

ESTUDIO DE LAS CORRIENTES RESIDUALES EN LA BAHÍA DE BUENAVENTURA
COLOMBIA

CLAUDIA PATRICIA GIRALDO IDARRAGA

Proyecto de grado presentado como requisito para optar el título de Ingeniera Agrícola

UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA DE RECURSOS NATURALES Y DEL AMBIENTE
SANTIAGO DE CALI
2017

ESTUDIO DE LAS CORRIENTES RESIDUALES EN LA BAHÍA DE BUENAVENTURA
COLOMBIA

CLAUDIA PATRICIA GIRALDO IDARRAGA

Director

CARLOS ALBERTO RAMIREZ CALLEJAS
Ingeniero Civil M.Sc. Ingeniería Hidráulica

Co-Director

JOSÉ LUÍS GARCIA VÉLEZ
Ingeniero Civil M.Sc. Ingeniería de Costas y Puertos

UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA DE RECURSOS NATURALES Y DEL AMBIENTE
SANTIAGO DE CALI

2017

ESTUDIO DE LAS CORRIENTES RESIDUALES EN LA BAHÍA DE BUENAVENTURA
COLOMBIA

Mg. CARLOS ALBERTO RAMÍREZ

DIRECTOR

Mg. JOSÉ LUÍS GARCÍA

CO-DIRECTOR

Mg. CARLOS OMAR AYALA

JURADO

Mg. JAIME ALONSO ROJAS

JURADO

Santiago de Cali, Agosto de 2017

*A Dios y a mi familia que me brindaron el
apoyo necesario para lograrlo. Por ellos y
para ellos.*

.

“Encomienda al Señor todo cuanto haces, confía en que él te ayudará a realizarlo, y él lo hará.”

(Salmos 37:5)

AGRADECIMIENTOS

A mis padres y hermanos por enseñarme cosas que no van a aparecer publicadas en una revista científica, por ponerme los pies en la tierra, por su día a día incondicional, por su trabajo y dedicación para darme una formación académica, humanista y espiritual. De ellos es este triunfo y para ellos es todo mi agradecimiento.

Debo agradecer de manera muy especial y sincera al profesor Carlos Alberto Ramírez Callejas por aceptarme para realizar este trabajo de investigación bajo su dirección. Su ayuda e interés no solamente en el desarrollo de esta investigación, sino también en mi formación como estudiante fueron fundamentales para obtener este logro. También al profesor José Luís García Vélez por aceptar participar como Co-director y su valiosa contribución durante este proceso.

Al jurado examinador integrado por el Mg. Carlos Omar Ayala y el Mg. Jaime Alonso Rojas, por sus valiosas correcciones y recomendaciones.

Al grupo de investigación HIDROMAR de la Universidad del Valle, por permitirme hacer parte de este proyecto y por los conocimientos adquiridos durante la duración del mismo.

A la Ing. Daniela Muñoz por introducirme en el entendimiento y utilización del modelo numérico MOHID. También por su mirada crítica y clínica frente a cualquier planteamiento o problema de implementación con el modelo.

Por hacer de unas cuantas personas con diferentes objetivos un verdadero grupo de investigación trabajando en equipo: a Pablo Leiton, Jennifer Barbosa, Steven Moreno, Erika Perdomo y Yonathan Burbano, por su buen humor y por hacerme pasar momentos inolvidables.

A Santiago Cuervo, Christian Lenis, Karen García, Julián Solís y un montón de amigos más que me han estado apoyando en todo momento durante estos años. A estas y a todas las personas que soportaron todos mis agobios y me dieron tantas alegrías y ánimos en estos años.

A los que nunca dudaron que lograría este triunfo.

Gracias

CONTENIDO

2	INTRODUCCIÓN.....	1
3	OBJETIVOS.....	3
3.1	Objetivo General.....	3
3.2	Objetivos Específicos.....	3
4	DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO	4
4.1	Generalidades de la Zona de Estudio.....	4
4.2	Planteamiento del Problema	5
4.3	Justificación	6
5	MARCO REFERENCIAL	8
5.1	Antecedentes	8
5.2	Estado del Arte.....	10
6	MARCO TEÓRICO	12
6.1	Corriente Residual	12
6.2	Procesos de Transporte	13
6.3	Concepto de Simulación	13
6.4	Modelos Matemáticos.....	13
6.5	Descripción del Modelo MOHID	14
6.5.1	Características generales.....	15
6.5.2	Módulo Model	15
6.5.3	Módulo Batimétrico	15
6.5.4	Módulo Hidrodinámico.....	16
6.5.5	Módulo Propiedades del Agua.....	19
6.5.6	Módulo Geométrico	19
6.5.7	Módulo Lagrangiano.....	20
6.6	Calibración del Modelo Hidrodinámico	21
6.7	Validación del Modelo Hidrodinámico	21
7	METODOLOGÍA.....	22
7.1	Recopilación de Información.....	22
7.2	Procesamiento y Análisis de la Información	22

7.3	Caracterización Hidrodinámica de la Bahía de Buenaventura	22
7.4	Implementación del Modelo Matemático Hidrodinámico	23
7.4.1	Representación de la batimetría y construcción de la malla de numérica	23
7.4.2	Condiciones de frontera e iniciales	23
7.4.3	Análisis de sensibilidad.....	24
7.4.4	Calibración del modelo	24
7.4.5	Verificación del modelo.....	24
7.5	Estudio de las Corrientes Residuales al interior de la bahía de Buenaventura	25
7.5.1	Planteamiento de escenarios para el estudio de las corrientes residuales	25
7.5.2	Implementación del módulo de trazadores Lagrangianos	25
7.5.3	Simulación de las corrientes residuales al interior de la bahía de Buenaventura ...	25
7.6	Análisis del Comportamiento de las Corrientes Residuales	25
8	CARACTERIZACIÓN HIDRODINÁMICA DE LA BAHÍA DE BUENAVENTURA.....	26
8.1	Descripción Física de la Bahía de Buenaventura.....	26
8.1.1	Bahía exterior.....	27
8.1.2	Bahía interior	27
8.1.3	Canal de acceso.....	27
8.2	Aspectos Hidrometeorológicos.....	28
8.2.1	Temperatura	30
8.2.2	Humedad relativa del aire	31
8.2.3	Precipitación	33
8.2.4	Vientos	35
8.2.5	Nubosidad	37
8.2.6	Brillo solar	39
8.2.7	Salinidad	40
8.3	Dinámica fluvial y marina	41
8.3.1	Cuenca hidrográfica de la bahía Buenaventura	41
8.3.2	Caudales fluviales	42
8.3.3	Corrientes en la bahía de Buenaventura.....	43
8.3.4	Mareas en la bahía de Buenaventura	43
8.3.5	Oleaje	47

9	IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO HIDRODINÁMICO (MOHID)	48
9.1	Construcción de la malla numérica	48
9.2	Esquematzación de la batimetría	50
9.2.1	Ajuste de la batimetría	51
9.3	Condiciones de frontera	52
9.4	Condiciones iniciales	53
9.5	Análisis de sensibilidad	54
9.6	Calibración del modelo	67
9.7	Verificación del modelo	71
9.8	Modelación hidrodinámica	73
10	CORRIENTES RESIDUALES	78
10.1	Escenario 1: Marea Viva Máxima (rango = 4.89 m) y Caudales Fluviales Mínimo	79
10.2	Escenario 2: Marea Viva Media (rango = 4.89 m) y Caudales Fluviales Máximos	91
10.3	Escenario 3: Marea Viva Máxima (rango = 4.23 m) y Caudales Fluviales Mínimos	102
10.4	Escenario 4: Marea Viva Media (rango = 4.23 m) y Caudales Fluviales Máximos	113
10.5	Escenario 5: Marea Viva Mínima (rango = 3.54 m) y Caudales Fluviales Mínimos	124
10.6	Escenario 6: Marea Viva Mínima (rango = 3.54 m) y Caudales Fluviales Máximos	135
10.7	Análisis del Comportamiento de las Corrientes Residuales	146
11	CONCLUSIONES	149
12	RECOMENDACIONES	153
13	BIBLIOGRAFÍA	154

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Localización de los puntos de monitoreo de la CVC y las estaciones hidrometeorológicas del IDEAM en la bahía de Buenaventura	29
Tabla 2. Temperatura media mensual multianual del aire en el municipio de Buenaventura	30
Tabla 3. Humedad relativa media mensual multianual en el municipio de Buenaventura	32
Tabla 4. Precipitación y días promedio de lluvia en el municipio de Buenaventura	34
Tabla 5. Velocidades medias mensuales multianuales del viento en el municipio de Buenaventura	35
Tabla 6. Rangos de Nubosidad	37
Tabla 7. Nubosidad media mensual multianual en el municipio de Buenaventura	37
Tabla 8. Brillo Solar medio mensual multianual en el municipio de Buenaventura	39
Tabla 9. Salinidad (%) semestral distribuido a lo largo de la bahía interior de Buenaventura....	41
Tabla 10. Subcuencas tributarias de la bahía de Buenaventura	42
Tabla 11. Caudales fluviales mínimos, medios y máximos de los ríos y esteros de la bahía de Buenaventura	42
Tabla 12. Amplitudes de marea y porcentaje de amplificación mareal en diferentes sitios al interior de la bahía de Buenaventura	44
Tabla 13. Niveles promedio de marea en la bahía de Buenaventura	45
Tabla 14. Valores de temperatura y salinidad del agua adoptadas en el modelo para la bahía de Buenaventura	54
Tabla 15. Ubicación geográfica de los sitios de control o estaciones al interior de la bahía de Buenaventura	55
Tabla 16. Amplitudes y fases de los componentes armónicos de marea para tres zonas horarias	63
Tabla 17. Valores del coeficiente de correlación R^2 para diferentes coeficientes de rugosidad de Manning	67
Tabla 18. Componentes armónicas de marea astronómica de mejor ajuste en la calibración	68
Tabla 19. Ubicación geográfica de los sitios de vertimiento de los trazadores al interior de la bahía de Buenaventura.....	79
Tabla 20. Escenarios de simulación para el estudio de las corrientes residuales en la bahía de Buenaventura	79

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Localización de la bahía de Buenaventura: A) Colombia, B) Valle del Cauca y C) Bahía de Buenaventura.....	5
Figura 2. Aplicación de la Segunda Ley de Newton sobre un volumen de control deformable .	17
Figura 3. Estructura modular de MOHID	20
Figura 4. Bahía de Buenaventura.....	26
Figura 5. Canal de acceso al puerto de Buenaventura	28
Figura 6. Bahía de Buenaventura. Localización de los puntos de monitoreo de CVC y las estaciones hidrometeorológicas del IDEAM	29
Figura 7. Rosa de los vientos en la estación Colpuertos (Fuente: IDEAM, 2015).....	36
Figura 8. Rosa de los vientos en la estación Aeropuerto de Buenaventura (Fuente: IDEAM, 2015)	36
Figura 9. Mapa hidrográfico de la bahía de Buenaventura.....	43
Figura 10. Esquemización de la línea de costa para la bahía de Buenaventura.....	48
Figura 11. Malla de cálculo del sistema bahía de Buenaventura.....	50
Figura 12. Batimetría de la bahía de Buenaventura.....	51
Figura 13. Condiciones de frontera en la bahía de Buenaventura	52
Figura 14. Mapa de zonificación de las propiedades temperatura y salinidad del agua en la bahía de Buenaventura.....	54
Figura 15. Ubicación de los sitios de control o estaciones al interior de la bahía de Buenaventura	55
Figura 16. Velocidad de flujo (07/05/2001). A) Instante pleamar 3:15 am. B) Instante reflujo 6:33 am. C) Instante bajamar 9:40 am. D) Instante flujo 1:00 pm	76
Figura 17. Velocidad de flujo (16/05/2001). A) Instante pleamar 9:40 am. B) Instante reflujo 1:50 pm. C) Instante bajamar 5:20 pm. D) Instante flujo 7:30 pm	77
Figura 18. Ubicación esquemática de los sitios de vertimiento de los trazadores al interior de la bahía de Buenaventura.....	78
Figura 19. Corrientes residuales Eulerianas en la bahía de Buenaventura para un ciclo cuasiquincenal de marea viva - marea muerta. Escenario 1: Marea viva máxima (rango de 4.89 m) y caudales fluviales mínimos	80
Figura 20. Corrientes residuales Eulerianas alrededor de la isla Cascajal para un ciclo cuasiquincenal de marea viva - marea muerta. Escenario 1: Marea viva máxima (rango de 4.89 m) y caudales fluviales mínimos	81
Figura 21. Desplazamiento neto de las partículas vertidas en el estero San Antonio en la bahía de Buenaventura para un ciclo cuasiquincenal de marea viva - marea muerta. Escenario 1: Marea viva máxima (rango de 4.89 m) y caudales fluviales mínimos. A) Instante $t=0$ días, B) Instante $t=5$ días, C) Instante $t=10$ días y D) Instante $t=15$ días	82
Figura 22. Desplazamiento neto de las partículas vertidas en el estero Gamboa en la bahía de Buenaventura para un ciclo cuasiquincenal de marea viva - marea muerta. Escenario 1: Marea viva	

máxima (rango de 4.89 m) y caudales fluviales mínimos. A) Instante $t=0$ días, B) Instante $t=5$ días, C) Instante $t=10$ días y D) Instante $t=15$ días	83
Figura 23. Desplazamiento neto de las partículas vertidas en el Muelle en la bahía de Buenaventura para un ciclo cuasiquincenal de marea viva - marea muerta. Escenario 1: Marea viva máxima (rango de 4.89 m) y caudales fluviales mínimos. A) Instante $t=0$ días, B) Instante $t=5$ días, C) Instante $t=10$ días y D) Instante $t=15$ días	84
Figura 24. Desplazamiento neto de las partículas vertidas en el estero Aguacate en la bahía de Buenaventura para un ciclo cuasiquincenal de marea viva - marea muerta. Escenario 1: Marea viva máxima (rango de 4.89 m) y caudales fluviales mínimos. A) Instante $t=0$ días, B) Instante $t=5$ días, C) Instante $t=10$ días y D) Instante $t=15$ días	85
Figura 25. Desplazamiento neto de las partículas vertidas en la desembocadura del río San Antonio en la bahía de Buenaventura para un ciclo cuasiquincenal de marea viva - marea muerta. Escenario 1: Marea viva máxima (rango de 4.89 m) y caudales fluviales mínimos. A) Instante $t=0$ días, B) Instante $t=5$ días, C) Instante $t=10$ días y D) Instante $t=15$ días	86
Figura 26. Desplazamiento neto de las partículas vertidas en la parte alta del río San Antonio en la bahía de Buenaventura para un ciclo cuasiquincenal de marea viva - marea muerta. Escenario 1: Marea viva máxima (rango de 4.89 m) y caudales fluviales mínimos. A) Instante $t=0$ días, B) Instante $t=5$ días, C) Instante $t=10$ días y D) Instante $t=15$ días	87
Figura 27. Desplazamiento neto de las partículas vertidas en el delta del río Dagua en la bahía de Buenaventura para un ciclo cuasiquincenal de marea viva - marea muerta. Escenario 1: Marea viva máxima (rango de 4.89 m) y caudales fluviales mínimos. A) Instante $t=0$ días, B) Instante $t=5$ días, C) Instante $t=10$ días y D) Instante $t=15$ días	88
Figura 28. Desplazamiento neto de las partículas vertidas en la desembocadura del río Limones en la bahía de Buenaventura para un ciclo cuasiquincenal de marea viva - marea muerta. Escenario 1: Marea viva máxima (rango de 4.89 m) y caudales fluviales mínimos. A) Instante $t=0$ días, B) Instante $t=5$ días, C) Instante $t=10$ días y D) Instante $t=15$ días	89
Figura 29. Desplazamiento neto de las partículas vertidas en la desembocadura del río Anchicayá en la bahía de Buenaventura para un ciclo cuasiquincenal de marea viva - marea muerta. Escenario 1: Marea viva máxima (rango de 4.89 m) y caudales fluviales mínimos. A) Instante $t=0$ días, B) Instante $t=5$ días, C) Instante $t=10$ días y D) Instante $t=15$ días	90
Figura 30. Corrientes residuales Eulerianas en la bahía de Buenaventura para un ciclo cuasiquincenal de marea viva - marea muerta. Escenario 2: Marea viva máxima (rango de 4.89 m) y caudales fluviales máximos	91
Figura 31. Corrientes residuales Eulerianas alrededor de la isla Cascajal para un ciclo cuasiquincenal de marea viva - marea muerta. Escenario 2: Marea viva máxima (rango de 4.89 m) y caudales fluviales máximos	92
Figura 32. Desplazamiento neto de las partículas vertidas en el estero San Antonio en la bahía de Buenaventura para un ciclo cuasiquincenal de marea viva - marea muerta. Escenario 2: Marea viva máxima (rango de 4.89 m) y caudales fluviales máximos. A) Instante $t=0$ días, B) Instante $t=5$ días, C) Instante $t=10$ días y D) Instante $t=15$ días	93

Figura 33. Desplazamiento neto de las partículas vertidas en el estero Gamboa en la bahía de Buenaventura para un ciclo cuasiquincenal de marea viva - marea muerta. Escenario 2: Marea viva máxima (rango de 4.89 m) y caudales fluviales máximos. A) Instante $t=0$ días, B) Instante $t=5$ días, C) Instante $t=10$ días y D) Instante $t=15$ días	94
Figura 34. Desplazamiento neto de las partículas vertidas en el Muelle en la bahía de Buenaventura para un ciclo cuasiquincenal de marea viva - marea muerta. Escenario 2: Marea viva máxima (rango de 4.89 m) y caudales fluviales máximos. A) Instante $t=0$ días, B) Instante $t=5$ días, C) Instante $t=10$ días y D) Instante $t=15$ días	95
Figura 35. Desplazamiento neto de las partículas vertidas en el estero Aguacate en la bahía de Buenaventura para un ciclo cuasiquincenal de marea viva - marea muerta. Escenario 2: Marea viva máxima (rango de 4.89 m) y caudales fluviales máximos. A) Instante $t=0$ días, B) Instante $t=5$ días, C) Instante $t=10$ días y D) Instante $t=15$ días	96
Figura 36. Desplazamiento neto de las partículas vertidas en la desembocadura del río San Antonio en la bahía de Buenaventura para un ciclo cuasiquincenal de marea viva - marea muerta. Escenario 2: Marea viva máxima (rango de 4.89 m) y caudales fluviales máximos. A) Instante $t=0$ días, B) Instante $t=5$ días, C) Instante $t=10$ días y D) Instante $t=15$ días	97
Figura 37. Desplazamiento neto de las partículas vertidas en la parte alta del río San Antonio en la bahía de Buenaventura para un ciclo cuasiquincenal de marea viva - marea muerta. Escenario 2: Marea viva máxima (rango de 4.89 m) y caudales fluviales máximos. A) Instante $t=0$ días, B) Instante $t=5$ días, C) Instante $t=10$ días y D) Instante $t=15$ días.....	98
Figura 38. Desplazamiento neto de las partículas vertidas en el delta del río Dagua en la bahía de Buenaventura para un ciclo cuasiquincenal de marea viva - marea muerta. Escenario 2: Marea viva máxima (rango de 4.89 m) y caudales fluviales máximos. A) Instante $t=0$ días, B) Instante $t=5$ días, C) Instante $t=10$ días y D) Instante $t=15$ días	99
Figura 39. Desplazamiento neto de las partículas vertidas en la desembocadura del río Limones en la bahía de Buenaventura para un ciclo cuasiquincenal de marea viva - marea muerta. Escenario 2: Marea viva máxima (rango de 4.89 m) y caudales fluviales máximos. A) Instante $t=0$ días, B) Instante $t=5$ días, C) Instante $t=10$ días y D) Instante $t=15$ días.....	100
Figura 40. Desplazamiento neto de las partículas vertidas en la desembocadura del río Anchicayá en la bahía de Buenaventura para un ciclo cuasiquincenal de marea viva - marea muerta. Escenario 2: Marea viva máxima (rango de 4.89 m) y caudales fluviales máximos. A) Instante $t=0$ días, B) Instante $t=5$ días, C) Instante $t=10$ días y D) Instante $t=15$ días.....	101
Figura 41. Corrientes residuales Eulerianas en la bahía de Buenaventura para un ciclo cuasiquincenal de marea viva - marea muerta. Escenario 3: Marea viva media (rango de 4.23 m) y caudales fluviales mínimos	102
Figura 42. Corrientes residuales Eulerianas alrededor de la isla Cascajal para un ciclo cuasiquincenal de marea viva - marea muerta. Escenario 3: Marea viva media (rango de 4.23 m) y caudales fluviales mínimos	103
Figura 43. Desplazamiento neto de las partículas vertidas en el estero San Antonio en la bahía de Buenaventura para un ciclo cuasiquincenal de marea viva - marea muerta. Escenario 3: Marea viva	

media (rango de 4.23 m) m y caudales fluviales mínimos. A) Instante $t=0$ días, B) Instante $t=5$ días, C) Instante $t=10$ días y D) Instante $t=15$ días	104
Figura 44. Desplazamiento neto de las partículas vertidas en el estero Gamboa en la bahía de Buenaventura para un ciclo cuasiquincenal de marea viva - marea muerta. Escenario 3: Marea viva media (rango de 4.23 m) y caudales fluviales mínimos. A) Instante $t=0$ días, B) Instante $t=5$ días, C) Instante $t=10$ días y D) Instante $t=15$ días	105
Figura 45. Desplazamiento neto de las partículas vertidas en el Muelle en la bahía de Buenaventura para un ciclo cuasiquincenal de marea viva - marea muerta. Escenario 3: Marea viva media (rango de 4.23 m) y caudales fluviales mínimos. A) Instante $t=0$ días, B) Instante $t=5$ días, C) Instante $t=10$ días y D) Instante $t=15$ días	106
Figura 46. Desplazamiento neto de las partículas vertidas en el estero Aguacate en la bahía de Buenaventura para un ciclo cuasiquincenal de marea viva - marea muerta. Escenario 3: Marea viva media (rango de 4.23 m) y caudales fluviales mínimos. A) Instante $t=0$ días, B) Instante $t=5$ días, C) Instante $t=10$ días y D) Instante $t=15$ días	107
Figura 47. Desplazamiento neto de las partículas vertidas en la desembocadura del río San Antonio en la bahía de Buenaventura para un ciclo cuasiquincenal de marea viva - marea muerta. Escenario 3: Marea viva media (rango de 4.23 m) y caudales fluviales mínimos. A) Instante $t=0$ días, B) Instante $t=5$ días, C) Instante $t=10$ días y D) Instante $t=15$ días	108
Figura 48. Desplazamiento neto de las partículas vertidas en la parte alta del río San Antonio en la bahía de Buenaventura para un ciclo cuasiquincenal de marea viva - marea muerta. Escenario 3: Marea viva máxima (rango de 4.23 m) y caudales fluviales mínimos. A) Instante $t=0$ días, B) Instante $t=5$ días, C) Instante $t=10$ días y D) Instante $t=15$ días	109
Figura 49. Desplazamiento neto de las partículas vertidas en el delta del río Dagua en la bahía de Buenaventura para un ciclo cuasiquincenal de marea viva - marea muerta. Escenario 3: Marea viva media (rango de 4.23 m) y caudales fluviales mínimos. A) Instante $t=0$ días, B) Instante $t=5$ días, C) Instante $t=10$ días y D) Instante $t=15$ días	110
Figura 50. Desplazamiento neto de las partículas vertidas en la desembocadura del río Limones en la bahía de Buenaventura para un ciclo cuasiquincenal de marea viva - marea muerta. Escenario 3: Marea viva media (rango de 4.23 m) y caudales fluviales mínimos. A) Instante $t=0$ días, B) Instante $t=5$ días, C) Instante $t=10$ días y D) Instante $t=15$ días	111
Figura 51. Desplazamiento neto de las partículas vertidas en la desembocadura del río Anchicayá en la bahía de Buenaventura para un ciclo cuasiquincenal de marea viva - marea muerta. Escenario 3: Marea viva media (rango de 4.23 m) y caudales fluviales mínimos. A) Instante $t=0$ días, B) Instante $t=5$ días, C) Instante $t=10$ días y D) Instante $t=15$ días	112
Figura 52. Corrientes residuales Eulerianas en la bahía de Buenaventura para un ciclo cuasiquincenal de marea viva - marea muerta. Escenario 4: Marea viva media (rango de 4.23 m) y caudales fluviales máximos	113
Figura 53. Corrientes residuales Eulerianas alrededor de la isla Cascajal para un ciclo cuasiquincenal de marea viva - marea muerta. Escenario 4: Marea viva media (rango de 4.23 m) y caudales fluviales máximos	114

Figura 54. Desplazamiento neto de las partículas vertidas en el estero San Antonio en la bahía de Buenaventura para un ciclo cuasiquincenal de marea viva - marea muerta. Escenario 4: Marea viva media (rango de 4.23 m) y caudales fluviales máximos. A) Instante $t=0$ días, B) Instante $t=5$ días, C) Instante $t=10$ días y D) Instante $t=15$ días	115
Figura 55. Desplazamiento neto de las partículas vertidas en el estero Gamboa en la bahía de Buenaventura para un ciclo cuasiquincenal de marea viva - marea muerta. Escenario 4: Marea viva media (rango de 4.23 m) y caudales fluviales máximos. A) Instante $t=0$ días, B) Instante $t=5$ días, C) Instante $t=10$ días y D) Instante $t=15$ días	116
Figura 56. Desplazamiento neto de las partículas vertidas en el Muelle en la bahía de Buenaventura para un ciclo cuasiquincenal de marea viva - marea muerta. Escenario 4: Marea viva media (rango de 4.23 m) y caudales fluviales máximos. A) Instante $t=0$ días, B) Instante $t=5$ días, C) Instante $t=10$ días y D) Instante $t=15$ días	117
Figura 57. Desplazamiento neto de las partículas vertidas en el estero Aguacate en la bahía de Buenaventura para un ciclo cuasiquincenal de marea viva - marea muerta. Escenario 4: Marea viva media (rango de 4.23 m) y caudales fluviales máximos. A) Instante $t=0$ días, B) Instante $t=5$ días, C) Instante $t=10$ días y D) Instante $t=15$ días	118
Figura 58.. Desplazamiento neto de las partículas vertidas en la desembocadura del río San Antonio en la bahía de Buenaventura para un ciclo cuasiquincenal de marea viva - marea muerta. Escenario 4: Marea viva media (rango de 4.23 m) y caudales fluviales máximos. A) Instante $t=0$ días, B) Instante $t=5$ días, C) Instante $t=10$ días y D) Instante $t=15$ días	119
Figura 59. Desplazamiento neto de las partículas vertidas en la parte alta del río San Antonio en la bahía de Buenaventura para un ciclo cuasiquincenal de marea viva - marea muerta. Escenario 4: Marea viva media (rango de 4.23 m) y caudales fluviales máximos. A) Instante $t=0$ días, B) Instante $t=5$ días, C) Instante $t=10$ días y D) Instante $t=15$ días	120
Figura 60. Desplazamiento neto de las partículas vertidas en el delta del río Dagua en la bahía de Buenaventura para un ciclo cuasiquincenal de marea viva - marea muerta. Escenario 4: Marea viva media (rango de 4.23 m) y caudales fluviales máximos. A) Instante $t=0$ días, B) Instante $t=5$ días, C) Instante $t=10$ días y D) Instante $t=15$ días	121
Figura 61. Desplazamiento neto de las partículas vertidas en la desembocadura del río Limones en la bahía de Buenaventura para un ciclo cuasiquincenal de marea viva - marea muerta. Escenario 4: Marea viva media (rango de 4.23 m) y caudales fluviales máximos. A) Instante $t=0$ días, B) Instante $t=5$ días, C) Instante $t=10$ días y D) Instante $t=15$ días	122
Figura 62. Desplazamiento neto de las partículas vertidas en la desembocadura del río Anchicayá en la bahía de Buenaventura para un ciclo cuasiquincenal de marea viva - marea muerta. Escenario 4: Marea viva media (rango de 4.23 m) y caudales fluviales máximos. A) Instante $t=0$ días, B) Instante $t=5$ días, C) Instante $t=10$ días y D) Instante $t=15$ días	123
Figura 63. Corrientes residuales Eulerianas en la bahía de Buenaventura para un ciclo cuasiquincenal de marea viva - marea muerta. Escenario 5: Marea viva mínima (rango de 3.54 m) y caudales fluviales mínimos	124

Figura 64. Corrientes residuales Eulerianas alrededor de la isla Cascajal para un ciclo cuasiquincenal de marea viva - marea muerta. Escenario 5: Marea viva mínima (rango de 3.54 m) y caudales fluviales mínimos	125
Figura 65. Desplazamiento neto de las partículas vertidas en el estero San Antonio en la bahía de Buenaventura para un ciclo cuasiquincenal de marea viva - marea muerta. Escenario 5: Marea viva mínima (rango de 3.54 m) y caudales fluviales mínimos. A) Instante $t=0$ días, B) Instante $t=5$ días, C) Instante $t=10$ días y D) Instante $t=15$ días	126
Figura 66. Desplazamiento neto de las partículas vertidas en el estero Gamboa en la bahía de Buenaventura para un ciclo cuasiquincenal de marea viva - marea muerta. Escenario 5: Marea viva mínima (rango de 3.54 m) y caudales fluviales mínimos. A) Instante $t=0$ días, B) Instante $t=5$ días, C) Instante $t=10$ días y D) Instante $t=15$ días	127
Figura 67. Desplazamiento neto de las partículas vertidas en el Muelle en la bahía de Buenaventura para un ciclo cuasiquincenal de marea viva - marea muerta. Escenario 5: Marea viva mínima (rango de 3.54 m) y caudales fluviales mínimos. A) Instante $t=0$ días, B) Instante $t=5$ días, C) Instante $t=10$ días y D) Instante $t=15$ días	128
Figura 68. Desplazamiento neto de las partículas vertidas en el estero Aguacate en la bahía de Buenaventura para un ciclo cuasiquincenal de marea viva - marea muerta. Escenario 5: Marea viva mínima (rango de 3.54 m) y caudales fluviales mínimos. A) Instante $t=0$ días, B) Instante $t=5$ días, C) Instante $t=10$ días y D) Instante $t=15$ días	129
Figura 69. Desplazamiento neto de las partículas vertidas en la desembocadura del río San Antonio en la bahía de Buenaventura para un ciclo cuasiquincenal de marea viva - marea muerta. Escenario 5: Marea viva mínima (rango de 3.54 m) y caudales fluviales mínimos. A) Instante $t=0$ días, B) Instante $t=5$ días, C) Instante $t=10$ días y D) Instante $t=15$ días	130
Figura 70. Desplazamiento neto de las partículas vertidas en la parte alta del río San Antonio en la bahía de Buenaventura para un ciclo cuasiquincenal de marea viva - marea muerta. Escenario 5: Marea viva mínima (rango de 3.54 m) y caudales fluviales mínimos. A) Instante $t=0$ días, B) Instante $t=5$ días, C) Instante $t=10$ días y D) Instante $t=15$ días	131
Figura 71. Desplazamiento neto de las partículas vertidas en el delta del río Dagua en la bahía de Buenaventura para un ciclo cuasiquincenal de marea viva - marea muerta. Escenario 5: Marea viva mínima (rango de 3.54 m) y caudales fluviales mínimos. A) Instante $t=0$ días, B) Instante $t=5$ días, C) Instante $t=10$ días y D) Instante $t=15$ días	132
Figura 72. Desplazamiento neto de las partículas vertidas en la desembocadura del río Limones en la bahía de Buenaventura para un ciclo cuasiquincenal de marea viva - marea muerta. Escenario 5: Marea viva mínima (rango de 3.54 m) y caudales fluviales mínimos. A) Instante $t=0$ días, B) Instante $t=5$ días, C) Instante $t=10$ días y D) Instante $t=15$ días	133
Figura 73. Desplazamiento neto de las partículas vertidas en la desembocadura del río Anchicayá en la bahía de Buenaventura para un ciclo cuasiquincenal de marea viva - marea muerta. Escenario 5: Marea viva mínima (rango de 3.54 m) y caudales fluviales mínimos. A) Instante $t=0$ días, B) Instante $t=5$ días, C) Instante $t=10$ días y D) Instante $t=15$ días	134

Figura 74. Corrientes residuales Eulerianas en la bahía de Buenaventura para un ciclo cuasiquincenal de marea viva - marea muerta. Escenario 6: Marea viva mínima (rango de 3.54 m) y caudales fluviales máximos	135
Figura 75. Corrientes residuales Eulerianas alrededor de la isla Cascajal para un ciclo cuasiquincenal de marea viva - marea muerta. Escenario 6: Marea viva mínima (rango de 3.54 m) y caudales fluviales máximos	136
Figura 76. Desplazamiento neto de las partículas vertidas en el estero San Antonio en la bahía de Buenaventura para un ciclo cuasiquincenal de marea viva - marea muerta. Escenario 6: Marea viva mínima (rango de 3.54 m) y caudales fluviales máximos. A) Instante $t=0$ días, B) Instante $t=5$ días, C) Instante $t=10$ días y D) Instante $t=15$ días	137
Figura 77. Desplazamiento neto de las partículas vertidas en el estero Gamboa en la bahía de Buenaventura para un ciclo cuasiquincenal de marea viva - marea muerta. Escenario 6: Marea viva mínima (rango de 3.54 m) y caudales fluviales máximos. A) Instante $t=0$ días, B) Instante $t=5$ días, C) Instante $t=10$ días y D) Instante $t=15$ días	138
Figura 78. Desplazamiento neto de las partículas vertidas en el Muelle en la bahía de Buenaventura para un ciclo cuasiquincenal de marea viva - marea muerta. Escenario 6: Marea viva mínima (rango de 3.54 m) y caudales fluviales máximos. A) Instante $t=0$ días, B) Instante $t=5$ días, C) Instante $t=10$ días y D) Instante $t=15$ días	139
Figura 79. Desplazamiento neto de las partículas vertidas en el estero Aguacate en la bahía de Buenaventura para un ciclo cuasiquincenal de marea viva - marea muerta. Escenario 6: Marea viva mínima (rango de 3.54 m) y caudales fluviales máximos. A) Instante $t=0$ días, B) Instante $t=5$ días, C) Instante $t=10$ días y D) Instante $t=15$ días	140
Figura 80. Desplazamiento neto de las partículas vertidas en la desembocadura del río San Antonio en la bahía de Buenaventura para un ciclo cuasiquincenal de marea viva - marea muerta. Escenario 6: Marea viva mínima (rango de 3.54 m) y caudales fluviales máximos. A) Instante $t=0$ días, B) Instante $t=5$ días, C) Instante $t=10$ días y D) Instante $t=15$ días	141
Figura 81. Desplazamiento neto de las partículas vertidas en la parte alta del río San Antonio en la bahía de Buenaventura para un ciclo cuasiquincenal de marea viva - marea muerta. Escenario 6: Marea viva mínima (rango de 3.54 m) y caudales fluviales máximos. A) Instante $t=0$ días, B) Instante $t=5$ días, C) Instante $t=10$ días y D) Instante $t=15$ días	142
Figura 82. Desplazamiento neto de las partículas vertidas en el delta del río Dagua en la bahía de Buenaventura para un ciclo cuasiquincenal de marea viva - marea muerta. Escenario 6: Marea viva mínima (rango de 3.54 m) y caudales fluviales máximos. A) Instante $t=0$ días, B) Instante $t=5$ días, C) Instante $t=10$ días y D) Instante $t=15$ días	143
Figura 83. Desplazamiento neto de las partículas vertidas en la desembocadura del río Limones en la bahía de Buenaventura para un ciclo cuasiquincenal de marea viva - marea muerta. Escenario 5: Marea viva mínima (rango de 3.54 m) y caudales fluviales máximos. A) Instante $t=0$ días, B) Instante $t=5$ días, C) Instante $t=10$ días y D) Instante $t=15$ días	144
Figura 84. Desplazamiento neto de las partículas vertidas en la desembocadura del río Anchicayá en la bahía de Buenaventura para un ciclo cuasiquincenal de marea viva - marea muerta. Escenario	

6: Marea viva mínima (rango de 3.54 m) y caudales fluviales máximos. A) Instante $t=0$ días, B) Instante $t=5$ días, C) Instante $t=15$ días..... 145

INDICE DE GRÁFICOS

Grafica 1. Diagrama de cajas y bigotes de temperatura del aire mensual multianual en la estación Colpuertos, en el municipio de Buenaventura	30
Grafica 2. Diagrama de cajas y bigotes de temperatura del aire mensual multianual en la estación Aeropuerto de Buenaventuras, en el municipio de Buenaventura	31
Grafica 3. Diagrama de cajas y bigotes de humedad relativa del aire mensual multianual en la estación Aeropuerto de Buenaventura, en el municipio de Buenaventura	32
Grafica 4. Diagrama de cajas y bigotes de humedad relativa del aire mensual multianual en la estación Colpuertos, en el municipio de Buenaventura.	33
Grafica 5. Diagrama de cajas y bigotes de precipitación mensual multianual en la estación Colpuertos, en el municipio de Buenaventura	34
Grafica 6. Diagrama de cajas y bigotes de precipitación mensual multianual en la estación Aeropuerto de Buenaventuras, en el municipio de Buenaventura	35
Grafica 7. Diagrama de cajas y bigotes de nubosidad mensual multianual en la estación Colpuertos, en el municipio de Buenaventura	38
Grafica 8. Diagrama de cajas y bigotes de nubosidad mensual multianual en la estación Aeropuerto de Buenaventura, en el municipio de Buenaventura	38
Grafica 9. Diagrama de cajas y bigotes de brillo solar mensual multianual en la estación Colpuertos, en el municipio de Buenaventura	39
Grafica 10. Diagrama de cajas y bigotes de brillo solar mensual multianual en la estación Aeropuerto de Buenaventura, en el municipio de Buenaventura	40
Grafica 11. Niveles de Marea en la bahía de Buenaventura durante el mes de noviembre del año 1997 (Fuente: Laboratorio de Proyectos Hidráulicos del Pacífico - Universidad del Valle, 1998)	45
Grafica 12. Análisis de sensibilidad para el coeficiente de rugosidad: Niveles de marea en el sitio de control Aguadulce	56
Grafica 13. Análisis de sensibilidad para el coeficiente de rugosidad: Niveles de marea en el sitio de control Muelle	56
Grafica 14. Análisis de sensibilidad para el coeficiente de rugosidad: Niveles de marea en el sitio de control La Bocana	57
Grafica 15. Análisis de sensibilidad para el coeficiente de rugosidad: Velocidad del flujo en el sitio de control Aguadulce	57
Grafica 16. Análisis de sensibilidad para el coeficiente de rugosidad: Velocidad del flujo en el sitio de control Muelle	58
Grafica 17. Análisis de sensibilidad para el coeficiente de rugosidad: Velocidad del flujo en el sitio de control La Bocana	58
Grafica 18. Análisis de sensibilidad para la viscosidad turbulenta: Velocidad del flujo en el sitio de control Aguadulce	60

Grafica 19. Análisis de sensibilidad para la viscosidad turbulenta: Velocidad del flujo en el sitio de control Muelle	60
Grafica 20. Análisis de sensibilidad para la viscosidad turbulenta: Velocidad del flujo en el sitio de control La Bocana	61
Grafica 21. Análisis de sensibilidad para la viscosidad turbulenta: Niveles de marea en el sitio de control Aguadulce	61
Grafica 22. Análisis de sensibilidad para la viscosidad turbulenta: Niveles de marea en el sitio de control Muelle.....	62
Grafica 23. Análisis de sensibilidad para la viscosidad turbulenta. Niveles de marea en el sitio de control La Bocana	62
Grafica 24. Análisis de sensibilidad para los armónicos de marea: Niveles de marea en el sitio de control Aguadulce	64
Grafica 25. Análisis de sensibilidad para los armónicos de marea: Niveles de marea en el sitio de control Muelle.....	64
Grafica 26. Análisis de sensibilidad para los armónicos de marea: Niveles de marea en el sitio de control La Bocana	65
Grafica 27. Análisis de sensibilidad para los armónicos de marea: Velocidad del flujo en el sitio de control Aguadulce	65
Grafica 28. Análisis de sensibilidad para los armónicos de marea: Velocidad del flujo en el sitio de control Muelle	66
Grafica 29. Análisis de sensibilidad para los armónicos de marea: Velocidad del flujo en el sitio de control La Bocana	66
Grafica 30. Valores del coeficiente de correlación R^2 en función del coeficiente de rugosidad de Manning.....	67
Grafica 31. Calibración del modelo hidrodinámico: Niveles de marea en el sitio de control La Bocana.....	69
Grafica 32. Calibración del modelo hidrodinámico: Niveles de marea en el sitio de control Isla Cangrejo.....	69
Grafica 33. Calibración del modelo hidrodinámico: Niveles de marea en el sitio de control Delta Dagua	70
Grafica 34. Calibración del modelo hidrodinámico: Niveles de marea en el sitio de control Aguadulce	70
Grafica 35. Calibración del modelo hidrodinámico: Niveles de marea en el sitio de control Muelle	71
Grafica 36. Verificación del modelo hidrodinámico: Niveles de marea en el sitio de control Mareógrafo (01/08/2003 – 06/08/2003).....	72
Grafica 37. Verificación del modelo hidrodinámico: Niveles de marea en el sitio de control Mareógrafo (16/11/2003 – 26/11/2003).....	73

Grafica 38. Variación del nivel del agua para los puntos de control La Bocana y Muelle para la marea de 09/05/2001	74
Grafica 39. Diferentes instantes de un ciclo de marea viva (07/05/2001)	75
Grafica 40. Diferentes instantes de un ciclo de marea muerta (16/05/2001)	75

RESUMEN

Las corrientes residuales en un estuario se definen como el promedio temporal de las velocidades de las corrientes mareales durante un ciclo completo de marea. Estas corrientes residuales se manifiestan en el desplazamiento neto de los cuerpos de agua y, a pesar de que son mucho menores que las velocidades mareales reales, tienen gran importancia en el transporte de sedimentos y sustancias. El transporte residual o neto, generado por la asimetría de las mareas, es determinante en la dinámica morfológica y de la calidad de las aguas en estuarios y bahías. En este proyecto se investigaron las corrientes residuales al interior de la bahía de Buenaventura, localizada al suroccidente de Colombia en la costa pacífica. En esta región se presenta una variación considerable del rango mareal, pudiendo fluctuar desde 1.4 m (mareas muertas mínimas) hasta 5.4 m (mareas vivas máximas). Se implementó el modelo matemático hidrodinámico MOHID y su módulo de trazadores Lagrangianos con el fin de simular los procesos hidrodinámicos en la bahía, determinar las corrientes residuales, tanto durante mareas vivas como durante mareas muertas, y estimar el transporte o desplazamiento neto de las partículas al final de un ciclo cuasi-quincenal de mareas vivas- mareas muertas. Los resultados obtenidos muestran que en la bahía de Buenaventura existe una circulación residual apreciable en toda su extensión y con dirección predominante hacia el exterior de la misma, aunque en algunos sectores se presentan pequeñas recirculaciones. Cuando se presenta una marea viva media (rango mareal de 4.23 m), las velocidades residuales al final de un ciclo completo de mareas vivas - mareas muertas pueden variar entre 2 cm/s en gran parte de la bahía hasta cerca de 50 cm/s en la entrada de la bahía (La Bocana). Se simuló igualmente diferentes condiciones de descargas en los ríos Dagua y Anchicayá, principales tributarios de la bahía, encontrándose que las corrientes residuales se incrementan cuando los afluentes descargan los máximos caudales, y que se manifiesta en un mayor desplazamiento neto de las partículas o trazadores Lagrangianos en dirección hacia la bahía exterior.

Palabras claves: Estuario, hidrodinámica, modelo MOHID, corriente residual, lagrangiano, euleriano.

1 INTRODUCCIÓN

La bahía de Buenaventura se encuentra ubicada sobre la costa pacífica colombiana. En ella se localizan varios terminales marítimos a través de los cuales se movilizan importantes volúmenes de cargas de importación y exportación. No obstante, esta intensa actividad portuaria y marítima se constituye en una importante fuente de contaminación de las aguas de la bahía, afectando de manera significativa el ecosistema estuarino (fluvial y marítimo). Adicionalmente existen significativos aportes de aguas servidas, vertimientos y residuos por parte de los asentamientos urbanos cercanos al sistema fluvial del municipio de Buenaventura. Esta situación se agrava en la medida en que se observa un crecimiento no planificado de la población y un incremento de las actividades productivas en la zona costera, convirtiéndola en un área frágil a causa del deterioro en la calidad del agua, impactando negativamente en los ecosistemas marino-costeros y, por ende, en la población (Vivas-Aguas *et al.*, 2014).

De acuerdo con los estudios realizados por INVEMAR, la amenaza más alta por contaminación orgánica y microbiológica en la bahía se presenta en las aguas próximas y periféricas a la isla Cascajal debido a la contaminación por hidrocarburos, los residuos orgánicos de origen animal y madereros (aserrín), los materiales de relleno usados para la compactación del suelo, los sedimentos re-suspendidos durante el dragado y los vertimientos de aguas residuales domésticas e industriales. Al mismo tiempo, estos contaminantes son diluidos y dispersados por toda la bahía a causa de la interacción de las aguas oceánicas, las descargas de los tributarios, los vientos y las precipitaciones frecuentes (Vivas-Aguas *et al.*, 2014).

Los desplazamientos netos de las partículas de agua causados por agentes como las mareas, los vientos, las corrientes de densidad, además de las corrientes producidas en la interacción del agua con el lecho marino, son denominados corrientes residuales. Es decir, las corrientes residuales corresponden a aquella circulación estuarina que se refleja en el transporte neto de los cuerpos de agua que ocurre en una bahía o estuario a pesar de los movimientos periódicos o cíclicos producidos por la marea.

La presente investigación procura establecer, a partir de la modelación matemática hidrodinámica, la caracterización de la dinámica de las corrientes residuales en la bahía de Buenaventura, considerando diferentes escenarios de condiciones mareales y aportes de tributarios; esto permitirá en futuros estudios analizar los procesos físicos de transporte neto y dispersión de sedimentos, partículas y sustancias contaminantes en los sectores próximos y periféricos a la isla Cascajal. Para tal fin, inicialmente se efectuó una caracterización física de la bahía, describiendo sus principales aspectos y características oceanográficas (marea, oleaje, entre otros), climáticas (vientos, nubosidad, temperatura y humedad relativa) y aportes de los diferentes ríos afluentes y esteros. Posteriormente se implementó el modelo matemático hidrodinámico MOHID para simular los procesos hidrodinámicos y de transporte en la bahía; también se implementó el módulo de trazadores Lagrangianos con el objeto de determinar las trayectorias que siguen las partículas

vertidas bajo variadas condiciones mareales y de descargas fluviales al interior de la bahía de Buenaventura.

