



Determinación de los tiempos de residencia de las masas de agua en bahía Colombia, golfo de Urabá

Manuela Rendón Osorio

Trabajo de grado presentado para optar al título de Oceanógrafo

Director

Vladimir Giovanni Toro Valencia, Doctor (PhD) en Oceanografía Física

Asesores

Yuley Mildrey Cardona Orozco, Doctor (PhD) en Ciencias de la Tierra y la Atmósfera

Yubián Andrés Bedoya Henao, Físico

Universidad de Antioquia

Facultad de Ciencias Exactas y Naturales

Oceanografía

Turbo, Antioquia, Colombia

2024

Cita	(Rendón Osorio, 2024)
Referencia	Rendón Osorio, M. (2024). <i>Determinación de los tiempos de residencia de las masas de agua en bahía Colombia, golfo de Urabá.</i> [Trabajo de grado profesional]. Universidad de Antioquia, Turbo, Colombia.
Estilo APA 7 (2020)	



Corporación Académica Ambiental (CAA).



Biblioteca Sede Ciencias del Mar (Turbo)

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Dedicatoria

Dedicada con profundo amor y gratitud a mi madre, Olga Lucía Osorio, y a mi padre, Jairo Rendón Jaramillo. A ustedes les agradezco de todo corazón por estar siempre a mi lado, apoyarme incondicionalmente en este importante paso de mi vida y por nunca dejarme sola.

Gracias por creer en mí y por ser mis guías y pilares. Este logro es también de ustedes, porque su amor y apoyo han sido fundamentales en este camino.

Agradecimientos

En primer lugar, me gustaría expresar mi profunda gratitud a Dios y a mi familia, quienes han sido mi mayor apoyo durante este viaje. A mi padre, Jairo Rendón, y a mi madre, Olga Lucia Osorio, les estoy eternamente agradecida por su amor incondicional, su cariño y su incansable esfuerzo por brindarme todo lo que necesitaba. Gracias a mi hermano, Santiago Rendón, por ser una fuente constante de motivación y por apoyarme en los momentos más difíciles.

Quiero extender un sincero agradecimiento a mis compañeros de la Universidad por compartir este proceso conmigo. Juntos, hemos vivido risas, frustraciones, retos y muchas otras experiencias que nos han unido. Su apoyo ha sido invaluable.

Mi más sincero reconocimiento al profesor Yubian A. Bedoya, quien me ha brindado su respaldo en cada paso del camino y ha sido un compañero excepcional en este viaje hacia el logro académico. Estoy profundamente agradecida con mi director de tesis, el profesor Vladimir G. Toro, por su guía y acompañamiento durante todo el proceso. Su experiencia y conocimientos han sido fundamentales para alcanzar este objetivo en mi vida. También quisiera agradecer a la profesora Yuley M. Cardona por su asesoría y contribución invaluable a mi trabajo de grado.

Finalmente, expreso mi gratitud a la Universidad de Antioquia por la formación recibida y al Proyecto PIMECLA "Programa Integral para el Monitoreo y Mitigación de la erosión Costera en el Litoral Antioqueño", liderado por el DAGRAN y la Universidad de Antioquia, por brindarme la oportunidad de realizar mi trabajo de grado.

Tabla de contenido

Resumen.....	13
Abstract.....	14
1. Introducción	15
2. Objetivos	18
2.1. Objetivo general.....	18
2.2. Objetivos específicos	18
3. Área de Estudio y Metodología.....	19
3.1. Área de estudio	19
3.2. Identificación de las masas de agua	20
3.3. Modelación numérica.....	21
3.3.1. Modelo CROCO	21
3.3.1.1 Patrones de circulación.....	22
3.4. Calculo del Tiempo de residencia (TR)	23
3.4.1. Modelo OpenDrift.....	24
4.1. Masas de agua.....	26
4.1.1. Datos <i>in situ</i>	26
4.1.2. Comparación de los datos <i>in situ</i> y el modelo numérico	27
4.2. Patrones de circulación en bahía Colombia.....	29
4.2.1 Patrones de circulación multianual y mensual multianual.....	29
4.2.2. Patrones de circulación mensual estacional en la capa superficial.....	33
4.2.2.1. Época seca.....	33
4.2.2.2. Época húmeda	34
4.2.3. Patrones de circulación mensual estacional en la capa de fondo	36
4.2.3.1. Época seca.....	36

4.2.3.2. Época húmeda	37
4.3. Trayectorias de las masas de agua	38
4.3.1. Trayectorias en la capa superficial	38
4.3.1.1 Época seca.....	38
4.3.1.2. Época húmeda	39
4.3.2. Trayectorias en la capa de fondo.....	40
4.3.2.1 Época seca.....	40
4.3.2.2. Época húmeda	40
4.4. Tiempo de residencia (TR).....	41
4.4.1. Tiempo de residencia en la capa superficial (TRS).....	43
4.4.2. Tiempo de residencia en la capa de fondo (TRF)	47
5. Conclusiones	51
6. Recomendaciones	54
Referencias.....	55
Anexos	59

Lista de tablas

- Tabla 1** Tiempo de residencia (días) para el 80% del volumen de agua evacuada en bahía Colombia, para la capa superficial (superficie a 5 m), para el periodo comprendido entre 2011 y 2018. Los valores se encuentran codificados por colores: 0 a 20 días (azul), 20 a 30 días (verde), y superiores a 30 días (rojo)..... 46
- Tabla 2** Tiempo de residencia (porcentaje) del volumen de agua en bahía Colombia, en la capa superficial (superficie a 5 m), para el periodo comprendido entre 2011 y 2018. Los valores se encuentran codificados por colores: mayor a 80% (azul), y menor a 80% (rojo). 47
- Tabla 3** Tiempo de residencia (días) para el 80% del volumen de agua evacuada en bahía Colombia, para la capa de fondo (5 m a fondo), para el periodo comprendido entre 2011 y 2018. Los valores se encuentran codificados por colores: 0 a 20 días (azul), 20 a 30 días (verde), y superiores a 30 días (rojo)..... 49
- Tabla 4** Tiempo de residencia (porcentaje) del volumen de agua en bahía Colombia, en la capa de fondo (5 m a fondo), para el periodo comprendido entre 2011 y 2018. Los valores se encuentran codificados por colores: mayor a 80% (azul), y menor a 80% (rojo)..... 50

Lista de figuras

- Figura 1** Zona de estudio. Golfo de Urabá y bahía Colombia 19
- Figura 2** Distribución inicial de partículas en bahía Colombia..... 25
- Figura 3** Diagrama de dispersión de temperatura vs salinidad (curva T-S) a partir de datos *in situ* recopilados en bahía Colombia. Campañas realizadas el 13/07/2017, 23/06/2022 y 03/09/2022. 26
- Figura 4** Diagramas de dispersión de temperatura vs salinidad (curva T-S) a partir de datos *in situ* (puntos en tonos rojos-amarillos) y resultados de un modelo numérico (puntos en tonos verde-azules) en bahía Colombia durante las campañas oceanográficas realizadas en las fechas 13/07/2017, 23/06/2022 y 03/09/2022. a) 2011, b) 2012, c) 2013, d) 2014, e) 2015, f) 2016, g) 2017, h) 2018. 28
- Figura 5** Campos de velocidad de las corrientes marinas multianuales en bahía Colombia, para el periodo 2011 a 2018. a) Capa superficial integrada desde la superficie hasta 5 m de profundidad. b) Integración de la columna de agua desde los 5 m de profundidad hasta el fondo. Las flechas indican la dirección y la escala de colores representa la magnitud de las velocidades (cm/s) 30
- Figura 6** Campos de velocidad de las corrientes marinas mensuales multianuales en bahía Colombia, para el periodo 2011 a 2018 en la capa superficial integrada desde la superficie hasta 5 m de profundidad. a) enero, b) febrero, c) marzo, d) abril, e) mayo, f) junio, g) julio, h) agosto, i) septiembre, j) octubre, k) noviembre y l) diciembre. Las flechas indican la dirección y la escala de colores representa la magnitud de las velocidades (cm/s). 31
- Figura 7** Campos de velocidad de las corrientes marinas mensuales multianuales en bahía Colombia, para el periodo 2011 a 2018 en la capa integrada desde los 5 m de profundidad hasta el fondo. a) enero, b) febrero, c) marzo, d) abril, e) mayo, f) junio, g) julio, h) agosto, i) septiembre, j) octubre, k) noviembre y l) diciembre. Las flechas indican la dirección y la escala de colores representa la magnitud de las velocidades (cm/s). 32
- Figura 8** Campos de velocidad de las corrientes marinas mensuales de febrero en bahía Colombia, obtenidos mediante modelación numérica en la capa superficial integrada desde la superficie hasta 5 m de profundidad para los años: a) 2011, b) 2012, c) 2013, d) 2014, e) 2015, f) 2016, g) 2017, h) 2018. Las flechas indican la dirección y la escala de colores representa la magnitud de las velocidades (cm/s). 34
- Figura 9** Campos de velocidad de las corrientes marinas mensuales de octubre en bahía Colombia, obtenidos mediante modelación numérica en la capa superficial integrada desde la superficie hasta 5 m de profundidad para los años: a) 2011, b) 2012, c) 2013, d) 2014, e) 2015, f) 2016, g) 2017, h) 2018. Las flechas indican la dirección y la escala de colores representa la magnitud de las velocidades (cm/s). 35
- Figura 10** Campos de velocidad de las corrientes marinas mensuales de febrero en bahía Colombia, obtenidos mediante modelación numérica en la capa integrada desde los 5 m de profundidad hasta el fondo para los años: a) 2011, b) 2012, c) 2013, d) 2014, e) 2015, f) 2016, g) 2017, h) 2018. Las

flechas indican la dirección y la escala de colores representa la magnitud de las velocidades (cm/s).
 36

Figura 11 Campos de velocidad de las corrientes marinas mensuales de octubre en bahía Colombia, obtenidos mediante modelación numérica en la capa integrada desde los 5 m de profundidad hasta el fondo para los años: a) 2011, b) 2012, c) 2013, d) 2014, e) 2015, f) 2016, g) 2017, h) 2018. Las flechas indican la dirección y la escala de colores representa la magnitud de las velocidades (cm/s). 37

Figura 12 Trayectorias lagrangianas de partículas superficiales simuladas durante el mes de febrero en bahía Colombia, integradas en una capa de 5 m de espesor sobre la superficie libre, para los años: a) 2011, b) 2012, c) 2013, d) 2014, e) 2015, f) 2016, g) 2017, h) 2018. 39

Figura 13 Trayectorias lagrangianas de partículas superficiales simuladas durante el mes de octubre en bahía Colombia, integradas en una capa de 5 m de espesor sobre la superficie libre, para los años: a) 2011, b) 2012, c) 2013, d) 2014, e) 2015, f) 2016, g) 2017, h) 2018. 39

Figura 14 Trayectorias lagrangianas de partículas de fondo simuladas durante el mes de febrero en bahía Colombia, integradas en una capa de 5 m hasta el fondo, para los años: a) 2011, b) 2012, c) 2013, d) 2014, e) 2015, f) 2016, g) 2017, h) 2018. 40

Figura 15 Trayectorias lagrangianas de partículas de fondo simuladas durante el mes de octubre en bahía Colombia, integradas en una capa de 5 m hasta el fondo, para los años: a) 2011, b) 2012, c) 2013, d) 2014, e) 2015, f) 2016, g) 2017, h) 2018. 41

Figura 16 Fracción de volumen remanente de partículas vs tiempo. Comparación entre simulaciones con promedios horarios (línea roja) y promedios diarios (línea negra) de las salidas del modelo CROCO, para el período junio 2011 - febrero 2012, considerando la capa superficial (0-5 m) de bahía Colombia. 42

Figura 17 Fracción de volumen remanente de partículas vs tiempo. Comparación entre simulaciones con promedios horarios (línea roja) y promedios diarios (línea negra) de las salidas del modelo CROCO, para el período junio 2011 - febrero 2012, considerando la capa de fondo (5-25 m aprox.) de bahía Colombia. 43

Figura 18 Fracción de volumen (tiempo de residencia promedio) en función del tiempo (30 días) para la capa superficial (superficie a 5 m), obtenido a partir de simulaciones lagrangianas durante el período 2011-2018. Cada panel muestra la evolución del respectivo mes para cada uno de los años. Las líneas discontinuas representan la media (μ) y la franja gris una desviación estándar ($\mu \pm \sigma$) del conjunto de simulaciones. 44

Figura 19 Fracción de volumen (tiempo de residencia promedio) en función del tiempo (30 días) para la capa de fondo (5 m al fondo), obtenido a partir de simulaciones lagrangianas durante el período 2011-2018. Cada panel muestra la evolución del respectivo mes para cada uno de los años. Las líneas discontinuas representan la media (μ) y la franja gris una desviación estándar ($\mu \pm \sigma$) del conjunto de simulaciones. 48

Lista de anexos

- Anexo 1** Campos de velocidad de las corrientes marinas mensuales de enero en bahía Colombia, obtenidos mediante modelación numérica en la capa superficial integrada desde la superficie hasta 5 m de profundidad para los años: **a)** 2011, **b)** 2012, **c)** 2013, **d)** 2014, **e)** 2015, **f)** 2016, **g)** 2017, **h)** 2018. Las flechas indican la dirección y la escala de colores representa la magnitud de las velocidades (cm/s). 59
- Anexo 2** Campos de velocidad de las corrientes marinas mensuales de enero en bahía Colombia, obtenidos mediante modelación numérica en la capa integrada desde los 5 m de profundidad hasta el fondo para los años: **a)** 2011, **b)** 2012, **c)** 2013, **d)** 2014, **e)** 2015, **f)** 2016, **g)** 2017, **h)** 2018. Las flechas indican la dirección y la escala de colores representa la magnitud de las velocidades (cm/s). 60
- Anexo 3** Campos de velocidad de las corrientes marinas mensuales de marzo en bahía Colombia, obtenidos mediante modelación numérica en la capa superficial integrada desde la superficie hasta 5 m de profundidad para los años: **a)** 2011, **b)** 2012, **c)** 2013, **d)** 2014, **e)** 2015, **f)** 2016, **g)** 2017, **h)** 2018. Las flechas indican la dirección y la escala de colores representa la magnitud de las velocidades (cm/s). 61
- Anexo 4** Campos de velocidad de las corrientes marinas mensuales de marzo en bahía Colombia, obtenidos mediante modelación numérica en la capa integrada desde los 5 m de profundidad hasta el fondo para los años: **a)** 2011, **b)** 2012, **c)** 2013, **d)** 2014, **e)** 2015, **f)** 2016, **g)** 2017, **h)** 2018. Las flechas indican la dirección y la escala de colores representa la magnitud de las velocidades (cm/s). 62
- Anexo 5** Campos de velocidad de las corrientes marinas mensuales de abril en bahía Colombia, obtenidos mediante modelación numérica en la capa superficial integrada desde la superficie hasta 5 m de profundidad para los años: **a)** 2011, **b)** 2012, **c)** 2013, **d)** 2014, **e)** 2015, **f)** 2016, **g)** 2017, **h)** 2018. Las flechas indican la dirección y la escala de colores representa la magnitud de las velocidades (cm/s). 63
- Anexo 6** Campos de velocidad de las corrientes marinas mensuales de abril en bahía Colombia, obtenidos mediante modelación numérica en la capa integrada desde los 5 m de profundidad hasta el fondo para los años: **a)** 2011, **b)** 2012, **c)** 2013, **d)** 2014, **e)** 2015, **f)** 2016, **g)** 2017, **h)** 2018. Las flechas indican la dirección y la escala de colores representa la magnitud de las velocidades (cm/s). 64
- Anexo 7** Campos de velocidad de las corrientes marinas mensuales de mayo en bahía Colombia, obtenidos mediante modelación numérica en la capa superficial integrada desde la superficie hasta 5 m de profundidad para los años: **a)** 2011, **b)** 2012, **c)** 2013, **d)** 2014, **e)** 2015, **f)** 2016, **g)** 2017, **h)** 2018. Las flechas indican la dirección y la escala de colores representa la magnitud de las velocidades (cm/s). 65

Anexo 8 Campos de velocidad de las corrientes marinas mensuales de mayo en bahía Colombia, obtenidos mediante modelación numérica en la capa integrada desde los 5 m de profundidad hasta el fondo para los años: **a)** 2011, **b)** 2012, **c)** 2013, **d)** 2014, **e)** 2015, **f)** 2016, **g)** 2017, **h)** 2018. Las flechas indican la dirección y la escala de colores representa la magnitud de las velocidades (cm/s).
..... 66

Anexo 9 Campos de velocidad de las corrientes marinas mensuales de junio en bahía Colombia, obtenidos mediante modelación numérica en la capa superficial integrada desde la superficie hasta 5 m de profundidad para los años: **a)** 2011, **b)** 2012, **c)** 2013, **d)** 2014, **e)** 2015, **f)** 2016, **g)** 2017, **h)** 2018. Las flechas indican la dirección y la escala de colores representa la magnitud de las velocidades (cm/s).
..... 67

Anexo 10 Campos de velocidad de las corrientes marinas mensuales de junio en bahía Colombia, obtenidos mediante modelación numérica en la capa integrada desde los 5 m de profundidad hasta el fondo para los años: **a)** 2011, **b)** 2012, **c)** 2013, **d)** 2014, **e)** 2015, **f)** 2016, **g)** 2017, **h)** 2018. Las flechas indican la dirección y la escala de colores representa la magnitud de las velocidades (cm/s).
..... 68

Anexo 11 Campos de velocidad de las corrientes marinas mensuales de julio en bahía Colombia, obtenidos mediante modelación numérica en la capa superficial integrada desde la superficie hasta 5 m de profundidad para los años: **a)** 2011, **b)** 2012, **c)** 2013, **d)** 2014, **e)** 2015, **f)** 2016, **g)** 2017, **h)** 2018. Las flechas indican la dirección y la escala de colores representa la magnitud de las velocidades (cm/s).
..... 69

Anexo 12 Campos de velocidad de las corrientes marinas mensuales de julio en bahía Colombia, obtenidos mediante modelación numérica en la capa integrada desde los 5 m de profundidad hasta el fondo para los años: **a)** 2011, **b)** 2012, **c)** 2013, **d)** 2014, **e)** 2015, **f)** 2016, **g)** 2017, **h)** 2018. Las flechas indican la dirección y la escala de colores representa la magnitud de las velocidades (cm/s).
..... 70

Anexo 13 Campos de velocidad de las corrientes marinas mensuales de agosto en bahía Colombia, obtenidos mediante modelación numérica en la capa superficial integrada desde la superficie hasta 5 m de profundidad para los años: **a)** 2011, **b)** 2012, **c)** 2013, **d)** 2014, **e)** 2015, **f)** 2016, **g)** 2017, **h)** 2018. Las flechas indican la dirección y la escala de colores representa la magnitud de las velocidades (cm/s).
..... 71

Anexo 14 Campos de velocidad de las corrientes marinas mensuales de agosto en bahía Colombia, obtenidos mediante modelación numérica en la capa integrada desde los 5 m de profundidad hasta el fondo para los años: **a)** 2011, **b)** 2012, **c)** 2013, **d)** 2014, **e)** 2015, **f)** 2016, **g)** 2017, **h)** 2018. Las flechas indican la dirección y la escala de colores representa la magnitud de las velocidades (cm/s).
..... 72

Anexo 15 Campos de velocidad de las corrientes marinas mensuales de septiembre en bahía Colombia, obtenidos mediante modelación numérica en la capa superficial integrada desde la superficie hasta 5 m de profundidad para los años: **a)** 2011, **b)** 2012, **c)** 2013, **d)** 2014, **e)** 2015, **f)** 2016, **g)** 2017, **h)** 2018. Las flechas indican la dirección y la escala de colores representa la magnitud de las velocidades (cm/s).
..... 73

-
- Anexo 16** Campos de velocidad de las corrientes marinas mensuales de septiembre en bahía Colombia, obtenidos mediante modelación numérica en la capa integrada desde los 5 m de profundidad hasta el fondo para los años: **a)** 2011, **b)** 2012, **c)** 2013, **d)** 2014, **e)** 2015, **f)** 2016, **g)** 2017, **h)** 2018. Las flechas indican la dirección y la escala de colores representa la magnitud de las velocidades (cm/s)..... 74
- Anexo 17** Campos de velocidad de las corrientes marinas mensuales de noviembre en bahía Colombia, obtenidos mediante modelación numérica en la capa superficial integrada desde la superficie hasta 5 m de profundidad para los años: **a)** 2011, **b)** 2012, **c)** 2013, **d)** 2014, **e)** 2015, **f)** 2016, **g)** 2017, **h)** 2018. Las flechas indican la dirección y la escala de colores representa la magnitud de las velocidades (cm/s)..... 75
- Anexo 18** Campos de velocidad de las corrientes marinas mensuales de noviembre en bahía Colombia, obtenidos mediante modelación numérica en la capa integrada desde los 5 m de profundidad hasta el fondo para los años: **a)** 2011, **b)** 2012, **c)** 2013, **d)** 2014, **e)** 2015, **f)** 2016, **g)** 2017, **h)** 2018. Las flechas indican la dirección y la escala de colores representa la magnitud de las velocidades (cm/s)..... 76
- Anexo 19** Campos de velocidad de las corrientes marinas mensuales de diciembre en bahía Colombia, obtenidos mediante modelación numérica en la capa superficial integrada desde la superficie hasta 5 m de profundidad para los años: **a)** 2011, **b)** 2012, **c)** 2013, **d)** 2014, **e)** 2015, **f)** 2016, **g)** 2017, **h)** 2018. Las flechas indican la dirección y la escala de colores representa la magnitud de las velocidades (cm/s)..... 77
- Anexo 20** Campos de velocidad de las corrientes marinas mensuales de diciembre en bahía Colombia, obtenidos mediante modelación numérica en la capa integrada desde los 5 m de profundidad hasta el fondo para los años: **a)** 2011, **b)** 2012, **c)** 2013, **d)** 2014, **e)** 2015, **f)** 2016, **g)** 2017, **h)** 2018. Las flechas indican la dirección y la escala de colores representa la magnitud de las velocidades (cm/s)..... 78
- Anexo 21** Trayectorias lagrangianas de partículas superficiales simuladas durante el mes de marzo en bahía Colombia, integradas en una capa de 5 m de espesor sobre la superficie libre, para los años: a) 2011, b) 2012, c) 2013, d) 2014, e) 2015, f) 2016, g) 2017, h) 2018..... 79
- Anexo 22** Trayectorias lagrangianas de partículas de fondo simuladas durante el mes de marzo en bahía Colombia, integradas en una capa de 5 m hasta el fondo, para los años: a) 2011, b) 2012, c) 2013, d) 2014, e) 2015, f) 2016, g) 2017, h) 2018. 79
- Anexo 23** Trayectorias lagrangianas de partículas superficiales simuladas durante el mes de septiembre en bahía Colombia, integradas en una capa de 5 m de espesor sobre la superficie libre, para los años: a) 2011, b) 2012, c) 2013, d) 2014, e) 2015, f) 2016, g) 2017, h) 2018..... 80
- Anexo 24** Trayectorias lagrangianas de partículas de fondo simuladas durante el mes de septiembre en bahía Colombia, integradas en una capa de 5 m hasta el fondo, para los años: a) 2011, b) 2012, c) 2013, d) 2014, e) 2015, f) 2016, g) 2017, h) 2018. 80

Resumen

Los tiempos de residencia de las masas de agua oceánicas son información fundamental para el entendimiento de procesos biológicos y químicos. Este tipo de información es estratégica en cuerpos de agua semicerrados. Este estudio tuvo como objetivo determinar los tiempos de residencia de las masas de agua en bahía Colombia, ubicada en el Golfo de Urabá, mediante el análisis de mediciones *in situ* y el análisis de información de modelos numéricos hidrodinámicos. En este lugar se definieron dos masas de aguas: la capa superficial de agua dulce a salobre y la capa de fondo salina. Se analizaron los patrones de circulación en la bahía utilizando las salidas del modelo CROCO para el período 2011-2018. Los resultados revelaron la presencia de un giro anticiclónico persistente, con mayores velocidades en la capa superficial durante la época seca debido al campo de vientos alisios. En la época húmeda, las corrientes superficiales mostraron un flujo saliente influenciado por el aumento del caudal del río Atrato y los vientos del sur más débiles. Las trayectorias de las masas de agua se analizaron mediante simulaciones lagrangianas empleando el modelo OpenDrift. Durante la época seca, las trayectorias superficiales mostraron una distribución por todo el golfo antes de la salida, mientras que en la época húmeda tendieron a salir por el este de la bahía. Los tiempos de residencia se calcularon aplicando un enfoque lagrangiano de seguimiento de partículas. En la capa superficial, los tiempos de residencia fueron menores durante la época húmeda, con valores inferiores a 20 días en la mayoría de los meses, siendo octubre el mes con el tiempo más bajo de 10,5 días. En la época seca, los tiempos de residencia fueron más variables, con febrero y marzo superando los 30 días. En la capa de fondo, los tiempos de residencia fueron más bajos durante la época seca (menores a 30 días) y más altos durante la época húmeda (mayores a 30 días). Los resultados sugieren que los tiempos de residencia en Bahía Colombia están influenciados por factores estacionales, como los vientos, la circulación oceánica, los aportes fluviales y la profundidad de la columna de agua, con patrones consistentes a lo largo de los años estudiados.

Palabras clave: masas de agua, hidrodinámica, tiempo de residencia, bahía Colombia, CROCO, OpenDrift.

Abstract

The residence times of ocean water masses are fundamental information for understanding biological and chemical processes. This type of information is strategic in semi-enclosed water bodies. This study aimed to determine the residence times of water masses in Bahía Colombia, located in the Gulf of Urabá, through the analysis of in-situ measurements and the analysis of information from hydrodynamic numerical models. In this place, two water masses were defined: the surface freshwater to brackish layer and the saline bottom layer. The circulation patterns in the bay were analyzed using the outputs of the CROCO model for the period 2011-2018. The results revealed the presence of a persistent anticyclonic gyre, with higher speeds in the surface layer during the dry season due to the trade wind field. In the wet season, the surface currents showed an outgoing flow influenced by the increased flow of the Atrato River and weaker southerly winds. The trajectories of the water masses were analyzed through Lagrangian simulations using the OpenDrift model. During the dry season, the surface trajectories showed a distribution throughout the gulf before exiting, while in the wet season they tended to exit through the east of the bay. The residence times were calculated by applying a Lagrangian particle tracking approach. In the surface layer, the residence times were lower during the wet season, with values below 20 days in most months, with October having the lowest time of 10.5 days. In the dry season, the residence times were more variable, with February and March exceeding 30 days. In the bottom layer, the residence times were lower during the dry season (less than 30 days) and higher during the wet season (greater than 30 days). The results suggest that the residence times in Bahía Colombia are influenced by seasonal factors, such as winds, ocean circulation, river inputs, and the depth of the water column, with consistent patterns throughout the years studied.

Keywords: water masses, hydrodynamics, residence time, Bahía Colombia, CROCO, OpenDrift

1. Introducción

Los fenómenos que modulan el intercambio de masas de agua en el océano son atribuidos principalmente a forzadores físicos como las corrientes, oleaje, mareas y viento. Este intercambio de agua en zonas oceánicas y costeras tiene implicaciones sociales, ambientales y económicas. Por lo tanto, se hace indispensable el estudio de la circulación oceánica para el entendimiento de los procesos de intercambio (Mosquera & Barrientos, 2019).

Por lo tanto, es necesario entender la hidrodinámica regional y local, ya que esta determina los patrones de circulación que influyen en algunos procesos físicos y biológicos, asociados al movimiento de la masa de agua (Mosquera & Barrientos, 2019). El transporte de sedimentos en superficie y fondo, de los contaminantes de las aguas servidas de municipios de la región y ribereños, del plancton entre otros, son procesos que dependen del patrón de corrientes.

