugar permite obtener valores de densidad, el cual es un parámetro que, junto con el efecto Coriolis que es el efecto por la rotación de la Tierra, permite conocer las corrientes y el transporte de sales en el océano.

A finales del siglo XIX, los científicos descubrieron que las cantidades relativas de iones en diferentes muestras de agua de mar permanecían constantes. Por ejemplo, una muestra de agua de mar tomada del Atlántico contendrá un 55,03% de cloruro y un 30,59% de sodio como porcentaje de su salinidad total. Una muestra similar tomada del Pacífico contendrá la misma proporción de estos iones. Esta consistencia demuestra la interconexión de todos los océanos y la vida marina que contienen (MarineBio, 2019). Posteriormente se determinó que medir la salinidad en función de la cantidad de cloro resulta más factible, originando la *clorinidad*.

La clorinidad se define como la cantidad total de gramos de cloro contenida en un kilogramo de agua de mar, admitiendo que el yodo y el bromo han sido sustituidos por el cloro. Mediante esta definición resulta sencillo determinar por análisis químico la salinidad, incluso con mayor precisión.

3.3 Parámetros biológicos

La distribución y abundancia del ecosistema marino está determinado por los gradientes de temperatura, presión, salinidad, oxígeno, nutrientes, profundidad de penetración de la luz, entre otros. El estudio de los organismos es amplio, debido al tamaño y complejidad de los mares y océanos, por lo que se originaron divisiones de ambientes, definidos por las comunidades de organismos que las habitan. El ambiente pelágico, que abarca el agua de los océanos caracterizado por el plancton y necton, y el bentónico, conformado por el fondo oceánico y con presencia de la

infauna béntica, donde viven organismos enterrados por sedimentos y la epifauna béntica donde viven adheridos a las rocas o a la vegetación e incluso se mueven sobre el fondo marino. Según su tipo de movimiento, se clasifican en sésiles, si viven adheridos al lecho marino; semisésiles, si son organismos que reptan y vágiles si tienen una facilidad de movimiento en la superficie del mar.

Un ejemplo de la influencia de la temperatura en la biología del mar es que en los días más cortos y con ángulos de energía radiante más bajos, limitan la tasa de crecimiento del fitoplancton, lo que a su vez limita la producción primaria y la tasa de crecimiento de los organismos más altos en la cadena alimenticia.

Las aguas cambian de azul a verde a medida que aumenta la cantidad de fitoplancton que disuelve los nutrientes inorgánicos provocando un aumento en la biomasa de clorofila. La biomasa de zooplancton también aumenta proporcionando alimento para toda una red trófica que depende de la energía que proporcionan.

3.4 Parámetros geológicos

El análisis geológico de océanos, mares y lagos se basa en la toma de muestras de sedimentos del fondo a diferentes profundidades según el perfil topográfico de la cuenca de estudio. Utilizando parámetros texturales, petrológicos y geoquímicos se caracterizan ambientes sedimentarios tales como ríos, dunas, playas, y en la plataforma continental arrecifes de coral, entre otros. Asimismo, se realizan análisis de procedencia a partir de estudios sedimentológicos utilizando índices químicos de alteración, elementos mayores, elementos traza y tierras raras.

La sedimentología estudia los procesos de formación, transporte, depósito del material acumulado como sedimento en ambientes continentales y marinos, así como los procesos de erosión con lo cual es posible conocer las características del ambiente en el que se produjo la sedimentación, la topografía o forma del fondo, la profundidad y la dinámica del agua, tanto en la zona de estudio como las áreas que la circundan.

Los sedimentos marinos están clasificados por tamaño de grano o su origen. De menor a mayor, los tamaños de partículas son arcilla, limo, arena y grava. Clasificados por origen son: litogénicos, biogénos, autígenos, volcanogénicos y cosmógenos.

Los **litogénicos** provienen de materiales derivados de zonas continentales que, debido a la erosión fueron transportados al mar y son los más abundantes. Los **biógenos** se derivan de los organismos marinos, como caparzones carbonatados o sílice de invertebrados. Los **autígenos** se componen de minerales que cristalizaron, derivados de reacciones químicas inorgánicas en el mar como calizas, evaporitas, arenas de glauconitas y nódulos de manganeso. Como su nombre lo indica, los sedimentos **volcanogénicos** son partículas provenientes de volcanes. Finalmente, los

cosmogénicos, son partículas de cuerpos originados en el espacio o extraterrestre (NOAA, Section 4. Ocean Geologic Features, 2011).

El fondo oceánico se conforma principalmente por rocas ígneas basálticas, sobre las cuales se encuentra una capa de sedimentos que pueden estar o no consolidados. Mediante la batimetría se registra la profundidad, logrando reconocer el relieve del fondo marino producto de procesos de dinámica interna generados por el movimiento de las placas tectónicas y por actividad volcánica principalmente, por lo que el relieve es muy variado teniendo, por ejemplo, los cañones submarinos, montículos aislados, abanicos, ventilas hidrotermales, fisuras, fallas, la plataforma continental, talud continental y la llanura abisal (Gómez, Lince, Luna, & Alatorre, 2018).

4. Variables termodinámicas del océano

En Termodinámica se utilizan un número muy reducido de variables, cuyo significado y cuantificación se han explicado ya, para este caso, las propiedades o variables más importantes a medir son la temperatura y la presión ya que éstas nos permiten describir los estados de equilibrio de los sistemas acuáticos.

4.1 Temperatura del océano

Como se explicó anteriormente, nuestro planeta se calienta por la luz solar o energía radiante proveniente del sol, la cual en mayor parte es absorbida por los océanos. Estas grandes cantidades de calor provocan un leve aumento de la temperatura.

Además de la luz solar, las nubes, el vapor de agua y los gases de efecto invernadero también emiten calor hacia el océano. Las corrientes oceánicas, olas y mareas mezclan constantemente el océano, distribuyendo la temperatura de latitudes más cálidas hacia las más frías y a niveles más profundos. Este transporte de calor se debe a la circulación atmosférica y oceánica de norte-sur, o de latitudes bajas a altas para equilibrar las ganancias y las pérdidas, y recibe el nombre de *transporte meridional*.

La circulación atmosférica también influye ya que cuando el viento sopla sobre el océano alrededor de los centros de presión, las ondas superficiales son generadas al transferir parte de la energía del viento en forma de impulso de aire hacia el agua. Este empuje sobre la superficie del océano en conjunto con el efecto Coriolis origina la fuerza que forma las corrientes superficiales.

La parte superficial del océano, al recibir la mayor cantidad de luz solar, aumenta su temperatura por lo que el flujo de calor a las capas profundas del océano suele ser mucho menor que el flujo a

través de la superficie. La suma de los cambios en los flujos de calor de un volumen de agua se denomina balance de calor. Los principales términos del balance en la superficie del mar son:

1. Insolación Q_{SW} , el flujo de luz solar dentro del mar;
2. Radiación infrarroja neta Q_{LW} , flujo neto de la radiación infrarroja del mar;
3. Flujo de calor sensible Q_S , el flujo de calor a través de la superficie debido a la conducción;
4. Flujo de calor latente Q_L , el flujo de calor llevado por la evaporación del agua; y
5. Advección Q_V , calor llevado por corrientes.

La conservación del calor requiere:

$$Q_T = Q_{SW} + Q_{LW} + Q_S + Q_L + Q_V$$

Donde Q_T es resultado del calor perdido o ganado. El cambio de temperatura ΔT del agua está relacionado con el cambio de energía ΔE a través de:

$$\Delta E = C_p m \Delta T$$

Donde m es la masa del agua que comienza a calentarse o enfriarse y C_p es el calor específico del agua de mar a una presión constante. $C_p \approx 4.0 \times 10^3 [J \cdot kg^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}]$. Estos 4,000 Joules de energía son los requeridos para calentar 1.0 [kg] de agua de mar a 1.0°C.

Dentro de los factores que afectan directamente el balance de calor podemos mencionar los siguientes para cada término:

- La radiación solar entrante está determinada principalmente por la latitud, estación, hora del día y nubosidad.
- En el flujo infrarrojo depende de la claridad de la ventana atmosférica, donde se ve involucrado el espesor y peso de las nubes que determina la temperatura a la que la nube irradia calor de regreso al océano, y el contenido de vapor de agua en la atmósfera.
- El flujo de calor latente es influenciado principalmente por la velocidad del viento y la humedad relativa.
- El flujo de calor sensible está en función de la velocidad del viento y la diferencia de temperatura aire-mar.

En la Tabla 1 se muestra el rango del promedio anual para los términos del balance de calor.

Promedio anual para los términos del balance de calor	
Parámetro	Rango [$W \cdot m^{-2}$]
Insolación	$30 < Q_{SW} < 260$
Radiación infrarroja neta	$-60 < Q_{LW} < -30$
Flujo de calor sensible	$-130 < Q_S < -10$
Flujo de calor latente	$-42 < Q_L < -2$

Tabla 1. Rango de los valores promedio para cada uno de los términos que involucra el flujo de calor (Stewart, 2008).

La temperatura del océano varía de manera latitudinal y en función de la profundidad. El sentido latitudinal se refiere a las variaciones de la temperatura en la superficie del océano, éstas están en función de la energía radiante absorbida y del lugar geográfico. Debido a la forma y rotación de la Tierra, y al ángulo de incidencia de la luz solar, en las latitudes cercanas al ecuador la energía radiante que incide durante todo el año calienta las aguas superficiales.

Los mares tropicales se calientan más que otras zonas por el aumento de temperatura por lo que hay más evaporación ocasionando una termorregulación del planeta. Los vientos alisios llevan el calor en forma de vapor de agua a la zona de convergencia tropical donde cae en forma de lluvia liberando el calor latente evaporado del mar y calentando el aire en los cúmulos de lluvia hasta en $125 [W/m^2]$ en promedio durante un periodo de seis años. Como resultado, el agua dulce que cae al océano contribuye a la disminución de la salinidad del agua superficial en esta región.

Los lugares más salados del océano son las regiones donde la evaporación es más alta o en grandes masas de agua donde no hay salida al océano. El agua del océano más salado es el Mar Rojo y la región del Golfo Pérsico (alrededor de 40 ups) debido a la muy alta evaporación y la poca entrada de agua dulce.

Por otro lado, la variación de la temperatura en función de la profundidad se debe a que cuanto mayor sea la profundidad, la presencia de luz solar es menor provocando que las aguas profundas mantengan temperaturas bajas, en la Figura 2 se muestra un perfil del comportamiento de la temperatura donde al incrementar la profundidad la temperatura disminuye. Por contraste de densidades, el agua fría se hunde por debajo del agua caliente en la superficie, que también contribuye a

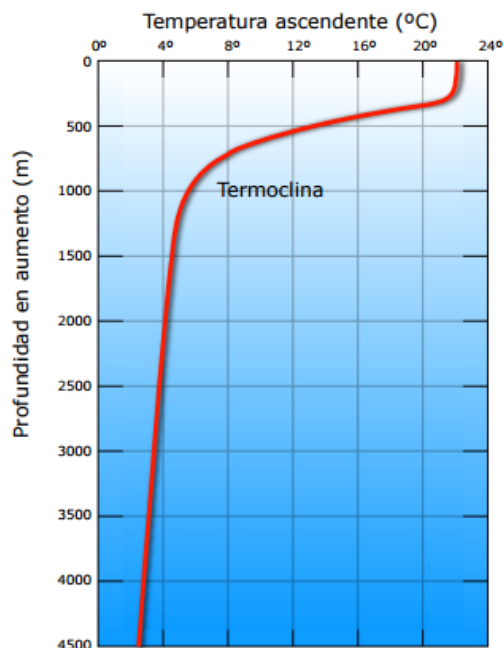
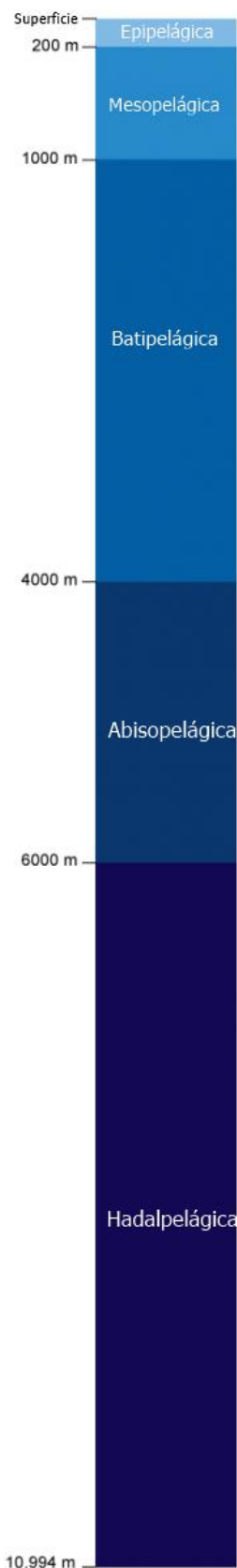


Figura 2. Perfil típico de temperatura °C vs profundidad [m]. Recuperado de: <http://1.bp.blogspot.com/-HY1i4tc1GZM/WBJHJfgX9YI/AAAAAAAAAig/eFXzqkzf9AcggAOylUCAhInkWJaYi40gCK4B/s1600/Sin%2Bt%25C3%25ADtulo.png>



las bajas temperaturas del océano profundo (NOAA, How does the temperature of ocean water vary?, 2018).

