

JUAN CARLOS ORTIZ ROYERO

# INTRODUCCIÓN A LA OCEANOGRAFÍA FÍSICA

Notas de clase

**UN** UNIVERSIDAD  
DEL NORTE

Editorial



INTRODUCCIÓN A LA  
**OCEANOGRAFÍA FÍSICA**

---

NOTAS DE CLASE



INTRODUCCIÓN A LA  
**OCEANOGRAFÍA FÍSICA**

---

NOTAS DE CLASE

Juan Carlos Ortiz Royero

Barranquilla  
COLOMBIA, 2015

 **UNIVERSIDAD  
DEL NORTE**  
Editorial

Ortiz Royero, Juan Carlos.

Introducción a la oceanografía física: notas de clase / Juan Carlos Ortiz Royero. – Barranquilla, Col. : Editorial Universidad del Norte, 2015.

129 p. : il., col ; 24 cm.

Incluye referencias bibliográficas en cada capítulo.

ISBN 978-958-741-554-4 (impreso)

ISBN 978-958-741-555-1 (PDF)

1. Oceanografía. I. Tít.

(551.46 O77 23 ed.) (CO-BrUNB)



[www.uninorte.edu.co](http://www.uninorte.edu.co)

Km 5, vía a Puerto Colombia

A.A. 1569, Barranquilla (Colombia)

© 2015, Universidad del Norte

Juan Carlos Ortiz Royero

*Coordinación editorial*

Zoila Sotomayor O.

*Diseño y diagramación*

Munir Kharfan de los Reyes

*Diseño de portada*

Jorge Arena

*Corrección de textos*

Paula Grisales

Hecho en Colombia

*Made in Colombia*

© Reservados todos los derechos. Queda prohibida la reproducción total o parcial de esta obra, por cualquier medio reprográfico, fónico o informático así como su transmisión por cualquier medio mecánico o electrónico, fotocopias, microfilm, *offset*, mimeográfico u otros sin autorización previa y escrita de los titulares del *copyright*. La violación de dichos derechos puede constituir un delito contra la propiedad intelectual.

## AGRADECIMIENTOS

---

Deseo agradecer a mis tutores Jorge Capella y Aurelio Mercado, del Departamento de Ciencias Marinas de la Universidad de Puerto Rico, en Mayagüez, quienes fueron los encargados de mostrarme el maravilloso mundo de la física aplicada al océano.

Mis agradecimientos a la Universidad del Norte de mi ciudad natal, Barranquilla, por darme todo el apoyo necesario para desarrollar mis investigaciones y llevar a la realidad estas notas de clase.

Agradezco a mis colegas del área de Océano y Atmósfera del Grupo de Física Aplicada, con quienes he compartido conocimientos y experiencias, así como también a todos mis estudiantes por enriquecer cada semestre mi propio aprendizaje.

A mi esposa Heidy Patricia Mejía Ávila por su apoyo permanente y, por supuesto, a Dios por regalarme mi mayor inspiración y dos grandes tesoros: Daniela y Alejandra.





# CONTENIDO

---

PRÓLOGO.....	xiii
<b>CAPÍTULO 1. Introducción.....</b>	<b>1</b>
1.1 Algo de historia de la oceanografía física .....	3
Referencias .....	10
<b>CAPÍTULO 2. La atmósfera y el océano .....</b>	<b>12</b>
2.1 El esfuerzo del viento .....	17
2.2 El balance de energía térmica .....	19
2.3 Calor específico .....	23
2.4 Ejercicios.....	24
Referencias .....	24
<b>CAPÍTULO 3. Propiedades físicas del agua de mar.....</b>	<b>26</b>
3.1 Temperatura .....	27
3.2 Salinidad .....	30
3.3 Ejercicios.....	39
Referencias .....	40