Existen diversos estudios que proponen entender estos patrones de circulación mediante métodos de trazabilidad, como el aplicado por Molina *et al.* (1992) y Chevillot *et al.* (1993). De igual manera se han desarrollado estudios que han usado modelos numéricos para el entendimiento de estos patrones (Roldán, 2008; Kenov *et al.*, 2012; Escobar *et al.*, 2015; Liu, 2018; Cucco & Umgiesser, 2006). En general sus resultados permiten el análisis de procesos físicos, químicos y biológicos. La importancia de comprender la circulación de un cuerpo de agua marino radica, entre otras cosas, en la posibilidad de evaluar el recambio de agua (el tiempo de residencia, TR) existente en el sistema, ya que, en función de esto, se logran identificar zonas donde el recambio es mínimo, indicando así lugares propensos a deteriorarse por contaminación u otros factores que dependan del recambio de agua.

El TR se utiliza como indicador de cuánto tiempo permanecerá una sustancia en un estuario, puerto o laguna. Sin embargo, el concepto de escala de tiempo propuesto para caracterizar los procesos de transporte de agua no tiene un nombre y una definición únicos (Monsen *et al.*, 2002). Se pueden encontrar diferentes términos para identificar escalas de tiempo, como tiempo de residencia, edad, tiempo de descarga, tiempo de rotación y tiempo transitorio.

El TR permite analizar las características de diferentes cuerpos de agua (Kenov *et al.*, en 2012). El TR puede definirse como el tiempo medio necesario para que en un dominio se renueve su volumen de agua. Dado que dicho intercambio regula la acumulación de sustancias, el TR está

claramente relacionado con la calidad del agua y de los sedimentos de las masas de agua (Takeoka, 1984; Gómez-Gesteira *et al.*, 2003; Orfila *et al.*, 2005).

El TR es un concepto importante para establecer la salud de un cuerpo de agua sometido a tensiones inducidas por el hombre (Wolanski, 2007). En general, los cuerpos de agua con un TR corto experimentan menos problemas de calidad del agua porque los contaminantes pasan menos tiempo en el sistema y habría una baja probabilidad de que se depositen o sean incorporados en los sedimentos. Por esta razón, el TR se utiliza a menudo para comparar la calidad de las masas de agua.

Un ejemplo particular, es el estudio de los tiempos de residencia de las masas de agua, realizado por Du & Shen (2016) en la bahía de Chesapeake. Empleando trazadores como partículas inmersas en el flujo, descubrieron que los tiempos de residencia fueron mayores en las capas inferiores que en las capas superficiales de la bahía de Chesapeake debido a la persistente estratificación y circulación estuarina.

En otro estudio realizado por Kenov *et al.* (2012), se determinaron los tiempos de residencia del agua en el estuario de Mondego (Portugal), donde se encontró que la entrada de agua dulce en la superficie es el factor principal que influye en el TR. El análisis del TR se realizó mediante el cálculo del intercambio de agua entre cajas dentro del estuario, destacando el caudal de un río como el principal contribuyente a la renovación del agua del estuario.

Las metodologías para calcular el TR no solo se basan en el análisis de mediciones *in situ* sino también en el uso de modelos numéricos. Estos son una herramienta útil para simular la hidrodinámica de estuarios, lagunas y puertos, y otros cuerpos de agua, considerando los efectos combinados de la marea, los campos de vientos, descargas de agua dulce y otros factores.

En la literatura existen varios ejemplos de uso de resultados de modelos numéricos para el cálculo de TR (Braunschweig *et al.*, 2003; Choi & Lee, 2004; Cucco & Umgiesser, 2006, Cucco *et al.*, 2009). En este trabajo se utilizó el modelo numérico CROCO, el cual permite simular procesos hidrodinámicos en dominios regionales y locales, permitiendo la interacción entre mallas de diferente resolución espacial (Mosquera & Barrientos, 2019). De manera particular los análisis se realizaron en la zona sur del golfo de Urabá, llamada bahía Colombia.

Bahía Colombia es un cuerpo de agua semicerrado con una porción abierta a la parte media del golfo de Urabá y modulado por la descarga algunas bocas del río Atrato. Según Roldán (2008), bahía Colombia es el principal sistema oceánico del golfo. A nivel económico, su importancia

radica en el lugar de salida del principal producto de exportación de la región, que es el banano. Esta economía ha permitido el florecimiento de las ciudades circundantes y el desarrollo de propuesta portuarias como Puerto Antioquia.

Los patrones generales de circulación en bahía Colombia pueden repercutir sobre actividades de ingeniería, manejo de contaminantes orgánicos, estudios asociados a olas y mareas y problemas de erosión costera (Gobernación de Antioquia [Gob.ANT], Universidad de Antioquia [UdeA], Universidad Nacional [UNAL], Universidad del Norte [UNINORTE], 2021). Bahía Colombia al ser un cuerpo de agua con aporte del caudal de los ríos León y Atrato, se hace indispensable identificar el recambio de sus masas de agua por la tendencia de este cuerpo a estar influenciado por grandes cantidades de nutrientes y contaminantes (Montoya, 2010). Teniendo en cuenta lo anterior, es necesario entender el comportamiento de las masas de agua de bahía Colombia, con el fin de caracterizar el tipo de circulación que predomina y la determinación de los TR de cada una de sus masas de agua.

Con el fin de identificar los TR en bahía Colombia, se analizaron las salidas del modelo numérico CROCO implementado en el proyecto “Influencia de las condiciones ambientales en la hidrodinámica del golfo de Urabá” entre el año 2011 y 2018, previamente validado con datos *in situ* por Bedoya Henao (2023). Con estos insumos se identificaron sus masas de agua. Posteriormente, utilizando las salidas generadas por el modelo CROCO se realizaron simulaciones con el modelo OpenDrift y se determinaron las trayectorias de las partículas y con esto el cálculo del TR de las masas de agua.

Como hipótesis se planteó que los TR en bahía Colombia están principalmente modulados por el campo de viento, presentando valores más altos durante la época seca, cuando predominan los vientos alisios del norte y noreste. Y valores más bajos durante la época climática húmeda, cuando predominan los vientos del sur y del suroeste.

2. Objetivos

2.1. Objetivo general

Caracterizar los tiempos de residencia de las masas de agua en bahía Colombia, golfo de Urabá, a partir de mediciones *in situ* y resultados de un modelo numérico.

2.2. Objetivos específicos

Identificar las principales características de las masas de agua en la zona de bahía Colombia.

Caracterizar la hidrodinámica de bahía Colombia en diferentes escalas temporales a partir de mediciones y modelo numérico.

Estimar las posibles trayectorias y tiempos de residencia de las masas de agua en bahía Colombia mediante simulaciones numéricas.

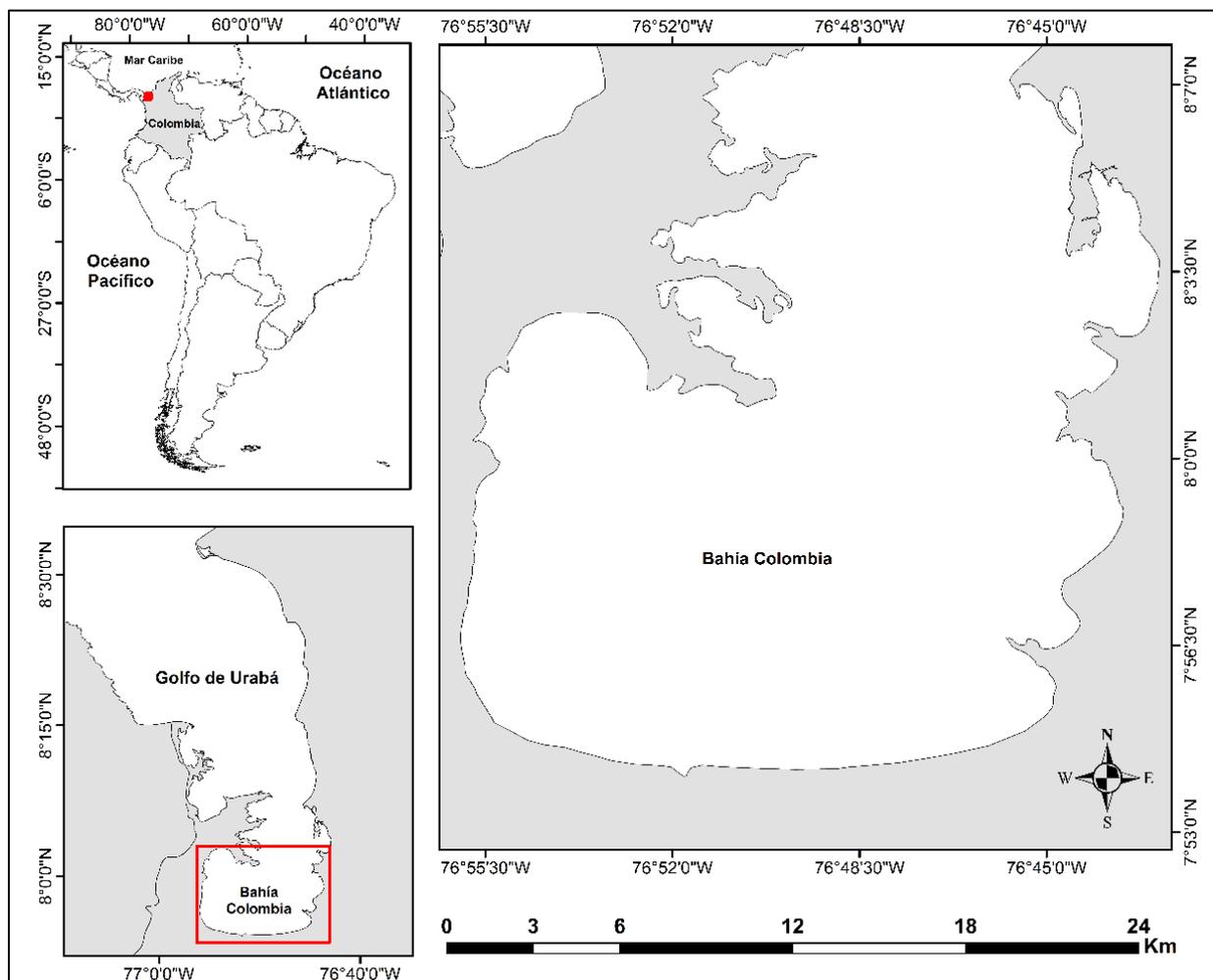
3. Área de Estudio y Metodología

3.1. Área de estudio

El golfo de Urabá es un cuerpo de agua semicerrado de aproximadamente 80 km de largo y 25 km de ancho, con profundidades medias de 25 m y máximas de 60 m (Bernal *et al.*, 2005). Se localiza en el extremo occidental de la costa Caribe colombiana, en el límite con Panamá. Bahía Colombia se encuentra en la parte sur del golfo de Urabá (Figura 1). Está separada del resto del golfo por el delta del río Atrato formado por los depósitos históricos de este río (Álvarez & Bernal 2007).

Figura 1

Zona de estudio. Golfo de Urabá y bahía Colombia.



Los ríos que desembocan en el golfo de Urabá se caracterizan por tener pequeñas cuencas y una alta producción de agua y sedimentos por m². El río Atrato es el que mayor cantidad de agua y sedimentos aporta a todo el golfo, con una descarga 15 veces mayor que el Río León, el segundo más caudaloso. Ambos ríos desembocan en bahía Colombia, aunque en el caso del Atrato solo llega una de sus bocas llamada Leoncito (Álvarez & Bernal 2007).

En total, bahía Colombia recibe la descarga de los ríos Suriquí, Currulao, Guadualito, León y la boca Leoncito del río Atrato el aporte fluvial principal. El delta de este río al parecer ejerce un bloqueo al flujo de agua marina desde la parte norte del golfo hacia el interior de la bahía (Roldán, 2008). Por la alta actividad agrícola de sus cuencas y los vertimientos de poblaciones aledañas y costeras, bahía Colombia es una de las zonas marinas del país que podría tener mayores índices de contaminación.

En el golfo de Urabá y en bahía Colombia se presenta un régimen micro-mareal de tipo mixto semidiurno, con amplitudes que no superan los 40 cm (Correa & Restrepo, 2002). Por otro lado, el oleaje en la zona norte del golfo depende de las condiciones marinas del mar Caribe, mientras que en bahía Colombia depende de las condiciones climáticas locales (Osorio *et al.*, 2010). El régimen climático está modulado por la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), lo que produce una presencia de la lluvia entre los meses de abril a octubre con vientos provenientes del sur y suroeste. La época seca ocurre entre diciembre y marzo, con la presencia de vientos alisios provenientes del norte y noreste desde el Mar Caribe (Lonin & Vásquez, 2005; INVEMAR, 2003; Molina *et al.* (1992) y Montoya & Toro, 2006).

3.2. Identificación de las masas de agua

Según Schneider *et al.* (2012), una masa de agua se define como un volumen hídrico con una temperatura y salinidad característica, que puede ser reconocida a partir de su lugar de origen. Puede formarse por interacciones entre aire y mar (precipitación-evaporación) o por mezcla de dos o más cuerpos de agua. Cuando realizamos mediciones de temperatura y salinidad en un mismo punto a distintas profundidades, podemos graficar en la ordenada la temperatura (T) y en la abscisa la salinidad (S).

La unión de los puntos genera una línea, que describe la relación que hay entre la temperatura y la salinidad en un volumen de agua considerado, a esto se le denomina diagrama T-S. Las masas de agua se mezclan muy lentamente con las aguas que las circundan y tienden a

mantener su temperatura y salinidad originales. De esta manera es posible identificarlas, lo cual es importante porque brinda información sobre el origen de estas masas de agua y también sobre el movimiento de ellas en profundidad.

VARIABLES físicas como corrientes, oleaje, marea y campo de viento son los principales responsables de regular y/o forzar el intercambio de masas de agua en los océanos. Las variaciones de la salinidad y temperatura en el perfil del agua entre la superficie y fondo determinan las características de las masas de cada sector. Tal es el caso de un estuario, donde el agua salada de mayor densidad tiende a desplazarse por el fondo, y el agua dulce proveniente de los ríos en superficie (Gómez, 1995).

Para identificar las masas de agua en bahía Colombia, se utilizaron mediciones *in situ* de temperatura y salinidad de tres campañas de medición: (17/07/2017, 24/06/2022 y 03/09/2022). Posteriormente, se realizó un análisis comparativo entre los datos medidos y los resultados de las simulaciones del modelo numérico CROCO por medio de gráficos T-S (temperatura vs salinidad).

3.3. Modelación numérica

Se utilizaron las salidas del modelo CROCO (Coastal and Regional Ocean COMMUNITY model) basado en ROMS_AGRIF. CROCO emplea las ecuaciones primitivas de superficie libre y tiene módulos con funciones biológicas, biogeoquímicas y sedimentarias, que se pueden acoplar a la hidrodinámica. La versatilidad de este modelo se enfoca en resolver escalas muy finas (especialmente en la zona costera), y sus interacciones con escalas oceánicas (CROCO, 2022).

Por otro lado, también se utilizó el modelo OpenDrift, el cual es un modelo lagrangiano de trayectoria de partículas de código abierto. Este modelo utiliza como datos de entrada los campos de corrientes en 3D para simular el transporte y destino de partículas (OpenDrift, 2022).

3.3.1. Modelo CROCO

Se utilizaron las salidas de las simulaciones numéricas del modelo CROCO generadas en el proyecto "Influencia de las condiciones ambientales en la hidrodinámica del golfo de Urabá". Para las simulaciones con el modelo CROCO, se recopiló y procesó información como la batimetría, caudales de los ríos Atrato y León, forzadores atmosféricos (flujos de calor, radiación, humedad y velocidad del viento), así como condiciones oceánicas iniciales y de frontera

(temperatura, salinidad, altura superficial del mar y velocidades en la columna de agua). También se incorporó el forzante de la marea a partir de 10 armónicos (Bedoya, 2023).

3.3.1.1 Patrones de circulación

El patrón de circulación en bahía Colombia fue estudiado por Molina *et al.* (1992) quienes esquematizaron cualitativamente las corrientes superficiales a partir de una imagen SPOT tomada en febrero de 1989 y señalaron una corriente en sentido Norte- Sur sobre el sector oeste de la bahía y una corriente en sentido Sur-Norte en la zona oriental del Golfo. Se planteó que esta última corriente debía existir para mantener la continuidad de masa. Sin embargo, Roldán (2008) sugiere que el agua confinada en bahía Colombia al sur del dominio no sale superficialmente por el costado oriental del dominio como lo sugieren en Molina *et. al.* (1992), sino que se profundiza formando una corriente a 4 m de la superficie que se dirige hacia el norte. Por otro lado, García (2007) y Escobar *et al.* (2015) identificaron que durante la época seca los vientos alisios del noreste producen corrientes superficiales en dirección sur. Y a una profundidad intermedia (aproximadamente a 5 m) las corrientes se dirigen al Norte.

En este estudio se analizaron los patrones de circulación de bahía Colombia durante el período comprendido entre 2011 y 2018 a partir de las salidas del modelo CROCO. El perfil se dividió en dos capas, superficial (0-5 m), y otra en profundidad (5 m al fondo). El criterio para realizar esta división es la presencia de la haloclina definida por varios autores (Toro *et al.*, 2019; Jiménez & Campillo 2020; Córdoba, 2020; Bedoya, 2023), la cual se encuentra en promedio a 5 m de profundidad. En este estudio, sobre bahía Colombia, se propuso una separación del dominio en dos capas: una que abarca desde los 0 a 5 m de profundidad y otra desde los 5 m hasta el fondo. Este criterio coincide con los resultados de Du & Shen (2016) los cuales estudiaron el patrón vertical de la circulación para la superficie y el fondo.

Inicialmente, se realizó un análisis del promedio multianual de las corrientes, seguido de promedios mensuales multianuales. Posteriormente, se seleccionó un mes significativo de cada época climática para analizar los patrones de circulación. En la época seca, se seleccionó el mes de febrero, y para la época húmeda se consideró el mes de octubre. Este análisis proporcionó una visión detallada de la circulación durante cada estación climática, y de paso el cálculo de los TR de las masas de agua.

3.4. Cálculo del Tiempo de residencia (TR)

En general, se utilizaron dos enfoques para calcular el TR: el enfoque euleriano y el lagrangiano. El enfoque euleriano puede resultar difícil para etiquetar masas de agua y monitorear su posición desde el origen en el espacio y el tiempo. Mientras que en el enfoque lagrangiano, las partículas pueden etiquetarse con información sobre su punto de liberación u origen (Braunschweig *et al.*, 2003). En este trabajo se utilizó un análisis con enfoque lagrangiano a partir de la fracción de agua.

A nivel numérico el TR se calcula usando el método lagrangiano de seguimiento de partículas. Este consiste en disponer partículas trazadoras en diferentes partes del perfil de agua y seguir su trayectoria, registrando el instante en que abandonan el dominio de interés (Gong *et al.*, 2008; Mosen *et al.*, 2002). En este trabajo esta actividad fue realizada usando el modelo OpenDrift.

Kenov *et al.* en 2012 mencionan que el TR debe usarse como una métrica aproximada en la toma de decisiones debido a las incertidumbres inherentes a la variabilidad de los factores ambientales y estacionales, la precisión del cálculo y la calidad de los datos de entrada del modelo. Sin embargo, el TR es útil para mejorar la comprensión de los sistemas acuáticos.

En estudios previos (Braunschweig *et al.*, en 2003, Malhadas *et al.*, en 2009, Malhadas *et al.*, en 2010, Kenov *et al.*, en 2012), definen el TR como el periodo en el que una masa de agua abandona una zona de interés o una caja. Por razones prácticas, se considera que el TR corresponde al intervalo de tiempo necesario para que el 80% de los trazadores salgan de la caja (o que el 20% permanezca dentro de ella). Este valor se emplea para asegurar que la mayoría de las partículas salgan de la caja. Estudios previos realizados en estuarios han demostrado que los TR prolongados están asociadas con un alto agotamiento de oxígeno (Uncles *et al.*, 1998 y Fujiwara *et al.*, 2002).

En el cálculo del TR, además se tiene en cuenta: 1) un error del 10% en el modelo hidrodinámico; 2) atrapamiento de partículas en las áreas intermareales e intensidad de las corrientes en las zonas de entradas de agua dulce; 3) influencia de las corrientes marinas en el intercambio de agua entre el estuario y el océano. El 20 % es una métrica justa para considerar las fuentes de incertidumbre en el cálculo del TR.

La metodología empleada para el cálculo del TR se basó en los estudios previos de Braunschweig *et al.* (2003) y Kenov *et al.* en 2012). Se aplicó un enfoque lagrangiano representando a bahía Colombia como una “caja” llena con partículas, cuyo volumen total equivale

al de la bahía. Para cada partícula se consideró su origen y así rastrear su trayectoria y determinar el tiempo de renovación del volumen inicial.

El TR se calculó a partir de la ecuación (1) donde se tiene la fracción de agua f_{ij} dentro de la caja i en un momento instantáneo t , con origen en la caja j :

$$f_{ij}(t) = \frac{V_{ij}(t)}{V_{i,i}(0)} \text{ (ecuación 1)}$$

donde:

$V_{ij}(t)$ = Volumen de trazadores liberados en la caja j , presentes dentro de la caja i

en el momento t .

$V_{i,i}(0)$ = Volumen de agua en la caja i al inicio de la simulación ($t=0$).

Esta ecuación se implementó en el software Matlab utilizando las salidas generadas por el modelo OpenDrift, en el cual se llevaron a cabo las simulaciones del seguimiento de las partículas.

3.4.1. Modelo OpenDrift

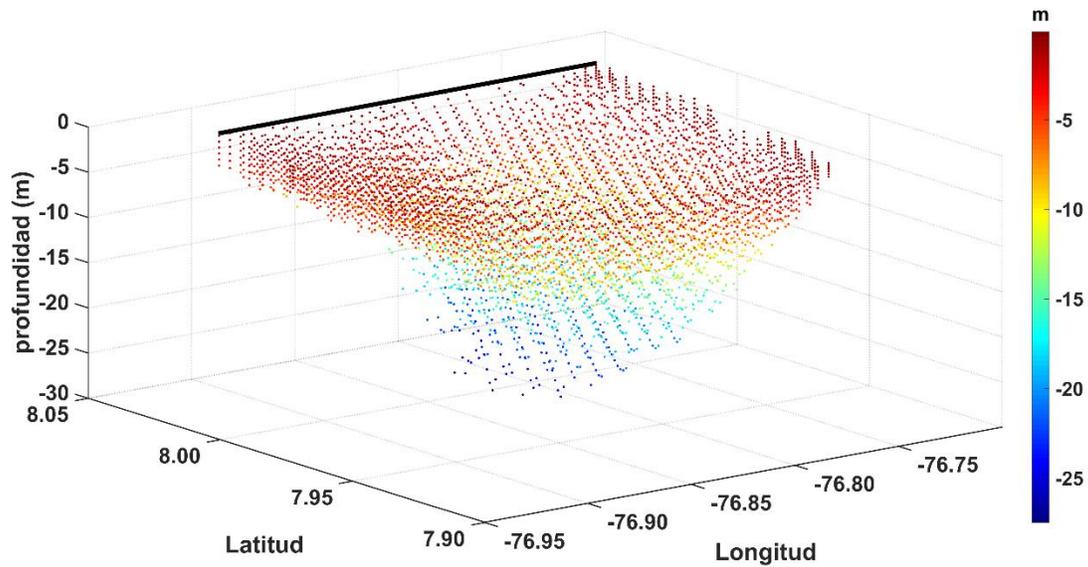
Las trayectorias de las masas de agua son los patrones o rutas que sigue una determinada masa de agua en el océano. Estas trayectorias están influenciadas por las corrientes, el campo de vientos, la marea y la batimetría. Analizar las trayectorias de las masas de agua en bahía Colombia es de gran importancia para comprender su dinámica, cómo se distribuyen los nutrientes y los sedimentos, y cómo se propagan los contaminantes o los organismos marinos.

El modelo OpenDrift es una herramienta que simula el movimiento de partículas, considerando corrientes oceánicas, campos de vientos entre otros factores. En este estudio, se emplearon los campos de corrientes en 3D del modelo numérico CROCO para identificar trayectorias lagrangianas a lo largo de toda la columna de agua.

Inicialmente, se distribuyeron un total de 5140 partículas en toda bahía Colombia, ocupando toda la capa de agua en las posiciones que se muestran en la Figura 2. Esta cantidad se usó en la información modelada con CROCO entre 2011 y 2018. Posteriormente, se realizó un seguimiento detallado de las trayectorias de las partículas hasta que abandonaron el dominio de estudio, marcando el punto de salida cuando alcanzaban los 8.03° de latitud norte (ver cuadro rojo: Figura 1).

Figura 2

Distribución inicial de partículas en bahía Colombia.



Es de notar que, de todo el periodo de simulaciones con CROCO, sólo se disponía de salidas con promedios horarios de los meses de junio de 2011 a febrero de 2012. Con esta información se decidió realizar una comparación con salidas de los promedios diarios (disponibles de 2011 a 2018) con el fin de identificar posibles diferencias en el tiempo de residencia de las partículas.

4. Resultados y Discusión

4.1. Masas de agua

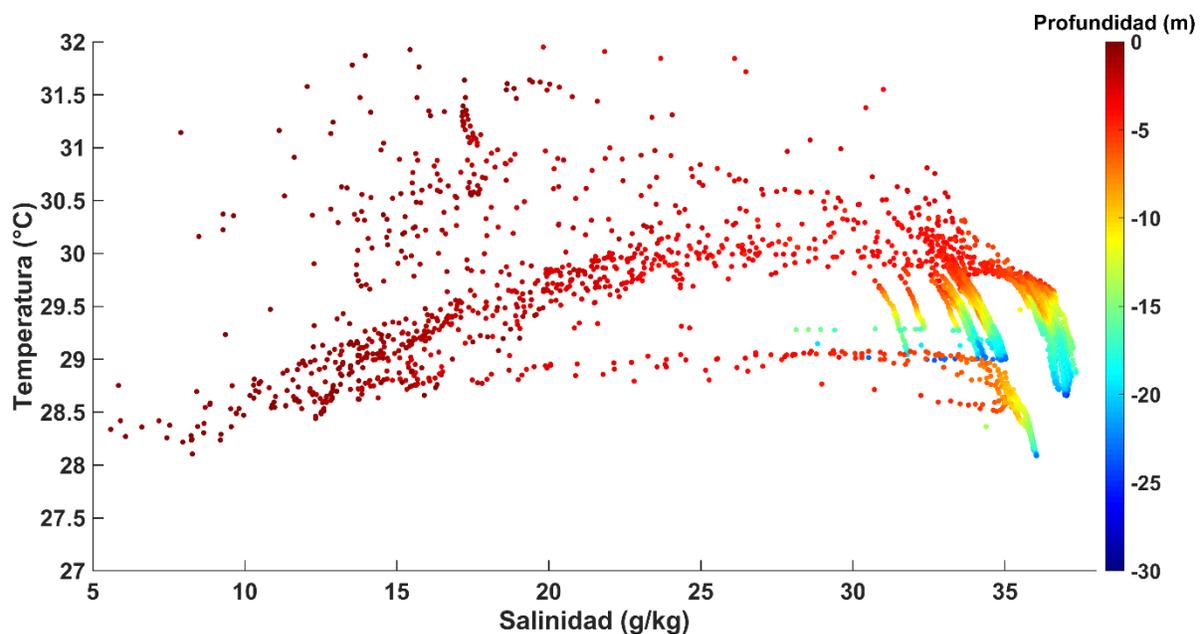
A continuación, se presentan los resultados relevantes relacionados con las masas de agua.

4.4.1. Datos *in situ*

La Figura 3 presenta las distribuciones de temperatura y salinidad en bahía Colombia obtenidas de datos *in situ* en tres campañas diferentes (13/07/2017, 23/06/2022 y 3/09/2022). Se observa un ligero gradiente de la temperatura en función de la profundidad, con valores superficiales que oscila entre 28°C y 32°C.

Figura 3

Diagrama de dispersión de temperatura vs salinidad (curva T-S) a partir de datos *in situ* recopilados en bahía Colombia. Campañas realizadas el 13/07/2017, 23/06/2022 y 03/09/2022.



Por otro lado, se observa una amplia gradiente de salinidad entre los valores superficiales y los de mayor profundidad. En la superficie (0 m a 5m), los datos *in situ* presentan un intervalo de salinidad entre 4 y 20 g/kg, mientras que en profundidad (5 m a 25 m), se alcanzan valores entre

21 g/kg y 37 g/kg. Esto sugiere que la estratificación y la densidad del agua de bahía Colombia está dominada por la salinidad, presentándose dos masas de agua principales, una que se encuentra desde la superficie hasta los 5 m de profundidad (agua salobre) y desde los 5 m hasta el fondo (salada).