La estructura vertical en el océano está formada por capas que se establecieron por los gradientes de temperatura, los cuales tienen un gran impacto en la distribución de la vida en el océano. La Figura 3 ilustra las capas verticales del océano denominadas *zonas*, a continuación, se describe las características más relevantes de cada una de ellas.

- **Zona epipelágica**

Es la capa superficial superior, también conocida como *zona fótica*, se extiende desde la superficie hasta los 200 metros. En esta zona hay interacción con el viento y las olas que mezclan el agua y distribuyen el calor. Las temperaturas en la superficie del mar van desde los 36°C (97°F) en el Golfo Pérsico hasta los -2°C (28°F) cerca del Polo Norte. En la base de esta capa se encuentra la termoclina, la cual es una región de transición entre la mezcla de agua cálida de la superficie y el agua fría en la profundidad. La profundidad y la fuerza de la termoclina varía de una temporada a otra y de un año a otro. En los trópicos es constante, fluctúa en las regiones templadas y poco profundas o es inexistente en las regiones polares, donde la columna de agua es fría desde la superficie hasta el fondo oceánico (NOAA, What is a thermocline?, 2019).

- **Zona mesopelágica**

Esta zona se extiende desde los 200[m] hasta los 1,000[m]. Suele denominarse zona crepuscular o zona media del agua ya que la luz del sol es débil a esta profundidad. La temperatura cambia más debido a la termoclina. Debido a la falta de luz, la bioluminiscencia comienza a presentarse en la vida marina.

- **Zona batipelágica**

Se comprende de los 1,000 a 4,000 [m], debido a su oscuridad constante también se le conoce como *zona de medianoche*. La luz visible en esta zona proviene de la bioluminiscencia de los propios animales. La temperatura es constante, nunca se aleja de los 4°C (39°F) y la presión en esta zona es extrema.

- **Zona abisopelágica**

Denominada *zona abisal*, se extiende desde los 4,000 a 6,000 [m]. Tres cuartas partes del fondo marino profundo se encuentran en esta zona. Su temperatura está constantemente cerca del punto de congelación y solo se puede encontrar poca vida marina.

Figura 3. Columna de agua que muestra la división de las zonas del océano (NOAA, 2018).

- **Zona hadalpelágica**

Es la zona más profunda del océano, va desde los 6,000 [m] hasta el fondo que se encuentra aproximadamente a 10,994 [m] en la Fosa de las Marianas frente a la costa de Japón. La temperatura está por encima del punto de congelación. El peso de toda la columna de agua en la Fosa de las Marianas es de más de 8 toneladas por pulgada cuadrada.

En 2005, se descubrieron pequeños organismos unicelulares en el fondo oceánico pertenecientes a una variedad de foraminíferos, un tipo de plancton, en la fosa Challenger Deep al suroeste de Guam en el Océano Pacífico. El pez más profundo que se ha encontrado se denomina *Abyssobrotula galathea* y habita en la Fosa de Puerto Rico a 8,372 metros (NOAA, 2018).

4.2 Relación profundidad-presión en el océano

Cuando nos encontramos al nivel del mar, el gas atmosférico que nos rodea ejerce una presión sobre nuestro cuerpo de alrededor de 101.353 [kPa]. No nos percatamos de esta fuerza debido a que los fluidos del cuerpo ejercen una fuerza igual hacia afuera del cuerpo.

¿Qué pasa en el océano? Incluso cuando nos sumergimos en una alberca, se produce un cambio notable. Se logra sentir un aumento de presión sobre los tímpanos. Esto se debe al aumento de la *presión hidrostática*. En el océano, cuanto más se adentra, mayor será la presión que ejerce el agua que empuja al cuerpo. Por cada 10.06 [m] que desciende, la presión aumenta una atmósfera (101.325 [kPa]) (NOAA, How does pressure change with ocean depth?, 2020).

Hasta este punto se sabe que la presión está en función de la profundidad ya que incrementa a mayor profundidad. Determinar la presión en el océano a cierta profundidad y a una ubicación determinada es útil para muchas aplicaciones de la acústica en el océano. Principalmente en la propagación del sonido, que depende de la variación de la velocidad del sonido con la profundidad y alcance.

La profundidad debe usarse en los diversos cálculos de propagación del sonido y debido a que la velocidad local del sonido en el océano varía con la temperatura T , la salinidad S y la presión P , las ecuaciones que se utilizan tienen estos parámetros.

De acuerdo con la investigación de N. P. Fofonoff and R. C. Millard, Jr., Unesco Tech. Papers in Mar. Sci. No. 44 (1983), la profundidad Z en el océano se obtiene a partir de la presión y la latitud mediante la siguiente ecuación que se obtiene al resolver la ecuación hidrostática:

$$\int_0^Z g z \phi dZ = \int_0^P V_{TSP} dP$$

Donde, $Z_S(P, \phi)$ es la expresión universal que los oceanógrafos utilizan para dar profundidad al “océano estándar”, un medio ideal con $T = 0\text{ }^\circ\text{C}$ y $S = 35\text{ ups}$. (Leroy & Parthiot, 1998). En este caso, V_{TSP} representa el volumen en función de T temperatura, S salinidad y P presión. El efecto en la densidad por cambios de temperatura y salinidad se puede comparar con el efecto de la densidad por cambios de profundidad y presión. La profundidad Z que se obtiene a partir de la presión está relacionada con la latitud por el efecto de la radiación solar, la cual dependiendo del ángulo de incidencia será mayor en el Ecuador y los trópicos y va disminuyendo hacia los polos.

5. Zonas térmicas

En el océano, la distribución de la temperatura en la superficie tiende a ser zonal, es decir, es independiente de la longitud. Como se ha visto a lo largo del capítulo, el agua más caliente está cerca del ecuador, especialmente en el lado occidental del océano y el agua más fría está cerca de los polos. En el oeste, el aire frío sopla de los continentes en invierno y enfría el océano. El enfriamiento domina el balance de calor.

La distribución de la salinidad en el océano también es zonal y a su vez verifica su estrecha relación con la temperatura. Las aguas más saladas se encuentran en latitudes medias donde la evaporación es alta. Las aguas menos saladas se encuentran cerca del ecuador, donde la lluvia reduce la salinidad de las aguas superficiales, y en las latitudes altas donde el hielo marino derretido también reduce la salinidad de las aguas superficiales (Stewart, 2008).

A continuación, se detallará sobre la distribución de las zonas térmicas del océano mundial y, posteriormente se enfatizará en la distribución sobre los mares mexicanos.

5.1 Zonas térmicas del océano mundial

Por definición existen tres grandes océanos según sus características de profundidad y extensión, y son: el Atlántico, Índico y el Pacífico; y dos menores: el Ártico y Antártico como se aprecia en la Figura 4Figura 3. A su vez, cada uno de ellos tiene mares marginales como el Báltico, el Caribe, el Golfo de México, el Mar Mediterráneo, etc.

El promedio zonal en términos del balance de calor oceánico demuestra que la insolación es mayor en los trópicos, que la evaporación equilibra la insolación y que el flujo de calor



Figura 4. Distribución de los océanos mundiales. Recuperada de: <https://es.wikipedia.org/wiki/Oc%C3%A9ano#/media/Archivo:Oceanus-es.png>

sensible es pequeño. La integral ponderada por área de la curva para el flujo de calor total no es cero. Dado que se conoce la cantidad aproximada de calor y agua dulce que son transportados por los océanos y la atmósfera, los valores conocidos de estos transportes pueden usarse para restringir los cálculos de los flujos netos de calor (Figura 5). Los flujos restringidos muestran que el océano gana calor en los trópicos y pierde calor en las latitudes altas.

La insolación es la radiación neta de onda corta descendente en la superficie del mar (Figura 6 Superior) muestra que el gran flujo hacia la región tropical está modulado por la distribución de las nubes y que el calentamiento es positivo en todas partes.

El flujo de calor infrarrojo neto (Figura 6 inferior) es mayor en las regiones con menos nubes, como los giros centrales y el Pacífico central oriental. El flujo infrarrojo neto es negativo en todas partes. Los flujos de calor latentes (Figura 7) están dominados por la evaporación en las regiones de vientos alisios y el flujo de masas de aire frío en alta mar detrás de frentes fríos en invierno en alta mar de Japón y América del Norte.

Los flujos de calor sensibles (Figura 8 Superior) están dominados por el aire frío que sopla desde los continentes. La ganancia neta de calor (Figura 8 inferior) es mayor en las regiones ecuatoriales y la pérdida neta de calor es mayor en la dirección del viento en Asia y América del Norte.

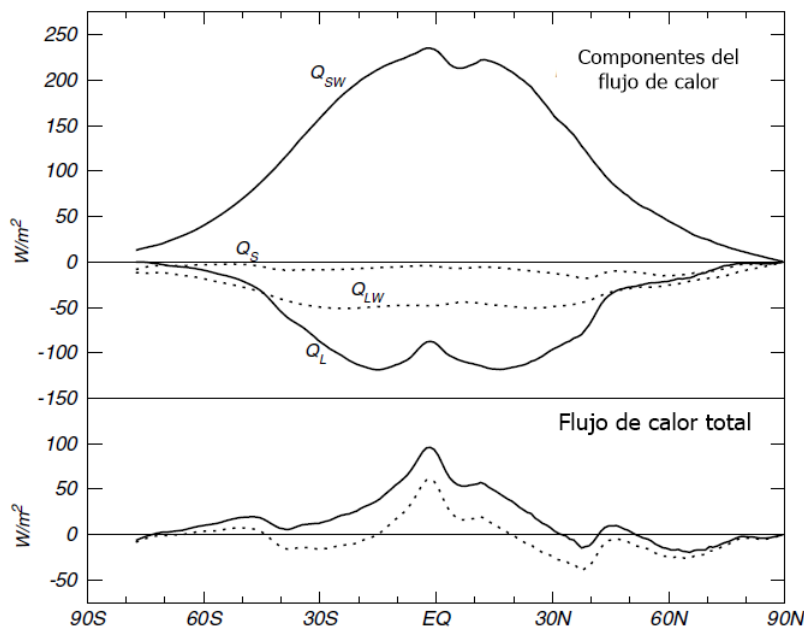


Figura 5. Superior: promedios zonales de transferencia de calor al océano por insolación Q_{sw} y pérdida por radiación infrarroja Q_{LW} , flujo de calor sensible Q_s y flujo de calor latente Q_L , calculados por DaSilva, Young y Levitus (1995) utilizando el conjunto de datos de COADS. Inferior: flujo de calor neto a través de la superficie del mar calculado a partir de los datos anteriores (línea continua) y flujo de calor neto restringido para proporcionar transporte de calor y agua dulce por el océano que coinciden con cálculos independientes de estos transportes. El área bajo las curvas inferiores debería ser cero, pero es de 16 W / m^2 para el caso sin restricciones y de -3 W / m^2 para el caso restringido. Modificada (Stewart, 2008).

