

UNIVERSIDAD POLITECNICA DE VALENCIA

ESCUELA POLITECNICA SUPERIOR DE GANDIA

MÁSTER UNIVERSITARIO EN EVALUACIÓN Y SEGUIMIENTO  
AMBIENTAL DE ECOSISTEMAS MARINOS Y COSTEROS

---



UNIVERSIDAD  
POLITECNICA  
DE VALENCIA



ESCUELA POLITECNICA  
SUPERIOR DE GANDIA

# “Estudio experimental de la Circulación General Atmosférica y Oceánica a escala de laboratorio.”

*TRABAJO FINAL DE MÁSTER*

Autor/es:

**Antònia Huguet Alzina.**

Director:

**D. Victor J. Sánchez Morcillo.**

*GANDIA, 2016*

## **RESUMEN**

La visualización de la relación existente entre la circulación oceánica y atmosférica presenta cierta dificultad debido a que se produce a gran escala. Por ello, en este trabajo se pretende diseñar un modelo a escala de laboratorio que permita recrear las características principales de la circulación general atmosférica y oceánica que se desarrolla a escala planetaria. Para la elaboración del modelo se han tenido en cuenta las dos variables principales que controlan dicha circulación general: (a) la rotación de la Tierra, y (b) el calentamiento diferencial (es decir, el gradiente térmico existente entre el ecuador y los polos). El océano en rotación se simula mediante una superficie giratoria sobre la que se deposita un tanque circular con una cierta cantidad de agua. La velocidad de rotación es proporcional a la aceleración de Coriolis, lo que permite simular diferentes regiones de la Tierra a distintas latitudes. Asimismo, los gradientes de temperatura observados entre el polo y el ecuador se recrean mediante bloques de hielo en el centro del tanque, el cual se corresponde con uno de los polos. Los movimientos del fluido se visualizan mediante distintos métodos (colorantes, partículas en suspensión). Entre los fenómenos estudiados se encuentran experimentos en 2 y 3 dimensiones de la circulación de Hadley y la circulación extra-tropical, el viento térmico, la inestabilidad baroclínica y la formación de frentes.

**Palabras clave:** circulación Hadley, circulación extra-tropical, viento térmico, frentes.

## **ABSTRACT**

The visualization of the relation between atmospheric and oceanic circulation it is too difficult because it occurs in a large scale. Therefore, this study pretends to design a laboratory scale model which allows us to recreate the main characteristics of the general atmospheric and oceanic circulation that is developed on a planetary scale. To design the model, the two main variables that we must take into account are: (a) the Earth's rotation, and (b) the differential heating (ie the thermal gradient between the equator and the poles). The rotating ocean is simulated by a rotating table, and on its surface there is a circular tank where the water is deposited. The angular velocity of rotation is proportional to the Coriolis acceleration, and it permits us to simulate different latitudes regions of the Earth. Also, the thermal gradient that exists between the poles and the equator, is recreated by ice blocks situated in the center of the tank, the ice simulates the pole. The fluids' movements are visualized using some different methods (colorants, particles in suspension). The studied situations include experiments of Hadley's circulation in 2 and 3 dimensions, the extra-tropical circulation, the thermal wind, the baroclinic instability and the generation of fronts.

**Key words:** Hadley circulation, extra-tropical circulation, thermal wind, fronts.

## **AGRAÏMENTS**

Als meus pares per confiar sempre en mi, a totes aquelles persones que m'han acompanyat en aquesta llarga carrera de fons, i en especial a Núria Felis perquè sense tu no hauria estat possible.

Gràcies a Víctor per la confiança depositada en mi i per l'entusiasme que ha posat en aquest treball.

*Com no sabia que era impossible, vaig fer-ho.*

*(Albert Einstein)*

## **AGRADECIMIENTOS**

A mis padres por confiar siempre en mí, a todas las personas que me han acompañado en esta larga carrera de fondo y en especial a Núria Felis porque sin ti no habría sido posible.

Gracias a Victor por la confianza depositada en mi y por el entusiasmo que ha puesto en este trabajo.

*Como no sabía que era imposible, lo hice.*

*(Albert Einstein)*

## ÍNDICE

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN AL FENÓMENO DE LA CIRCULACIÓN ATMOSFÉRICA Y OCEÁNICA A ESCALA GLOBAL.....	3
1.1 CIRCULACIÓN ATMOSFÉRICA.....	3
1.1.1 Cinturón global de vientos .....	4
1.2 CIRCULACIÓN OCEÁNICA.....	6
1.2.1 Circulación en Superficie.....	7
1.2.2 Circulación vertical inducida por el viento.....	10
1.2.3 Circulación Profunda o Termohalina .....	10
1.3 RELACIÓN ENTRE LA CIRCULACIÓN ATMOSFÉRICA Y LA OCEÁNICA .....	11
1.4 IMPORTANCIA DEL ESTUDIO DE LA CIRCULACIÓN ATMOSFÉRICA Y OCEÁNICA .....	12
CAPÍTULO 2: DISEÑO DEL PROTOCOLO DE SIMULACIÓN DE LA CIRCULACIÓN ATMOSFÉRICA Y OCEÁNICA A ESCALA DE LABORATORIO.....	13
2.1 EQUIVALENCIAS SISTEMA EXPERIMENTAL – SISTEMA PLANETARIO .....	13
2.2 DESCRIPCIÓN DEL PROTOCOLO EXPERIMENTAL DE SIMULACIÓN DE LA CIRCULACIÓN ATMOSFÉRICA Y OCEÁNICA.....	14
2.2.1 Introducción al protocolo experimental de simulación.....	14
2.2.2 Material.....	14
2.2.3 Listado de las simulaciones experimentales diseñadas.....	17
CAPÍTULO 3: DESCRIPCIÓN DE LOS PROTOCOLOS DE SIMULACIÓN EXPERIMENTAL.....	18
CASO 1: Simulación de la circulación atmosférica de Hadley en 2D.....	18
a. Materiales .....	18
b. Metodología .....	18
c. Conclusiones experimentales.....	18
d. Reportaje gráfico de la evolución .....	19
Caso 2: Simulación de la circulación atmosférica de Hadley con rotación en 2D.....	20
a. Materiales .....	20
b. Metodología .....	20
c. Conclusiones experimentales.....	20
d. Reportaje gráfico .....	21
Caso 3: Simulación de la circulación tropical en 3D y viento térmico.....	22
a. Materiales .....	22
b. Metodología .....	22

c.	Conclusiones experimentales.....	23
	.....	23
d.	Reportaje gráfico .....	26
	Caso 4: Simulación de la circulación extra-tropical en 3D.....	27
a.	Materiales .....	27
b.	Metodología .....	27
c.	Conclusiones experimentales.....	28
d.	Reportaje gráfico .....	29
	Caso 5: Simulación de frentes.....	30
a.	Materiales .....	30
b.	Metodología .....	30
c.	Conclusiones experimentales.....	31
d.	Reportaje gráfico .....	31
	CAPÍTULO 4. Conclusiones y futuras líneas de investigación .....	33
	REFERENCIAS .....	34

## CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN AL FENÓMENO DE LA CIRCULACIÓN ATMOSFÉRICA Y OCEÁNICA A ESCALA GLOBAL

En primer lugar se procederá a la descripción de del fenómeno de la circulación atmosférica y oceánica a escala global para determinar qué variables influyen en dichos procesos y poder reproducirlos posteriormente en el laboratorio.

### 1.1 CIRCULACIÓN ATMOSFÉRICA

En el siglo XVIII George Hadley presentó el primer modelo de circulación atmosférica, según el cual, si las zonas de máxima insolación están cerca del ecuador, la elevada temperatura del aire en esta zona provocará que este presente una menor densidad, y por tanto, su ascenso convectivo dando lugar a una zona de bajas presiones.

Por otro lado, la menor temperatura de los polos provocará un incremento en la densidad del aire, generándose un descenso desde las capas más altas de la atmósfera hacia las capas más bajas, dando lugar a una zona de altas presiones.

El anticiclón de la zona polar, generaría vientos en superficie fríos que se desplazarán hacia las zonas de bajas presiones del ecuador. La célula convectiva se cerraría en las capas altas de la troposfera, con los vientos cálidos que viajan desde la zona de bajas presiones cercana al ecuador hacia los polos (ver Fig. 1)[1].

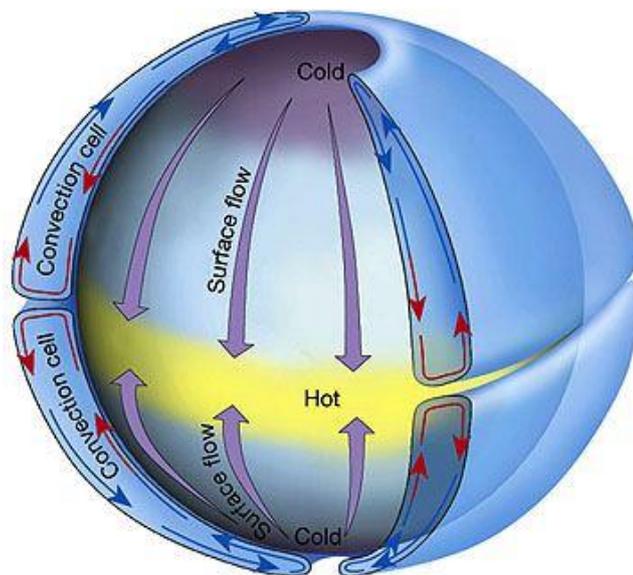


Figura 1. Modelo de circulación atmosférica presentado por Hadley [2].

Sin embargo, esto solo sería posible si la Tierra fuese estática. Al ser un sistema en rotación, los fluidos tienden a formar remolinos debido al **efecto Coriolis**, una fuerza inercial que actúa desviando los vientos y las corrientes hacia la derecha en el hemisferio norte y hacia la izquierda en el hemisferio sur [3].

Por eso, no es posible que la celda convectiva propuesta por Hadley entre las zonas de altas presiones polares y la zona de bajas presiones ecuatoriales llegara a cerrarse.

En la figura 2 se observa que en la zona de bajas presiones ecuatoriales el aire caliente asciende hasta la altura de la tropopausa donde se desplazará hacia los polos. Debido al efecto Coriolis y a la necesidad de los fluidos de mantener el momento angular, la masa de aire

aumenta su velocidad llegando a desviarse hacia la izquierda de forma que a una latitud aproximada de 30°, su dirección será perpendicular a la original provocando el descenso del aire que dará lugar a una zona de altas presiones. Una vez en superficie, la mayor parte de estos vientos retornarán hacia el ecuador.

En cambio, en los polos, las zonas de altas presiones generan vientos en superficie que viajan hacia el ecuador, pero debido al efecto de Coriolis se desplazan hacia la izquierda. A la latitud 60° estos vientos circulan perpendiculares a su dirección original, como consecuencia, estos vientos se verán obligados a ascender dando lugar a una zona de bajas presiones y completando la célula convectiva de la zona polar.

Por último, en las latitudes medias comprendidas entre los 30° y los 60° tendrá que situarse otra celda convectiva conocida como Celda de Ferrel, con el fin de completar la circulación del viento en la troposfera.

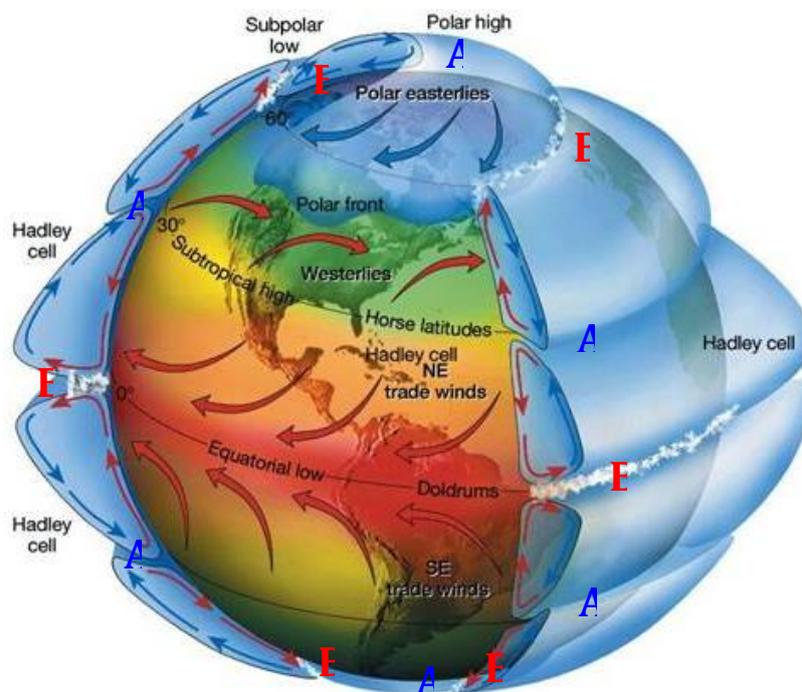


Figura 2. Esquema de la circulación atmosférica actual [4].