Esto concuerda con lo reportado por Montoya (2010) que identificó la presencia de dos masas de agua en el golfo de Urabá de acuerdo con su origen: una proveniente de las descargas de los ríos y otra masa oceánica. Adicionalmente, Roldán (2008) identificó a partir de mediciones realizadas en agosto y noviembre que la picnoclina se encontraba entre los 2 m y 4 m de profundidad. Debajo de la picnoclina, esta autora reportó que el agua oceánica presenta bajas velocidades y es homogénea en temperatura, salinidad y densidad.

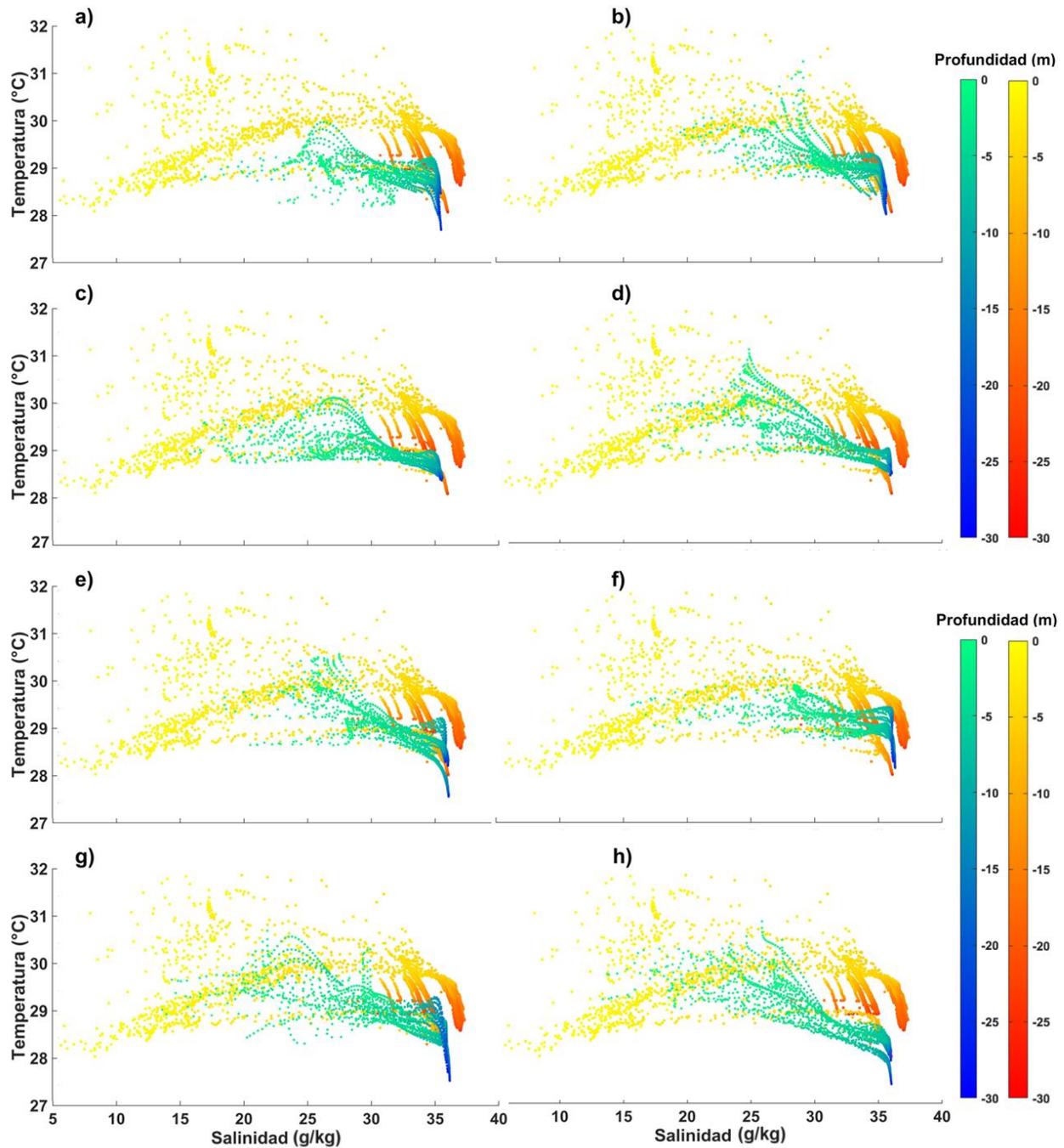
Estos resultados también coinciden con Bedoya (2023) quien identificó en cada una de las estaciones climáticas que, en bahía Colombia se encuentran dos capas, una capa de agua dulce de 4 m en la estación húmeda y 6 m en la estación seca, y debajo de esta, una capa de agua salada. Por otro lado, Lonin y Vásquez (2005) observaron que la capa superficial depende del flujo descargado por los ríos, mientras que la capa inferior depende de la corriente que se origina en el Caribe y se dirige hacia el interior del golfo de Urabá.

4.1.2. Comparación de los datos *in situ* y el modelo numérico

La comparación de datos *in situ* obtenidos durante la época húmeda, y los datos del modelo numérico para la misma temporada, muestra concordancia en las tendencias de los valores de temperatura y salinidad. Según los resultados del modelo numérico, se identifican dos masas de agua: desde superficie hasta aproximadamente los 5 m de profundidad, y desde 5 m hasta el fondo (Figura 4). De acuerdo con estos resultados, se observa que las salinidades alcanzan valores mínimos de 13 g/kg y máximos de 36 g/kg. Una característica para tener en cuenta es que la capa media tiene una mayor temperatura promedio que la capa superficial. En general se observa como los datos medidos tienen una temperatura ligeramente mayor a los datos del modelo. Y en salinidad como el modelo no logra capturar los valores extremos o de muy baja o alta salinidad.

Figura 4

Diagramas de dispersión de temperatura vs salinidad (curva T-S) a partir de datos in situ (puntos en tonos rojos-amarillos) y resultados de un modelo numérico (puntos en tonos verde-azules) en bahía Colombia durante las campañas oceanográficas realizadas en las fechas 13/07/2017, 23/06/2022 y 03/09/2022. **a)** 2011, **b)** 2012, **c)** 2013, **d)** 2014, **e)** 2015, **f)** 2016, **g)** 2017, **h)** 2018.



Estos resultados indican que el modelo representa en promedio y de manera adecuada el comportamiento de la salinidad y la temperatura en bahía Colombia, mostrando las dos capas típicas mencionadas. Sin embargo, estas observaciones brindan una visión parcial del comportamiento del sistema y se requiere un análisis más detallado con nuevas mediciones para validar exhaustivamente al modelo y mejorar la precisión de las condiciones oceanográficas en la bahía.

4.2. Patrones de circulación en bahía Colombia

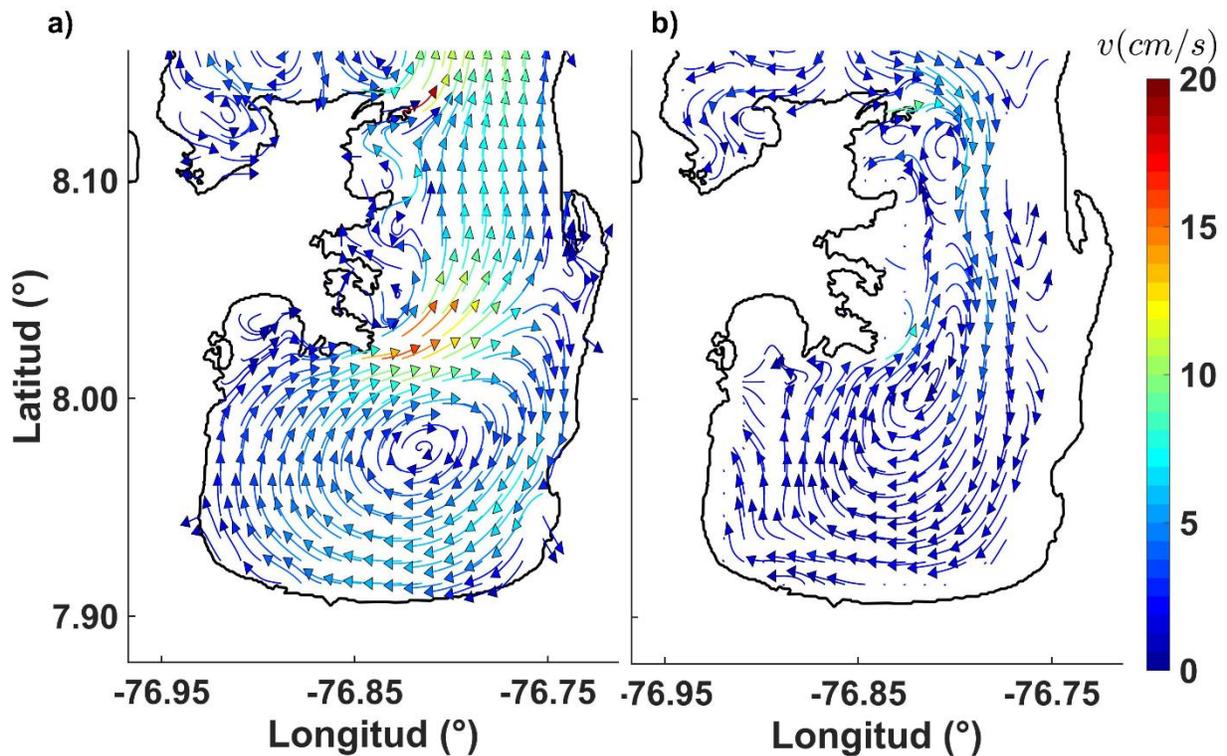
Para el análisis de los patrones de circulación en bahía Colombia, se llevaron a cabo diferentes enfoques. Primero, se examinaron los patrones de circulación multianuales y mensuales multianuales. Posteriormente, se realizó un análisis de los patrones de circulación mensuales durante el período 2011 a 2018, seleccionando febrero como mes representativo de la época seca, y octubre como mes representativo de la época húmeda. Adicionalmente, con el objetivo de realizar un análisis más detallado, se dividió la bahía en dos capas: una capa superficial hasta los 5 metros de profundidad y otra capa desde los 5 metros hasta el fondo batimétrico. Esta división se basó en la identificación de la haloclina (capa de transición de salinidad) que se estima se encuentra aproximadamente a 5 metros de profundidad y los resultados previamente obtenidos.

4.2.1 Patrones de circulación multianual y mensual multianual

En la Figura 5 se presenta un análisis de las corrientes multianuales en bahía Colombia, para el periodo 2011 a 2018. Esta figura muestra las magnitudes de las corrientes tanto en la capa superficial (0 m a 5 m) como en la capa de fondo (> 5 m). En ella, se aprecia un giro anticiclónico que se extiende verticalmente desde la superficie hasta el fondo de la bahía. Es importante destacar que este giro anticiclónico domina toda la circulación de la bahía. Sin embargo, es de notar que a la altura del delta en superficie el campo de corrientes tiene una dirección promedio hacia el norte, mientras que en el mismo sitio el flujo es hacia el sur.

Figura 5

Campos de velocidad de las corrientes marinas multianuales en bahía Colombia, para el periodo 2011 a 2018. a) Capa superficial integrada desde la superficie hasta 5 m de profundidad. b) Integración de la columna de agua desde los 5 m de profundidad hasta el fondo. Las flechas indican la dirección y la escala de colores representa la magnitud de las velocidades (cm/s).

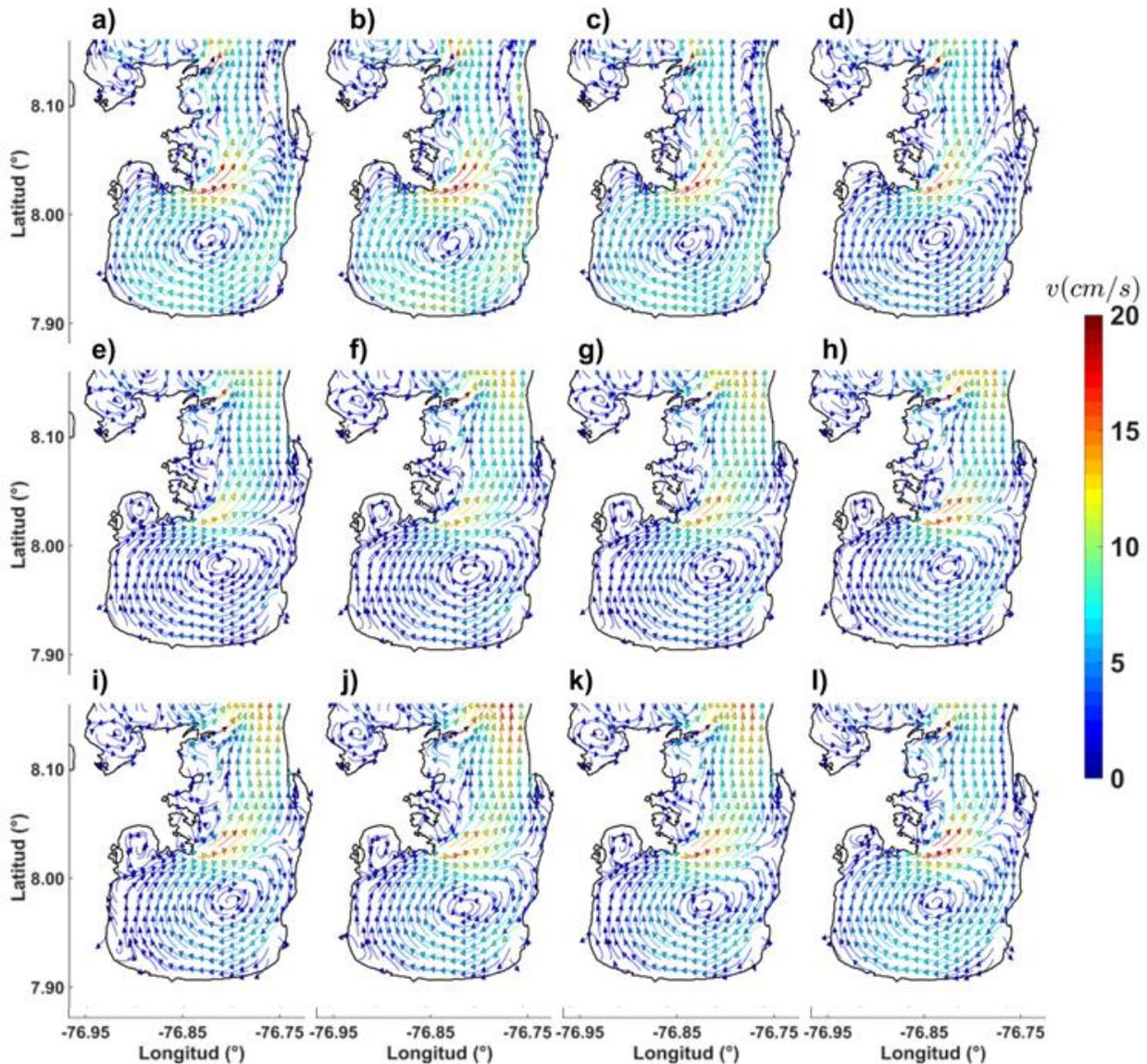


Además, se observa que las magnitudes de las corrientes son mayores en la capa superficial, con intensidades que oscilan entre 5 y 12 cm/s, en contraste con las menores velocidades registradas en el fondo, inferiores a 5 cm/s. Estos resultados indican que existe una mayor circulación en la capa superficial de la bahía respecto a la capa del fondo.

La Figura 6 presenta los campos de corrientes mensuales multianuales para la capa superficial. Los resultados sugieren importantes hallazgos sobre el patrón de circulación en bahía Colombia. Se evidencia un giro anticiclónico durante todos los meses del año con un flujo neto dirigido hacia el norte en la capa superficial. Las corrientes superficiales presentan una magnitud promedio que varía aproximadamente entre 2 cm/s y 12 cm/s. Un aspecto importante es que durante los meses de diciembre a marzo (época seca) se registran velocidades más altas en comparación con el resto del año. Esto puede atribuirse a la influencia de los vientos alisios del norte los cuales son más intensos en esta época.

Figura 6

Campos de velocidad de las corrientes marinas mensuales multianuales en bahía Colombia, para el periodo 2011 a 2018 en la capa superficial integrada desde la superficie hasta 5 m de profundidad. a) enero, b) febrero, c) marzo, d) abril, e) mayo, f) junio, g) julio, h) agosto, i) septiembre, j) octubre, k) noviembre y l) diciembre. Las flechas indican la dirección y la escala de colores representa la magnitud de las velocidades (cm/s).

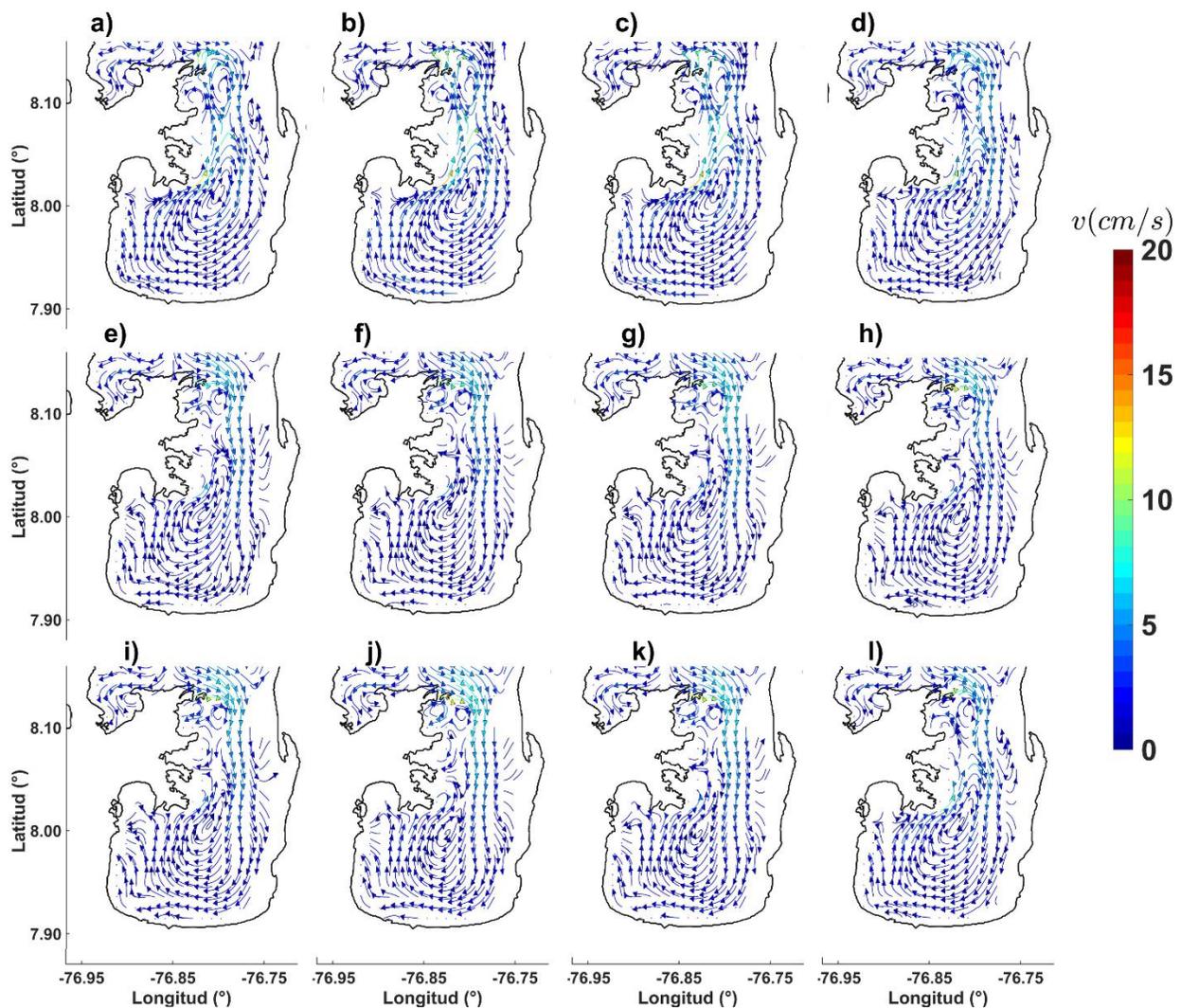


Por otro lado, al examinar el comportamiento de la circulación desde los 5 metros de profundidad hasta el fondo (Figura 7), los resultados sugieren que la magnitud del campo de corrientes es más baja en comparación con la capa de la superficie durante todos los meses del año.

Las velocidades registradas no superan los 5 cm/s. También se identifica un patrón de circulación anticiclónica en esta capa profunda, pero a diferencia de la superficie, se observa un flujo en dirección sur indicando la entrada de agua por el fondo hacia el interior de la bahía.

Figura 7

Campos de velocidad de las corrientes marinas mensuales multianuales en bahía Colombia, para el periodo 2011 a 2018 en la capa integrada desde los 5 m de profundidad hasta el fondo. a) enero, b) febrero, c) marzo, d) abril, e) mayo, f) junio, g) julio, h) agosto, i) septiembre, j) octubre, k) noviembre y l) diciembre. Las flechas indican la dirección y la escala de colores representa la magnitud de las velocidades (cm/s).



Estas observaciones sugieren como la temporada climática y la profundidad desempeñan un papel importante en el comportamiento en el campo de corrientes tanto en superficie como en fondo.

Los resultados presentados coinciden con lo reportado por Bedoya (2023), quien observó como a profundidades superiores a 5 m en la zona norte, el flujo se divide en cada zona en una parte entrando al interior del golfo y otro saliendo. Además, mostró como en bahía Colombia el flujo se divide en dos capas verticales, una derecha dirigida al sur y otra izquierda dirigida al norte. En la zona del delta del río Atrato observó una capa de 5 m de grosor saliendo del golfo, y una capa en profundidad entrando. Además, según el estudio de Bedoya (2023), bahía Colombia está dominada por un giro anticiclónico. Este giro presenta valores más altos en el centro de la bahía y la distribución de las líneas de corriente parece estar influenciada por la batimetría de la zona. Estos hallazgos se pueden observar y corroborar de las figuras 5 a la 11 de este trabajo. Cabe destacar que este giro anticiclónico se mantiene de manera permanente durante todos los meses del año como se aprecia en las figuras 6 y 7.

4.2.2. Patrones de circulación mensual estacional en la capa superficial

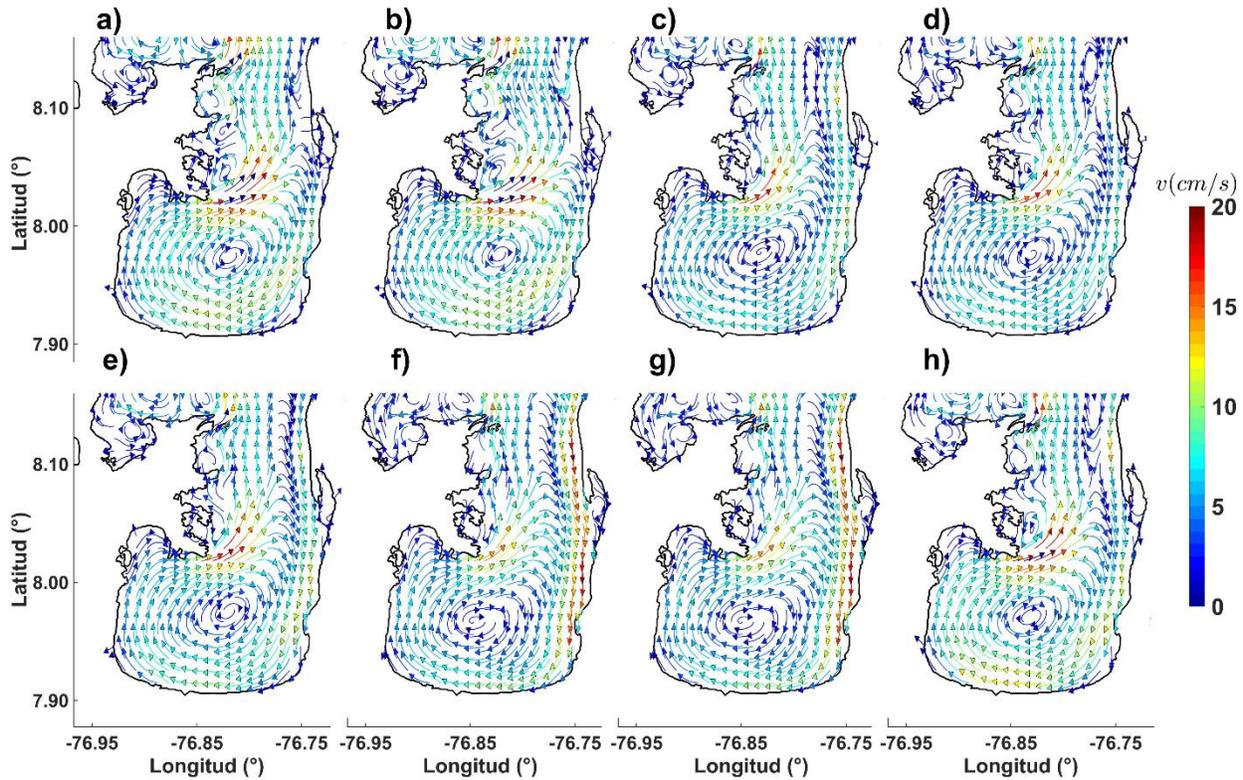
Teniendo en cuenta las dos épocas climáticas de la región, se seleccionaron dos meses representativos para los siguientes análisis: febrero para la época seca y octubre para la época húmeda. Estos meses se consideran representativos de cada una de las épocas climáticas mencionadas (Toro *et al.* 2019; Bedoya, 2023). Teniendo en cuenta los factores climáticos y las características de la circulación estuarina en bahía Colombia, este análisis permite una visión más integral de la dinámica de la bahía en diferentes momentos del año.

4.2.2.1. Época seca

Durante la época seca (mes de febrero), entre los años 2011 y 2018, se observa una circulación anticiclónica en la capa superficial de bahía de Colombia (Figura 8). En el centro de la bahía, las corrientes presentan magnitudes que oscilan entre 2 cm/s y 5 cm/s. Mientras que en el resto de la bahía las magnitudes varían entre 6 cm/s y 20 cm/s.

Figura 8

Campos de velocidad de las corrientes marinas mensuales de febrero en bahía Colombia, obtenidos mediante modelación numérica en la capa superficial integrada desde la superficie hasta 5 m de profundidad para los años: a) 2011, b) 2012, c) 2013, d) 2014, e) 2015, f) 2016, g) 2017, h) 2018. Las flechas indican la dirección y la escala de colores representa la magnitud de las velocidades (cm/s).



La circulación del mes de febrero a lo largo de los 9 años muestra un flujo entrando por el este de la bahía y una salida por el oeste, donde se encuentra el delta del río Atrato. Esta circulación podría estar influenciada por los fuertes vientos alisios provenientes del norte y noroeste. Estos vientos intensos (hasta 10 m/s) provocan una retención de agua en la bahía, generando corrientes más intensas en comparación con las que se presentan durante la época húmeda, como se observa en la Figura 9.