<b>CAPÍTULO 4. Ecuaciones de movimiento</b> .....	41
4.1 Hipótesis del continuo .....	42
4.2 Fluidos ideales .....	43
4.3 Operadores diferenciales .....	45
4.4 Descripción euleriana y lagrangiana.....	46
4.5 Forzadores del movimiento .....	48
4.5.1 Gradiente de presión.....	50
4.5.2 La fuerza de Coriolis.....	51
4.5.3 La fricción molecular .....	53
4.6 Ecuaciones de Euler o de momentum .....	54
4.7 Ecuaciones de Reynolds.....	56
4.8 Análisis de escala.....	61
4.9 Vorticidad .....	63
4.10 Ejercicios.....	65
Referencias .....	66
<b>CAPÍTULO 5. Modelos de circulación</b> .....	67
5.1 Modelo inercial.....	68
5.2 Modelo Geostrófico.....	70
5.3 Cálculo de velocidades geostróficas usando estaciones hidrográficas.....	73
5.4 Modelo de Ekman .....	77
5.4.1 Transporte de Ekman .....	80
5.5 Modelo de Sverdrup.....	81
5.6 Modelo de Stommel .....	84
5.7 Modelo de Munk.....	86
5.8 Circulación profunda.....	89
5.9 Ejercicios.....	95
Referencias .....	96

<b>CAPÍTULO 6. Teoría de olas</b> .....	97
6.1 Teoría de pequeña amplitud o teoría lineal.....	99
6.2 Asomeramiento o Shoaling.....	103
6.3 Las mareas .....	113
6.3.1 Mareas semidiurnas .....	115
6.3.2 Mareas diurnas .....	115
6.3.3 Mareas mixtas .....	115
6.4 Corrientes de marea .....	116
6.5 Predicciones de la marea.....	117
6.6 Ondas largas .....	120
6.7 Ejercicios.....	123
Referencias .....	125

## LISTA DE FIGURAS

---

FIGURA 1	Imagen del buque <i>Challenger</i> . . . . .	1
FIGURA 2	Corriente del Golfo por Benjamín Franklin. . . . .	4
FIGURA 3	Expedición <i>Challenger</i> 1872-1876. . . . .	5
FIGURA 4.	Expedición <i>Nautilus</i> en 1931 (derecha) y Harald Sverdrup (izquierda). . . . .	6
FIGURA 5	Walter Munk (centro), nacido en Austria hizo unos aportes valiosos a la circulación y al oleaje. . . . .	6
FIGURA 6	Henry Stommel. . . . .	7
FIGURA 7	Fridtjof Nansen (izquierda) y Vagn Walfrid Ekman (derecha). . . . .	8
FIGURA 8	George B. Airy (izquierda) y George Stokes (derecha). . . . .	9
FIGURA 9	Mapa de anomalía de TSM en el océano Pacífico y su relación con El Niño Oscilación del Sur (ENOS). . . . .	12
FIGURA 10	Circulación atmosférica general. . . . .	14
FIGURA 11	Campo de vientos en Colombia (Sep. 18 de 2012). Las flechas rojas indican la dirección media de los alisios del Noreste. . . . .	15
FIGURA 12	Imagen infrarroja de nubosidad de noviembre de 2004 (el color rojo representa los valores más altos de humedad y precipitación). La ZCIT corresponde a la línea puntuada. . . . .	15
FIGURA 13	Variación mensual multianual de la precipitación en la costa Norte de Colombia (estación del aeropuerto Ernesto Cortizos de Barranquilla). . . . .	17
FIGURA 14.	Comparación de la cobertura de vientos vectoriales tomados del satélite <i>QuikSCAT/SeaWinds Scatterometer</i> y <i>ASCAT</i> . . . . .	18
FIGURA 15	Esquema del balance térmico en los océanos. . . . .	22
FIGURA 16	Distribución meridional de los flujos de calor. . . . .	23
FIGURA 17	Ilustración de la molécula de agua. . . . .	26
FIGURA 18	Distribución geográfica de la temperatura superficial de mar (TSM), promedio anual. . . . .	28
FIGURA 19	Distribución vertical de la temperatura del océano. . . . .	29
FIGURA 20	Distribución geográfica de la salinidad superficial del océano, promedio anual. . . . .	31
FIGURA 21	Distribución geográfica de la salinidad superficial en el Caribe y el Pacífico colombiano. . . . .	32
FIGURA 22	Distribución geográfica de la salinidad superficial en la zona costera del Caribe colombiano. . . . .	32
FIGURA 23	Distribución geográfica de la salinidad superficial. . . . .	33
FIGURA 24	Distribución vertical de la salinidad del océano. . . . .	34