La determinación de las corrientes residuales en la bahía de Buenaventura, especialmente alrededor de la isla Cascajal, permitirá en investigaciones posteriores plantear y evaluar diferentes medidas a implementar con el propósito de mejorar la calidad de las aguas alrededor de la isla y de la bahía en general; y por lo tanto, contribuirá a la recuperación y conservación del ecosistema estuarino y costero.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo General

Estudiar las corrientes residuales al interior de la bahía de Buenaventura empleando la modelación matemática.

2.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar la hidrodinámica de la bahía de Buenaventura.
- Implementar un modelo matemático hidrodinámico en la bahía de Buenaventura.
- Implementar un modelo de trazadores Lagrangianos en la bahía de Buenaventura.
- Plantear, simular y analizar diferentes escenarios considerando distintas condiciones mareales y descargas de tributarios y determinar las corrientes residuales al interior de la bahía de Buenaventura para cada uno de ellos.

3 DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

3.1 Generalidades de la Zona de Estudio

El municipio de Buenaventura se encuentra localizado en el departamento del Valle del Cauca, al sur-occidente de Colombia; limita por el norte con el departamento del Chocó, por el oriente con los municipios de Dagua, Cali y Jamundí, por el sur con el departamento del Cauca y por el occidente con el océano Pacífico; sus coordenadas son latitud norte $3^{\circ}53'47''$ y $77^{\circ}04'40''$ longitud oeste (ver Figura 1). La bahía de Buenaventura está conformada por una bahía exterior que se halla en conexión directa con el mar abierto y una bahía interior con características estuarinas; ambas bahías están comunicadas por un canal de acceso, el cual permite el tránsito de embarcaciones desde mar afuera hasta los terminales marítimos de Buenaventura.

La bahía interior es una zona con una orientación suroeste-noreste, presentando una forma alargada y angosta de cerca de 15 Km de longitud y 3.4 Km de ancho, aproximadamente. La entrada a la bahía interior se conoce como La Bocana y está determinada por tierra firme al norte por Punta Bazán y al sur por Punta Soldado. La protección natural por la configuración geomorfológica de la entrada misma a la bahía interior limita el oleaje producido mar afuera por los vientos a olas de sólo 0.6 a 0.9 m de altura máxima sobre la entrada misma.

A la bahía interior confluyen doce (12) tributarios entre ríos, brazos y esteros, alimentados por la cuenca de la bahía de Buenaventura con una extensión aproximada de 3800 Km^2 . Los aportes de agua dulce de los tributarios a la bahía se estiman en un caudal total promedio de $448.2 \text{ m}^3/\text{s}$, con una considerable carga de sedimentos que se depositan normalmente en los deltas e islas sobre el flanco sur del canal de acceso al puerto de Buenaventura (Palacios & Quirós, 2006).

Por la posición de la zona de estudio, la circulación de los vientos está afectada por la concavidad ecuatorial de bajas presiones, donde convergen los vientos alisios de cada hemisferio para formar la zona de convergencia intertropical (ZCIT), resultando en vientos variables y débiles. Además, la precipitación durante el año se caracteriza como un régimen de lluvias bimodal y las variaciones en la temperatura durante el año son mínimas debido al alto contenido de vapor de agua en la atmósfera (Ramírez, 1999).

En la bahía de Buenaventura las características de las mareas son bastante similares a las existentes en el Pacífico Colombiano, con algunas pequeñas variaciones, especialmente en los valores de la amplitud de la marea a medida que ésta penetra en la bahía por efecto de fenómenos, tales como resonancia, reflexión, difracción y refracción por cambios en la velocidad de la onda de marea en aguas a diferentes profundidades, etc. Así pues, en la entrada de la Bahía (sector Punta Soldado - Punta Bazán) se tienen amplitudes ligeramente inferiores a las que se presentan en el sector de la Isla de Cascajal. Según el informe del “Estudio sedimentológico de la Bahía de Buenaventura” del Laboratorio Central de Hidráulica de Francia (1975), este aumento en la amplitud de la marea se

debe al estrechamiento en la parte interior de la bahía y en menor proporción a la convergencia entre la entrada y la Isla de Cascajal.

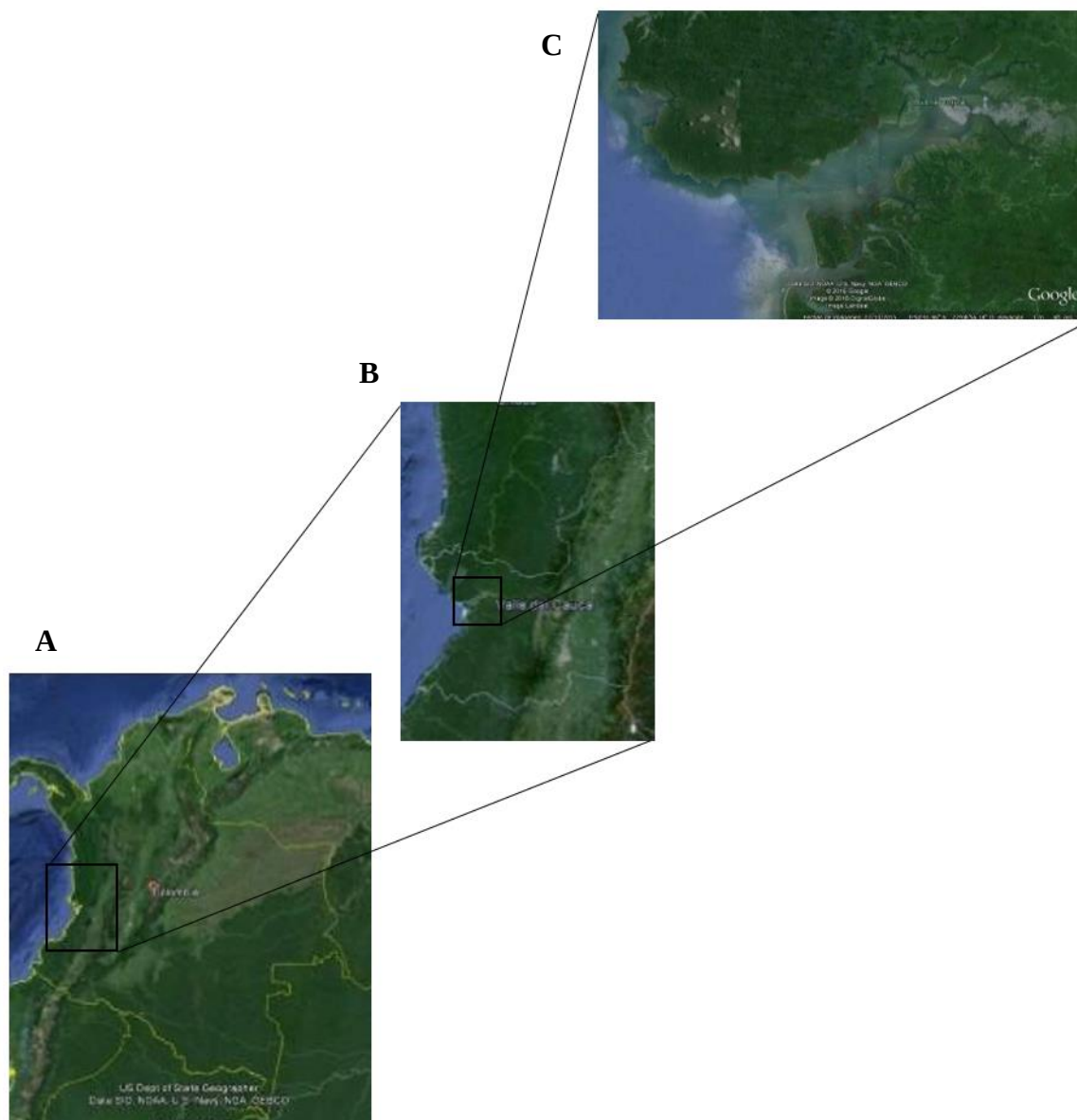


Figura 1. Localización de la bahía de Buenaventura: A) Colombia, B) Valle del Cauca y C) Bahía de Buenaventura

3.2 Planteamiento del Problema

Por sus características físicas y ubicación la bahía de Buenaventura es un ecosistema de gran interés socioeconómico en Colombia; es una zona conformada por bosques tropicales húmedos, cubierta por una densa vegetación arbórea de gran variedad de especies. Además, es un estuario bien mezclado ya que presenta muy poca variabilidad de la salinidad en la columna de agua, debido a la intensidad de mezcla que existe entre el agua proveniente de los escurrimientos

continentales (ríos y arroyos) y el agua oceánica (Ramírez, 1995). Al interior de la bahía se encuentran diferentes terminales marítimos, como son: el Terminal de Contenedores de Buenaventura (TCBUEN), el Muelle Petrolero y el Terminal Marítimo de la Sociedad Portuaria Regional de Buenaventura (SPRBUN), los cuales registran desde hace varias décadas una intensa y creciente actividad portuaria, estimulada por la inversión del gobierno y compañías nacionales e internacionales (Pérez, 2007). Actualmente, a través de este puerto se moviliza el 53% del comercio colombiano; se exporta el 80% del café y el 60% de todas las exportaciones del país y se importa el 83% de los productos químicos inorgánicos, el 81% de las láminas metálicas, el 72 % del maíz y el trigo y el 60% de los productos químicos industriales, atribuyéndole el calificativo de ser el puerto más importante del país sobre el Océano Pacífico (Cámara de Comercio de Buenaventura, 2016).

A nivel mundial importantes impactos en diferentes ecosistemas están siendo generados por el desarrollo acelerado de las zonas costeras. En este sentido, las operaciones que constituyen las actividades portuarias generan desechos, residuos de aceites, petróleo y demás hidrocarburos que constituyen fuentes de contaminación; estos desechos son arrastrados hacia otros sectores distintos dependiendo de la circulación de las aguas (Mancera *et al.*, 2013). A su vez, las actividades económicas, como la pesca, el turismo, la navegación, la explotación minera y los asentamientos urbanos próximos a las cuencas del municipio de Buenaventura impactan negativamente la calidad de las aguas de la bahía a través del aporte de aguas servidas y vertimientos de fuentes puntuales y difusas provenientes de escorrentías fluviales y urbanas (Vivas-Aguas *et al.*, 2012).

La dinámica de las corrientes en bahías, ensenadas y estuarios está influenciada principalmente por la acción de las mareas y las descargas fluviales de los ríos que en ellas desembocan. La marea es un factor primordial en el equilibrio ecológico de los sistemas costeros ya que permite el intercambio energético con las aguas oceánicas, resultando en un transporte neto de masa, incluyendo el material disuelto y en suspensión (Sánchez, 2004). Dentro del estudio global, es muy importante el conocimiento de las corrientes al interior de estos cuerpos de agua y, en especial, de las corrientes residuales, con el fin de predecir o estimar el transporte neto de los contaminantes y posteriormente evaluar los impactos en los diferentes sectores, así como plantear y analizar diferentes medidas para mantener unas condiciones de calidad de agua apropiadas.

3.3 Justificación

El Pacífico colombiano tiene una línea de costa de 1544 Km de longitud, integrado por superficies estuarinas, entre las cuales se destaca la bahía de Buenaventura (Posada & Roza, 2014). La importancia de los estuarios es vastísima ya que albergan multitud de procesos biológicos y numerosas actividades humanas. A pesar de generar múltiples beneficios, los estuarios se ven constantemente amenazados por la presencia de numerosas presiones generadas por actividades antrópicas que limitan su potencial productivo. Es por esto que las zonas estuarinas precisan de respuestas específicas y una gestión eficaz para mitigar los efectos de dichas presiones; esto

requiere la aplicación de políticas que protejan el desarrollo sostenible de la zona, partiendo de estudios previos que abarquen la globalidad y complejidad del problema, especialmente por sus particularidades ambientales que los convierten en hábitats únicos para grupos biológicos específicos, su importancia en la conexión ecológica y en la prestación de servicios económicos de los que depende la subsistencia de muchas comunidades de la región.

Hasta ahora se han realizado diversas investigaciones orientadas al estudio y análisis de las condiciones hidrodinámicas al interior de la bahía de Buenaventura, pero ninguno enfocado hacia la comprensión de las corrientes residuales, es decir, los procesos de transporte neto de las aguas, sedimentos, partículas y sustancias contaminantes en sectores próximos y periféricos a la isla Cascajal. Esta situación denota la necesidad de realizar un estudio que facilite el conocimiento y entendimiento del régimen hidráulico que gobierna el comportamiento de las corrientes alrededor de la isla, resultando en un patrón neto de circulación que permita finalmente cuantificar el transporte a largo plazo de las masas de agua, los sedimentos, las partículas y las sustancias contaminantes alrededor de la isla, considerando para ello diferentes condiciones mareales y descargas de tributarios.

Los resultados de este estudio pueden aportar una base física para una gran variedad de estudios interdisciplinarios y en la generación de información que permita tomar decisiones orientadas a diseñar estrategias de recuperación y conservación de estos ecosistemas tan importantes a nivel hídrico, ecológico y socioeconómico, tales como el diseño de obras portuarias, la localización y el trazado de emisarios finales de aguas residuales del municipio de Buenaventura y otras actividades que alteren el sistema marino, como puede ser el diseño de estructuras civiles que ayuden a mitigar los problemas de sedimentación en las zonas portuarias, canales de descarga que ayuden a reducir el impacto ambiental o bien en la planificación de otras actividades marino-productivas. Igualmente la determinación y comprensión del régimen oceanográfico en sectores próximos y periféricos a la isla Cascajal, incluyendo en especial las corrientes residuales, serán de gran utilidad en el desarrollo de proyectos de gestión y manejo ambiental del ecosistema estuarino de la bahía de Buenaventura.

Con el propósito de mejorar el conocimiento de la hidrodinámica de la bahía y en especial de comprender el comportamiento de las corrientes residuales en el sector de la isla Cascajal se implementará un modelo matemático hidrodinámico bajo diferentes escenarios de condiciones mareales y de descargas de tributarios. Para ello se implementará el modelo hidrodinámico MOHID, teniendo en cuenta su gran capacidad en el procesamiento de datos, su alto rendimiento computacional y su robustez numérica. Este modelo ha sido aplicado e implementado con éxito en el modelado de zonas costeras y estuarinas en numerosos proyectos a nivel mundial y en diferentes zonas costeras de Colombia, tales como la bahía de Buenaventura y la bahía de Cartagena.

4 MARCO REFERENCIAL

4.1 Antecedentes

Con el fin de conocer el comportamiento y el patrón de circulación de las corrientes al interior de la bahía de Buenaventura en las últimas décadas se han realizado diferentes estudios con la ayuda de la modelación teórica y matemática. Dado el gran desarrollo que ha experimentado la tecnología informática y en especial los modelos matemáticos de simulación en los últimos años, su uso ha ido en aumento como herramienta para contribuir al desarrollo de estudios hidrodinámicos aplicables en zonas costeras y estuarios. En la bahía de Buenaventura se han realizado estudios que incluyen la modelación matemática desde hace más de 20 años.

Uno de los primeros trabajos en el escenario de la bahía de Buenaventura fue la investigación de los procesos hidrodinámicos y de transporte de sedimentos. Ramírez, su autor, estudió la hidrodinámica del estuario mediante la aplicación de dos modelos matemáticos: el modelo de flujo unidimensional DUFLOW para obtener las características hidrodinámicas principales y también para ahorrar tiempo durante el proceso de calibración del modelo de dos dimensiones, este último llamado TRISULA fue aplicado para obtener el patrón de flujo en la bahía, lo que permitió obtener más detalles del comportamiento hidráulico en algunos sectores específicos. El desplazamiento y distribución de los sedimentos fue trabajado con base en el análisis de resultados de la modelación hidrodinámica y la aplicación de expresiones empíricas existentes para estuarios con características similares a la de la bahía de Buenaventura (Ramírez, 1995).

En el año 1998, el Consorcio Hidroestudios-Moffatt & Nichol realizó un estudio de factibilidad y diseño para la profundización del canal de acceso al puerto de Buenaventura, en el cual se ejecutó FASTTABS, un modelo matemático bidimensional del sistema de la bahía de Buenaventura para evaluar, mediante los módulos hidrodinámicos y sedimentológicos, el impacto de las diversas alternativas de profundización del canal sobre la hidrodinámica y la sedimentación del sistema y para estimar los volúmenes del dragado de mantenimiento anual (Moffatt & Nichol, 1998).

Ramírez en el año 1999, llevó a cabo un estudio mediante la implementación del modelo matemático MIKE21, en el cual se logró un mejor entendimiento de los fenómenos hidrodinámicos y los procesos del transporte de sedimentos finos cohesivos (lodos) y granulares (arenas) en la bahía de Buenaventura. Se investigó la influencia en la hidrodinámica de la bahía de parámetros como la rugosidad y la viscosidad turbulenta o de remolino e igualmente fue evaluada la influencia en los patrones de sedimentación y erosión de parámetros y factores como los coeficientes de dispersión, la velocidad de caída de los sedimentos en suspensión, las concentraciones de sedimentos suspendidos en las fronteras, etc. (Ramírez, 1999).

Otero (2005) utilizó el modelo numérico H2D para efectuar la descripción espacio-temporal de las corrientes y la propagación de la onda de marea en la bahía de Buenaventura. La metodología seguida comprendió la recolección de información en campo de las principales variables

hidrodinámicas involucradas en el estudio, con las cuales se efectuó la calibración del modelo numérico obteniéndose finalmente los valores de la rugosidad de Chezy y de la viscosidad de remolino que mejor describen el comportamiento hidrodinámico en la bahía, especialmente la variación de los niveles del mar y las corrientes. Con el modelo calibrado se analizaron los resultados para estimar la intensidad de las corrientes en diferentes sectores de la zona de estudio y se describió la transformación que sufre la onda de marea (por efecto de los contornos) en su propagación al interior del estuario. Se encontró que el rango de marea se incrementa cerca de un 10% al llegar a la isla Cascajal, con un desfase o retardo de 20 minutos aproximadamente (Otero, 2005).

Muñoz, en el año 2015 realizó el estudio de la dispersión de hidrocarburos debido a un posible derrame en la bahía de Buenaventura implementando el modelo matemático MOHID (desarrollado por MARETEC) para simular los procesos hidrodinámicos y de transporte y de calidad del agua de la bahía. De igual manera se implementó el módulo de trazadores Lagrangianos con el fin de estimar las trayectorias de las partículas de diferentes sustancias vertidas en el sistema de la bahía. La investigación se enmarcó dentro de un escenario eventual, confirmando que ante el posible derrame accidental de hidrocarburo, frente al Terminal de Contenedores de Buenaventura (TCBUEN) o en la parte media del canal de acceso al puerto, la dispersión del mismo se verá fuertemente influenciada por la velocidad y dirección de las corrientes mareales existentes durante el derrame. Durante las 12 primeras horas, la mayor área contaminada se presenta cuando el vertido del crudo ocurre justamente durante la pleamar. Después de siete días de ocurrido el derrame accidental del crudo frente al TCBUEN (independientemente de la condición de marea), los esteros más afectados son Aguacate y Gamboa y la Isla Cascajal; cuando el derrame ocurre en la parte media del canal de acceso los sectores más afectados son los tramos frente de los ríos Anchicayá y Limones, los esteros Hondo y Humane, la entrada y la zona media de la Bahía (Muñoz, 2015).

Ayala (2015) estudió la modelación hidrodinámica y de calidad de agua de la bahía de Buenaventura con el propósito de simular los procesos de dispersión de coliformes temporales (CTE) y la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) (variación temporal y espacial de estos parámetros), para finalmente plantear y simular diferentes escenarios a corto (5 años), mediano (10 años) y largo plazo (20 años), considerando diferentes condiciones: mareales, proyecciones de cargas contaminantes y niveles de tratamiento de las aguas residuales vertidas a la bahía de Buenaventura condicionadas a unos escenarios denominados optimista y pesimista referente a la implementación de medidas estructurales para su mitigación (Ayala, 2015).

Posteriormente, el Consorcio Dragado Buenaventura (2016) estudió y diseñó el dragado de profundización del canal de acceso al Puerto de Buenaventura, garantizando la entrada y salida segura de embarcaciones, mediante el diseño, no solo de las características geométricas del canal (ancho de solera, taludes, profundidad, entre tangencias, radios de giro, de una o dos vías) y de las zonas de fondeo, establecidas en función de las características de la embarcación de diseño (eslora, manga, calado), determinadas a su vez en función de su capacidad de transporte y de las

proyecciones de carga tanto de importación como de exportación del Puerto de Buenaventura, sino además estructuras complementarias que permitan minimizar la sedimentación en los sectores críticos, y áreas de depósito de los materiales que se estime dragar, como resultado del mismo estudio. Con el propósito de estudiar de manera completa el comportamiento hidrosedimentológico de la bahía de Buenaventura, se llevaron a cabo los montajes de los modelos bidimensionales tales como el hidrodinámico, de oleaje, de corrientes y sedimentológicos (Consorcio Dragado Buenaventura, 2016).

4.2 Estado del Arte

El estudio de las corrientes residuales en los estuarios es de gran interés e importancia, ya que está relacionado con el transporte y la dispersión de sustancias disueltas y no disueltas. A continuación se presentan algunos de los estudios desarrollados sobre este tema a nivel mundial.

En el año 1997, García-Silva y Marinone estudiaron el efecto del tamaño de las celdas de malla en el modelado de las corrientes residuales producidas por la marea en el Golfo de California. Los tamaños de malla usados iban desde 14 Km x 14 Km hasta 2 Km x 2 Km. Los resultados mostraron que el modelado de la marea y de las corrientes residuales fueron consistentes para las diferentes mallas evaluadas. En el norte del golfo se obtuvo un patrón de circulación residual bien definido y alineado con las isóbatas, mientras que en el archipiélago se encontró un giro anticiclónico al noroeste de la Isla Tiburón. Para el resto del golfo no se presentó un patrón de circulación residual apreciable. Las velocidades máximas se obtuvieron en el archipiélago con magnitudes de hasta 18 cm/s; en cambio, en la región norte, las velocidades fueron del orden de 1 cm/s. Finalmente, se encontró que la malla de 3 Km x 3 Km resultó ser la más adecuada para modelar las corrientes residuales en el norte del golfo (García-Silva & Marinone, 1997).

En el año 2014, Vaz y Dias llevaron a cabo el estudio de las corrientes residuales y las rutas de transporte en un estuario de planicie costera (estuario del río Tajo, Portugal), teniendo en cuenta los principales factores de forzamiento: marea, caudal de los ríos y la fuerza del viento. La metodología utilizada fue la implementación del modelo MOHID en modo 2D para simular la dinámica mareal del estuario. Los flujos de marea fueron calculados por las mareas, con un promedio de las corrientes de flujo a lo largo de todo el estuario. La batimetría compleja del estuario, las mareas, la descarga de los ríos y la fuerza del viento modularon el flujo residual en el estuario del Tajo. El efecto de combinar las descargas de las mareas y fluviales crean flujos de corrientes preferenciales en las zonas más profundas del estuario. Por otro lado, la intensidad y dirección del viento generan cambios en las corrientes residuales en las zonas poco profundas cerca de la orilla sur del estuario. La escorrentía de los ríos cambia la intensidad de la corriente residual de valores superiores a 0.3 m/s a valores de alrededor de 0.05 m/s. La dirección del viento también induce cambios en los patrones de flujo residual, induciendo la rotación de las corrientes residuales según la dirección del viento. Por lo tanto, el modelo del estuario del Tajo es una herramienta que

arroja una nueva visión acerca de sus procesos hidrodinámicos y en consecuencia sobre los patrones de circulación a largo plazo (Vaz & Dias, 2014).

En Changjiang Bank, en el año 2014 se llevó a cabo una investigación sobre las corrientes residuales de marea y su papel en el flujo medio. En este trabajo se observó, a partir de modelos de simulación, una estructura detallada de la corriente residual de las mareas, en particular, los remolinos meso-escala en la región; su influencia en el flujo medio se cuantificó mediante la validación del modelo de volúmenes finitos Coastal Ocean Model. Los remolinos de marea residuales meso-escala se producen en todo en Changjiang Bank y contribuyen a la circulación residual de las mareas a escala regional de la costa en el límite noroeste y en el borde noreste del Changjiang Bank, sureste a lo largo de la isóbata de 50 m. La rectificación de las mareas es el principal mecanismo que causa la corriente residual de las mareas a fluir a lo largo de las isóbatas (Xuan *et al.*, 2014).

En el año 2015 se utilizó el modelo numérico FVCOM en la bahía de Xiangshan, situada en la costa oeste del Mar Oriental de China, la cual se caracteriza por ser alargada, semi-cerrada y presentar fuertes mareas. Se implementó un modelo de seguimiento de partículas Lagrangiano para simular las mareas a partir de las cuales se produjeron las circulaciones residuales de las mareas Lagrangiana y Euleriana para precisar las distinciones de transporte residual euleriana y lagrangiana. La circulación residual lagrangiana exhibió un patrón de dos ramificaciones que conectó los mares del sur y del norte de la bahía de Xiangshan, mientras que la circulación residual euleriana se caracterizó por remolinos que no son favorables para el intercambio de agua (Peng *et al.*, 2015).

En un estudio sobre mareas y corrientes de marea en el archipiélago de Cabo Verde, en el año 2015, sus autores describen la propagación de la marea en la región de las islas de Cabo Verde y las corrientes inducidas por la marea, evaluando la importancia del viento para la circulación mediante el modelo numérico MOHID en 2D. El objetivo del estudio fue contribuir a demostrar que con base en muy poca información local es posible aumentar nuestro conocimiento a través del uso de modelos numéricos (Gomes *et al.*, 2015).

5 MARCO TEÓRICO

5.1 Corriente Residual

Los conceptos clásicos sobre la hidrodinámica de sistemas semicerrados como lagunas, bahías, puertos o cuerpos de agua costeros, en general, consideran que los agentes que modifican la dinámica de manera directa son la marea, las variables meteorológicas y la batimetría (Quispe, 2007). Según Fischer *et al.* (1979), estos forzamientos generan patrones de circulación inmediata y dan lugar a la formación de otros factores que empiezan a interactuar con ellos (apilamientos de agua, gradientes de presión y gradientes de densidad, entre otros), y que incluso en algunas ocasiones llegan a ser más relevantes que los forzamientos primarios.

En estos sistemas parcialmente conectados al océano adyacente, la marea es el agente que modifica en primera instancia la circulación (Fischer *et al.*, 1979). En la mayoría de los estuarios, es conocido que una partícula de agua no retornará a su posición inicial después de transcurrido un ciclo de marea. Esto se debe a las asimetrías de las corrientes de marea durante la llenante y la vaciante, producidas por una diversidad de factores, tales como el efecto del viento, las descargas de los ríos, la batimetría y la morfología de la costa entre otros (Cáceres *et al.*, 2007). Por lo tanto, al eliminar el efecto del flujo y el reflujo de la marea es posible observar el transporte neto o corriente residual Lagrangiana dentro del sistema (Quispe, 2007).

Las corrientes residuales también se pueden definir como el promedio, durante un ciclo de marea, de las componentes de las velocidades en un punto de un estuario o bahía, denominada corriente residual Euleriana y que se manifiestan en el desplazamiento neto de las partículas de agua durante un ciclo mareal. A pesar de que las corrientes residuales pueden ser muy pequeñas en comparación con las velocidades instantáneas de la marea, sus efectos en el transporte de sedimentos y sustancias son muy importante, ya que están actuando todo el tiempo, generando el desplazamiento y dispersión de sustancias y sedimentos en grandes distancias. El transporte residual neto de los sedimentos tiene consecuencias importantes para el equilibrio morfológico de estuarios y bahías así como en la respuesta de estos cuerpos de agua a cambios en las condiciones externas (Universidad de Granada, 2010).

Según Feng (1986), la corriente residual Euleriana muestra un patrón espacial más estable, mientras que la corriente residual Lagrangiana puede ser altamente dependiente de la fase inicial cuando las partículas son liberadas. No obstante, por su carácter predictivo, una de las aplicaciones prácticas de las corrientes residuales Lagrangianas es la predicción de la trayectoria y destino final de materiales y sedimentos transportados por el agua, induciendo diferentes vías teóricas de transporte de partículas.

En una región estuarina, las partícula de agua se desplazará hacia aguas arriba y hacia aguas abajo en el estuario durante el flujo y el reflujo mareal debido a la propagación de las mareas. En ausencia de corrientes residuales y otras influencias perturbadoras (como la turbulencia), la parcela de agua

volverá a su posición original después de un período de marea. Pero, si se incorporan los efectos de la circulación residual, entonces la posición de las partículas al final del ciclo mareal será de alguna manera diferente de su posición en ausencia de corrientes residuales.

5.2 Procesos de Transporte

Los cuerpos de agua naturales en superficie están sujetos a la permanente renovación por medio de la constante entrada y salida de agua, a tasas muy variables, dependiendo del tipo de cuerpo. Este transporte de agua está acompañado por el transporte de energía mecánica (momentum), térmica (calor) y de sustancias (masa) que viajan como suspensiones en solución. Cada uno de estos fenómenos, que ocurren en los cuerpos de agua, condiciona la proliferación de la vida acuática, así como demás procesos que se presentan.

La evolución de la concentración de una sustancia depende de la acción conjunta de tres procesos, la advección, difusión o dispersión y los procesos de transformación (Fennel & Neumann, 2004; citado por Torres, 2015). Advección es el término aplicado al transporte de un contaminante como consecuencia del flujo de agua, en el cual este es disuelto o suspendido. Por otra parte, las variaciones en la velocidad, junto con gradientes de concentración y difusión molecular, permiten la acción de un fenómeno de transporte de masa llamado dispersión o difusión (Crites & Tchobanoglous, 2000).

5.3 Concepto de Simulación

Robert E. Shannon, define simulación como: *“Simulación es el proceso de diseñar y desarrollar un modelo computarizado de un sistema o proceso y conducir experimentos con este modelo con el propósito de entender el comportamiento del sistema o evaluar varias estrategias con las cuales se puede operar el sistema”* (Coss, 2003).

La simulación constituye una técnica muy vigorosa y ampliamente usada en las ciencias para analizar y estudiar complejos sistemas. Es el proceso de diseñar y desarrollar un modelo computarizado de un sistema o proceso y conducir experimentos con este modelo a fin de entender el comportamiento del sistema y evaluar varias estrategias con las cuales se puede operar el sistema. Consiste básicamente en construir modelos informáticos que describen la parte esencial del comportamiento de un sistema de interés, así como en diseñar y realizar experimentos con el modelo y extraer conclusiones de sus resultados para apoyar la toma de decisiones (Ríos *et al.*, 2000; citado por Sosa, 2010).

5.4 Modelos Matemáticos

La simulación de un fenómeno o del comportamiento exhibido por un sistema, requiere la formulación previa de un modelo matemático. El cual consiste en ecuaciones matemáticas o un

conjunto de éstas, que representen cuantitativamente las hipótesis realizadas sobre un caso real y mediante las cuales se puede conocer el comportamiento de un sistema dado (González, 2003).

Las principales ventajas de los modelos matemáticos respecto a los modelos físicos de laboratorio y a las medidas de campo son: (i) proporcionan una cantidad de información muy completa y extensa; (ii) se obtienen resultados de forma más rápida y con pocos recursos económicos, en comparación con un modelo experimental; (iii) se puede modificar fácilmente la geometría y condiciones de contorno para la evaluación de escenarios presentes y futuros de un sistema en estudio.

Dada la alta complejidad de los fenómenos físicos que intervienen en el mar, así como el gran número de variables involucradas, es necesario recurrir al uso de un modelo matemático hidrodinámico. En su gran mayoría, estos modelos derivan sus ecuaciones del principio de continuidad, de la ecuación de Navier-Stokes (2da ley de Newton) y de las ecuaciones de la Termodinámica.

Debido a la importancia de los modelos numéricos como herramientas de investigación y en la toma de decisiones, actualmente existe en el mercado una gran variedad de software (libre y comercial) disponibles. De manera que la selección del software MOHID, con respecto a otros disponibles en el mercado (COHERENS, ROMS, ELCOM, CH3D, etc.) se realizó con base a los siguientes atributos:

- A. Es un software gratuito
- B. Es aplicable y se ha demostrado su efectividad en el modelado de zonas costeras y estuarinas en numerosos proyectos a nivel mundial
- C. En él se puede modelar el objeto del presente estudio bidimensionalmente
- D. Es aplicable a la escala de la zona de estudio de la bahía de Buenaventura, además de haberse aplicado anteriormente en ella.
- E. Utiliza una interfaz gráfica similar a la suite de Microsoft Office 2013, característica que lo diferencia ampliamente de los demás programas y lo hace más amigable.
- F. Funciona eficientemente en un computador personal, sin altas exigencias de hardware
- G. La información y documentación disponible para capacitar modeladores es aceptable, ya que se dispone de un manual técnico, el cual es fundamental para entender los aspectos físicos y numéricos del modelo, y un manual de usuario, el cual es una guía fundamental para utilizar el modelo. Además periódicamente los diseñadores del software ofrecen cursos de capacitación en Latinoamérica.

5.5 Descripción del Modelo MOHID

El desarrollo del modelo MOHID inició en 1985 por MARETEC (Marine and Environmental Technology Research Center) en el Instituto Superior Técnico de Lisboa en Portugal. Desde

entonces se han realizado numerosas actualizaciones y mejoras, como consecuencia de su uso durante los diferentes proyectos de investigación científica y de proyectos de ingeniería.

5.5.1 Características generales

Principalmente, MOHID es un modelo compuesto por un módulo hidrodinámico de flujo a superficie libre (tridimensional y/o bidimensional) y más de cuarenta módulos, que se encargan del modelado de la dinámica de diversos cuerpos de agua como ríos, estuarios y océanos, basado en las ecuaciones de Navier-Stokes y con las aproximaciones de Boussinesq e hidrostática (Fernández *et al.*, 2011).

El diseño de MOHID, en sus últimas versiones, está basado en el paradigma de orientación a objetos y un diseño modular; mientras que para la implementación se utilizó el lenguaje Fortran 95. El diseño establece una jerarquía de módulos permitiendo así que cada módulo se encargue de manejar la información específica referente a su propósito. En él se pueden emplear diferentes escalas de modelación, permitiendo el uso de mallas, módulos y sistemas anidados (cuencas y estuarios). Además, está integrado por diferentes herramientas como lo son MOHID Water, MOHID Soil y MOHID Land, las cuales pueden ser usadas para estudiar el ciclo del agua en un ambiente integrado, permitiendo simular procesos físicos y biogeoquímicos tanto en el agua como en los sedimentos (Barreto *et al.*, 2009).

MOHID en su diseño modular se subdivide en 40 módulos, cada uno de ellos contiene determinada información e interactúa con los demás a través de flujos de información. Según Barreto *et al.*, (2009), los módulos más importantes son los siguientes:

5.5.2 Módulo Model

Es el módulo principal en la arquitectura del sistema. El módulo Model maneja toda la información de un solo modelo. Es responsable de construir, modificar y destruir cada modelo. También se encarga de controlar el flujo de información entre diferentes modelos y la evolución del tiempo de simulación. Coordina la ejecución del módulo Hidrodinámico y el módulo Transporte; y depende de los módulos Hidrodinámico, Propiedades del Agua y el Lagrangiano.

La coordinación de ejecución del modelo consiste en la actualización del tiempo global del modelo y la actualización de los módulos Transporte e Hidrodinámico en un solo modelo.

5.5.3 Módulo Batimétrico

Su función es leer los datos batimétricos desde un archivo de entrada de tipo ASCII y publicarlos a todos los módulos cliente que así lo requieran. Los datos batimétricos se almacenan en una malla regular, de tamaño X por Y, por cada punto especificado en la malla se debe indicar la profundidad.

Las coordenadas horizontales se pueden dar de diversos tipos, siendo las más comunes las métricas y las geográficas.

5.5.4 Módulo Hidrodinámico

El módulo hidrodinámico tiene la función de calcular niveles, velocidades y caudales de agua, brindando información fundamental para la ejecución de módulos de gran importancia en las diferentes aplicaciones de MOHID.

Ecuaciones gobernantes

La discretización espacial es realizada por una aproximación de volúmenes finitos y la discretización temporal se realiza con un algoritmo semi-implícito ADI (Alternating Direction Implicit). Este algoritmo computa alternativamente una componente de la velocidad horizontal implícitamente mientras la otra es calculada explícitamente. La esencia del método ADI es dividir el paso del tiempo en dos o más fragmentos de tiempo, y para cada uno de éstos resolver las ecuaciones.

El modelo resuelve las ecuaciones primitivas tridimensionales para fluido incomprensible. Se asume como válido el equilibrio hidrostático y se utilizan las aproximaciones de Boussinesq y de Reynolds para la resolución de las ecuaciones tridimensionales de Navier-Stokes, provenientes, a su vez, de la aplicación de la segunda ley de Newton a un volumen de control de dimensiones “dx”, “dy” y “dz” (Figura 2).

Las ecuaciones del balance de momentum – procedente de las aproximaciones antes mencionadas- para las velocidades promedio del flujo horizontal, en su forma cartesiana se presentan en las Ecuaciones 1 a 3; las cuales expresan que la evolución temporal de las velocidades es igual al transporte advectivo, la fuerza de Coriolis, el gradiente de presiones y la difusión turbulenta. A partir de dichas ecuaciones se determina el campo horizontal de velocidades.

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} = & -\frac{\partial}{\partial x}(uu) - \frac{\partial}{\partial y}(uv) - \frac{\partial}{\partial z}(uw) + fu - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left((v_H + v) \frac{\partial u}{\partial x} \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial y} \left((v_H + v) \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left((v_t + v) \frac{\partial u}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad \textbf{Ecuación 1}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} = & -\frac{\partial}{\partial x}(vu) - \frac{\partial}{\partial y}(vv) - \frac{\partial}{\partial z}(vw) + fv - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left((v_H + v) \frac{\partial v}{\partial x} \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial y} \left((v_H + v) \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left((v_H + v) \frac{\partial v}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad \textbf{Ecuación 2}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial w}{\partial t} = & -\frac{\partial}{\partial x}(wu) - \frac{\partial}{\partial y}(wv) - \frac{\partial}{\partial z}(ww) + fw - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left((v_H + v) \frac{\partial w}{\partial x} \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial y} \left((v_H + v) \frac{\partial w}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left((v_H + v) \frac{\partial w}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad \text{Ecuación 3}$$

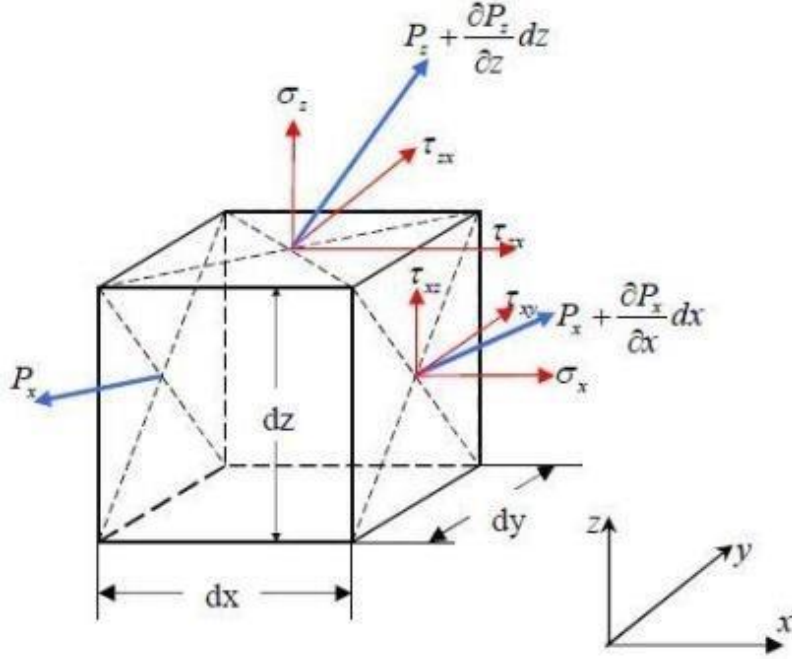


Figura 2. Aplicación de la Segunda Ley de Newton sobre un volumen de control deformable

Donde “ u ”, “ v ” y “ w ” son las componentes del vector velocidad en las direcciones “ x ”, “ y ” y “ z ”, respectivamente, “ f ” es el parámetro de Coriolis, “ v_H ” y “ v_t ” son las velocidades turbulentas en las direcciones vertical y horizontal, “ ν ” es la viscosidad cinemática, y “ p ” es la presión, $\frac{\partial u}{\partial t}$, $\frac{\partial v}{\partial t}$ y $\frac{\partial w}{\partial t}$ representan la variación temporal de la velocidad (en cada dirección) y están dadas por la suma de las siguientes componentes: i) el balance de los transportes advectivos (primeros tres términos en el lado derecho de cada ecuación), ii) la fuerza de Coriolis, iii) el gradiente de presión (siguientes tres términos) y iv) la difusión turbulenta (últimos tres términos). La velocidad vertical se calcula a partir de la integración en la dirección vertical de la ecuación de continuidad para fluido incomprensible (Ecuación 4), entre el fondo y la profundidad “ z ” donde se calcula “ w ” (Ecuación 5):

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad \text{Ecuación 4}$$

$$w(z) = -\frac{\partial}{\partial x} \left(\int_{-h}^z u dz \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\int_{-h}^z v dz \right) \quad \text{Ecuación 5}$$

La ecuación para la superficie libre (Ecuación 6) se obtiene por integración de la ecuación de continuidad sobre toda la columna de agua, es decir, entre la elevación de la superficie libre $\eta(x, y)$ y el fondo $-h$, e imponiendo las condiciones de borde cinemáticas en el fondo y en la superficie:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x} \left(\int_{-h}^{\eta} u dz \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\int_{-h}^{\eta} v dz \right) \quad \textbf{Ecuación 6}$$

El modelo utiliza la aproximación hidrostática ya que las escalas horizontales en los cuerpos de agua estuarinos u oceánicos son mucho mayores que las verticales. Se supone entonces que las aceleraciones verticales son pequeñas respecto a los otros términos que intervienen en la ecuación de cantidad de movimiento en la dirección vertical, y la misma se reduce al balance hidrostático que se presenta en la Ecuación 7, donde g es la gravedad y ρ la densidad.

$$\frac{\partial p}{\partial z} + g\rho = 0 \quad \textbf{Ecuación 7}$$

Aplicando la descomposición de descomposición de Boussinesq en donde la densidad ρ se divide en una densidad constante de referencia ρ_0 y una fluctuación de ese valor ρ' , e integrando en la dirección vertical entre la superficie libre η y la profundidad z donde se calcula la presión, se obtiene la Ecuación 8. Esta ecuación relaciona la presión en cualquier profundidad con la presión atmosférica en la superficie libre, el nivel de agua y la presión integrada entre ese nivel y la superficie.

$$p(z) = p_{atm} + g\rho_0(\eta - z) + g \int_z^{\eta} \rho' dz \quad \textbf{Ecuación 8}$$

Utilizando la anterior expresión es posible determinar el gradiente de presiones horizontales en la dirección " x_j ", la cual se presenta en la siguiente ecuación:

$$\frac{\partial p}{\partial x_j} = \frac{\partial p_{atm}}{\partial x_j} - g\rho_0 \frac{\partial \eta}{\partial x_j} - g \int_z^{\eta} \frac{\partial \rho'}{\partial x} dz \quad \textbf{Ecuación 9}$$

De esta última ecuación se tiene que el gradiente total de presiones es la suma de los gradientes atmosférico, de elevación de la superficie (gradiente de presión barotrópico) y el gradiente de distribución de la densidad (gradiente de presión baroclínico). Por último, para su operación el modelo MOHID obtiene la densidad de parámetros como la salinidad y la temperatura y, además, sustituye la descomposición del gradiente de presión (Ecuación 9) en las ecuaciones de la evolución temporal de la velocidad.

Discretización del sistema de ecuaciones

Debido a que las ecuaciones antes descritas son diferenciales no lineales, y no tienen soluciones analíticas, es necesario recurrir a métodos numéricos que permiten realizar aproximaciones a sus soluciones. Para un análisis más detallado puede consultarse a Neves *et al.*, (2006).

Discretización espacial

El modelo MOHID, utiliza el método de los volúmenes finitos para discretizar las ecuaciones que gobiernan el flujo, basándose en la forma integral de las leyes de conservación. A partir del volumen que ocupa el fluido (finito), se obtienen las relaciones para una partícula del fluido, reduciendo el volumen de integración hasta alcanzar el volumen correspondiente a una partícula (infinitesimal). Para ello se integra la ecuación diferencial original sobre un volumen finito, cuya forma concreta depende de la malla y del sistema de coordenadas que se esté empleando (Barreto *et al.*, 2009).

Discretización temporal

La discretización temporal de las ecuaciones se realiza por el algoritmo semi-implícito ADI (Alternative Direction Implicit). Este algoritmo calcula alternadamente una de las componentes de la velocidad de forma implícita mientras que la otra se calcula explícita, luego en la interacción siguiente las direcciones implícita y explícita cambian. El sistema de ecuaciones resultantes es tridiagonal y puede resolverse de forma eficiente y rápida.

5.5.5 Módulo Propiedades del Agua

Coordina y maneja la evolución de las propiedades del agua (temperatura, salinidad, sedimentos, fitoplancton, nutrientes, contaminantes, entre otros) utilizando un modelo de transporte Euleriano, apoyado de otros módulos como son advección-difusión y calidad de agua.

5.5.6 Módulo Geométrico

Almacena y actualiza la información sobre los volúmenes finitos, calculando las áreas laterales y los volúmenes de la discretización según la demanda. Para realizar estos cálculos se basa en la elevación de la superficie libre calculada por el módulo hidrodinámico y en los datos batimétricos del dominio ingresados.

El enfoque de volúmenes finitos usado en MOHID, permite que la resolución de las ecuaciones de conservación sea independiente de la geometría de cada celda o volumen de control, debido a que solo se requiere el flujo a través de las caras de la celda. De esta manera se logra una separación total entre las variables físicas y la geometría. El módulo Geométrico proporciona datos a los módulos Lagrangiano, Turbulencia y Propiedades del Agua.

5.5.7 Módulo Lagrangiano

Es un modelo de transporte Lagrangiano que utiliza el concepto de trazador, caracterizado por su posición (x, y, z), así como por características específicas, definidas por el modelador, que representan propiedades de partículas, tales como sedimentos, bacterias, mamíferos, sustancias químicas, entre otros. La velocidad media es el principal responsable del movimiento de las partículas, cuyas coordenadas espaciales están dadas por la siguiente ecuación, donde u representa la velocidad media y x la posición de la partícula i es un instante dado t (Sosa, 2010):

$$\frac{dx_i}{dt} = u_i(x_i, t) \quad \text{Ecuación 10}$$

Donde " u " representa la velocidad media y " x " la posición de la partícula. La velocidad en cualquier punto del espacio se calcula usando la interpolación lineal entre los puntos de la malla del modelo hidrodinámico. El transporte turbulento es el responsable de la dispersión.