Las zonas de altas presiones de las zonas polares y subtropicales suelen ir asociadas de cielos despejados. Por el contrario, las zonas de bajas presiones en las zonas ecuatoriales y subpolares suelen ir acompañadas de cielos cubiertos y de mucha precipitación [1].

### 1.1.1 Cinturón global de vientos

Los grandes cinturones de vientos son sistemas corrientes de aire que afectan a grandes regiones de la superficie terrestre. Su formación se debe al movimiento de las masas de aire a escala global.

La distribución de los océanos y de los continentes influye en la localización latitudinal de la zona de convergencia de los sistemas de vientos de ambos hemisferios, conocida como **Zona de Convergencia Intertropical** (ZCI o ITCZ en inglés), presentándose en las zonas de mayor

temperatura de la corteza terrestre. Esto implica que la ZCI se verá desplazada hacia el Sur cuando es verano en el hemisferio sur (HS en adelante), y se ve desplazada hacia el Norte cuando es verano en el hemisferio norte (HN en adelante) [3].

Como se puede ver en la Fig. 3, los vientos que confluyen en la ZCI procedentes de ambos hemisferios son conocidos como los **vientos alisios** (*trade winds* en inglés) y son la expresión en superficie de la primera celda convectiva de la circulación atmosférica, también llamada **Celda de Hadley**.

En esta celda, el aire que se aleja del ecuador por las capas altas, cae por la subsidencia de las zonas de altas presiones subtropicales (30° latitud N y S). Estos vientos tienen componente Nordeste en el hemisferio norte y Sudeste en el hemisferio sur, esto se debe al efecto Coriolis ya que si éste no existiera, los vientos tendrían componente Norte en el hemisferio norte y componente Sur en el hemisferio sur. Aun así, los vientos alisios no forman un cinturón continuo, sino que a veces se ven interrumpido por zonas de vientos flojos y variables conocidas tradicionalmente como **Zona de Calmas Ecuatoriales o "Doldrums"** [3].

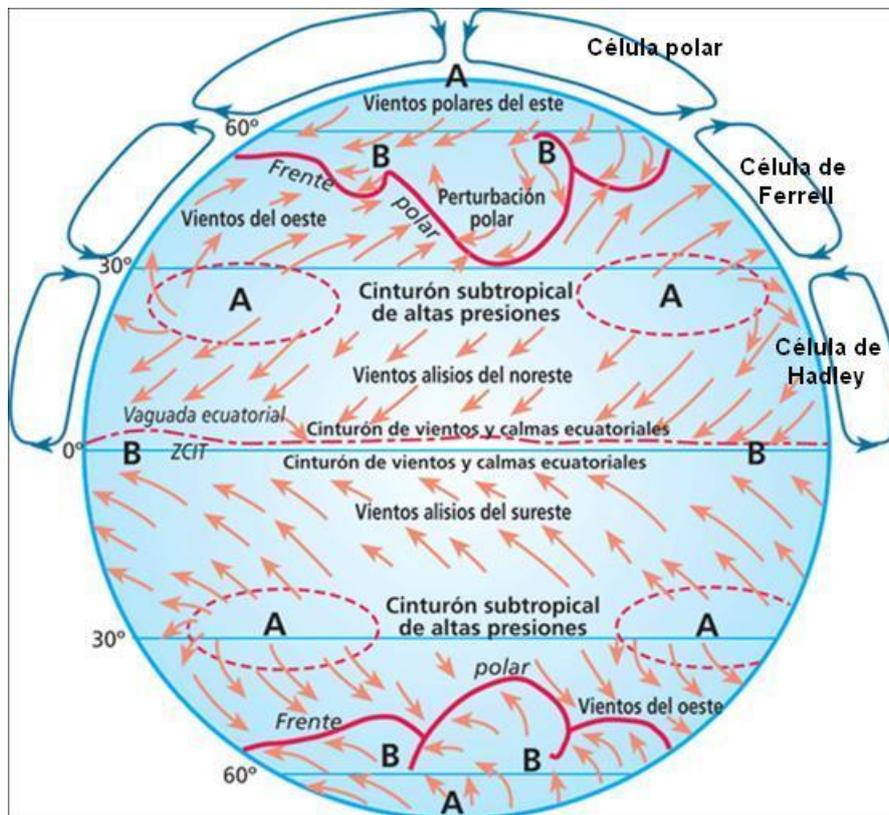


Figura 3. Esquema Cinturón Global de Vientos [5]

Si se sigue aumentando en latitud, entre los 35° y 60° N y S, se encuentran los **vientos del Oeste o "Westerlies"**. Estos vientos se forman entre las zonas de altas presiones subtropicales y las bajas presiones subpolares. Son mucho más variables que los vientos alisios, debido a que los núcleos de altas y bajas presiones se desplazan hacia el Este afectando a su trayectoria. Además, la existencia de los continentes en el hemisferio norte con sus formas irregulares y la variación de la presión atmosférica entre los distintos periodos estacionales del año, tienden a enmascarar el flujo de los vientos del Oeste.

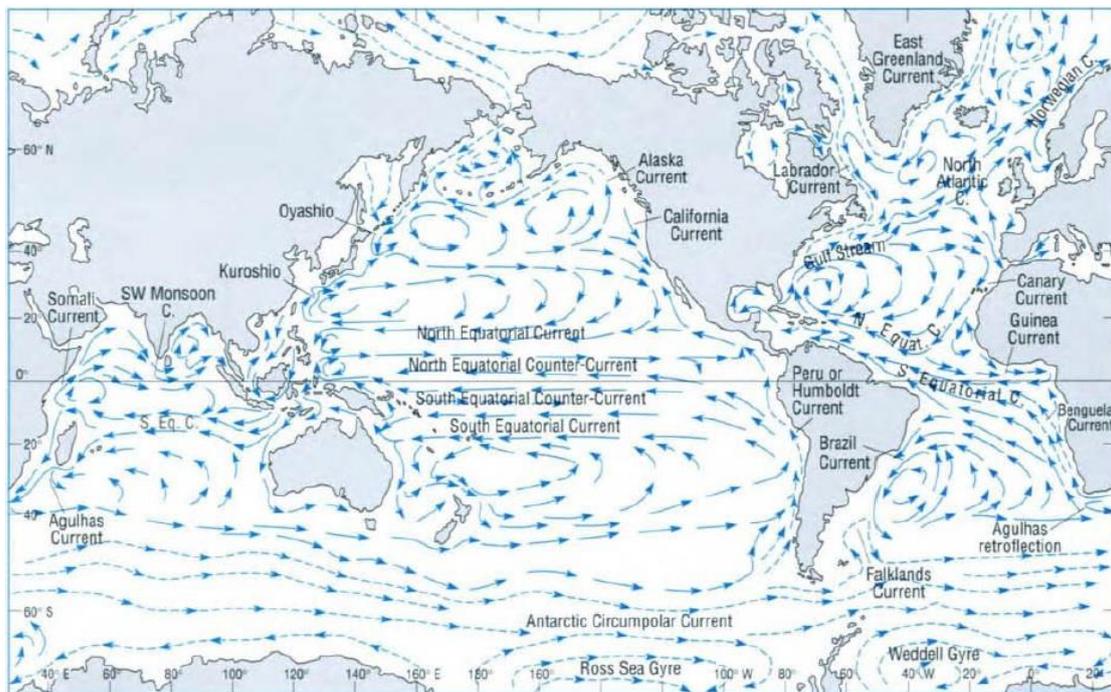
Sin embargo, en el hemisferio sur al estar formado en su mayoría por grandes extensiones oceánicas, éstas regulan la presión atmosférica de los sistemas estacionales haciendo que los vientos del Oeste sean más fuertes en este hemisferio y con una dirección más constante que los del hemisferio norte [6] [7].

Finalmente, en las latitudes más altas, aparecen los **vientos polares del Este o “Esterlies”** que se dirigen desde los anticiclones polares hacia las bajas presiones subpolares. Se sitúan entre las latitudes de 60° y los polos, formando una zona de aire frío que sopla hacia el Sudeste en el hemisferio norte y hacia el Nordeste en el hemisferio sur; hasta que se encuentran con los vientos del Oeste más cálidos. La interfaz entre los vientos polares del Este y los del Oeste se conoce como el **frente polar** [6] [7].

El **frente polar** viaja de Oeste a Este ayudando al aire frío y seco a desplazarse hacia el sur y al aire cálido y húmedo hacia el norte (HN), de ese modo, transporta energía calorífica a las regiones polares. A medida que el aire húmedo y cálido, característico de los vientos del oeste, ejerce presión sobre los vientos del este, fríos y más secos, se desarrolla una zona de bajas presiones. Ello implica que el frente polar generalmente este acompañado por nubes y precipitaciones.

## 1.2 CIRCULACIÓN OCEÁNICA

En el apartado anterior se ha visto como la circulación atmosférica transporta calor desde las latitudes bajas hacia las más altas. En los océanos ocurre lo mismo tal y como se puede observar en la figura 4. En ella se observa como las corrientes superficiales calentadas en las latitudes bajas llevan el calor hacia los polos, mientras que las corrientes frías de las latitudes altas fluyen hacia el ecuador.



**Figura 4.** Representación generalizada del sistema de corrientes superficiales actual. Las corrientes frías se representan con líneas discontinuas y las corrientes cálidas con líneas continuas [3].

Las corrientes oceánicas son masas de agua que se encuentra en movimiento, el cual permite la redistribución del calor y los nutrientes en la superficie de los océanos, dispersan los organismos vivos que se acumulan en determinadas profundidades oceánicas y permiten homogeneizar algunas propiedades oceánicas como: la temperatura, la salinidad, las sustancias tóxicas, etc. Y, finalmente, juegan un papel muy importante en el comercio marítimo.

El origen de estas fuerzas físicas está influenciado por las siguientes variables:

- El **viento atmosférico**: aporta movimiento al comunicar la energía atmosférica a la masa de agua.
- La **temperatura**: las masas de agua más calientes tenderán a desplazarse hacia la superficie por su menor densidad y las masas de agua frías se desplazarán hacia las zonas más profundas al ser más densas, generándose un movimiento convectivo.
- La **salinidad**: las masas de agua de mayor concentración salina tenderán a desplazarse hacia el fondo marino por su mayor densidad, encontrándose las menos salinas en las zonas más superficiales.

Resaltar que estas tres variables físicas están íntimamente relacionadas entre ellas repercutiendo unas en otras. Los vientos condicionan las temperaturas de las masas de agua y las temperaturas condicionan a la concentración de sales que puede albergar una masa de agua [3]. Todo ello permite la existencia de 2 tipos de circulaciones en el océano: **circulación en superficie y circulación profunda o termohalina**.

### 1.2.1 Circulación en Superficie

La circulación superficial del océano se produce desde la superficie hasta la parte superior de la pycnoclina<sup>1</sup>.

Las corrientes marinas superficiales son un gran sistema de transporte de agua que se mueve debido a la fricción entre el aire y el agua en la dirección que sopla el viento. Van distribuyendo el calor de los trópicos al resto del planeta. Su circulación es independiente en los hemisferios Norte y Sur y tienen influencia hasta aproximadamente los 2000 m de profundidad [9].

La distribución de los continentes influye en la naturaleza y la dirección de las corrientes superficiales (ver Fig. 5), puesto que si no existieran las masas continentales, las corrientes superficiales seguirían el patrón que marcan los principales sistemas de vientos. Otros factores que influirán en el movimiento de las corrientes superficiales serán: la fuerza de la gravedad, las fuerzas de fricción y el efecto Coriolis [3].

---

<sup>1</sup> **Pycnoclina**: capa de agua en la que se evidencia un cambio súbito en su densidad vinculado con la profundidad [8].