## CONTENIDO

FIGURA 25	Temperatura in situ y $\Theta$ medida en la fosa Kermadec en el océano Pacífico. ....	35
FIGURA 26	Sección vertical de sigma- $\Theta$ en el océano Atlántico occidental. ....	36
FIGURA 27	Perfilador CTD. ....	37
FIGURA 28	Ejemplo de un diagrama T-S. ....	38
FIGURA 29	Imagen de antiguos navegantes. ....	41
FIGURA 30	Modelo de un fluido, considerando que está formado por partículas o parcelas de fluido. ....	43
FIGURA 31	Esquema del esfuerzo cortante de una capa de fluido sobre otro. . .	44
FIGURA 32	Líneas de flujo laminar y turbulento. ....	45
FIGURA 33	Descripción Lagrangiana y Euleriana para un campo de vientos superficiales en el Caribe colombiano. ....	47
FIGURA 34	Parcela de fluido en tres dimensiones bajo presión a lo largo del eje x. ....	50
FIGURA 35	Esquema de la Tierra en rotación. ....	52
FIGURA 36	Serie de tiempo del nivel del mar en el Golfo de Morrosquillo, en el Caribe colombiano (Universidad del Norte). ....	56
FIGURA 37	Cambios en la vorticidad relativa vinculados a la conservación de la vorticidad potencial, a) Si la columna de agua cambia de latitud y b) Si la columna cambia de forma. ....	64
FIGURA 38	Modelo de corrientes para la costa Este de EEUU. ....	67
FIGURA 39	Esquema del modelo inercial. ....	69
FIGURA 40	Corrientes inerciales en el Pacífico Norte detectadas en 1987 por boyas a la deriva de la NOAA. ....	70
FIGURA 41	Balance geostrófico. ....	71
FIGURA 42	Diagrama de cómo puede calcularse la corriente geostrófica superficial con el uso de altimetría. ....	72
FIGURA 43	Perfil de corrientes geostróficas, (a) para condiciones barotrópicas y (b) condiciones baroclínicas. ....	73
FIGURA 44	Geometría para calcular corrientes geostróficas usando dos estaciones hidrográficas A y B. ....	74
FIGURA 45	Perfil vertical de corrientes usando dos estaciones hidrográficas. . .	76
FIGURA 46	Espiral de Ekman, usando $U_{10} = 5$ m/s a una latitud de $10^\circ$ N y calculada hasta 200 m de profundidad. ....	79
FIGURA 47	Surgencia o afloramiento de Ekman. ....	81
FIGURA 48	Transporte de masa de acuerdo al modelo de Sverdrup. ....	83
FIGURA 49	Corrientes superficiales en la cuenca sin rotación o con rotación constante (izq.) y corrientes asumiendo plano $\beta$ (der.) ....	85
FIGURA 50	Representación de las corrientes superficiales bajo el modelo de Munk. ....	87
FIGURA 51	Representación de las principales corrientes superficiales en Sverdrup (Sv). ....	88