El modelo MOHID aproxima la solución a la anterior ecuación mediante el método explícito:

$$x_j^{t+\Delta t} = x_j^t + \Delta t * u_j^t \quad \text{Ecuación 11}$$

Luego, a partir de la solución aproximada obtenida, el módulo Lagrangiano calcula la velocidad en cualquier punto del volumen de control mediante interpolación lineal entre dos puntos de propiedades conocidas en el módulo hidrodinámico.

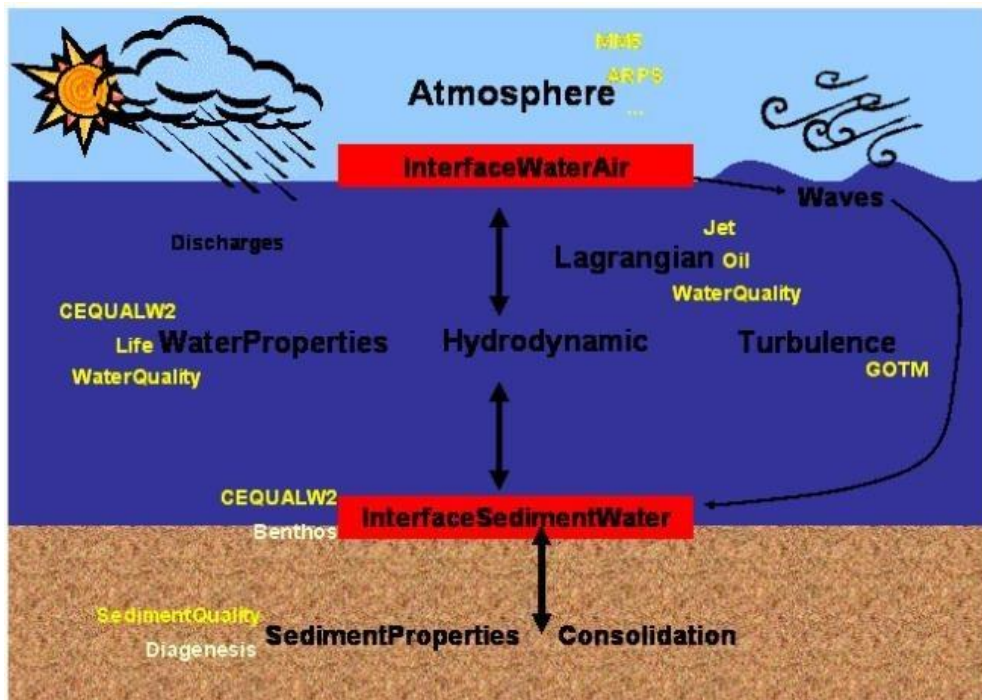


Figura 3. Estructura modular de MOHID

5.6 Calibración del Modelo Hidrodinámico

Es el proceso de ajuste de los elementos geométricos simplificados (batimetría, contornos de estructuras, etc.) y de los valores de los parámetros empíricos (hidráulicos, de sedimentos, de transporte, de calidad de agua, etc.) que aparecen en las diferentes ecuaciones (hidrodinámicas, de los sedimentos, etc.), de tal manera que los eventos simulados en el modelo reproduzcan de la manera más precisa los eventos de la naturaleza (Ramírez, 2016).

Es una de las fases con mayor relevancia en el proceso de implementación del modelo hidrodinámico. El objetivo de la calibración es representar los procesos hidrodinámicos (niveles, velocidades, caudales, profundidades) en el sistema para una condición real, disponiendo de datos e información de campo a través del ajuste o modificación de los parámetros físicos dentro de los rangos físicamente válidos como: rugosidad, viscosidad de remolino o turbulenta, etc. El ajuste o modificación de un parámetro debe hacerse con base en la física de los datos y en el conocimiento de los procesos en el sistema o área de estudio. Algunos parámetros susceptibles de ajuste pueden ser las condiciones de frontera (especialmente en un modelo Bidimensional de Costas, Estuarios, etc.), la batimetría, la rugosidad de fondo, la viscosidad turbulenta (modelos bidimensionales), la fricción debida al viento, etc. (Ramírez, 2016).

5.7 Validación del Modelo Hidrodinámico

Es el proceso de demostración de que el modelo es capaz de hacer predicciones en un lugar específico, para períodos determinados y condiciones diferentes a las existentes en el período de calibración. De esta manera se dice que un modelo ha sido validado si su precisión y capacidad predictiva en el período de validación muestran errores o limitantes aceptables. Usualmente, la validez de un modelo para un período diferente al de la calibración se asume como verdadera considerando condiciones futuras similares a las actuales (Refsgaard & Knudsen, 1996).

6 METODOLOGÍA

Para alcanzar los objetivos propuestos se propone la siguiente metodología:

6.1 Recopilación de Información

La información básica requerida para la modelación fue consultada y suministrada por las siguientes entidades e instituciones:

- DIMAR: Cartas Náuticas 153, 730 y 306 del año 2014.
- IDEAM: Pronóstico de Pleamares y Bajamares en la Costa Pacífica Colombiana
- CVC e IDEAM: Registros históricos de variables hidrometeorológicas, temperatura superficial del mar y salinidad.
- Página web del modelo MOHID: www.mohid.com
- Laboratorio de Proyecto Hidráulicos del Pacífico. Universidad del Valle – Ministerio de Transporte. Universidad del Valle 1998: Registro de niveles de marea y velocidades.
- Estudios realizados o financiados por diferentes empresas e instituciones, tales como, el Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras (INVEMAR), el Centro de Control de Contaminación del Pacífico (CCCCP) y la Sociedad Portuaria Regional de Buenaventura (SPRBUN).

6.2 Procesamiento y Análisis de la Información

Se digitalizó la información batimétrica a partir de las cartas náuticas correspondientes al área de estudio, se realizó el análisis estadístico de los registros históricos (provenientes de mediciones en campo de los últimos 50 años aproximadamente) que proporcionan las características de la zona y las condiciones iniciales requeridas por el modelo, tales como: descargas de los ríos, temperatura superficial del mar, mareas (niveles y velocidades), temperatura del aire, humedad relativa, salinidad, velocidad y dirección del viento, entre otros.

6.3 Caracterización Hidrodinámica de la Bahía de Buenaventura

Mediante revisión bibliográfica sobre las principales características físicas e hidrodinámicas de la bahía de Buenaventura, se efectuó la descripción física de su ubicación, morfología (bahía exterior, bahías interior y canal de acceso); aspectos hidrometeorológicos como temperatura del aire, humedad relativa del aire, precipitación, velocidad y dirección del viento, nubosidad y brillo solar; dinámica fluvial y marina como caudales fluviales, las corrientes, las mareas y el oleaje.

6.4 Implementación del Modelo Matemático Hidrodinámico

6.4.1 Representación de la batimetría y construcción de la malla de numérica

El primer paso dentro del proceso de implementación del modelo consistió en generar la batimetría de la zona de estudio y construir la malla de cálculo. Para ello se georeferenció el área de estudio mediante coordenadas geográficas WGS 84 con el fin de precisar la línea de costa extraída a través del software Coastline Extractor; esto permitió definir las fronteras abiertas y cerradas del dominio y la posterior incorporación de la información batimétrica de las cartas náuticas en formato .xyz y referenciada con respecto al nivel de sicigia. Posteriormente se procedió a construir la malla computacional. El tamaño de las celdas de la malla está relacionado con el grado de detalle requerido en los resultados de los procesos hidrodinámicos en la bahía (niveles de marea, velocidades y patrón de circulación de las corrientes), el grado de irregularidad de los contornos batimétricos y topográficos, el tiempo y esfuerzo computacional y la representación de ríos y esteros que descargan a la bahía.

Se interpolaron los datos niveles batimétricos sobre la malla de cálculo, generando una distribución de profundidades (batimetría) en formato .dat, delimitadas por celdas asignadas como tierra y las celdas de frontera abierta. La frontera abierta de mar corresponde a aquellas celdas donde actúa el forzamiento de la marea.

6.4.2 Condiciones de frontera e iniciales

Para reproducir mediante un modelo numérico los fenómenos hidrodinámicos y de transporte que suceden en un cuerpo de agua se requiere suministrarle las condiciones de borde o frontera en las fronteras abiertas del modelo. En este estudio se tienen las siguientes fronteras abiertas: (i) frontera de mar, en la cual se deben definir como condición la variación temporal de los niveles de marea; y (ii) fronteras internas fluviales como los ríos y esteros tributarios, en los cuales se introducen las hidrógrafas de caudales.

Las condiciones de borde en la frontera de mar se obtienen a partir del atlas global de marea FES2004, el cual es un modelo de pronóstico de mareas, que permite establecer la variación de los niveles de marea en cualquier región y para cualquier período de interés particular.

En las fronteras fluviales internas se incluyen las secciones en las que se introducen los aportes de aguas continentales por parte de los esteros San Antonio y Aguadulce y en los ríos Dagua y Anchicayá. En el modelo MOHID dicho aporte es representado como una condición de borde correspondiente a una hidrógrafa de caudales para cada uno de los afluentes.

Los valores de rugosidad del fondo y los valores iniciales de temperatura y salinidad se establecieron a partir de la información obtenida en la caracterización de la bahía de Buenaventura. El modelo MOHID permite crear cajas (o áreas) con información específica en una zona en

particular del cuerpo de agua objeto de estudio; esto permite representar de una manera más precisa las condiciones características de las zonas de estudio, como pueden ser los diferentes valores de rugosidad, temperatura y salinidad, dependiendo de la localización.

6.4.3 *Análisis de sensibilidad*

Este análisis tiene por objeto determinar la influencia de determinado parámetro físico y numérico (rugosidad, viscosidad turbulenta, etc.) en los resultados del modelo, como puede ser en los niveles de marea, las velocidades de la corriente y los patrones de flujo mareales. Esta información es valiosa por cuanto permite reducir el tiempo y esfuerzo computacional durante la calibración del modelo y, además, permite precisar, para futuros programas de mediciones de campo, aquellos parámetros y variables sobre las cuales se deberán dedicar una mayor atención y los mejores esfuerzos.

6.4.4 *Calibración del modelo*

En esta etapa se buscó que las situaciones específicas simuladas en el modelo se asemejen de la mejor manera posible a las medidas en la naturaleza; los elementos geométricos, tales como batimetría y contornos de estructuras, entre otros, y los valores de coeficientes empíricos utilizados en las ecuaciones, ya sean de descripción y predicción de marea, hidráulicos, de transporte, de sedimentos, etc., pueden ser ajustados dentro de rangos físicamente válidos, procurando que los valores calculados de los diferentes parámetros y variables hidrodinámicas y de transporte estén próximas a los valores de los mismos parámetros y variables medidas en campo por la Universidad del Valle y el Laboratorio de Proyectos Hidráulicos del Pacífico.

Para el modelo hidrodinámico de la bahía de Buenaventura la calibración y verificación se efectuó modificando o ajustando los siguientes parámetros en el modelo: (i) la rugosidad o resistencia del lecho; (ii) la viscosidad turbulenta o de remolino; (iii) los niveles batimétricos en la frontera con el mar; y (iv) los componentes armónicos de marea. Estos parámetros fueron modificados gradualmente procurando que los eventos simulados en el modelo reprodujeran de manera aceptable los eventos de la naturaleza.

6.4.5 *Verificación del modelo*

En esta fase fue necesario confrontar los resultados obtenidos en la simulación con las situaciones reales (información de campo), con el objetivo de verificar que el modelo presenta una correcta representación física e hidrodinámica de la Bahía de Buenaventura para diferentes condiciones de simulación.

6.5 Estudio de las Corrientes Residuales al interior de la bahía de Buenaventura

6.5.1 Planteamiento de escenarios para el estudio de las corrientes residuales

Con el fin de determinar las corrientes residuales en la bahía de Buenaventura se plantearon diferentes escenarios, en los cuales se consideraron diferentes condiciones mareales en la bahía y diferentes caudales en los esteros y ríos tributarios. Para ello inicialmente se realizó un análisis de probabilidad de excedencia de los rangos máximos de mareas vivas. A partir de este análisis se seleccionaron los rangos de marea viva máximas registradas históricamente del 10, 50 y 90 % de probabilidad de excedencia, los cuales se pueden considerar representativos de las condiciones mareales mínimas, medias y máximas en la bahía, respectivamente. Luego, a partir de los registros históricos se seleccionaron las mareas vivas máximas que representaron los rangos mareales determinados previamente. Por otra parte, de los registros de caudales disponibles en los esteros y ríos tributarios se seleccionaron los caudales mínimos y máximos.

6.5.2 Implementación del módulo de trazadores Lagrangianos

Para determinar el desplazamiento neto de las partículas de agua durante el ciclo cuasi-quincenal de mareas vivas – mareas muertas se empleó el módulo Lagrangiano del modelo MOHID, el cual se basa en el concepto de trazador. Se utilizó un trazador inerte (partícula conservativa) y de flotabilidad neutra que, al ser inyectado en cualquier sitio de la bahía permite identificar el patrón de transporte horizontal y describir la trayectoria a lo largo de toda la zona modelada.

6.5.3 Simulación de las corrientes residuales al interior de la bahía de Buenaventura

Se ubicaron geográficamente en coordenadas WGS 84 los sitios de vertimiento de las partículas o trazadores con características Lagrangianas. Posteriormente se acopló al módulo hidrodinámico el módulo de transporte Lagrangiano. Este módulo utiliza el campo de velocidades calculado por el módulo hidrodinámico para simular el movimiento de las partículas de agua y representado por los trazadores. Finalmente se efectuó la modelación de cada uno de los escenarios planteados previamente acoplada al modelo hidrodinámico.

6.6 Análisis del Comportamiento de las Corrientes Residuales

Se analizaron los resultados de la modelación hidrodinámica; las velocidades y la ampliación de la marea, entre otros. Además se analizaron los resultados de la modelación caracterizando las corrientes residuales de acuerdo con la dispersión y transporte de las partículas Lagrangianas para cada punto de vertimiento.

7 CARACTERIZACIÓN HIDRODINÁMICA DE LA BAHÍA DE BUENAVENTURA

7.1 Descripción Física de la Bahía de Buenaventura

El municipio de Buenaventura se encuentra localizado en el departamento del Valle del Cauca, al sur-occidente de Colombia; limita por el norte con el departamento del Chocó, por el oriente con los municipios de Dagua, Cali y Jamundí, por el sur con el departamento del Cauca y por el occidente con el Océano Pacífico; sus coordenadas son latitud norte $3^{\circ}53'47''$ y $77^{\circ}04'40''$ longitud oeste. La bahía de Buenaventura sigue una dirección de sur-oeste a norte-este con una extensión aproximada de 30 Km, su forma es angosta alargada y en ella se pueden distinguir dos áreas bien diferenciadas: la bahía exterior y la bahía interior (CCCP, 2001; citado por Otero, 2005) (ver Figura 4). Ambas bahías están comunicadas por un canal de acceso, el cual permite el tránsito de embarcaciones desde mar afuera hasta los diferentes terminales marítimos de Buenaventura.

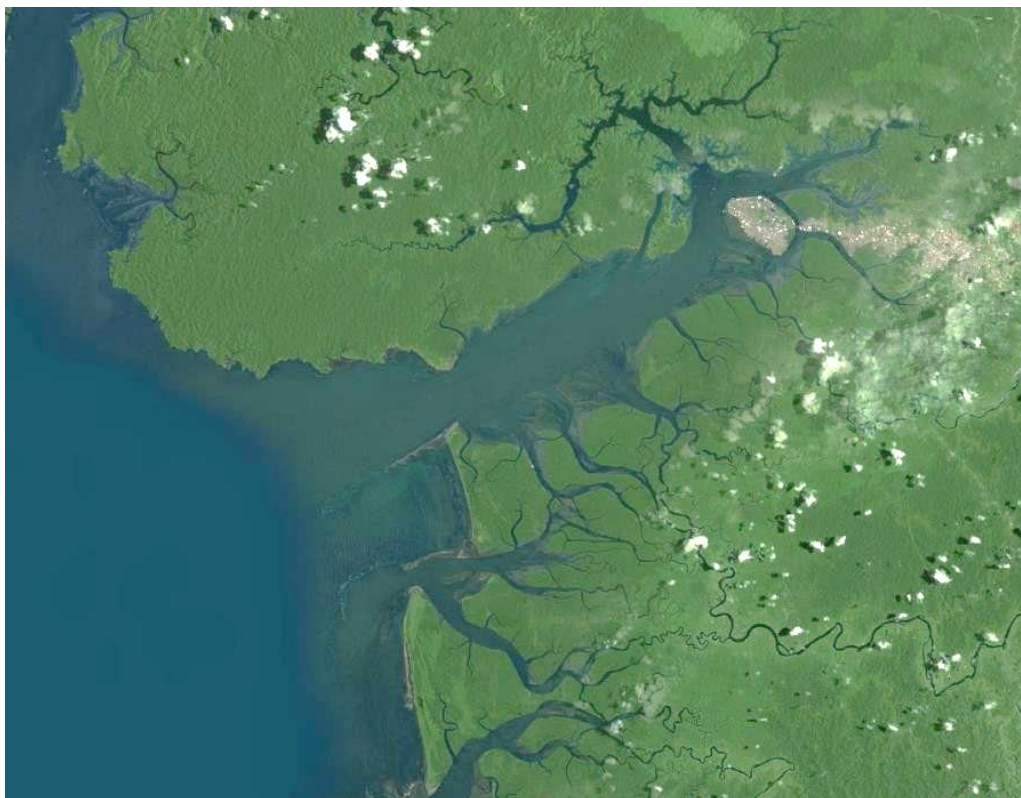


Figura 4. Bahía de Buenaventura

La costa noroeste de la bahía de Buenaventura está conformada por colinas con drenaje incipiente y acantilados de hasta 13 m de altura; los deslizamientos en esta zona son poco comunes debido a que la vegetación la cubre casi totalmente. El flanco sureste de la bahía está conformada por terrenos bajos, con pantanos de manglar, islas barreras y bajos arenosos, al igual que grandes ríos y numerosos arroyos con mucha influencia mareal.

7.1.1 Bahía exterior

La bahía exterior es influenciada permanentemente por las acciones del mar abierto debido a que se encuentra en conexión directa con el mismo. Presenta una extensión de aproximadamente 20 Km, medidos desde la entrada a la bahía interior (La Bocana), y se encuentra delimitada por los accidentes geográficos de Punta Magdalena al norte, en Bahía Málaga, y la Boca Cajambre al sur.

En la entrada a la bahía exterior se presenta una formación del fondo a manera de barra submarina, conformada por arenas medias y sueltas; posee una extensión de cerca de 5 Km y sus profundidades relativamente bajas limitan el acceso de grandes embarcaciones durante las mareas bajas a los diferentes terminales marítimos que operan al interior de la bahía.

7.1.2 Bahía interior

La bahía interior presenta una orientación suroeste-noreste, con forma alargada y angosta de cerca de 15 Km de longitud y 3.4 Km de ancho, aproximadamente. La entrada a la bahía interior se conoce como La Bocana y está determinada por tierra firme al norte por Punta Bazán y al sur por Punta Soldado. En dicha entrada se encuentra un efecto conjugado entre las barras de playa, el delta de marea y sus sedimentos y la posible actividad de la falla de Buenaventura que puede incidir también en la sedimentación (Gómez & Padilla, 1990), además de actuar como una protección natural por la configuración geomorfológica de la entrada misma a la bahía interior, limitando el oleaje producido mar afuera por los vientos a olas de sólo 0.6 a 0.9 m de altura máxima sobre la entrada misma.

A la bahía interior confluyen doce (12) tributarios entre ríos, brazos y esteros, alimentados por la cuenca de la bahía de Buenaventura con una extensión aproximada de 3800 Km², los cuales son: al norte de la bahía las quebradas Aguadulce, Pichidó y San Joaquín y los esteros Aguadulce, Gamboa, Aguacate y el Piñal; al sur los ríos Dagua, Anchicayá y Limones, las quebradas limones y Potedó y los esteros San Antonio, Hondo y el Pailón. Los aportes de agua dulce de los tributarios a la bahía se estiman en un caudal total promedio de 448.2 m³/s, con una considerable carga de sedimentos que se depositan normalmente en los deltas e islas sobre el flanco sur del canal de acceso al puerto de Buenaventura (Palacios & Quirós, 2006).

7.1.3 Canal de acceso

El canal de acceso a los terminales marítimos de Buenaventura presenta una longitud total de aproximadamente 30.5 Km. Los primeros 15 Km están en la bahía interior, desde el frente del muelle del Terminal Marítimo en la Isla Cascajal, hasta La Bocana, entre Punta Bazán y Punta Soldado; en esta zona los oleajes son de pequeña amplitud y el alineamiento del canal coincide naturalmente con la dirección de las corrientes locales predominantes. Desde La Bocana, los 15.5 Km siguientes se hallan en mar abierto; sobre la bahía exterior, donde se presentan oleajes de mayor amplitud, corrientes cruzadas y vientos de costado (ver Figura 5). Las profundidades del dragado de profundización efectuado en el canal actual son de 12.5 m en la bahía interior y 13.5

m en la bahía exterior. El ancho del canal varía de 200 m en la bahía exterior a 160 m en la bahía interior (Consortio Dragado Buenaventura, 2015).



Figura 5. Canal de acceso al puerto de Buenaventura

7.2 Aspectos Hidrometeorológicos

Las características hidrometeorológicas en la bahía de Buenaventura, tales como, temperatura, humedad relativa, precipitación, vientos, nubosidad y brillo solar, son analizadas a partir de los registros históricos mensuales del IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales) correspondientes a las estaciones Colpuertos y Aeropuerto de Buenaventura. El parámetro salinidad se analiza a partir de los registros de monitoreo realizados por la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca, CVC, en el período comprendido entre los 2005 y 2012, con una frecuencia semestral, en tres estaciones de monitoreo distribuidas a lo largo de la bahía de Buenaventura.

La ubicación geográfica de cada uno de los puntos de monitoreo de la CVC y las estaciones hidrometeorológicas del IDEAM anteriormente mencionadas se presentan en la Tabla 1 y en la Figura 6.

Tabla 1. Localización de los puntos de monitoreo de la CVC y las estaciones hidrometeorológicas del IDEAM en la bahía de Buenaventura

Punto de Monitoreo /Estación	Localización	Coordenadas	
		Latitud (N)	Longitud (W)
1	Entrada a la bahía, frente a la Bocana	3°49'12''	77°10'41''
2	Frente al Río Potedó	3°51'25''	77°06'47''
3	En esquema Norte del Terminal Marítimo	3°53'31''	77°04'48''
Colpuertos	Zona central de la Isla Cascajal	3°53'00''	77°04'00''
Aeropuerto Buenaventura	Aeropuerto de Buenaventura	3°49'00''	76°59'00''

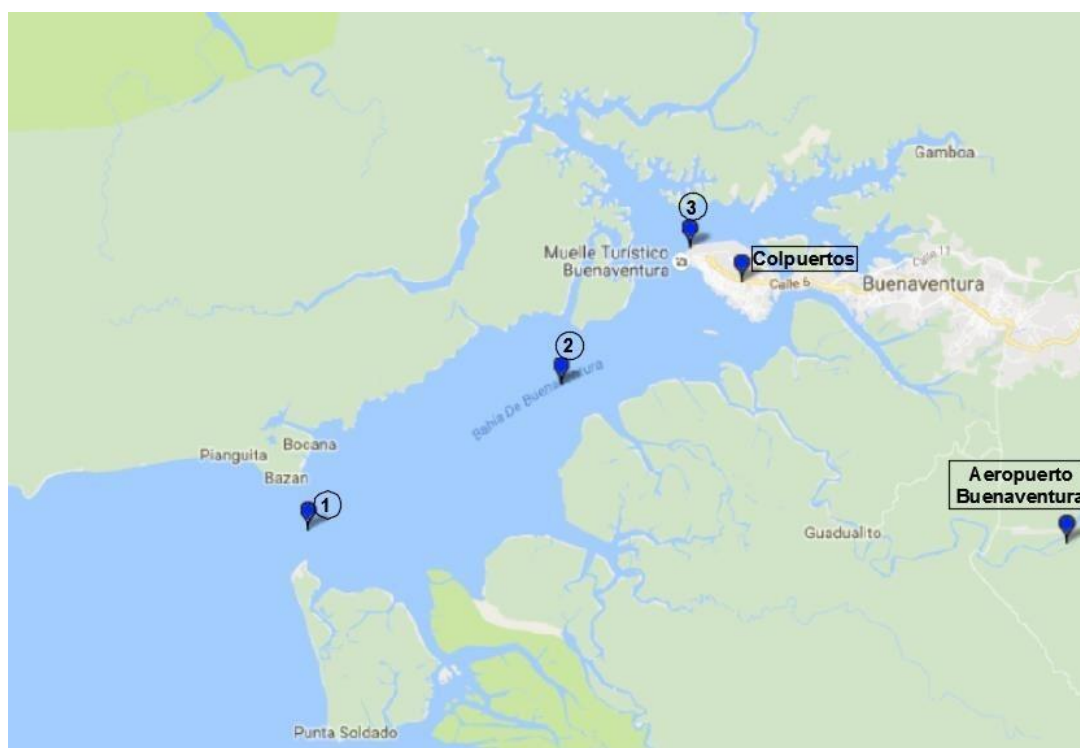


Figura 6. Bahía de Buenaventura. Localización de los puntos de monitoreo de CVC y las estaciones hidrometeorológicas del IDEAM

El municipio de Buenaventura se encuentra influenciado por la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), presentando condiciones climáticas particulares de una región de bajas presiones atmosféricas, en donde convergen los vientos alisios tropicales del sureste y del noreste.

El análisis de los registros meteorológicos de las estaciones Colpuertos y Aeropuerto de Buenaventura, las cuales por su ubicación se consideran adecuadas, permiten establecer, en términos generales que el clima del municipio es predominantemente cálido, muy húmedo, con altas temperaturas y precipitaciones durante la mayor parte del año (POT Buenaventura, 2001), presentando los siguientes pisos térmicos: cálido 5350 Km², medio 640 Km², frío 58 Km² y páramo 30 Km².

7.2.1 Temperatura

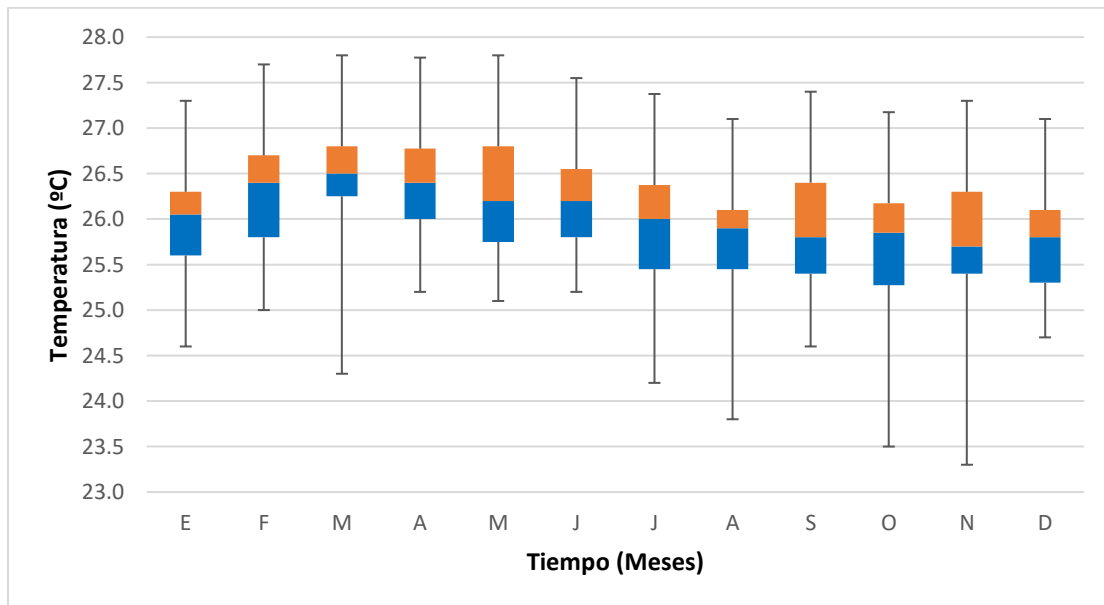
Temperatura del Aire

Para el análisis de la temperatura del aire se cuenta con los datos suministrados por el IDEAM medidos en las estaciones hidrometeorológicas Colpuertos y Aeropuerto de Buenaventura. El valor medio anual de temperatura del aire reportada por el IDEAM para el período comprendido entre 1969 – 2000 fue de 26.0 °C medidos en la estación Colpuertos, y en la estación Aeropuerto de Buenaventura se reportó un valor de 25.6°C para el período 1962 – 2014 (ver Tabla 2).

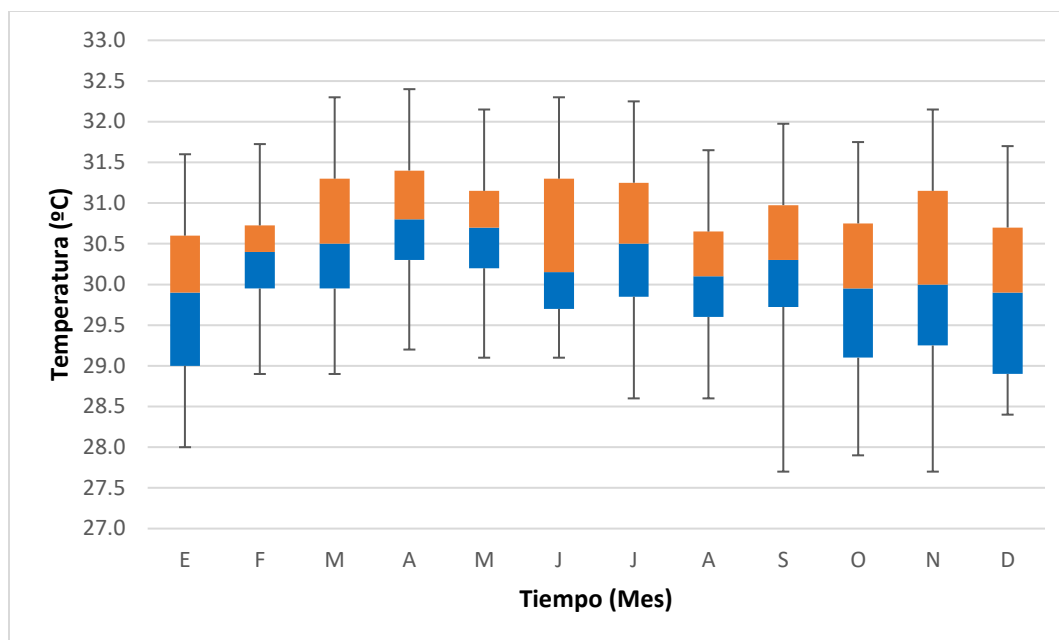
Tabla 2. Temperatura media mensual multianual del aire en el municipio de Buenaventura

Estación	Periodo	Temperatura (°C)												
		Mes												Media Anual
		E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	
Aeropuerto B/ventura	1962-2014	25.9	26.1	26.1	26.4	25.5	25.2	24.8	25.9	24.5	25.8	25.7	25.7	25.6
Colpuertos	1969-2000	26.1	25.5	26.5	26.4	26.3	26.2	26.0	25.8	25.9	25.8	25.8	25.8	26.0

En términos generales, la temperatura en la bahía de Buenaventura corresponde a un clima cálido con variaciones mínimas de temperatura durante el año debido al alto contenido de vapor de agua en la atmósfera. En las Gráficas 1 y 2 se presentan los diagramas de cajas y bigotes elaborados para los datos históricos de la estación Colpuertos y la estación Aeropuerto de Buenaventura, respectivamente.



Grafica 1. Diagrama de cajas y bigotes de temperatura del aire mensual multianual en la estación Colpuertos, en el municipio de Buenaventura



Grafica 2. Diagrama de cajas y bigotes de temperatura del aire mensual multianual en la estación Aeropuerto de Buenaventuras, en el municipio de Buenaventura

Los Gráficos 1 y 2 proporcionan una visión general de la simetría de la distribución de los datos de temperatura del aire en cada una de las estaciones, además se puede apreciar que las máximas temperaturas se presentan en los meses de marzo y abril, que además corresponden a los meses más secos y de menores precipitaciones en la zona; y los descensos de temperatura se dan en el período comprendido entre los meses de septiembre a noviembre, lo que coincide con la época de lluvias del área de estudio.

Temperatura superficial del mar

En el año 2015, CVC – INVEMAR por medio del Convenio No. 061-2014, realizaron mediciones en la bahía de Buenaventura correspondientes a dos épocas climáticas (mayo y agosto), determinando que durante la condición de pleamar aumenta la temperatura superficial del mar en la zona externa de la bahía, donde se encuentra en un rango entre 29.5 y 30°C, y es menor en las zonas periféricas a la isla Cascajal, donde oscila entre 28.5 y 29.5°C. Durante la bajamar, la temperatura en toda la bahía es más homogénea y se encuentra en un rango de 29 a 29.5°C.

7.2.2 Humedad relativa del aire

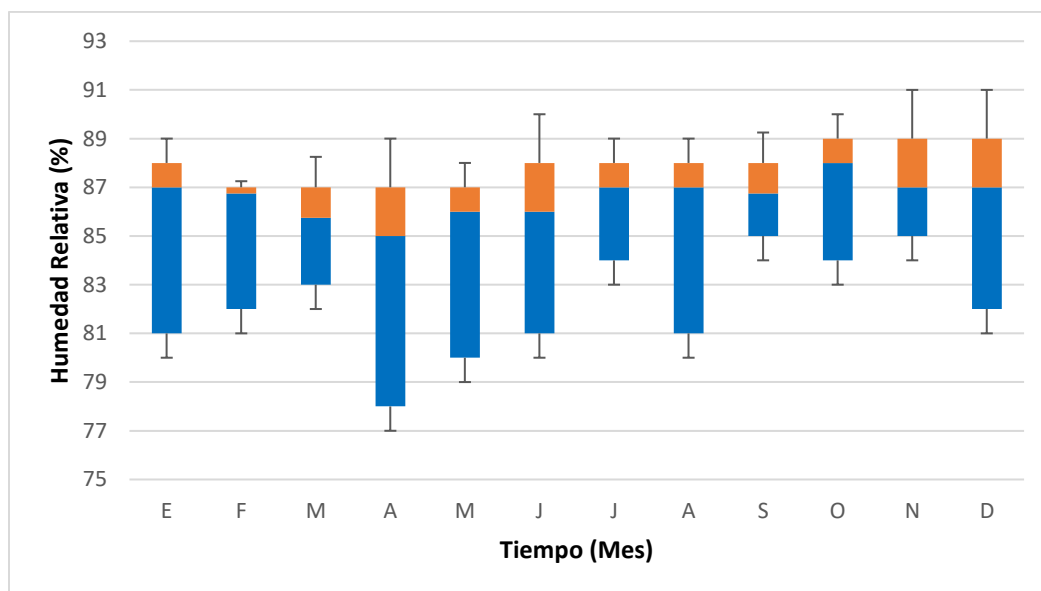
La baja salinidad del mar en la Costa Pacífica es la causa principal de que en la bahía de Buenaventura la humedad relativa del aire mantenga niveles próximos al de saturación, originando altas condiciones de humedad en la región (Ramírez, 1999). En la Tabla 3 se presentan los valores de la humedad relativa media mensual multianual en las dos estaciones meteorológicas.

Tabla 3. Humedad relativa media mensual multianual en el municipio de Buenaventura

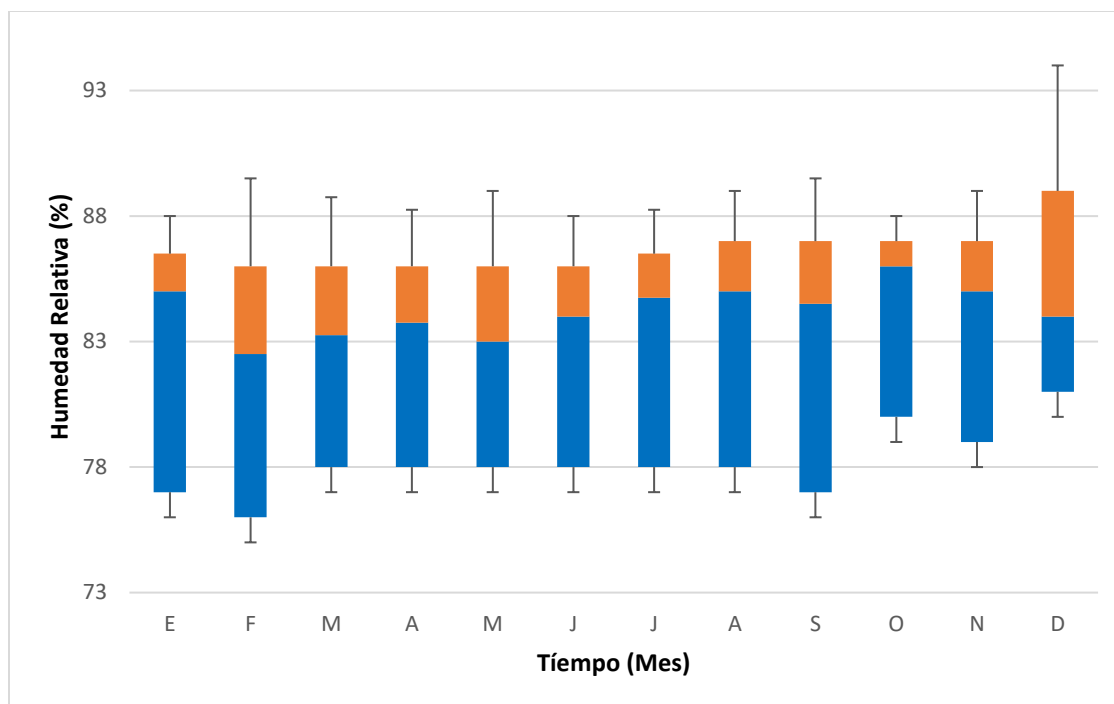
Estación	Periodo	Humedad Relativa (%)												
		Mes												Media Anual
		E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	
Aeropuerto B/ventura	1962-2014	87.8	87.5	87.1	86.6	86.8	87.4	87.6	87.9	87.7	88.6	88.3	88.4	87.6
Colpuertos	1969-2000	86.5	85.6	85.6	85.8	85.4	85.3	86.1	86.5	86.5	86.7	86.4	87.3	86.1

El valor medio anual de humedad relativa del aire reportada por el IDEAM para el período comprendido en 1962 – 2014 fue de 87.6% medidos en la estación Aeropuerto de Buenaventura, y en la estación Colpuertos se reportó un valor de 86.1% para el período 1969 – 2000. En las Gráficas 3 y 4 se presentan los diagramas de cajas y bigotes elaborados para los datos históricos de humedad relativa del aire en las estaciones Aeropuerto de Buenaventura y Colpuertos, respectivamente.

De acuerdo con los registros de las estaciones analizadas se puede concluir que en los meses de febrero a junio en el área de estudio se produce una disminución en la humedad del ambiente, correspondiendo con la época más seca por las altas temperaturas que se presentan. Por otra parte, en los últimos cuatro meses del año se presenta un aumento de la humedad relativa del aire como consecuencia de la disminución en la temperatura para la zona. Los máximos valores de humedad relativa se presentan en el mes de octubre para la estación Aeropuerto de Buenaventura y en el mes de diciembre para la estación Colpuertos; y los valores mínimos de humedad relativa se presentan en los meses de abril y junio para las estaciones Aeropuerto de Buenaventura y Colpuertos respectivamente.



Grafica 3. Diagrama de cajas y bigotes de humedad relativa del aire mensual multianual en la estación Aeropuerto de Buenaventura, en el municipio de Buenaventura



Grafica 4. Diagrama de cajas y bigotes de humedad relativa del aire mensual multianual en la estación Colpuertos, en el municipio de Buenaventura.

7.2.3 Precipitación

En el municipio de Buenaventura se presenta un ciclo anual de lluvias regida por la interacción de los principales sistemas de circulación atmosférica en el trópico, resultando de ello la ocurrencia de periodos muy marcados de mayores lluvias, debido principalmente al desplazamiento de la ZCIT. Así mismo, las masas de nubes que se forman a poca altura sobre el mar, saturadas de humedad, son arrastradas por los fuertes vientos del occidente hacia el interior y al encontrarse con la cordillera Occidental se detienen, se enfrían, se condensan y se precipitan, formando abundantes lluvias de forma torrencial, frecuentemente acompañadas de cargas eléctricas (POT Buenaventura, 2001).

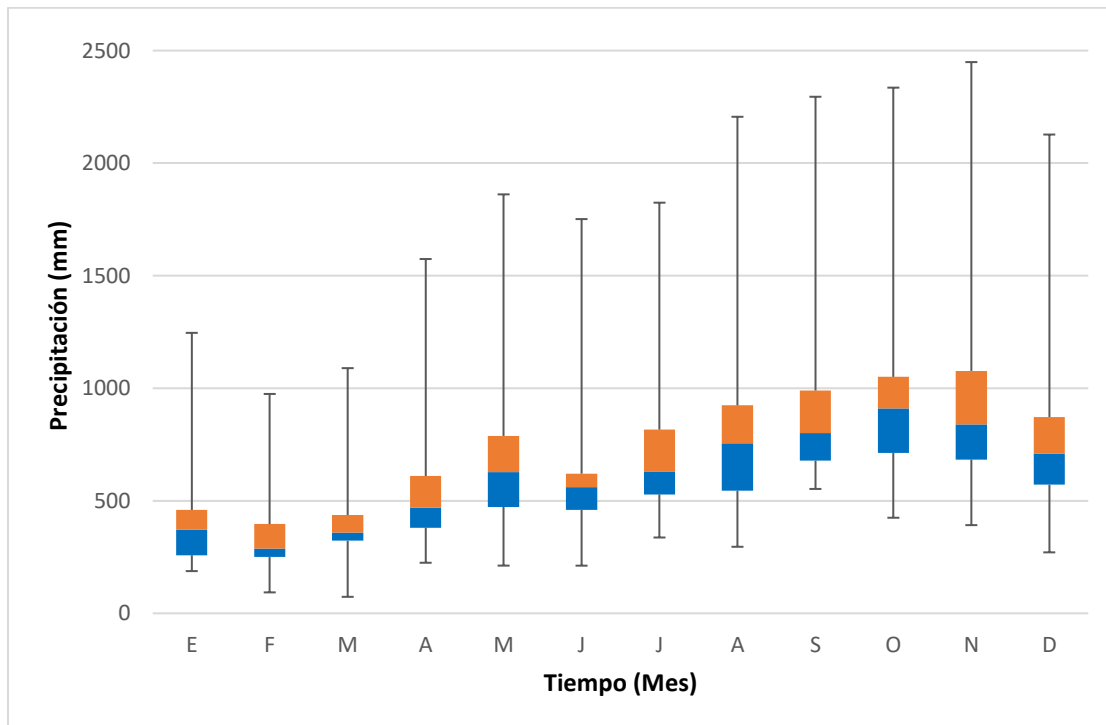
Para conocer el comportamiento de las lluvias en el área de estudio se empleó la información de los registros históricos en las estaciones Colpuertos y Aeropuerto de Buenaventura. Se estudiaron las condiciones medias de los totales de precipitación y número de días de lluvia media mensual multianual, obteniéndose resultados que se registran en la Tabla 4. Además se presenta en las Gráficas 5 y 6 los diagramas de cajas y bigotes elaborados para las estaciones Colpuertos y Aeropuerto de Buenaventura, respectivamente.

Tabla 4. Precipitación y días promedio de lluvia en el municipio de Buenaventura

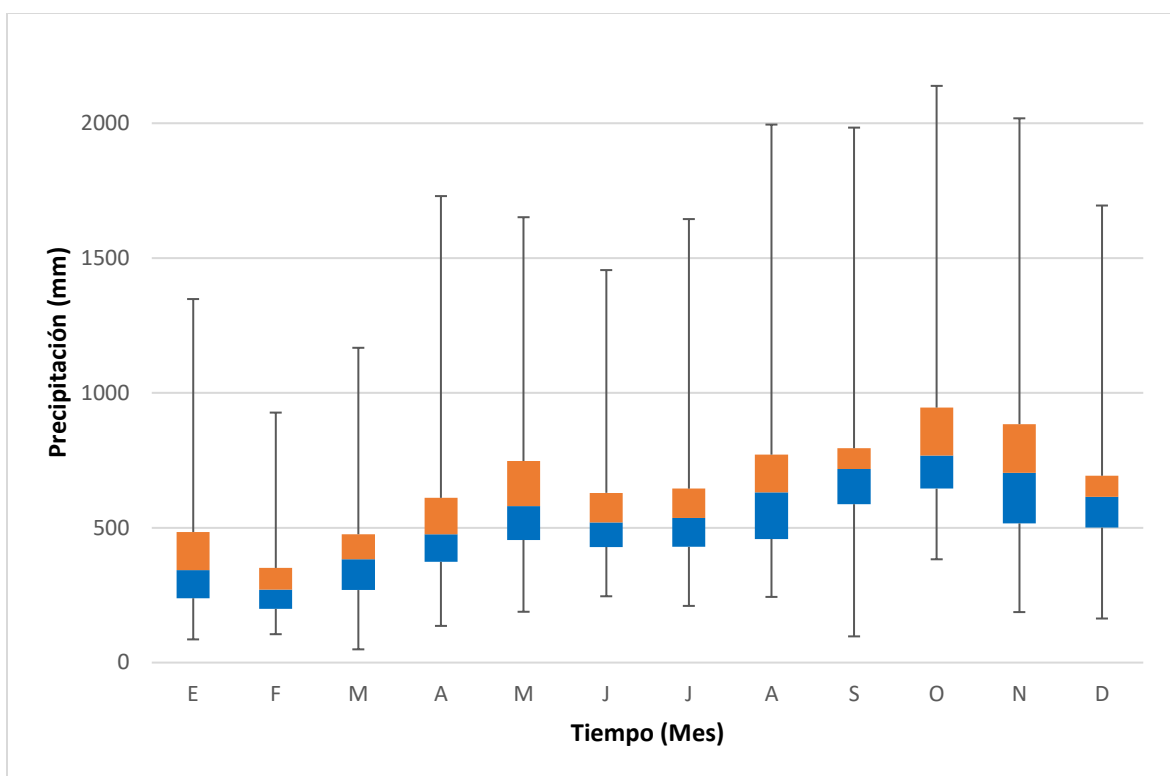
Estación	Precipitación Media (mm)			Días Promedio de Lluvia	
	Periodo	Media Mensual	Media Anual	Media Mensual	Media Anual
Aeropuerto B/ventura	1946 -2016	595.6	6465.6	23	280
Colpuertos	1969 - 2001	636.4	6955.8	26	313

Se concluye que la precipitación en la región de Buenaventura es muy alta, siendo ligeramente mayor la precipitación media anual en la estación Colpuertos (6955.8 mm/año). En promedio, los meses más y menos lluviosos en la estación Colpuertos son noviembre (1021 mm) y febrero (315 mm), respectivamente, mientras que en la estación Aeropuerto de Buenaventura los meses de mayor y menor precipitación son diciembre (958 mm) y febrero (276 mm), respectivamente.