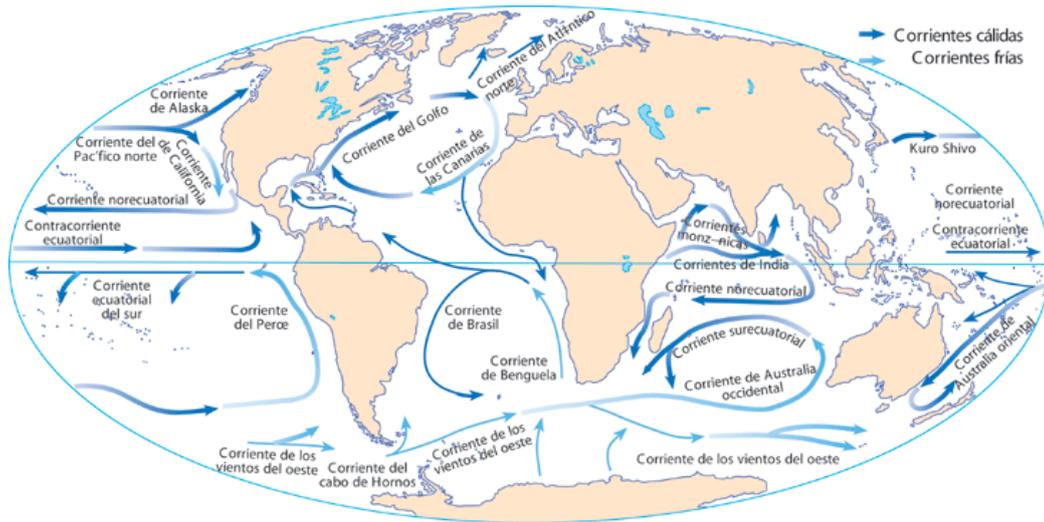
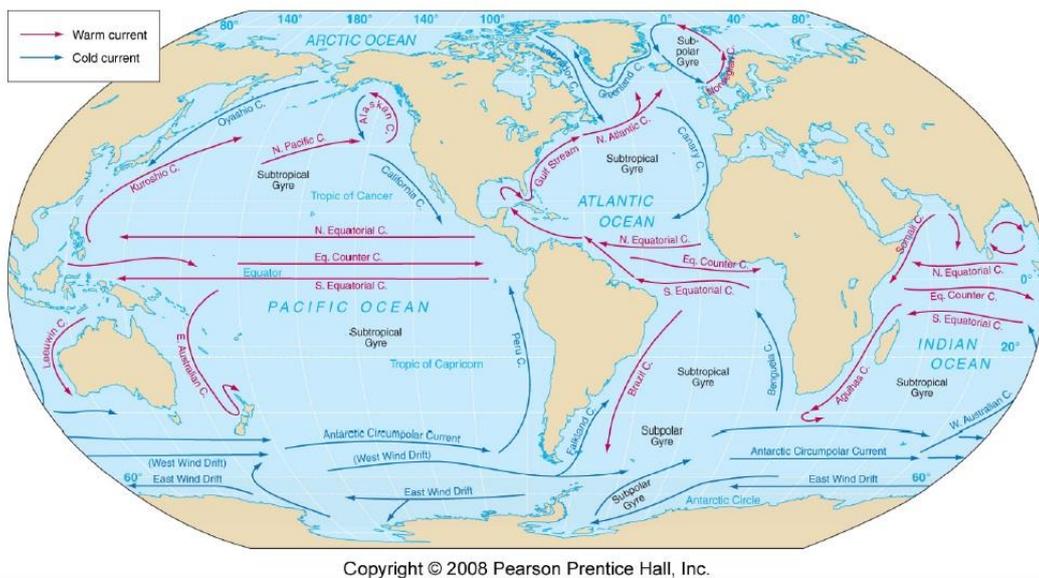


Figura 5. Esquema de las corrientes superficiales oceánicas [10]

Observando las figuras 5 y 6 se puede comprender mejor el funcionamiento de la circulación oceánica superficial.



Copyright © 2008 Pearson Prentice Hall, Inc.

Figura 6. Esquema más simple de las corrientes superficiales y de los giros oceánicos [1].

Los vientos alisios que soplan desde el Noreste en el hemisferio norte y desde el Sureste en el hemisferio sur, forman las corrientes oceánicas conocidas como: **Corriente Ecuatorial del Norte o Norecuatorial** y la **Corriente Ecuatorial del Sur o Surecuatorial**.

Ambas corrientes, al llegar a la parte occidental de la cuenca del Atlántico, no pueden seguir su rumbo hacia el Oeste debido a que se encuentran con el continente americano. Esto junto con el efecto Coriolis, hace que las corrientes se desvíen hacia el Norte en el HN y hacia el Sur en el HS, discurriendo por la parte Oeste de sus respectivas cuencas oceánicas. Un ejemplo de esta situación son la **Corriente del Golfo** y la **Corriente de Brasil** que se mueven hacia el Norte y hacia el Sur respectivamente [11].

Posteriormente a ser desviadas hacia el Norte o el Sur, dependiendo del hemisferio en el que nos encontremos, estas corrientes se ven afectadas por los vientos del Oeste que se encuentran entre la latitud 30° y 60° en ambos hemisferios. Esta interacción provoca el desvío de las corrientes hacia el Este en ambos hemisferios. Cuando alcanzan la parte oriental de la cuenca del Atlántico (las costas europea y africana) se desvían hacia el Sur en el HN y hacia el Norte en el HS debido al efecto Coriolis.

La desviación provoca que las aguas regresen a la zona ecuatorial mediante corrientes que recorren toda la parte Este de la cuenca del Atlántico, formando así un circuito giratorio circular de corrientes superficiales llamado **Giro Oceánico Subtropical**.

En la tabla siguiente se muestran los 5 giros subtropicales que existen y qué corrientes los forman:

**Tabla 1.** Tabla resumen de los giros subtropicales existentes [12].

GIRO DEL:	FORMADO POR:	GIRO DEL:	FORMADO POR:
Atlántico Norte	Corriente Norecuatorial.	Atlántico Sur	Corriente Surecuatorial
	Corriente del Golfo		Corriente de Brasil
	Corriente Noratlántica		Corriente del Atlántico Sur
	Corriente de Canarias		Corriente de Benguela
Pacífico Norte	Corriente Norecuatorial	Pacífico Sur	Corriente Surecuatorial
	Corriente de Kuroshio		Corriente Australiana del Este
	Corriente del Pacífico Norte		Corriente del Pacífico Sur.
	Corriente de California.		Corriente de Perú o Humbolt.
Océano Índico	Corriente Surecuatorial		
	Corriente de Angulhas		
	Corriente Sur del Océano Índico.		
	Corriente australiana del oeste.		

En las latitudes más altas del hemisferio norte, las masas continentales y los vientos del Este favorecen la generación de los giros subpolares. En estos giros, las corrientes circulan en el sentido contrario con respecto a los giros subtropicales. Hay 2 giros Subpolares [12]:

**1. Giro Subpolar del Atlántico Norte, formado por:**

- Corriente del Atlántico Norte.
- Corriente de Groenlandia.
- Corriente del Labrador.

**2. Giro Subpolar del Pacífico Norte, formado por:**

- Corriente del Pacífico Norte.
- Corriente de Alaska.
- Corriente de Oyashio.

Por otro lado, en las latitudes más altas del hemisferio sur, no hay masas continentales que puedan impedir el flujo oceánico, esto implica que los vientos del Oeste generen la **Corriente Circumpolar Antártica**, que recorre todo el planeta fluyendo de Oeste a Este [12].

En las latitudes cercanas al Ecuador, entre 4° y 10°N, y en el resto de los océanos, se puede apreciar la existencia de una corriente que se dirige hacia el Este, esta corriente se denomina Contracorriente Ecuatorial. Su origen se debe a la acumulación de agua en las costas del Oeste por la acción de los vientos alisios y las corrientes ecuatoriales. Esto genera una pendiente en la superficie del mar y un gradiente horizontal de presión que hace que las aguas acumuladas en el Oeste tiendan a dirigirse hacia el Este gracias a la debilitación de los vientos en la Zona de Convergencia Intertropical, dando lugar a la **Contracorriente Ecuatorial** [12].

### 1.2.2 Circulación vertical inducida por el viento

En ocasiones, el movimiento de las masas de aire que están en contacto con la superficie de las masas oceánicas provoca un movimiento vertical en la columna de agua. Estos movimientos verticales pueden ser ascendentes o descendientes.

En aquellos lugares donde las corrientes superficiales divergen (se alejan de un área superficial oceánica) se presencian zonas de afloramiento de aguas o “*upwelling*”. Por otro lado, en una zona donde las corrientes superficiales se encuentren y converjan, se observará una zona de “*downwelling*”.

### 1.2.3 Circulación Profunda o Termohalina

Se denomina circulación profunda o termohalina a la circulación que tiene lugar en las zonas más profundas de los océanos, por debajo de la termoclina<sup>2</sup> [12].

La circulación se debe a la convección, es decir, se produce por la diferencia de densidades entre las masas de agua. Las más densas tienden a hundirse y las menos densas a ascender.

Estas diferencias de densidad dependen principalmente de 2 factores: la temperatura y la salinidad. Cuanto más fría y salada sea una masa de agua, más densa será y viceversa.

De esta manera, cuando las aguas cálidas superficiales de la corriente del Golfo llegan a las cercanías de Groenlandia se hunden por su mayor densidad con respecto a la de las aguas situadas a mayor profundidad (ver Fig. 7). Esto se debe al enfriamiento que se produce en el límite de la banquisa o hielo polar, donde el agua que forma hielo se hace dulce provocando una acumulación de sal en el medio, generándose un incremento de su salinidad y, por lo tanto, de su densidad [1].

Así, se establece la corriente Termohalina que recorre el fondo de la cuenca del Océano Atlántico hasta el Océano Glacial Antártico, donde asciende de nuevo, se enfría hasta el punto de congelación y se hunde nuevamente en profundidad [1] [11].

---

<sup>2</sup> **Termoclina:** zona de la capa superficial del océano en la cual la temperatura del agua del mar tiene una rápida disminución en sentido vertical, con poco aumento de la profundidad. Capa delgada de agua colocada entre la parte superficial más cálida y la más fría del fondo [13].

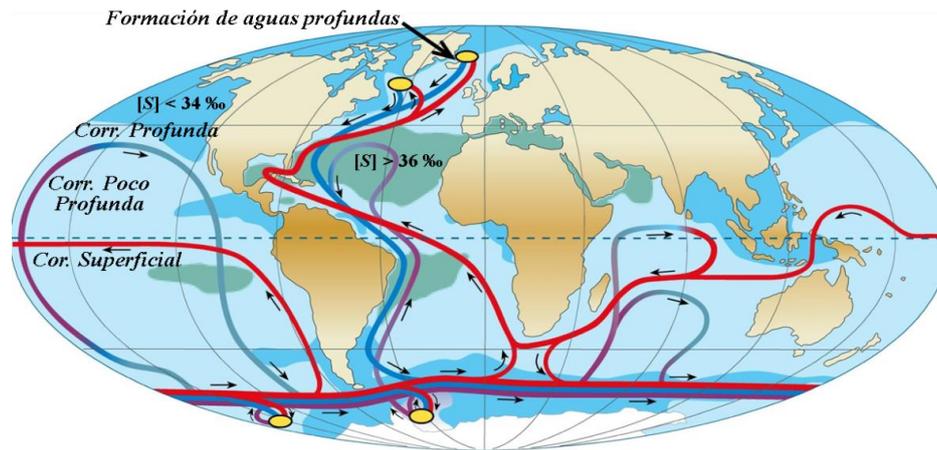


Figura 7. Esquema general de la Circulación Termohalina [11]

Algunas lenguas de la corriente Termohalina fluyen en dirección Norte hasta los Océanos Pacífico e Índico, donde asciende hasta zonas poco profundas formándose una corriente de aguas cálidas que fluye de nuevo hacia el Atlántico Norte atravesando el ecuador.

Esta agua profunda se forma en el Atlántico Norte, pero no en el Pacífico, porque la salinidad de las aguas superficiales del Atlántico es mayor que la de las aguas del Pacífico. Aspecto muy a tener en cuenta actualmente por la acción de deshielo polar, debido a que si parte de las masas de hielo se derritiesen se produciría un aumento del aporte de agua dulce en la cuenca del Atlántico Norte.

Cuando estas masas de agua se hunden para formar la corriente termohalina, ceden su calor a los vientos superficiales del Oeste. La cesión de este calor a la atmósfera explica el clima anómalo que disfruta Europa. La corriente del Golfo transporta una cantidad enorme de calor hacia el Norte. Su temperatura es 8°C mayor que la de la corriente de Canarias que avanza hacia el Sur. Si la corriente termohalina se interrumpiera, la temperatura del Atlántico Norte y de Europa caería bruscamente 5°C o más [1] [11].