FIGURA 52	Corrientes superficiales del modelo HYCOM. . . . .	89
FIGURA 53	Los mares nórdicos del océano Atlántico. . . . .	91
FIGURA 54	Cinta transportadora. . . . .	92
FIGURA 55	Trayectorias del fluido abisal y circulación inferida por Stommel, 1948. . . . .	93
FIGURA 56	<i>Acosutic Doppler Current Profile</i> - ADCP (Universidad del Norte). . .	94
FIGURA 57	Dos formas de usar el ADCP. . . . .	94
FIGURA 58	Un tsunami ( <i>tsu</i> = ola , <i>nami</i> = puerto).. . . . .	97
FIGURA 59	Espectro de energía del oleaje en función de los forzadores y restauradores. . . . .	98
FIGURA 60	Esquema de la teoría lineal. . . . .	99
FIGURA 61	Gráfica de la función <i>tanh(kd)</i> . . . . .	102
FIGURA 62	Trayectorias de las partículas de fluido de acuerdo a la teoría lineal. . . . .	102
FIGURA 63	Efectos de difracción de olas en la entrada a la bahía de Cartagena en el Caribe colombiano. . . . .	103
FIGURA 64	Rotura de una ola y las diferentes zonas en el proceso de <i>shoaling</i> . . . . .	104
FIGURA 65	Espectro de P-M para un mar completamente desarrollado. . . . .	105
FIGURA 66	Tipo de rotura de acuerdo a la pendiente de la playa. . . . .	106
FIGURA 67	Corrientes inducidas por las olas. . . . .	108
FIGURA 68	Boya de la NDBC de NOAA. . . . .	110
FIGURA 69	Diferentes tipos de equipos de medición: sensores de presión CTD de aguas profundas y de aguas llanas (Universidad del Norte). . . . .	111
FIGURA 70	Contornos de altura significativa para la zona del delta del río Magdalena en el Caribe colombiano usando el modelo SMS, para el 09 de marzo de 2009. . . . .	112
FIGURA 71	Esquema de la formación de las mareas. . . . .	113
FIGURA 72	Marea semidiurna (San Vicente de la Barquera, España 11, 12 y 13 de . . . . .	114
FIGURA 73	Marea diurna (Veracruz, México 11 y 12 de noviembre de 2003)..	115
FIGURA 74	Marea mixta (Los Ángeles, EEUU 11, 12, 13 y 14 de noviembre de 2003) . . . . .	116
FIGURA 75	Modelación de corrientes de marea en California. . . . .	117
FIGURA 76	Análisis de armónicos para un punto en la bahía de Cartagena en el Caribe colombiano (Universidad del Norte). .	119
FIGURA 77	El Registro fotográfico de Tumaco en el Pacífico colombiano y de Puerto Colombia. . . . .	120
FIGURA 78	Esquema de una ola de aguas someras. . . . .	121
FIGURA 79	Esquema de una onda de Kelvin. . . . .	122

## PRÓLOGO

---

Esta obra pretende resumir algunas notas de clase de asignaturas como Oceanografía Básica, Oceanografía Física, Oceanografía Dinámica, Ondas Oceánicas y Dinámica Computacional de Fluidos Geofísicos, que he dictado en estos últimos diez años, tanto a nivel de pregrado como de postgrado. Estas notas se basan en algunas obras clásicas y ampliamente utilizadas en la comunidad internacional de la oceanografía física, publicadas por autores como Pickard y Emery; Pond y Pickard; Knauss, Müller, Young, y por la serie *Open University*; además del texto del profesor Robert Stewart, de la Universidad de Texas A&M, entre otras notas y apuntes publicados en Internet.

En mi experiencia docente, he notado que un buen porcentaje de los estudiantes principiantes que no dominan el idioma inglés presentan inconvenientes en su proceso de aprendizaje, debido a la escasa bibliografía impresa en español. En la mayoría de los programas de ciencias del mar es conveniente que los estudiantes tomen inicialmente la primera parte (Oceanografía Descriptiva) y, después, la segunda (Oceanografía Dinámica), pero algunos programas de postgrados solo incluyen un único curso de Oceanografía Física. Por esa razón, he preparado un material para una clase de Oceanografía Física, incorporando algunos elementos descriptivos y también dinámicos para alumnos de pregrado avanzado y principiantes a nivel de posgrado que no hayan tomado