Según los registros del IDEAM, la precipitación presenta un comportamiento similar en las dos estaciones analizadas. Teniendo en cuenta que la estación Colpuertos se encuentra ubicada al interior de la zona de estudio, se puede concluir que las condiciones de precipitación registradas por la estación son las que mejor representan las condiciones reales de la zona de interés con un promedio anual de lluvias de 6955.8 mm/año.



Grafica 5. Diagrama de cajas y bigotes de precipitación mensual multianual en la estación Colpuertos, en el municipio de Buenaventura



Grafica 6. Diagrama de cajas y bigotes de precipitación mensual multianual en la estación Aeropuerto de Buenaventuras, en el municipio de Buenaventura

7.2.4 Vientos

La acción del viento influye directamente en el movimiento de la superficie del agua, creando un oleaje fuerte o moderado dependiendo de la intensidad y la dirección del viento, incidiendo de manera importante en la dinámica de las masas de agua y en la morfología costera (Collazos, 2014). La velocidad media anual del viento en la bahía de Buenaventura, según los registros históricos en las estaciones de monitoreo es de 0.7 m/s. En la Tabla 5 se presentan las velocidades medias mensuales multianuales del viento en el municipio de Buenaventura.

Tabla 5. Velocidades medias mensuales multianuales del viento en el municipio de Buenaventura

Estación	Periodo	Velocidad Mensual Media del Viento (m/s)												
		Mes												Media Anual
		E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	
Aeropuerto B/ventura	1962-2014	0.9	0.9	0.8	0.8	0.9	0.7	0.8	0.9	1.0	0.9	0.9	0.9	0.9
Colpuertos	1969-2001	0.7	2	0.9	0.2	0.1	0.1	0.4	0.5	0.4	0.2	0.2	0.6	0.53

La Figura 7 presenta la rosa de los vientos en la estación de Colpuertos para el período de registro 1982 – 1999, en la que se observa que la dirección predominante de los vientos es sur-oeste, con una frecuencia relativa del 28.9%, seguidas de las direcciones sur y oeste, con frecuencias relativas

del 18.4 y 13.3%, respectivamente. Finalmente, la dirección con menor frecuencia es la nor-oeste, con 3.3%.

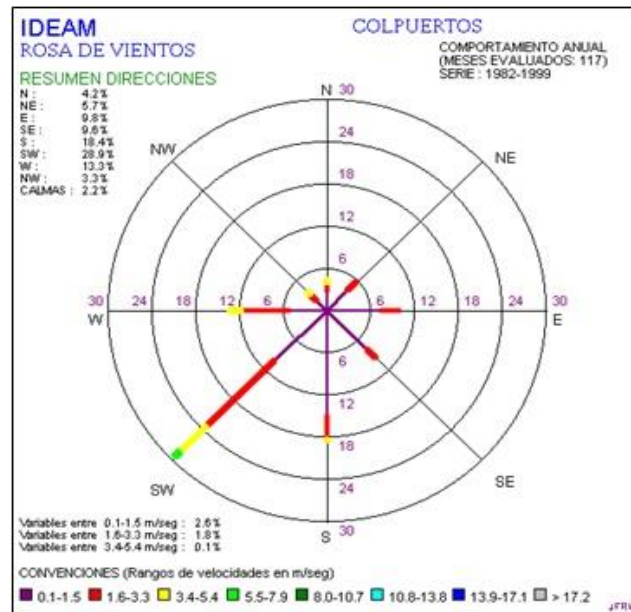


Figura 7. Rosa de los vientos en la estación Colpuertos (Fuente: IDEAM, 2015)

Para la estación Aeropuerto de Buenaventura, con datos desde 1964 hasta 2014, la Figura 8 presenta la rosa de los vientos en la que se observa que al igual que en la estación de Colpuertos el sur-oeste es la dirección predominante de los vientos, con una frecuencia relativa del 32 %; le siguen las direcciones sur y oeste, con frecuencias relativas del 17% y 13 %, respectivamente. Finalmente las direcciones con menores frecuencias relativas son las provenientes del norte y del nor-oeste, con un 4%.

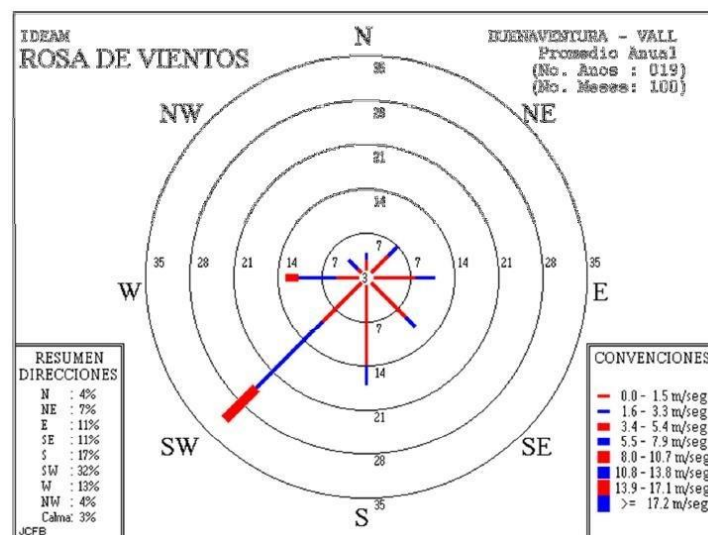


Figura 8. Rosa de los vientos en la estación Aeropuerto de Buenaventura (Fuente: IDEAM, 2015)

7.2.5 Nubosidad

Según la Agencia Estatal de Meteorología de España, los rangos de la unidad nubosidad (Octas) se clasifican de la siguiente forma (Tabla 6):

Tabla 6. Rangos de Nubosidad

Octas	Cantidad de nubes
1 a 2	Escasa
3 a 4	Dispersa
5 a 7	Nuboso
> 7	Cubiertos

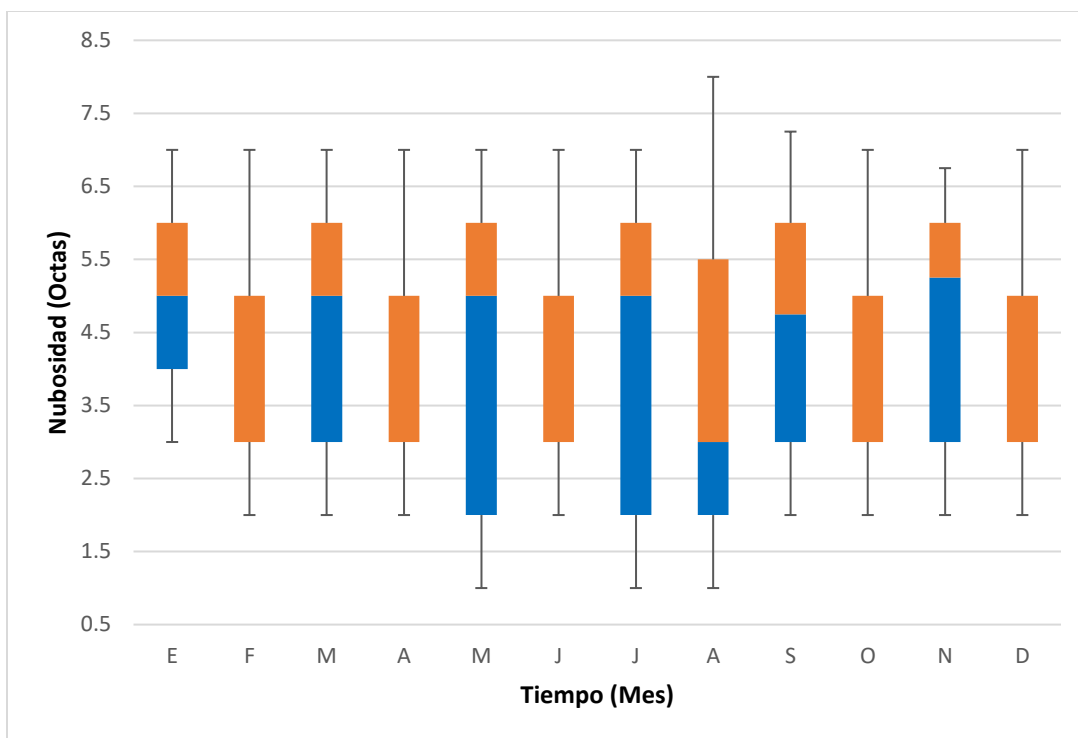
Fuente: Consorcio Dragado Buenaventura (2015)

La Tabla 7 presentan los valores medios mensuales multianuales de nubosidad para las estaciones Colpuertos y Aeropuerto de Buenaventura. En las Gráficas 7 y 8 se muestran los diagramas de cajas y bigotes elaborados para los datos históricos de humedad relativa del aire en las estaciones Colpuertos y Aeropuerto de Buenaventura, respectivamente.

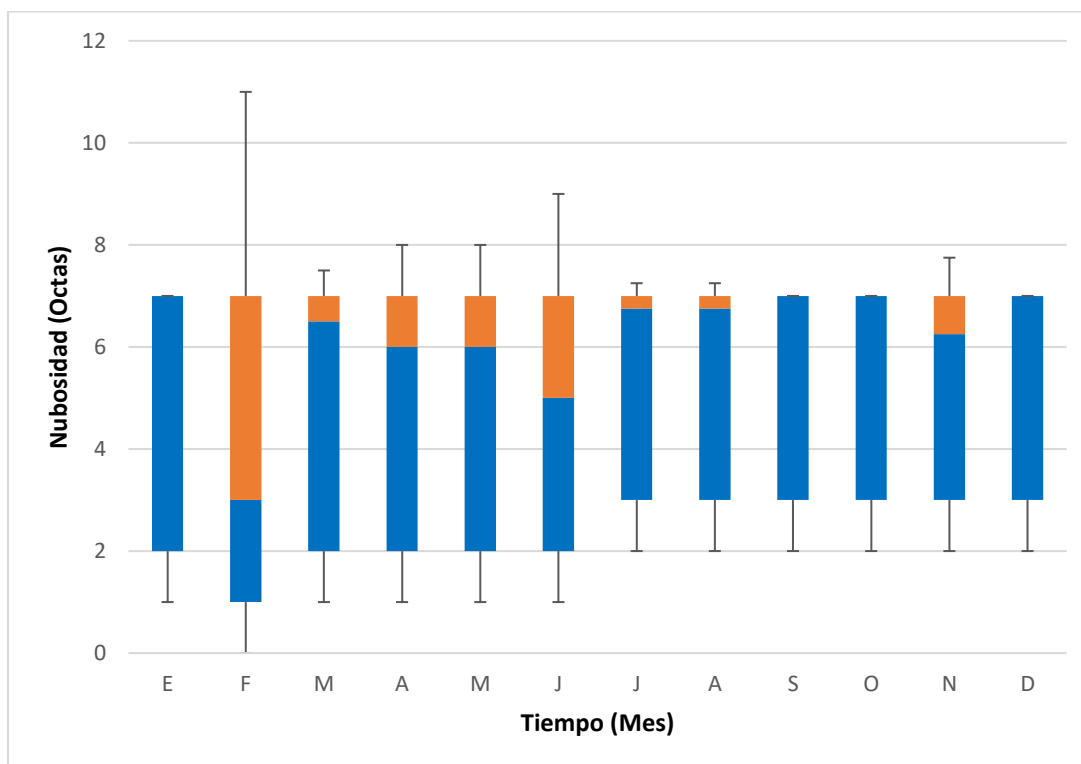
Se puede observar poca variabilidad en los valores de nubosidad registrados, lo cual permite concluir que el municipio de Buenaventura permanece nuboso prácticamente durante todo el año. Los máximos valores de nubosidad se presentan en los meses de diciembre y enero para las estaciones Aeropuerto de Buenaventura y Colpuertos respectivamente; los mínimos valores de nubosidad se presentan en el mes de febrero para la estación Aeropuerto de Buenaventura y en los meses de febrero y diciembre para la estación Colpuertos.

Tabla 7. Nubosidad media mensual multianual en el municipio de Buenaventura

Estación	Periodo	Nubosidad (Octas)												
		Mes												Media Anual
		E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	
Aeropuerto B/ventura	1964-2014	6.6	5.8	6.4	6.4	6.6	5.9	6.5	6.5	6.7	6.6	6.4	6.9	6.4
Colpuertos	1969-2000	5.7	4.5	5.5	4.6	5.3	4.9	5.4	4.8	5.8	4.6	5.6	4.5	5.1



Grafica 7. Diagrama de cajas y bigotes de nubosidad mensual multianual en la estación Colpuertos, en el municipio de Buenaventura



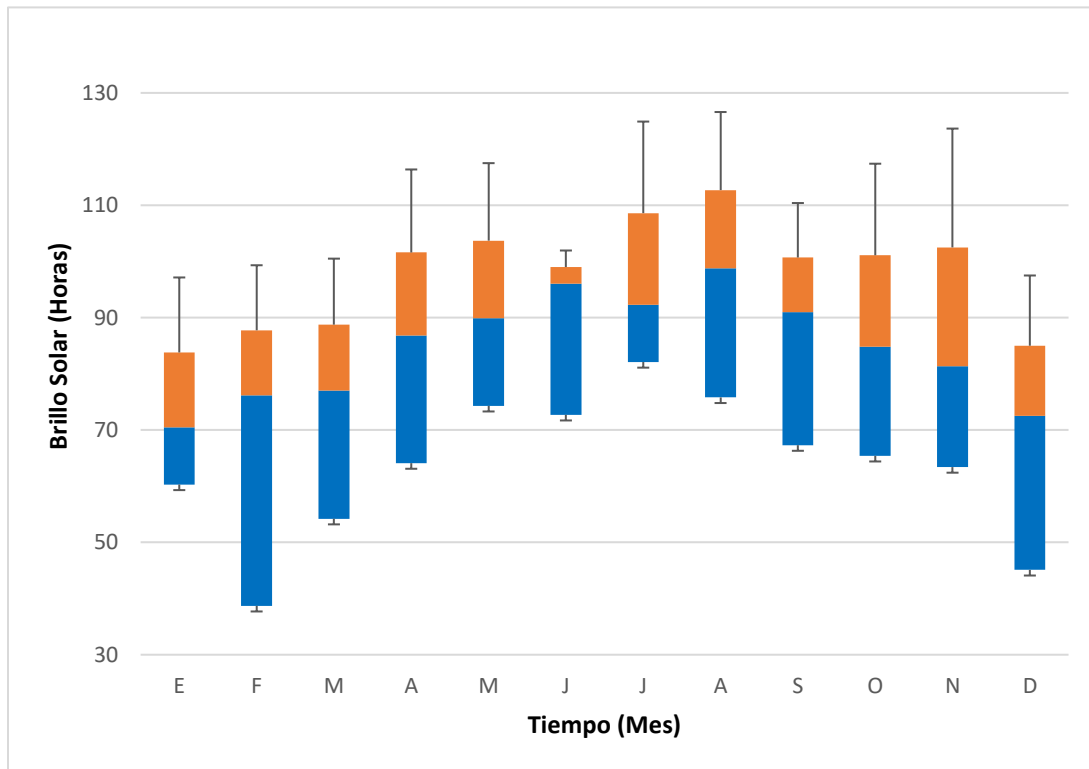
Grafica 8. Diagrama de cajas y bigotes de nubosidad mensual multianual en la estación Aeropuerto de Buenaventura, en el municipio de Buenaventura

7.2.6 Brillo solar

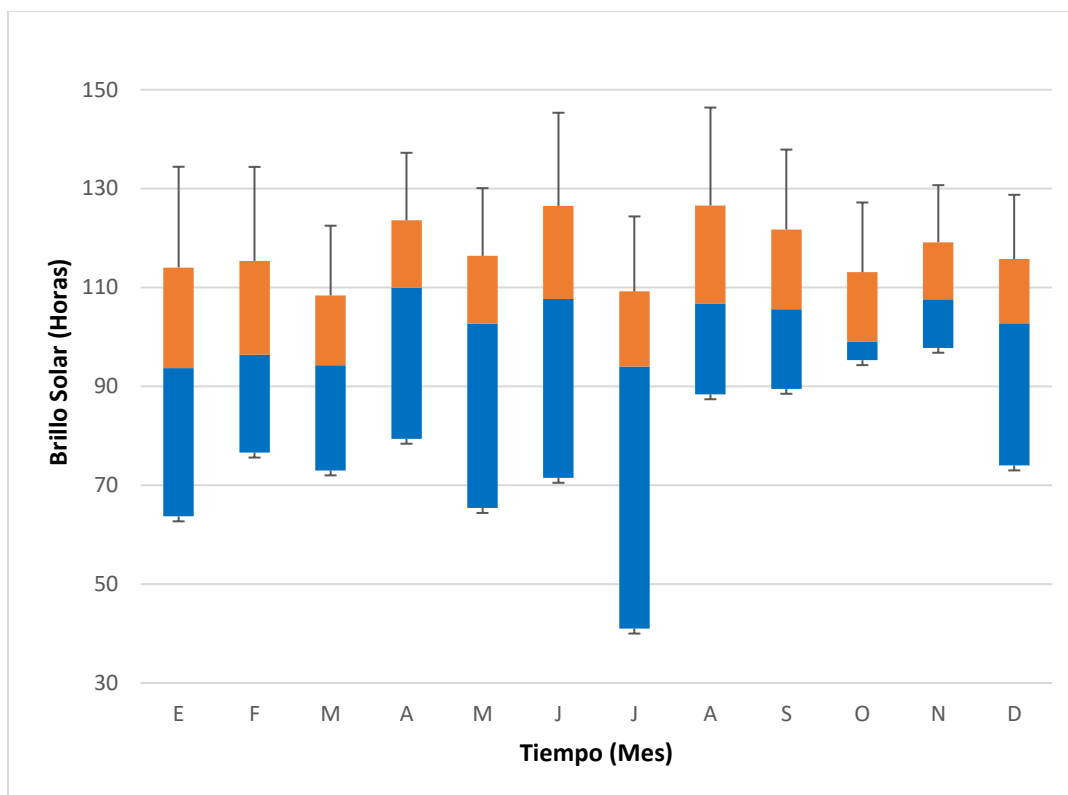
El brillo solar en el municipio de Buenaventura registra en los meses de julio y agosto mayor intensidad horaria y un valor medio anual de 1168.5 y 1442.0 horas por año en las estaciones Aeropuerto de Buenaventura y Colpuertos, respectivamente. De acuerdo con la información presentada en la Tabla 8 y las Gráficas 9 y 10 es posible establecer que se presenta una importante oscilación de sus valores a lo largo del año, debido a que se ve afectado por variables como precipitación, temperatura y nubosidad.

Tabla 8. Brillo Solar medio mensual multianual en el municipio de Buenaventura

Estación	Period	Brillo Solar (Horas)												
		Mes												Media Anual
		E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	
Aeropuerto B/ventura	2003-2014	84.0	87.6	94.7	104.0	98.8	100.4	116.1	119.2	91.8	101.1	85.8	85.0	1168.5
Colpuertos	1980-2001	125.3	118.8	120.7	117.6	122.2	122.6	134.6	125.9	115.4	112.4	112.6	113.9	1442.0



Gráfica 9. Diagrama de cajas y bigotes de brillo solar mensual multianual en la estación Colpuertos, en el municipio de Buenaventura



Grafica 10. Diagrama de cajas y bigotes de brillo solar mensual multianual en la estación Aeropuerto de Buenaventura, en el municipio de Buenaventura

7.2.7 Salinidad

En la Tabla 9 se presentan los resultados de las mediciones semestrales de salinidad para los 3 puntos distribuidos a lo largo de la bahía interior de Buenaventura monitoreados por la CVC. Los resultados de las mediciones se presentan en porcentaje (%).

Los registros de salinidad al interior de la bahía indican que puede variar entre 0.92% y 2.31%, dependiendo del sitio, los niveles de marea y los caudales de los ríos y esteros que confluyen en la bahía. Los mayores valores o concentraciones se presentan hacia la entrada de la bahía y disminuye hacia el interior de la misma. Igualmente las salinidades más altas se presentan en pleamar y las más bajas en bajamar. Por otra parte, cuando se incrementan las descargas de agua dulce de los ríos y esteros que tributan a la bahía las concentraciones de salinidad disminuyen. La variación de salinidad en la columna de agua es muy pequeña (menor del 1%, presentando valores ligeramente superiores cerca al fondo), por lo cual la bahía de Buenaventura se considera un estuario bien mezclado.

Tabla 9. Salinidad (%) semestral distribuido a lo largo de la bahía interior de Buenaventura

Primer Semestre (Enero-Junio)									
Punto de Monitoreo	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
1	1.08	2.31	0.96	2.01	-	2.11	1.47	1.44	1.36
2	0.99	2.14	1.02	1.80	-	1.61	1.34	1.15	1.27
3	1.00	1.94	0.96	1.41	-	1.39	1.15	1.13	1.18
Segundo Semestre (Julio-Diciembre)									
Punto de Monitoreo	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
1	1.26	2.47	1.71	1.43	1.30	1.22	1.44	1.11	1.83
2	1.06	1.87	1.57	1.33	0.92	0.92	1.32	1.04	1.28
3	0.95	1.54	1.38	1.12	0.72	1.06	0.68	0.96	0.77

Fuente: Collazos (2014)

7.3 Dinámica fluvial y marina

A la bahía interior confluyen diez (10) tributarios entre ríos, brazos y esteros, alimentados por la cuenca de la bahía de Buenaventura y con una extensión aproximada de 3800 Km². Los aportes de agua dulce de los tributarios a la bahía se estiman en un caudal promedio de 448.2 m³/s, con un considerable arrastre de sedimentos que se depositan normalmente en los deltas e islas sobre el flanco sur del canal de acceso al puerto de Buenaventura (Palacios & Quirós, 2006).

En la bahía de Buenaventura las características de las mareas son bastante similares a las existentes en el Pacífico Colombiano, con algunas pequeñas variaciones, especialmente en los valores de la amplitud de la marea a medida que esta penetra en la bahía por efecto de diferentes fenómenos, tales como: resonancia, reflexión, difracción y refracción por cambios en la velocidad de la onda de marea en aguas a diferentes profundidades, etc. Así pues, en la entrada de la bahía (sector Punta Soldado - Punta Bazán) se tienen amplitudes ligeramente inferiores a las que se presentan en el sector de la Isla de Cascajal. Según el informe del “Estudio sedimentológico de la Bahía de Buenaventura” del Laboratorio Central de Hidráulica de Francia, 1975, este aumento en la amplitud de la marea hacia el interior de la bahía se debe al estrechamiento en la parte interior de la Bahía y en menor proporción a la convergencia entre la entrada y la isla de Cascajal.

7.3.1 Cuenca hidrográfica de la bahía Buenaventura

La cuenca de la bahía de Buenaventura tiene una extensión aproximada de 3800 Km². Las áreas de las subcuencas de los ríos y esteros que tributan a la bahía se presentan en la Tabla 10 (Palacios & Quirós, 2006).

Tabla 10. Subcuencas tributarias de la bahía de Buenaventura

CUENCA	Área (Km²)	Porcentaje (%)
Río Dagua	1639	43.6
Río Anchicayá	1200	31.9
Estero Aguadulce	730	19.4
Estero San Joaquín	78.9	2.1
Esteros San Antonio y Hondo	34	0.9
Estero Gamboa	31.3	0.8
Estero Pichidó	29.3	0.8
Estero Aguacate	16.8	0.4
Total	3759.3	100

7.3.2 Caudales fluviales

A la bahía interior de Buenaventura confluyen diez (10) tributarios entre ríos, brazos y esteros (ver Figura 9). En la Tabla 11 se presentan los caudales mínimos, medios y máximos en los diferentes tributarios de la bahía de Buenaventura (POT Buenaventura, 2001).

El prisma de marea o de agua que entra y sale de la bahía es directamente proporcional a la amplitud de la marea y a las descargas de los tributarios. Así mismo, el volumen total de agua dulce descargado por los ríos afluentes puede variar entre un 3% y un 6% del prisma mareal. Las descargas de los ríos tienen influencia significativa sobre el comportamiento de la bahía, pues traen apreciables cantidades de sedimentos los cuales afectan su morfología y disminuyen las profundidades de agua, tanto en el canal de acceso como en las dársenas de maniobras y aproximación a los diferentes terminales marítimos, obligando a realizar frecuentes dragados de mantenimiento en dichos sectores.

Tabla 11. Caudales fluviales mínimos, medios y máximos de los ríos y esteros de la bahía de Buenaventura

Ríos y Esteros	Caudal en m³/s		
	Mínimo	Medio	Máximo
Río Dagua	55.8	66.1	89.4
Río Anchicayá – Brazo Principal	48.8	98.9	604.5
Río Anchicayá – Brazo Seco	26.2	53.2	325.5
Río Anchicayá – Brazo Humané	15.0	30.0	60.0
Estero Aguadulce	40.0	80.0	160.0
Estero Gamboa	15.0	30.0	60.0
Estero Aguacate	5.0	10.0	20.0
Estero San Antonio	10.0	20.0	40.0
Estero Hondo	5.0	10.0	20.0

Fuente: POT Buenaventura (2001)



Figura 9. Mapa hidrográfico de la bahía de Buenaventura

7.3.3 Corrientes en la bahía de Buenaventura

Las corrientes en el Pacífico Colombiano están relacionadas con el desplazamiento de la zona de convergencia intertropical y los vientos alisios del norte y del sur. También se tiene influencia al norte de las aguas calientes del golfo de Panamá y al sur de las corrientes costeras de aguas frías y las corrientes oceánicas de aguas cálidas del Perú. Por otra parte, se tiene localmente la corriente de Colombia que recorre la costa de sur a norte hasta mezclarse con las aguas del golfo de Panamá.

Las corrientes dentro de la bahía de Buenaventura están influenciadas por diferentes factores, tales como las mareas, las descargas de los ríos, los vientos, el oleaje, las lluvias y la configuración del fondo del mar y de las zonas costeras. De todos estos factores, la marea se constituye en uno de los de mayor influencia en el régimen de las corrientes en la bahía, originando corrientes de alguna intensidad a lo largo de la bahía y en los esteros de acuerdo con la fase y amplitud de la marea (Ramírez, 1999).

7.3.4 Mareas en la bahía de Buenaventura

Las mareas en la bahía de Buenaventura son de tipo semidiurno regular, presentando aproximadamente dos (2) pleamares y dos (2) bajamares en un mismo día, con un periodo de 12 horas 25 minutos. El período correspondiente al flujo o subida de la marea es casi 30 minutos más

largo que el período de reflujo o bajada de la marea, y la amplitud del reflujo es ligeramente inferior con respecto al del flujo (Ramírez, 1999).

Los resultados presentados por el Laboratorio de Proyectos Hidráulicos del Pacífico durante el programa de campo Hidrosedimentológico en la Bahía de Buenaventura en el mes de noviembre de 1997 indican que la marea se amplifica en promedio, desde su paso por la Bocana, en un 9.5% en la sección del muelle de Terminal Marítimo y en un 10.3% en el estero Aguadulce. Así mismo, los desfases en promedio entre pleamares y bajamares de la marea entre la sección La Bocana y el muelle del Terminal Marítimo, al interior de la bahía, es de aproximadamente 18 minutos. Además, en el sector de medición del río Anchicayá, localizado a 12 Km aguas arriba de la desembocadura, la influencia mareal es pequeña, alcanzándose amplitudes de marea que oscilan entre 0.61 m y 1.24 m.

En la Tabla 12 se presentan los valores de amplificación de la marea desde su paso por la sección de La Bocana hacia el interior de la bahía de Buenaventura. Los porcentajes que se presentan en la Tabla 12 fueron obtenidos a partir de registros mareales continuos durante un ciclo mareal completo que abarque la pleamar y la bajamar de la marea.

En la bahía de Buenaventura se cuenta con los niveles promedio de marea presentados en la Tabla 13, obtenidos de los registros de niveles medios mensuales del mareógrafo de Buenaventura y presentados por el IDEAM para el período de 1953 y 2016, los cuales están referidos al nivel medio de las bajamares vivas denominado nivel de Sicigia, que es el nivel de referencia más utilizado para fines de navegación.

Tabla 12. Amplitudes de marea y porcentaje de amplificación mareal en diferentes sitios al interior de la bahía de Buenaventura

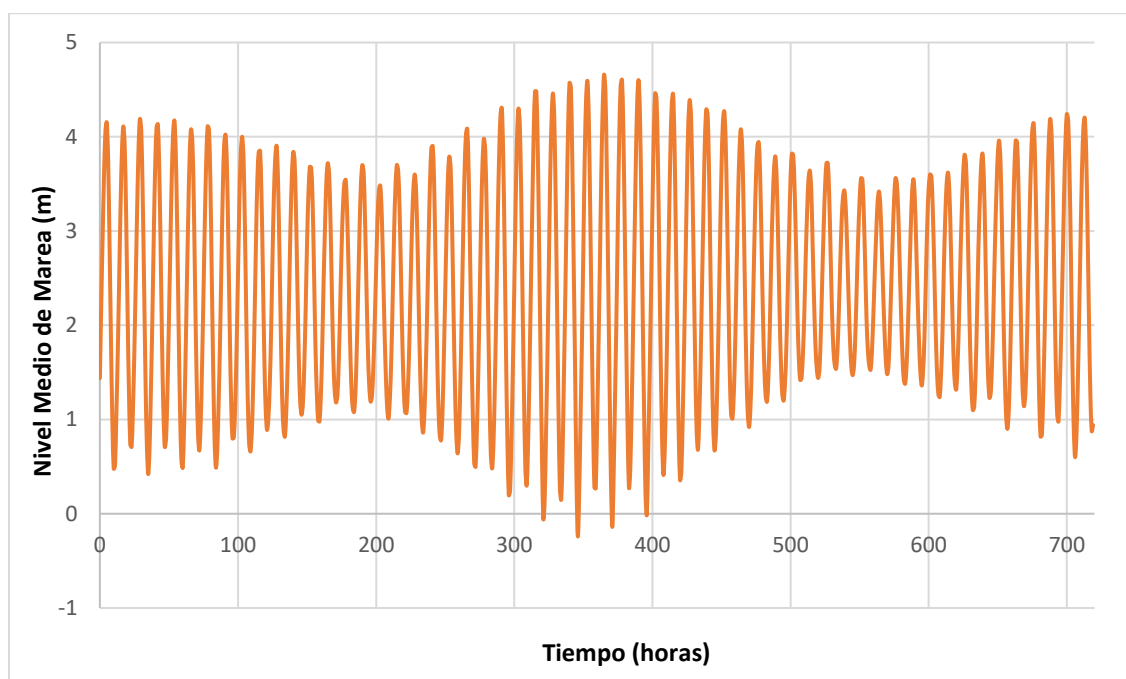
Fecha	Amplitud mareal (m)					% Amplificación mareal			
	Bocana	Anchicayá	Cangrejo	Muelle	Aguadulce	Boc-Anch.	Boc-Cang	Boc-Muell	Boc-Agua
Nov. 14/97	4.2			4.56				8.6	
Nov. 15/97	4.36			4.69				7.6	
Nov. 17/97	4.03	1.22				-69.7			
Nov. 18/97	3.02	1.24		3.31		-58.9		9.6	
Nov. 19/97	3.23	1.07		3.69	3.74	-66.9		14.2	
Nov. 20/97	2.96	1.01	3.24	3.17	3.23	-65.9	9.5	7.1	9.1
Nov. 21/97	2.46	0.87	2.65	2.66	1.7	-64.6	7.7	8.1	9.8
Nov. 22/97	2.10	0.61	2.44	2.24	2.24	-71.0	16.2	6.7	6.7
Nov. 27/97	2.5		2.87	2.79	2.81		14.8	11.6	12.4
Nov. 28/97	2.80		3.2	3.11	3.15		14.3	11.1	12.5
Nov. 29/97	3.18		3.39	3.5	3.54		6.6	10.1	11.3
Promedio						-66.2%	+11.5%	+9.5%	+10.3%

Fuente: Laboratorio de Proyectos Hidráulicos del Pacífico (Universidad del Valle, 1998)

Tabla 13. Niveles promedio de marea en la bahía de Buenaventura

Nivel	Convención	Nivel (m)
Nivel medio del mar	MSL	2.24
Nivel de marea media	MTL	2.13
Nivel de pleamar media	MHW	3.68
Nivel de bajamar media	MLW	0.59
Nivel de pleamar media superior	MHHW	3.75
Nivel de bajamar media inferior	MLLW	0.49
Amplitud de marea media	Mn	3.09
Pleamar máxima registrada	-	5.04
Bajamar mínima registrada	-	-0.79

La Gráfica 11 presenta la variación de los niveles medios de pleamar y bajamar durante el mes de noviembre del año 1997. Estos registros horarios permiten apreciar dos períodos de rangos mareales máximos y dos períodos de rangos mareales mínimos, denominados “mareas vivas” y “mareas muertas”, respectivamente. Históricamente se han registrado un mínimo de 1.4 m y un máximo de 5.4 m en los rangos mareales, presentándose durante las mareas vivas las pleamares máximas y mínimas, mientras que durante las mareas muertas tienen lugar las pleamares mínimas y las bajamares máximas.



Grafica 11. Niveles de Marea en la bahía de Buenaventura durante el mes de noviembre del año 1997 (Fuente: Laboratorio de Proyectos Hidráulicos del Pacífico - Universidad del Valle, 1998)

Marea subiendo o flujo

En términos generales se observa que cuando la marea sube, es decir, cuando la marea entra a la bahía, el patrón de flujo, a las diferentes profundidades, es bastante similar. Las velocidades

mínimas, como es de esperarse, se presentan en los períodos próximos a pleamares y bajamares y en las zonas de profundidades muy pequeñas.

Las velocidades máximas se presentan en los tramos estrechos y en los sectores de mayores profundidades (zona del canal), aproximadamente en el período comprendido entre las 2.5 y las 4.0 horas después de las bajamares y las pleamares. La máxima velocidad medida durante una campaña de monitoreo del Laboratorio de Proyectos Hidráulicos del Pacífico de la universidad del Valle fue de 2.08 m/s a 5.0 metros de profundidad en proximidad del canal de navegación frente al sector denominado Boca Cangrejo. En promedio las velocidades máximas observadas se hallan entre 1.0 y 1.5 m/s. Las velocidades del flujo en las zonas bajas, generalmente presentan valores menores a 0.5 m/s (Laboratorio de Proyectos Hidráulicos del Pacífico, 1998).

Las corrientes entran en la Bahía y avanzan siguiendo aproximadamente el alineamiento del canal de navegación hasta llegar al sector de la Isla Cangrejo, donde el flujo se divide en dos: una buena parte se dirige hacia la zona de los muelles y el estero Aguadulce y la otra fracción se dirige hacia el sur de la isla para continuar hacia el río Dagua, estero Hondo, Piñal Sur y posteriormente al estero San Antonio.

Al norte de la Isla Cascajal, frente a la zona de muelles, el flujo avanza en sentido noreste y se dirige hacia el estero Gamboa, observándose un flujo de menor intensidad hacia el estero Aguacate. Las líneas de corrientes próximas a los muelles siguen una orientación bastante paralela a ellos y cambian de dirección hacia el estero Piñal Norte. Algunas de las líneas de corrientes presentan una dirección más o menos definida, paralela al eje del canal del Piñal Norte, mientras que unas pocas especialmente las superficiales, se dirigen hacia las zonas costeras bajas localizadas al frente del Muelle Petrolero.

Los flujos provenientes de los esteros Piñal Norte y Piñal Sur se encuentran en la entrada del estero San Antonio, mezclándose para producir el llenado del mismo.

Marea bajando o reflujo

Cuando la marea sale de la Bahía se observan velocidades de la corriente un poco mayores a las registradas durante la fase de marea subiendo debido a las descargas de los ríos. Las velocidades máximas fluctúan en un rango promedio de 1.3 a 2.8 m/s. La velocidad máxima observada de 2.26 m/s, se obtuvo en el sector aledaño al muelle turístico de la Bocana, ubicado sobre la margen izquierda en la sección de entrada de la Bahía (Laboratorio de Proyectos Hidráulicos del Pacífico, 1998).

Durante el reflujo, las corrientes del estero San Antonio se dirigen hacia los esteros Piñal Norte y Piñal Sur, así: al comienzo el agua se dirige en mayor proporción hacia el Piñal Sur, disminuyendo gradualmente este flujo y aumentando el flujo de salida hacia el Piñal Norte. Hacia el final de la marea saliente el flujo descarga en mayor cantidad hacia el Piñal Norte.

El flujo vaciante del estero Aguacate se dirige hacia el sector de los muelles, encontrándose con el flujo proveniente del estero Piñal Norte. Algunas corrientes que provienen del estero Aguacate siguen a lo largo de la zona muelles, mientras que otras se dirigen hacia el sector de los muelles de la Sociedad Regional Portuaria de Buenaventura.

Desde el sector de la Isla Cangrejo hasta la entrada de la bahía el flujo saliente presenta un comportamiento bastante ordenado, siguiendo trayectorias más o menos paralelas al canal de navegación. Los flujos vaciantes del río Dagua y el estero Hondo se dirigen hacia la zona del canal, orientándose finalmente en el mismo sentido del eje del canal hacia la entrada de la bahía.

El flujo proveniente de los diferentes brazos del río Anchicayá descarga casi perpendicularmente sobre el flujo principal vaciante de la bahía.

7.3.5 Oleaje

El oleaje en la Costa Pacífica Colombiana es generado mar afuera en el Océano Pacífico y está determinado fundamentalmente por la Corriente Ecuatorial del Sur y los vientos alisios del noreste. Como resultado de esta interacción, las olas presentan una variación en dirección e intensidad y está en relación directa con el desplazamiento de los vientos de la zona de convergencia intertropical a lo largo del año (POT Buenaventura, 2001).

El oleaje generado por los vientos locales presenta una frecuencia media anual del 51% en la dirección suroeste y del 13% en la dirección sur, con idéntico porcentaje en la dirección oeste. La frecuencia media anual de calma es del 7%. La máxima frecuencia es del 66% en la dirección suroeste en el período octubre - diciembre.

El oleaje oceánico que logra avanzar más allá de las áreas de generación presenta las mayores frecuencias en la dirección suroeste en el período abril - diciembre, seguido en frecuencia en las direcciones sur y oeste, respectivamente. En el período enero- marzo se presenta en mayor frecuencia el oleaje en dirección noroeste (25%). La frecuencia media anual de calma es del 30%.

El oleaje de alguna consideración (de 3 y más metros de altura) que eventualmente puede presentarse durante períodos muy cortos mar afuera de la bahía de Buenaventura, al propagarse hacia la zona costera (atravesando la barra localizada al exterior de la bahía), reducen rápidamente su altura debido a la disipación de energía por efectos de la fricción del fondo. Como resultado de esto, la altura máxima de las olas cerca a la entrada de la bahía es de alrededor de 0.9 m. Las olas generadas en las zonas costeras alcanzan alturas máximas de unos 0.6 metros.

Dentro de la Bahía de Buenaventura, las olas (de alturas reducidas) que se propagan hacia el interior, así como las generadas por vientos locales, pierden rápidamente altura debido a la disminución de energía por fricción, de tal manera que en el sector próximo a la isla Cascajal o isla de Buenaventura el oleaje es mínimo.

8 IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO HIDRODINÁMICO (MOHID)

8.1 Construcción de la malla numérica

Para la construcción de la malla numérica primero se ubicó espacialmente el área de estudio mediante el sistema de coordenadas geográficas WGS 84, para precisar la línea de costa extraída a través del software libre Coastline Extractor y modificarla en pos de representar los ríos Dagua y Anchicayá y los esteros San Antonio y Aguadulce, por ser los de mayor aporte fluvial en la bahía de Buenaventura (Figura 10, línea azul), lo cual permitió definir la frontera abierta del dominio.

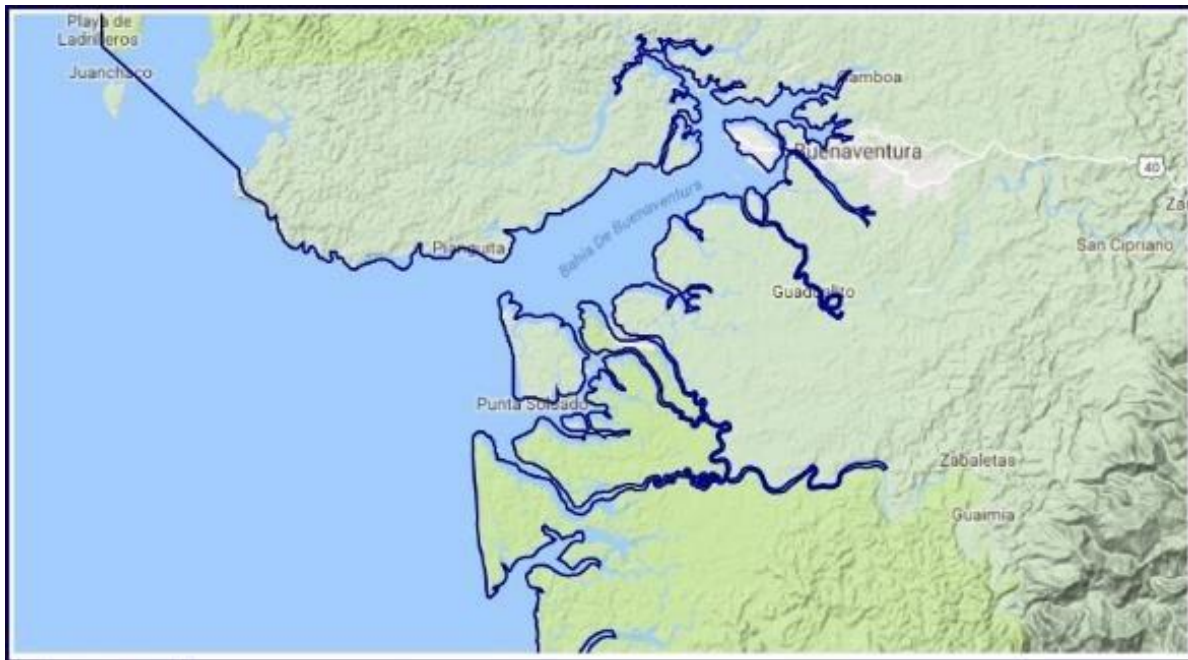


Figura 10. Esquematización de la línea de costa para la bahía de Buenaventura

Para representar en el modelo los ríos tributarios Dagua y Anchicayá, y dado que no se cuenta con la información batimétrica hasta el límite de influencia mareal, se optó por estimarla con base en la información disponible de los volúmenes oscilantes para mareas máximas, las longitudes máximas de influencia mareal y la morfología media de los cauces; esta información se tomó del estudio sedimentológico del Laboratorio Central de Francia (LCHF, 1974).

En el río Anchicayá, para un rango de marea máxima registrada de 5.40 m el volumen oscilante es 31.3 millones de m³ y la longitud de la influencia mareal es aproximadamente 25 km; además, se consideró un ancho medio de 120 m, un factor de rugosidad de Manning de 0.04 s/m³ y un caudal medio de 152 m³/s.

En el río Dagua, en marea viva máxima de 5.4 m de rango el volumen oscilante estimado es 3.1 millones de m³, la influencia mareal alcanza una longitud de 10 km y su cauce presenta, en su tramo final, un ancho medio de 60 m; se adoptaron para los cálculos un factor de rugosidad de Manning de 0.04 s/m³ y un caudal medio de 89 m³/s.

Posteriormente, aplicando el método del paso directo para determinar los perfiles de flujo gradualmente variado, se construyó una hoja de cálculo electrónica en Excel. Para ello se asumían los niveles del lecho del río y una vez determinado el perfil de flujo se procedía a calcular el volumen total de agua almacenado en el tramo final del río. Este volumen se comparaba con el volumen oscilante conocido; si los dos volúmenes eran diferentes, entonces se debían ajustar los niveles del lecho y recalcularse el perfil de flujo y el volumen total almacenado; este procedimiento se repetía hasta lograr una diferencia aceptable entre los dos volúmenes.

El área del sistema a modelar se representó a través de una malla de celdas cuadradas ($\Delta x = \Delta y$). La selección del tamaño de las celdas de la malla resulta de considerar el grado de detalle requerido para representar los diferentes elementos y contornos del sistema físico, el tiempo computacional total y la estabilidad numérica del modelo. Un tamaño de celda muy pequeño permite representar con gran detalle toda la configuración morfológica del sistema, pero puede implicar un tiempo computacional considerable.

La selección final del tamaño de las celdas consideró criterios como el tiempo computacional, la estabilidad durante los cálculos del modelo y la representatividad del sistema, teniendo en cuenta que principalmente lo conforman islas (Cascajal, Cangrejo y Soldado), ríos (Dagua y Anchicayá) y esteros (Aguadulce y San Antonio). Por esta razón fue necesario aplicar un procedimiento de ensayo y error hasta garantizar la correcta representación de la batimetría en las secciones de los ríos y esteros, ya que por el tamaño de la sección transversal y la morfología de los mismos, algunas celdas en la zona de los meandros quedaban pobremente conectadas generando obstrucción del flujo o errores inmediatos que no permitían iniciar el cálculo computacional; o en su defecto, se generaban celdas que unían los meandros en la parte cóncava, incidiendo en la representatividad de la morfología fluvial del sistema.

Finalmente se optó por una malla de cálculo rectangular con celdas de igual tamaño (50 m*50 m), con una cantidad total de celdas de 700*600 y un área de 1050 Km². Siguiendo las recomendaciones del manual del modelo MOHID se optó por girar la malla numérica de tal modo que la dirección principal de las líneas de flujo fueran aproximadamente perpendicular a la frontera. La malla fue orientada 25° con respecto al eje S-N, con origen en las coordenadas geográficas (-77.2304, 3.5730) (ver Figura 11).