### 1.3 RELACIÓN ENTRE LA CIRCULACIÓN ATMOSFÉRICA Y LA OCEÁNICA

Hasta el momento se han explicado los fenómenos de la circulación atmosférica y de la circulación oceánica por separado, pero en realidad, el conjunto de ambos da lugar al fenómeno conocido como circulación general.

Esto se debe a la interacción que existe entre el sistema atmosférico y oceánico. Todo lo que ocurre en uno afecta al otro, y por ello no se concibe un estudio por separado de cada uno de ellos.

Los vientos ocasionados en la circulación atmosférica condicionan las temperaturas de las masas de agua y provocan el movimiento de sus capas superficiales. A su vez, la variación en la temperatura provoca cambios en la concentración salina del agua. Al aumentar la temperatura, se produce mayor evaporación de agua provocando un aumento de la concentración de sales en el agua. Así mismo, una disminución de la temperatura hace aumentar la densidad del agua haciendo que ésta posicionarse en zonas más profundas.

## 1.4 IMPORTANCIA DEL ESTUDIO DE LA CIRCULACIÓN ATMOSFÉRICA Y OCEÁNICA

El estudio de la circulación atmosférica y oceánica a nivel global permite conocer con detalle cómo se distribuye la energía en forma de calor que llega a la Tierra procedente del Sol. Estas corrientes se encargan de redistribuir a escala global esta energía.

Los rayos solares, debido a la inclinación del eje de rotación de la Tierra con respecto al plano de la elíptica, presentan un ángulo de incidencia sobre la tierra que varía en función de la latitud donde no encontremos.

Las regiones ecuatoriales y tropicales reciben más calor ya que los rayos solares inciden casi verticalmente, y las regiones medias y polares reciben menos calor porque los rayos inciden de manera oblicua tal y como se puede observar en la figura 8 [1].

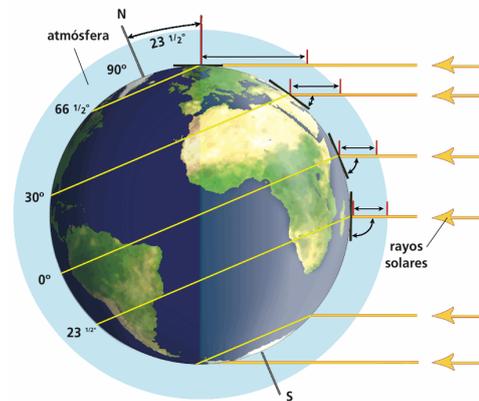


Figura 8. Incidencia de los rayos solares [2].

A su vez, en las latitudes altas se pierde más calor por la reflexión del que se gana por absorción debido al albedo<sup>3</sup> del hielo y a la incidencia angular de los rayos solares. En las latitudes bajas se gana más calor del que se pierde porque hay muy poca reflexión (ver Fig. 9). Con todo esto se puede decir que se produce un calentamiento desigual sobre la superficie de la Tierra.

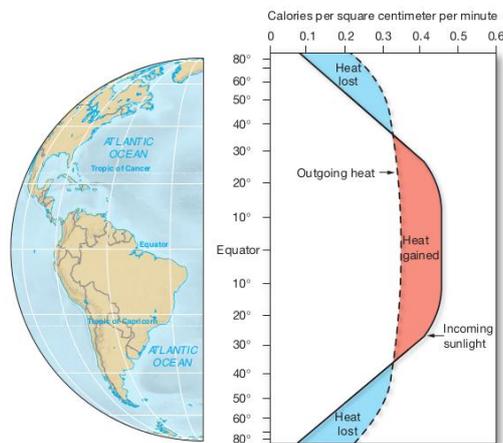


Figura 9. Calorías por centímetro cuadrado y por minuto [1].

Sin embargo, la temperatura de las zonas ecuatoriales no está en aumento de forma permanente sino que existe un equilibrio térmico en el planeta. La circulación de la atmósfera y del océano son las encargadas de distribuir el exceso de energía que reciben las zonas ecuatoriales hacia latitudes más altas manteniendo así el equilibrio térmico del planeta [1].

<sup>3</sup> **Albedo**: es el porcentaje de radiación que cualquier superficie refleja respecto a la radiación que incide sobre la misma [14].

## CAPÍTULO 2: DISEÑO DEL PROTOCOLO DE SIMULACIÓN DE LA CIRCULACIÓN ATMOSFÉRICA Y OCEÁNICA A ESCALA DE LABORATORIO

### 2.1 EQUIVALENCIAS SISTEMA EXPERIMENTAL – SISTEMA PLANETARIO

Hasta ahora se ha expuesto claramente como prácticamente todo el movimiento de circulación de las masas oceánicas y atmosféricas están influenciados por el fenómeno conocido como el Efecto Coriolis que varía según la latitud a la que nos encontremos. Este efecto se cuantifica por un parámetro, el parámetro de Coriolis, que se escribe:

$$f = 2\Omega \sin \theta \quad (1)$$

dónde  $\Omega$  es la velocidad angular de rotación de la Tierra, y  $\theta$  la latitud.

En el caso de un planeta en rotación, la única manera de aumentar o disminuir el parámetro de Coriolis es cambiando la latitud a la que nos encontremos, puesto que la frecuencia de rotación no puede cambiar. En un modelo experimental, por el contrario, no hay posibilidad de modificar la latitud ya que esta viene determinada por el ángulo que forma el eje de rotación y la superficie del agua, el cual siempre es de 90°. El parámetro de Coriolis en nuestro experimento es siempre:

$$f_{exp} = 2\Omega \quad (2)$$

Debido a esta imposibilidad de modificar el parámetro de la latitud en el modelo experimental, se procede a realizar una similitud modificando la frecuencia de rotación, y por tanto el parámetro de Coriolis, el cual permite obtener una equivalencia con latitudes mayores o menores. En concreto, cualquier variación en la velocidad de rotación implicará un aumento o disminución del parámetro de Coriolis, es decir, velocidades de rotación bajas se corresponderán con valores de  $f \approx 0$  similares a los que se encuentran cerca del ecuador, y velocidades de rotación altas, se corresponderán con valores de  $f > 0$  similares a los que se encuentran en latitudes medias y altas [15].

Si nos fijamos en la figura 10 se puede ver que en la esfera terrestre, la superficie del agua y la velocidad angular de rotación no están alineadas. Pero en el sistema rotante, donde el plano del agua es perpendicular al eje de rotación, sí estarían alineadas.

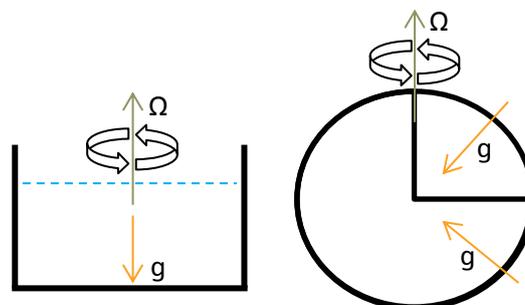


Figura 10. Esquema de la equivalencia entre el planeta y la plataforma giratoria.

## 2.2 DESCRIPCIÓN DEL PROTOCOLO EXPERIMENTAL DE SIMULACIÓN DE LA CIRCULACIÓN ATMOSFÉRICA Y OCEÁNICA

### 2.2.1 Introducción al protocolo experimental de simulación

El objetivo principal de nuestras simulaciones reproducir la circulación general atmosférica y oceánica a escala de laboratorio y así poder observar los principales fenómenos que ocurren.

El primer aspecto a tener en cuenta a la hora de diseñar el protocolo a seguir en el proceso experimental, es determinar las principales variables que condicionan la circulación general atmosférica y oceánica. En concreto:

- ***La rotación de la Tierra***
- ***El calentamiento diferencial entre el ecuador y los polos***

Para simular la rotación de la Tierra, se cuenta con el tanque acrílico sobre la plataforma giratoria que simulará el océano en rotación. A su vez, los gradientes de temperatura observados entre los polos y el ecuador, se recrearán mediante la utilización de bloques de hielo que simularán el polo. Y por último, para poder mostrar cómo se produce la circulación general en distintas latitudes se utilizará la variación de la velocidad de rotación del tanque que será proporcional a la aceleración de Coriolis.

Además, como se ha podido comprobar en apartados anteriores, es importante observar las variaciones que se producen a diferentes latitudes. Para ello será necesario tener en cuenta el parámetro de Coriolis que, como hemos visto, varía con la latitud de manera que es mínimo en el ecuador ( $f \approx 0$ ) y máximo en los polos.

Para poder diferenciar en la circulación de estudio los movimientos de los fluidos, se utilizarán colorantes alimenticios: azul, rojo y verde.

Las simulaciones que se pretenden llevar a cabo son:

- Simulación de la circulación atmosférica de Hadley en 2D
- Simulación de la circulación atmosférica de Hadley con rotación en 2D
- Simulación de la circulación tropical en 3D y viento térmico
- Simulación de la circulación extra-tropical en 3D
- Simulación de frentes

### 2.2.2 Material

Debido a que la mayoría de los elementos utilizados son comunes entre las distintas simulaciones, a continuación se procederá a la descripción detallada del material necesario para llevarlas a cabo y posteriormente, se especificará qué material es requerido en cada una de las simulaciones.

- **Una plataforma giratoria:** esta plataforma fue diseñada por el Instituto Tecnológico de Massachussets (MIT) y es la pieza central para poder realizar los distintos experimentos. Su diseño es simple, pero eficaz.

La plataforma está compuesta por una base de madera de 0.46 cm x 0.60 cm que gira alcanzando un rango de velocidades que asciende de 1 revolución por minuto (rpm) hasta 30 rpm. El impulso se consigue mediante una rueda de fricción en la parte inferior de la plataforma impulsada por un motor de velocidad variable manualmente.

También contiene un tacómetro que hace uso de la función de cadencia de un ciclómetro y no necesita ser calibrado. La velocidad de rotación se puede ver en la esquina inferior derecha del ciclómetro. Y, con el fin de alinear el sensor del dispositivo a un rango de rotación adecuado, hay 10 imanes fijos en la parte inferior de la plataforma giratoria con los que se marca la velocidad de rotación en el tacómetro.



Figura 11: Plataforma giratoria [16]

- **Tanque acrílico transparente:** existen varios tipos de tanque que se pueden utilizar, pero para todos los experimentos llevados a cabo, se ha utilizado un tanque circular de 50 cm de diámetro, 34.5 cm de profundidad y 1 cm de grosor. El tanque se sitúa sobre una plataforma de color blanco para facilitar la visualización de lo que ocurre durante la realización de los experimentos.
- **Sensores de temperatura:** serán utilizados para medir la evolución de la temperatura del interior y del exterior del tanque.
- **Lata de aluminio:** se utilizará una lata de 20 cm de altura, 15 cm de diámetro y 4 mm de grosor.
- **Embudo de vidrio** de 10 cm de diámetro que se utilizará para separar aguas con distinta densidad.
- **Pesos de 1.2 kg** para introducir en la lata de aluminio y así evitar que flote.



Figura 12. Tanque acrílico transparente con lata de aluminio en el interior [16]

- **Pesos de 120 g** para introducir en los hielos tintados y evitar que flote.
- **Agua líquida.**
- **Cubitos de hielo.**
- **Cubitos de hielo tintados.**
- **Colorantes alimenticios:** para poder observar correctamente lo que está ocurriendo mientras se realizan los experimentos, se utilizarán colorantes de varios colores: azul, rojo y verde, que nos permitirán distinguir unos fluidos de otros.
- **Permanganato potásico** en pequeñas cantidades, que gracias a su precipitación, nos permitirá observar mejor lo que ocurre en las capas inferiores del tanque.



Figura 13: Permanganato Potásico (izquierda) y colorantes alimenticios (derecha)

- **Jeringas** con una capacidad de 10 ml para poder introducir los colorantes en el tanque.
- **Espátula** para coger e introducir el permanganato potásico.
- **Vaselina** para aislar el embudo de vidrio y no permitir el paso de agua.
- **Papeles pequeños** para simular partículas en suspensión.
- Para la toma de imágenes y vídeos se utilizará una **cámara de grabación de video de alta definición** y un **teléfono móvil**.
- **Soportes** para sujetar las cámaras.