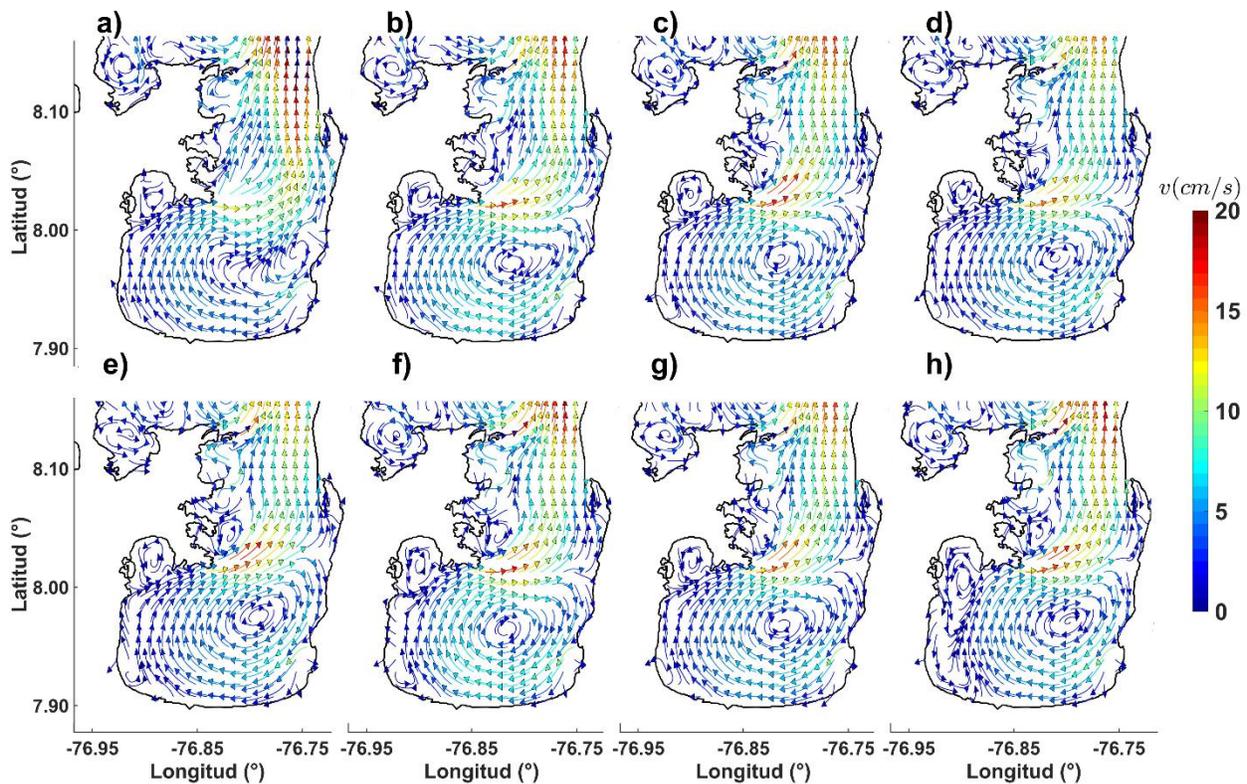
4.2.2.2. Época húmeda

Con respecto a la época húmeda (mes de octubre), también se observa una circulación anticiclónica en bahía Colombia, indicando que este giro está presente durante ambas épocas climáticas (figuras 8 y 9). Sin embargo, en la época húmeda, la circulación es menos intensa, con

magnitudes de corrientes que varían entre 2 cm/s y 10 cm/s. En contraste con la época seca, en la época húmeda se observa principalmente un flujo superficial saliendo por el oeste. Este flujo se ve influenciado por la desembocadura del río Atrato, lo que puede estar relacionado con un mayor caudal del río durante esta época climática.

Figura 9

Campos de velocidad de las corrientes marinas mensuales de octubre en bahía Colombia, obtenidos mediante modelación numérica en la capa superficial integrada desde la superficie hasta 5 m de profundidad para los años: a) 2011, b) 2012, c) 2013, d) 2014, e) 2015, f) 2016, g) 2017, h) 2018. Las flechas indican la dirección y la escala de colores representa la magnitud de las velocidades (cm/s).



Adicionalmente, la disminución de la intensidad de las corrientes durante la época húmeda está relacionada con el campo de vientos del sur, los cuales son generalmente más débiles en comparación con los fuertes vientos del norte y noreste que prevalecen durante la época seca. Esto podría contribuir a la reducción de la intensidad de las corrientes observadas en la época húmeda.

4.2.3. Patrones de circulación mensual estacional en la capa de fondo

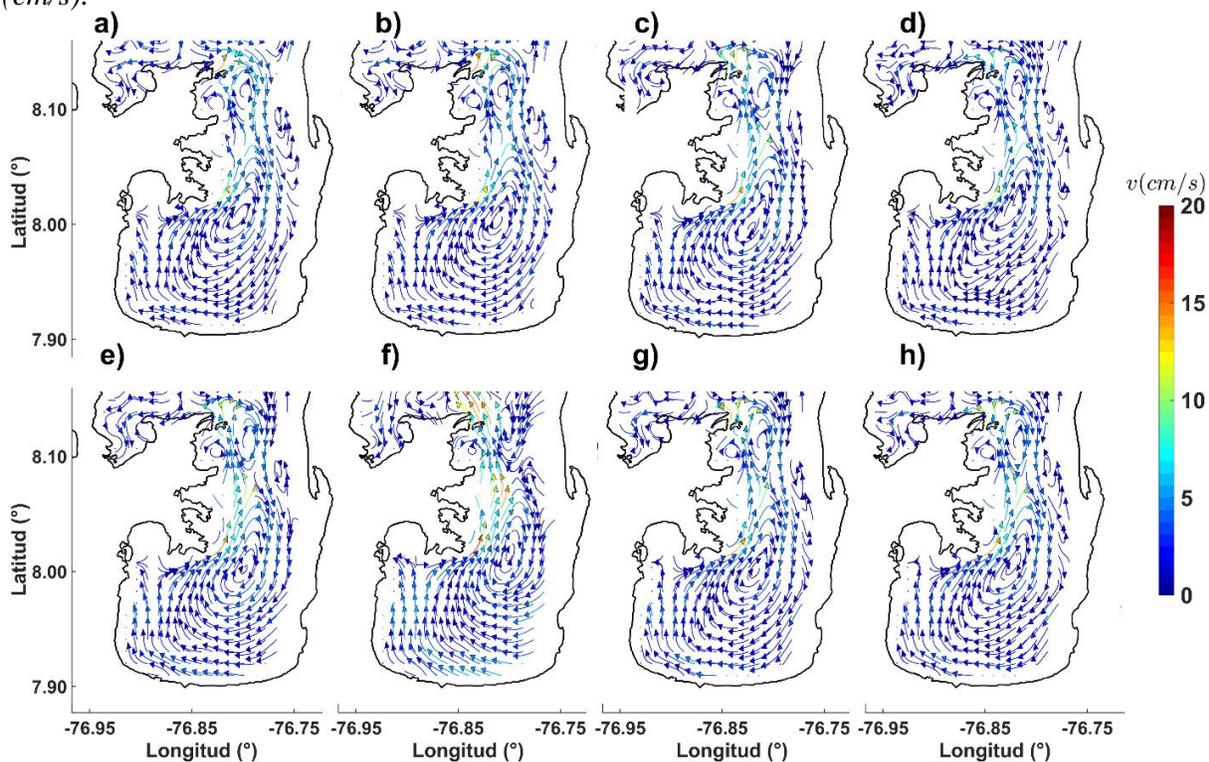
Se realizó un análisis de la capa inferior de la columna de agua, que abarca desde los 5 metros hasta el fondo. Esta aproximación permite obtener una comprensión más completa de la circulación en diferentes niveles de profundidad y cómo está variando en las dos épocas climáticas.

4.2.3.1. Época seca

La Figura 10 presenta los campos de velocidad para el mes de febrero de los años 2011 a 2018. Como se mencionó anteriormente en superficie se presentó una circulación anticiclónica. Es importante destacar que, de acuerdo con los resultados, esta circulación se extiende hasta el fondo de bahía de Colombia. En la capa inferior, las corrientes presentan magnitudes considerablemente más bajas en comparación con las corrientes superficiales (Figura 8), y varían entre 0 cm/s y 4 cm/s.

Figura 10

Campos de velocidad de las corrientes marinas mensuales de febrero en bahía Colombia, obtenidos mediante modelación numérica en la capa integrada desde los 5 m de profundidad hasta el fondo para los años: **a)** 2011, **b)** 2012, **c)** 2013, **d)** 2014, **e)** 2015, **f)** 2016, **g)** 2017, **h)** 2018. Las flechas indican la dirección y la escala de colores representa la magnitud de las velocidades (cm/s).

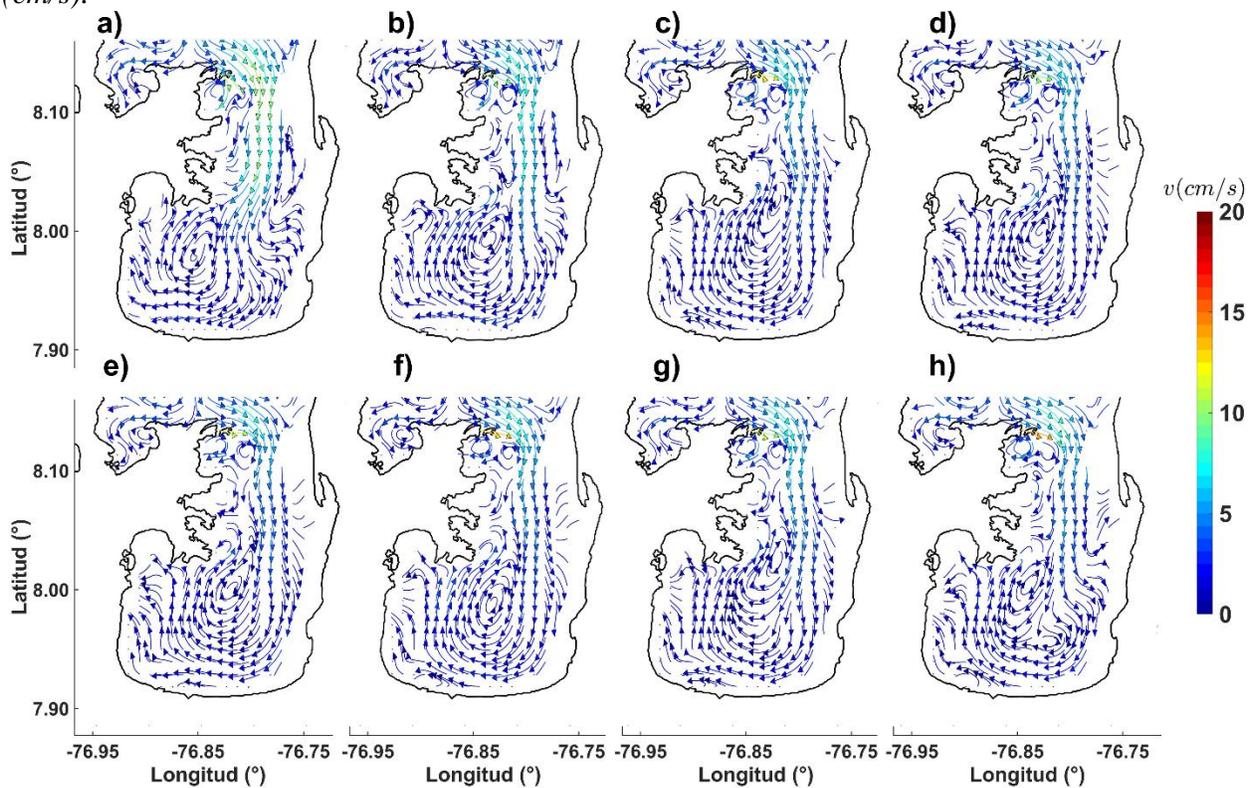


Es importante notar que el giro anticiclónico en la capa inferior no se presenta en el centro de la bahía, como en la capa superficial (figuras 8 y 9), sino que está desplazado hacia el norte, cerca del delta del río Atrato. Además, se observa un flujo saliendo por el fondo al oeste de la bahía. Esto sugiere que el agua de bahía Colombia, que es de origen oceánico, ingresa por el fondo y una parte sale por el fondo.

4.2.3.2. Época húmeda

Figura 11

Campos de velocidad de las corrientes marinas mensuales de octubre en bahía Colombia, obtenidos mediante modelación numérica en la capa integrada desde los 5 m de profundidad hasta el fondo para los años: **a)** 2011, **b)** 2012, **c)** 2013, **d)** 2014, **e)** 2015, **f)** 2016, **g)** 2017, **h)** 2018. Las flechas indican la dirección y la escala de colores representa la magnitud de las velocidades (cm/s).



Para el mes de octubre (Figura 11), también se observa un flujo de agua entrando por el fondo hacia bahía Colombia. Los resultados muestran, que las magnitudes de corriente son inferiores a 4 cm/s para este mes. Es interesante destacar que este flujo de agua que ingresa por el

fondo también presenta una salida por la misma capa, es decir, el agua que entra por el fondo sale nuevamente, una parte, por el fondo.

Los resultados anteriores, concuerdan con lo mostrado por Bernal et al. (2005) quienes sugieren que el caudal del río Atrato genera un patrón de circulación de tipo estuarino, con aguas dulces saliendo a nivel superficial y aguas saladas entrando por el fondo. Por otro lado, Molina et al. (1992), y Chevillot et al. (1993) identificaron dos épocas climáticas principales en la región, la época seca, de diciembre a abril, dominada por fuertes vientos del norte y noreste. Y la época húmeda, de mayo a noviembre, con vientos débiles predominantemente del sur.

4.3. Trayectorias de las masas de agua

Para el análisis de las trayectorias de las masas de agua en bahía Colombia, se realizó una división de la columna de agua en dos capas: una capa superficial que abarcó desde la superficie hasta los 5 m de profundidad, y una capa inferior que se extendió desde los 5 m hasta el fondo. Se seleccionaron los meses significativos de cada época climática, febrero y octubre, para realizar el análisis.

4.3.1. Trayectorias en la capa superficial

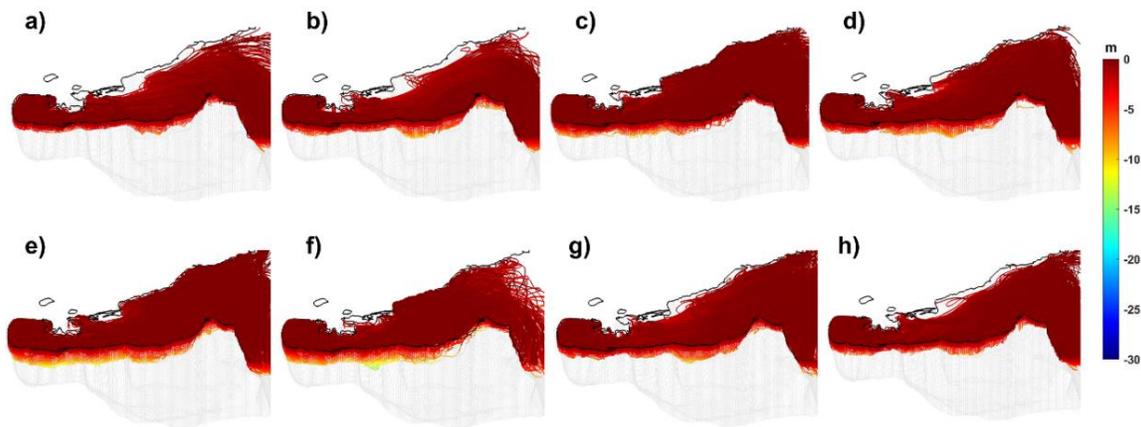
Las figuras 12 y 13 presentan las trayectorias de las masas de agua en la capa superficial de bahía Colombia durante las épocas húmeda y seca, respectivamente. Para una mejor visualización la orientación del golfo fue girada, el sur aparece a la izquierda y el norte a la derecha. Las trayectorias se presentan como líneas continuas desde que inicia el recorrido cada una de las partículas (grafico tipo espagueti).

4.3.1.1 Época seca

Estas figuras evidencian patrones diferentes para cada época climática. En el mes de febrero, se puede observar que las trayectorias de las masas de agua superficiales, para los años analizados, se distribuyen por todo el golfo antes de su eventual salida hacia el mar Caribe. Además, se nota una profundización promedio de la capa superficial, la cual alcanza los 8 m de profundidad.

Figura 12

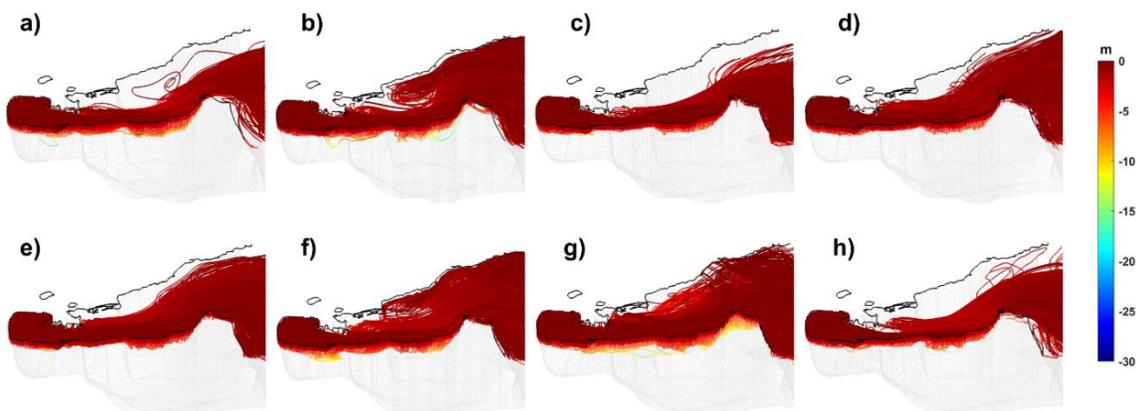
Trayectorias lagrangianas de partículas superficiales simuladas durante el mes de febrero en bahía Colombia, integradas en una capa de 5 m de espesor sobre la superficie libre, para los años: a) 2011, b) 2012, c) 2013, d) 2014, e) 2015, f) 2016, g) 2017, h) 2018.

**4.3.1.2. Época húmeda**

Durante el mes de octubre, se observa un comportamiento diferente a las trayectorias superficiales del mes de febrero. En la mayoría de los años, las trayectorias muestran una salida preferencial por el este de la bahía. Esta tendencia puede ser atribuida a la influencia del aumento en el caudal del río Atrato durante esta época climática. Además, la capa superficial no muestra una profundización en este período.

Figura 13

Trayectorias lagrangianas de partículas superficiales simuladas durante el mes de octubre en bahía Colombia, integradas en una capa de 5 m de espesor sobre la superficie libre, para los años: a) 2011, b) 2012, c) 2013, d) 2014, e) 2015, f) 2016, g) 2017, h) 2018.



4.3.2. Trayectorias en la capa de fondo

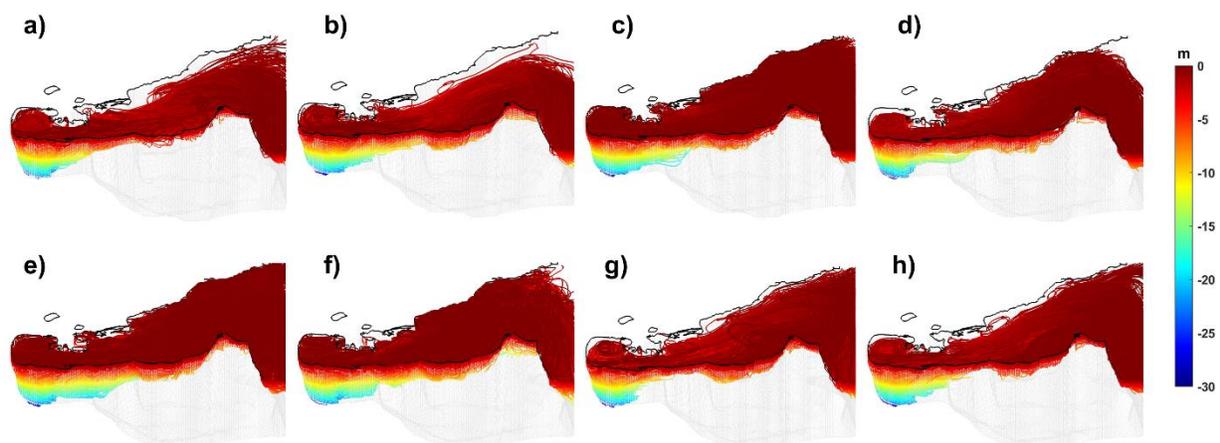
Las figuras 14 y 15 muestran las trayectorias lagrangianas de las masas de agua en la capa de fondo de bahía Colombia durante los meses de febrero y octubre, respectivamente. Estos resultados sugieren que, tanto en la época seca como en la época húmeda, las trayectorias del fondo muestran un ascenso hacia la superficie antes de salir de la bahía. Sin embargo, es importante destacar que no todas las trayectorias siguen exactamente este patrón.

4.3.2.1 Época seca

En febrero, se observa que algunas trayectorias de las masas de agua del fondo salen por debajo de los 10 m de profundidad. Esto indica que parte de las masas de agua pueden estar siguiendo rutas diferentes y no ascender completamente hacia la superficie antes de salir de la bahía.

Figura 14

Trayectorias lagrangianas de partículas de fondo simuladas durante el mes de febrero en bahía Colombia, integradas en una capa de 5 m hasta el fondo, para los años: a) 2011, b) 2012, c) 2013, d) 2014, e) 2015, f) 2016, g) 2017, h) 2018.

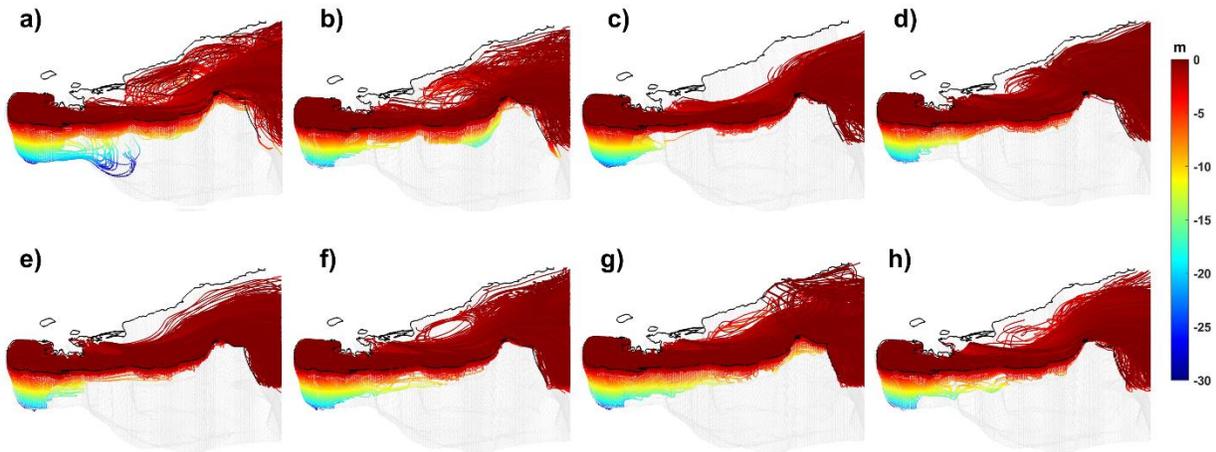


4.3.2.2. Época húmeda

En octubre, se mantiene la tendencia a que las trayectorias del fondo asciendan hacia la superficie y luego se dirijan hacia el este para su evacuación. Sin embargo, al igual que en la época seca, es posible que a profundidades inferiores algunas trayectorias no asciendan a superficie.

Figura 15

Trayectorias lagrangianas de partículas de fondo simuladas durante el mes de octubre en bahía Colombia, integradas en una capa de 5 m hasta el fondo, para los años: a) 2011, b) 2012, c) 2013, d) 2014, e) 2015, f) 2016, g) 2017, h) 2018.



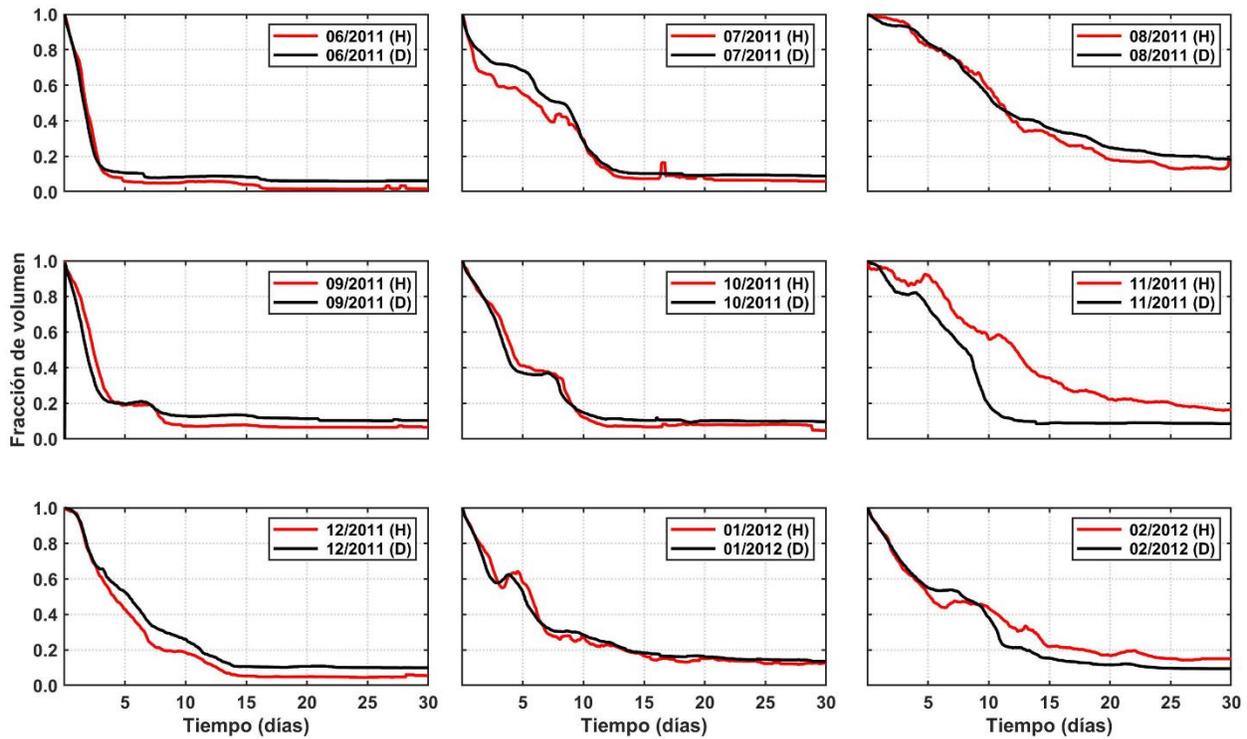
Los análisis de los patrones de circulación y las trayectorias lagrangianas proporcionan una base sólida para determinar los TR de las masas de agua en bahía Colombia.

4.4. Tiempo de residencia (TR)

Las figuras 16 y 17 muestran el cambio de la fracción de volumen de agua vs el TR en bahía Colombia tanto para la capa superficial como la de fondo. La línea roja (promedios horarios) muestra una mayor variación, respecto a la línea negra (promedios diarios). La variabilidad de los promedios horarios podría deberse a efectos de la marea, el campo de viento o procesos diurnos, mientras que el comportamiento de los datos diarios podría estar enmascarando procesos del orden de horas. Sin embargo, en general se evidencia como las dos líneas tienen una tendencia similar, con diferencias mínimas en el porcentaje de salida después de 30 días de simulación.