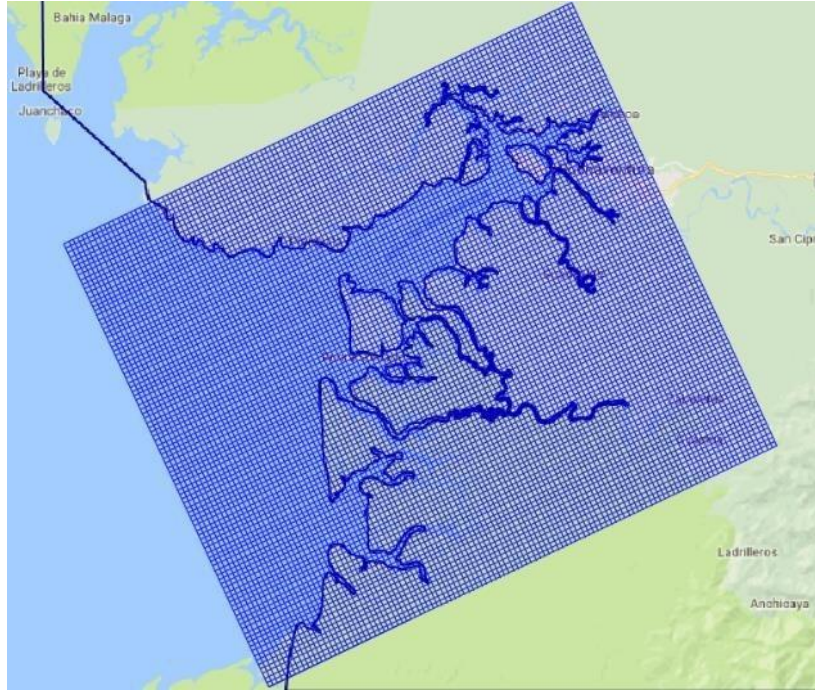


Figura 11. Malla de cálculo del sistema bahía de Buenaventura

El tiempo de cálculo en la modelación fue seleccionado considerando el número de Courant, dado por la siguiente ecuación:

$$Cr = \sqrt{gh_{m\acute{a}x}} \frac{\Delta t}{\Delta x} \quad \textbf{Ecuación 12}$$

donde:

Cr = Número de Courant

g = Aceleración gravitacional [m/s^2]

$h_{m\acute{a}x}$ = Profundidad máxima del dominio [m]

Δx = Tamaño de la malla [m]

Δt = Intervalo de tiempo utilizado por las ecuaciones [s]

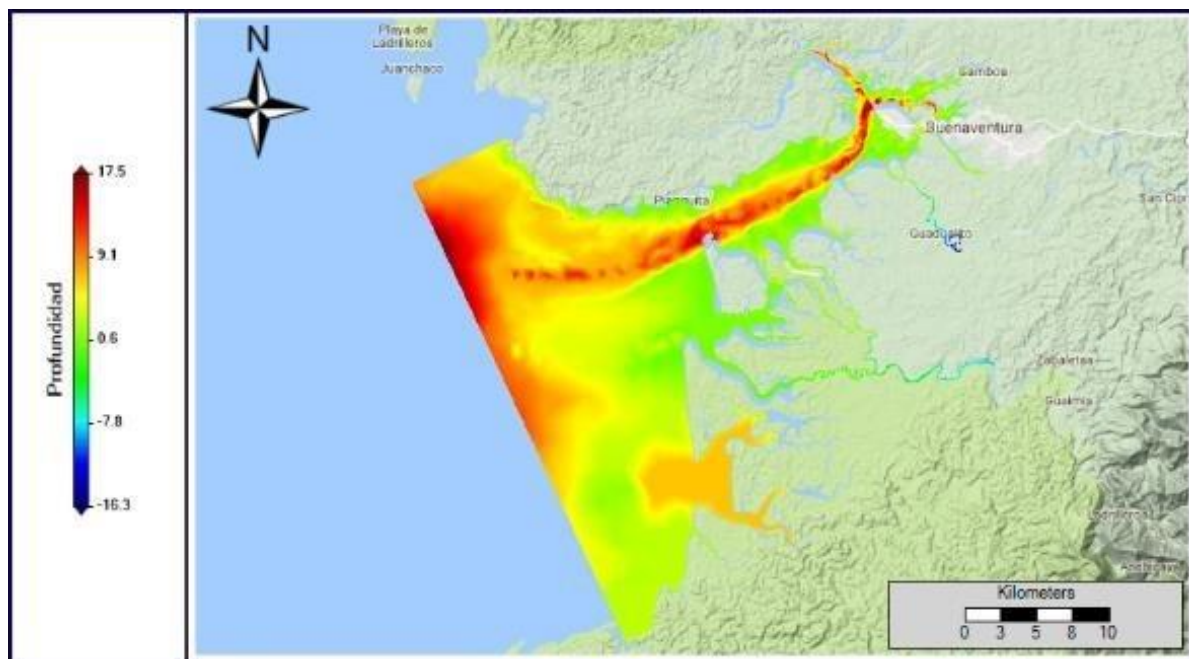
Cuidando de no afectar la estabilidad del modelo el valor óptimo para el número de Courant debe ser menor a 4. Por lo tanto, el tiempo de cálculo adoptado en las modelaciones fue de 15 s. Pero en general, se puede asumir que el modelo implementado es estable para números de Courant hasta 4.8.

8.2 Esquemmatización de la batimetría

Una vez digitalizada la información batimétrica de las cartas náuticas 153, 730 y 306 del Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe, CIOH, donde los niveles del lecho marino están dados con respecto al nivel de sicigia (promedio de las bajamareas de las mareas

vivas), se procedió a construir su representación en el modelo. Según MOHID, todos los puntos que se encuentren por debajo de este nivel de referencia tendrán valores positivos y los puntos que se hallen por encima tendrán valores positivos.

8.2.1 Ajuste de la batimetría



8.3 Condiciones de frontera

Debido a que no se disponía de registros de campo de la variación de los niveles de marea en la sección definida como frontera abierta (oceánica) de mar afuera del modelo matemático, se decidió generar tal información a partir del modelo de pronóstico de mareas denominado FES2004. Por consiguiente, la condición hidrodinámica en la frontera de mar fue utilizada para imponer el efecto de la marea astronómica sobre el dominio o zona de estudio mediante la construcción de una serie de 18 nodos, distribuidos en toda la frontera abierta, a partir de la superposición de los principales componentes armónicos de la marea en la costa Pacífica Colombiana, como son: M_2 , S_2 , K_1 , K_2 , N_2 , O_1 , Q_1 , P_1 y M_4 . En la Figura 13 se puede apreciar la distribución de estos 18 nodos (representados por puntos azules) en la frontera de mar.

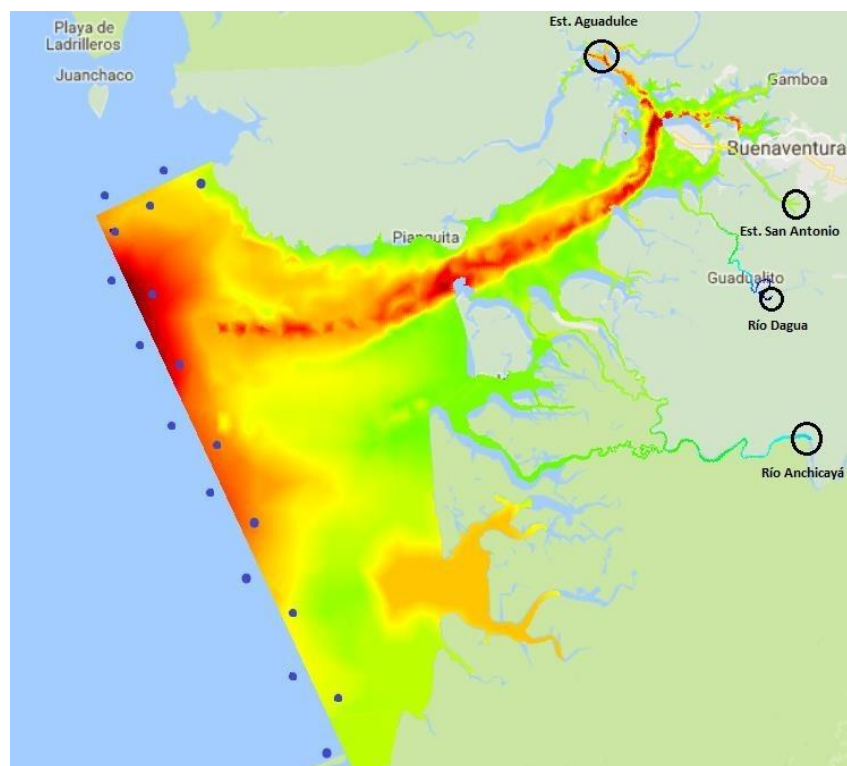


Figura 13. Condiciones de frontera en la bahía de Buenaventura

Los valores de las amplitudes y las fases de las componentes de la marea astronómica que se ingresaron en los 18 nodos de la frontera oceánica se obtuvieron con la ayuda de la herramienta del MOHID denominada “MOHID-tide”, la cual extrae la solución del Atlas de Mareas FES2004 en dichos puntos de la frontera. Estos valores son los que deben ajustarse en la calibración del modelo para representar correctamente la onda de marea en el dominio.

Las fronteras internas en los ríos tributarios y esteros se localizaron aguas arriba del límite de influencia mareal. En el modelo MOHID dichos aportes son representados como una condición de borde correspondiente a un caudal de entrada. Dado que el volumen o prisma de marea en la bahía

(es decir, el volumen de agua salada que ingresa a la bahía durante un ciclo de marea) es muy alto, las descargas de los ríos pueden considerarse constantes a lo largo del tiempo para las condiciones de fronteras internas del modelo (Ramírez, 1995). Por ello, en las condiciones de caudales mínimos se impusieron en los ríos Dagua y Anchicayá descargas de $56 \text{ m}^3/\text{s}$ y $111 \text{ m}^3/\text{s}$ respectivamente, y en los esteros Aguadulce y San Antonio descargas de $40 \text{ m}^3/\text{s}$ y $10 \text{ m}^3/\text{s}$, respectivamente; en las condiciones de caudales máximos fueron impuestos en los ríos Dagua y Anchicayá descargas de $90 \text{ m}^3/\text{s}$ y $930 \text{ m}^3/\text{s}$, respectivamente y en los esteros Aguadulce y San Antonio descargas de $160 \text{ m}^3/\text{s}$ y $40 \text{ m}^3/\text{s}$, respectivamente. En la Figura 19 es posible apreciar la ubicación de estas fronteras internas.

8.4 Condiciones iniciales

Para la resolución del sistema de ecuaciones en el modelo matemático es necesaria la especificación de las condiciones iniciales hidrodinámicas (para $t = 0$), como son el nivel de la superficie libre del agua y la velocidad del flujo en todas las celdas de la malla computacional. Es conveniente que al comienzo de una simulación el modelo pase un cierto tiempo de relajación, denominado “tiempo de calentamiento”, en el cual adquiere un régimen normal. En este tiempo de transición, los parámetros hidrodinámicos se irán adecuando progresivamente a sus valores reales (Montero, 1999).

Dicho período inicial de calentamiento o adaptación es necesario debido a que generalmente las condiciones hidrodinámicas iniciales en casi todo el dominio computacional, se desconocen, y, por lo tanto, deben asumirse por parte del ingeniero modelador.

Teniendo en cuenta que las diferentes simulaciones se realizaron iniciando en condición de pleamar o bajamar se adoptó para el campo de velocidades como condición inicial una velocidad de flujo igual a cero en todo el dominio computacional, y un nivel de agua igual a 2.24 m (nivel medio del mar). Como se indicó previamente, solamente es necesario un tiempo corto de arranque o calentamiento para que las velocidades se ajusten a la acción de los forzantes considerados. Para los ríos se asumieron, como condiciones iniciales, las mismas descargas constantes definidas como condiciones de frontera.

Adicionalmente fueron introducidas condiciones iniciales correspondientes a propiedades como la salinidad y la temperatura del agua, de forma sectorizada. En la Figura 14 se presenta el mapa de variación y en la Tabla 14 se indica el valor de cada uno de estos parámetros según la zona.

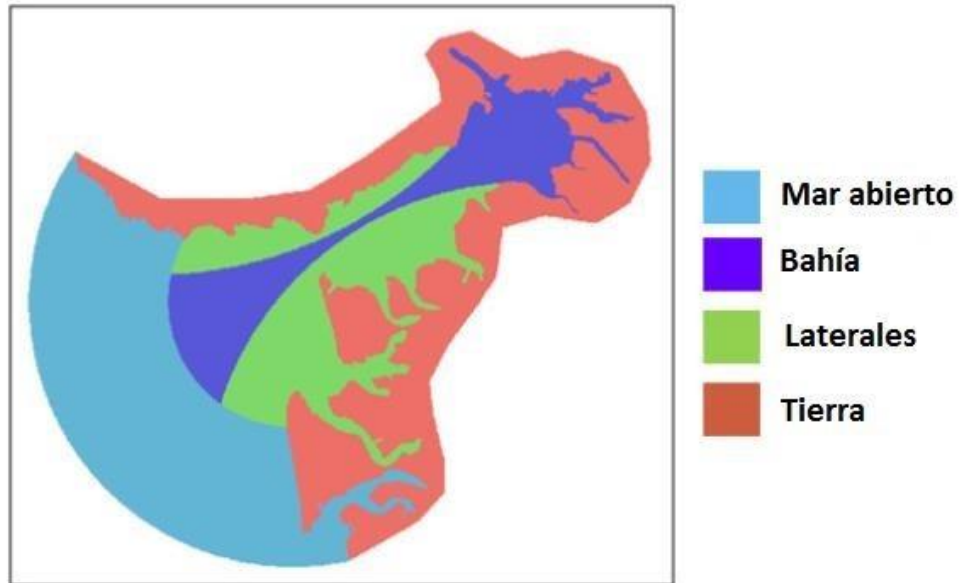


Figura 14. Mapa de zonificación de las propiedades temperatura y salinidad del agua en la bahía de Buenaventura

Tabla 14. Valores de temperatura y salinidad del agua adoptadas en el modelo para la bahía de Buenaventura

Zona	Parámetro	
	Temperatura (°C)	Salinidad (UPS)
Mar abierto	26	30
Bahía	26	27
Laterales	27	26

8.5 Análisis de sensibilidad

Para el análisis de sensibilidad del modelo de la bahía de Buenaventura se evaluó la influencia de los siguientes parámetros: (i) el coeficiente de rugosidad, (ii) la viscosidad turbulenta horizontal y (iii) los armónicos de marea astronómica. Se realizó una serie de simulaciones para un período de 2 días, iniciando el 14/11/1997 y variando uno a uno cada parámetro, para así determinar la influencia de cada uno de ellos en el comportamiento hidrodinámico de la bahía. Los valores modelados fueron obtenidos a partir de los archivos de resultados en formato ASCII en puntos o sitios de control específicos, establecidos a lo largo de la bahía y en los cuales se disponía de registros de campo de variación de los niveles de marea. En la Figura 15 y en la Tabla 15 se presenta la ubicación de los sitios de control seleccionados para fines de análisis de sensibilidad y posterior calibración y verificación del modelo hidrodinámico.



Figura 15. Ubicación de los sitios de control o estaciones al interior de la bahía de Buenaventura

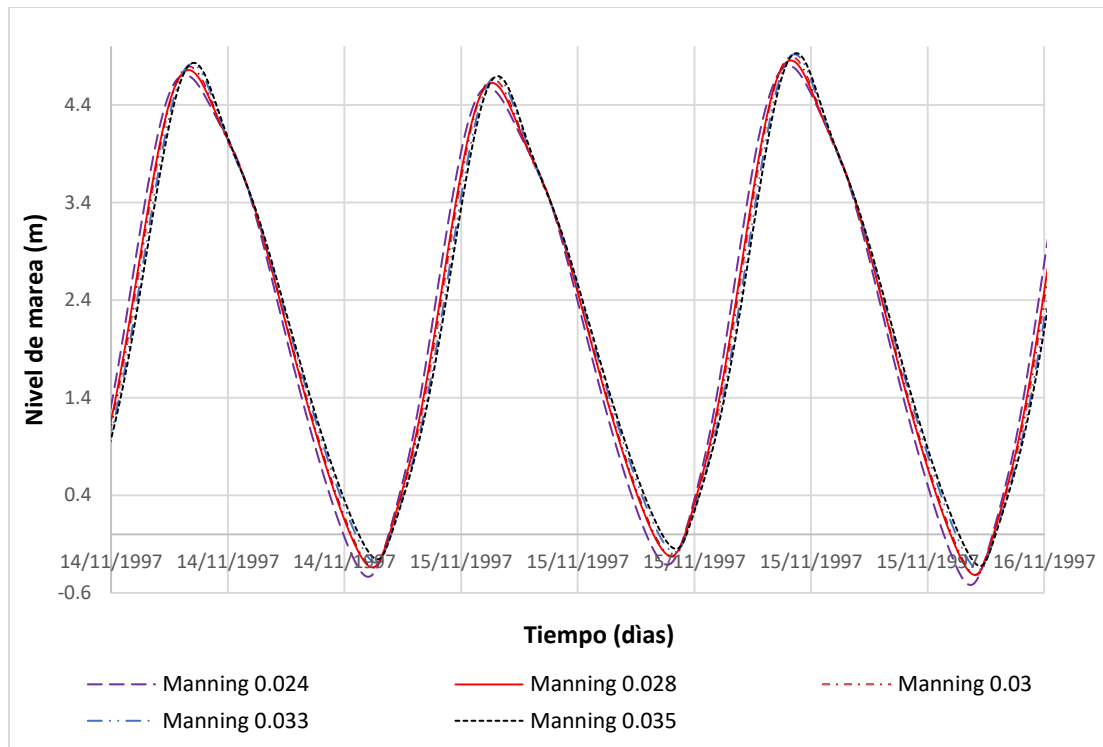
Tabla 15. Ubicación geográfica de los sitios de control o estaciones al interior de la bahía de Buenaventura

Estación	Coordenadas (WGS 84)	
	Longitud (W)	Latitud (N)
La Bocana	77°11'04"	3°49'24"
Isla Cangrejo	77°06'03"	3°52'13"
Aguadulce	77°05'56"	3°54'54"
Delta Dagua	77°04'50"	3°51'59"
Muelle	77°04'45"	3°53'50"
Mareógrafo	77°03'41"	3°53'33"

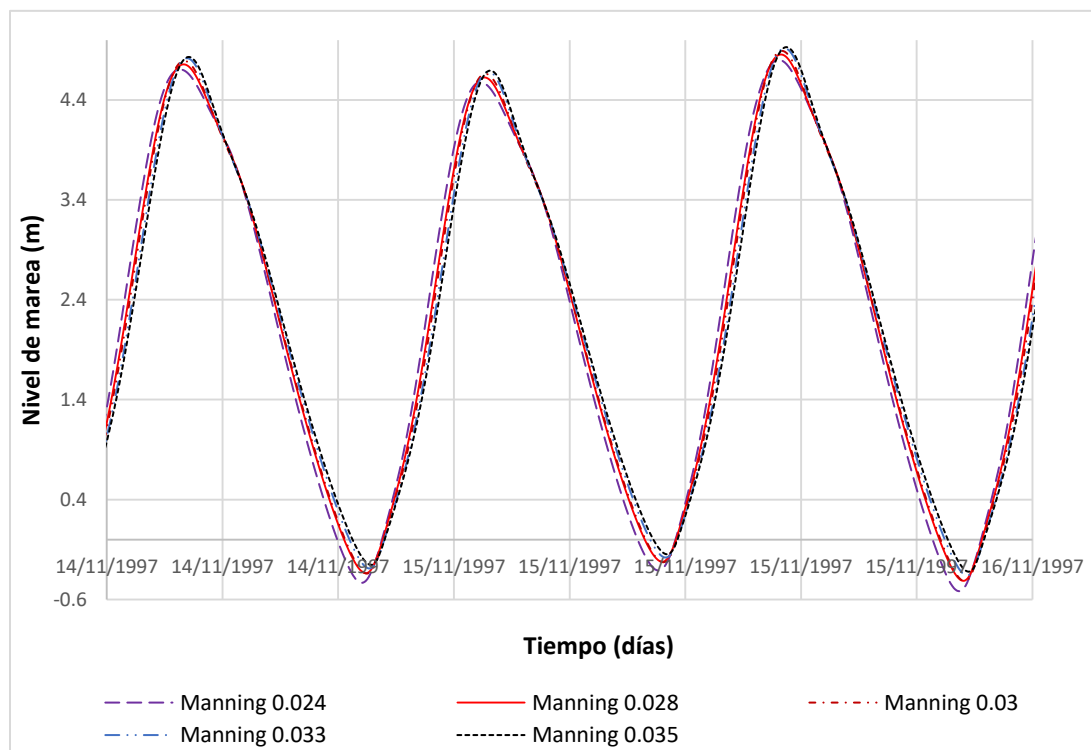
Los resultados que se presentan a continuación corresponden a 3 de las estaciones o sitios de control (Aguadulce, Muelle y La Bocana) establecidos para el presente estudio.

(i) **Análisis del coeficiente de rugosidad de Manning**

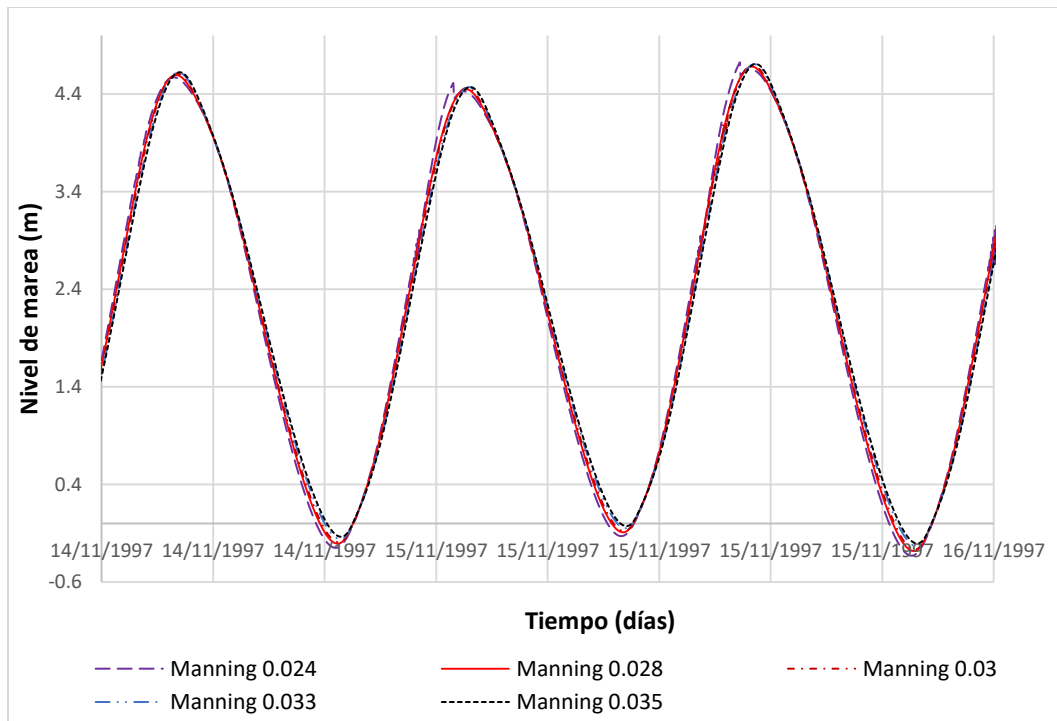
Para el análisis de la influencia del coeficiente de rugosidad de Manning sobre los niveles de marea y las velocidades del flujo se efectuaron simulaciones para diferentes valores de rugosidad de Manning en el rango de 0.024 – 0.035. Cabe mencionar que el modelo hidrodinámico implementado considera un único parámetro de rugosidad para todo el sistema. En las Gráficas 12 a 14 se logra apreciar el comportamiento del nivel de marea y en las Gráficas 15 a 17 se presenta el comportamiento de la velocidad del flujo en respuesta a la variación del coeficiente de rugosidad de Manning.



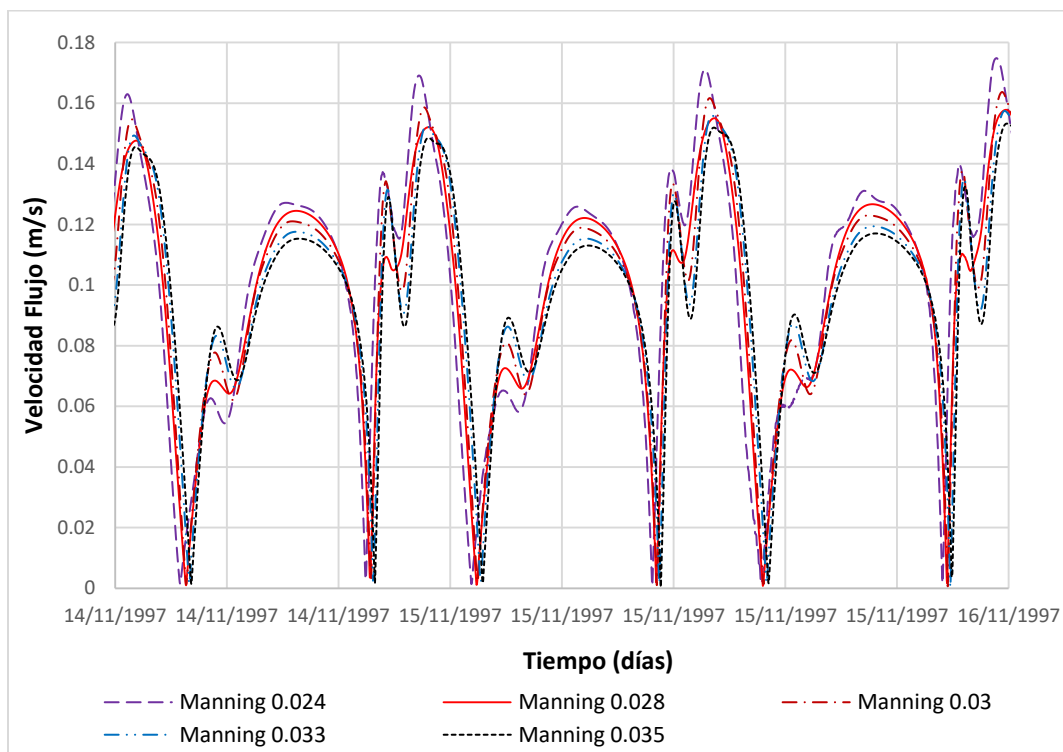
Grafica 12. *Análisis de sensibilidad para el coeficiente de rugosidad: Niveles de marea en el sitio de control Aguadulce*



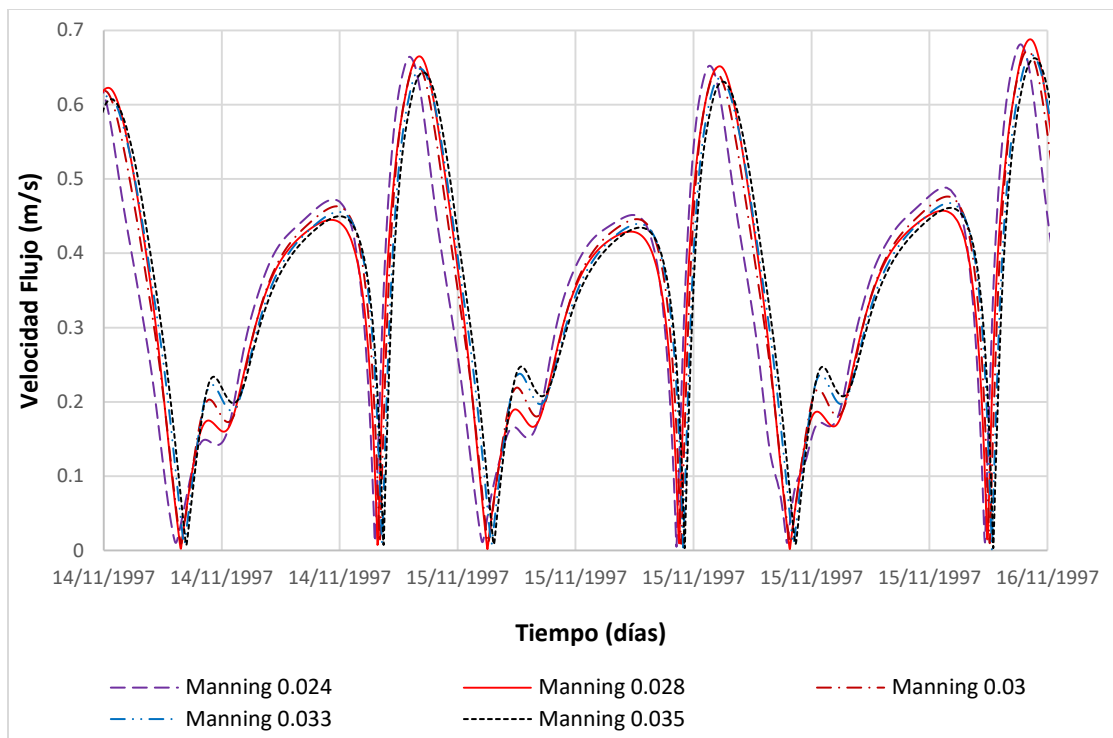
Grafica 13. *Análisis de sensibilidad para el coeficiente de rugosidad: Niveles de marea en el sitio de control Muelle*



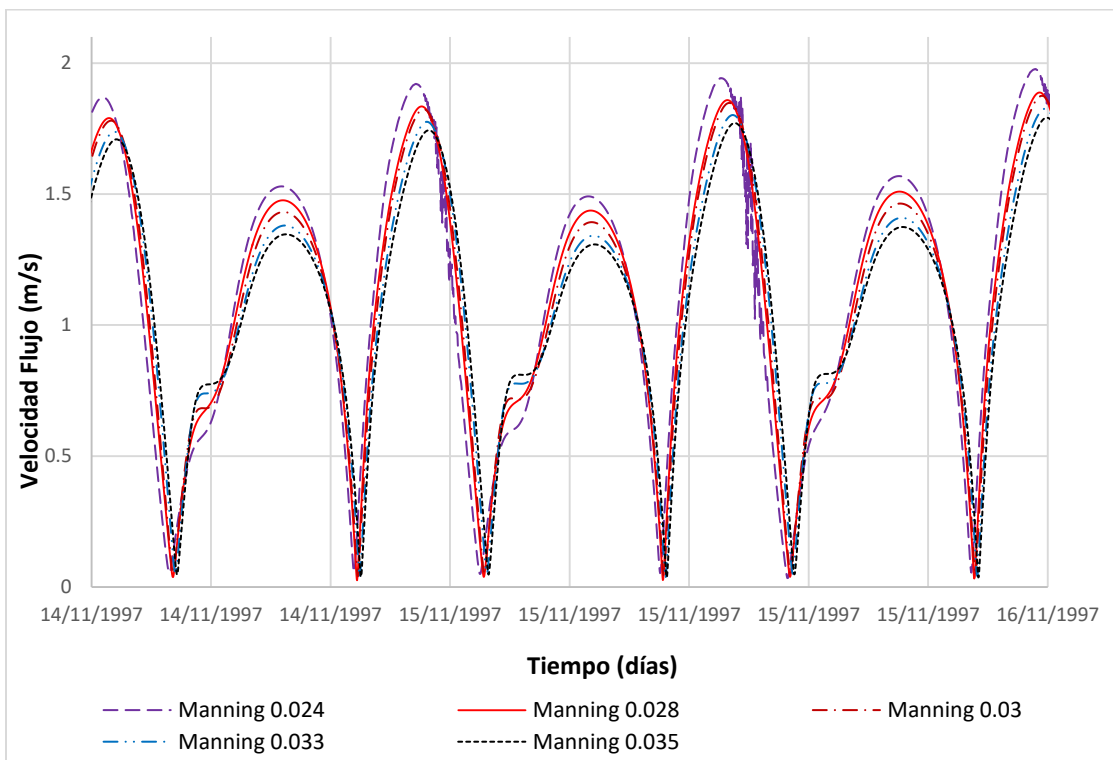
Grafica 14. Análisis de sensibilidad para el coeficiente de rugosidad: Niveles de marea en el sitio de control La Bocana



Grafica 15. Análisis de sensibilidad para el coeficiente de rugosidad: Velocidad del flujo en el sitio de control Aguadulce



Grafica 16. Análisis de sensibilidad para el coeficiente de rugosidad: Velocidad del flujo en el sitio de control Muelle



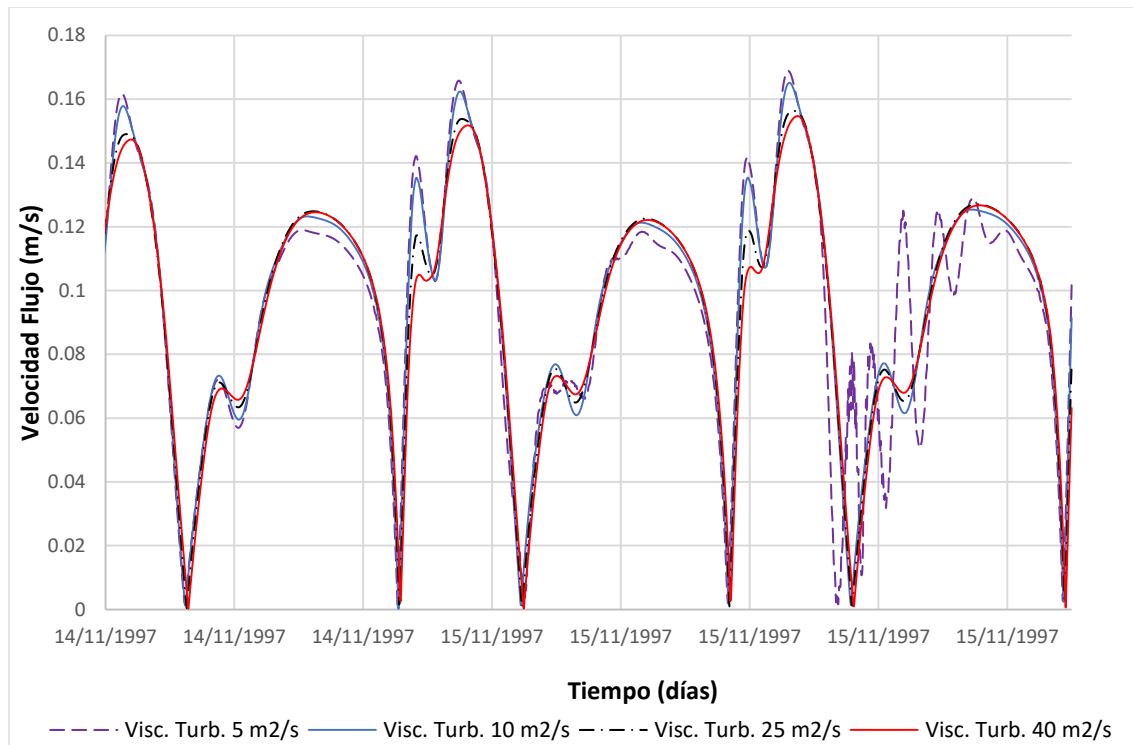
Grafica 17. Análisis de sensibilidad para el coeficiente de rugosidad: Velocidad del flujo en el sitio de control La Bocana

Según los resultados, la influencia de la variación del parámetro rugosidad es insignificante en los niveles de marea. La influencia sobre las velocidades del flujo también es moderada; en los períodos de corrientes máximas puede observarse algunas diferencias (alrededor de 0.2 m/s es la máxima diferencia absoluta entre las velocidades para las rugosidades de Manning de 0.024 y 0.035). Finalmente, es posible concluir que el coeficiente de rugosidad de Manning no es un parámetro sensible en el cálculo de los niveles de marea en toda la bahía y es moderadamente sensible en la determinación de las velocidades de las corrientes de marea.

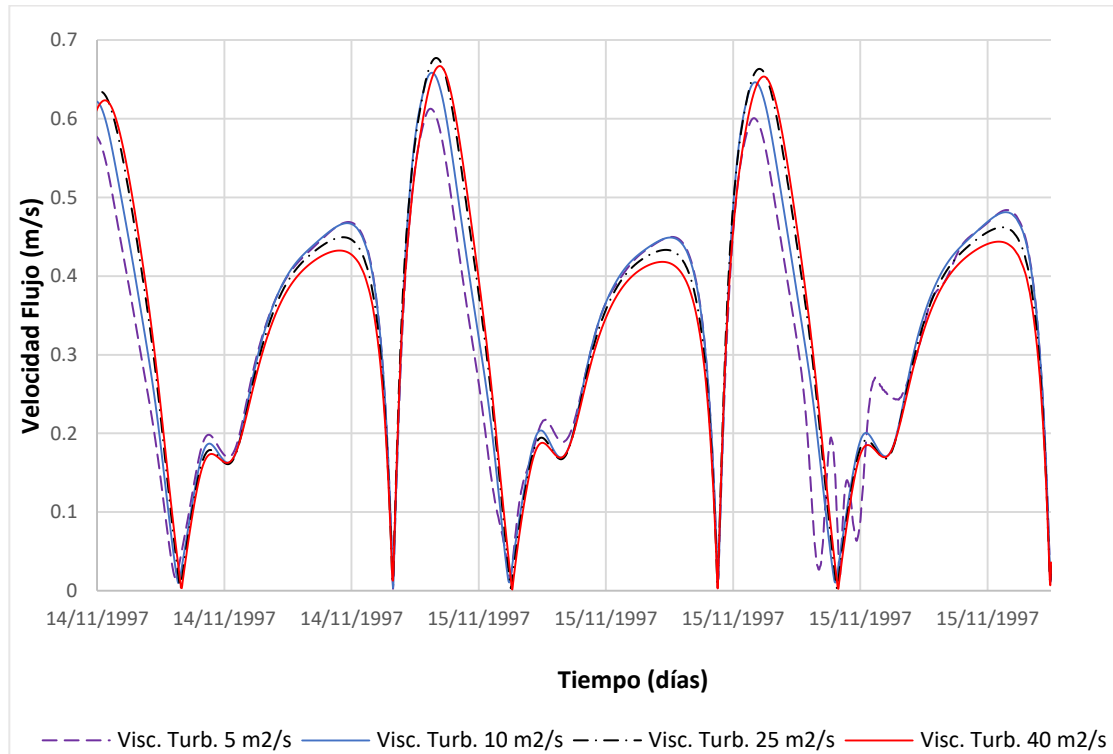
(ii) *Análisis de la viscosidad turbulenta*

En las guías de implementación del modelo MOHID se recomienda emplear la relación 1:10 entre el valor de la viscosidad turbulenta y el tamaño de la celda de la malla; es decir, adoptar una viscosidad turbulenta de 5 m²/s para el presente estudio. Para determinar la influencia de la viscosidad turbulenta en el comportamiento hidrodinámico de la bahía de Buenaventura se efectuaron simulaciones variando dicho parámetro entre 5 y 40 m²/s. En torno a los resultados obtenidos en las simulaciones se puede observar en las Gráficas 18 a 20 un comportamiento inversamente proporcional entre las variables velocidad del flujo y viscosidad turbulenta, con tendencias a presentarse una disminución en la velocidad del flujo a medida que aumenta el valor de la viscosidad; a partir de estos resultados se puede concluir que la viscosidad turbulenta es un parámetro poco sensible en la determinación de las velocidades de las corrientes mareales; además, se observó que a valores bajos de viscosidad turbulenta el modelo presenta mayor inestabilidad en aguas poco profundas. En las Gráficas 21 a 23 se presenta la variación de los niveles de marea para los diferentes valores de viscosidad turbulenta, de los cuales se puede afirmar que la viscosidad turbulenta no es un parámetro sensible para determinar los niveles de marea.

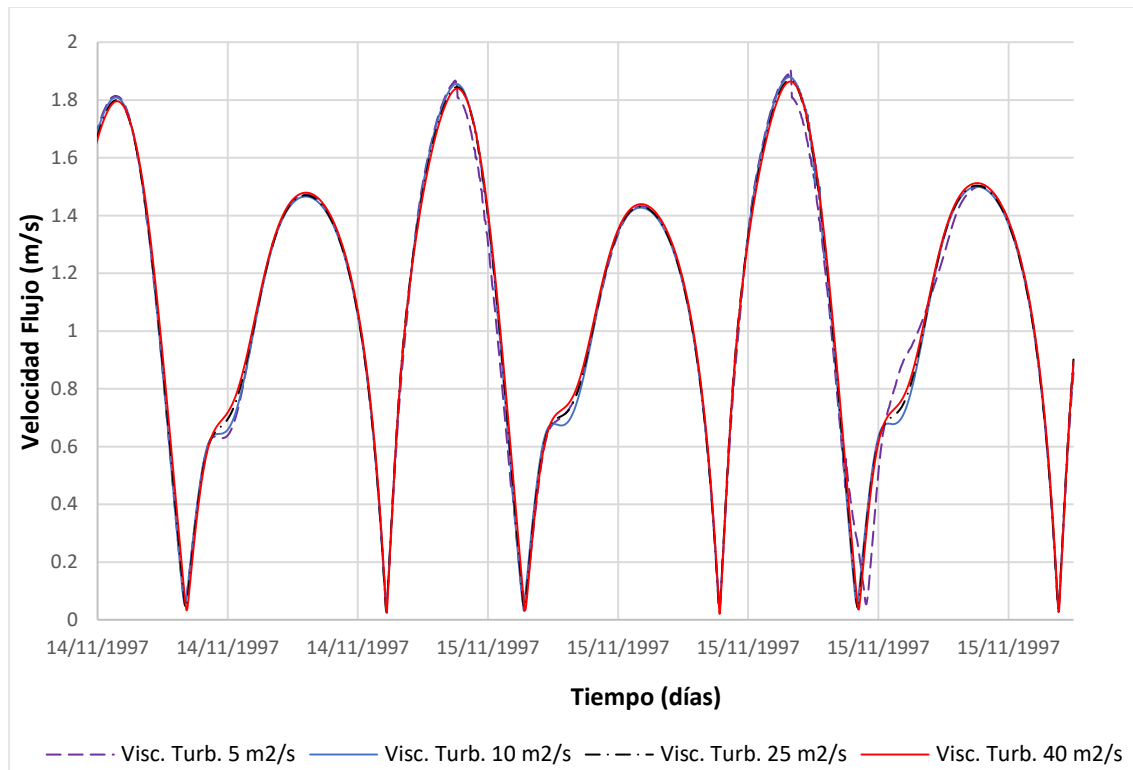
Según los resultados, en los períodos de niveles de marea más bajos (final del reflujo e inicios del flujo) puede observarse algunas variaciones en las velocidades del flujo (alrededor de 0.08 m/s es la diferencia máxima absoluta entre las velocidades para la viscosidad turbulenta de 5 m²/s y 40 m²/s). No obstante, en el punto de control La Bocana las variaciones en la velocidad son insignificantes.