### 2.2.3 Listado de las simulaciones experimentales diseñadas

1. **Circulación atmosférica de Hadley:** se propone un protocolo para la simulación de la circulación descrita por Hadley a escala de laboratorio y en 2D. Para ello se insertará una columna de agua con muy poca profundidad y se dejará el tanque estático.
2. **Circulación atmosférica de Hadley con rotación:** se presenta el protocolo para simular cómo sería la circulación propuesta por Hadley si se añade la variable de la rotación. Para no añadir dificultad se seguirá un modelo en 2D, es decir, con una columna de agua poco profunda.
3. **Circulación tropical y viento térmico:** se describirá el protocolo a seguir para simular la circulación tropical, para ello se tendrá en cuenta que cerca del ecuador, el parámetro de Coriolis es menor y eso significa que la rotación de la Tierra tiene un efecto menos importante [15]. Para poder simularlo en el laboratorio, se realizará el experimento en un régimen de rotación lento, entre 1 y 2 rpm.
4. **Circulación extra-tropical:** puesto que la circulación extra-tropical tiene lugar en latitudes medias donde el efecto Coriolis es mayor, se presentará un protocolo para la simulación de dicha circulación, que tenga en cuenta que será necesario aumentar la velocidad de rotación para aumentar el efecto Coriolis sobre los fluidos.
5. **Formación de frentes:** se presentará un protocolo para simular la formación de un frente entre fluidos de distintas densidades como pueden ser los vientos más fríos y densos procedentes del polo, y los menos fríos y menos densos procedentes de latitudes medias.

## **CAPÍTULO 3: DESCRIPCIÓN DE LOS PROTOCOLOS DE SIMULACIÓN EXPERIMENTAL**

A lo largo de este apartado se describen los protocolos para las distintas simulaciones realizadas en el laboratorio y los resultados obtenidos en cada uno de ellos.

### **CASO 1: Simulación de la circulación atmosférica de Hadley en 2D**

#### **a. Materiales**

- Plataforma giratoria
- Tanque acrílico circular
- Agua a temperatura ambiente (18°C)
- Hielo tintado con colorante alimenticio
- Cámara vista en planta
- Soporte para la cámara

#### **b. Metodología**

Para la realización de esta primera simulación, se procede a colocar el tanque acrílico circular sobre la mesa giratoria y se introduce agua hasta los 2 cm. La introducción de poca agua, permite que las variaciones producidas en función de la profundidad de la columna de agua sean despreciables, convirtiendo la simulación en un modelo de 2 dimensiones (2D) [17].

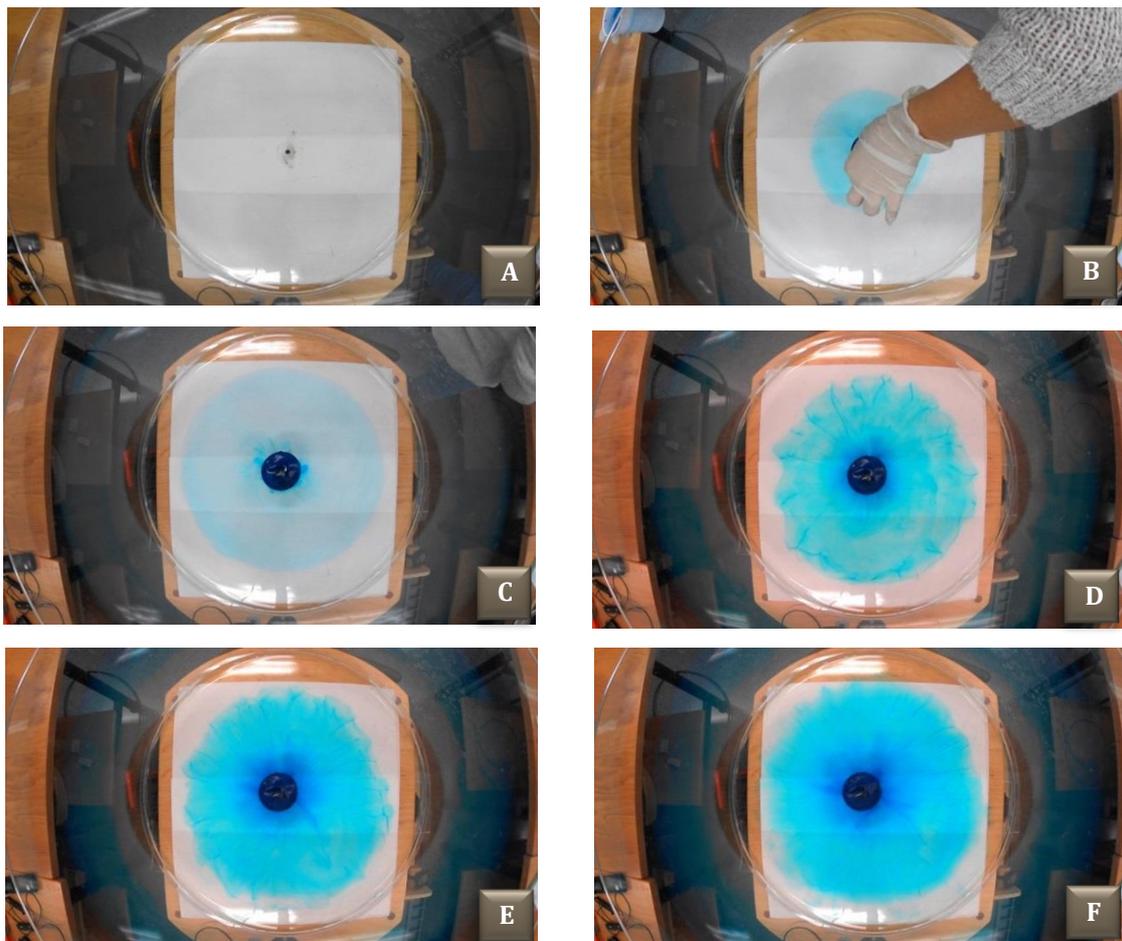
Una vez introducida el agua, esperamos entre 10 y 15 minutos para que el fluido se estabilice y no exista ninguna perturbación. A continuación se introduce un bloque de hielo tintado con colorante azul con un peso de 120 gr en su interior para evitar que flote y se observa su evolución.

#### **c. Conclusiones experimentales**

Con el paso del tiempo (Fig. 14) se puede apreciar la formación de un halo circular alrededor del hielo que va avanzando en función del gradiente de temperatura radial que se forma entre el centro y los bordes del tanque debido a la fusión del hielo.

La circulación que se produce en esta simulación, se corresponde con la propuesta inicial de circulación que Hadley en el s. XVII. El agua más fría se desplaza por las capas más bajas hacia la periferia y la más caliente se desplaza hacia el interior por las capas superiores.

**d. Reportaje gráfico de la evolución**



**Figura 14.** A) Situación de partida, tanque estático con 2 cm de agua. B) Introducción del hielo en el minuto 01:10. C) Captura a los 50 s de introducir el hielo, minuto 02:00. D) Captura minuto 04:00. E) Captura minuto 06:00. F) Captura minuto 08:00, instante final.

## **Caso 2: Simulación de la circulación atmosférica de Hadley con rotación en 2D**

### **a. Materiales**

- Plataforma giratoria
- Tanque acrílico circular
- Agua a temperatura ambiente (18°C)
- Papeles pequeños para simular partículas en suspensión
- Hielo tintado con colorante alimenticio
- Cámara vista en planta
- Soporte para la cámara

### **b. Metodología**

En esta simulación se procede de manera muy similar a la simulación anterior, se introduce agua hasta los 2 cm y se inicia la rotación del tanque a una velocidad de 14 revoluciones por minuto (rpm en adelante). Esperar durante 20 min hasta que el fluido gira de manera estacionaria con el centro del tanque.

Para saber cuándo el fluido gira de manera estacionaria, se depositarán unos sobre la superficie del agua pequeños cuadrados de papel y se observa la imagen desde la cámara superior. Si no se detecta ningún movimiento de los fragmentos de papel se considera que el fluido está girando de manera estacionaria con el tanque.

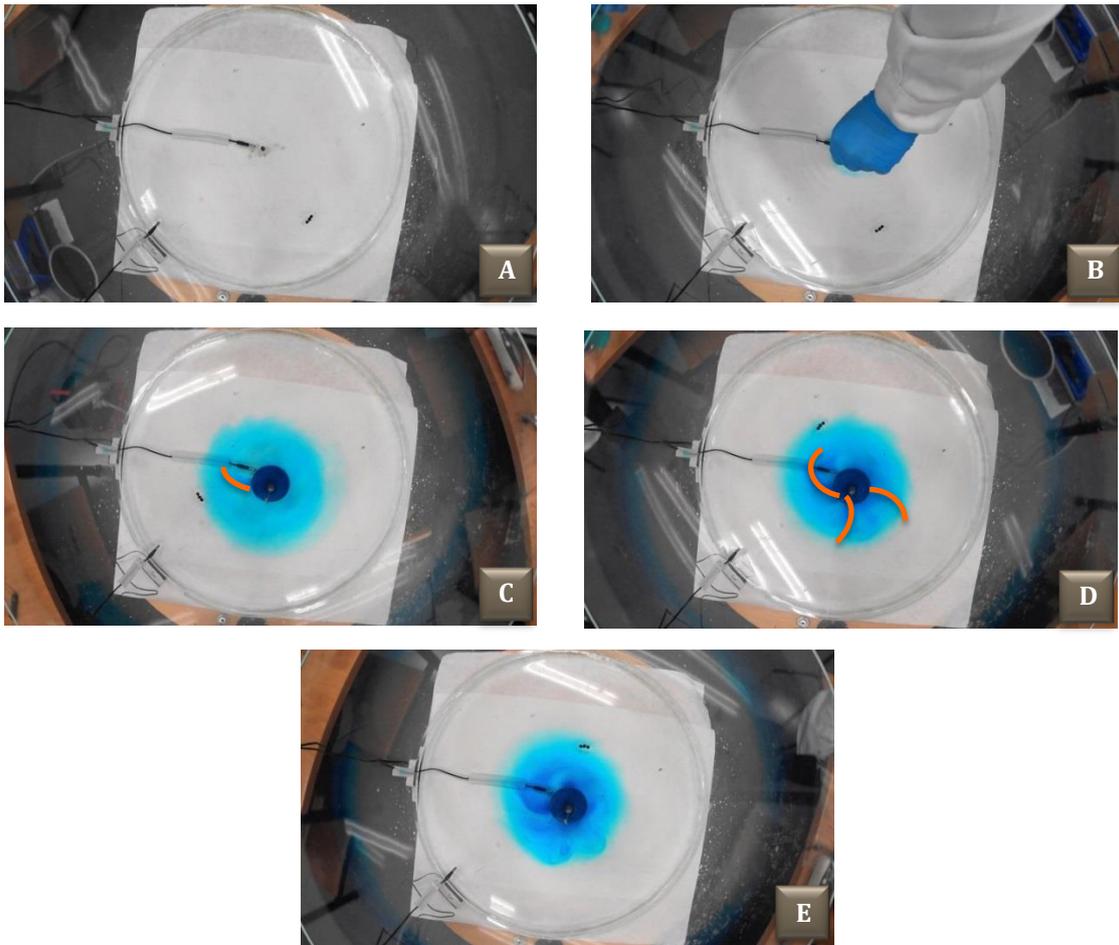
Será entonces cuando se introducirá el hielo tintado en el centro del tanque y se observará qué ocurre.

### **c. Conclusiones experimentales**

Una vez introducido el hielo en el centro del tanque, con el paso del tiempo (ver Fig. 15) se observa que a diferencia de la simulación 1, en este caso no se forma un halo alrededor del hielo, sino que se van formando remolinos (eddies). Esto se debe a que el tanque está en rotación y el agua fría viaja del centro hacia el exterior y el agua caliente en sentido contrario empujándose una con otra y dando lugar a esos remolinos de circulación debidos al gradiente de temperatura.

Esta simulación muestra que la circulación inicial producida por Hadley no se correspondía con la realidad. Se demuestra que la rotación de la Tierra provoca determinados comportamientos en los fluidos que se desplazan, tal y como se había comentado en el capítulo 1 del presente documento.

**d. Reportaje gráfico**



**Figura 15.** Situación de partida, tanque con 2 cm de agua y rotando a 10 rpm. B) Introducción del hielo en el minuto 00:40. C) Comienza a formarse el primer eddie al minuto 03:00. D) Se observa la formación de más eddies en el minuto 06:00. E) Captura minuto 08:00

### **Caso 3: Simulación de la circulación tropical en 3D y viento térmico**

#### **a. Materiales**

- Plataforma giratoria
- Tanque acrílico circular
- Lata de aluminio
- Agua a temperatura ambiente (18°C)
- Papeles pequeños para simular partículas en suspensión
- Hielo
- Colorante azul
- Permanganato potásico
- Sensores de temperatura
- Cámara vista en planta
- Cámara vista en perfil
- Soportes para las cámaras

#### **b. Metodología**

En esta simulación, se procede a aumentar la profundidad de la columna de agua para poder tener en cuenta los cambios que se producen en la misma a lo largo de la simulación, convirtiéndola en un modelo en 3D.