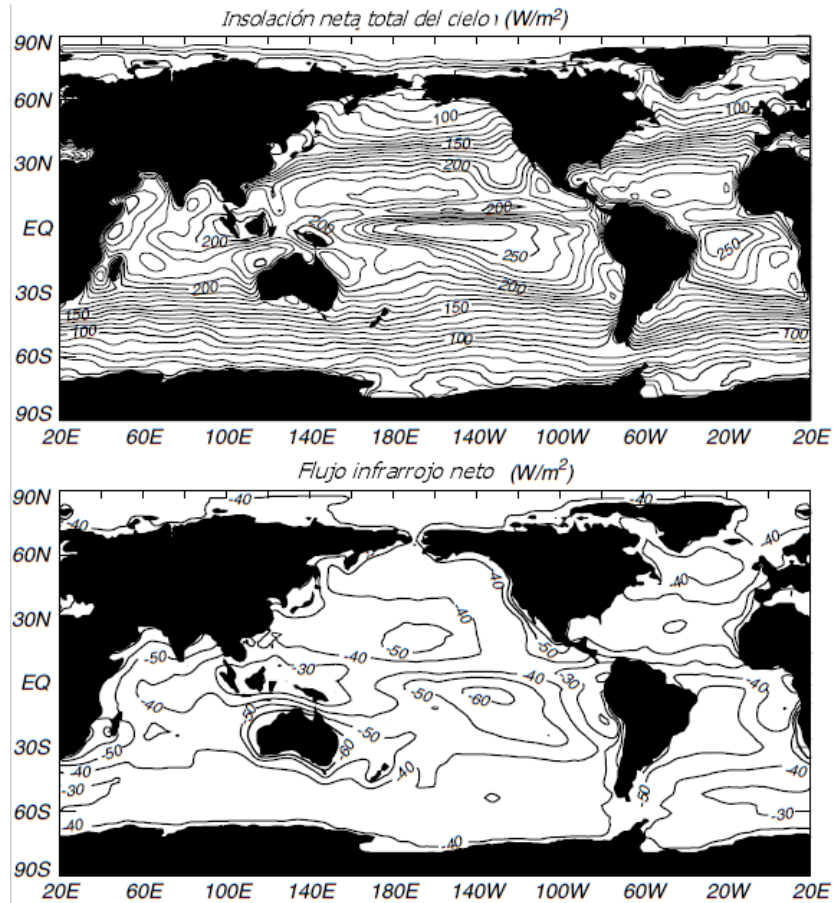


Figura 6. Q_{sw} de insolación media anual (superior) y Q_{LW} de radiación infrarroja (inferior) a través de la superficie del mar durante 1989 calculada por el Centro de Análisis de Datos Satelitales en el Langley Research Center de la NASA (Darnell et al., 1992) usando datos del Proyecto Internacional de Climatología de Nubes por Satélite. Las unidades son $[W/m^2]$, el intervalo de contorno es 10 $[W/m^2]$. Modificada (Stewart, 2008).

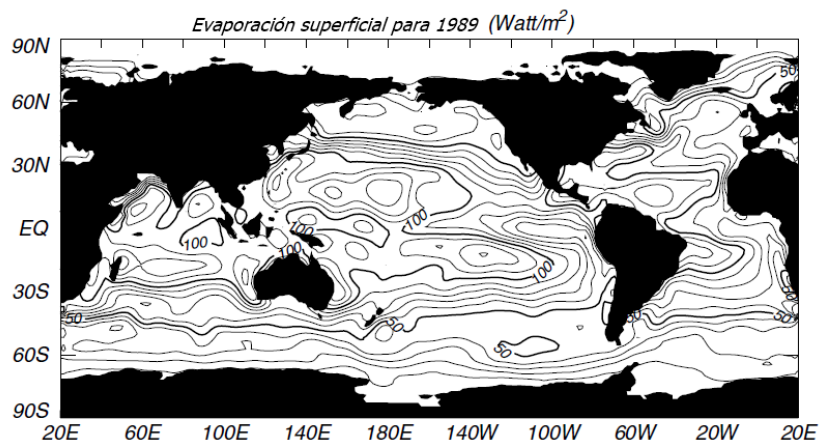


Figura 7. Flujo de calor latente medio anual de la superficie del mar Q_L en $[W/m^2]$ durante 1989 calculado a partir de datos compilados por la Oficina de Asimilación de Datos del Centro de Vuelo Espacial Goddard de la NASA utilizando resultados reanalizados del modelo de predicción meteorológica numérica ECMWF. El intervalo de contorno es de 10 $[W/m^2]$. Modificada (Stewart, 2008).

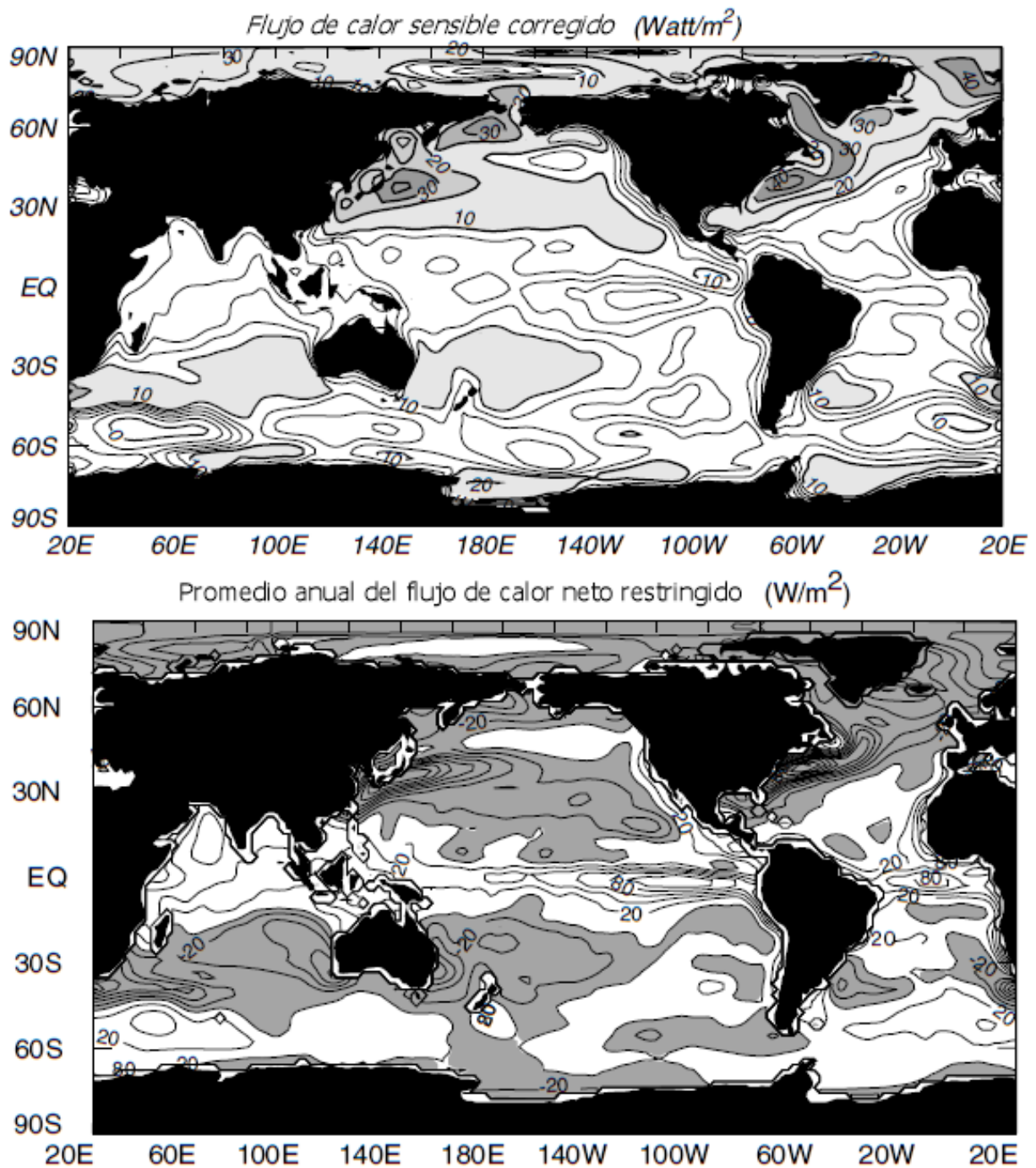
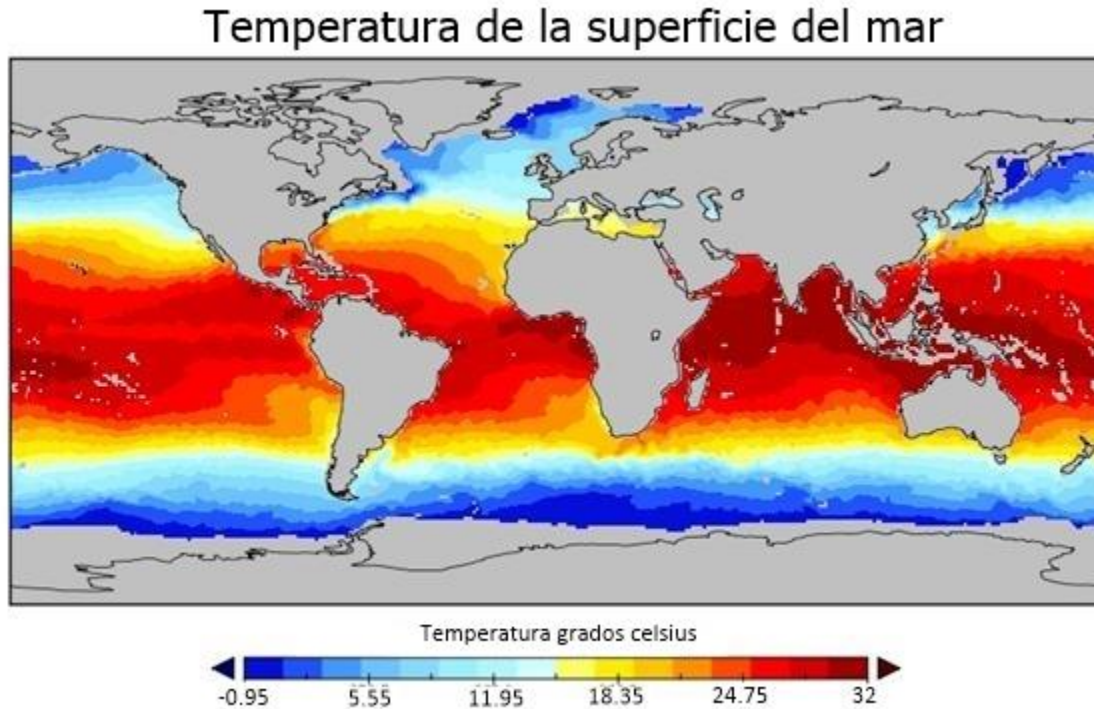


Figura 8. Flujo de calor sensible ascendente promedio anual Q_s Superior y flujo de calor neto restringido hacia abajo Inferior a través de la superficie del mar en [W/m²] calculado por DaSilva, Young y Levitus (1995) utilizando el conjunto de datos de COADS de 1945 a 1989. El intervalo de contorno es 2 [W/m²] (superior) y 20 [W/m²] (inferior). Modificada (Stewart, 2008).

En la Figura 9 se muestra un mapa de la distribución de la temperatura en grados Celsius en la superficie del océano mundial. Se observa que las temperaturas más altas se encuentran cercanas al ecuador y, conforme se aleja hacia los polos van disminuyendo.