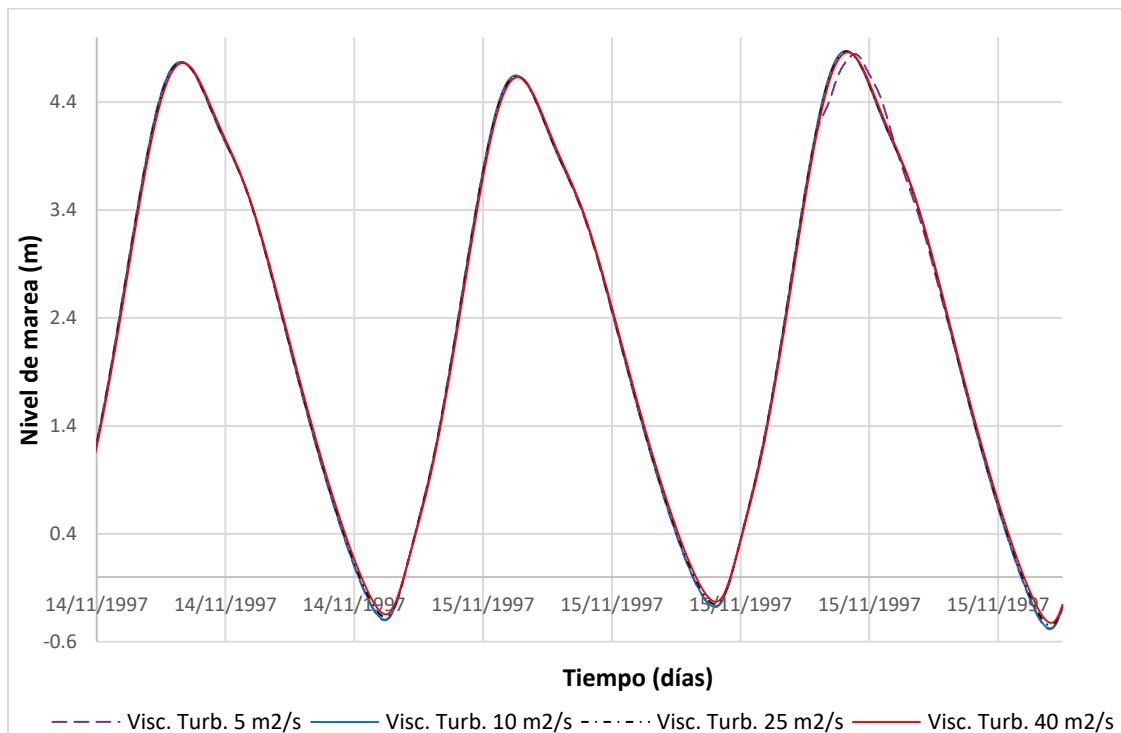
Grafica 18. Análisis de sensibilidad para la viscosidad turbulenta: Velocidad del flujo en el sitio de control Aguadulce



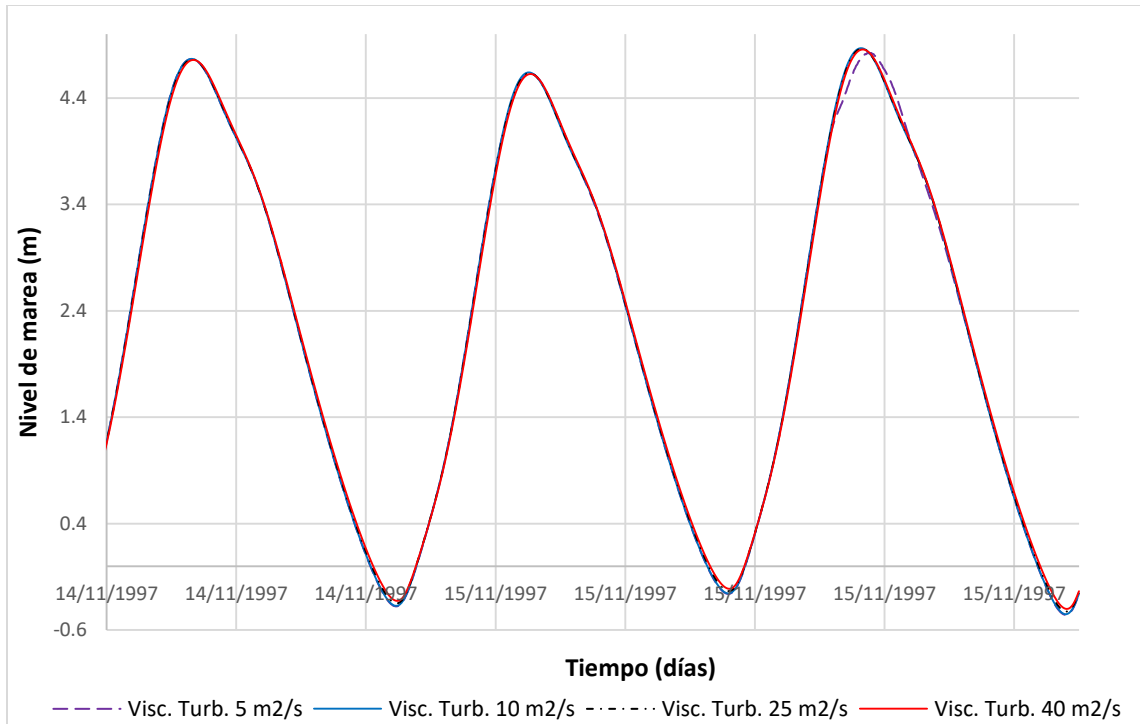
Grafica 19. Análisis de sensibilidad para la viscosidad turbulenta: Velocidad del flujo en el sitio de control Muelle



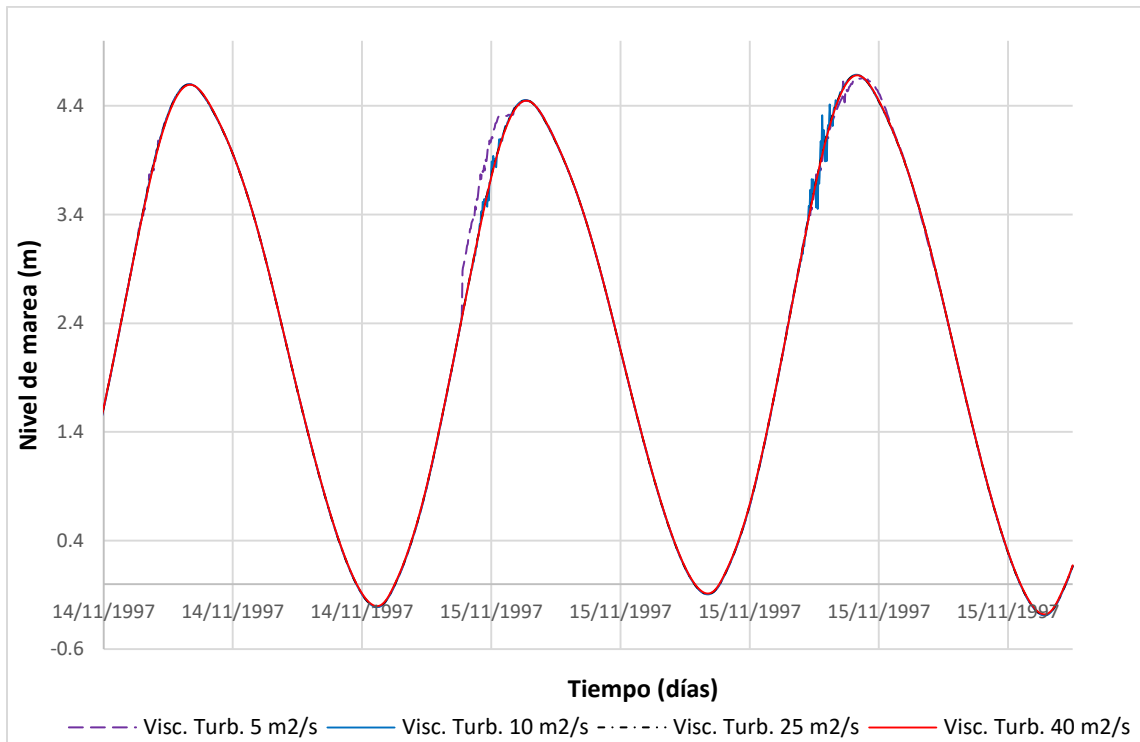
Grafica 20. Análisis de sensibilidad para la viscosidad turbulenta: Velocidad del flujo en el sitio de control La Bocana



Grafica 21. Análisis de sensibilidad para la viscosidad turbulenta: Niveles de marea en el sitio de control Aguadulce



Grafica 22. Análisis de sensibilidad para la viscosidad turbulenta: Niveles de marea en el sitio de control Muelle



Grafica 23. Análisis de sensibilidad para la viscosidad turbulenta. Niveles de marea en el sitio de control La Bocana

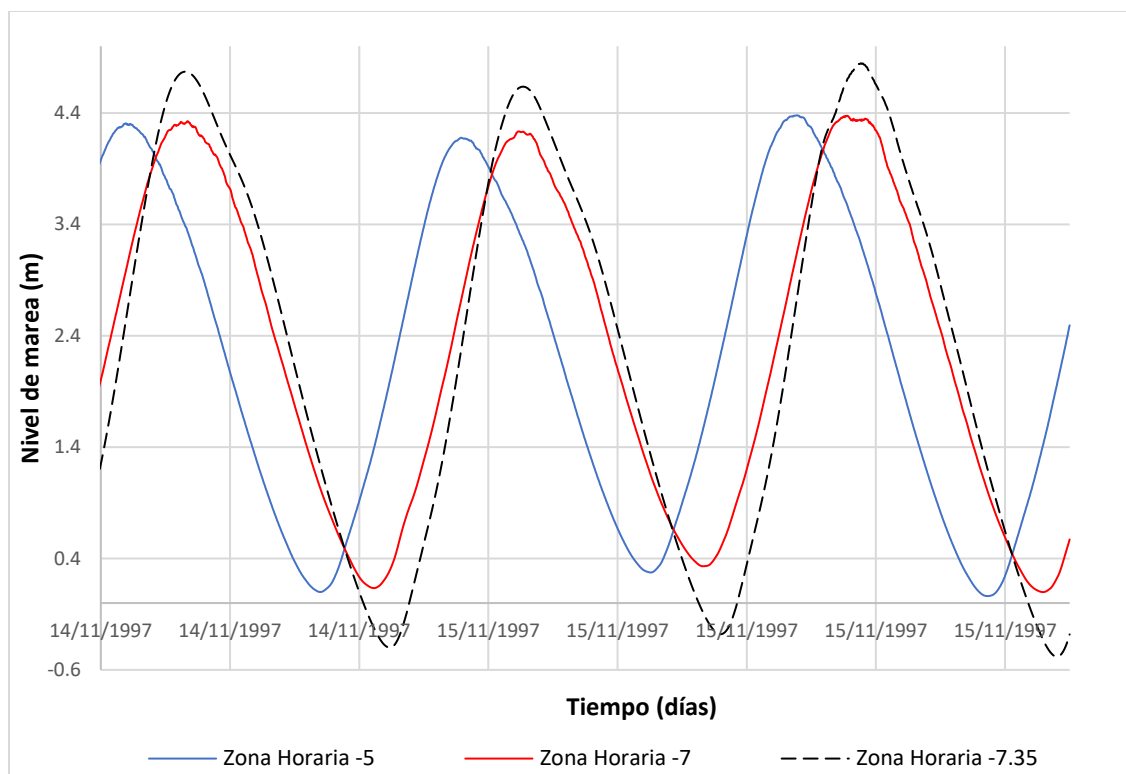
(iii) *Análisis de los armónicos de marea astronómica*

La marea astronómica se ingresa como condición de borde en la frontera abierta de mar en el modelo, imponiendo las fases y las amplitudes de las diferentes componentes de la marea obtenidas mediante el modelo global FES2004, de acuerdo con la zona horaria que se especifique. Con el fin de determinar la influencia de las condiciones hidrodinámicas impuestas en la frontera de mar (correspondiente a la marea astronómica, como se indicó previamente) en el comportamiento hidrodinámico de la bahía se efectuaron tres simulaciones diferentes imponiendo en la frontera las mareas correspondientes a las zonas horarias -5, -7 y -7.35. En la Tabla 16 se presentan las componentes armónicas obtenidas para la zona horaria -5, -7 y -7.35; es posible observar variaciones muy pequeñas en las amplitudes y las fases de los diferentes componentes armónicos.

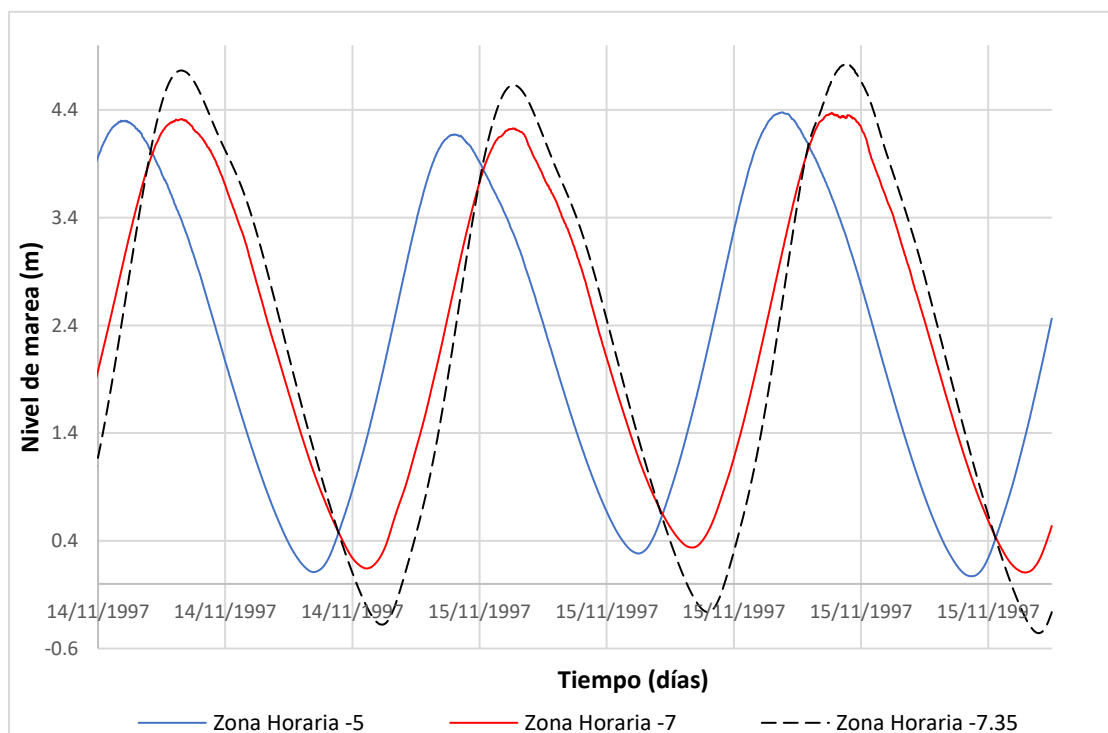
Tabla 16. Amplitudes y fases de los componentes armónicos de marea para tres zonas horarias

Componente	Zona Horaria -5		Zona Horaria -7		Zona Horaria -7.35	
	Amplitud (m)	Fase (°)	Amplitud (m)	Fase (°)	Amplitud (m)	Fase (°)
M2	1.2084	-114.9400	1.2085	-114.9410	1.2086	-114.9410
S2	0.3259	-60.4106	0.3260	-60.4117	0.3260	-60.4099
K1	0.1113	55.3594	0.1113	55.3538	0.1113	55.3521
K2	0.0805	-66.8956	0.0805	-66.8963	0.0805	-66.8945
N2	0.2591	-148.1920	0.2591	-148.1940	0.2591	-148.1940
O1	0.0293	60.6469	0.0293	60.6341	0.0293	60.6285
Q1	0.0366	55.5483	0.0366	55.5420	0.0366	55.5400
P1	0.0041	148.7340	0.0041	148.7650	0.0041	148.7800
M4	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

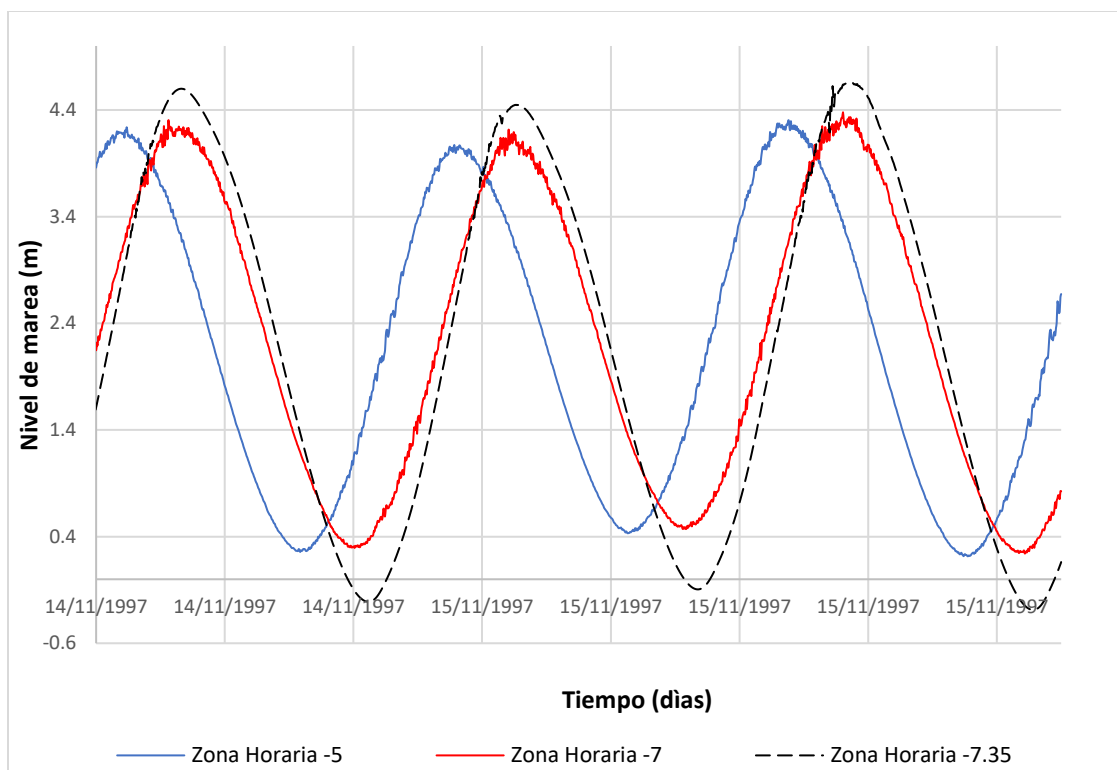
En las Figuras 24 a 29 se presentan los niveles de marea y las velocidades de las corrientes mareales obtenidas en los tres sitios de control establecidos (Aguadulce, Muelle y La Bocana). Se puede apreciar diferencias, más o menos importantes, tanto en los niveles de marea como en las velocidades de las corrientes mareales. Estos resultados permiten afirmar que la hidrodinámica al interior de la bahía de Buenaventura es fuertemente influenciada por las condiciones mareales impuestas en la frontera de mar. Por ello, las condiciones mareales en esta frontera deben definirse con precisión; por lo tanto, es recomendable para futuros estudios instalar mareógrafos en dicha sección localizada afuera de la bahía, lo cual permitirá disponer de información de campo, disminuyendo así la incertidumbre y los errores en los resultados de las modelaciones que se realicen.



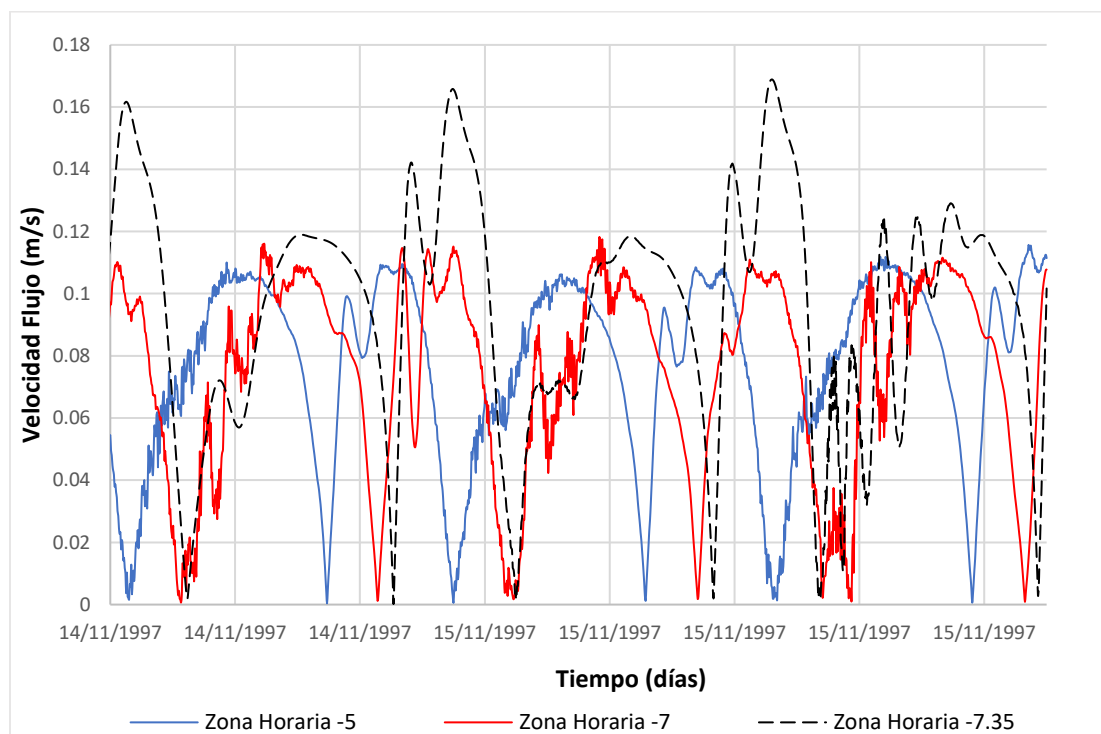
Grafica 24. *Análisis de sensibilidad para los armónicos de marea: Niveles de marea en el sitio de control Aguadulce*



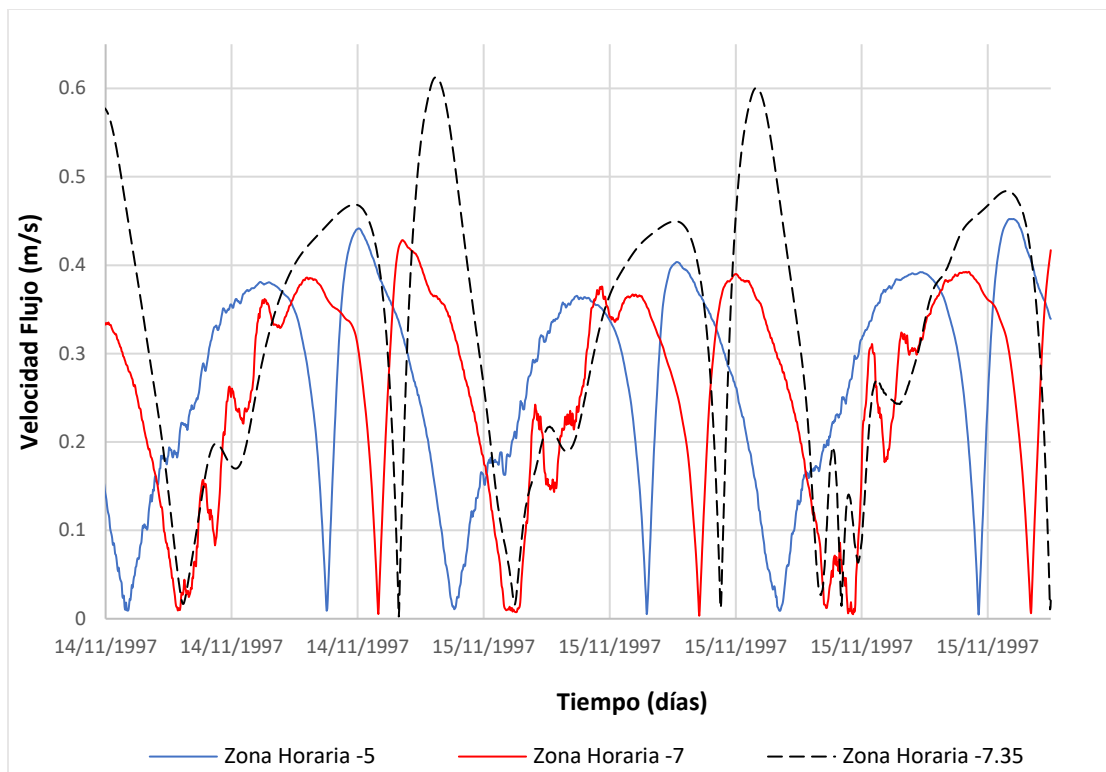
Grafica 25. *Análisis de sensibilidad para los armónicos de marea: Niveles de marea en el sitio de control Muelle*



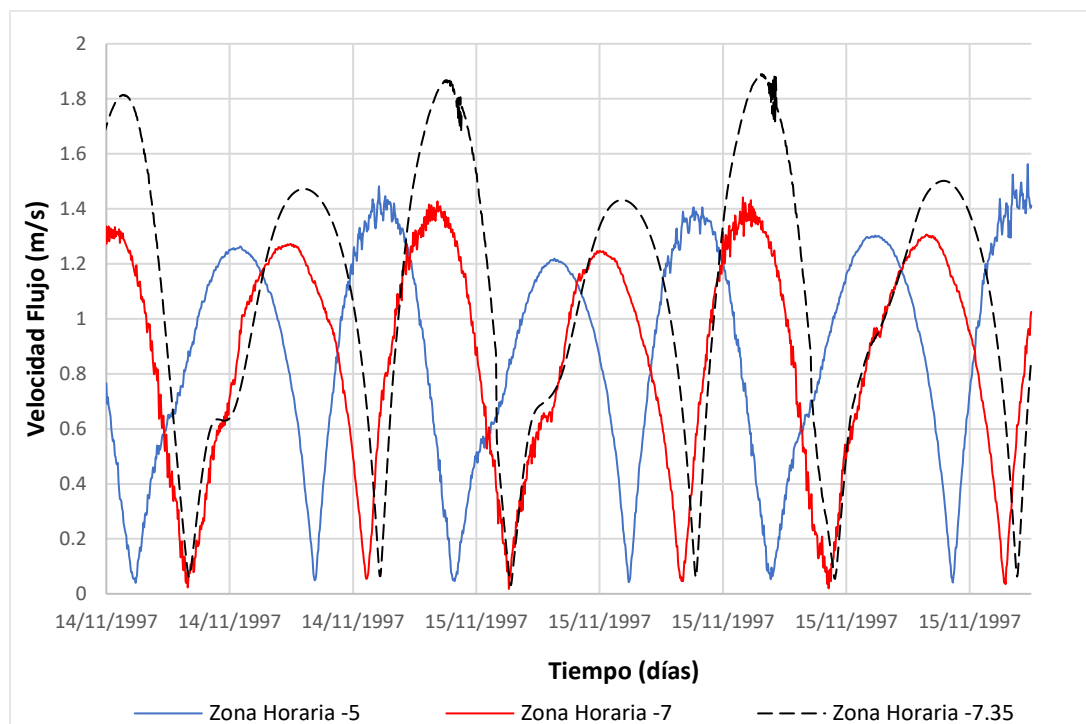
Grafica 26. Análisis de sensibilidad para los armónicos de marea: Niveles de marea en el sitio de control La Bocana



Grafica 27. Análisis de sensibilidad para los armónicos de marea: Velocidad del flujo en el sitio de control Aguadulce



Grafica 28. Análisis de sensibilidad para los armónicos de marea: Velocidad del flujo en el sitio de control Muelle



Grafica 29. Análisis de sensibilidad para los armónicos de marea: Velocidad del flujo en el sitio de control La Bocana

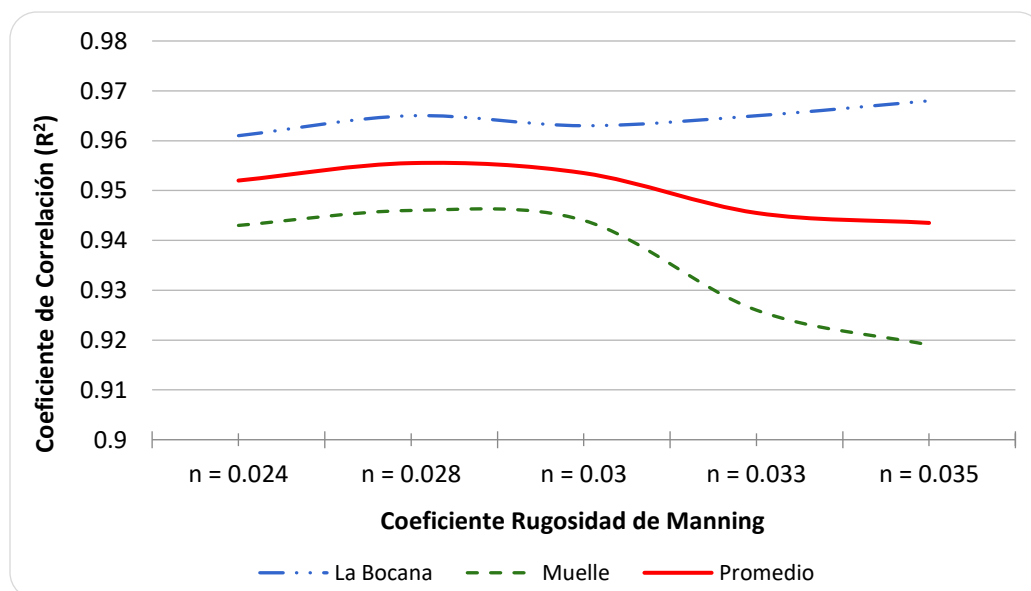
8.6 Calibración del modelo

Para efectos de calibración del modelo hidrodinámico de la bahía de Buenaventura se ajustaron gradualmente el coeficiente de rugosidad de Manning, la viscosidad turbulenta y los componentes armónicos de la marea en la frontera abierta de mar; también se revisaron y ajustaron, cuando se encontró necesario, los niveles batimétricos en los sectores próximos a la frontera de mar, ya que el modelo generaba inestabilidades numéricas repetidamente en esos sectores. La calibración del modelo se realizó con base en la información de series de tiempo de las mareas medidas en noviembre de 1997 por la Universidad del Valle y el Laboratorio de Proyectos Hidráulicos del Pacífico.

Para establecer el coeficiente de rugosidad de Manning se realizaron diferentes simulaciones adoptando valores de 0.024, 0.028, 0.030, 0.033 y 0.035 $\text{s/m}^{1/3}$. Para cada simulación se obtuvo el coeficiente de determinación, R^2 , al correlacionar los niveles de marea medidos y calculados en los sitios de control ubicados en el Muelle (Isla Cangrejo) y La Bocana. En la Tabla 17 y en la Gráfica 30 se presentan los resultados obtenidos del coeficiente R^2 en las estaciones de control, así como los valores promedio. El máximo coeficiente de determinación se obtuvo para un factor de Manning de 0.028 $\text{s/m}^{1/3}$.

Tabla 17. Valores del coeficiente de correlación R^2 para diferentes coeficientes de rugosidad de Manning

Estación	n = 0.024	n = 0.028	n = 0.03	n = 0.033	n = 0.035
	R^2	R^2	R^2	R^2	R^2
La Bocana	0.961	0.965	0.963	0.965	0.968
Muelle	0.943	0.946	0.944	0.926	0.919
Promedio	0.952	0.956	0.954	0.946	0.944



Grafica 30. Valores del coeficiente de correlación R^2 en función del coeficiente de rugosidad de Manning

En consecuencia, este coeficiente de rugosidad de Manning de $0.028 \text{ s/m}^{1/3}$ fue seleccionado por arrojar la mayor correlación entre los niveles de marea registrados en campo y los niveles obtenidos mediante la simulación numérica.

Con respecto a la viscosidad turbulenta se realizaron diferentes simulaciones adoptando valores de 1, 5, 10 y $40 \text{ m}^2/\text{s}$. Finalmente se adoptó una viscosidad turbulenta de $1 \text{ m}^2/\text{s}$ por cuanto arrojó los mejores resultados del patrón de flujo en toda la bahía.

Con frecuencia se observaban algunas fluctuaciones en los niveles de marea y en las velocidades de las corrientes mareales, principalmente en zonas de aguas poco profundas y durante la primera parte de la simulación; sin embargo, después de un lapso relativamente corto, estas fluctuaciones disminuían hasta desaparecer completamente. Este período inicial en el cual se presenta inestabilidad numérica es frecuente en los modelos y cuando las fluctuaciones no son excesivas son disipadas por las fuerzas de fricción. En ocasiones las oscilaciones en los niveles de agua llegaban a ser tan grandes que causaban la interrupción de la simulación. Estos problemas se superaron reduciendo gradualmente el intervalo de tiempo computacional en el modelo.

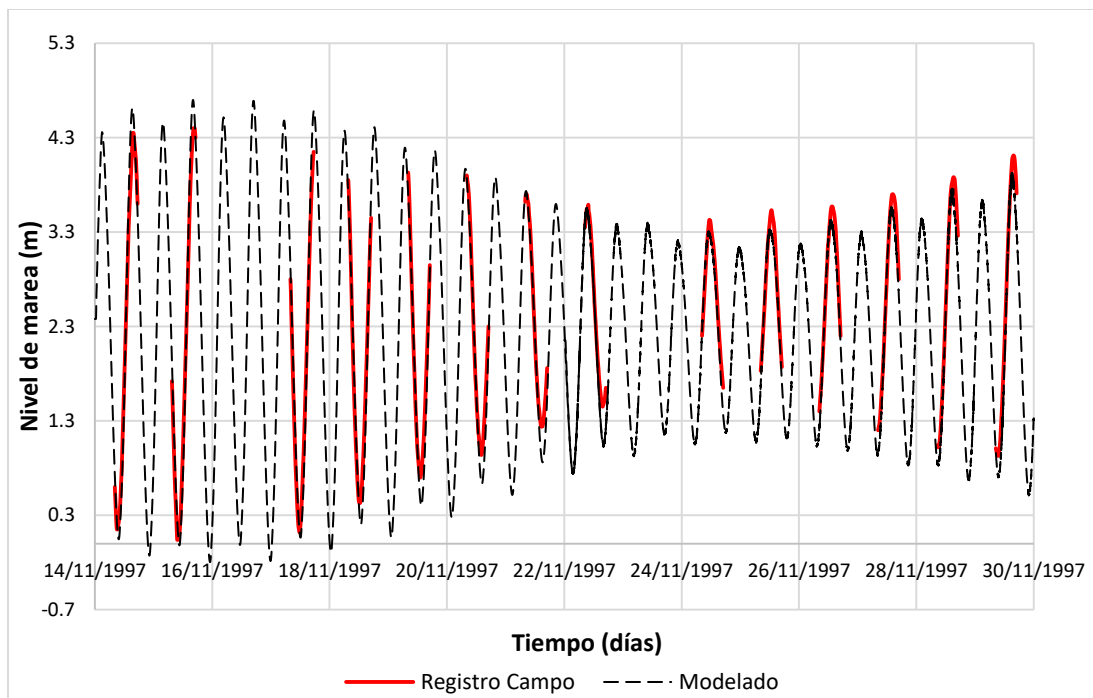
La esquematización inicial de la batimetría debió ser revisada y ajustada en los sectores donde la inestabilidad numérica era recurrente, principalmente a causa de, las irregularidades en la morfología costera, especialmente cerca a la frontera abierta de mar.

Para establecer en la frontera abierta de mar las amplitudes y las fases de los principales componentes de la marea en la bahía se ingresó al modelo el forzante astronómico a partir de los valores determinados en el modelo FES2004, los cuales fueron comparados, ajustados y aproximados a los componentes armónicos de marea astronómica obtenidas del mareógrafo en el terminal de Buenaventura, obteniéndose finalmente el ajuste de los valores de amplitudes y fases presentados en la Tabla 18.

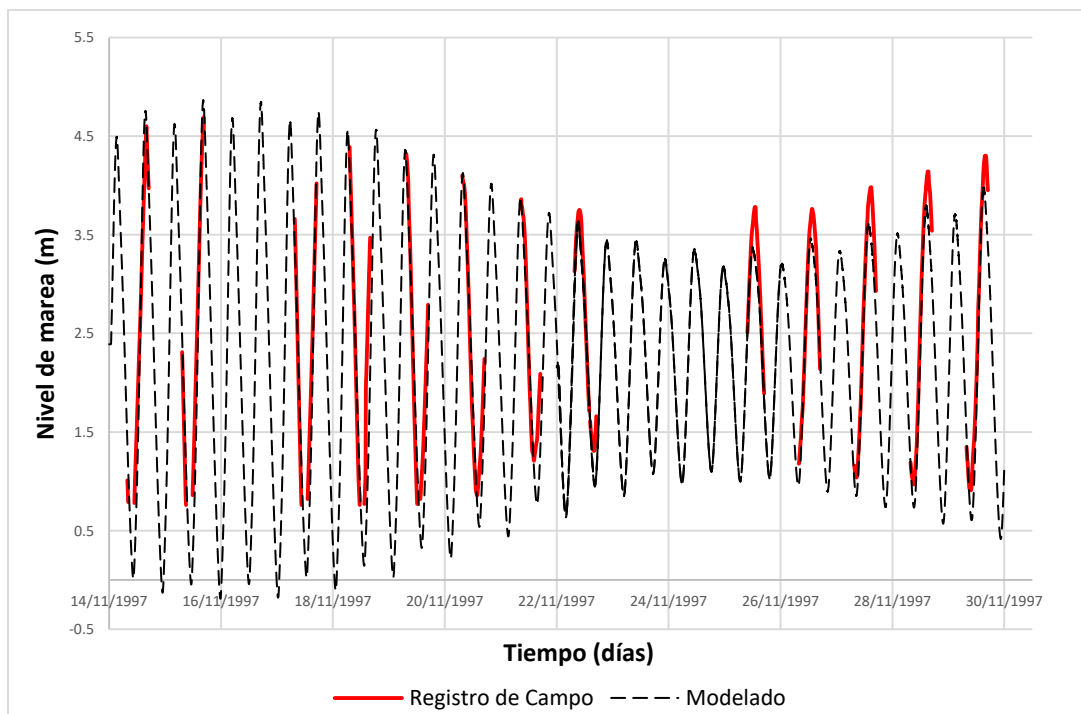
Tabla 18. Componentes armónicas de marea astronómica de mejor ajuste en la calibración

Componente	Amplitud (m)	Fase (°)
M2	1.5185	-114.9520
S2	0.4023	-60.4288
K1	0.0981	55.3441
K2	0.1142	-66.9127
N2	0.3367	-148.2100
O1	0.0239	60.6242
Q1	0.0071	55.5307
P1	0.0322	148.7770
M4	0.0630	0.0000

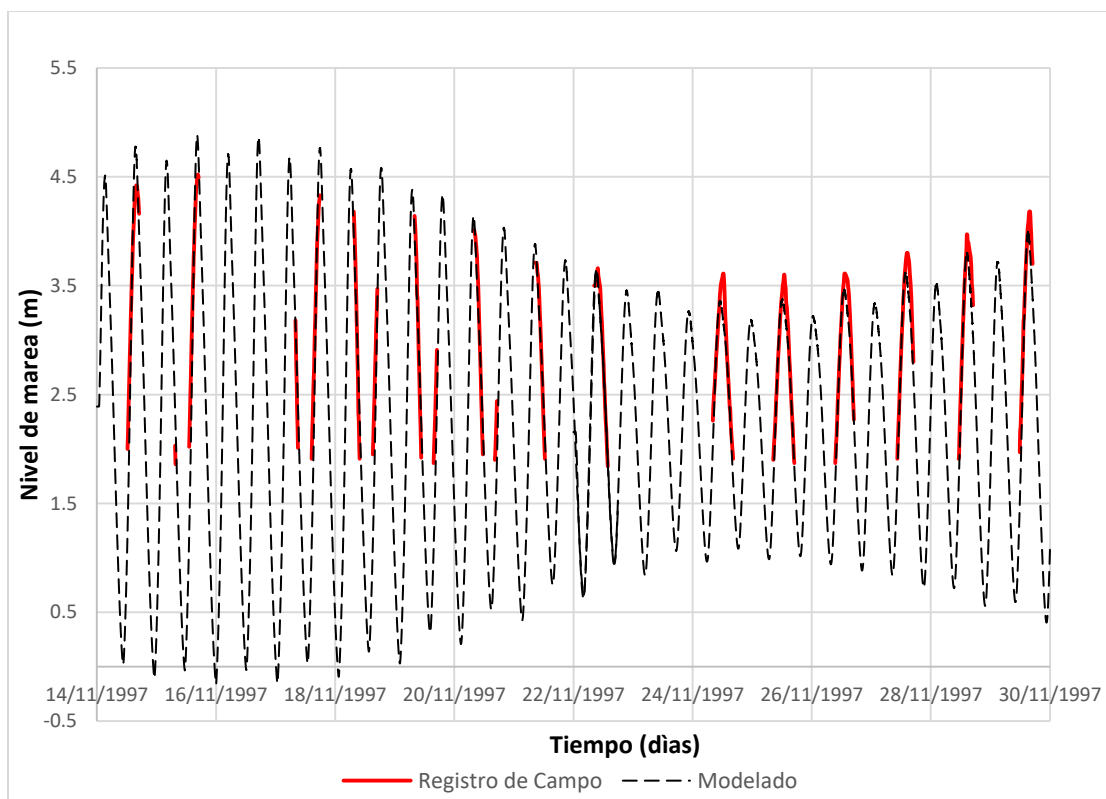
Posteriormente, se confrontaron los resultados obtenidos del modelo MOHID con la información de las series de tiempo de los niveles de marea registrados en las estaciones La Bocana, Isla Cangrejo, Aguadulce, Delta Dagua y Muelle, como puede observarse respectivamente en las Gráficas 31 a 35.



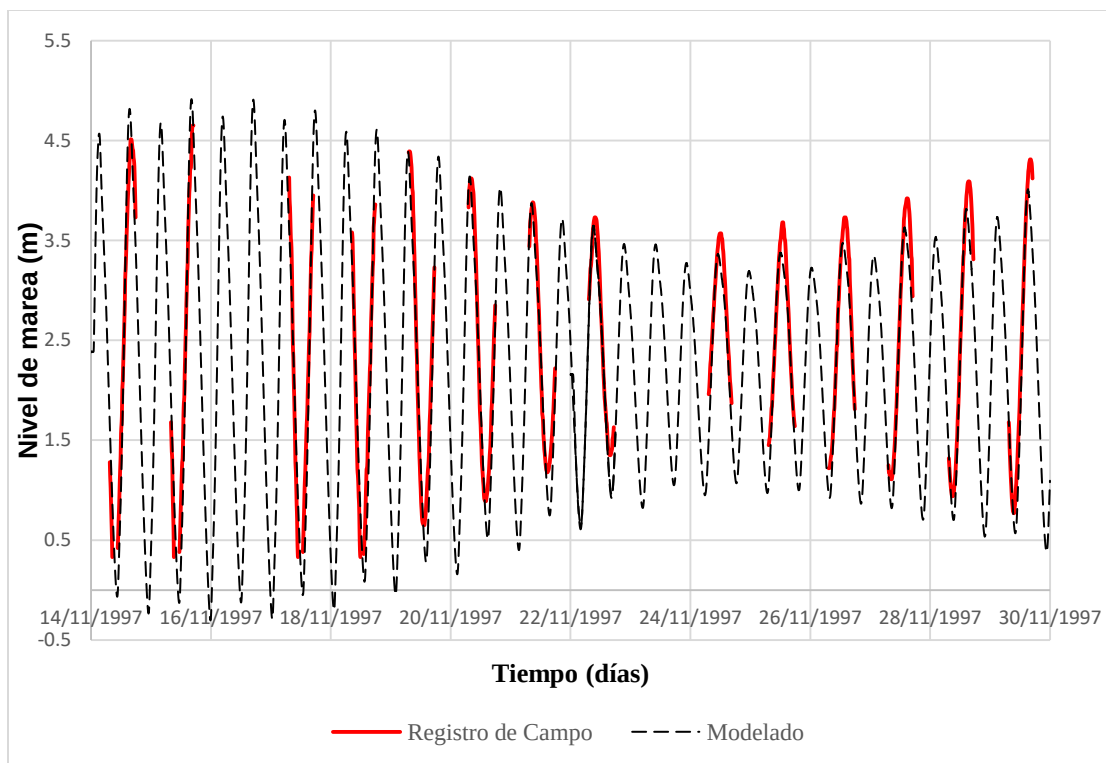
Grafica 31. Calibración del modelo hidrodinámico: Niveles de marea en el sitio de control La Bocana



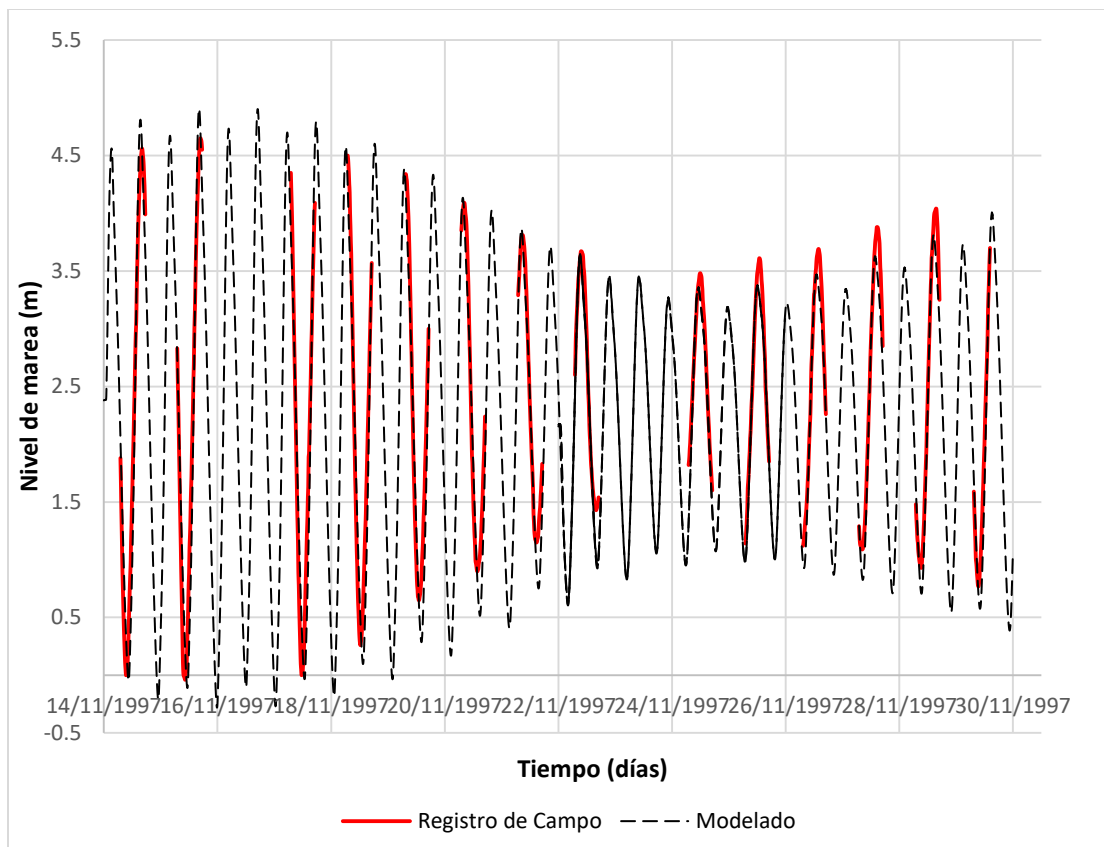
Grafica 32. Calibración del modelo hidrodinámico: Niveles de marea en el sitio de control Isla Cangrejo



Grafica 33. Calibración del modelo hidrodinámico: Niveles de marea en el sitio de control Delta Dagua



Grafica 34. Calibración del modelo hidrodinámico: Niveles de marea en el sitio de control Aguadulce



Grafica 35. Calibración del modelo hidrodinámico: Niveles de marea en el sitio de control Muelle

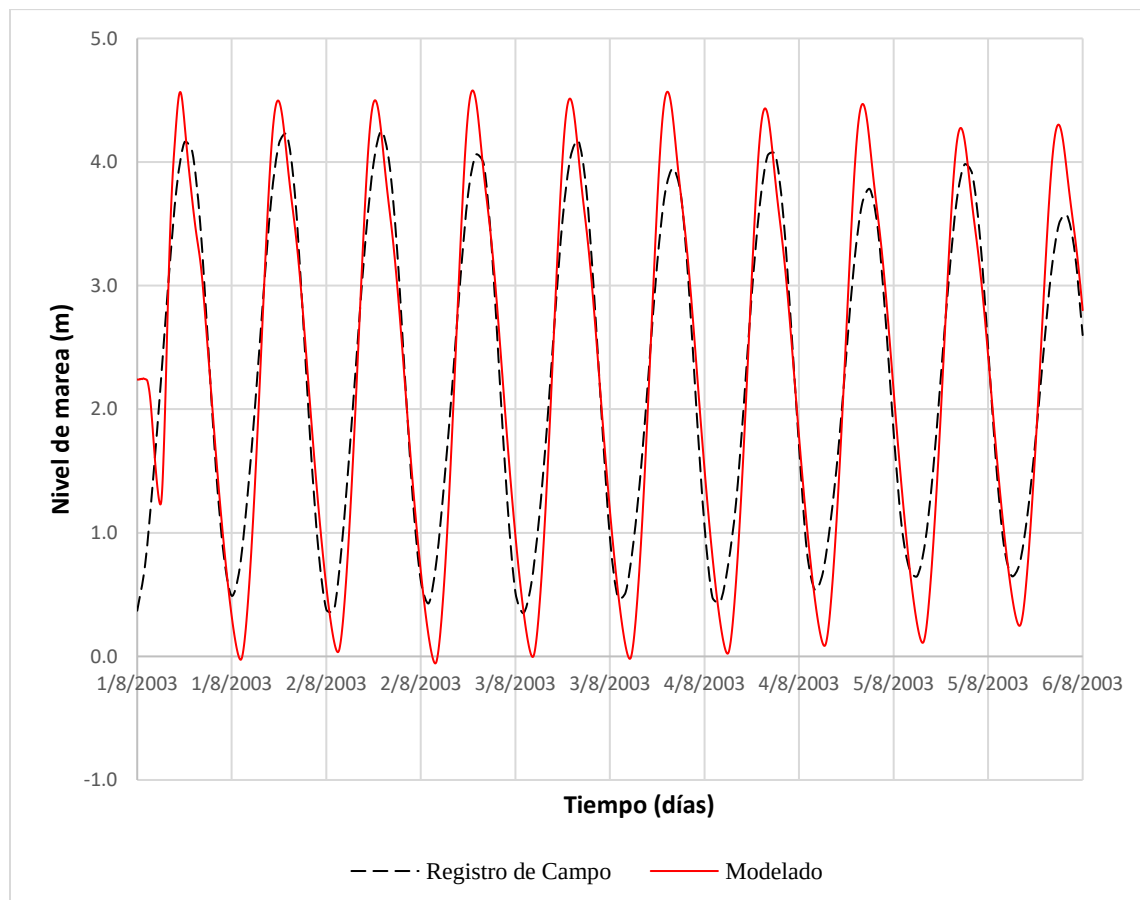
Al analizar los resultados indicados en las Gráficas 31 a 35 se puede observar que el modelo representa aceptablemente la hidrodinámica de la bahía, por cuanto simula dos pleamares y dos bajamares en un mismo día, con un período aproximado de 12 horas 25 minutos; y los niveles del agua simulados se aproximan a los registros de campo, tanto en la amplitud como en la fase. La diferencia máxima observada entre los niveles de marea medidos y modelados fue de cerca de 0.30 m durante la bajamar del día 22/11/1997, un valor bastante aceptable al considerar que el rango medio de la marea es de 3.11 m y que las profundidades de agua en la bahía pueden estar entre los 10 m y los 20 m. Además, es posible apreciar después del 25/11/1997 los niveles de marea simulados presentaron un desfase cercano a los 30 minutos.