Será necesaria la colocación de la cámara vista en perfil y la cámara vista en planta que permita captar correctamente todo el desarrollo del experimento.

Se colocará el tanque cilíndrico sobre la base rotante y se sitúa la lata en el centro con un peso para que no flote. A continuación, se añadirá agua hasta los 10 cm de profundidad y se pondrá el tanque a rotar a 1 rpm.

Como la circulación tropical ocurre a unas latitudes bajas, esta variable la consideraremos mediante el régimen de rotación del tanque. El movimiento rotacional lento, entre 1 y 2 rpm, permite equiparar los efectos del parámetro de Coriolis en las latitudes bajas.

Se dejará rotar unos 10 min hasta que el fluido esté estacionario con el tanque. Comprobaremos que el fluido gira de manera estacionaria depositando pequeños fragmentos de papel sobre la superficie del agua y viendo que no existe movimiento.

Una vez comprobado, se llenará la lata central con hielo y agua para evitar que queden burbujas de aire que impidan la conducción térmica y, se dejará rotar el tanque unos minutos para que la circulación empiece a desarrollarse.

Finalmente, se añadirán unos pocos cristales de permanganato potásico, y unas gotas de colorante azul alrededor de la lata. Se observa la evolución.

### c. Conclusiones experimentales

Esta simulación nos ha permitido observar un análogo de la circulación general en las zonas tropicales donde se forma el cinturón de bajas presiones. Se ha observado como el agua que se enfría por proximidad del cubo de hielo pesa más que la de su entorno y se hunde, fluyendo en dirección al borde exterior del tanque la parte inferior del mismo. Este movimiento simula la expresión en superficie de la celda de Hadley, es decir los vientos alisios.

Por otra parte, el agua relativamente caliente del borde se eleva y se mueve hacia el interior por las capas superiores del tanque, cerrándose así la celda convectiva.

Si se observa la evolución del experimento (ver Fig. 16 y 17), debido a la presencia de rotación ciclónica de la plataforma giratoria, los anillos de fluido que se mueven hacia el centro, giran más ciclónicamente conforme su radio disminuye. Mientras que en las capas inferiores se observa como los anillos de líquido se expanden al viajar hacia el exterior, adquieren un giro anticiclónico. Los cristales de permanganato en la parte inferior nos indican el sentido de flujo hacia la derecha en la parte inferior.



**Figura 16.** Izquierda: el flujo inferior (flechas verdes) gira en sentido contrario al giro del tanque (flecha naranja). Derecha: formación de los anillos de fluido que se mueven ciclónicamente hacia el centro.

Un importante detalle observado durante el proceso experimental ha sido que al introducir los cristales de permanganato potásico, sus trazas no han seguido una trayectoria vertical, sino que se han inclinado en una dirección azimutal, arrastradas por las corrientes que aumentan con la altura en un sentido ciclónico (hacia la derecha visto desde el lado) (ver Fig. 17).

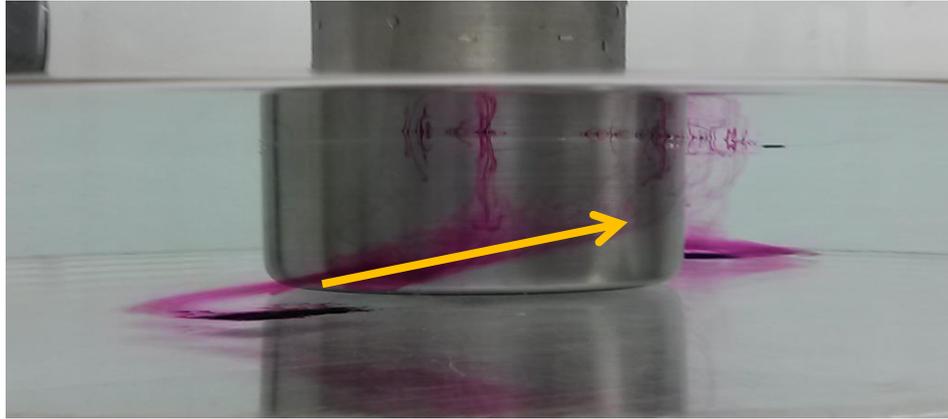


Figura 17. Visualización del viento térmico en la simulación.

Este esfuerzo cortante de corriente vertical, es una consecuencia del **viento térmico**:

$$\frac{\delta U}{\delta Z} = - \frac{g\alpha}{2\Omega} \frac{\delta T}{\delta r} \quad (3)$$

Con la finalidad de comprobar que se cumple la relación del viento térmico, a continuación, se realizará un estudio teórico sencillo de cuál sería dicha relación en nuestro modelo a escala de laboratorio.

### **Cálculo 1: Deducción del viento térmico a partir de velocidades**

En este caso, se deducirá el término del viento térmico en función de la variación de la velocidad con la profundidad, es decir:

$$\frac{\delta V}{\delta Z} = \frac{V_{sup} - V_{inf}}{Z_{sup} - Z_{inf}} \quad (4)$$

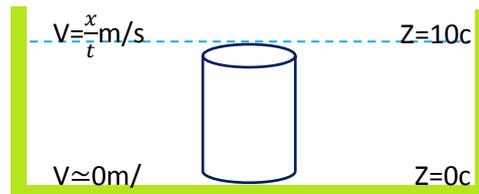


Figura 18. Esquema del experimento vista de perfil.

Puesto que la velocidad del fluido, en contacto con la superficie inferior del tanque, es prácticamente nula, ese término de la ecuación 2  $V_{inf}$  es despreciable; de la misma manera, la altura en la parte inferior del tanque  $Z_{inf}$  es cero. De manera que la ecuación 2 quedaría de la siguiente forma:

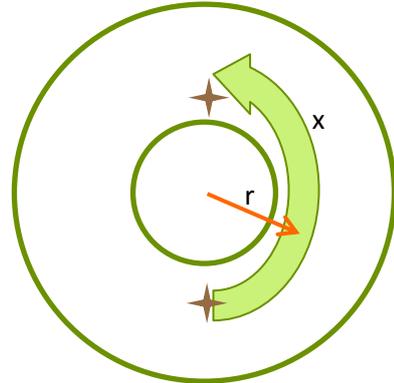
$$\frac{\delta V}{\delta Z} = \frac{V_{sup}}{Z_{sup}} \quad (5)$$

La altura en superficie se corresponde con la altura de la columna de agua, que en nuestro caso son 10 cm.

Por otro lado, para calcular la velocidad en la superficie, se colocará una partícula que flote (en nuestro caso un fragmento de papel) y se anotará el tiempo que tarda en realizar media vuelta. Así se obtendrá cuánto tiempo tarda en recorrer una distancia determinada y se podrá calcular la velocidad superficial:

$$V_{sup} = \frac{\text{espacio } (X)}{\text{tiempo } (t)} = \frac{\pi \cdot r}{t} = \frac{\pi \cdot 10\text{cm}}{40\text{s}}$$

$$= 0.7853 \frac{\text{cm}}{\text{s}}$$



**Figura 19.** Esquema del experimento para calcular la velocidad superficial. Vista en planta.

Por último, solo falta sustituir los valores de la velocidad superficial y la profundidad en la ecuación 3 para obtener el valor de la relación del viento térmico:

$$\frac{\delta V}{\delta Z} = \frac{V_{sup}}{Z_{sup}} = \frac{0.7853 \frac{\text{cm}}{\text{s}}}{10 \text{ cm}} = 0.07853 \text{ s}^{-1}$$

### **Cálculo 2: Cálculo del viento térmico**

En este segundo caso, se calculará el viento térmico que se produce durante la realización del experimento. Para ello y con el fin de simplificar el problema, en lugar de tomar el factor  $\frac{\delta T}{\delta r}$  como derivadas, se hará como incrementos  $\frac{\Delta T}{\Delta r}$ , de manera que:

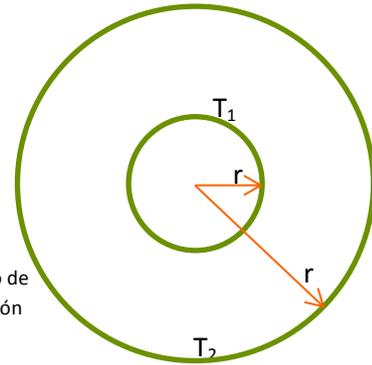
$$\frac{\delta U}{\delta Z} = - \frac{g\alpha}{2\Omega} \cdot \frac{\delta T}{\delta r} = - \frac{g\alpha}{2\Omega} \cdot \frac{\Delta T}{\Delta r} \quad (6)$$

Dónde:

- $g = 10 \text{ m/s}^2$
- $\alpha = 2,1 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
- $\Omega = \frac{2\pi}{T \text{ (periodo)}} = \frac{2\pi}{43\text{s}} = 0.14 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$

La temperatura 1 se corresponde con la del interior del tanque y la temperatura 2 con la de la parte exterior. A su vez, el radio 2 se corresponde con el del tanque y el radio 1 con el de la lata (ver Fig. 20):

$$\frac{\delta T}{\delta r} = \frac{T_2 - T_1}{r_2 - r_1} = \frac{17.2 - 15.5}{25 - 10} = 0.113 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{cm}}$$

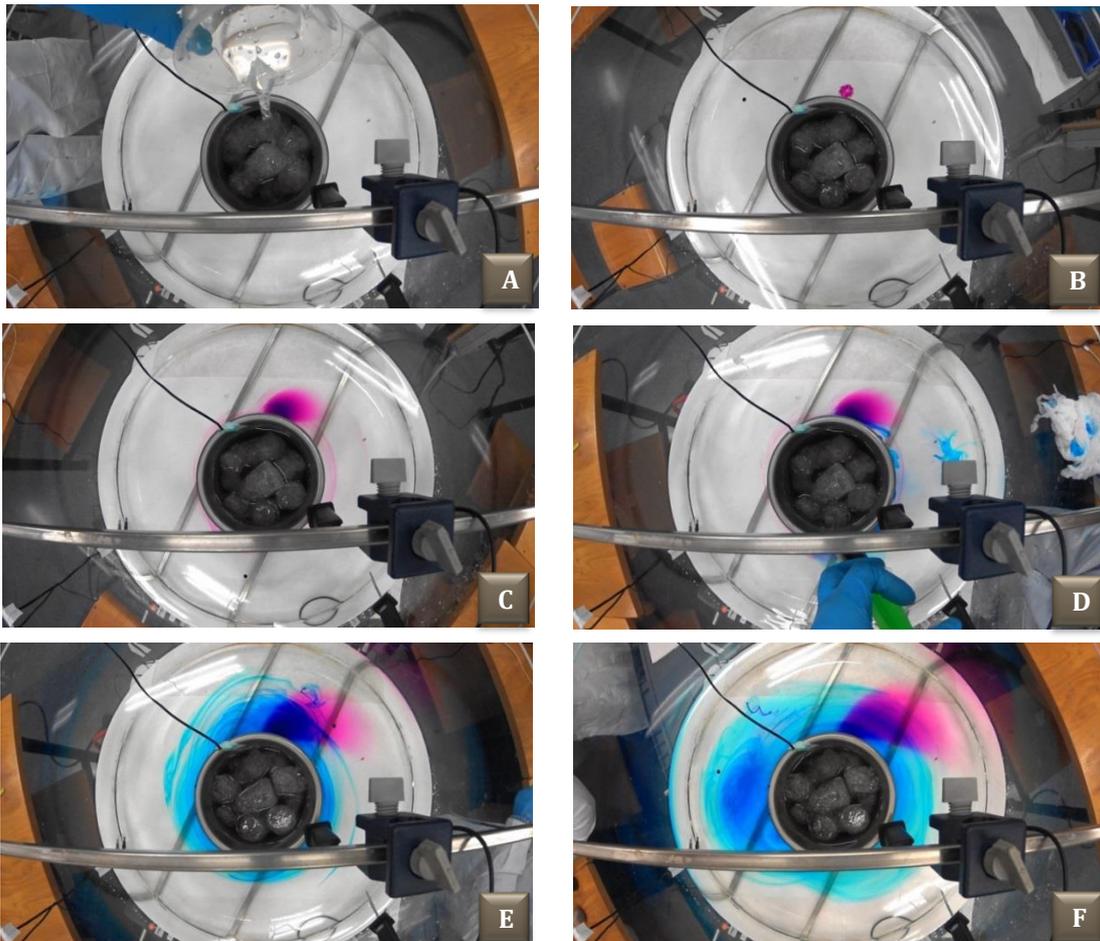


**Figura 20.** Esquema para el cálculo de la variación de temperatura en función del radio. Vista en planta.

Solo queda sustituir todos los valores de los parámetros  $g$  y  $\alpha$ , y los valores obtenidos para  $\Omega$  y  $\frac{\delta T}{\delta r}$  en la ecuación 6:

$$\frac{\delta U}{\delta Z} = -\frac{g\alpha}{2\Omega} \cdot \frac{\delta T}{\delta r} = -\frac{g\alpha}{2\Omega} \cdot \frac{\Delta T}{\Delta r} = -\frac{10 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot (2,1 \cdot 10^{-4})^{\circ}\text{C}^{-1}}{2 \cdot 0.14 \frac{\text{rad}}{\text{s}}} \cdot 11.3 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{m}} = 0.08475 \text{s}^{-1}$$

#### d. Reportaje gráfico



**Figura 21.** Evolución del experimento. A) Introducción de hielo y agua en la lata. B) Introducción de permanganato potásico. C) Evolución del permanganato potásico. D) Introducción de colorante azul alrededor de la lata. E) Evolución del colorante y el permanganato potásico. F) Imagen al final.