*Figura 9. Mapa que muestra una ejemplificación de la distribución de la temperatura de la superficie oceánica, unidades °C.
Modificada <https://doi.org/10.5067/SST00-1D1M1>.*

El transporte de calor en el océano se puede calcular de tres maneras:

1. Método del flujo superficial, se basa en mediciones de viento, insolación, aire y temperatura del mar, nubosidad y fórmulas de bulk para estimar el flujo de calor en la superficie del mar. Posteriormente los flujos son integrados para obtener el promedio zonal del flujo de calor.
2. Método directo, utiliza valores medidos de velocidad y temperatura de la corriente de arriba hacia abajo a lo largo de una sección zonal que abarca la cuenca oceánica. Estos valores se emplean para calcular el flujo a partir del producto de la velocidad hacia el norte y el contenido de calor derivado de la medición de temperatura.
3. Método residual, usa observaciones atmosféricas o de salida de modelos numéricos de la circulación atmosférica para calcular el transporte de calor en la atmósfera. El transporte atmosférico se resta del transporte meridional total calculado a partir del flujo de calor de la parte superior de la atmósfera para obtener la contribución oceánica como residuo.

5.2 Zonas térmicas en mares mexicanos

México es un país megadiverso a nivel mundial y cuenta con una mayor extensión oceánica (~65%) que terrestre (35%). Los mares y océanos mexicanos se señalan en la Figura 10, se distribuye en la región del Océano Pacífico incluyendo el Golfo de California y Tehuantepec y en el Océano Atlántico con el Golfo de México y el Mar Caribe. A su vez el Golfo de México contiene al Golfo de Campeche. Esto origina una gran variedad de especies y ecosistemas (Mares Mexicanos, 2003).



Figura 10. Mapa de México donde se señalan los océanos y mares principales (Conabio, 2003). Recuperada de http://www.conabio.gob.mx/gap/index.php/Procesos_oceanogr%C3%A1ficos.

Golfo de México

Se caracteriza por ser un sistema semi-cerrado con una entrada oceánica por medio del Caribe (Figura 10) a través del Canal de Yucatán y una salida por el estrecho de Florida, con una profundidad superior a los 3,600[m] en la parte central de la cuenca. Las características físicas más pronunciadas son la corriente del Lazo y sus remolinos ciclónicos y anticiclónicos asociados. Los giros anticiclónicos que se reciben en esta región se desprenden de la corriente cálida del Caribe.

En la región sur del Golfo de México descargan sus aguas dos ríos importantes: el Coatzacoalcos y el sistema Grijalva-Usumacinta. En esta región se presenta una circulación de tipo ciclónica semipermanente. Este aporte de agua dulce disminuye la salinidad y modifica la temperatura marina creando un frente costero.

Corriente del Lazo

La circulación del Golfo de México tiene influencia de aguas cálidas y salinas que entran por el estrecho de Yucatán, la cual se mezcla el Golfo de México para posteriormente salir por el estrecho de Florida formando un meandro. Parte de la corriente forma anillos anticiclónicos, los cuales generan remolinos ciclónicos en las aguas adyacentes. Este comportamiento produce una franja plegada hacia el este que se denomina corriente del Lazo como se observa en la Figura 11. Esta corriente es un flujo de agua de alta salinidad y temperaturas superficiales durante el verano de 28 a 29°C, que disminuyen en el invierno alrededor de los 24 y 26°C.

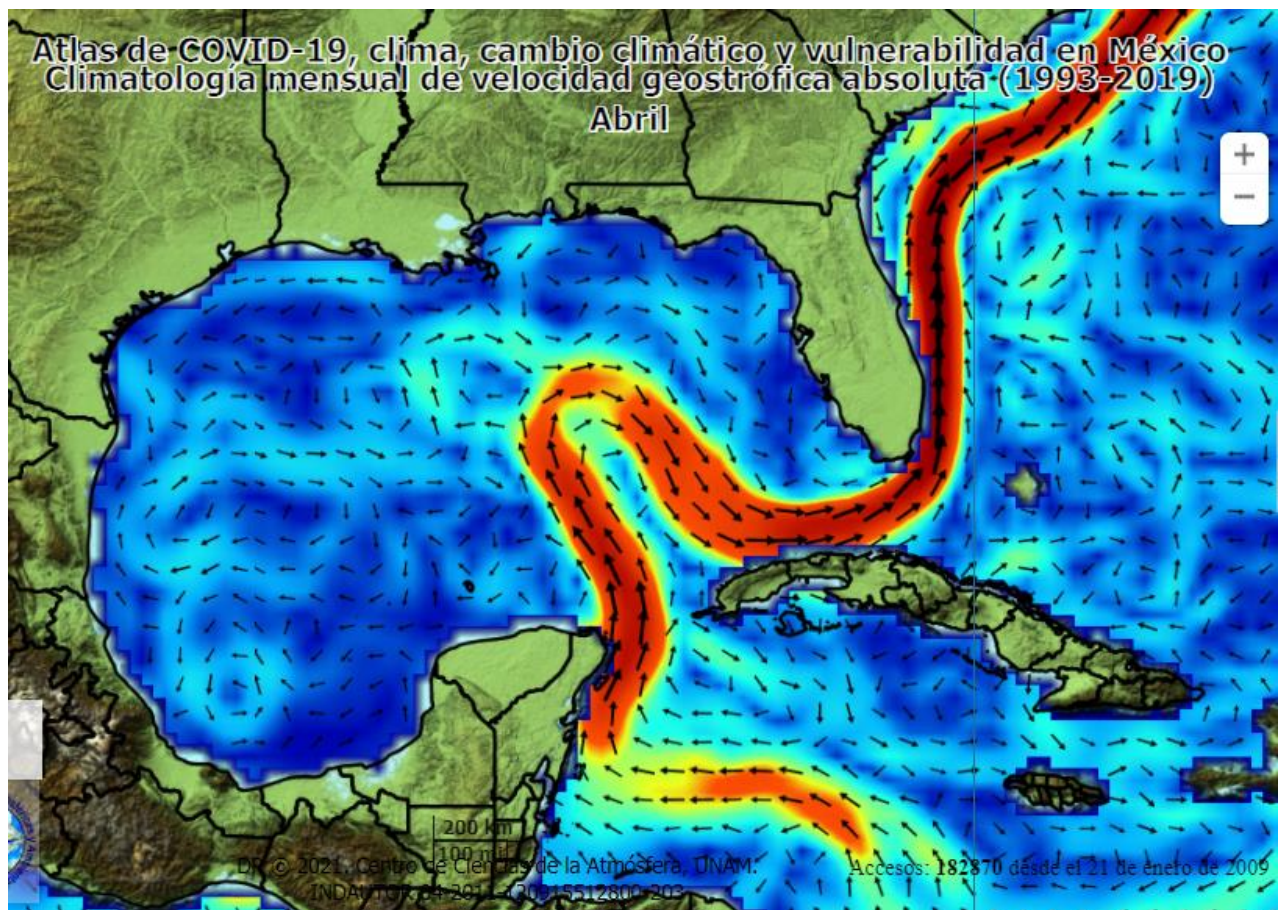


Figura 11. Mapa de Climatología de abril 2021 de la velocidad geostrofica absoluta. Captura de la zona del Golfo de México. UNIATMOS, UNAM. <http://ri.atmosfera.unam.mx:8080/ACVC/servmapas>

Los giros anticiclónicos mencionados son áreas de temperaturas cálidas y salinas semejantes a las del Lazo. Cuando el flujo de intromisión dentro del Golfo se reduce, los giros pueden constituirse como anillos aislados. Los giros anticiclónicos también conocidos como *giros cálidos* debido a que en la superficie presentan convergencia y por conservación de masa tienden a hundir el agua

superficial que es más cálida generando un descenso de aguas con temperaturas más bajas que las de su entorno. Estos giros al igual que los giros ciclónicos cumplen con la ley de la vorticidad de la mano derecha, los giros ciclónicos presentan divergencia en la superficie y por lo tanto se genera un ascenso de agua por debajo de la superficie que es un poco más fría, por ello se les conoce como giros fríos.

En la región noroeste se presentan variaciones estacionales del viento y el aporte fluvial de los ríos Bravo, Soto la Marina y Pánuco influyen en la corriente modificando las propiedades térmicas y salinas de la región.

A pesar de que la corriente del Lazo es permanente en el Golfo de México, los satélites la detectan con claridad en las temporadas frías. Durante los meses cálidos la zona epipelágica del Golfo se vuelve isotérmica debido a la energía radiante.

Por otro lado, las variaciones de temperatura que se presentan en el Golfo son producto de la interacción de las aguas cálidas de la corriente del Lazo con las aguas más frías, por ejemplo, las provenientes del Río Mississippi y por efecto de los nortes que resultan de los frentes fríos y del efecto de los huracanes.

Mar Caribe Mexicano

Se conforma por la parte norte del Mar Caribe, constituido por cinco cuencas principales dentro de las cuales se encuentra la de Yucatán. La cuenca de Yucatán une al Mar del Caribe con el Golfo de México a través del Canal de Yucatán (ver Figura 8).

Durante el verano y otoño se presentan tormentas tropicales y huracanes por el calentamiento de la superficie del agua. La zona epipelágica del Mar Caribe se calienta desde inicios de febrero hasta mediados de septiembre. Alcanzando valores máximos durante abril y agosto y valores mínimos relativos durante junio, resultando una fase de siete meses de calentamiento. Esta capa se enfría durante los cinco meses restantes, alcanzando las menores temperaturas en diciembre. La corriente principal que influye en esta región es la corriente del Caribe, la cual tiene una dirección de este a oeste.

Costa occidental de Baja California

La costa occidental de Baja California se extiende desde la parte sur de California, EE. UU. hasta la boca del Golfo de California. Se considera una zona de transición entre el Golfo y el océano bajo la influencia de la Corriente de California, la Contracorriente Meridional. La corriente de California se caracteriza por condiciones bajas de salinidad y temperatura.

Corriente de California

Esta corriente fría nace de la división de la corriente del Pacífico del Norte al llegar a Norteamérica, donde fluye hacia el sur. El frente de esta corriente separa las aguas frías del Ártico de las aguas cálidas provenientes del sur. Eventualmente se une a la corriente Ecuatorial del Norte, la cual es una de las corrientes más cálidas que fluye de este a oeste cerca del Ecuador. En la Figura 12 se observa un mapa de las corrientes de California y Ecuador del Norte.