8.7 Verificación del modelo

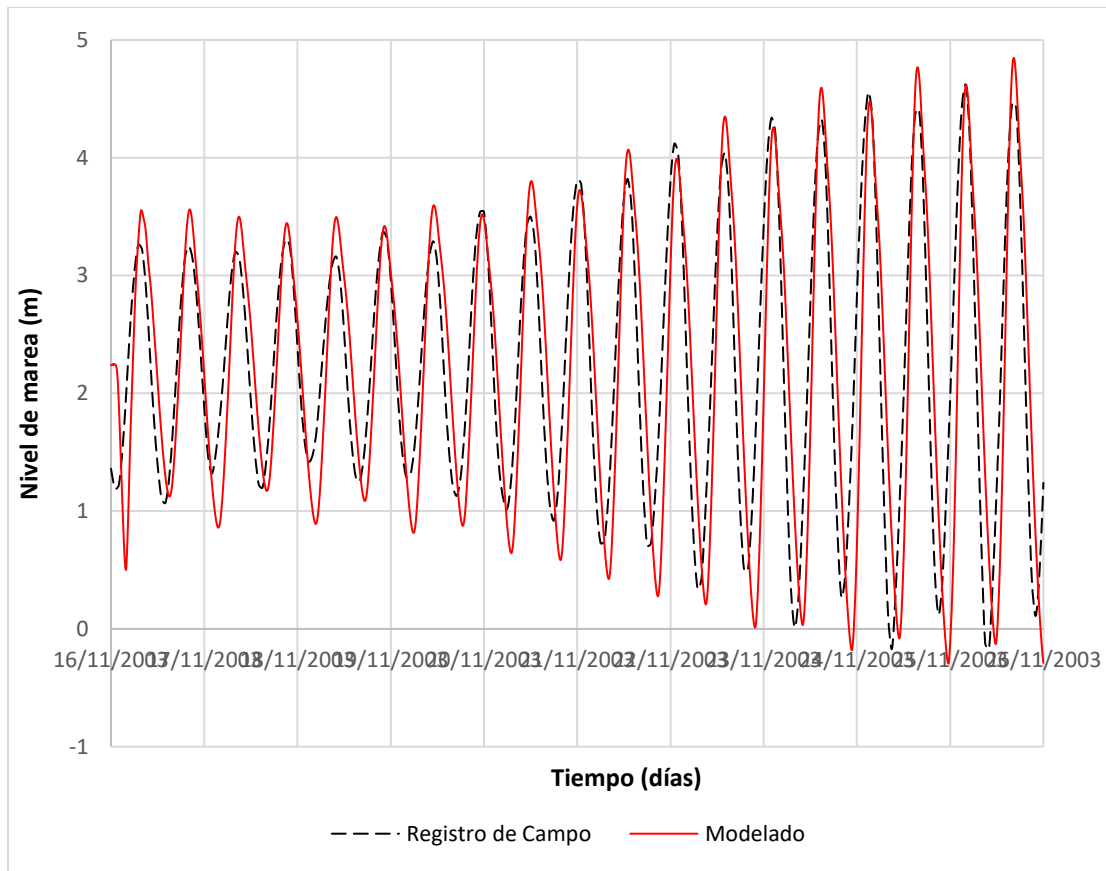
Con el proceso de verificación se busca determinar la precisión en la representación de la realidad (mediciones de campo) obtenida con el modelo y de esta forma tener idea de qué tan representativos son los resultados del modelo con el fin de ser utilizados para predecir una determinada situación (Trucano *et al.*, 2006; citado por Montoya, 2010). La validación se realizó de acuerdo a la disponibilidad de los datos de la campaña de campo llevada a cabo en el año 2003;

se hicieron comparaciones entre los niveles de marea medidos en el campo con los obtenidos en las simulaciones, para un período diferente al empleado en el proceso de calibración.

La validación se realizó a partir de datos de campo continuos obtenidos para condiciones hidráulicas en un período de marea viva comprendido entre 01 y 06 de agosto de 2003 y un período de transición (marea muerta a marea viva) comprendido entre 16 y 26 de noviembre de 2003. En las Gráficas 36 y 37 se muestra el comparativo entre los niveles de marea obtenidos en las simulaciones con los datos existentes para la estación Mareógrafo. Los resultados del modelo se pueden considerar igualmente satisfactorios por su capacidad predictiva. Hay que tener en cuenta que tanto el modelo hidrodinámico utilizado como las mediciones traen consigo errores propios del proceso de modelación y de medición, por lo que no se debe esperar ajustes completamente perfectos, lo que da lugar a la búsqueda de aproximaciones razonables como las obtenidas en estos resultados.



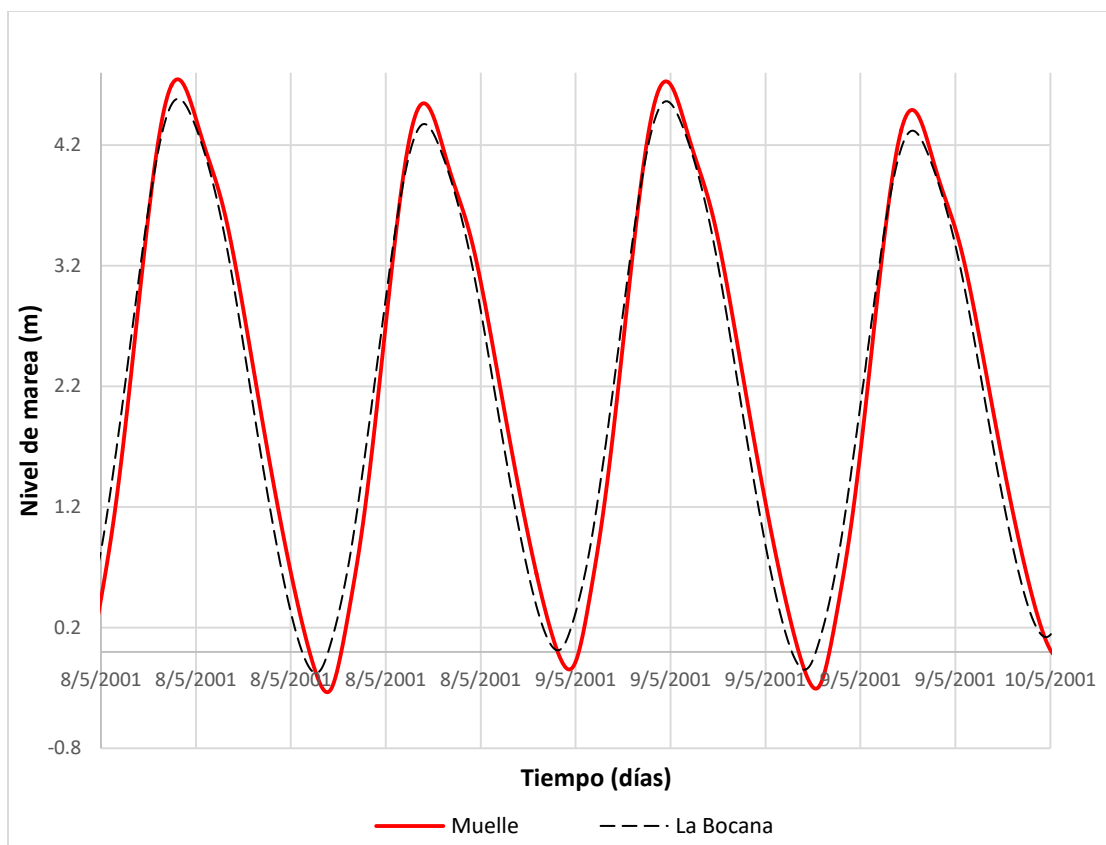
Grafica 36. Verificación del modelo hidrodinámico: Niveles de marea en el sitio de control Mareógrafo (01/08/2003 – 06/08/2003)



Gráfica 37. Verificación del modelo hidrodinámico: Niveles de marea en el sitio de control Mareógrafo (16/11/2003 – 26/11/2003)

8.8 Modelación hidrodinámica

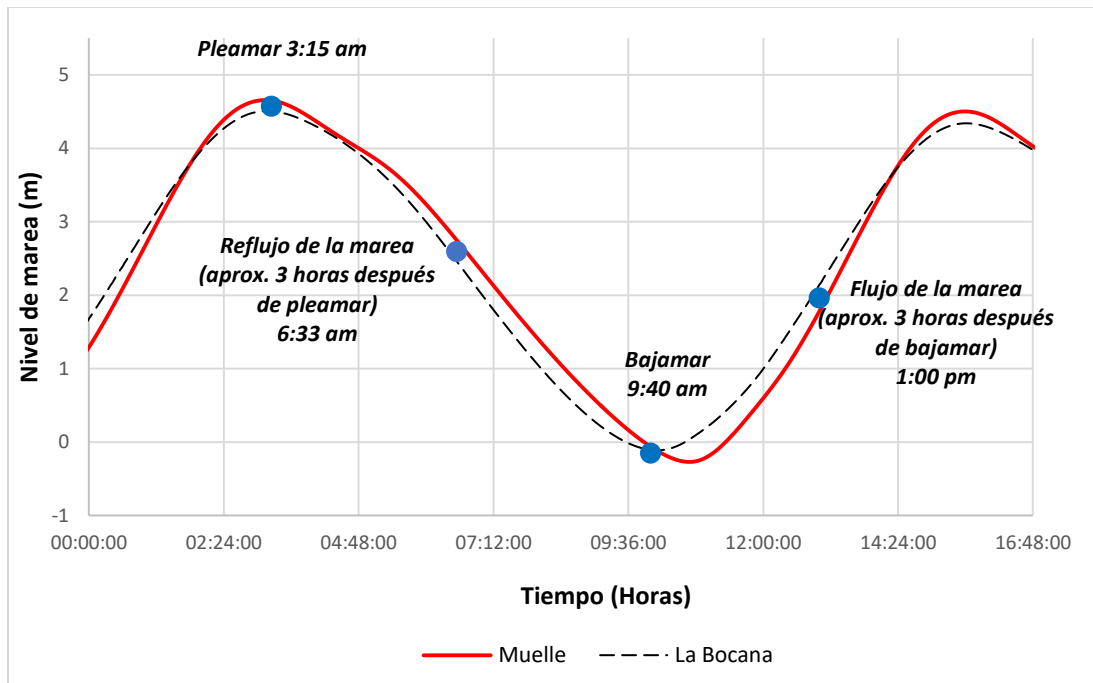
Las diferentes simulaciones mostraron de manera consistente la ligera amplificación de la marea desde la entrada de la bahía (La Bocana) hasta la región alrededor de la isla Cascajal (Muelle). Desde La Bocana hasta la isla Cascajal la amplificación de las mareas es de alrededor del 9.5%, como lo registró la Universidad del Valle en el año 1997. Este comportamiento característico se muestra en la Gráfica 38, logrando apreciarse la variación del nivel del agua en los puntos de control La Bocana y el Muelle. Esta amplificación puede explicarse por la reducción del área hidráulica (efecto de embudo) y la baja resistencia al flujo del lecho marino.



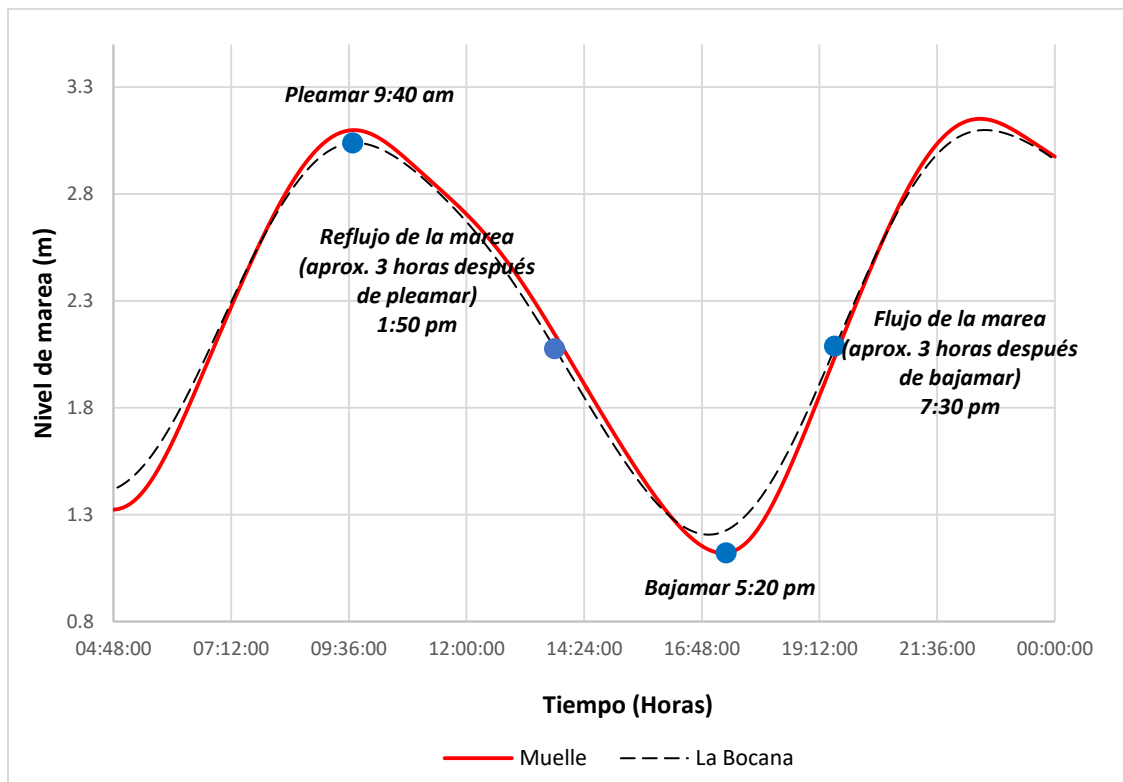
Gráfica 38. Variación del nivel del agua para los puntos de control La Bocana y Muelle para la marea de 09/05/2001

En las Gráficas 39 y 40 se presentan los instantes de un ciclo de marea viva para el día 07 de mayo de 2001 y un ciclo de marea muerta para el día 16 de mayo de 2001, respectivamente. En las Figuras 16 y 17 se observan las velocidades durante la pleamar, el reflujo, la bajamar y el flujo para las respectivas fechas. En estas se observa que las velocidades promedio para el reflujo de la marea (o vaciante) son ligeramente mayores que las velocidades de flujo (o inundación), bien sea para marea viva o para marea muerta; en la zona de La Bocana en la entrada a la bahía de Buenaventura se presenta en marea viva las mayores velocidades con un valor aproximado de 1.9 m/s y las menores velocidades en marea muerta en la zona de Isla Cascajal con un valor aproximado de 0.2.

La aplicación del modelo hidrodinámico permitió ratificar, entre otros aspectos, el patrón de circulación de las corrientes y las velocidades máximas en diferentes sectores: así, por ejemplo, en la zona de La Bocana la velocidad máxima de la corriente mareal es 0.91 m/s y en el muelle del Terminal Marítimo la velocidad máxima es 0.17 m/s. Además, las velocidades cambian de orientación entre bajamar y pleamar, siendo saliente desde La Bocana hacia la frontera durante bajamar, y entrante desde la frontera hacia el interior de la bahía en pleamar, lo cual concuerda con los resultados obtenidos en diferentes estudios (Otero, 2005; Universidad del Valle, 1999; Palacios & Quirós, 2006).



Grafica 39. Diferentes instantes de un ciclo de marea viva (07/05/2001)



Grafica 40. Diferentes instantes de un ciclo de marea muerta (16/05/2001)

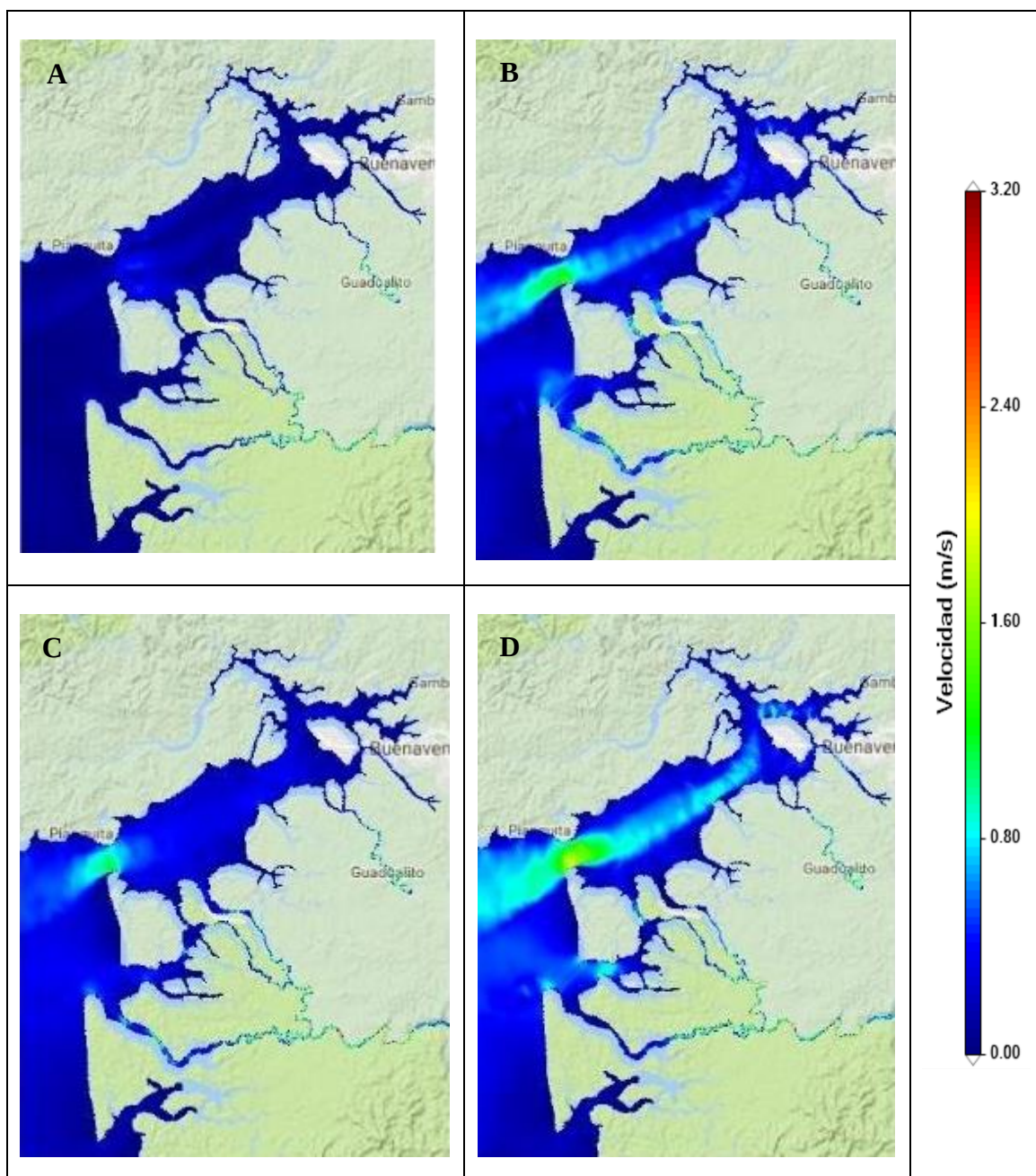


Figura 16. Velocidad de flujo (07/05/2001). A) Instante pleamar 3:15 am. B) Instante reflujo 6:33 am. C) Instante bajamar 9:40 am. D) Instante flujo 1:00 pm

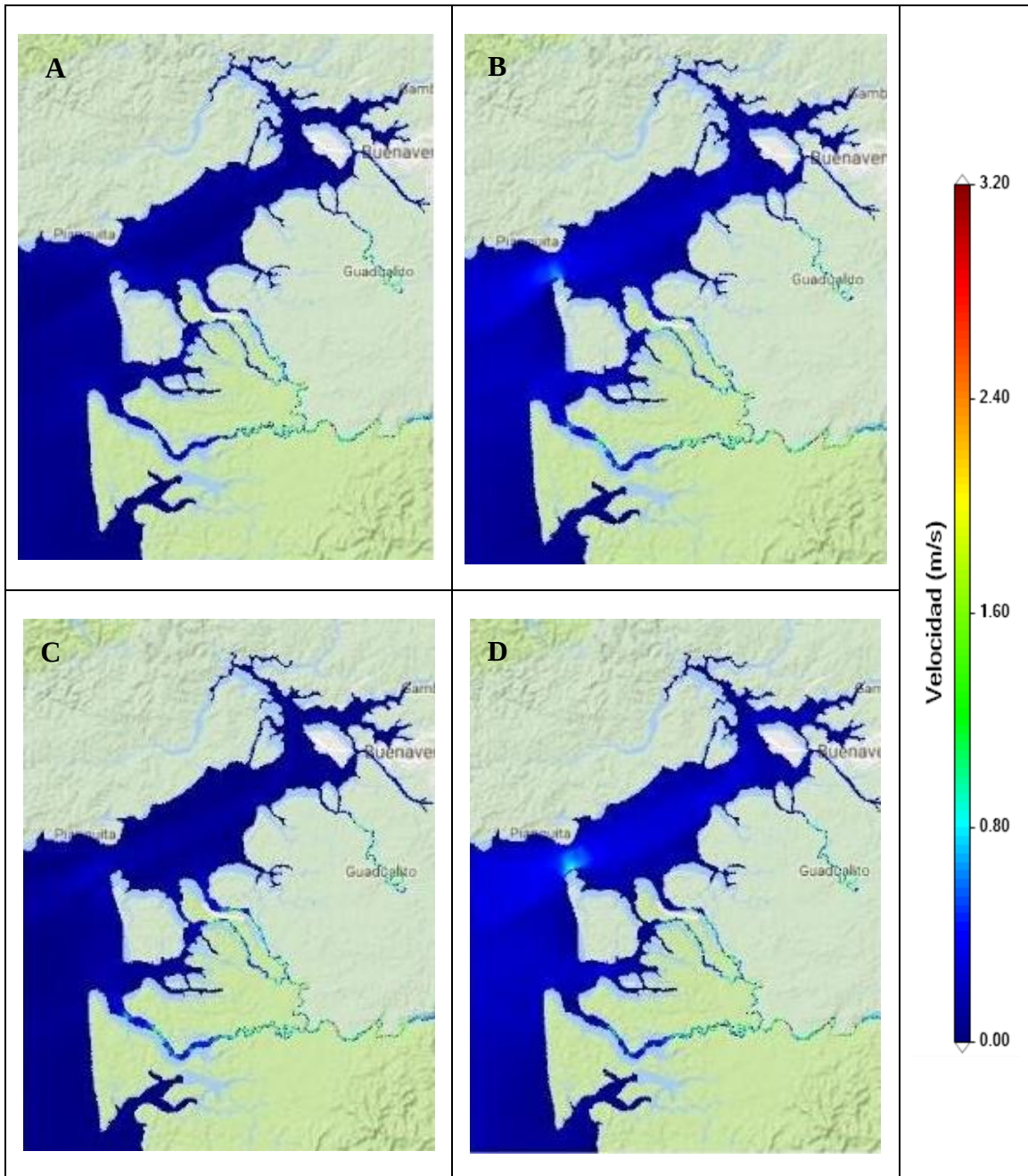


Figura 17. Velocidad de flujo (16/05/2001). A) Instante pleamar 9:40 am. B) Instante reflujo 1:50 pm. C) Instante bajamar 5:20 pm. D) Instante flujo 7:30 pm

9 CORRIENTES RESIDUALES

Con el propósito de estudiar las corrientes residuales al interior de la bahía de Buenaventura se plantearon, simularon y analizaron diferentes escenarios. Las corrientes residuales Lagrangianas consistieron en determinar el desplazamiento neto de trazadores o partículas durante un ciclo cuasiquincental, para lo cual se consideraron nueve sitios diferentes de vertimiento de las partículas trazadores (ver Figura 18 y Tabla 19); y las corrientes residuales Eulerianas se definieron al determinar el promedio de las velocidades mareales en toda la bahía durante un ciclo mareal cuasiquincental.

Fueron considerados diferentes tipos de mareas vivas (máxima, media y mínima) y caudales fluviales mínimos y máximos en los ríos y esteros tributarios. En la Tabla 20 se indican las características de cada uno de los escenarios planteados.

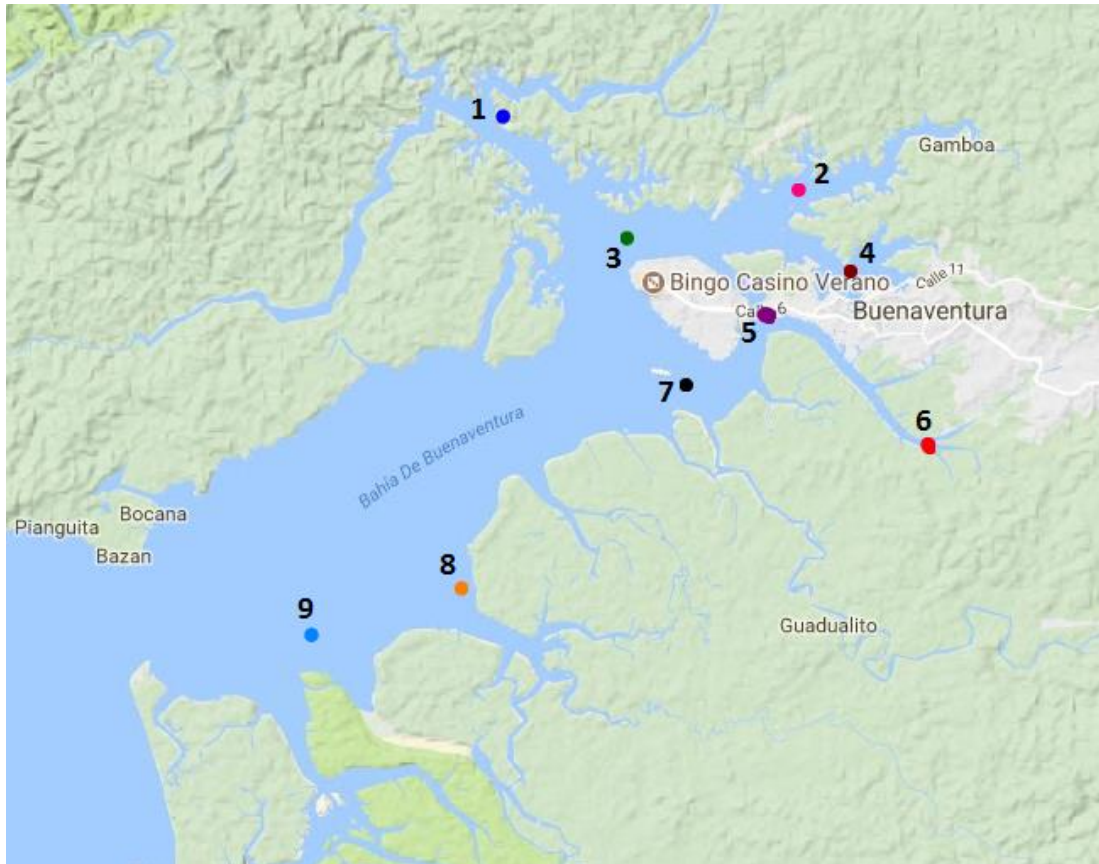


Figura 18. Ubicación esquemática de los sitios de vertimiento de los trazadores al interior de la bahía de Buenaventura

Tabla 19. Ubicación geográfica de los sitios de vertimiento de los trazadores al interior de la bahía de Buenaventura

Punto Vertimiento	Descripción	Coordenadas (WGS 84)	
		Longitud (W)	Latitud (N)
1	Estero Aguadulce	-77°06'23''	3°55'20''
2	Estero Gamboa	-77°02'48''	3°54'27''
3	Muelle	-77°04'52''	3°55'51''
4	Estero Aguacate	-77°02'09''	3°55'27''
5	Desembocadura río San Antonio	-77°03'12''	3°55'56''
6	Parte alta río San Antonio	-77°01'13''	3°55'21''
7	Delta río Dagua	-77°04'09''	3°55'04''
8	Desembocadura río Limones	-77°06'53''	3°55'36''
9	Desembocadura río Anchicayá	-77°08'42''	3°55'03''

Tabla 20. Escenarios de simulación para el estudio de las corrientes residuales en la bahía de Buenaventura

Escenario	Fecha y Hora de Inicio Simulación	Rango Marea Viva	Caudal Afluyente (ríos y esteros)
1	22/05/2002 Hora 12:00:00	Máxima (4.89 m)	Mínimos
2	22/05/2002 Hora 12:00:00		Máximos
3	02/05/2001 Hora 00:00:00	Media (4.23 m)	Mínimos
4	02/05/2001 Hora 00:00:00		Máximos
5	02/01/2000 Hora 14:00:00	Mínima (3.54 m)	Mínimos
6	02/01/2000 Hora 14:00:00		Máximos

9.1 Escenario 1: Marea Viva Máxima (rango = 4.89 m) y Caudales Fluviales Mínimo

En las Figuras 19 y 20 se presentan los resultados de las corrientes residuales Eulerianas en la bahía de Buenaventura, donde es posible observar el patrón de circulación y la magnitud de las velocidades residuales.

En las Figuras 21 a 29 se muestran los resultados de las corrientes residuales Lagrangianas en la bahía de Buenaventura, en las cuales es posible apreciar el desplazamiento neto de los trazadores o partículas para cada uno de los diferentes sitios de vertimientos.

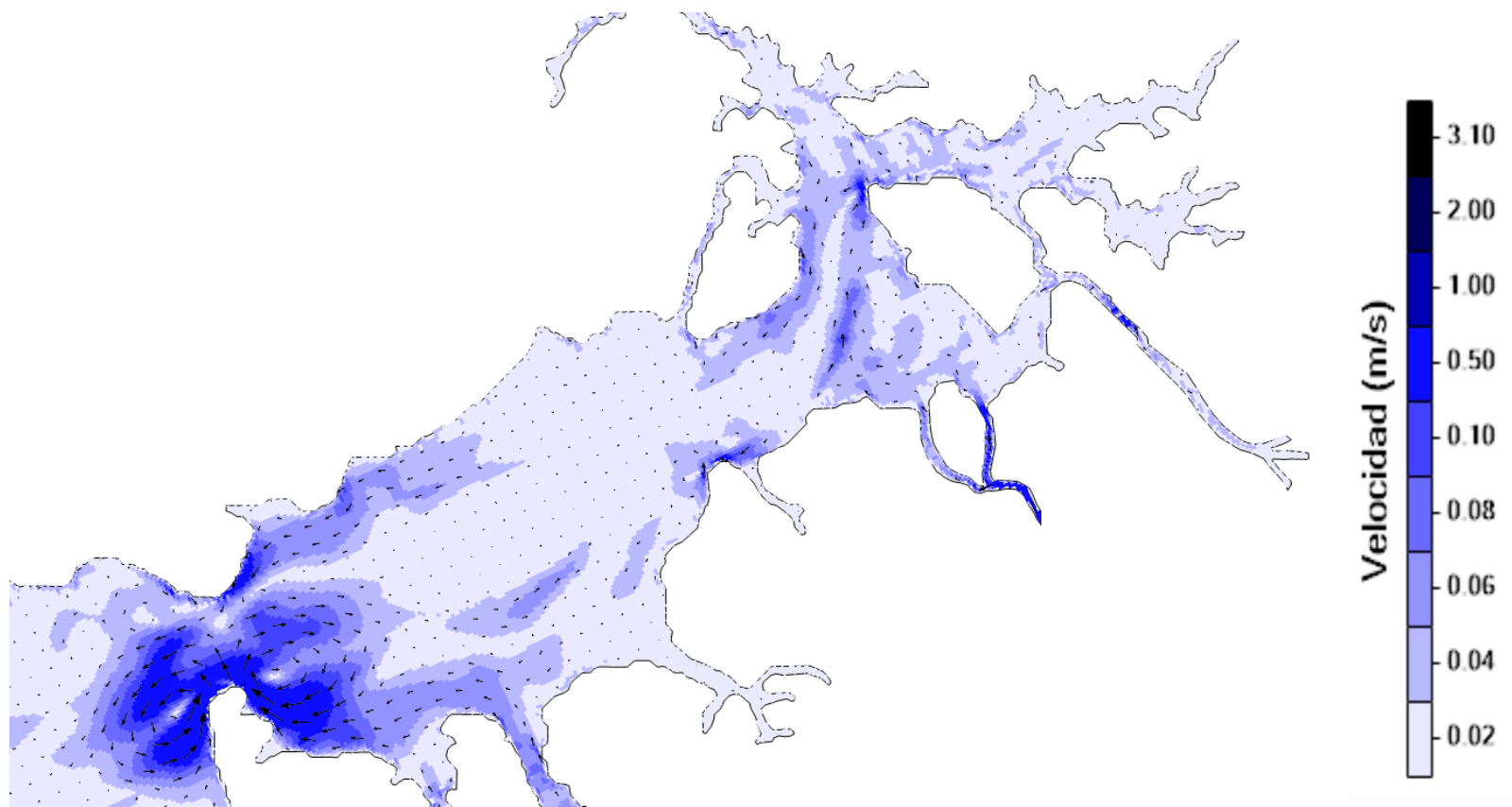


Figura 19. Corrientes residuales Eulerianas en la bahía de Buenaventura para un ciclo cuasiquincenal de marea viva - marea muerta. Escenario 1: Marea viva máxima (rango de 4.89 m) y caudales fluviales mínimos

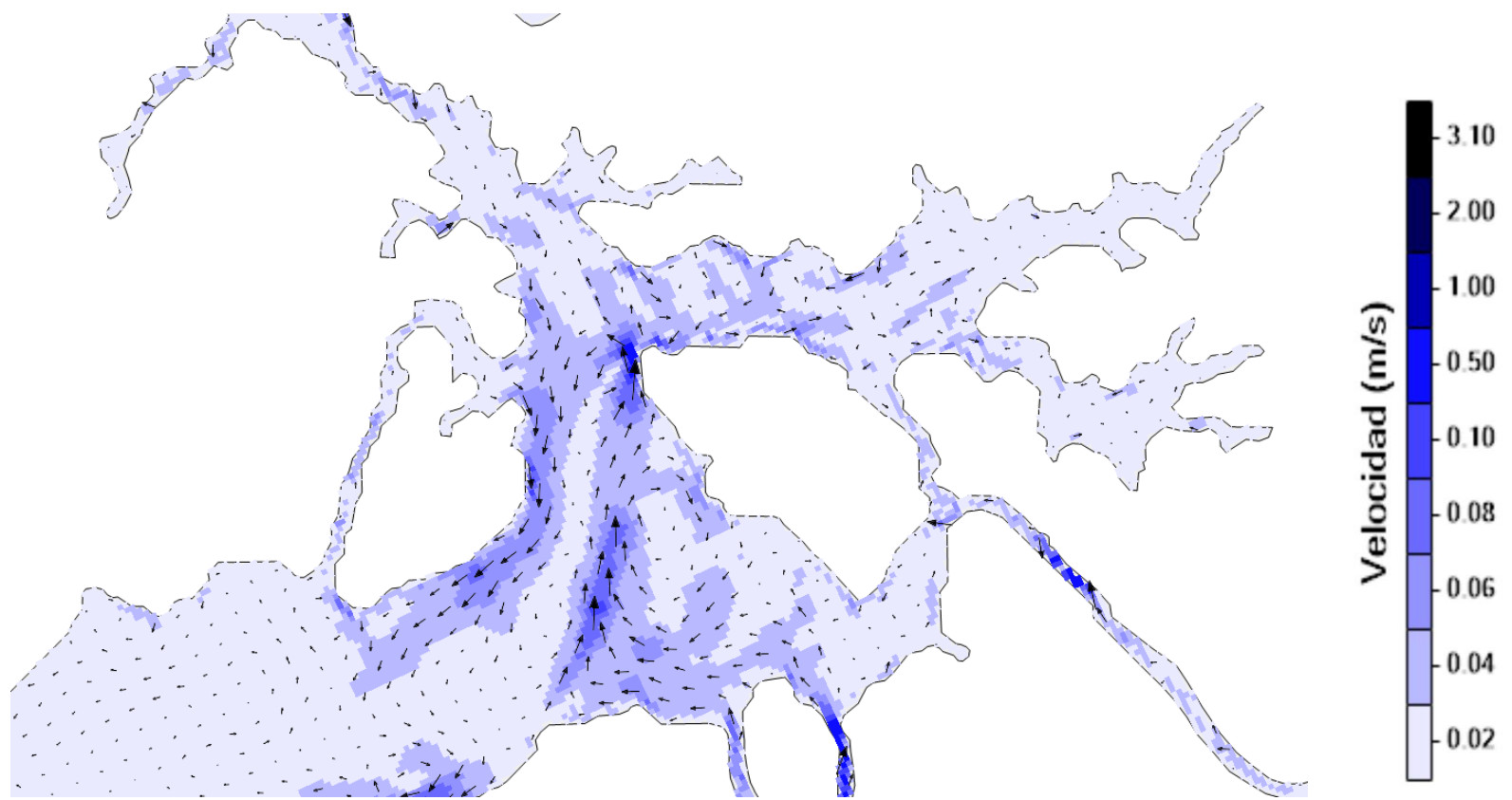


Figura 20. Corrientes residuales Eulerianas alrededor de la isla Cascajal para un ciclo cuasiquincenal de marea viva - marea muerta. Escenario 1: Marea viva máxima (rango de 4.89 m) y caudales fluviales mínimos

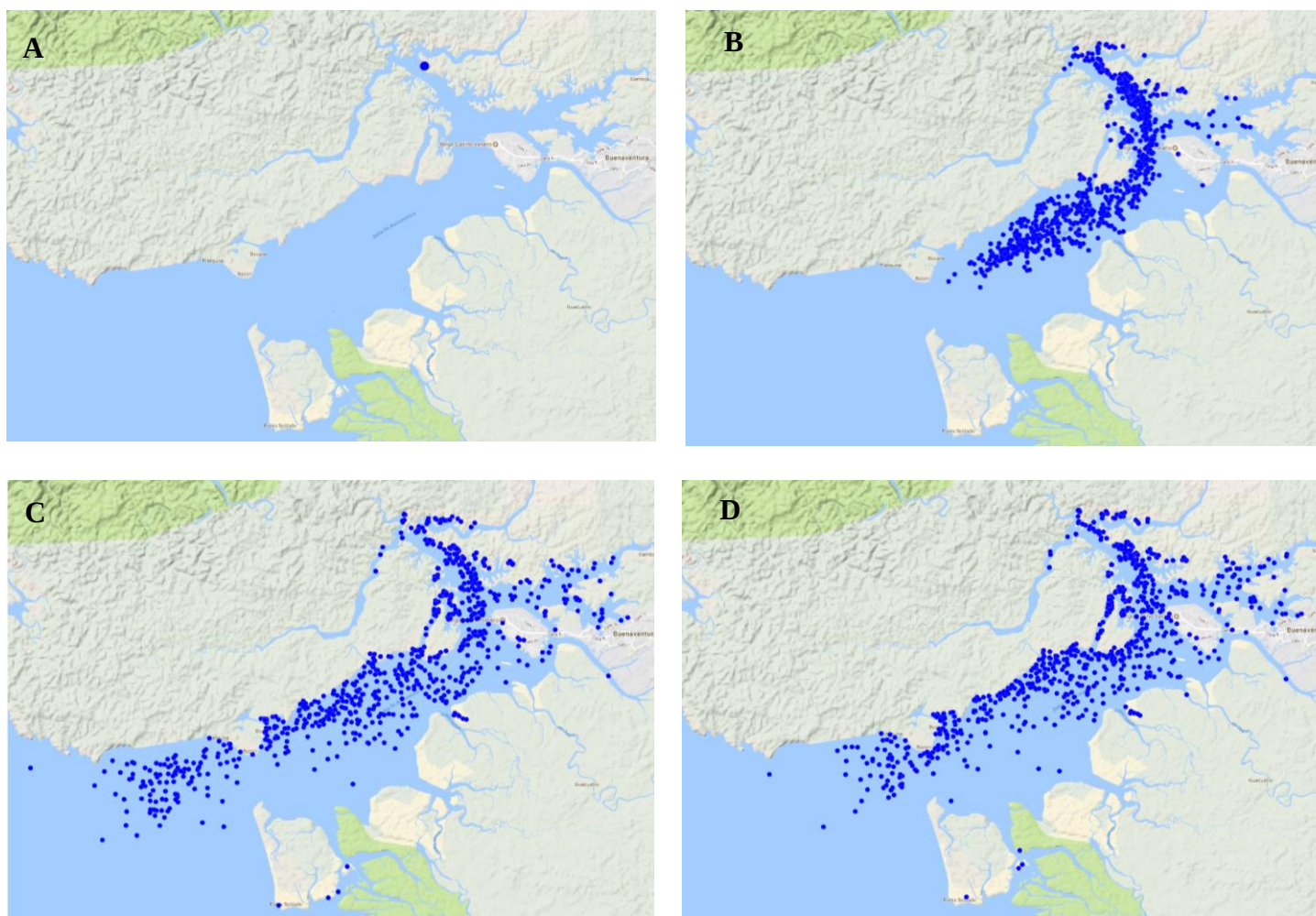


Figura 21. Desplazamiento neto de las partículas vertidas en el estero San Antonio en la bahía de Buenaventura para un ciclo cuasiquincenal de marea viva - marea muerta. Escenario 1: Marea viva máxima (rango de 4.89 m) y caudales fluviales mínimos. A) Instante $t=0$ días, B) Instante $t=5$ días, C) Instante $t=10$ días y D) Instante $t=15$ días

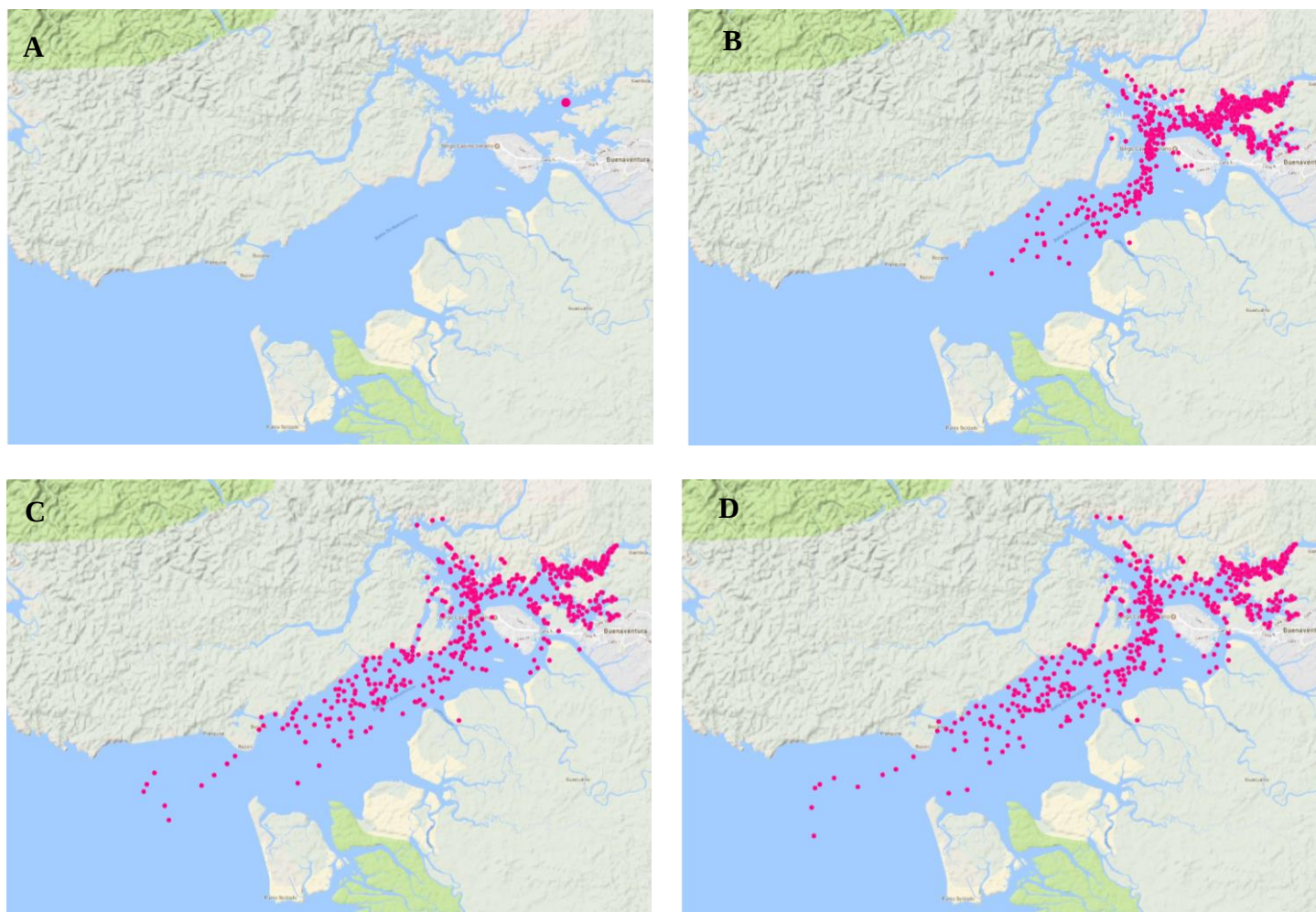


Figura 22. Desplazamiento neto de las partículas vertidas en el estero Gamboa en la bahía de Buenaventura para un ciclo cuasiquincenal de marea viva - marea muerta. Escenario 1: Marea viva máxima (rango de 4.89 m) y caudales fluviales mínimos. A) Instante $t=0$ días, B) Instante $t=5$ días, C) Instante $t=10$ días y D) Instante $t=15$ días