## Caso 4: Simulación de la circulación extra-tropical en 3D

### a. Materiales

- Plataforma giratoria
- Tanque acrílico circular
- Lata de aluminio
- Agua a temperatura ambiente (18°C)
- Papeles pequeños para simular partículas en suspensión
- Hielo
- Colorante azul
- Colorante rojo
- Sensores de temperatura
- Cámara vista en planta
- Soportes para la cámara

### b. Metodología

Para poder simular los efectos de la rotación sobre fenómenos que ocurren en latitudes medias y altas, en nuestra simulación, será necesario simular un parámetro de Coriolis mayor.

Para ello, se colocará el tanque cilíndrico sobre la base rotante y se depositará la lata en el centro con el peso de 1.2 kg para que no flote, se añadirá agua hasta los 10 cm de profundidad y se pondrá el tanque a rotar a 10 rpm puesto que la circulación extra-tropical ocurre a unas latitudes medias y altas, y eso en nuestro modelo se traduce en un régimen de rotación rápida.

Se dejará rotar 20 min hasta que con la ayuda de un papelito es superficie veamos que no se mueva y sea entonces cuando el flujo gire de manera estacionaria con el tanque. En ese instante, se llenará la lata con hielo y agua para evitar que queden burbujas de aire que impidan la conducción térmica. Y, una vez introducido el hielo, se deja rotar el tanque 5 minutos para que la circulación empiece a desarrollarse.

A continuación se añadirán unas gotas de colorante azul cerca de la lata, y colorante rojo en la periferia del tanque y se observará cuál es la evolución.

Con un gradiente térmico considerable y con altas velocidades de rotación cabe esperar que se genere una inestabilidad que da lugar a la generación de remolinos o *eddies*.

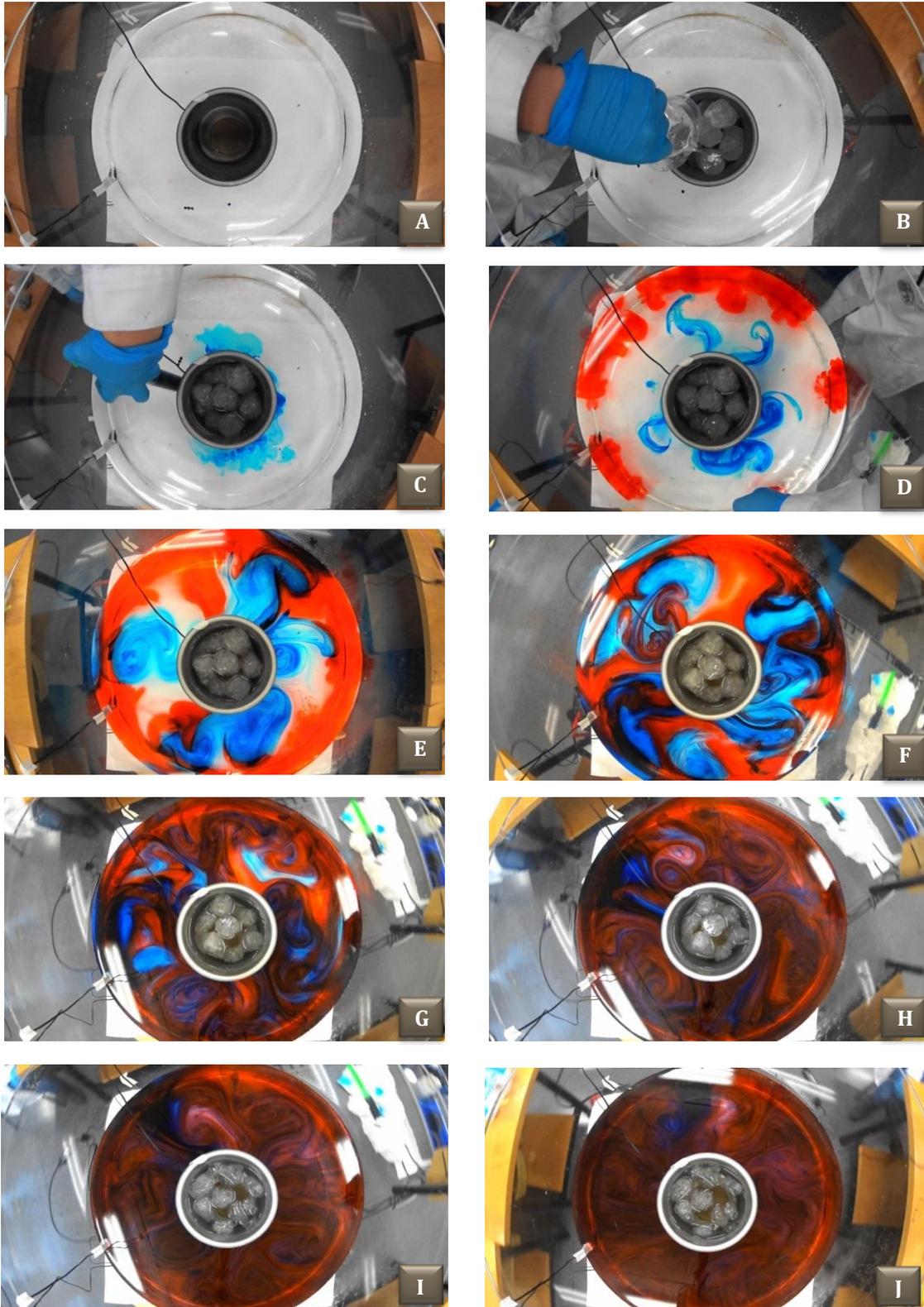
### **c. Conclusiones experimentales**

Si se observa la figura 22 se percibe la formación de remolinos que transportan fluido caliente desde la periferia hacia el interior del tanque, y al mismo tiempo llevan fluido frío del interior a la periferia. De esta manera se consigue un transporte de calor radialmente hacia el interior, compensando el enfriamiento en el centro causado por la fusión del hielo.

Estos remolinos se producen por el mismo mecanismo en la creación de los sistemas meteorológicos atmosféricos, con un gradiente térmico considerable y con altas velocidades de rotación se genera una inestabilidad (conocida como inestabilidad baroclínica) que da lugar a la generación de remolinos o eddies.

La teoría [1] dice que la escala de los remolinos depende de la velocidad de rotación, es decir, cuanto mayor sea la velocidad de rotación, más pequeños serán los remolinos. Esto se ha comprobado comparando el tamaño de los remolinos de la simulación 2 (ver Fig. 15) con respecto al tamaño de los presentes en esta simulación (ver Fig. 22).

d. Reportaje gráfico



**Figura 22.** Evolución del experimento. A) Situación inicial, tanque con 10cm de agua rotando a 10rpm. B) Introducción de agua y hielo. C) Introducción de colorante azul. D) Introducción de colorante rojo. E) Captura a los 08:00 min. F) Captura a los 12:00min. G) Captura a los 16min. H) Captura a los 20min. I) Captura a los 24min. J) Captura a los 27min.

## Caso 5: Simulación de frentes

### a. Materiales

- Plataforma giratoria
- Tanque acrílico circular
- Embudo de vidrio
- Vaselina
- Agua a temperatura ambiente (18°C)
- Agua con sal
- Papeles pequeños para simular partículas en suspensión
- Colorante verde
- Cámara vista en planta
- Cámara vista en perfil
- Soportes para las cámaras

### b. Metodología

Para llevar a cabo esta simulación, se utilizarán fluidos con distintas densidades que simulen, por un lado, los vientos más fríos y densos procedentes del polo, y por otro, los vientos menos fríos y menos densos procedentes de latitudes medias.

Conseguiremos fluidos de distintas densidades, añadiendo sal a uno de ellos convirtiéndolo en el fluido más denso; y para diferenciarlo del otro, se le añadirán unas gotas de colorante alimenticio de color verde.

El procedimiento será el siguiente, en el centro del tanque se colocará un embudo de vidrio invertido y lo sellaremos en la base del tanque con vaselina (material hidrófobo) para evitar que los fluidos se mezclen. A continuación se procederá a introducir el fluido de mayor densidad dentro del embudo, y el de menor densidad en el tanque. Se debe ir con mucho cuidado y ser precisos a la hora de introducir los fluidos y tratar de mantener igualadas las presiones hidrostáticas de ambos, porque si no podrían producirse fugas de un lado a otro [15].

Se irá añadiendo fluido hasta que la profundidad de la columna de agua sea de 10 cm. Después, se pondrá el tanque a rotar a 10 rpm y esperaremos hasta que los fluidos giren de manera estacionaria con el tanque, para ello utilizaremos papelitos sobre la superficie y cuando estos se mantengan inmóviles nos indicará que el fluido está girando de manera estacionaria con el tanque.

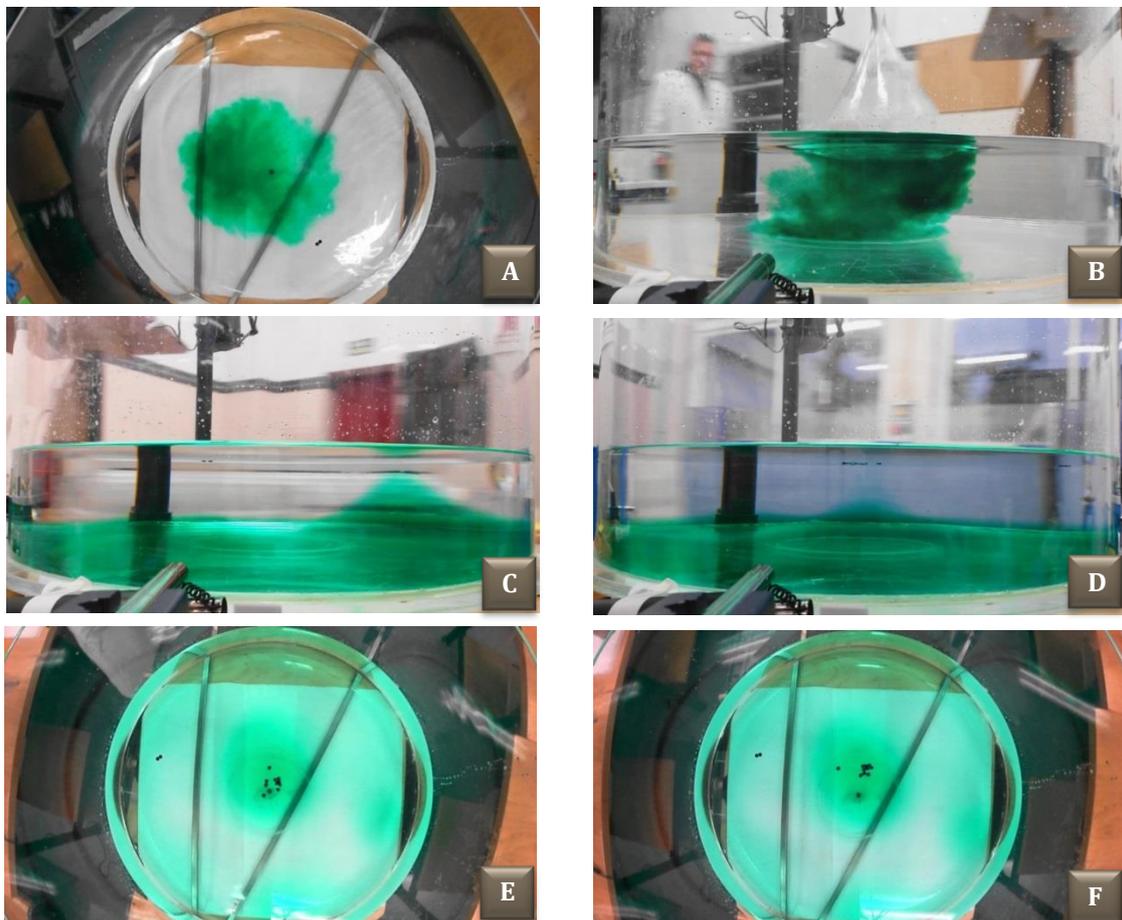
Llegados a este punto, se procederá a la retirada del embudo y se observará qué ocurre.