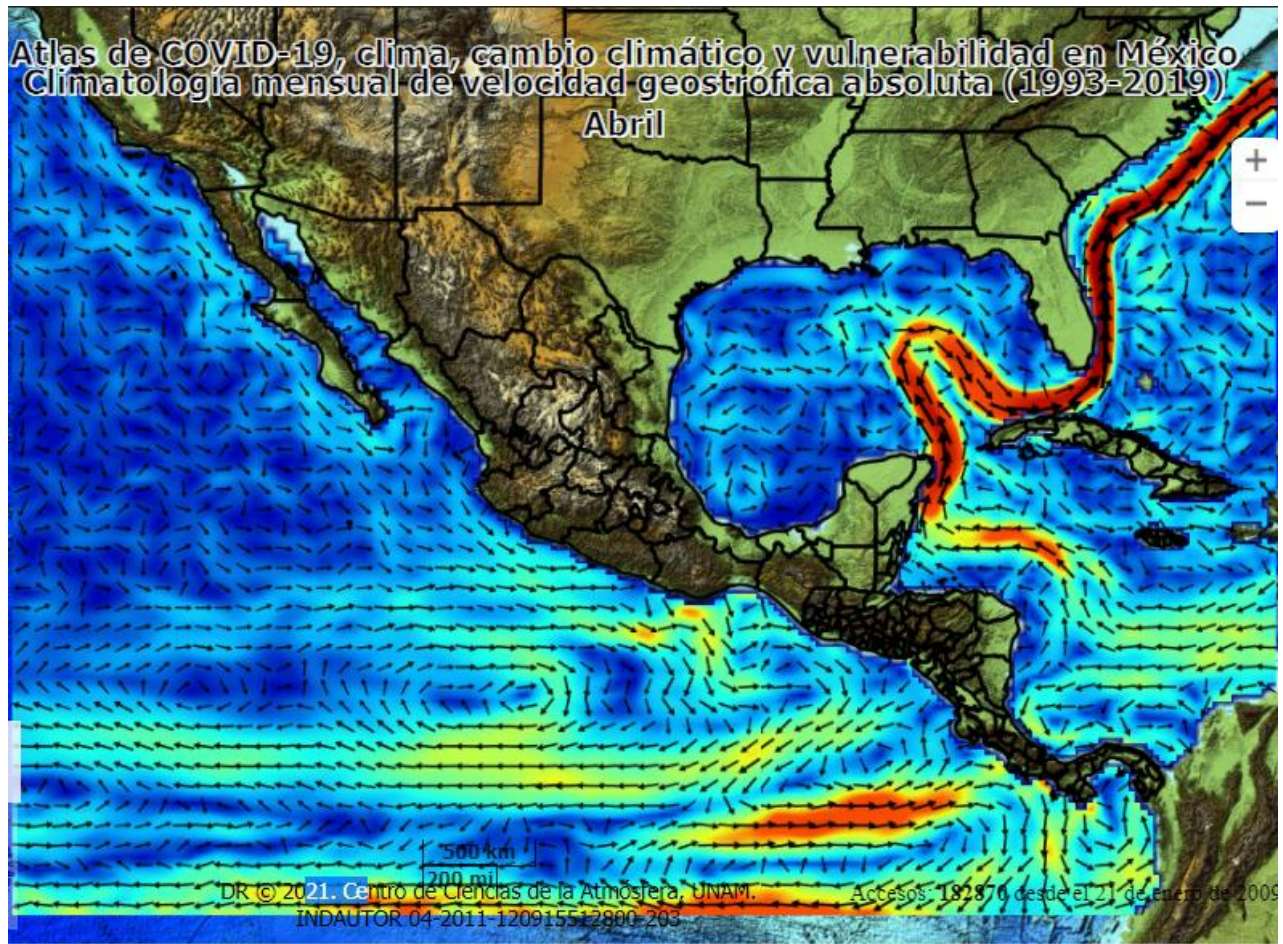


Figura 12. Mapa de Climatología de abril 2021 de la velocidad geostrofica absoluta. Captura de la zona del Pacífico mexicano. UNIATMOS, UNAM. <http://ri.atmosfera.unam.mx:8080/ACVC/servmapas>.

La corriente de California tiene temperaturas superficiales de 15 a 17°C, desplazándose sobre la costa occidental de la península de Baja California. La mezcla de la corriente de agua fría de California y la cálida de la Corriente Nor-Ecuatorial es apreciable al sur de San José del Cabo, Baja California Sur, donde se registran temperaturas superficiales de 17°C. En la región comprendida desde Mazatlán, Sinaloa, hasta las costas centroamericanas, la temperatura superficial alcanza valores cercanos a los 28°C.

Golfo de California

Este es un mar marginal muy dinámico, localizado entre la península de Baja California y la parte continental del occidente de México (ver Figura 8). El Golfo de California se considera una cuenca de evaporación que gana calor a través de la superficie, produciendo una importante modulación estacional. Las masas de aguas superficiales en la región sur del Golfo son de tres tipos: a) agua fría de baja salinidad proveniente de la corriente de California, b) agua templada y muy salina del Golfo de California y c) agua cálida de salinidad intermedia procedente del Pacífico tropical oriental.

La zona alta del Golfo presenta variaciones de temperatura, siendo más fuertes a lo largo de la península y, principalmente en la desembocadura del río Colorado, donde en invierno se han registrado temperaturas menores a 10°C y mayores a 32°C durante el verano. En las costas de Sonora se han registrado temperaturas superficiales entre invierno y primavera de 12 y 30°C respectivamente.

Más al sur, en la costa oeste del Golfo se localiza el Canal de Ballenas y la fosa Salsipuedes donde se han registrado temperaturas frías permanentes sin importar el aporte del viento. En el Golfo Interior, localizado entre la Isla Tiburón y la línea que une a Mazatlán y Cabo San Lucas, se presenta un incremento en la temperatura con relación a las regiones anteriores.

Pacífico tropical mexicano (central)

En esta zona se presentan la corriente de California y la Nor-Ecuatorial. En la zona cercana a las costas mexicanas la corriente Ecuatorial se caracteriza por tener aguas templadas de salinidad intermedia que fluyen hacia el norte desde el sureste.

La estructura térmica del Pacífico oriental se caracteriza por una capa superficial con temperaturas constantes, su variación anual fluctúa entre 26 y 28°C. En las costas de Guerrero la estructura térmica se encuentra alrededor de los 28°C similar a la de las aguas oceánicas, esta homogeneidad se extiende hacia el sur, entre Manzanillo, Colima y Puerto Ángel, Oaxaca.

Pacífico Tropical mexicano (Golfo de Tehuantepec)

Se localiza en la región suroccidental de México. Presenta una distribución heterogénea de la temperatura superficial debido al efecto del viento en el Golfo de Tehuantepec de las aguas frías subsuperficiales y un giro anticiclónico de aguas cálidas en la parte occidental del Golfo.

En invierno las temperaturas superficiales del mar son bajas donde las velocidades del viento son altas y también en las regiones inmediatamente adyacentes, lo cual muestra una gran difusión de agua fría hacia las regiones circundantes. Generalmente durante el verano los vientos son débiles

y soplan hacia el este por lo que no producen efecto en las aguas superficiales (Aguirre Gómez, 2002).

Finalmente, la Figura 13 muestra una ejemplificación de la distribución de la temperatura en los mares mexicanos durante el mes de diciembre del 2013. Hacia el norte del país las temperaturas son frías y conforme se desplaza hacia el sur la temperatura aumenta y mezcla en algunas zonas del Golfo de México y de Tehuantepec.

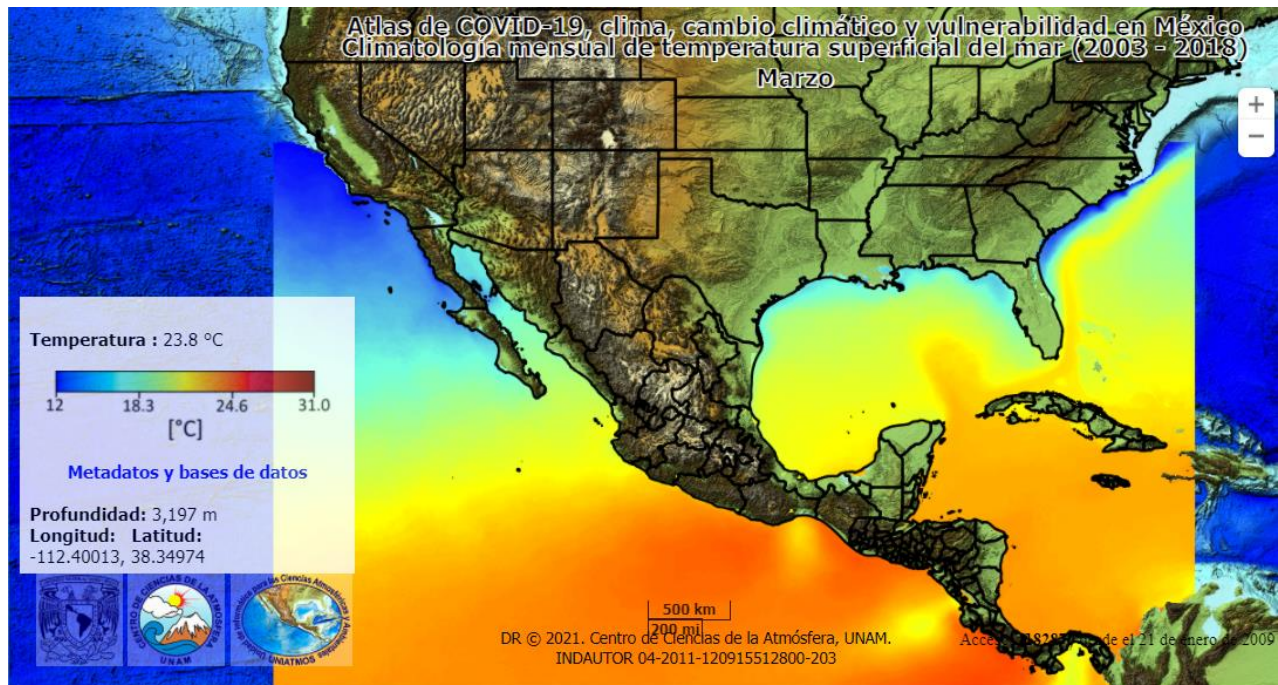


Figura 13. Mapa de Climatología mensual de temperatura superficial del mar (2003-2018). UNIAMTOS, UNAM.
<http://ri.atmosfera.unam.mx:8080/ACVC/servmapas>.

6. Temperatura de lagos

Un lago es un cuerpo de agua que se ha acumulado en un punto bajo en relación con el campo circundante. Significa que el agua ingresa más rápido de lo que puede escapar, ya sea por la salida de un río, filtración en el suelo o evaporación. Es importante aclarar que existen lagos artificiales llamados embalses, los cuales se crean cuando se construye una presa en un río.

La mayoría de los lagos son de agua dulce, pero algunos, en especial los que no tienen salida a través de un río, pueden ser clasificados como lagos salinos. El Gran Lago Salado de Utah, por ejemplo, es un lago más salado que el océano.

Los lagos constituyen un ecosistema de gran importancia para peces, vida acuática y vida silvestre, sin embargo, los ecosistemas lacustres son frágiles. Suelen sufrir cambios ambientales rápidos, lo que puede conducir a una disminución significativa en sus funciones como ecosistema. Dado que los lagos se encuentran expuestos a efectos externos de la atmósfera, sus cuencas hidrográficas y aguas subterráneas de los lagos están sujetos a cambios a través del tiempo (USGS, Lakes and Reservoirs, s.f.).

Las temperaturas que se registran en los lagos por equipos de campo se denominan temperaturas in situ. La temperatura potencial puede ser útil cuando se considera gradientes de temperatura vertical.

La temperatura potencial se define como la temperatura que adquiriría una parcela de agua si se transfiriera adiabáticamente a una presión de referencia, a menudo tomada como presión atmosférica. La tasa de lapso adiabático está dada por:

$$\left(\frac{dT}{dz}\right)_{ad} = \frac{g\alpha(T + 273.25)}{c_p}$$

donde α es el coeficiente de expansión térmica y $c_p \approx 4200 \text{ [J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}]$ es el calor específico a presión constante. Por lo tanto, la temperatura potencial se evalúa como:

$$T_{pot} = T(z) + \int_{z'=z}^0 \left(\frac{dT}{dz}\right)_{ad} dz' = T(z) + \int_{z'=z}^0 \frac{g\alpha(T + 273.25)}{c_p} dz'$$

donde z es positivo hacia abajo. Para la mayoría de los propósitos limnológicos, α , g y c_p se pueden considerar constantes en todo el rango de profundidad. Usando una estimación para α de

$$1 \dots 1.5 \times 10^{-5} (T - T_{md}) \frac{1}{K^2}$$

La diferencia entre la temperatura in situ y la temperatura potencial se puede ignorar en la mayoría de los casos. Sin embargo, para ser exactos, agregaremos un subíndice T_{pot} cuando sea apropiado en esta contribución. En los lagos tropicales profundos se puede encontrar una diferencia considerable entre la temperatura potencial y la temperatura in situ (Boehrer & Schultze, 2008).

Variaciones estacionales

La temperatura está relacionada con la concentración de oxígeno disuelto en el agua, el cual es de gran importancia para la vida acuática. Los lagos suelen experimentar una variación de sus capas de agua cuando cambian las estaciones. De la primavera al verano, la capa superficial se vuelve más cálida que las capas inferiores ocasionando una estratificación en el lago para la llegada del verano. En cambio, durante el invierno, algunas superficies de los lagos pueden enfriarse mucho. Cuando esto sucede, el agua superficial se vuelve más densa que el agua profunda con una temperatura constante durante todo el año, y el lago ejerce una rotación cuando el agua superficial más fría se hunde hasta el fondo del lago.

La rotación del lago como se muestra en la Figura 14, es un fenómeno en el que todo el volumen de agua se mezcla con el viento. Esto sucede cuando todo el lago tiene la misma temperatura y densidad. Esta rotación es importante en lagos de agua dulce, ya que se reponen los niveles de oxígeno disuelto en las aguas más profundas del lago.