Figura 16

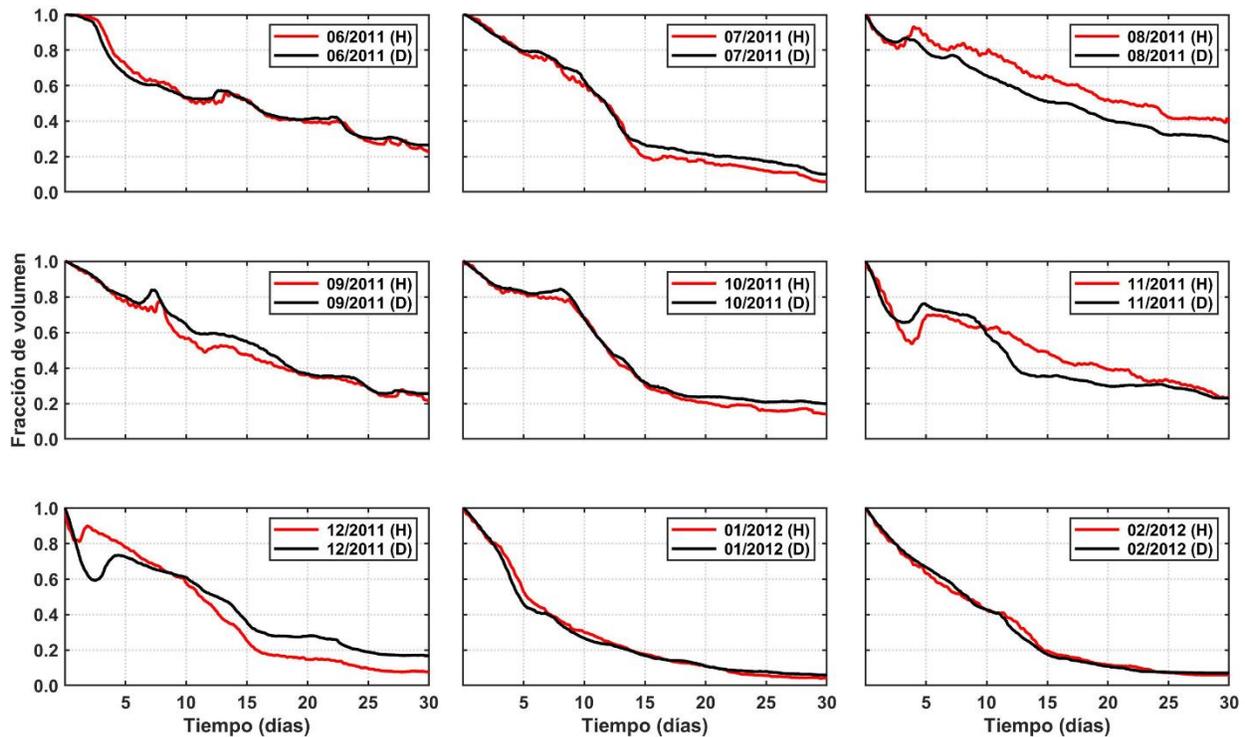
Fracción de volumen remanente de partículas vs tiempo. Comparación entre simulaciones con promedios horarios (línea roja) y promedios diarios (línea negra) de las salidas del modelo CROCO, para el período junio 2011 - febrero 2012, considerando la capa superficial (0-5 m) de bahía Colombia.



Con base en estos resultados, se optó por utilizar las salidas diarias para abarcar un mayor periodo de análisis. Esta elección permitió ampliar la perspectiva temporal y obtener una visión más completa de la dinámica de las partículas.

Figura 17

Fracción de volumen remanente de partículas vs tiempo. Comparación entre simulaciones con promedios horarios (línea roja) y promedios diarios (línea negra) de las salidas del modelo CROCO, para el período junio 2011 - febrero 2012, considerando la capa de fondo (5-25 m aprox.) de bahía Colombia.

**4.4.1. Tiempo de residencia en la capa superficial (TRS)**

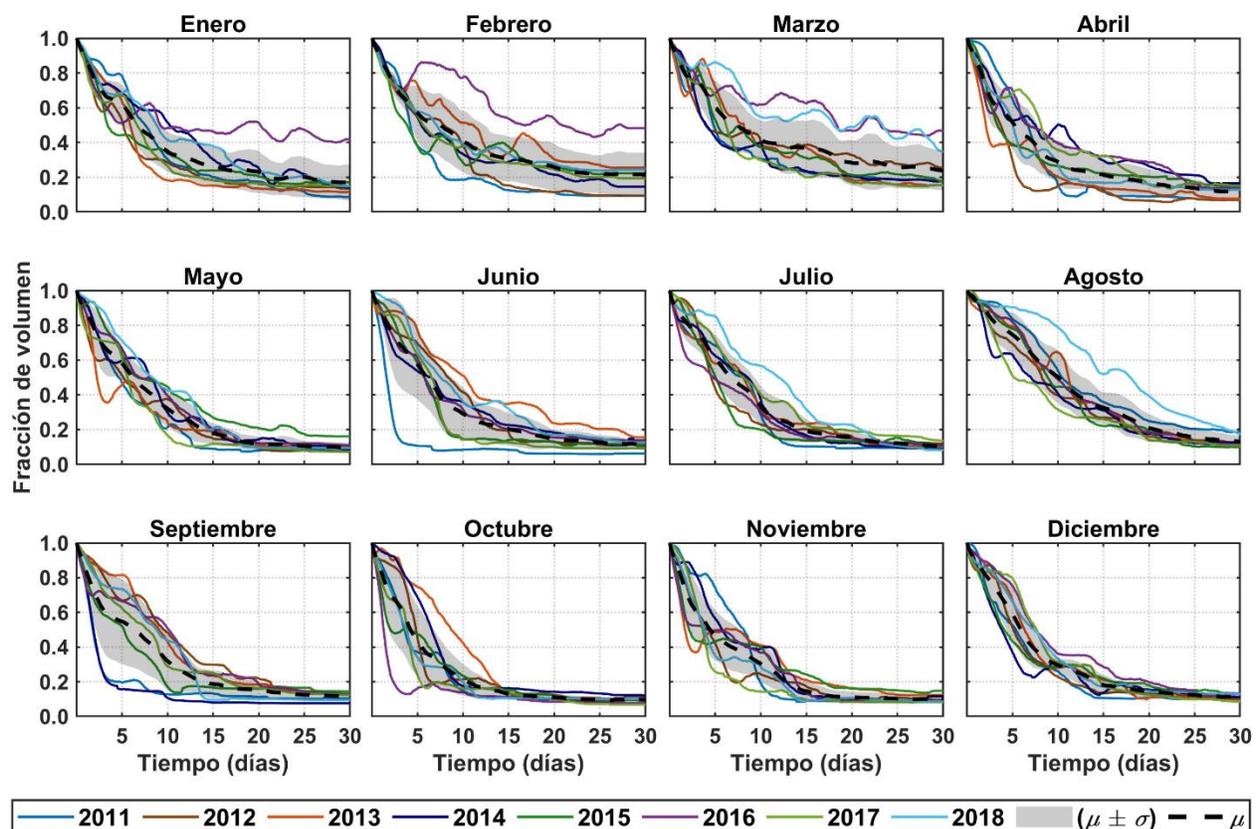
La Figura 18 muestra el comportamiento de los tiempos de residencia en la capa superficial (0-5 m) de bahía Colombia para periodo de 30 días de todos los meses del año entre 2011 y 2018. Es de notar que el TRS fue calculado con base en el criterio de evacuación del 80% del volumen de agua de la bahía.

Se puede observar que durante la estación seca (diciembre a abril) los TRS son generalmente más altos que durante la estación húmeda (mayo a noviembre). Este comportamiento se mantiene constante a lo largo los años, con una mínima variabilidad en la desviación estándar. Específicamente, diciembre tiene un valor de TRS menor, en comparación con los otros meses de esta época climática. Esto puede atribuirse a que es un mes de transición entre ambas épocas climáticas. En los meses de enero a marzo, se observa un aumento en los valores de TRS. En enero, se puede evidenciar un ligero aumento, pero, aun así, en la mayoría de los años, más del 80% del

volumen de agua sale del dominio durante los 30 días de simulación. Por su parte, febrero y marzo, exhiben los TRS más elevados en comparación con los otros meses del año, y adicionalmente con mayores valores de la desviación estándar.

Figura 18

Fracción de volumen (tiempo de residencia promedio) en función del tiempo (30 días) para la capa superficial (superficie a 5 m), obtenido a partir de simulaciones lagrangianas durante el período 2011-2018. Cada panel muestra la evolución del respectivo mes para cada uno de los años. Las líneas discontinuas representan la media (μ) y la franja gris una desviación estándar ($\mu \pm \sigma$) del conjunto de simulaciones.



Respecto a abril, puede considerarse como un mes de transición hacia la época húmeda, lo cual se evidencia con una disminución del valor de TRS. De mayo a noviembre se observan tiempos de residencia bajos, con más del 80% del volumen de agua evacuado en los primeros 15 días, a excepción de agosto. Es de notar, que la desviación estándar muestra variaciones significativas al inicio de cada uno de estos meses, pero luego de 15 días (en promedio) todos presentan una menor variación y una tendencia similar a lo largo de todos los años.

Estos resultados sugieren que, en la capa superficial de bahía Colombia, los tiempos de residencia son más cortos durante la época climática húmeda respecto a la época seca. Esto puede atribuirse a diversos factores, incluyendo el cambio en los patrones de vientos y en el caudal de los ríos de la región. Esto concuerda con lo propuesto por Toro *et al.* (2019) que muestran como durante febrero y marzo, los vientos alisios del norte y noroeste son los más intensos de todo el año (mayores a 5 m/s) y podrían retener las masas de agua en bahía Colombia e impedir que salgan rápidamente.

Por otro lado, durante la estación húmeda, los vientos alisios del sur son más débiles (menores a 5 m/s) y favorecen tiempos de residencia más cortos. Es de notar que, aunque estos vientos son menos intensos, su dirección facilita la salida de las masas de agua superficial de bahía Colombia, lo que coincide con TRS menores. Este comportamiento es consistente con las observaciones de Mosquera & Barrientos (2019), quienes documentaron una mayor recirculación de la masa de agua en la bahía Colombia a medida que se intensifican los vientos del sur.

En la Tabla 1 se muestra los TRS (en días) necesario para que el 80% del volumen de agua salga de bahía Colombia. Durante la época húmeda, los tiempos de residencia son en promedio inferiores a 20 días, mientras que durante la época seca son más variados, con algunos meses superando los 30 días. Los valores medios mensuales confirman lo que ya se ha mencionado.

Tabla 1

Tiempo de residencia (días) para el 80% del volumen de agua evacuada en bahía Colombia, para la capa superficial (superficie a 5 m), para el periodo comprendido entre 2011 y 2018. Los valores se encuentran codificados por colores: 0 a 20 días (azul), 20 a 30 días (verde), y superiores a 30 días (rojo).

MES	AÑO								MEDIA
	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	
Enero	15,3	13,5	9,3	25,7	20,5	>30	13,4	25,8	21,3
Febrero	8,0	13,1	>30	21,0	>30	>30	26,8	>30	>30
Marzo	21,0	>30	19,2	21,0	28,1	>30	19,0	>30	>30
Abril	9,6	5,6	10,1	26,0	22,0	23,5	18,9	11,0	16,3
Mayo	11,3	12,9	12,9	15,1	24,1	15,4	9,4	16,0	13,9
Junio	2,6	13,7	27,0	13,9	8,2	16,6	8,3	14,0	15,3
Julio	11,0	11,7	18,0	13,5	10,0	12,6	18,0	21,0	14,6
Agosto	27,4	17,6	19,8	17,5	19,8	19,0	18,6	28,5	20,8
Septiembre	6,9	21,3	16,9	3,4	9,7	19,8	16,5	13,2	13,5
Octubre	8,9	12,6	13,5	9,3	11,0	2,4	5,3	10,0	10,5
Noviembre	9,9	12,3	15,7	12,8	16,8	13,9	7,6	12,3	12,9
Diciembre	11,3	11,1	15,9	12,8	16,0	19,9	14,7	13,8	14,0

Se observa que, en los meses de abril, mayo, junio, julio, septiembre, octubre, noviembre y diciembre, los tiempos de residencia fueron inferiores a 17 días, siendo octubre el mes con el tiempo de residencia más bajo (10,5 días). Agosto y enero presentaron un tiempo de residencia de 20,8 y 21,3 días, respectivamente. Febrero y marzo, registraron los tiempos de residencia más extensos, superando los 30 días. Esto indica que, en la capa superficial, los tiempos de residencia son más cortos durante la época húmeda que durante la época seca.

La Tabla 2 presenta el porcentaje de salida del volumen de agua en bahía Colombia en la capa superficial después de transcurridos 30 días. Se observa cómo, de abril a enero, más del 80% del volumen de agua salió de la bahía, siendo octubre el mes con la mayor salida de volumen de agua. En febrero y marzo, después de los 30 días de simulación, no se alcanza a evacuar el 80% del volumen de agua. En febrero sale el 78,3% y en marzo el 76,2% en comparación con la media de todos los años, lo que indica que el tiempo de residencia es superior a 30 días.

Tabla 2

Tiempo de residencia (porcentaje) del volumen de agua en bahía Colombia, en la capa superficial (superficie a 5 m), para el periodo comprendido entre 2011 y 2018. Los valores se encuentran codificados por colores: mayor a 80% (azul), y menor a 80% (rojo).

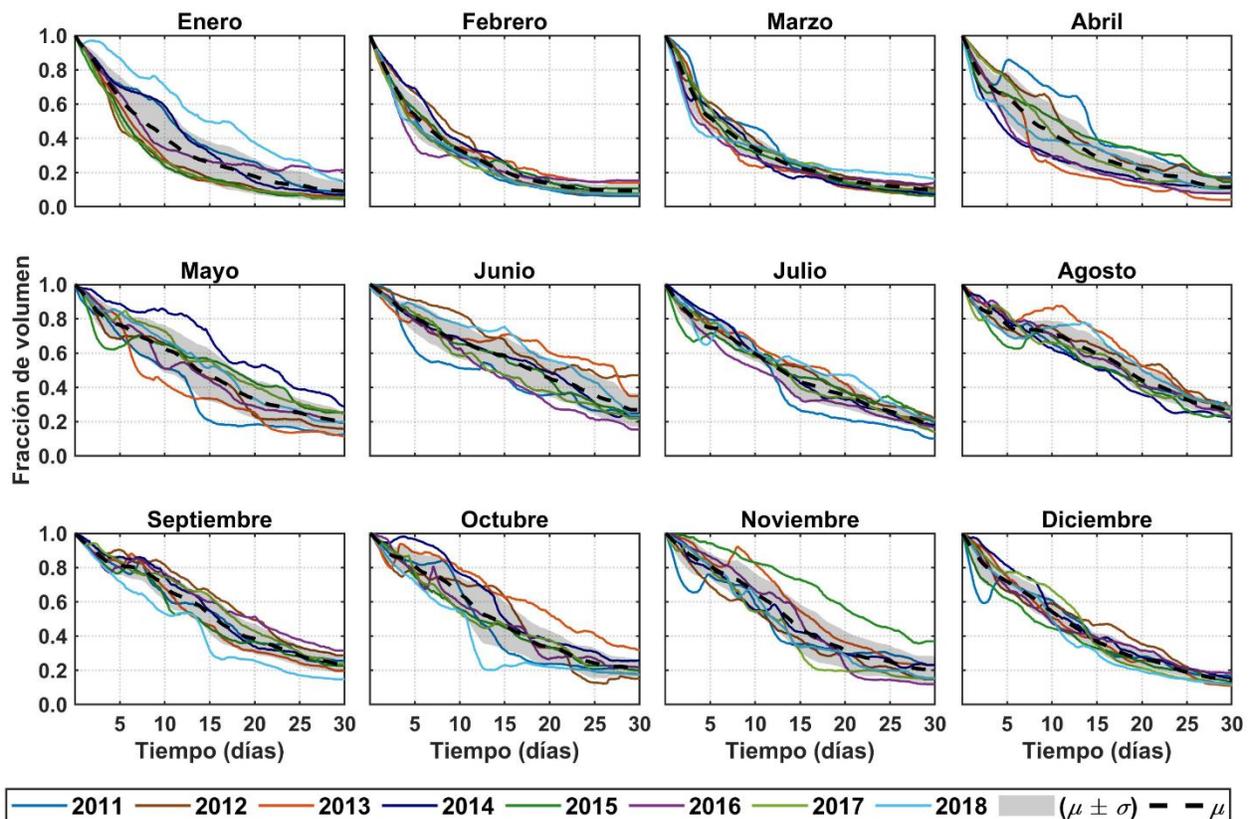
MES	AÑO								MEDIA
	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	
Enero	91,4%	86,4%	88,4%	85,8%	82,9%	58,5%	85,3%	85,1%	83,0%
Febrero	90,7%	90,6%	74,5%	85,4%	77,7%	51,7%	80,6%	75,7%	78,3%
Marzo	82,5%	74,8%	84,5%	82,3%	82,5%	53,3%	84,4%	65,4%	76,2%
Abril	92,8%	93,0%	92,2%	83,5%	85,5%	86,3%	84,8%	87,2%	88,2%
Mayo	92,2%	92,9%	90,2%	91,3%	83,9%	89,1%	92,7%	90,5%	90,4%
Junio	93,7%	88,8%	84,4%	86,2%	89,5%	86,6%	90,8%	87,4%	88,4%
Julio	91,0%	88,2%	89,7%	91,7%	88,9%	88,9%	86,3%	91,8%	89,6%
Agosto	81,7%	87,6%	87,9%	87,3%	90,1%	88,5%	89,2%	82,6%	86,9%
Septiembre	89,6%	87,1%	87,0%	92,4%	85,6%	87,2%	87,6%	90,6%	88,4%
Octubre	90,5%	88,5%	90,1%	88,1%	90,7%	92,4%	93,3%	90,1%	90,5%
Noviembre	91,5%	90,5%	87,6%	88,5%	85,2%	91,2%	91,8%	91,4%	89,7%
Diciembre	90,2%	88,9%	91,1%	88,9%	87,4%	86,7%	91,6%	87,3%	89,0%

4.4.2. Tiempo de residencia en la capa de fondo (TRF)

En la capa profunda se observa como durante la época seca, los tiempos de residencia son inferiores en comparación con la época húmeda (Figura 19). En el periodo comprendido entre diciembre y abril, los TRF son los más bajos, y en todos los años analizados, al menos el 80% del volumen de agua sale de la bahía durante los 30 días de simulación. Esta tendencia no se repite en los meses de mayo a noviembre, donde los TRF en la capa de fondo son más elevados.

Figura 19

Fracción de volumen (tiempo de residencia promedio) en función del tiempo (30 días) para la capa de fondo (5 m al fondo), obtenido a partir de simulaciones lagrangianas durante el período 2011-2018. Cada panel muestra la evolución del respectivo mes para cada uno de los años. Las líneas discontinuas representan la media (μ) y la franja gris una desviación estándar ($\mu \pm \sigma$) del conjunto de simulaciones.



Esta diferencia puede explicarse debido al comportamiento de la circulación en la bahía. Durante la época seca, el volumen de agua parece salir a través de una capa más profunda (Figura 14) en comparación con la salida de flujo observada durante la época húmeda (Figura 15). Esto sugiere que el TRF podría estar influenciado directamente por los patrones de circulación y por la profundidad de bahía Colombia. Además, los resultados sugieren que el TRF de bahía Colombia está relacionado con la estacionalidad: es más bajo durante la época seca y más alto durante la época húmeda.

La Tabla 3 muestra los tiempos de residencia (días) para el 80% del volumen. Se observa como en la mayoría de los meses de la época húmeda, el TRF es superior a 30 días, mientras que

en la época seca es menor a 30 días. Los valores medios mensuales de los TRF, en los meses de junio y agosto a noviembre, muestran como el porcentaje de salida del volumen de agua se mantiene por encima de los 30 días para lograr el 80% de renovación de agua de la bahía, lo que indica tiempos de residencia altos durante estos meses.

Tabla 3

Tiempo de residencia (días) para el 80% del volumen de agua evacuada en bahía Colombia, para la capa de fondo (5 m a fondo), para el periodo comprendido entre 2011 y 2018. Los valores se encuentran codificados por colores: 0 a 20 días (azul), 20 a 30 días (verde), y superiores a 30 días (rojo).

MES	AÑO								MEDIA
	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	
Enero	22,0	13,7	12,0	18,3	11,8	>30	12,5	27,3	18,9
Febrero	12,9	14,5	18,2	16,7	17,2	15,3	13,5	14,1	15,3
Marzo	16,5	18,7	15,1	12,8	17,0	15,9	18,5	23,7	17,3
Abril	25,8	26,0	11,8	16,4	26,7	15,0	19,3	22,0	21,3
Mayo	15,3	25,7	20,9	>30	>30	29,1	>30	28,2	29,5
Junio	>30	>30	>30	>30	>30	27,4	>30	>30	>30
Julio	22,2	30,0	>30	26,8	30,0	27,3	27,7	>30	28,5
Agosto	>30	>30	>30	>30	>30	>30	>30	>30	>30
Septiembre	>30	>30	29,0	>30	>30	>30	>30	23,0	>30
Octubre	29,6	22,5	>30	>30	29,9	>30	24,6	24,5	>30
Noviembre	>30	26,1	>30	>30	>30	20,4	18,7	23,9	>30
Diciembre	24,3	26,0	24,3	26,3	25,7	25,9	21,0	19,7	24,2

En los meses de abril, mayo, julio y diciembre, los TRF se encuentran entre los 20 y 30 días, siendo abril el mes con el TRF más bajo (21,3 días). En los meses de enero, febrero y marzo, los TRF fueron inferiores a 30 días, con salidas en 18,9, 15,3 y 17,3 días, respectivamente.

En la tabla 4 se presentan los porcentajes del volumen de agua evacuada de la bahía en la capa profunda después de 30 días de simulación. Respecto a los valores medios mensuales, se observa una marcada diferencia estacional en el comportamiento de los TRF. En los meses de junio y agosto a noviembre, no se alcanza a superar la salida del 80% del volumen de agua durante los 30 días, lo que indica un tiempo de residencia alto en comparación con los meses de enero, febrero,

marzo, abril, mayo, julio y diciembre, donde se logra evacuar más del 80% del volumen de agua en los 30 días simulados, siendo enero el mes con la mayor salida de volumen de agua.

Tabla 4

Tiempo de residencia (porcentaje) del volumen de agua en bahía Colombia, en la capa de fondo (5 m a fondo), para el periodo comprendido entre 2011 y 2018. Los valores se encuentran codificados por colores: mayor a 80% (azul), y menor a 80% (rojo).

MES	AÑO								MEDIA
	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	
Enero	91,6%	94,2%	94,2%	92,1%	95,1%	78,5%	94,6%	84,9%	90,7%
Febrero	93,7%	93,0%	85,1%	92,4%	89,2%	84,6%	92,0%	92,7%	90,4%
Marzo	92,0%	89,1%	93,1%	92,7%	93,7%	85,8%	90,4%	83,7%	90,1%
Abril	82,5%	83,7%	95,8%	89,3%	85,3%	92,0%	89,0%	89,3%	88,4%
Mayo	87,4%	84,1%	88,7%	71,2%	74,7%	80,6%	75,2%	80,2%	80,3%
Junio	76,7%	52,9%	65,1%	75,3%	75,9%	84,5%	78,1%	76,1%	73,1%
Julio	90,0%	79,0%	79,1%	82,1%	80,1%	83,4%	86,1%	78,9%	82,3%
Agosto	71,7%	71,5%	71,5%	77,9%	76,8%	77,8%	73,0%	72,4%	74,1%
Septiembre	74,5%	71,2%	80,2%	76,4%	77,3%	68,4%	76,4%	85,2%	76,2%
Octubre	80,2%	84,8%	68,2%	74,1%	80,2%	78,3%	82,6%	82,3%	78,8%
Noviembre	77,0%	85,3%	76,8%	76,7%	63,0%	88,1%	85,0%	84,5%	79,6%
Diciembre	83,3%	84,3%	89,1%	84,7%	87,2%	81,6%	88,4%	88,1%	85,8%

De acuerdo con los resultados aquí obtenidos los TR son menores en la época húmeda que en la seca. Esto coincide con lo mencionado por Toro *et al.*, 2019 para la zona de bahía Colombia. Esto autores observaron de manera casi permanente un corte de velocidades en vertical, con un flujo de agua que sale por la capa superficial de la costa oeste (en casi todo su ancho) y entra desde una capa intermedia y cerca del fondo por el lado este del golfo de Urabá. De acuerdo con sus resultados, en los últimos tres trimestres, de manera especial julio, agosto y septiembre, los valores de las magnitudes son mayores lo que indicaría una mayor circulación al interior de bahía Colombia y un mejor intercambio con la zona centro del golfo de Urabá. A partir de esto, sugirieron que los tiempos de residencia en bahía Colombia podrían ser menores en la época húmeda.

5. Conclusiones

El estudio sobre la dinámica de masas de agua en bahía Colombia, basado en mediciones *in situ* y la implementación de un modelo numérico hidrodinámico, reveló la presencia de dos capas con características distintivas de temperatura y salinidad: una capa superficial menos densa debido a la influencia de agua dulce y una capa de fondo más densa y salina. Esta estratificación vertical, identificada tanto en estudios previos como en el presente trabajo, se encuentra modulada por factores climáticos y corrientes oceánicas. Los resultados del modelo numérico sugieren una tendencia general consistente con los datos *in situ*, lo que valida su utilidad para representar de las condiciones oceanográficas del golfo y de manera especial en bahía Colombia.

Los patrones de circulación en bahía Colombia revelaron la presencia de un giro anticiclónico permanente en la bahía, que se extiende desde la superficie hasta el fondo y es influenciado por factores climáticos como los vientos alisios del norte y noroeste durante la época seca y los vientos del sur durante la época húmeda. Durante la época seca, las corrientes superficiales exhiben velocidades más altas en comparación con la época húmeda y muestran un flujo que entra por el este de la bahía y una salida por el oeste, impulsadas por los vientos del norte. Por otro lado, durante la época húmeda, se observó principalmente un flujo que sale por el oeste, influenciado por un mayor caudal del río Atrato y, aunque más débiles, vientos del sur. Además, se identificó corrientes de magnitudes considerablemente menores en la capa de fondo en comparación con la capa superficial. Finalmente se evidenció un flujo que entra por el fondo y sale por el mismo medio, sugiriendo procesos de intercambio de agua entre bahía Colombia y la parte media y alta del golfo de Urabá.

El análisis de las trayectorias de las masas de agua en bahía Colombia reveló patrones distintivos influenciados por factores climáticos y geográficos. Durante la época seca, las trayectorias en la capa superficial mostraron una distribución por todo el golfo de Urabá antes de su salida, con profundidad media de 8 m. En contraste, durante la época húmeda, las masas de agua tendieron a salir por el este de la bahía, posiblemente debido al aumento del caudal del río Atrato. En ambas épocas, las trayectorias en la capa de fondo ascendieron hacia la superficie antes de salir, aunque algunas pudieron mantenerse a profundidades inferiores. Este análisis proporciona un entendimiento fundamental para determinar el TR de las masas de agua en la bahía.

Los TR en la capa superficial de bahía Colombia mostraron un patrón consistente a lo largo de los años, con períodos más cortos durante la época húmeda y períodos más largos durante la época seca. Diciembre es un mes de transición, evidenciando tiempos de residencia más bajos debido a una circulación más rápida. Los meses de enero a marzo mostraron un aumento progresivo en los TR, alcanzando su punto máximo durante estos meses, lo cual se encuentra especialmente influenciado por los vientos alisios del norte. Durante la época húmeda, los vientos del sur contribuyeron a TR más cortos y la desviación estándar mostró una consistencia en la tendencia de los TR a lo largo de los años, con mayores variaciones al principio de cada mes, pero una tendencia más uniforme luego de 15 días. En contraste, en la capa de fondo, los TR fueron más bajos durante la época seca y más altos durante la época húmeda. Esto se atribuyó al comportamiento de la circulación, donde el volumen de agua parece salir a través de una capa más profunda durante la época seca en comparación con la época húmeda. Esto indica que los TR en bahía Colombia están influenciados por la estacionalidad, los vientos, la circulación, los aportes fluviales y la batimetría, con patrones consistentes tanto en la capa superficial como en la capa de fondo a lo largo de los años estudiados.

Finalmente, los resultados sugieren que en bahía Colombia, el tiempo de residencia del agua en la capa superficial es menor durante la época húmeda en comparación con la época seca. Durante la época húmeda, la mayoría de los meses muestran tiempos de residencia por debajo de 20 días, mientras que en la época seca los tiempos de residencia fueron más variables, con algunos meses superando los 30 días. En la capa superficial, los meses de abril a julio y septiembre a diciembre exhiben tiempos de residencia menores a 17 días, siendo octubre el mes con el tiempo más bajo (10,5 días). Por otro lado, agosto y enero presentaron tiempos de residencia más prolongados, alrededor de 20,8 y 21,3 días, respectivamente. Febrero y marzo mostraron los tiempos de residencia más altos, superando los 30 días, lo que indica que el tiempo de residencia es más prolongado durante la época seca que en la época húmeda en la capa superficial.