### c. Conclusiones experimentales

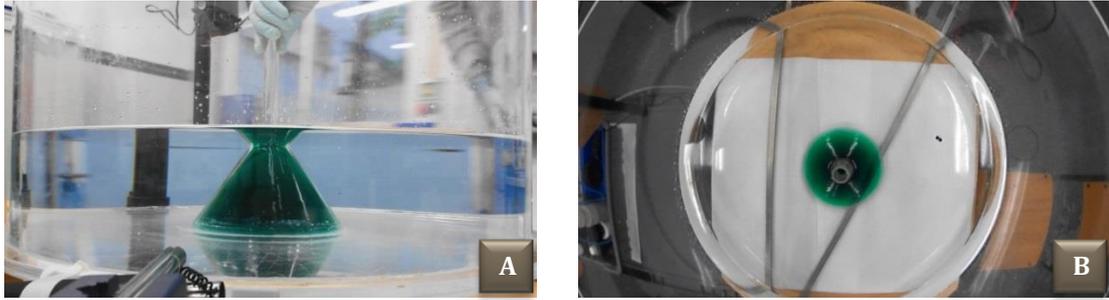
En la figura 23 se puede observar que nada más sacar el embudo se forma una columna vertical con el agua más densa y se observa que en un minuto, ya no es vertical sino que ha caído y ha adquirido una forma de cono, aun así, no llega a caer del todo gracias a la rotación del sistema que contrarresta la acción de la gravedad.

Las figuras 23E y 23F muestran cómo las partículas depositadas sobre el cono, se mueven más rápidamente que las que se encuentran lejos de éste; esto es debido a que los grandes gradientes horizontales de densidad que existen cerca del cono, están asociados con una gran cizalladura vertical del flujo geostrófico, puesto que el fluido que se encuentra en contacto con la parte inferior del tanque, se siente arrastrado, haciendo que las corrientes en la superficie del cono, se muevan más rápidamente [15].

### d. Reportaje gráfico



**Figura 23.** Evolución del frente. A) Instantes después de quitar el embudo vista planta. B) Segundos después de quitar el embudo vista perfil. C) Formación del cono al minuto de sacar el embudo. D) Vista perfil del posicionamiento de las partículas en superficie. E) Introducción de las partículas sobre el cono. F) Situación de las partículas a los 10 segundos.



**Figura 24.** Fotografías de los instantes iniciales del experimento. A) Vista perfil. B) Vista planta.

## **CAPÍTULO 4. Conclusiones y futuras líneas de investigación**

A lo largo de este trabajo se han logrado la mayoría de los objetivos iniciales propuestos.

En primer lugar, se ha conseguido crear un dispositivo experimental capaz de reproducir las condiciones necesarias para la circulación oceánica y atmosférica a pequeña escala.

Además, se ha logrado simular los fenómenos que se producen en distintas latitudes del planeta, lo que nos permite observar los efectos de la rotación según la latitud a la que nos encontremos, simplemente variando la velocidad angular del sistema experimental.

Con todo ello, hemos reproducido la circulación tropical y extra-tropical a escala de laboratorio, primero en 2D y posteriormente en 3D.

Los experimentos en 2D han servido como punto de partida facilitado la comprensión de los fenómenos que querían simularse y cuáles debían ser las claves para conseguirlo. Y los modelos en 3D han permitido el cálculo de la expresión del viento térmico, teórica y numéricamente.

Una de las conclusiones más importantes que se han obtenido es que los resultados numéricos para el cálculo del viento térmico, se aproximan a los resultados obtenidos sobre la parte teórica, obteniendo valores muy similares en ambos casos. Aun así, no se pueden comparar con otros estudios como el realizado por Vince Agard en 2009 [18] porque, aunque apuntan el valor obtenido para el viento térmico, no se revelan los valores del resto de parámetros.

También se ha conseguido formar un frente de propagación similar al frente polar pero, queda pendiente para futuras investigaciones, el cálculo de la variación de la inclinación de los flancos del frente en función de la densidad del fluido.

Así mismo, aunque se han utilizado todos los medios disponibles para ello, no ha sido posible tomar datos coherentes de la evolución de los gradientes de temperatura a lo largo de cada simulación. Se utilizaron varios sensores de temperatura, pero no eran suficientemente precisos, por lo tanto, queda pendiente de mejora para futuras etapas de la investigación.

Finalmente podemos concluir que la simulación de la circulación atmosférica y oceánica a escala de laboratorio, resulta una herramienta muy útil para la visualización y aprendizaje de ciertos conceptos físicos y oceanográficos que en una explicación o un libro, son difíciles de comprender.

## REFERENCIAS

[1] Trujillo, A., Thurman, H. (2008) *Essentials of Oceanography* 10<sup>th</sup> edition. Pearson Prentice Hall, USA, 577pp.

[2] NASA Landsat Science. Education. < <http://landsat.gsfc.nasa.gov/education/> > [Consulta: 05 de octubre de 2016]

[3] Brown, E., Colling, A., Park, D., Phillips, J., Rothery, D., Wright, J., (2001) *Ocean Circulation*. Butterworth-Heinemann, Oxford, 287pp.

[4] Rios, P. Biolulia: Biología per a la ESO. < <https://biolulia.wordpress.com/biolulia/4-eso/7-tectonica-de-plaques/7-1-la-terra-com-a-planeta/8-1-3-atmosfera-terrestre/> > [Consulta: 05 de octubre de 2016]

[5] Sánchez, S. (2010) “La Circulación Atmosférica General” en Cambio climático, energía, 17 de diciembre. < [http://cambioclimaticoenergia.blogspot.com.es/2010\\_12\\_01\\_archive.html](http://cambioclimaticoenergia.blogspot.com.es/2010_12_01_archive.html) > [Consulta: 07 de octubre de 2016]

[6] Universidad de Murcia. *Licenciatura en Ciencias Ambientales. Asignatura de Climatología. Tema 7.* < <http://www.um.es/geograf/clima/tema07.pdf> > [Consulta: 07 de octubre de 2016]

[7] Instituto de Tecnologías Educativas. *Temas de Ecología. Lección 3: el subsistema atmosférico.* < <https://fjferrer.webs.ull.es/Apuntes3/Leccion03/index.html> > [Consulta: 07 de octubre de 2016]

[8] Wikipedia. *Definición de Pycnoclina.* <<https://es.wikipedia.org/wiki/Pycnoclina>> [Consulta: 30 de noviembre de 2016]

[9] Cifuentes, J.L., Torres-García, P., Frías, M. (1995) *El Océano y sus recursos III. Las Ciencias del Mar: Oceanografía física, matemáticas e ingeniería.* Fondo de Cultura Económica, México. < <http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen1/ciencia2/17/htm/oceano.htm> > [Consulta: 11 de octubre de 2016]

[10] Toni Biología Camp (2014). Tema 13: modelado del relieve en Biologiacampmorvedre, 20 de noviembre. <<http://biologiacampmorvedre.blogspot.com.es/2014/11/3-eso-tema-13-modelado-del-relieve.html>> [Consulta: 10 de octubre de 2016]

[11] Instituto de Tecnologías Educativas. *Temas de Ecología. Lección 4: el subsistema oceánico.* < [https://fjferrer.webs.ull.es/Apuntes3/Leccion04/4\\_circulacin\\_global\\_de\\_la\\_corriente\\_termohalina.html](https://fjferrer.webs.ull.es/Apuntes3/Leccion04/4_circulacin_global_de_la_corriente_termohalina.html) > [Consulta: 15 de noviembre de 2016]

[12] Garcia, L.F. (2004) *Introducción a la Oceanografía Física: caracterización de los movimientos de las aguas oceánicas.* Universidad de las Palmas de Gran Canaria. Departamento de Física. <[http://www2.ulpgc.es/hege/almacen/download/16/16268/BloqueF\\_IOF\\_0304\\_pd.pdf](http://www2.ulpgc.es/hege/almacen/download/16/16268/BloqueF_IOF_0304_pd.pdf)> [Consulta: 18 de noviembre de 2016]

[13] Glosario.net. *Definición de Termoclina*. < <http://ciencia.glosario.net/medio-ambiente-acuatico/termoclina-10464.html> > [Consulta: 30 de noviembre de 2016]

[14] Wikipedia. *Definición de Albedo*. < <https://es.wikipedia.org/wiki/Albedo> > [Consulta: 30 de noviembre de 2016]

[15] Marshall, J., Plumb Alan, R. (2008) *Atmosphere, Ocean, and Climate Dynamics: an introductory text*. Elsevier Academic Press, USA, UK, 345pp.

[16] Massachussets Institute of Technology. *Weather in a Tank*. <<http://paoc.mit.edu/labguide/>> [Consulta: 05 de mayo de 2016]

[17] Nadiga, B.T., Aurnou, J.M. (2008) A Tabletop Demostration of Atmospheric Dynamics. Baroclinic Instability. *Oceanography*, Volume 21, Number 4.

[18] Agard, V. (2009) *Analysis of the General Circulation of the Atmosphere Through Low- and Mid-Latitude Phenomena*. Massachussets Institute of Technology <[https://wikis.mit.edu/confluence/download/attachments/10986512/agard\\_general\\_circ.pdf](https://wikis.mit.edu/confluence/download/attachments/10986512/agard_general_circ.pdf)> [Consulta: 20 de noviembre de 2016]

#### VIDEOS:

[19] EUMETSAT, “A Year of Weather 2015” en Youtube <<https://www.youtube.com/watch?v=i4mBYwBNULk>> [Consulta: 22 de febrero de 2016]

[20] NASA, “A Year in the Life on Earth’s CO<sub>2</sub>” en Youtube <<https://www.youtube.com/watch?v=x1SgmFa0r04>> [Consulta: 22 de febrero de 2016]

[21] Massachussets Institute of Technology (MIT) “Weather in a tank” en Youtube <<https://www.youtube.com/watch?v=uWdKVpQ94Ns&t=100s>> [Consulta: 15 de octubre de 2016]

[22] WeatherInATank, “Weather in a Tank – Global Circulation – Hadley Regime – HR” en Youtube <<https://www.youtube.com/watch?v=olKFj6g-nPw>> [Consulta: 20 de octubre de 2016]

[23] MITgcm, “Differentially Heated Rotating Annulus Lab Expt I” en Youtube <<https://www.youtube.com/watch?v=lmNxEMv85IA>> [Consulta: 20 de octubre de 2016]

[24] WeatherInATank, “Weather in a Tank – Global Circulation – Hadley Regime (side view) HD” en Youtube <<https://www.youtube.com/watch?v=HbhpaUYgM2A>> [Consulta: 20 de octubre de 2016]

[25] WeatherInATank “Weather in a Tank – Global Circulation – Turbulent Regime Time Lapse” en Youtube <<https://www.youtube.com/watch?v=iFK8l3RNpfE>> [Consulta: 20 de octubre de 2016]

[26] CSDMSmovie “Global Circulation” en Youtube <<https://www.youtube.com/watch?v=qh011eAYjAA>> [Consulta: 20 de octubre de 2016]

[27] MIT OpenCourseWare “Experiment VIII: Hadley Circulation” en Youtube <<https://www.youtube.com/watch?v=7BcDOuJRUoo>> [Consulta: 22 de octubre de 2016]

[28] MIT OpenCourseWare “Experiment IX: Cylinder Collapse” en Youtube <<https://www.youtube.com/watch?v=DARyaierioc>> [Consulta: 22 de octubre de 2016]

[29] MIT OpenCourseWare “Experiment XI: Baroclinic Instability of the Thermal Wind (Eddies)” en Youtube <[https://www.youtube.com/watch?v=bkBG\\_QokUCY](https://www.youtube.com/watch?v=bkBG_QokUCY)> [Consulta: 22 de octubre de 2016]

[30] NASA Goddard “The Ocean: A Driving Force for Weather and Climate” en Youtube <<https://www.youtube.com/watch?v=6vgvTeuoDWY>> [Consulta: 30 de noviembre de 2016]