Cuando los lagos tienen una temperatura y densidad uniformes, se necesita relativamente poca energía eólica para mezclar el agua en las profundidades del lago. El viento mueve el agua superficial con una alta oxigenación hacia el fondo del lago, forzando que el agua salga con poco oxígeno desde el fondo del lago hasta la superficie, donde se satura de oxígeno. Esto es fundamental para los organismos acuáticos, ya que una vez que los lagos se congelan durante el invierno, no se mezcla oxígeno nuevo en el lago desde la atmósfera, y lo que hay en el lago debe durar hasta que el hielo se disuelva en la primavera.

La rotación de primavera es importante por la misma razón. Una vez que se establece la estratificación térmica, las aguas hipolimnéticas no se mezclan con la superficie y el oxígeno disuelto que existe en las partes más profundas del lago es todo lo que está disponible hasta que el lago se renueve en el otoño (Fafard, 2018).

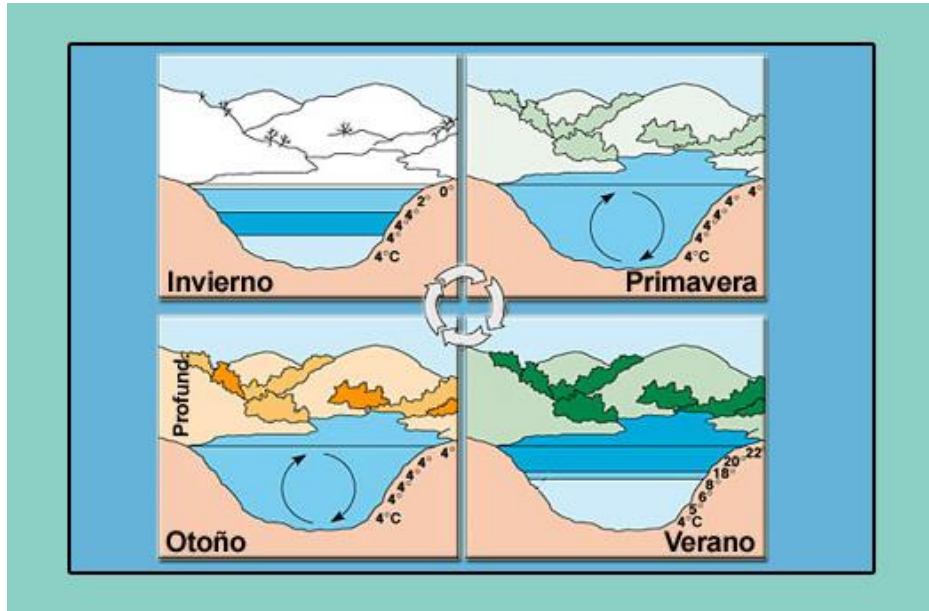


Figura 14. Ejemplificación de la variación estacional de un lago. Recuperado de: https://cidta.usal.es/cursos/quimica/modulos/curso/uni_05/u5c3s3.html.

La variación estacional también depende del lugar donde el lago se encuentre. En climas cálidos, posiblemente la superficie del lago nunca se vuelve tan fría como para que el lago rote. Por el lado contrario, en climas invernales, ocurren estratificaciones de temperatura.

Estratificación del agua

De manera análoga al océano, la estratificación del agua en los lagos está en función del calor proveniente del sol y la profundidad. Muchos lagos muestran esta estratificación vertical al menos durante algunos periodos de tiempo prolongados. Las capas más profundas son las más frías y la capa superficial es la que se calienta, pero esta tiene un alcance de tan solo unos pocos metros.

La estratificación térmica se puede establecer durante la estación cálida si el lago es lo suficientemente profundo. De manera contraria, durante la estación fría el enfriamiento de la superficie fuerza la circulación vertical de masas de agua y la eliminación de gradientes de propiedades del agua. En el periodo de primavera a verano, los lagos comienzan a estratificarse debido a las diferencias de temperatura, formando tres capas como se ilustra en la Figura 15. Estas capas se describen a continuación:

La capa cálida de la superficie recibe el nombre de ***epilimnion***. La atmósfera intercambia calor y sustancias volátiles como los gases en esta capa; así como la presencia de interacción del lago con el viento y la luz solar, por lo que el lago se vuelve cálido y contiene más oxígeno disuelto. Aunque el oxígeno disuelto no interviene directamente en la estratificación del lago y en la rotación, es importante para los organismos acuáticos en el lago que requieren oxígeno para sobrevivir.

Además, el epilimnion es recirculado episódicamente por eventos de viento o períodos de temperaturas más bajas durante el período de estratificación.

El espesor de esta capa depende del viento y no es constante a lo largo del período de estratificación. En primavera se forma una fina capa que a lo largo del verano va ganando espesor por el efecto del viento.

La capa más profunda es de agua fría y densa y recibe el nombre de **hipolimnion**. Esta capa se encuentra aislada del intercambio con la atmósfera durante el periodo de estratificación. Usualmente se encuentra alrededor de los 4°C durante todo el año, no suele recibir calor directo de la luz solar y, a menudo, puede volverse anóxico (sin oxígeno disuelto) mientras que el lago está estratificado térmicamente.

No es hasta el otoño que el agua más fría de la superficie del lago puede erosionar la estratificación del hipolimnion a un ritmo mayor. Durante este último periodo de estratificación térmica, las sustancias disueltas en aguas hipolimnéticas como los nutrientes, vuelven a estar disponibles en el epilimnion. Si la temperatura de la superficie desciende considerablemente, el epilimnion e hipolimnion se pueden mezclar homogeneizando todo el lago (periodo de circulación), generando una sola capa llamada **mixolimnion**.

Entre estas dos capas se encuentra una capa intermedia entre el agua cálida del epilimnion y el agua fría del hipolimnion, llamada **metalimnion**. Esta es una zona de transición donde las aguas frías más superficiales del hipolimnion se calientan gradualmente hasta que se mezclan con el epilimnion. La termoclina ocurre dentro del metalimnion que es el punto con mayor diferencia de temperatura (Fafard, 2018).

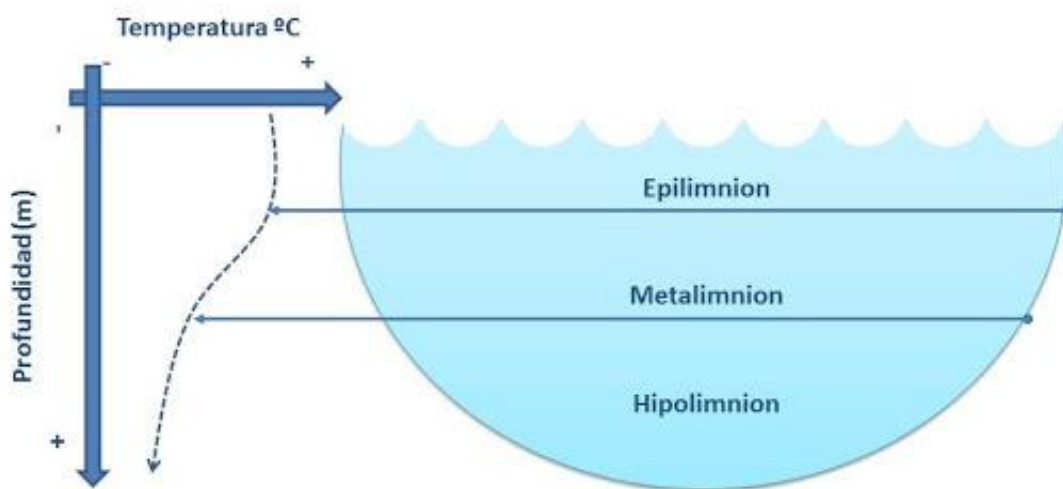


Figura 15. Diagrama de la estratificación de un lago. Recuperado de <http://aerationoxicom.com/estratificacion/>.

A través del gradiente de densidad vertical de la termoclina el transporte de materia disuelta suele ser muy pequeño. En la mayoría de los lagos, solo la precipitación química y el asentamiento de partículas pueden transportar mayores cantidades de materia a través de la termoclina.

Debido a sus altos gradientes, la termoclina puede formar un hábitat especial. Los organismos que regulan su densidad pueden posicionarse en el fuerte gradiente de densidad. Por otro lado, los organismos móviles pueden habitar en la termoclina para aprovechar las ventajas de ambas capas, epilimnion e hipolimnion.

Los lagos que se encuentran cercanos al ecuador tienen algunas características diferentes, por ejemplo, la variación anual de temperatura es relativamente pequeña. Como consecuencia, la diferencia de temperatura entre el epilimnion e hipolimnion también es pequeña. En condiciones adecuadas, las temperaturas nocturnas pueden formar aguas frías poco profundas lo suficientemente densas como para inmiscuirse en el hipolimnion o incluso provocar una rotación completa. Por lo que algunas características del ciclo de estratificación pueden verse diferentes al presentarse un clima tropical o polar.

Dependiendo del clima y la altitud local, los lagos de todo el mundo se pueden clasificar en:

- **Holomícticos**

Son lagos que se rotan y homogeneizan al menos una vez al año. A su vez estos se subdividen en clases que indican la frecuencia y el tiempo de rotación.

- a. **Polimíctico**

Hace referencia a los lagos que no son lo suficientemente profundos para formar un hipolimnion. En general, todo lago se comporta como un epilimnion donde se mezcla con fuertes vientos esporádicos, por lo que puede ocurrir en lagos de todo el mundo dependiendo de características como la profundidad, el tamaño y la forma de un lago.

- b. **Dimíctico**

Se manejan como prototipos de lagos en climas moderados a fríos presentando estratificación en verano e invierno y se mezclan o giran en primavera y otoño. Sin embargo, en la mayoría de los casos se requiere una capa de hielo o una gran profundidad máxima para garantizar un periodo de estratificación durante el invierno.

- c. **Monomíctico**

Además del periodo de estratificación poseen un periodo de circulación. Muchos lagos de clima templado pertenecen a este tipo si no se desarrolla una capa de hielo

en la superficie durante el invierno. A veces, suelen denominarse como monomítico cálido o monomítico frío.

- i. *Monomítico cálido*: el agua se enfría alrededor de los 4°C en invierno, cuando puede ocurrir un giro. Los lagos se estratifican en otras épocas del año y no están cubiertos de hielo. Los lagos que se encuentran en los trópicos o en las latitudes bajas en las áreas templadas del norte pueden pertenecer a este tipo.
- ii. *Monomítico frío*: el agua no se calienta más de 4°C y el giro se produce una vez en verano. Los lagos del Ártico son un ejemplo de este caso.

d. Oligomíticos

Se caracteriza por tener un agua tibia y estratificada que ocasionalmente se enfría para generar circulación con menos frecuencia que una vez al año, normalmente a intervalos irregulares provocados por condiciones climáticas extremas como inviernos extremadamente fríos para su ubicación respectiva. Este tipo de lagos se presentan en regiones de latitudes más bajas donde hay poca variación en la temperatura anual.

- **Meromíticos**

En ellos la recirculación profunda no incluye toda la masa de agua. La mayoría de los limnólogos denominan a un lago meromítico si una capa inferior químicamente diferente llamada monimolimnion ha estado presente continuamente durante al menos un ciclo anual.

- **Amítico**

Se encuentran cubiertos por hielo durante todo el año, no experimentan recirculación profunda. El transporte debajo de una capa de hielo se produce por difusión o doble difusión. Además, pueden circular fuerzas externas como la radiación solar y el flujo de calor geotérmico, o por gradientes de salinidad creados cuando se forma hielo en un lago salado. Es típico de los lagos de la Antártida los cuales están cubiertos permanentemente por hielo (Boehrer & Schultze, 2008).

Estas son generalizaciones basadas en patrones de circulación, y los lagos pueden caer en muchas clasificaciones y sistemas de clasificación diferentes. Muchos lagos pueden tener períodos de estratificación, dependiendo de la profundidad del lago. Los lagos poco profundos pueden estratificarse después de la renovación del lago y luego mezclarse completamente durante gran parte del año si la luz solar penetra en el fondo del lago o si hay suficiente energía eólica para mover el agua a través de toda la columna de agua (Fafard, 2018).

Dentro del país, se estima que existen cerca de 70 lagos que van desde los 10 hasta 100 km² de extensión como lo es el lago de Chapala ubicado entre el estado de Jalisco y Michoacán. Este lago es el más grande de México y tiene más de 50 millones de años (Ríos y Lagos, 2021).