En cuanto al porcentaje de salida después de 30 días en la capa superficial, los meses de abril a enero muestran que más del 80% del volumen de agua sale de la bahía, siendo octubre el mes con la mayor salida. Febrero y marzo muestran cómo no alcanza a salir el 80% del volumen de agua después de 30 días, indicando TR superiores a 30 días. En la capa de fondo, durante la

época húmeda, la mayoría de los meses muestran TR superiores a 30 días, mientras que en la época seca son menores a 30 días. Junio, agosto a noviembre presentan tiempos de residencia altos, con porcentajes de salida superiores a 30 días. De enero a marzo, los TR son menores a 30 días. Por lo tanto, los datos sugieren una clara diferencia en los TR del agua entre la época húmeda y seca, con variaciones significativas entre meses y entre capas superficial y de fondo.

En las dos capas mencionadas se analizó el comportamiento de la circulación y se calculó el TR. Al estudiar estas capas por separado, se obtiene una visión más adecuada de la circulación y de cómo interactúan los procesos hidrodinámicos en cada una de ellas. Este enfoque permitió examinar en detalle los patrones de circulación en bahía Colombia y entender la dinámica del flujo de agua en diferentes profundidades. Estos hallazgos son fundamentales para la comprensión de los procesos oceanográficos en la bahía y su influencia en el transporte de nutrientes, sedimentos y organismos, entre otros aspectos relevantes para el ecosistema marino.

6. Recomendaciones

Se recomienda llevar a cabo campañas de medición periódicas en el golfo de Urabá para obtener una caracterización más precisa de los patrones de circulación en bahía Colombia y comprender cómo influyen en los tiempos de residencia. Estas campañas pueden incluir mediciones de corrientes, mareas, temperatura y salinidad, entre otros parámetros relevantes.

Se requiere una validación más exhaustiva del modelo numérico y una mayor recopilación de datos para comprender la dinámica de las masas de agua en la región. Esto implica realizar mediciones *in situ*, recopilar datos oceanográficos y analizarlos en conjunto con el modelo para mejorar su precisión y confiabilidad.

Se sugiere incorporar la investigación de contaminantes u otros trazadores específicos para comprender cómo se comportan en relación con los tiempos de residencia. Esto puede brindar información adicional sobre la dispersión y la dinámica de los flujos de agua en la bahía.

Referencias

- Álvarez, A. M., & Bernal, G. R. (2007). Estimación del campo de transporte neto de sedimentos en el fondo de Bahía Colombia con base en análisis de tendencia del tamaño de grano. *Avances en recursos Hidráulicos*, (16), 41-50.
- Bedoya Henao, Y. A. (2023). Modulación a la circulación oceánica en el Golfo de Urabá debido a condiciones meteomarinas y a la descarga de ríos [Tesis de maestría]. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.
- Bernal, G., Montoya, L. J., Garizábal, C., & Toro, M. (2005). La complejidad de la dimensión física en la problemática costera del Golfo de Urabá, Colombia. *Gestión y ambiente*, 8(1), 123-135.
- Braunschweig, F., Chambel, P., Martins, F., Neves, R. (2003). A methodology to estimate the residence time of estuaries. *Ocean Dynamics* 53, 137-145.
- Chevillot, P., Molina Márquez, A., Giraldo Ospina, L., & Molina Márquez, C. (1993). Estudio geológico e hidrológico del Golfo de Urabá. *Boletín Científico CIOH*, (14), 79–90. https://doi.org/10.26640/01200542.14.79_90
- Choi, K. W., Lee, J. H. W., (2004). Numerical determination of flushing time for stratified water bodies. *Journal of Marine Systems* 50(3-4),263-281.
- Córdoba Mena, N. I. (2020). Variabilidad espaciotemporal de las microalgas fitoplanctónicas con énfasis en las productoras de biotoxinas y su relación con las concentraciones de nutrientes en el Golfo de Urabá, Caribe colombiano.
- Correa, I. D., & Restrepo, J. D. (2002). Geología y Oceanografía del delta del río San Juan. Litoral Pacífico colombiano. Universidad EAFIT (pp. 285–299). EAFIT.
- Croco – Coastal and Regional Ocean COmmunity model. (2022). Disponible en: <https://www.croco-ocean.org/>
- Cucco, A., Umgiesser, G., (2006). Modeling the Venice Lagoon residence time. *Ecological Modelling* 193, 34-51.
- Cucco, A., Umgiesser, G., Ferrarin, C., Perilli, A., Melaku Canu, D., Solidoro, C., (2009). Eulerian and Lagrangian transport time scales of a tidal active coastal basin. *Ecological Modelling* 220 (7), 913-922.
- Du, J., & Shen, J. (2016). Water residence time in Chesapeake Bay for 1980–2012. *Journal of Marine Systems*, 164, 101–111. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2016.08.011>

- Escobar, C.A.; Velásquez, L., & Posada, F. (2015). Marine currents in the Gulf of Urabá, Colombian Caribbean Sea. *Journal of Coastal Research*, 31(6), 1363–1374. Coconut Creek (Florida), ISSN 0749-0208.
- Fujiwara, T., Takahashi, T., Kasai, A., Sugiyama, Y., Kuno, M., (2002). The role of circulation in the development of hypoxia in Ise Bay, Japan. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 54 (1), 19-31.
- García, C. (2007). Atlas del golfo de Urabá: una mirada al Caribe de Antioquia y Chocó. Santa Marta, Colombia. Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras –Invemar– y Gobernación de Antioquia. Serie de Publicaciones Especiales de Invemar No 12. 180p. ISBN: 978-958-98104-3-9.
- Gobernación de Antioquia, Universidad de Antioquia, Universidad Nacional y Universidad del Norte (2021). Erosión Costera en el Litoral Antioqueño. Compilación de resultados. (Formatos impreso y digital). © Medellín / Antioquia / Colombia. Litografía Grafiservicios S.A.S
- Gómez, J. J. P. (1995). UN MODELO DE CAJA APLICADO AL TRANSPORTE DE PARTÍCULAS Y TIEMPO DE RESIDENCIA DE LAS AGUAS DEL SECTOR " EL PINDO"(ENSENADA DE TUMACO). *Boletín Científico Centro de Control de Contaminación del Pacífico (CERRADO EN 2009)*, 5, 5-35.
- Gómez-Gesteira, M., de Castro, M., Prego, R. (2003). Dependence of the water residence time in Ria of Pontevedra (NW Spain) on the seawater infl ow and the river discharge. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 58. 567-573.
- Gong, W., Shen, J., & Jia, J. (2008). The impact of human activities on the flushing properties of a semi-enclosed lagoon: Xiaohai, Hainan, China. *Marine Environmental Research*, 65(1), 62–76. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2007.08.00>
- INVEMAR. (2003). Diagnóstico, zonificación y definición de la estructura administrativa de manejo de la unidad ambiental costera del Darién, Caribe Colombiano. Fase I. Caracterización y Diagnóstico. Informe técnico preliminar. Colombia. 698
- Jiménez Ruiz, G. A., & Campillo Cuervo, L. L. (2020). Caracterización termohalina de las masas de agua del golfo de Urabá. Caso específico desembocadura del río León y el río Atrato.
- Kenov, I. A., Garcia, A. C., & Neves, R. (2012). Residence time of water in the Mondego estuary (Portugal). *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 106, 13-22.

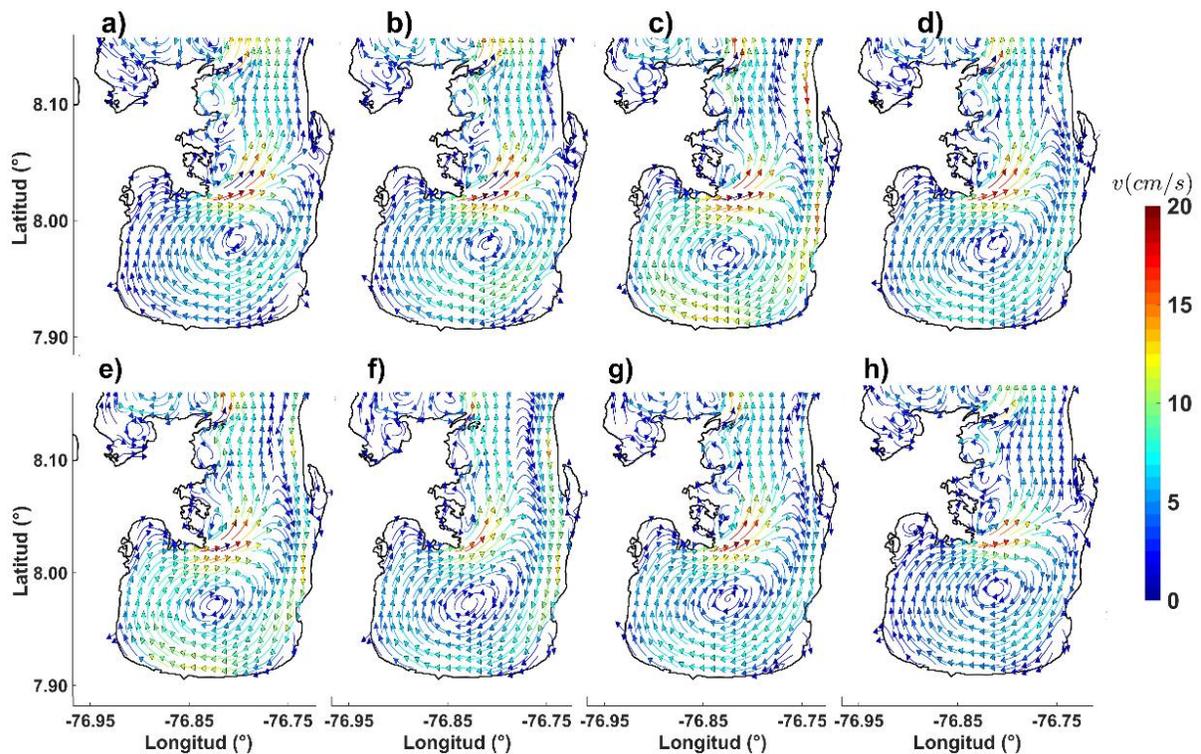
- Liu, L. (2018). Application of a Hydrodynamic and Water Quality Model for Inland Surface Water Systems. *In Applications in Water Systems Management and Modeling*. InTech. <https://doi.org/10.5772/intechopen.74914>
- Lonin, S. y Vásquez A., J. G. (2005). Hidrodinámica y distribución de coniformes en el Golfo de Urabá. *Boletín Científico CIOH*. No. 23: pp. 76-89
- Malhadas, M.S., Leitão, P.C., Silva, A., Neves, R., (2009). Effect of the bathymetric changes on the hydrodynamic and residence time in Óbidos Lagoon (Portugal). *Journal of Coastal Research SI56*, 549e553.
- Malhadas, M.S., Neves, R., Leitão, P.C., Silva, A., (2010). Influence of tide and waves on water renewal in Óbidos Lagoon, Portugal. *Ocean Dynamics* 60 (1), 41e55.
- Molina M, A., Molina M., C. y Chevillot, P. (1992). Percepción remota aplicada para determinar la circulación de las aguas superficiales del Golfo de Urabá y las variaciones de su línea de costa. *Boletín Científico CIOH*. No 11: pp. 43-58.
- Monsen, N.E., Cloern, J.E., Lucas, L.V., (2002). A comment on the use of flushing time, residence time, and age as transport time scales. *Limnology and Oceanography* 47 (5), 1545e1553.
- Montoya Jaramillo, L. J. (2010). Dinámica oceanográfica del golfo de Urabá y su relación con los patrones de dispersión de contaminantes y sedimentos. [Tesis doctoral]. Universidad Nacional de Colombia.
- Montoya, L. J. & Toro B., F. M. (2006). Calibración de un modelo hidrodinámico para el estudio de los patrones de circulación en el golfo de Urabá, Colombia. *Avances en Recursos Hidráulicos*, No. 13: pp. 37-54.
- Mosquera, W. A., & Barrientos, N. S. (2019). Modulación a la circulación oceánica en el golfo de Urabá por la ocurrencia de eventos atmosféricos de baja y alta frecuencia [Tesis de pregrado]. Universidad de Antioquia, sede de Ciencias del Mar, Turbo.
- OpenDrift. (2022). Introduction to OpenDrift. Disponible en: <https://opendrift.github.io/>
- Orfila. A.. Jordi. A.. Basterretxea. G.. Vizoso. G.. Marbà. N.. Duarte. C. M.. Werner. F. E. Tintoré. J. (2005). Residence time and *Posidonia oceanica* in Cabrera Archipelago National Park. Spain. *Continental Shelf Research*. 25. 1339-1352.
- Osorio, A, Gomez, A, Molina, L., Alvarez, O., & Osorio, J. (2010). Bases metodológicas para caracterizar el oleaje local (SEA) y de fondo (SWELL) en el Golfo de Urabá. XXIV Congreso Latinoamericano de Hidráulica, 1–12.

-
- Roldán, P. A. (2008). Modelamiento del patrón de circulación de la bahía Colombia, Golfo de Urabá. Implicaciones para el transporte de sedimentos [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia].
- Schneider, W., Fuenzalida, R., & Garcés, J. (2004). Corrientes marinas y masas de agua. *Biología Marina y Oceanografía: Conceptos y proceso*. Ed. C. Werliger, 1.
- Takeoka, H. (1984). Fundamental concepts of exchange and transport time scales in a coastal sea. *Continental Shelf Research*. 3(3). 311-326.
- Toro, V. G., Mosquera, W., Barrientos, N., & Bedoya, Y. (2019). Circulación oceánica del golfo de Urabá usando campos de viento de alta resolución temporal. *Boletín científico CIOH*, 38(2), 41-56.
- Uncles, R.J., Joint, I., Stephens, J.A., (1998). Transport and retention of suspended particulate matter and bacteria in the Humber-Ouse estuary, U.K., and their relationship with hypoxia and anoxia. *Estuaries* 21, 597-612.
- Wolanski, E., (2007). *Estuarine Ecohydrology*. Elsevier, Amsterdam, 157 pp.

Anexos

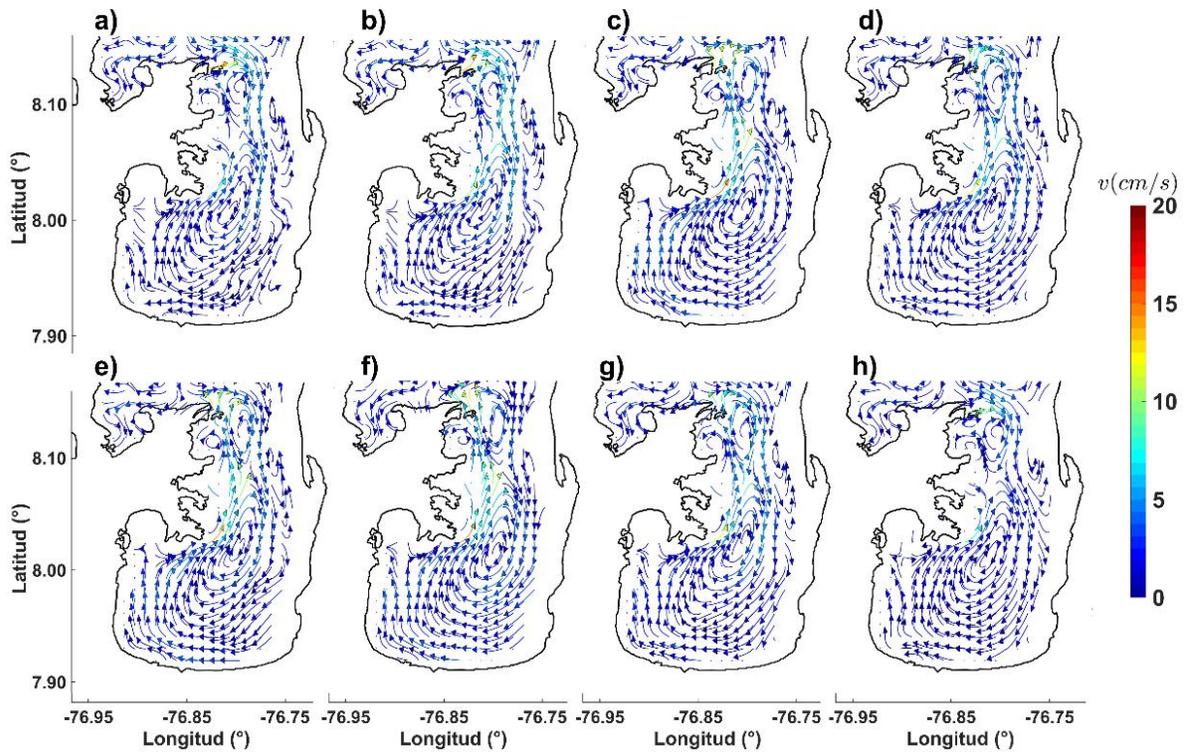
Anexo 1

Campos de velocidad de las corrientes marinas mensuales de enero en bahía Colombia, obtenidos mediante modelación numérica en la capa superficial integrada desde la superficie hasta 5 m de profundidad para los años: a) 2011, b) 2012, c) 2013, d) 2014, e) 2015, f) 2016, g) 2017, h) 2018. Las flechas indican la dirección y la escala de colores representa la magnitud de las velocidades (cm/s).



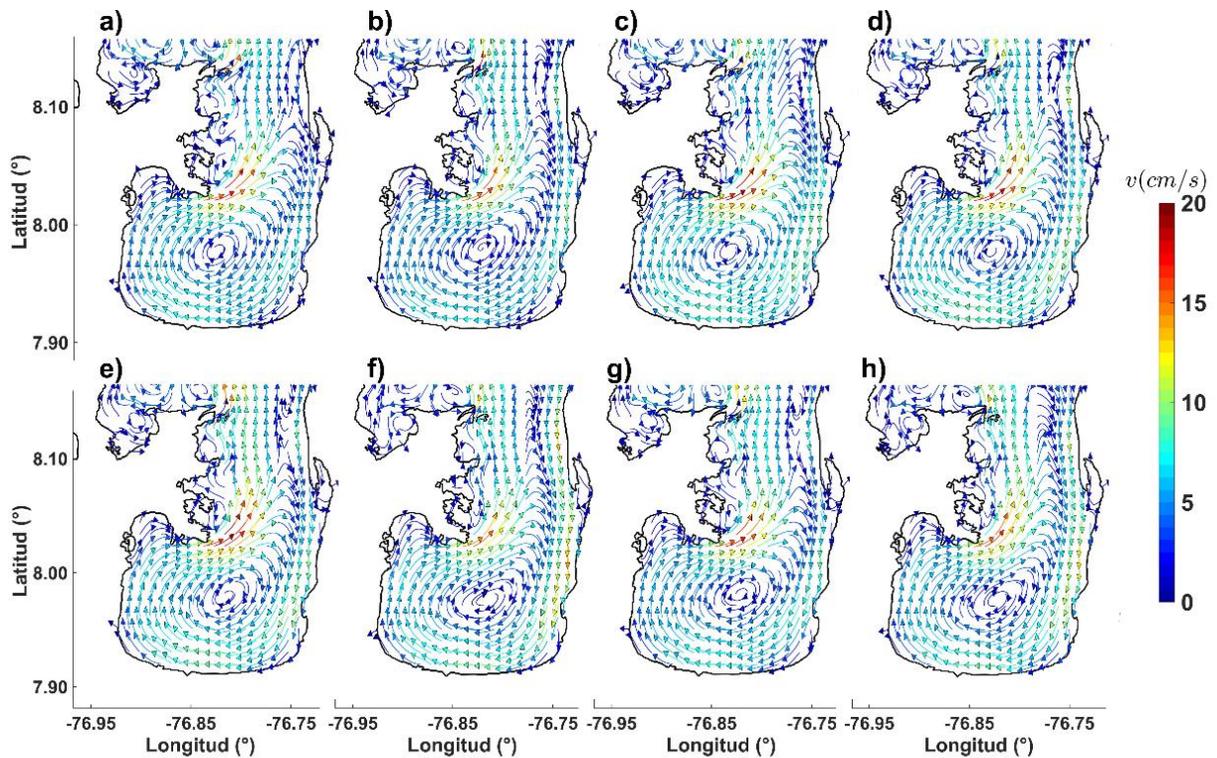
Anexo 2

Campos de velocidad de las corrientes marinas mensuales de enero en bahía Colombia, obtenidos mediante modelación numérica en la capa integrada desde los 5 m de profundidad hasta el fondo para los años: a) 2011, b) 2012, c) 2013, d) 2014, e) 2015, f) 2016, g) 2017, h) 2018. Las flechas indican la dirección y la escala de colores representa la magnitud de las velocidades (cm/s).



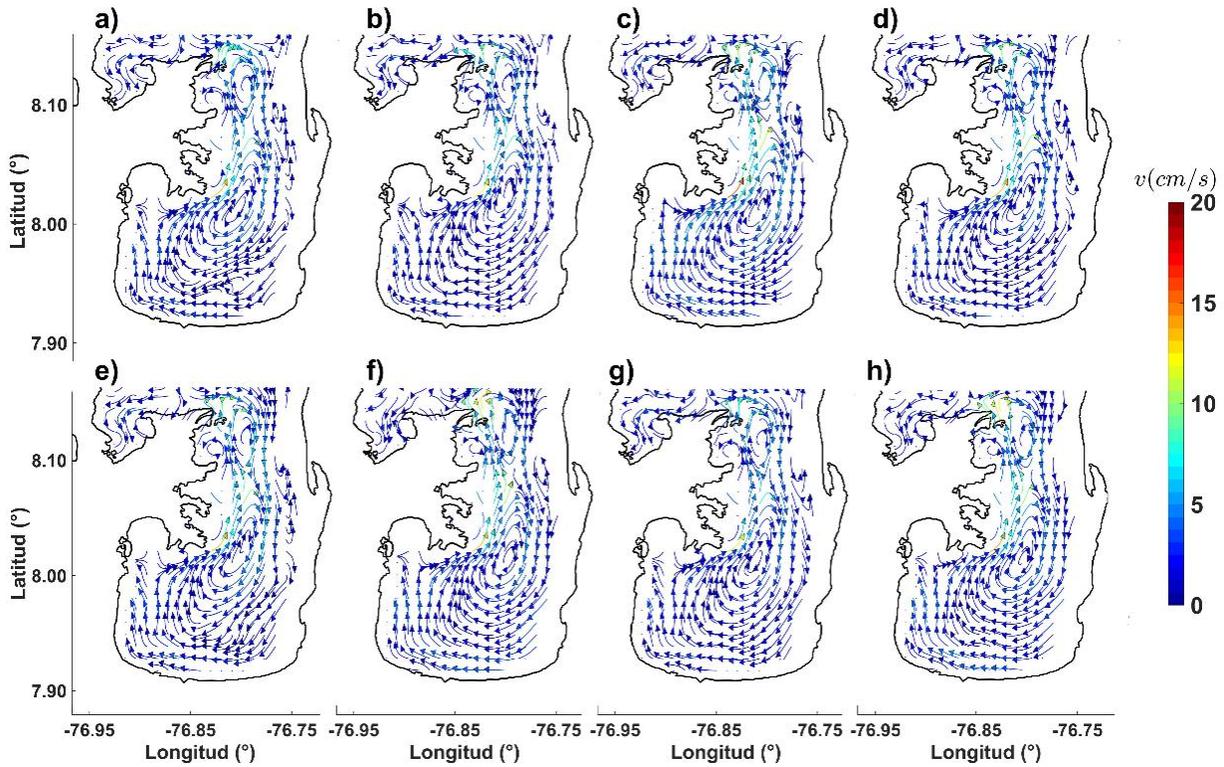
Anexo 3

Campos de velocidad de las corrientes marinas mensuales de marzo en bahía Colombia, obtenidos mediante modelación numérica en la capa superficial integrada desde la superficie hasta 5 m de profundidad para los años: a) 2011, b) 2012, c) 2013, d) 2014, e) 2015, f) 2016, g) 2017, h) 2018. Las flechas indican la dirección y la escala de colores representa la magnitud de las velocidades (cm/s).



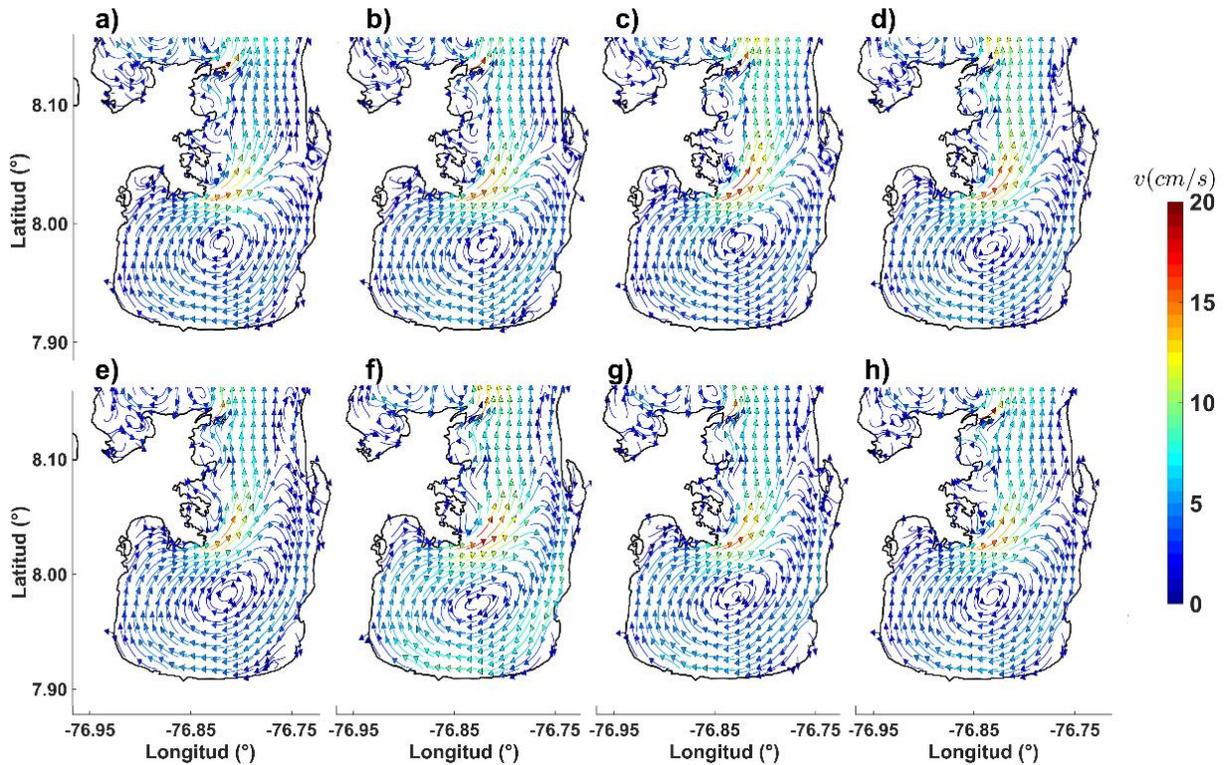
Anexo 4

Campos de velocidad de las corrientes marinas mensuales de marzo en bahía Colombia, obtenidos mediante modelación numérica en la capa integrada desde los 5 m de profundidad hasta el fondo para los años: a) 2011, b) 2012, c) 2013, d) 2014, e) 2015, f) 2016, g) 2017, h) 2018. Las flechas indican la dirección y la escala de colores representa la magnitud de las velocidades (cm/s).