7. La importancia de la medición de la temperatura en estos sistemas

Gracias a la alta capacidad calorífica del agua, los océanos pueden liberar calor lentamente durante muchos meses o años, por lo que se le da al océano un papel central en la estabilización del sistema climático de la Tierra. Como se ha mencionado, la mayor parte de la radiación del sol es absorbida por el océano, mayormente en las aguas tropicales, donde el océano actúa como un panel solar masivo que retiene el calor.

El calor absorbido por el océano se mueve de un lugar a otro, pero no desaparece. La energía térmica eventualmente reingresa al resto del sistema terrestre derritiendo las plataformas de hielo, evaporando el agua o recalentando directamente la atmósfera. Por lo tanto, la energía térmica del océano puede calentar el planeta durante décadas después de su absorción. Si el océano absorbe más calor del que libera, su contenido de calor aumenta. Saber cuánta energía térmica absorbe y libera el océano es esencial para comprender y modelar el clima global.

¿Por qué es importante el balance de calor en el océano? Para comprender esto en términos termodinámicos, es necesario hacer una comparación del calor almacenado en el océano con el almacenado en la Tierra durante un ciclo anual. Durante el ciclo, el calor se almacena en verano y se libera en invierno. El punto es mostrar que los océanos almacenan y liberan mucho más calor que la Tierra.

La capacidad calorífica del suelo y las rocas es de $C_{p(rocas)} = 800 [J \cdot kg^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}]$ para obtener $C_{p(rocas)} \approx 0.2C_{p(agua)}$.

El volumen de agua que intercambia calor con la atmósfera en un ciclo estacional es de 100[m³] por metros cuadrados de superficie. La densidad del agua de 1,000 [kg/m³] y la masa en contacto con la atmósfera es densidad x volumen = $m_{agua} = 100,000 [kg]$. El volumen de Tierra que intercambia calor con la atmósfera en un ciclo estacional es 1 [m³]. Debido a que la densidad de la roca es de 3,000 [kg/m³], la masa del suelo y la roca en contacto con la atmósfera es de 3,000 [kg]. Por lo tanto, los calores estacionales de almacenamiento para el océano y la Tierra son:

$$\begin{aligned}\Delta E_{\text{océanos}} &= C_{p(\text{agua})} \cdot m_{\text{agua}} \cdot \Delta T & \Delta T &= 10^{\circ}\text{C} \\ &= (4000)(10^5)(10^0) \text{ Joules} \\ &= 4.0 \times 10^9 \text{ Joules}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Delta E_{\text{tierra}} &= C_{p(\text{roca})} \cdot m_{\text{roca}} \cdot \Delta T & \Delta T &= 20^{\circ}\text{C} \\ &= (800)(3000)(20^0) \text{ Joules} \\ &= 4.8 \times 10^7 \text{ Joules}\end{aligned}$$

$$\frac{\Delta E_{\text{océanos}}}{\Delta E_{\text{tierra}}} = 100$$

donde ΔT es el típico cambio en la temperatura de verano a invierno.

El almacenamiento de calor en el océano en comparación con la Tierra tiene importantes consecuencias. El rango estacional de temperaturas del aire en tierra aumenta con la distancia al océano y puede superar los 40°C en el centro de los continentes, alcanzando los 60°C en Siberia. El rango típico de temperatura sobre el océano y a lo largo de las costas es inferior a 10°C.

Una de las manifestaciones de energía que presenta el calor es la evaporación, que es un proceso importante en el ciclo del agua ya que junto con la humedad del aire circundante forma lluvias y tormentas que luego son transportadas por los vientos alisios. Prácticamente toda la lluvia se origina en los océanos, siendo los trópicos el lugar donde hay más presencia de lluvia porque es una zona donde absorben mayores cantidades de calor.

Fuera de las áreas ecuatoriales, los patrones climáticos son impulsados por las corrientes oceánicas. Las corrientes son movimientos del agua en un flujo continuo, creado en gran parte por los vientos superficiales, pero también están en función de los gradientes de temperatura y salinidad, la rotación de la Tierra y las mareas. Los principales sistemas de corrientes fluyen típicamente en el sentido de las manecillas del reloj en el hemisferio norte y en sentido antihorario en el hemisferio sur, en patrones circulares que a menudo trazan las costas.

De manera general, las corrientes oceánicas fluyen hacia los polos por la superficie del mar y al llegar a éstos la temperatura desciende, se enfría y regresa hacia el ecuador por el fondo, ascendiendo lentamente en las regiones tropicales, lo que inicia el ciclo nuevamente. Por lo tanto, las corrientes oceánicas también se ven involucradas en la regulación del clima global, ayudando a contrarrestar la distribución desigual de la radiación solar que incide en la superficie de la Tierra. Sin las corrientes oceánicas, las temperaturas regionales serían más extremas (NOAA, How does the ocean affect climate and weather on land?, 2018).

Uno de los problemas actuales es buscar soluciones ante la crisis del cambio climático, como se vio a lo largo de este capítulo, los océanos absorben la energía radiante y ayudan a la regulación de la temperatura del planeta. Aproximadamente el 90% del calor atrapado es ocasionado por los gases de efecto invernadero emitidos por la quema de combustibles fósiles, destrucción de bosques y otras actividades humanas.

La mayoría de la biota marina, desde el plancton hasta los peces y las ballenas, viven en la parte superior del océano, exactamente en la zona epipelágica donde las temperaturas aumentan más rápidamente. Muchos de estos organismos son sensibles incluso a cambios de temperatura de corta duración. Por ejemplo, las aguas cálidas ponen en peligro la salud de los corales y, a su vez, las comunidades de vida marina que dependen de ellos para obtener refugio y alimento. En última instancia, las personas que dependen de la pesca marina para obtener alimentos y empleos pueden enfrentar impactos negativos por el calentamiento del océano.

En cuanto a fenómenos meteorológicos, los océanos más calientes provocan que tormentas como huracanes y ciclones tropicales sean más intensas en el futuro, aumentando la probabilidad de alcanzar categoría 4 o 5 en la escala de intensidad de Saffir-Simpson; acelerar la velocidad a la que se intensifican y aumentando la probabilidad de que liberen enormes volúmenes de lluvia. Esto interrumpe el ciclo del agua causando inundaciones, sequías e incendios forestales.

El nivel del mar también se ve afectado ya que a medida que los océanos aumentan su temperatura, incrementa su nivel. Entre 1971 y 2010, este aumento del nivel del mar impulsado por el calor agregó aproximadamente ocho décimas de milímetro a la altura del océano cada año. La expansión térmica ha contribuido aproximadamente a la mitad de todo el aumento del nivel del mar observado en todo el planeta hasta ahora, más de lo que contribuyó al derretimiento del hielo de Groenlandia o la Antártida o de los otros glaciares del mundo. Éstas masas de hielo se están derritiendo rápidamente y es probable que superen la expansión del agua impulsada por el calor como la principal contribución al aumento global del nivel del mar (Borunda, 2019).

Por todo lo mencionado previamente, es importante tener un registro de la temperatura en el océano porque sirve de base para estimar que tan rápido se está calentando la Tierra y cómo afectará a la vida del planeta para buscar las mejores soluciones ante las problemáticas presentadas.

Por otro lado, y no menos importante, la relevancia de medir la temperatura en los lagos ejerce una gran influencia en la actividad biológica y el crecimiento de organismos acuáticos. La mayoría de los organismos acuáticos son de sangre fría, lo que significa que no pueden regular internamente su temperatura corporal central.

La temperatura también influye en la química del agua. La velocidad de las reacciones químicas generalmente aumenta a temperaturas más altas, lo que a su vez afecta la actividad biológica. Un ejemplo importante de los efectos de la temperatura en la química del agua es su impacto en el oxígeno. El agua tibia contiene menos oxígeno que el agua fría, por lo que puede estar saturada de oxígeno, pero aún no contener lo suficiente para la supervivencia de la vida acuática. Algunos compuestos también son más tóxicos para la vida acuática a temperaturas más altas.

8. Conclusiones

Lo visto a lo largo de este capítulo sobre sistemas acuáticos nos llevó a comprender en primer lugar que estos son sistemas muy complejos debido al tipo de alcance que representan para el ser humano. Principalmente el océano es una fuente de diversos recursos para la sociedad, sin embargo, debido a su dimensión y características lo convierte en un lugar complejo para su estudio.

Descubrir y comprender los fenómenos del océano se ha convertido en un reto para los científicos, ingenieros, biólogos, químicos, geólogos, etc., quienes desde el siglo XIX con el origen de la *Oceanografía* y mediante los avances tecnológicos de los últimos años se han logrado grandes avances científicos que han permitido obtener descripciones más cuantitativas del comportamiento físico del océano.

El océano cumple con características que lo convierten en un sistema termodinámico donde la temperatura, salinidad y presión se encuentran en función de la densidad. Como se vio anteriormente la magnitud de estos parámetros depende principalmente de la energía radiante que el océano absorbe y distribuye, regulando la temperatura del planeta entero.

Está claro que, al ser un sistema regulador de temperatura, es de suma importancia comprender y estudiar los parámetros termodinámicos que lo involucran para así buscar las mejores soluciones para su conservación ya que si este sistema se ve alterado ocasionaría un desequilibrio que no sólo afectaría al sistema acuático en particular, sino que tendría alteraciones severas sobre todo el planeta.

Como estudiantes de Ciencias de la Tierra no debemos pasar por alto que la Oceanografía forma parte de estas ciencias y, más importante, que el océano es parte del conjunto del estudio del planeta.

9. Cuestionario de autoevaluación

A continuación, se presenta un breve cuestionario de autoevaluación de los temas vistos a lo largo del capítulo. El cuestionario consiste tanto de preguntas abiertas como cerradas, para ambos casos selecciona o escribe solamente una respuesta correcta.

1. Menciona las grandes divisiones de los sistemas acuáticos:
2. La _____ es la ciencia que estudia las aguas continentales
 - a) Biología
 - b) Litología
 - c) Limnología
 - d) Ciencias de las aguas continentales
3. ¿Qué disciplina dentro de la oceanografía está estrechamente relacionada con la termodinámica?
 - a) Oceanografía física
 - b) Oceanografía geológica
 - c) Oceanografía química
 - d) Termodinámica de sistemas acuáticos
4. La primera expedición oceanográfica se llevó a cabo en el buque _____.
 - a) Titanic
 - b) Challenge
 - c) Bougainville
 - d) Hespérides
5. Al recibir la energía de radiación, los cuerpos de agua la transportan mediante el proceso de _____.
6. La temperatura en los océanos varía en función de _____ y _____.
7. Explica que es la presión en un sistema acuático.
8. El transporte meridional se refiere a la circulación de atmosférica y oceánica de _____ bajas a altas equilibrando las ganancias y pérdidas.
 - a) longitudes
 - b) altitudes
 - c) latitudes

d) profundidades

9. El empuje que se genera sobre el océano a partir de la energía del viento en forma de impulso hacia el agua y el efecto Coriolis origina las _____.

- a) Corrientes superficiales
- b) Circulación atmosférica
- c) Ondas de calor
- d) Huracanes

10. Enuncia la ecuación del balance del calor y describe cada uno de sus términos:

11. Selecciona la opción que señale de manera decreciente la estratificación del agua en los lagos

- a) hipolimnion, metalimnion, epilimnion
- b) metalimnion, epilimnion, hipolimnion
- c) hipolimnion, epilimnion, metalimnion
- d) hipolimnion, metalimnion, epipelágica

12. Escribe tres características importantes sobre la medición de temperatura en los sistemas acuáticos.

13. Los cambios de presión en un medio elástico, en este caso un medio líquido origina:

- a) deformación
- b) sonido
- c) velocidad del sonido
- d) ondas

14. La presión hidrostática en el océano se caracteriza mediante:

- a) Ondas sonoras
- b) Ondas superficiales
- c) Olas
- d) Profundidad

15. Explica cómo la salinidad está relacionada con la temperatura del océano.

16. ¿A qué se le denominan aguas continentales?

17. El inicio de la limnología lo marcó la obra Le Lemán de:

- a) Forbes
- b) Darwin

- c) Thieneman
- d) Max Planck

18. Menciona las cuatro disciplinas pertenecientes a la Oceanografía.

19. Describe la diferencia entre mar y océano.

20. ¿Cuáles son las ciencias que trabajan por el aprovechamiento del agua?

- a) Limnología y Oceanografía
- b) Oceanografía y Litología
- c) Oceanografía física y Geofísica
- d) Limnología y Biología marina

21. El 3.5% de la composición del agua de los océanos conforma:

- a) magnesio, bromuro, cloruro de sodio
- b) sales, partículas de materia orgánica e inorgánica y sedimentos
- c) sal de mar
- d) agua pura

22. Las propiedades físicas son diferentes en el agua dulce que en el agua salada debido a la cantidad de:

- a) sedimentos
- b) materia orgánica
- c) sales
- d) hielo

23. ¿Cuál es la fuente principal de la energía radiante?

- a) calor interno de la Tierra
- b) Sol
- c) volcanes submarinos
- d) evaporación

24. La quinta parte de la energía radiante es absorbida por

- a) atmósfera
- b) superficie continental
- c) océano
- d) seres vivos

25. Actualmente se obtienen valores de la temperatura superficial del mar mediante

- a) muestras puntuales
- b) temperatura de la fauna marina

- c) termómetros
- d) satélites

26. ¿En la base de qué zona o capa vertical del océano se encuentra la termoclina?

- a) zona epilimnion
- b) zona epipelágica
- c) zona abisal
- d) zona cero

27. Esta corriente se ubica del lado del Golfo de México, sus aguas entran por el estrecho de Yucatán, mezclándose en el Golfo de México para posteriormente salir por el estrecho de Florida formando un meandro.

- a) Corriente del Caribe
- b) Corriente de California
- c) Corriente del Lazo
- d) Corriente del Ecuador

28. Dependiendo del clima y la altitud local, los lagos se clasifican en:

- a) holomícticos, meromícticos, amícticos
- b) salados y dulces
- c) hipolimnion, metalimnion, epilimnion
- d) no existe clasificación de los lagos

29. Es el lago más grande de México

- a) Gran Lago
- b) Lago de Pátzcuaro
- c) Lago de Chapala
- d) Lago Victoria

30. Según el ángulo de incidencia de la energía radiante la temperatura en el océano será:

- a) mayor en el ecuador y menor en los polos
- b) mayor en los trópicos y menor en los glaciares
- c) estará en equilibrio debido a la autorregulación
- d) menor en el ecuador y menor en los polos

10. Soluciones

1. Limnéticos (lagos), marinos marginales (estuarios, costas rocosas y lagunas) y marinos (océanos).
2. c) Limnología
3. a) Oceanografía física
4. b) Challenge
5. La circulación del calor.
6. Profundidad y latitud.
7. La presión en el océano o en un lago es el resultado de una fuerza (el peso) ejercida por la columna de agua y de aire a una determinada profundidad.
8. c) latitudes
9. a) Corrientes superficiales
10. $Q_T = Q_{SW} + Q_{LW} + Q_S + Q_L + Q_V$
Insolación Q_{SW} , el flujo de luz solar dentro del mar;
Radiación infrarroja neta Q_{LW} , flujo neto de la radiación infrarroja del mar;
Flujo de calor sensible Q_S , el flujo de calor a través de la superficie debido a la conducción;
Flujo de calor latente Q_L , el flujo de calor llevado por la evaporación del agua; y
Advección Q_V , calor llevado por corrientes.
11. a) hipolimnion, metalimnion, epilimnion
12.
 - i) El océano tiene un papel en la estabilización del sistema climático de la Tierra, regulando la temperatura del planeta.
 - ii) Para comprender y modelar el clima global.
 - iii) Para buscar soluciones ante la problemática que el aumento de temperatura causa sobre estos sistemas acuáticos.
13. b) sonido

14. b) Ondas sonoras

15. Las aguas más saladas se encuentran en latitudes medias donde la evaporación es alta. Las aguas menos saladas se encuentran cerca del ecuador, donde la lluvia refresca las aguas superficiales, y en las latitudes altas donde el hielo marino derretido refresca las aguas superficiales.

16. Las aguas internacionales constituyen todas las partes del mar u océanos no incluidas en la zona económica exclusiva, mar territorial o aguas interiores de un estado o archipiélago.

17. a) Forbes

18. Oceanografía física, Oceanografía química, Oceanografía biológica y Oceanografía Geológica.

19. Un *océano* se define como un conjunto de masas de agua que se encuentran sobre la corteza oceánica, ocupa más de 10 millones de km² y una profundidad mayor de 3 km; a diferencia de los *mares*, los cuales se ubican en la corteza continental o basáltica, tienen una extensión menor a los 10 millones de km² y su profundidad es de menos de 3 km.

20. a) Limnología y Oceanografía

21. b) sales, partículas de materia orgánica e inorgánica y sedimentos

22. c) sales

23. c) Sol

24. a) atmósfera

25. d) satélites

26. b) zona epipelágica

27. c) Corriente del Lazo

28. a) holomícticos, meromícticos, amícticos

29. c) Lago de Chapala

30. a) mayor en el ecuador y menor en los polos

Referencias bibliográficas

- (24 de Mayo de 2021). Recuperado el 06 de Junio de 2021, de Biodiversidad Mexicana:
<https://www.biodiversidad.gob.mx/ecosistemas/ecosismex/rios-y-lagos>
- Academia Nacional de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. (2015). Capítulo 8. Oceanografía. En E. Vallés, *Estado y perspectivas de las ciencias exactas, físicas y naturales en la Argentina* (págs. 310-312). Argentina.
- ACNUR Comité Español. (Febrero de 2019). *ACNUR*. Recuperado el 05 de Junio de 2021, de <https://eacnur.org/blog/que-son-las-aguas-internacionales-tc-alt45664n-o-pstn-o-pst/>
- Aguirre Gómez, R. (2002). *Los mares mexicanos a través de la percepción remota*. (P. y. Editores, Ed.) CDMX, México: Instituto de Geografía, UNAM.
- Apel, J. R., & PH.D. (1998). *Principles of Ocean Physics*. International Geophysics Series. Obtenido de <http://www.oas.org/juridico/spanish/tratados/b-44.html>
- Boehrer, B., & Schultze, M. (2008). Stratification of Lakes. *Rev. Geophys*, 46.
doi:10.1029/2006RG000210
- Borunda, A. (14 de agosto de 2019). *National Geographic*. Recuperado el 01 de septiembre de 2020, de <https://www.nationalgeographic.com/environment/oceans/critical-issues-sea-temperature-rise/>
- Colmenar, E. (2002). La limnología estudia los fenómenos físicos y biológicos relativos a las aguas continentales. Un termómetro para las aguas. *Ambienta: La revista del Ministerio de Medio Ambiente*(15), 47-52.
- Dahlman, L., & Lindsey, R. (17 de agosto de 2020). *Cambio climático: contenido de calor del océano*. (NOAA, Ed.) Recuperado el 02 de septiembre de 2020, de Climate.gov Science & information for a climate-smart nation: <https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-change-ocean-heat-content>
- Downing, J. A. (2017). Limnology and oceanography: two estranged twins reuniting by global change. *Inland Waters*, 215-232.
- Fafard, P. (16 de mayo de 2018). *How and Why Lakes Stratify and Turn Over: We explain the science behind the phenomena*. Recuperado el 06 de septiembre de 2020, de International Institute for Sustainable Development: <https://www.iisd.org/ela/blog/commentary/lakes-stratify-turn-explain-science-behind-phenomena/>
- Gío Argáez, F. R. (1999). La formación de recursos humanos para la oceanografía y las ciencias del mar. *CIENCIA ergo-sum, Revista Científica Multidisciplinaria de Prospectiva*, 6(2), 183-189.

- Gómez, M., Lince, I., Luna, V., & Alatorre, M. (2018). *REPORTE DE LA CAMPAÑA OCEANOGRÁFICA "MIO-HA/2018"-B/O"El Puma"*. Instituto del Mar y Limnología, Posgrado en Ciencias del Mar y Limnología. Ciudad de México: UNAM.
- Karp-Boss, L., Boss, E., Weller, H., Loftrin, J., & Albright, J. (2009). *Enseñanza Práctica de Conceptos de Oceanografía Física. Una aproximación basada en preguntas y respuestas*. The Oceanography Society.
- Leroy, C. C., & Parthiot, F. (1998). Depth-pressure relationships in the oceans and seas. *J. Acoust. Soc. Am.*, 103(3), 1346-1352. doi:S0001-4966(98)02103-1
- Mares Mexicanos*. (2003). Recuperado el 01 de septiembre de 2020, de Biodiversidad Mexicana: <https://www.biodiversidad.gob.mx/pais/mares/>
- MarineBio*. (16 de febrero de 2019). Obtenido de <https://marinebio.org/oceans/ocean-chemistry/>
- Naturales, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos. (16 de 10 de 2018). *Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales*. Recuperado el 05 de 06 de 2021, de Océanos y mares de México: <https://www.gob.mx/semarnat/articulos/oceanos-y-mares-de-mexico>
- NOAA. (julio de 2011). *Learning Ocean Science through Ocean Exploration*. (P. Valerie Chase, Ed.) Obtenido de Ocean Exploration and Research: <https://oceanexplorer.noaa.gov/edu/curriculum/section4a.pdf>
- NOAA. (2018). *How does the ocean affect climate and weather on land?* Recuperado el 02 de septiembre de 2020, de Ocean Exploration and Research: <https://oceanexplorer.noaa.gov/facts/climate.html>
- NOAA. (2018). *How does the temperature of ocean water vary?* (NOAA) Recuperado el 29 de septiembre de 2020, de Ocean Exploration and Research: <https://oceanexplorer.noaa.gov/facts/temp-vary.html>
- NOAA. (2018). *Layers of the Ocean*. (N. O. Administration, & NOAA, Editores) Recuperado el 30 de agosto de 2020, de National Weather Service: https://www.weather.gov/jetstream/layers_ocean
- NOAA. (13 de noviembre de 2019). *What is a thermocline?* Obtenido de National Ocean Service: <https://oceanservice.noaa.gov/facts/thermocline.html>
- NOAA. (20 de abril de 2020). *How does pressure change with ocean depth?* Recuperado el 12 de enero de 2021, de National Ocean Service Web site: <https://oceanservice.noaa.gov/facts/pressure.html#:~:text=Pressure%20increases%20with%20ocean%20depth.&text=At%20sea%20level%2C%20the%20air,and%20a%20noticeable%20change%20occurs.>

NOAA. (s.f.). *Sea Water*. Recuperado el 02 de septiembre de 2020, de Natinal Weaaher Service: <https://www.weather.gov/jetstream/seawater>

Remote Sensing Systems. 2011. *AMSR-E Level 3 Sea Surface Temperature for Climate Model Comparison*. (s.f.). doi:<https://doi.org/10.5067/SST00-1D1M1>.

Remote Sensing Systems. 2011. *AMSR-E Level 3 Sea Surface Temperature for Climate Model Comparison*., 1. (2011). Recuperado el 06 de septiembre de 2020, de PO.DAAC, CA: <https://doi.org/10.5067/SST00-1D1M1>.

Roldán, G., & Ramírez, J. (2008). *Fundamentos de limnología neotropical*. Colombia: Universidad de Antioquia.

Stewart, R. H. (2008). *Introduction To Physical Oceanography*. (T. A. University, Ed.) Prentice Hall. doi:10.1119/1.18716

USGS. (s.f.). *Lakes and Reservoirs*. (USGC, Editor) Recuperado el 06 de 09 de 2020, de Watter Science School: https://www.usgs.gov/special-topic/water-science-school/science/lakes-and-reservoirs?qt-science_center_objects=0#qt-science_center_objects

USGS. (s.f.). *Temperature and Water*. (USGS, Editor) Recuperado el 05 de septiembre de 2020, de Water Science School: https://www.usgs.gov/special-topic/water-science-school/science/temperature-and-water?qt-science_center_objects=0#qt-science_center_objects