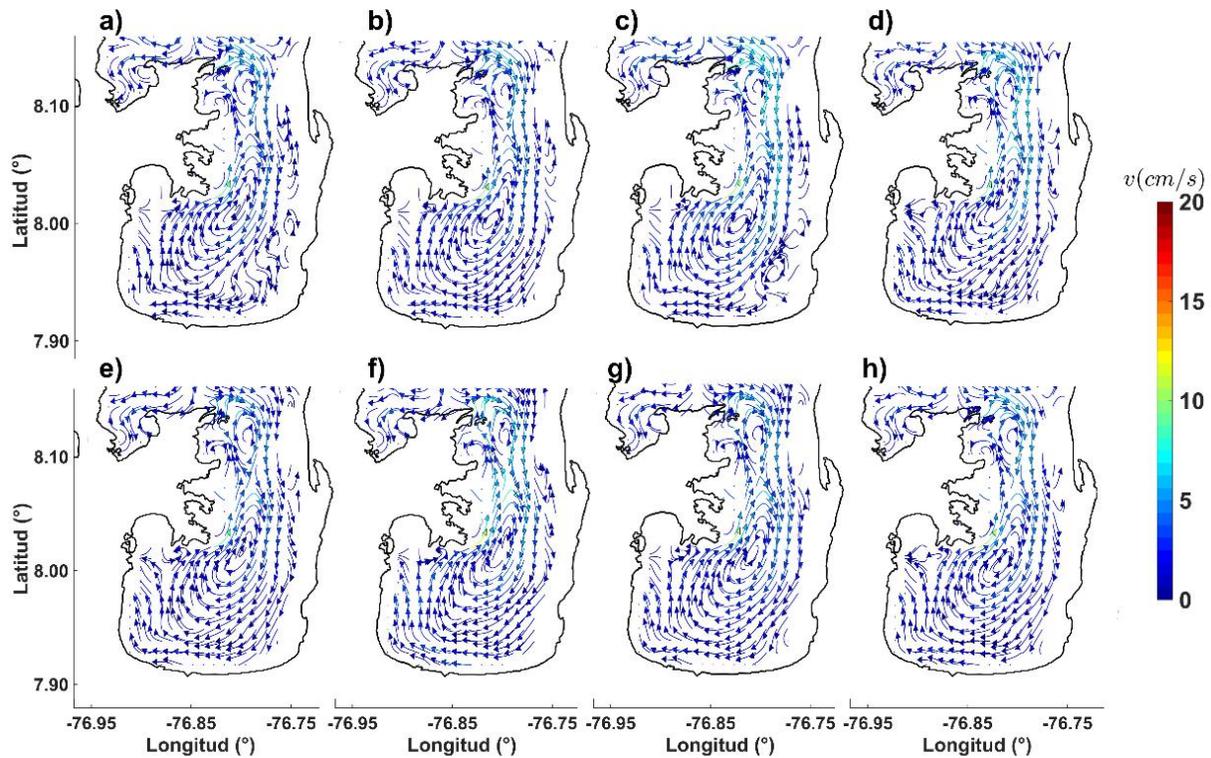
Anexo 5

Campos de velocidad de las corrientes marinas mensuales de abril en bahía Colombia, obtenidos mediante modelación numérica en la capa superficial integrada desde la superficie hasta 5 m de profundidad para los años: a) 2011, b) 2012, c) 2013, d) 2014, e) 2015, f) 2016, g) 2017, h) 2018. Las flechas indican la dirección y la escala de colores representa la magnitud de las velocidades (cm/s).



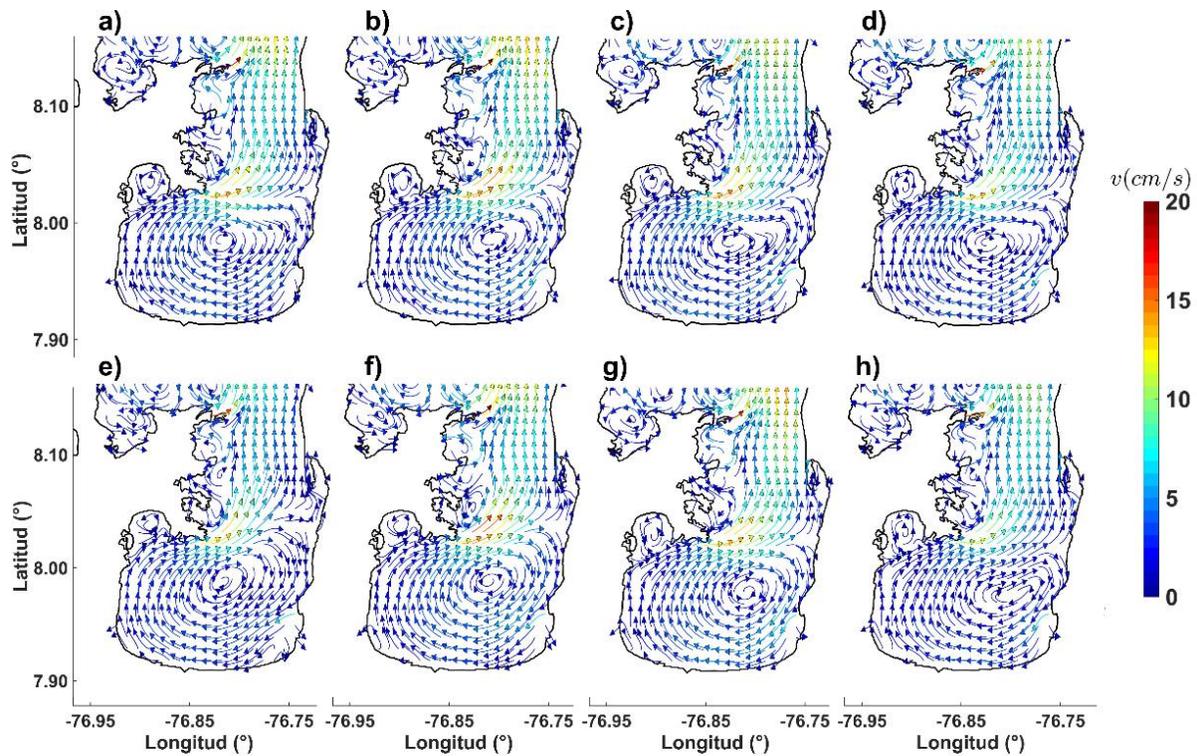
Anexo 6

Campos de velocidad de las corrientes marinas mensuales de abril en bahía Colombia, obtenidos mediante modelación numérica en la capa integrada desde los 5 m de profundidad hasta el fondo para los años: a) 2011, b) 2012, c) 2013, d) 2014, e) 2015, f) 2016, g) 2017, h) 2018. Las flechas indican la dirección y la escala de colores representa la magnitud de las velocidades (cm/s).



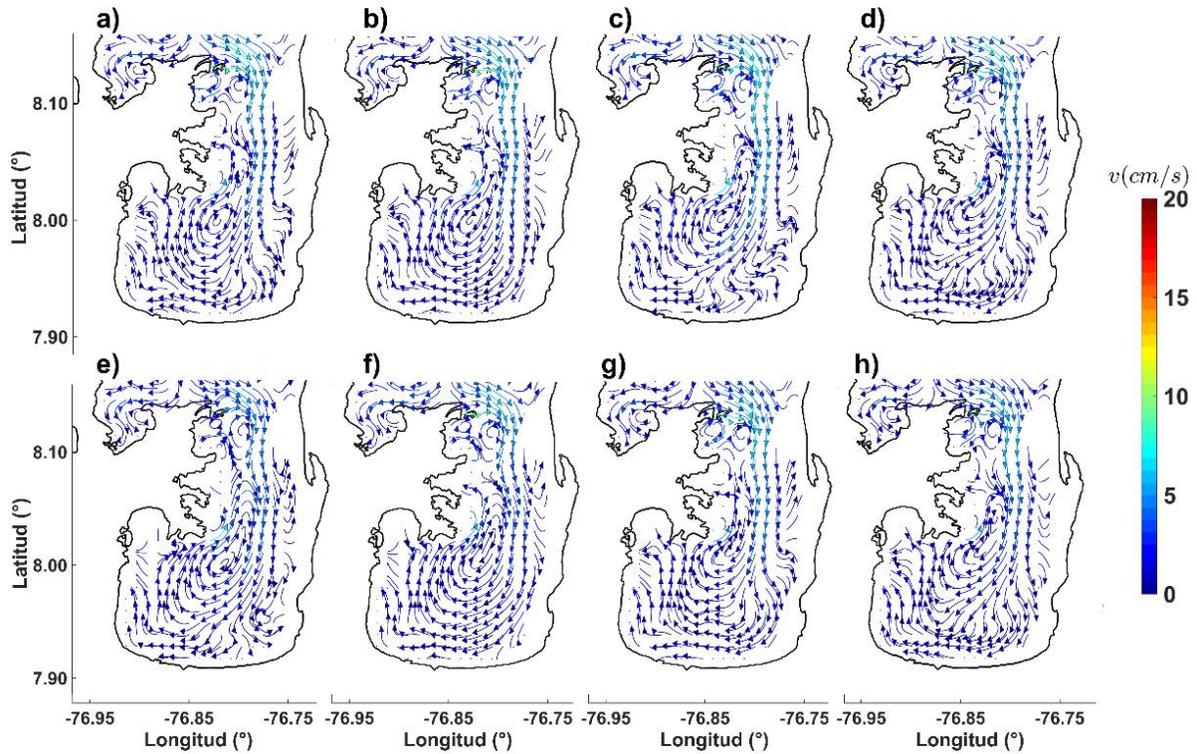
Anexo 7

Campos de velocidad de las corrientes marinas mensuales de mayo en bahía Colombia, obtenidos mediante modelación numérica en la capa superficial integrada desde la superficie hasta 5 m de profundidad para los años: a) 2011, b) 2012, c) 2013, d) 2014, e) 2015, f) 2016, g) 2017, h) 2018. Las flechas indican la dirección y la escala de colores representa la magnitud de las velocidades (cm/s).



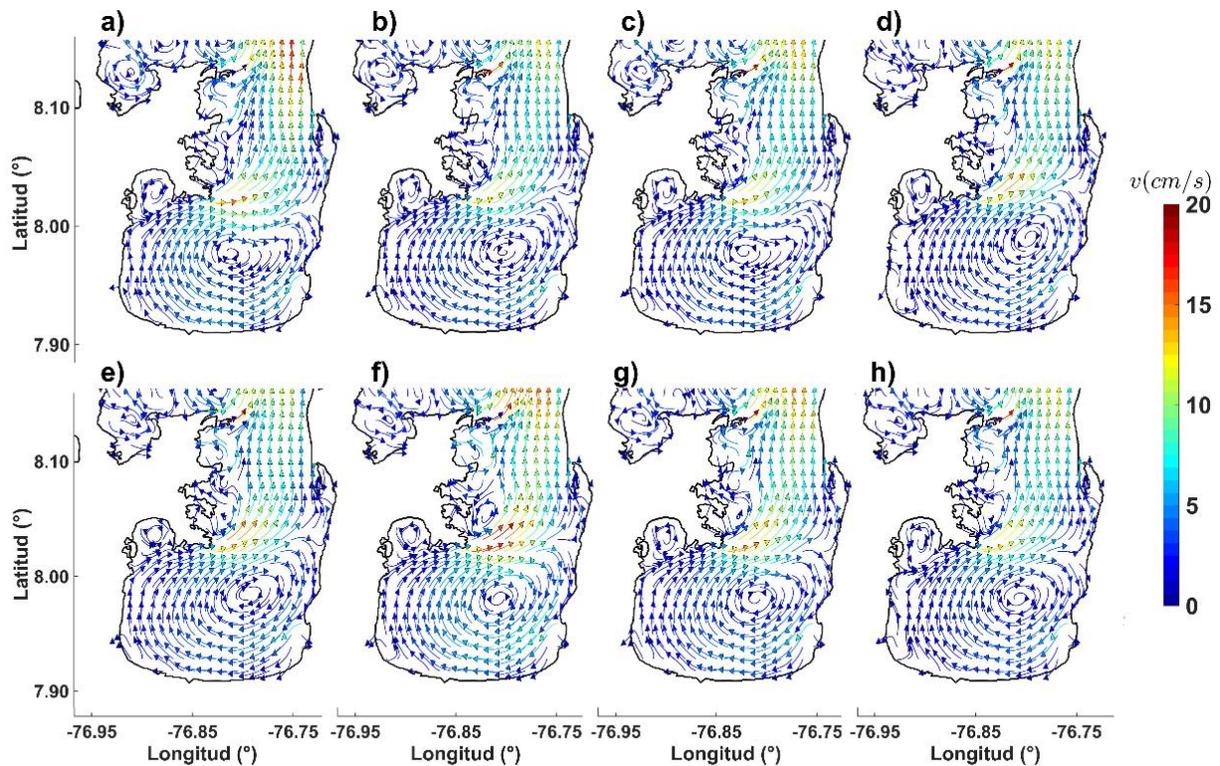
Anexo 8

Campos de velocidad de las corrientes marinas mensuales de mayo en bahía Colombia, obtenidos mediante modelación numérica en la capa integrada desde los 5 m de profundidad hasta el fondo para los años: a) 2011, b) 2012, c) 2013, d) 2014, e) 2015, f) 2016, g) 2017, h) 2018. Las flechas indican la dirección y la escala de colores representa la magnitud de las velocidades (cm/s).



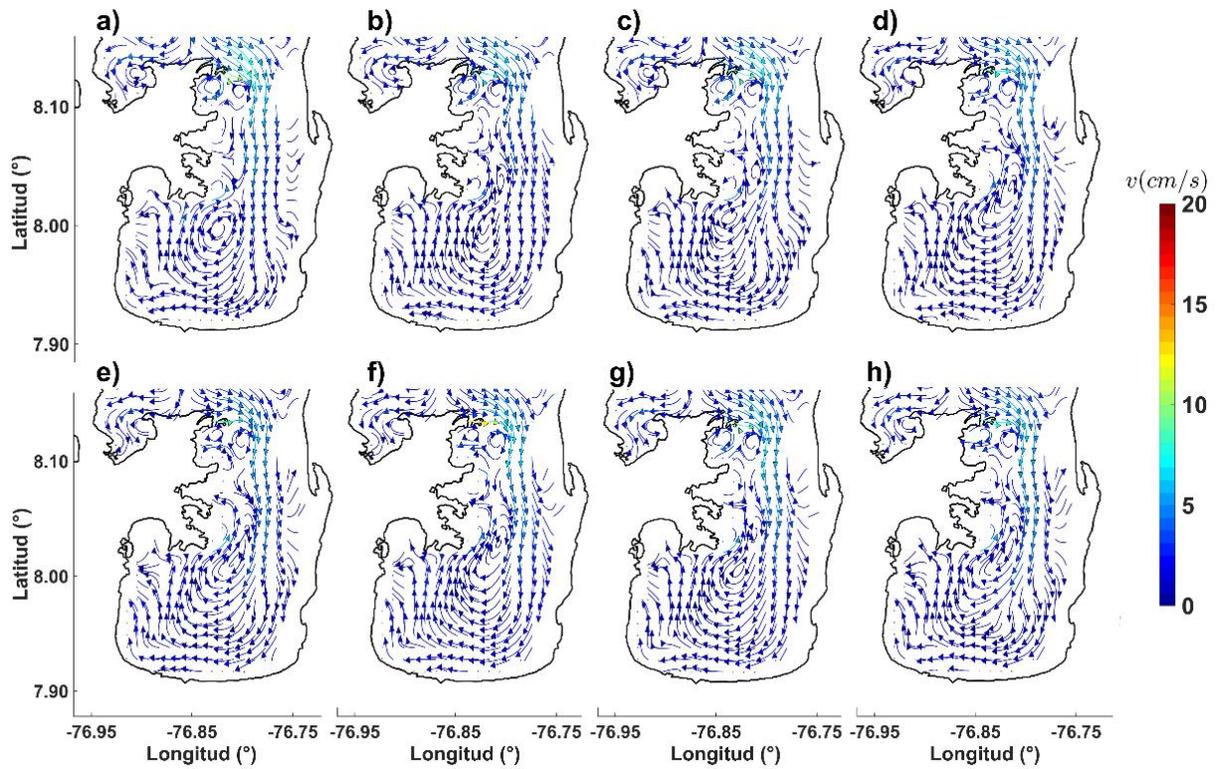
Anexo 9

Campos de velocidad de las corrientes marinas mensuales de junio en bahía Colombia, obtenidos mediante modelación numérica en la capa superficial integrada desde la superficie hasta 5 m de profundidad para los años: a) 2011, b) 2012, c) 2013, d) 2014, e) 2015, f) 2016, g) 2017, h) 2018. Las flechas indican la dirección y la escala de colores representa la magnitud de las velocidades (cm/s).



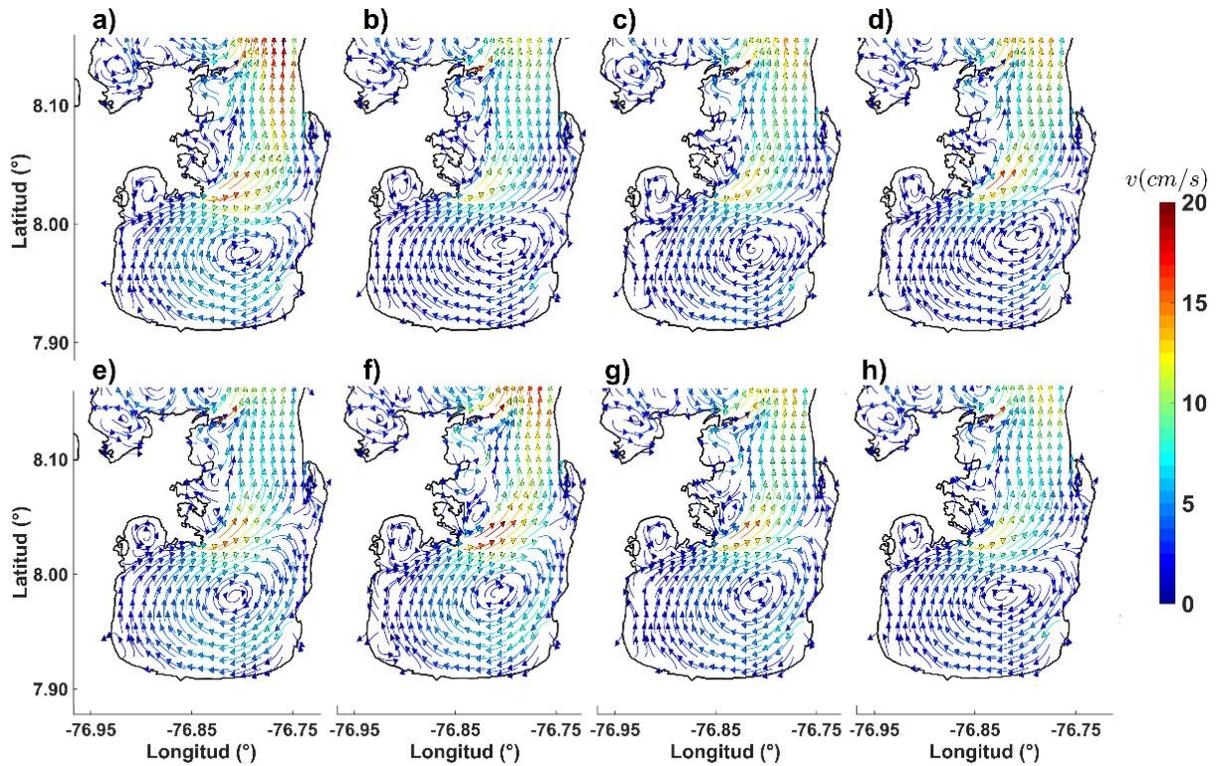
Anexo 10

Campos de velocidad de las corrientes marinas mensuales de junio en bahía Colombia, obtenidos mediante modelación numérica en la capa integrada desde los 5 m de profundidad hasta el fondo para los años: a) 2011, b) 2012, c) 2013, d) 2014, e) 2015, f) 2016, g) 2017, h) 2018. Las flechas indican la dirección y la escala de colores representa la magnitud de las velocidades (cm/s).



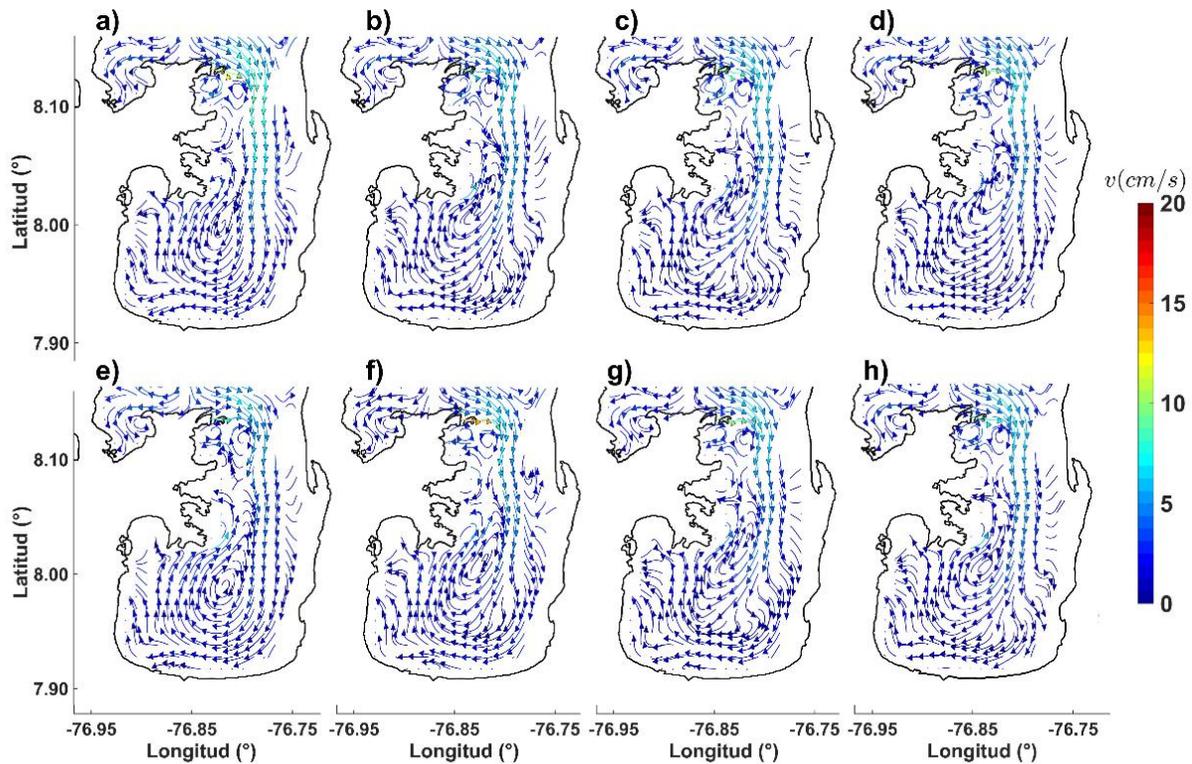
Anexo 11

Campos de velocidad de las corrientes marinas mensuales de julio en bahía Colombia, obtenidos mediante modelación numérica en la capa superficial integrada desde la superficie hasta 5 m de profundidad para los años: a) 2011, b) 2012, c) 2013, d) 2014, e) 2015, f) 2016, g) 2017, h) 2018. Las flechas indican la dirección y la escala de colores representa la magnitud de las velocidades (cm/s).



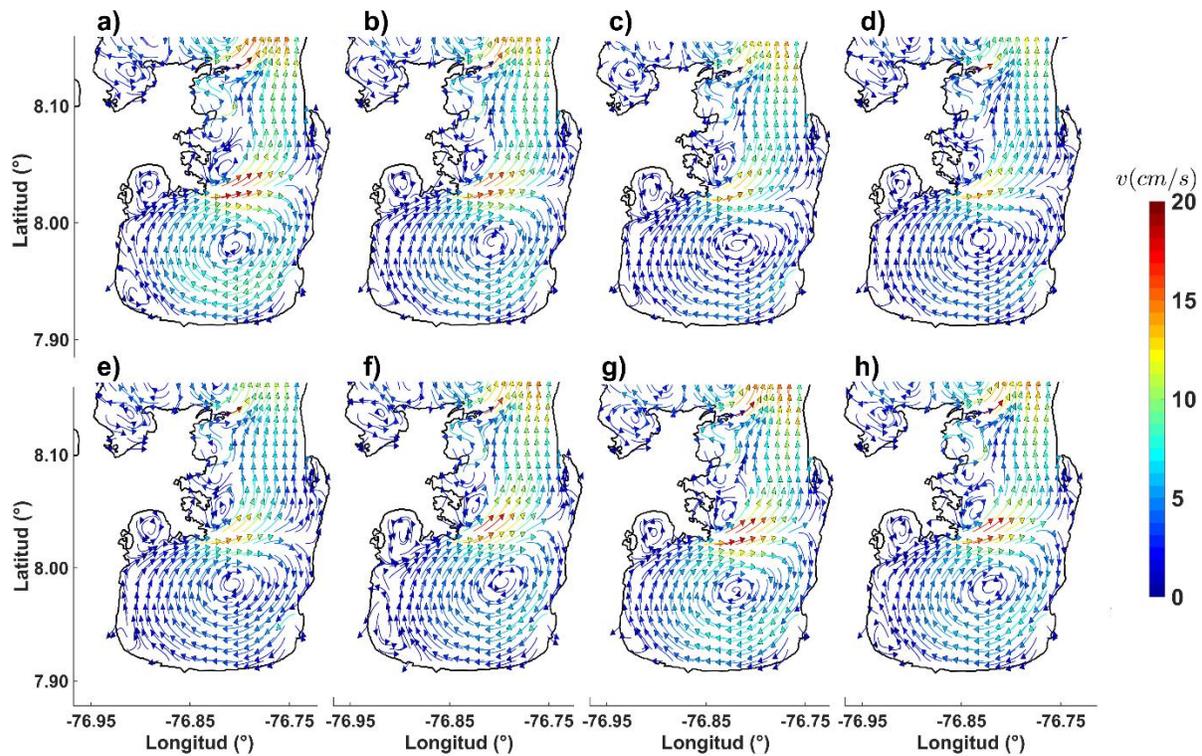
Anexo 12

Campos de velocidad de las corrientes marinas mensuales de julio en bahía Colombia, obtenidos mediante modelación numérica en la capa integrada desde los 5 m de profundidad hasta el fondo para los años: a) 2011, b) 2012, c) 2013, d) 2014, e) 2015, f) 2016, g) 2017, h) 2018. Las flechas indican la dirección y la escala de colores representa la magnitud de las velocidades (cm/s).



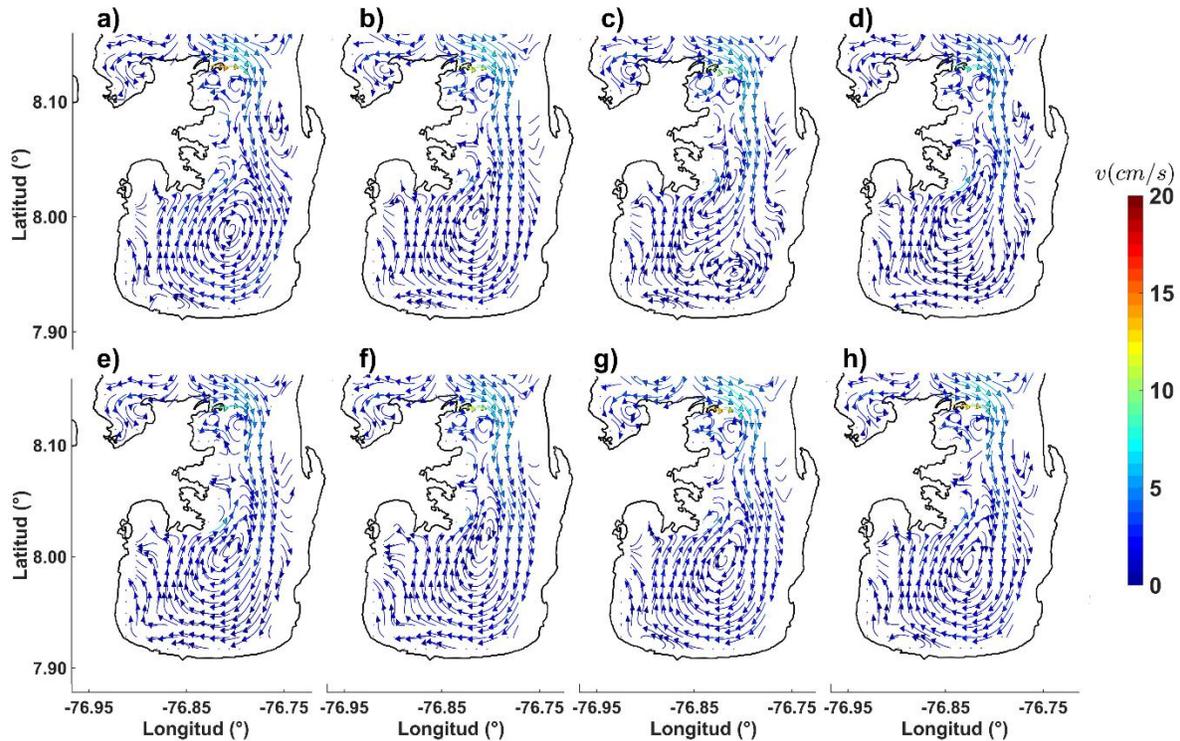
Anexo 13

Campos de velocidad de las corrientes marinas mensuales de agosto en bahía Colombia, obtenidos mediante modelación numérica en la capa superficial integrada desde la superficie hasta 5 m de profundidad para los años: a) 2011, b) 2012, c) 2013, d) 2014, e) 2015, f) 2016, g) 2017, h) 2018. Las flechas indican la dirección y la escala de colores representa la magnitud de las velocidades (cm/s).



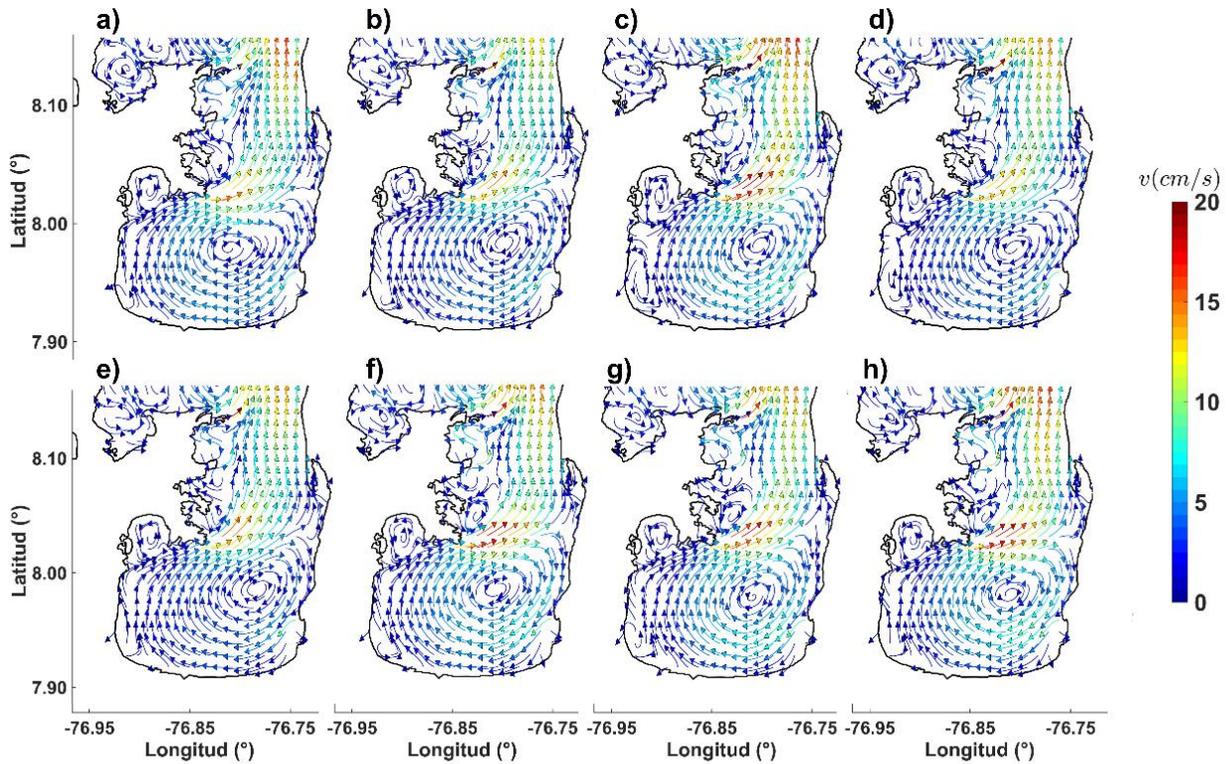
Anexo 14

Campos de velocidad de las corrientes marinas mensuales de agosto en bahía Colombia, obtenidos mediante modelación numérica en la capa integrada desde los 5 m de profundidad hasta el fondo para los años: a) 2011, b) 2012, c) 2013, d) 2014, e) 2015, f) 2016, g) 2017, h) 2018. Las flechas indican la dirección y la escala de colores representa la magnitud de las velocidades (cm/s).



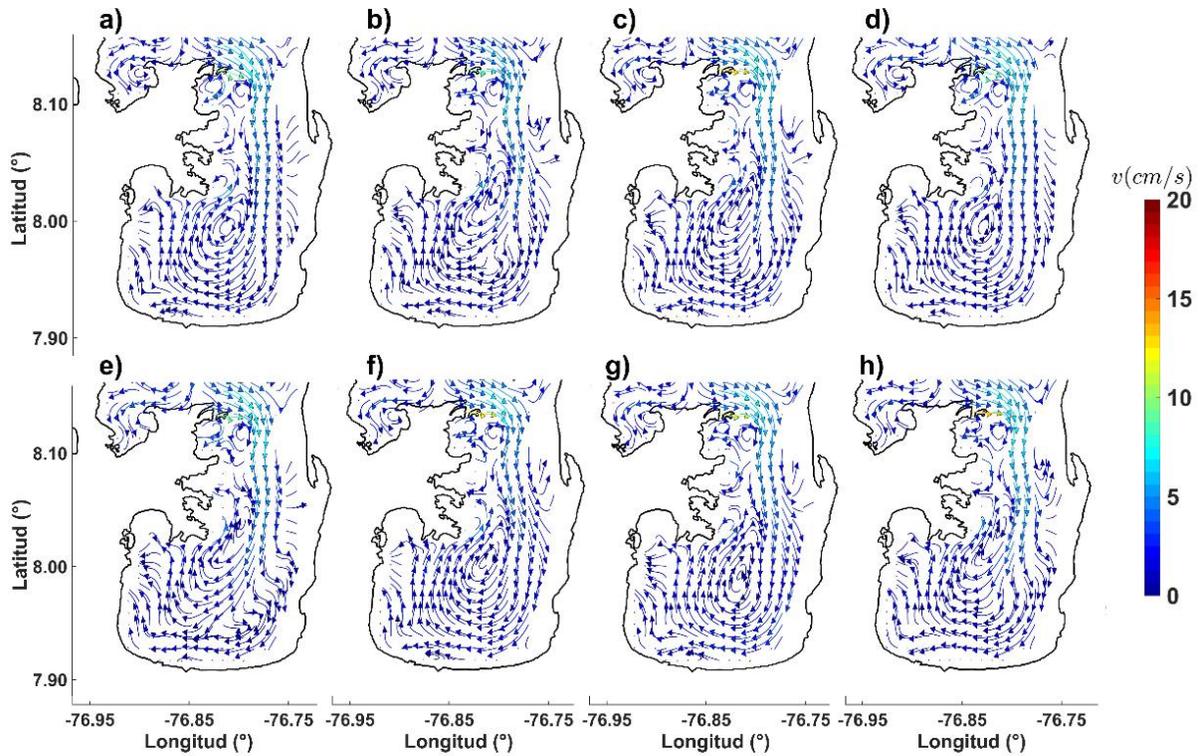
Anexo 15

Campos de velocidad de las corrientes marinas mensuales de septiembre en bahía Colombia, obtenidos mediante modelación numérica en la capa superficial integrada desde la superficie hasta 5 m de profundidad para los años: a) 2011, b) 2012, c) 2013, d) 2014, e) 2015, f) 2016, g) 2017, h) 2018. Las flechas indican la dirección y la escala de colores representa la magnitud de las velocidades (cm/s).



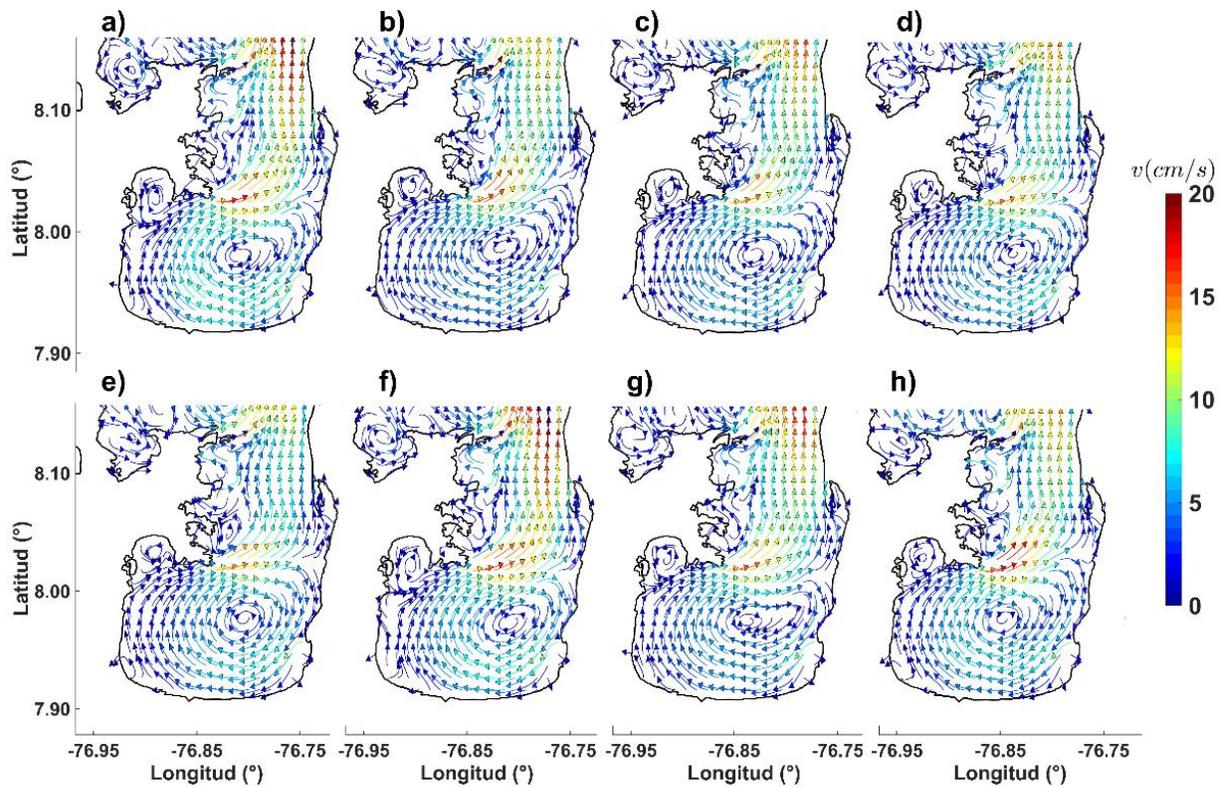
Anexo 16

Campos de velocidad de las corrientes marinas mensuales de septiembre en bahía Colombia, obtenidos mediante modelación numérica en la capa integrada desde los 5 m de profundidad hasta el fondo para los años: a) 2011, b) 2012, c) 2013, d) 2014, e) 2015, f) 2016, g) 2017, h) 2018. Las flechas indican la dirección y la escala de colores representa la magnitud de las velocidades (cm/s).



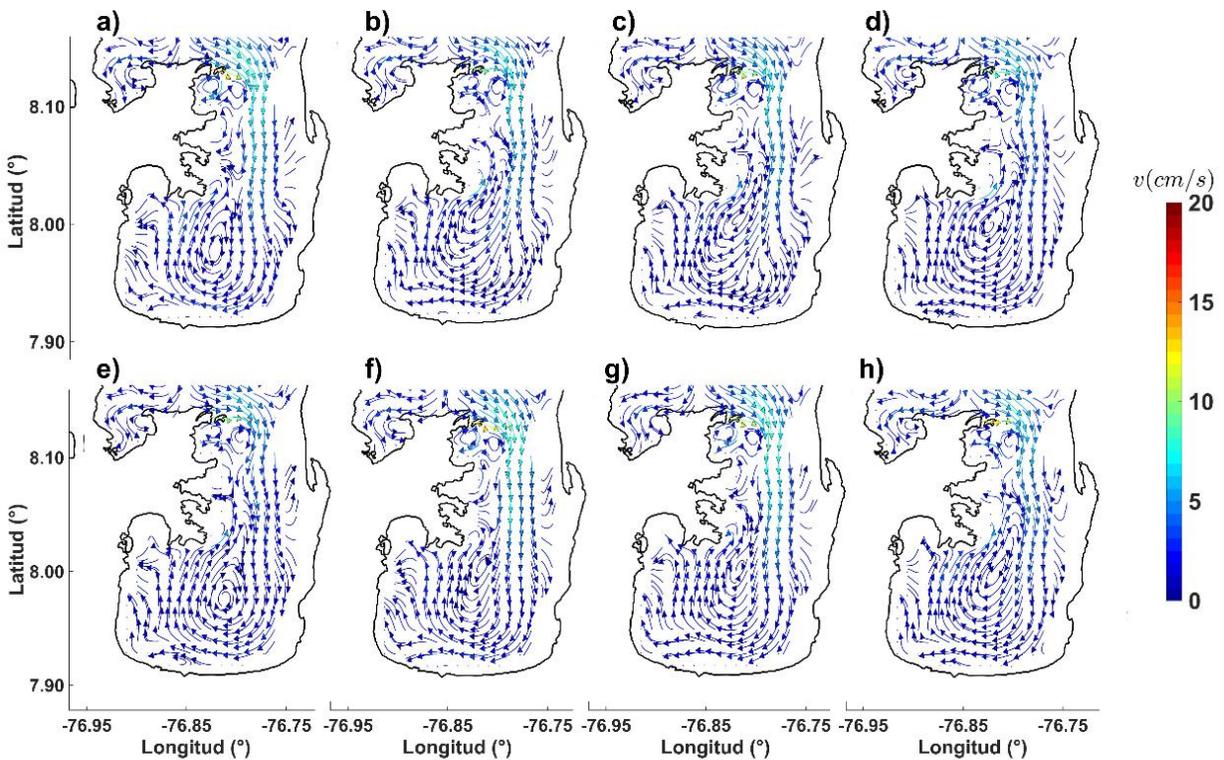
Anexo 17

Campos de velocidad de las corrientes marinas mensuales de noviembre en bahía Colombia, obtenidos mediante modelación numérica en la capa superficial integrada desde la superficie hasta 5 m de profundidad para los años: a) 2011, b) 2012, c) 2013, d) 2014, e) 2015, f) 2016, g) 2017, h) 2018. Las flechas indican la dirección y la escala de colores representa la magnitud de las velocidades (cm/s).



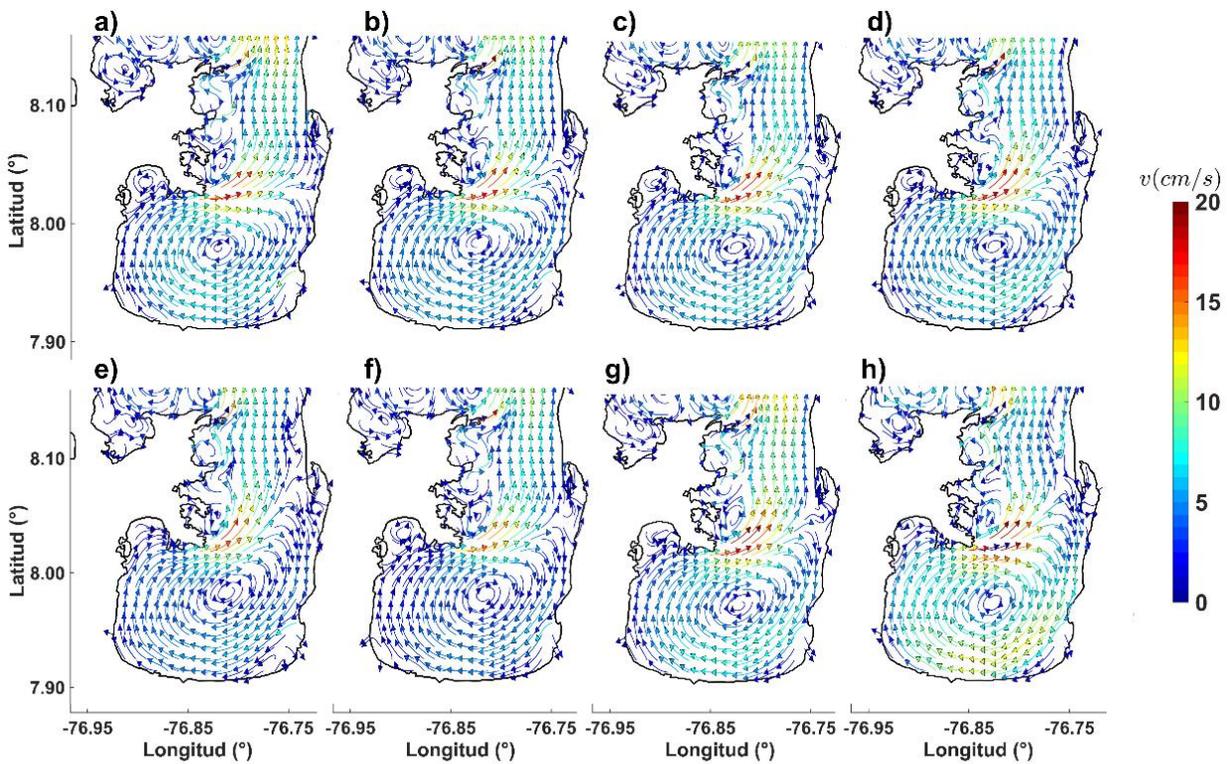
Anexo 18

Campos de velocidad de las corrientes marinas mensuales de noviembre en bahía Colombia, obtenidos mediante modelación numérica en la capa integrada desde los 5 m de profundidad hasta el fondo para los años: a) 2011, b) 2012, c) 2013, d) 2014, e) 2015, f) 2016, g) 2017, h) 2018. Las flechas indican la dirección y la escala de colores representa la magnitud de las velocidades (cm/s).



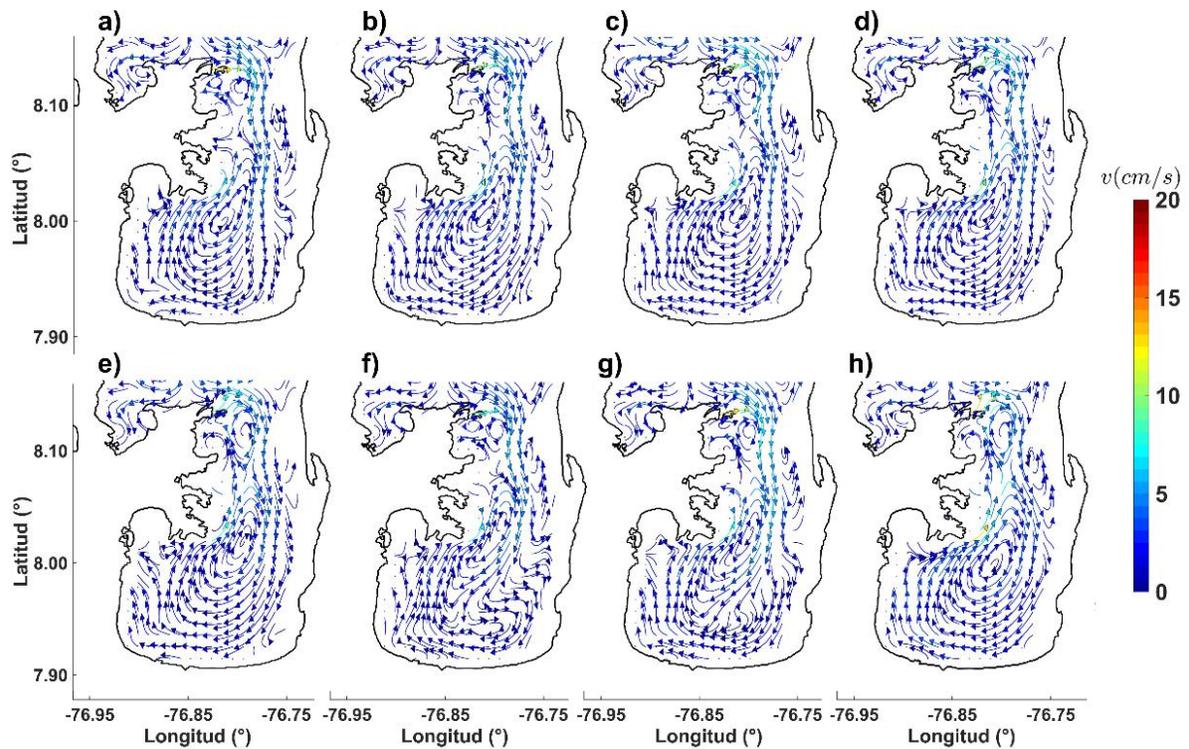
Anexo 19

Campos de velocidad de las corrientes marinas mensuales de diciembre en bahía Colombia, obtenidos mediante modelación numérica en la capa superficial integrada desde la superficie hasta 5 m de profundidad para los años: a) 2011, b) 2012, c) 2013, d) 2014, e) 2015, f) 2016, g) 2017, h) 2018. Las flechas indican la dirección y la escala de colores representa la magnitud de las velocidades (cm/s).



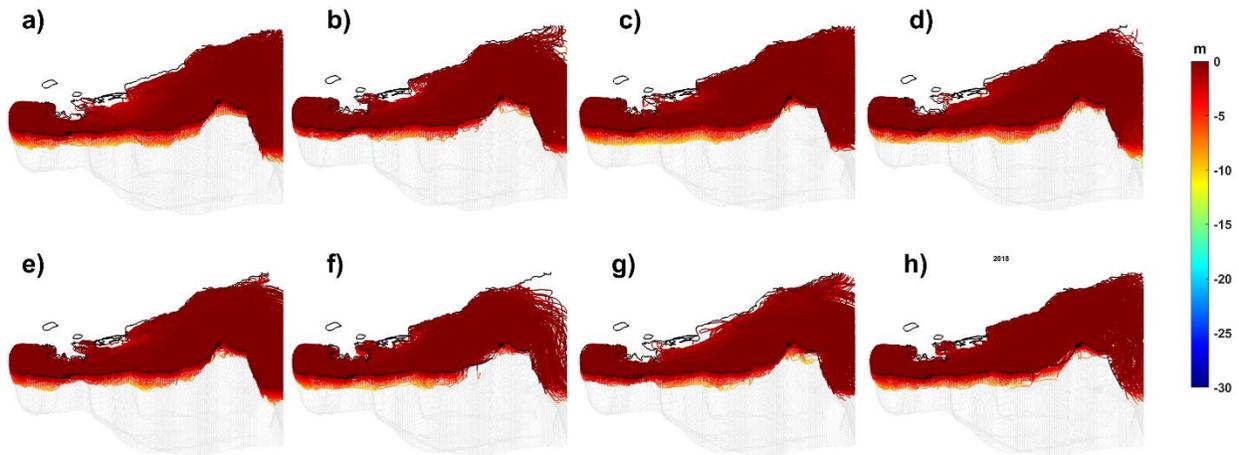
Anexo 20

Campos de velocidad de las corrientes marinas mensuales de diciembre en bahía Colombia, obtenidos mediante modelación numérica en la capa integrada desde los 5 m de profundidad hasta el fondo para los años: a) 2011, b) 2012, c) 2013, d) 2014, e) 2015, f) 2016, g) 2017, h) 2018. Las flechas indican la dirección y la escala de colores representa la magnitud de las velocidades (cm/s).

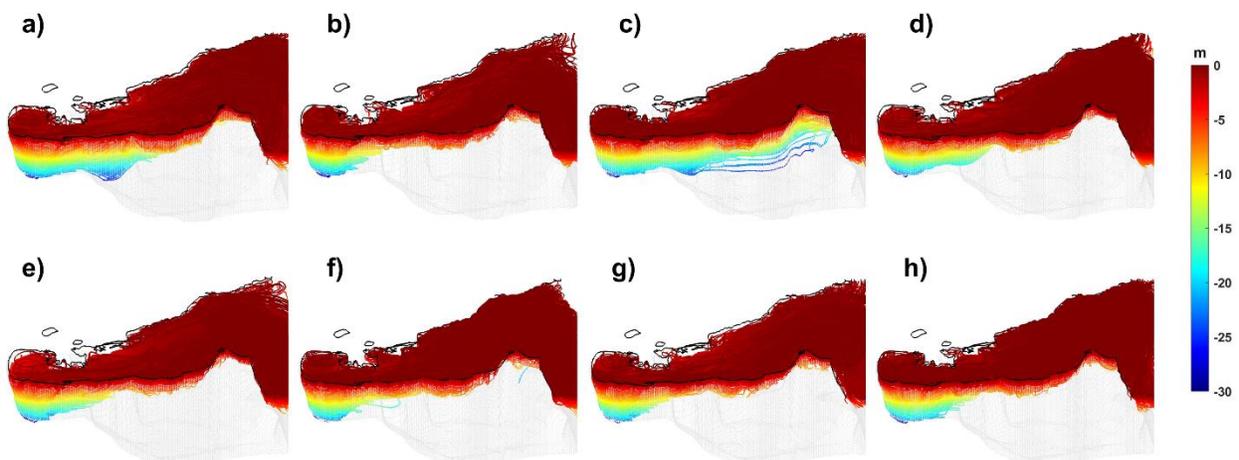


Anexo 21

Trayectorias lagrangianas de partículas superficiales simuladas durante el mes de marzo en bahía Colombia, integradas en una capa de 5 m de espesor sobre la superficie libre, para los años: a) 2011, b) 2012, c) 2013, d) 2014, e) 2015, f) 2016, g) 2017, h) 2018.

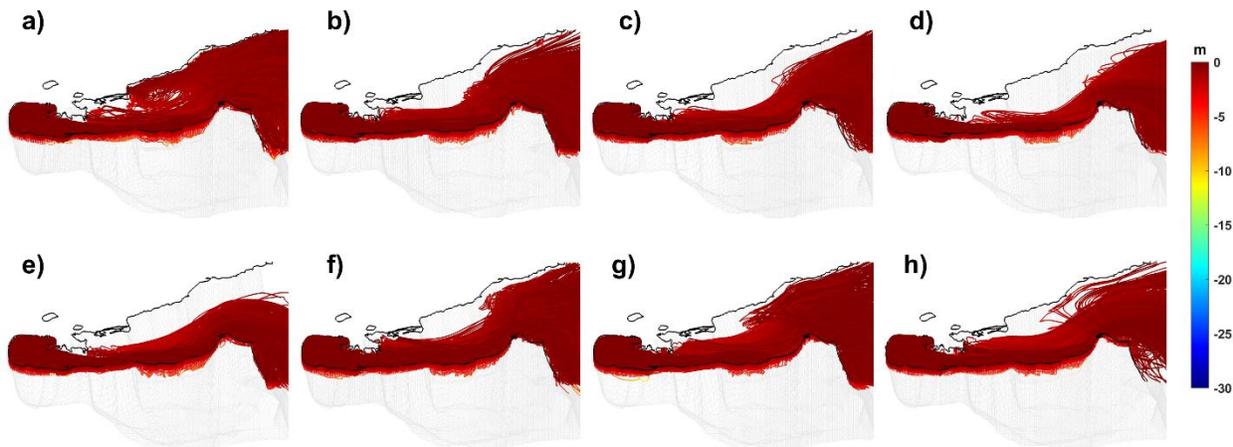
**Anexo 22**

Trayectorias lagrangianas de partículas de fondo simuladas durante el mes de marzo en bahía Colombia, integradas en una capa de 5 m hasta el fondo, para los años: a) 2011, b) 2012, c) 2013, d) 2014, e) 2015, f) 2016, g) 2017, h) 2018.



Anexo 23

Trayectorias lagrangianas de partículas superficiales simuladas durante el mes de septiembre en bahía Colombia, integradas en una capa de 5 m de espesor sobre la superficie libre, para los años: a) 2011, b) 2012, c) 2013, d) 2014, e) 2015, f) 2016, g) 2017, h) 2018.

**Anexo 24**

Trayectorias lagrangianas de partículas de fondo simuladas durante el mes de septiembre en bahía Colombia, integradas en una capa de 5 m hasta el fondo, para los años: a) 2011, b) 2012, c) 2013, d) 2014, e) 2015, f) 2016, g) 2017, h) 2018.