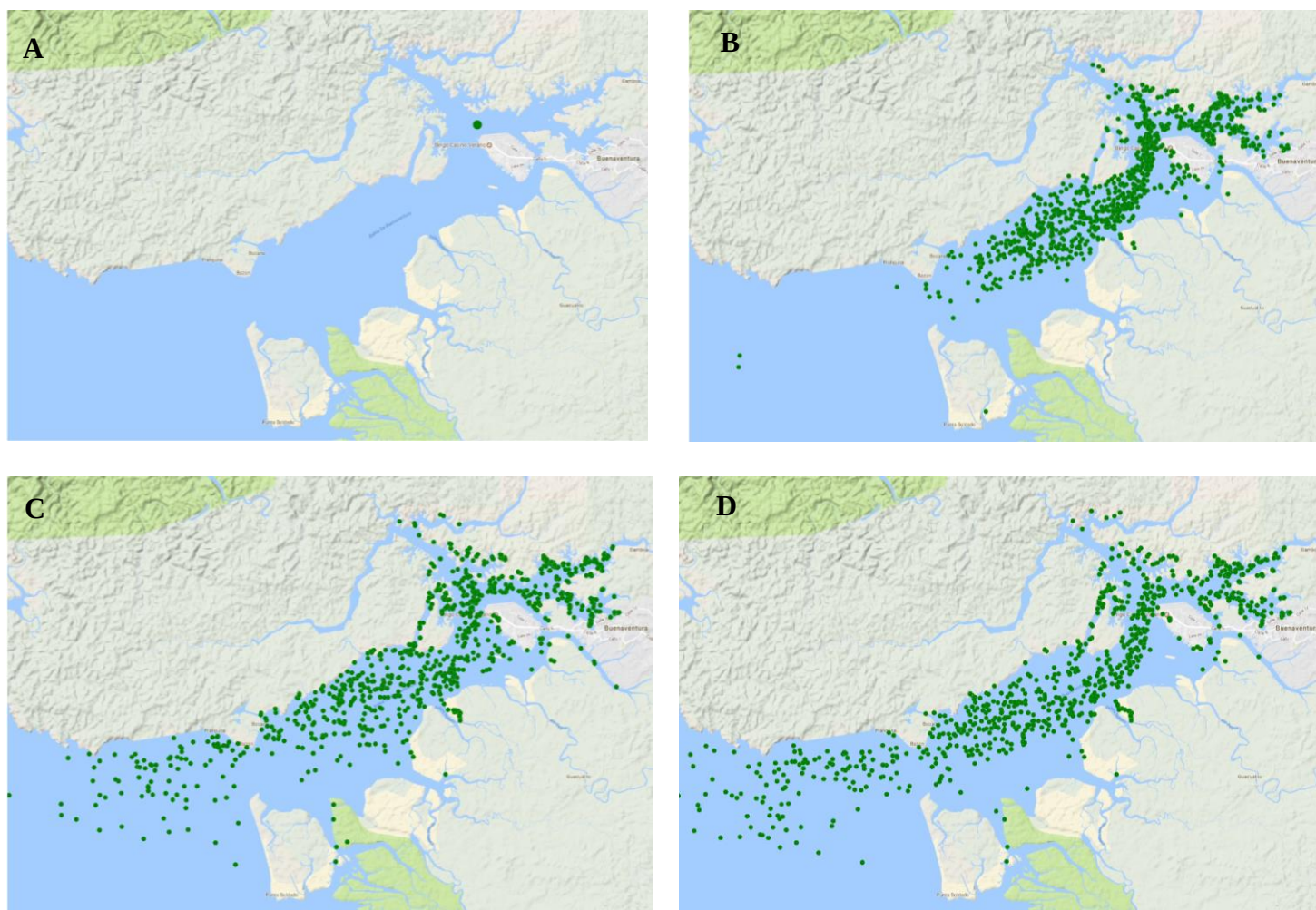


Figura 23. Desplazamiento neto de las partículas vertidas en el Muelle en la bahía de Buenaventura para un ciclo cuasiquincenal de marea viva - marea muerta. Escenario 1: Marea viva máxima (rango de 4.89 m) y caudales fluviales mínimos. A) Instante $t=0$ días, B) Instante $t=5$ días, C) Instante $t=10$ días y D) Instante $t=15$ días

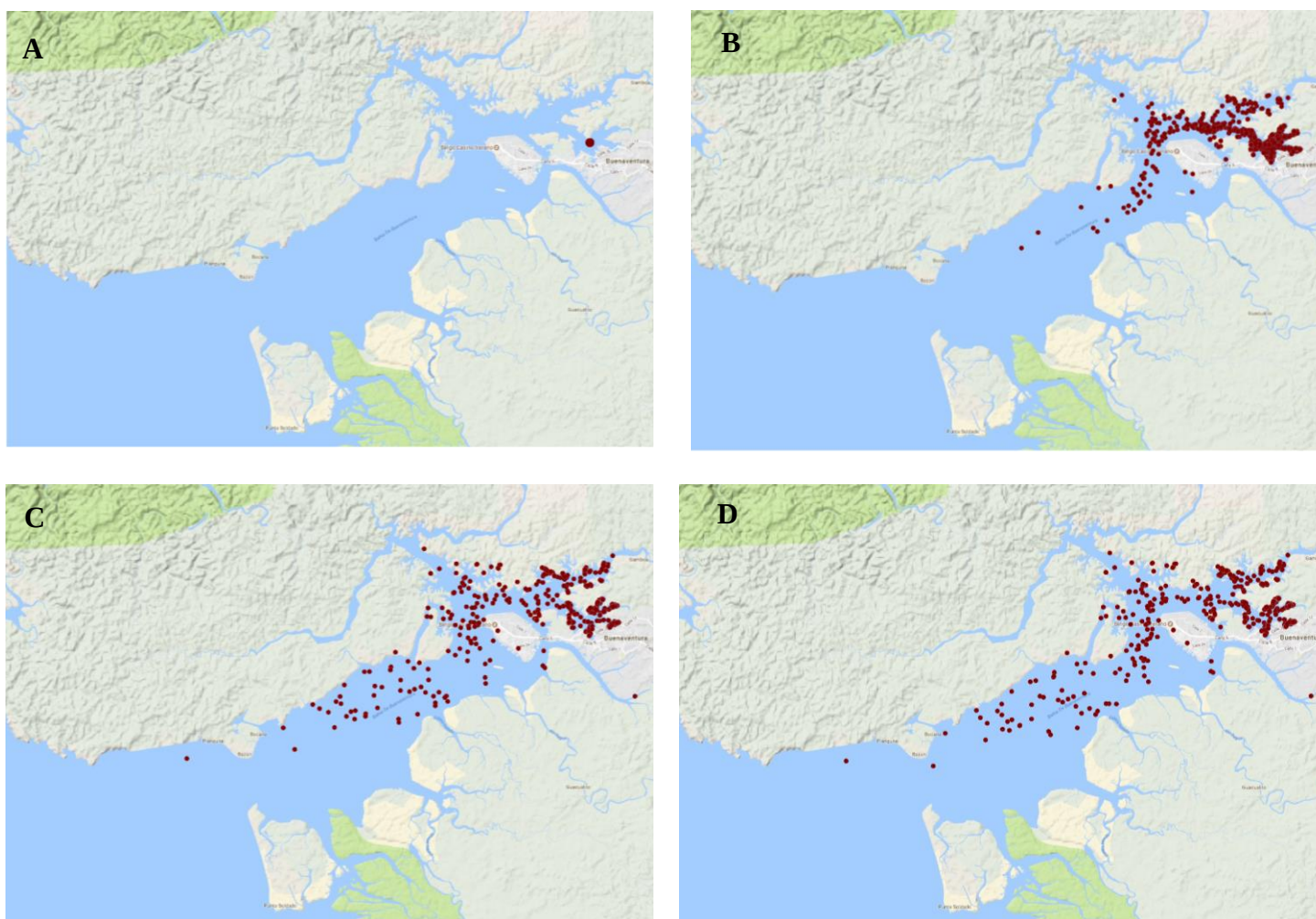


Figura 24. Desplazamiento neto de las partículas vertidas en el estero Aguacate en la bahía de Buenaventura para un ciclo cuasiquincenal de marea viva - marea muerta. Escenario 1: Marea viva máxima (rango de 4.89 m) y caudales fluviales mínimos. A) Instante $t=0$ días, B) Instante $t=5$ días, C) Instante $t=10$ días y D) Instante $t=15$ días

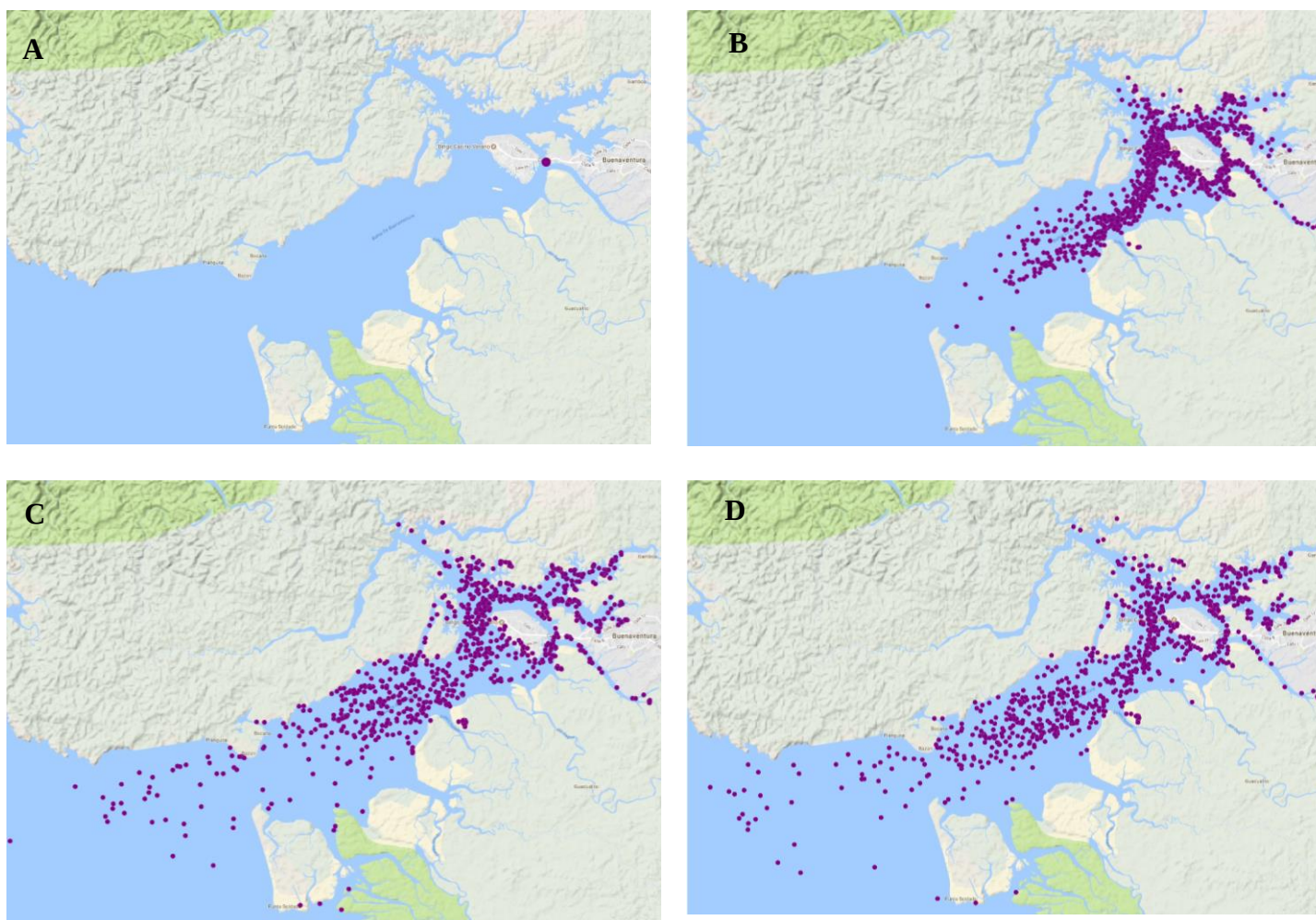


Figura 25. Desplazamiento neto de las partículas vertidas en la desembocadura del río San Antonio en la bahía de Buenaventura para un ciclo cuasiquincenal de marea viva - marea muerta. Escenario 1: Marea viva máxima (rango de 4.89 m) y caudales fluviales mínimos. A) Instante $t=0$ días, B) Instante $t=5$ días, C) Instante $t=10$ días y D) Instante $t=15$ días

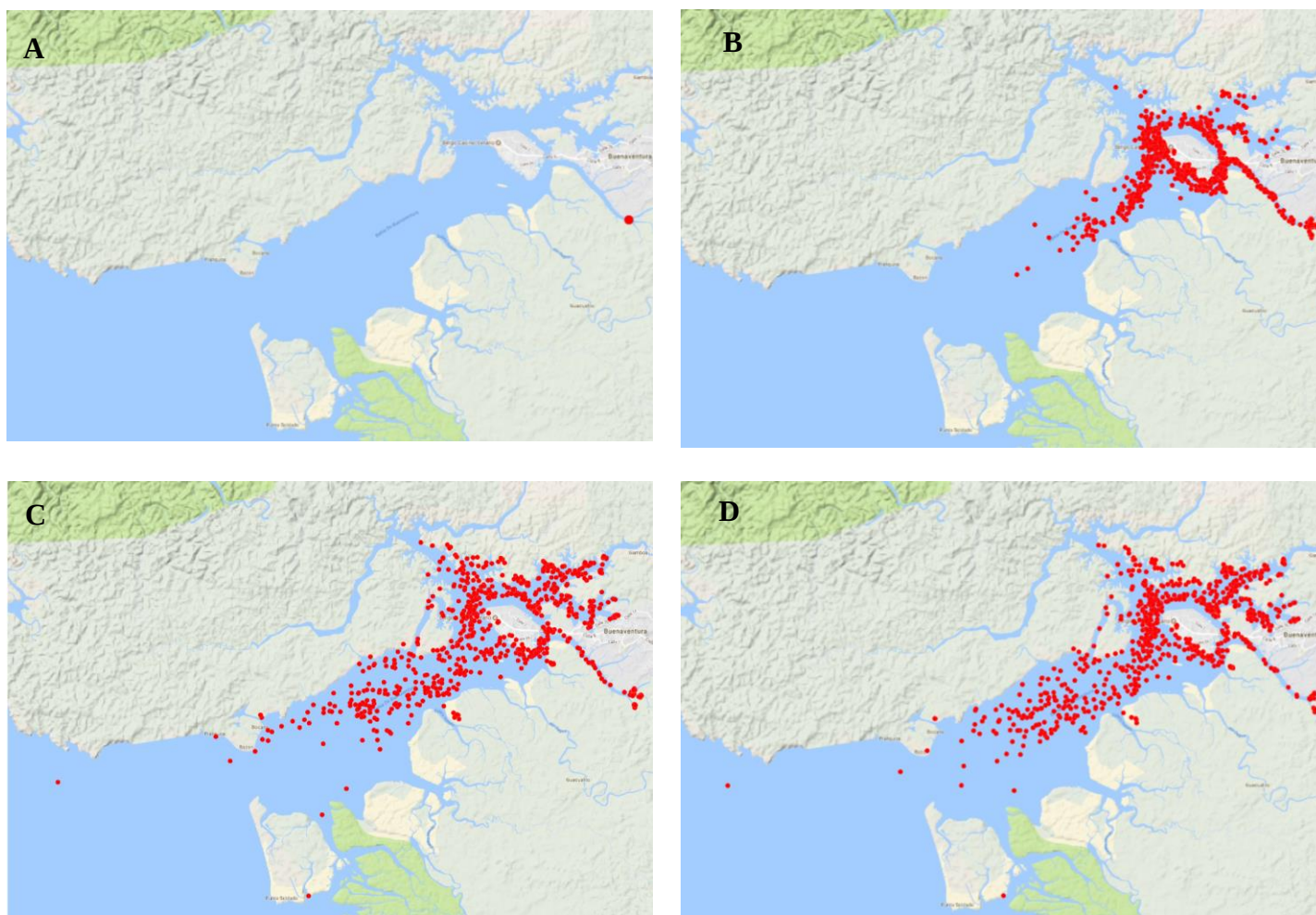


Figura 26. Desplazamiento neto de las partículas vertidas en la parte alta del río San Antonio en la bahía de Buenaventura para un ciclo cuasiquincenal de marea viva - marea muerta. Escenario 1: Marea viva máxima (rango de 4.89 m) y caudales fluviales mínimos. A) Instante $t=0$ días, B) Instante $t=5$ días, C) Instante $t=10$ días y D) Instante $t=15$ días

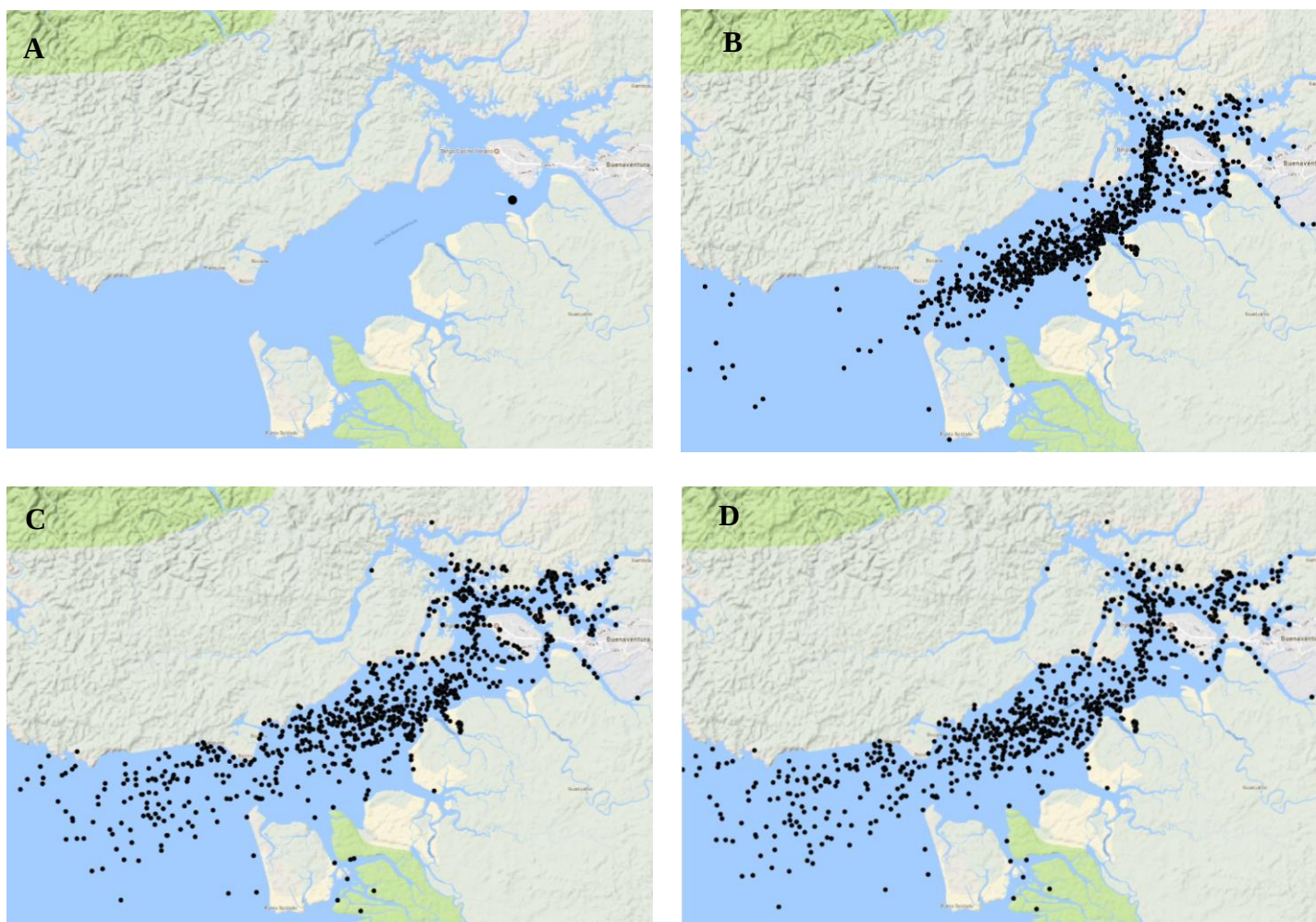


Figura 27. Desplazamiento neto de las partículas vertidas en el delta del río Dagua en la bahía de Buenaventura para un ciclo cuasiquincenal de marea viva - marea muerta. Escenario 1: Marea viva máxima (rango de 4.89 m) y caudales fluviales mínimos. A) Instante $t=0$ días, B) Instante $t=5$ días, C) Instante $t=10$ días y D) Instante $t=15$ días

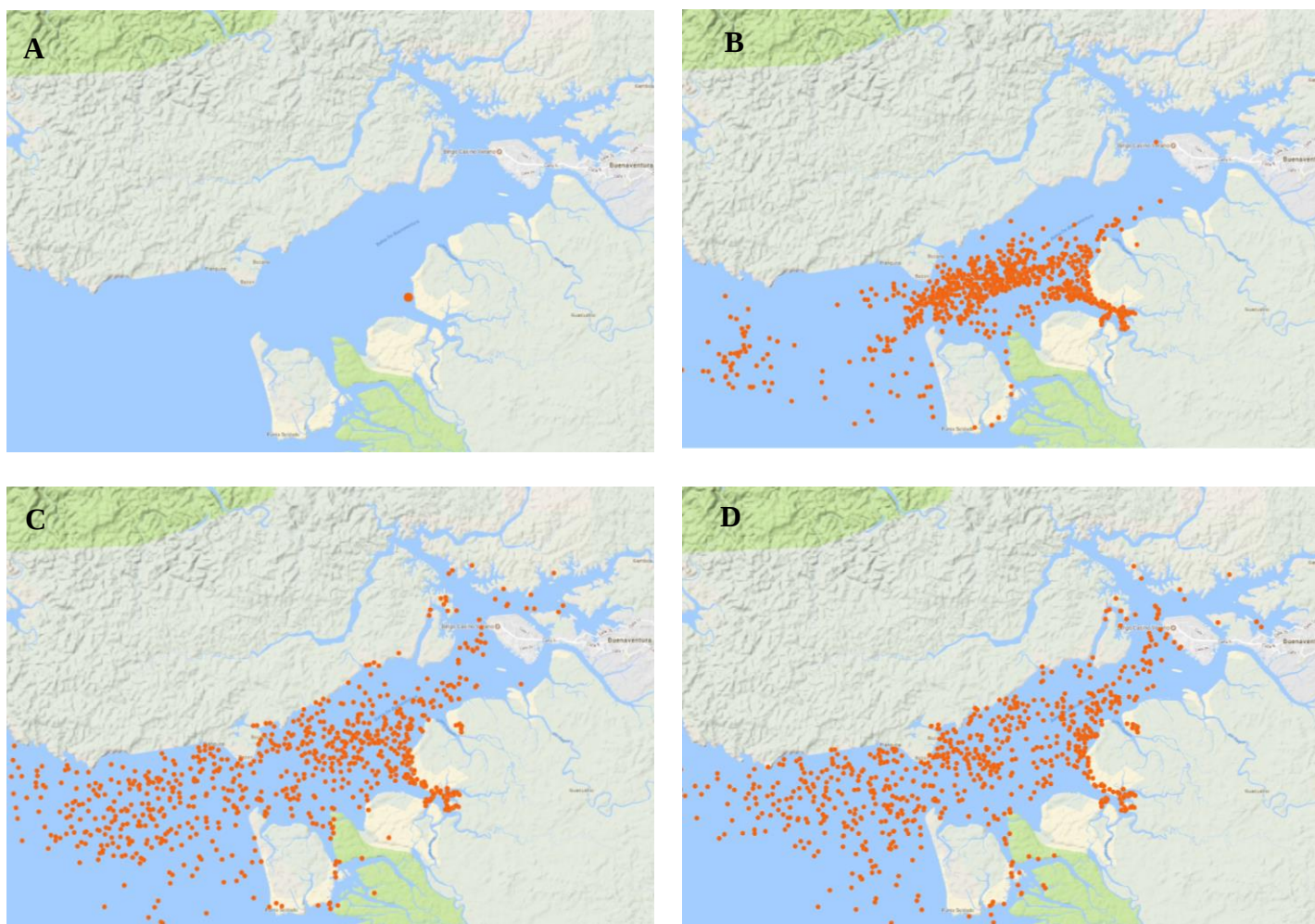


Figura 28. Desplazamiento neto de las partículas vertidas en la desembocadura del río Limones en la bahía de Buenaventura para un ciclo cuasiquincenal de marea viva - marea muerta. Escenario 1: Marea viva máxima (rango de 4.89 m) y caudales fluviales mínimos. A) Instante $t=0$ días, B) Instante $t=5$ días, C) Instante $t=10$ días y D) Instante $t=15$ días

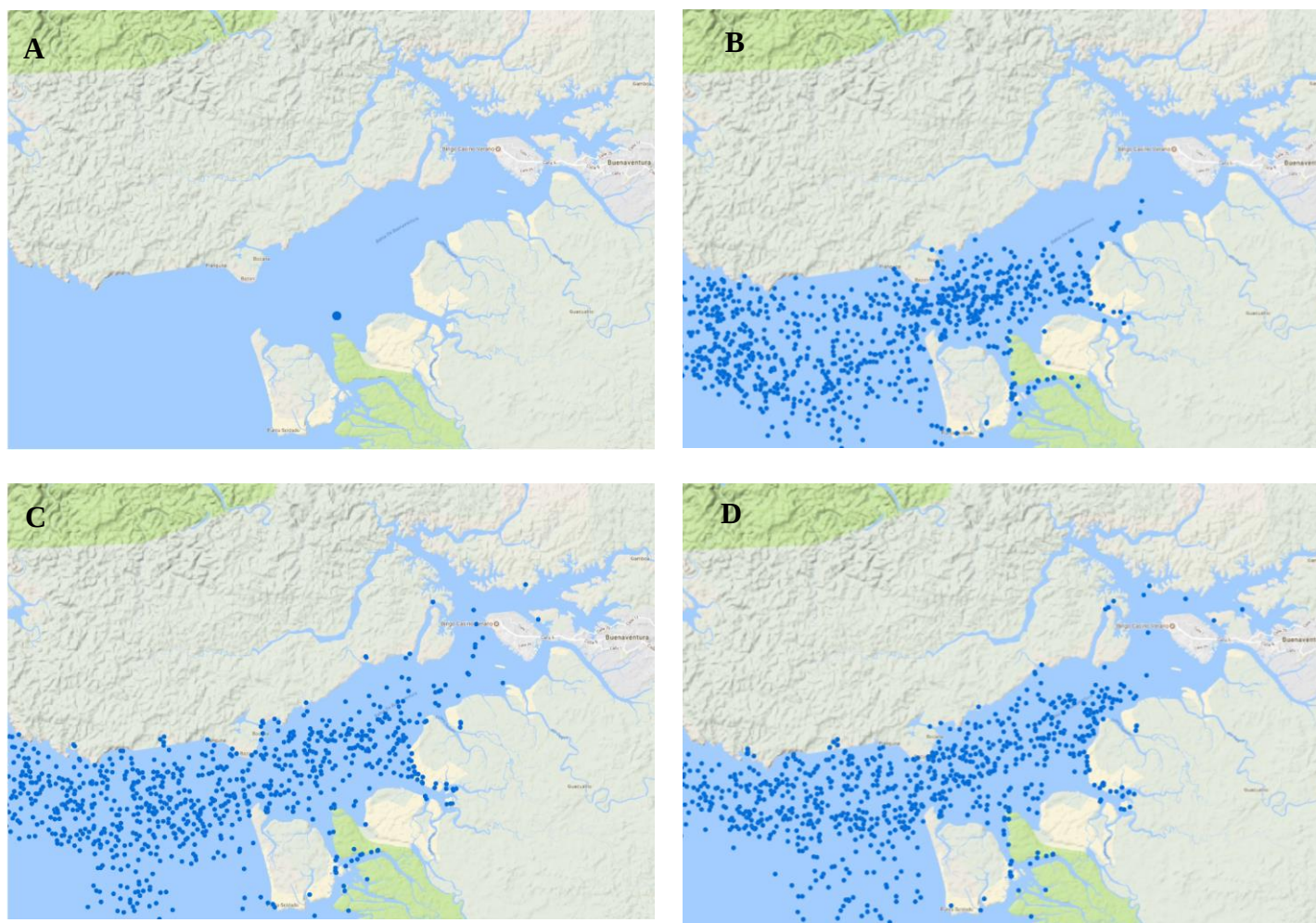


Figura 29. Desplazamiento neto de las partículas vertidas en la desembocadura del río Anchicayá en la bahía de Buenaventura para un ciclo cuasiquincenal de marea viva - marea muerta. Escenario 1: Marea viva máxima (rango de 4.89 m) y caudales fluviales mínimos. A) Instante $t=0$ días, B) Instante $t=5$ días, C) Instante $t=10$ días y D) Instante $t=15$ días

9.2 Escenario 2: Marea Viva Media (rango = 4.89 m) y Caudales Fluviales Máximos

En las Figuras 30 y 31 se presentan los resultados de las corrientes residuales Eulerianas en la bahía de Buenaventura, donde es posible observar el patrón de circulación y la magnitud de las velocidades residuales.

En las Figuras 32 a 40 se muestran los resultados de las corrientes residuales Lagrangianas en la bahía de Buenaventura, en las cuales es posible apreciar el desplazamiento neto de los trazadores o partículas para cada uno de los diferentes sitios de vertimientos.

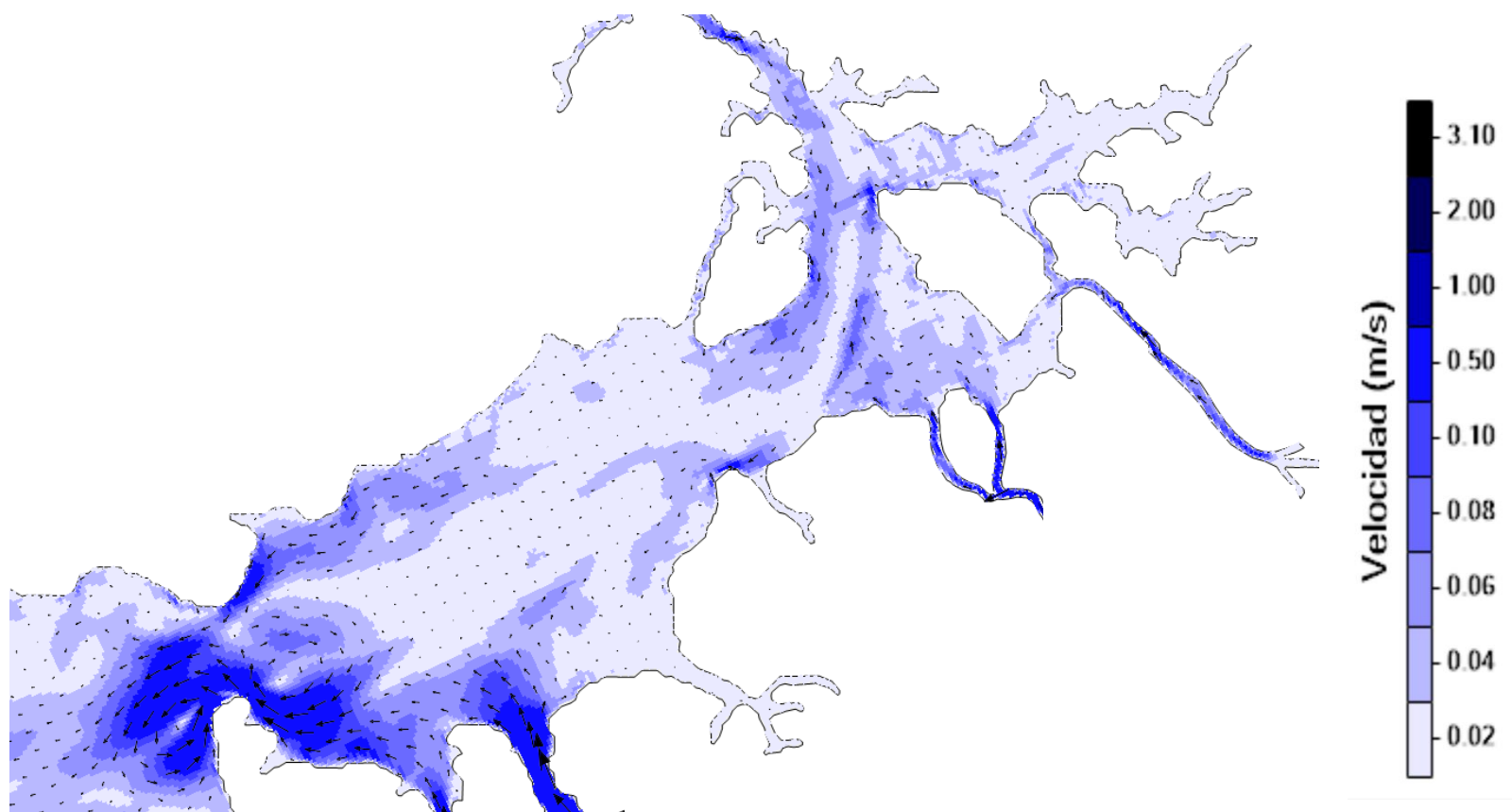


Figura 30. Corrientes residuales Eulerianas en la bahía de Buenaventura para un ciclo cuasiquincenal de marea viva - marea muerta. Escenario 2: Marea viva máxima (rango de 4.89 m) y caudales fluviales máximos

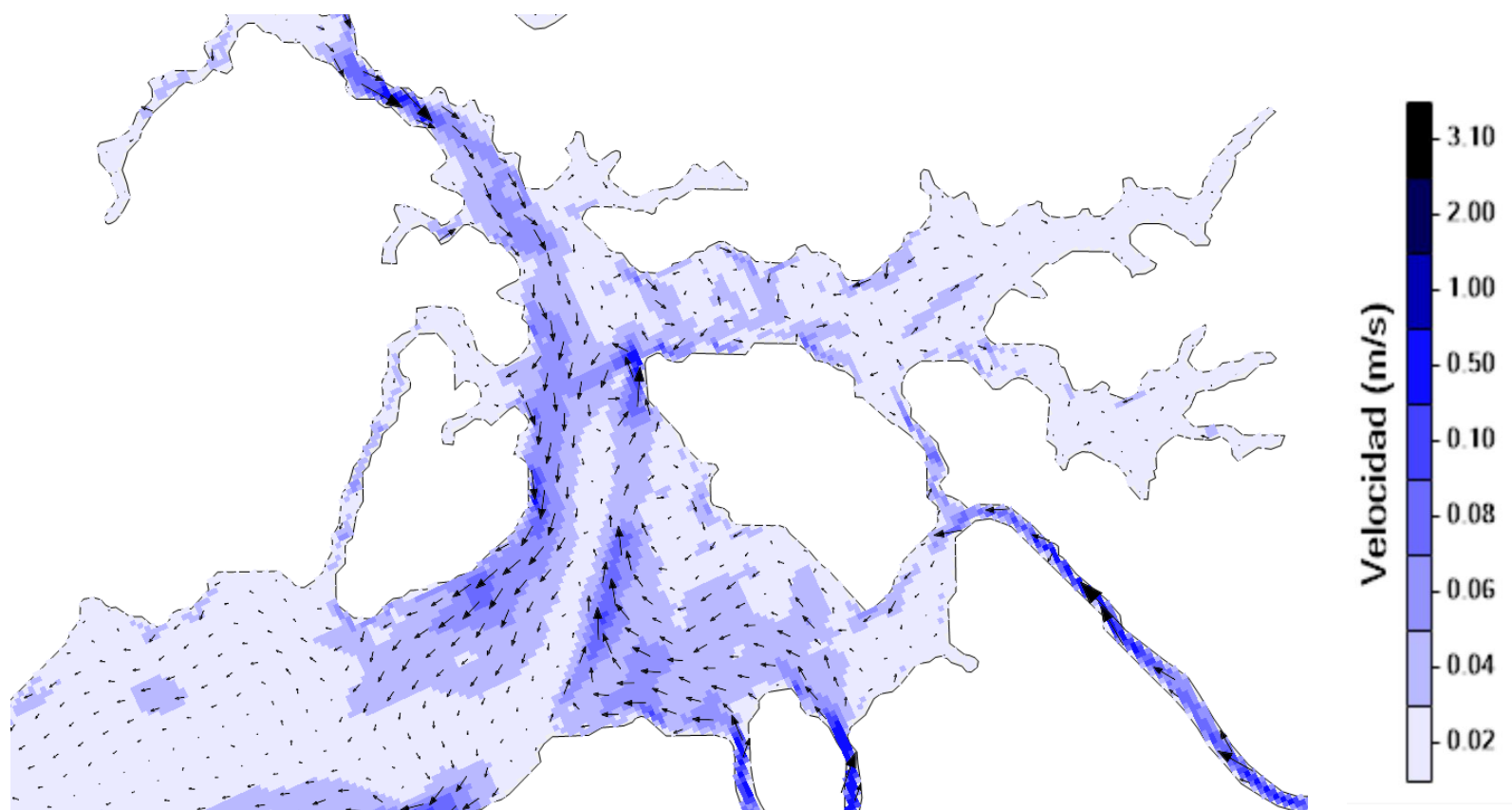


Figura 31. Corrientes residuales Eulerianas alrededor de la isla Cascajal para un ciclo cuasiquincenal de marea viva - marea muerta. Escenario 2: Marea viva máxima (rango de 4.89 m) y caudales fluviales máximos

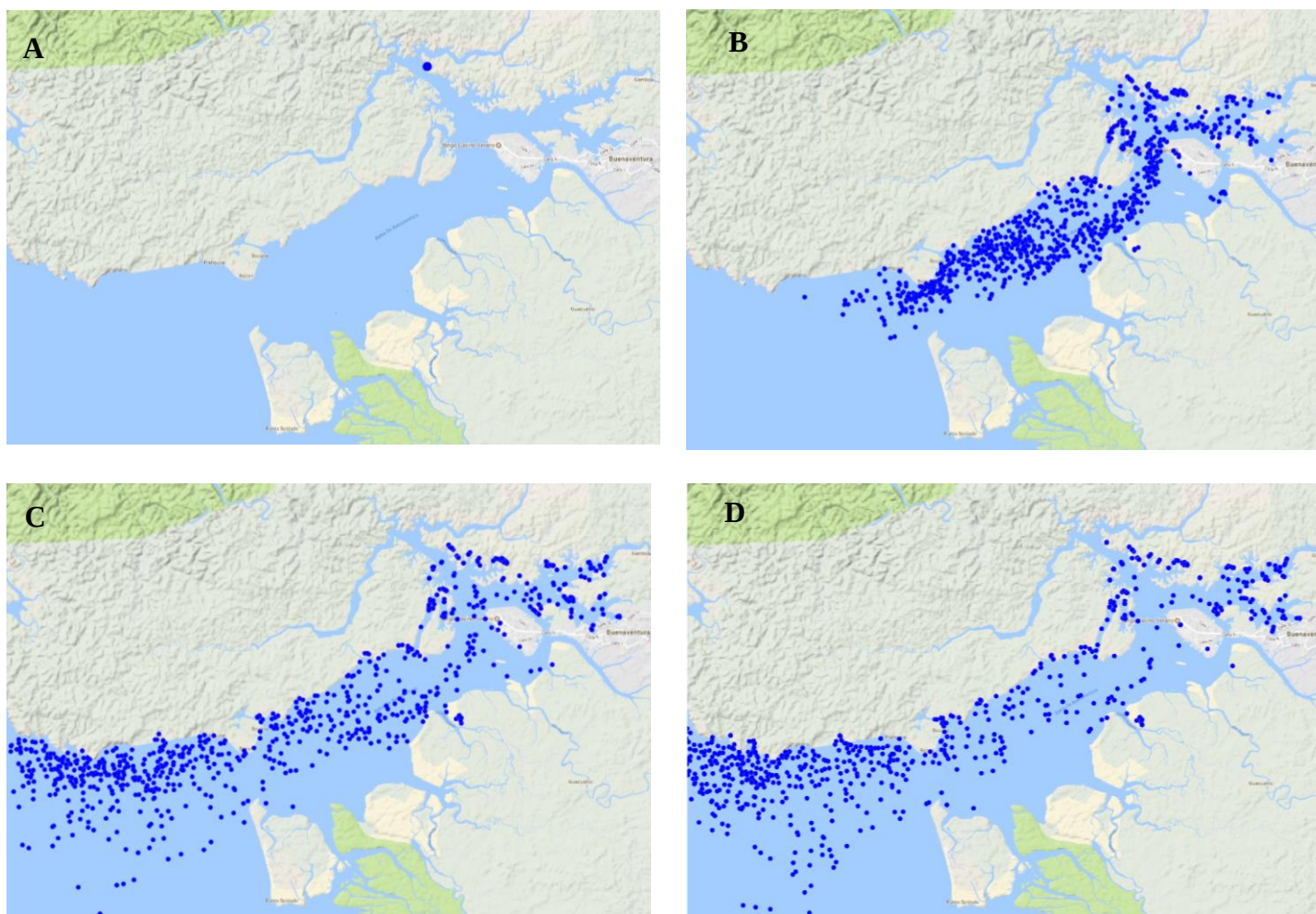


Figura 32. Desplazamiento neto de las partículas vertidas en el estero San Antonio en la bahía de Buenaventura para un ciclo cuasiquincenal de marea viva - marea muerta. Escenario 2: Marea viva máxima (rango de 4.89 m) y caudales fluviales máximos. A) Instante $t=0$ días, B) Instante $t=5$ días, C) Instante $t=10$ días y D) Instante $t=15$ días

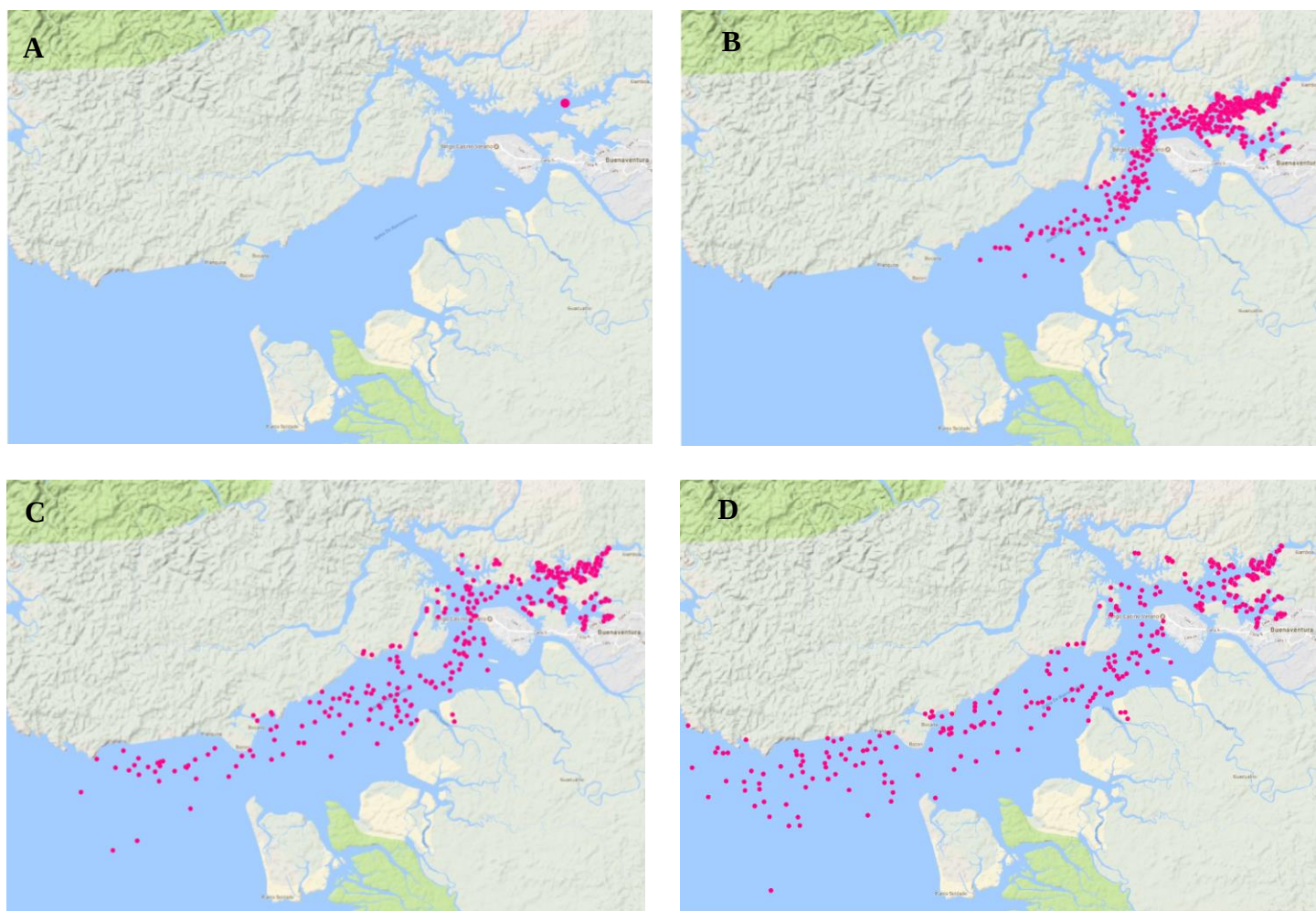


Figura 33. Desplazamiento neto de las partículas vertidas en el estero Gamboa en la bahía de Buenaventura para un ciclo cuasiquincenal de marea viva - marea muerta. Escenario 2: Marea viva máxima (rango de 4.89 m) y caudales fluviales máximos. A) Instante $t=0$ días, B) Instante $t=5$ días, C) Instante $t=10$ días y D) Instante $t=15$ días

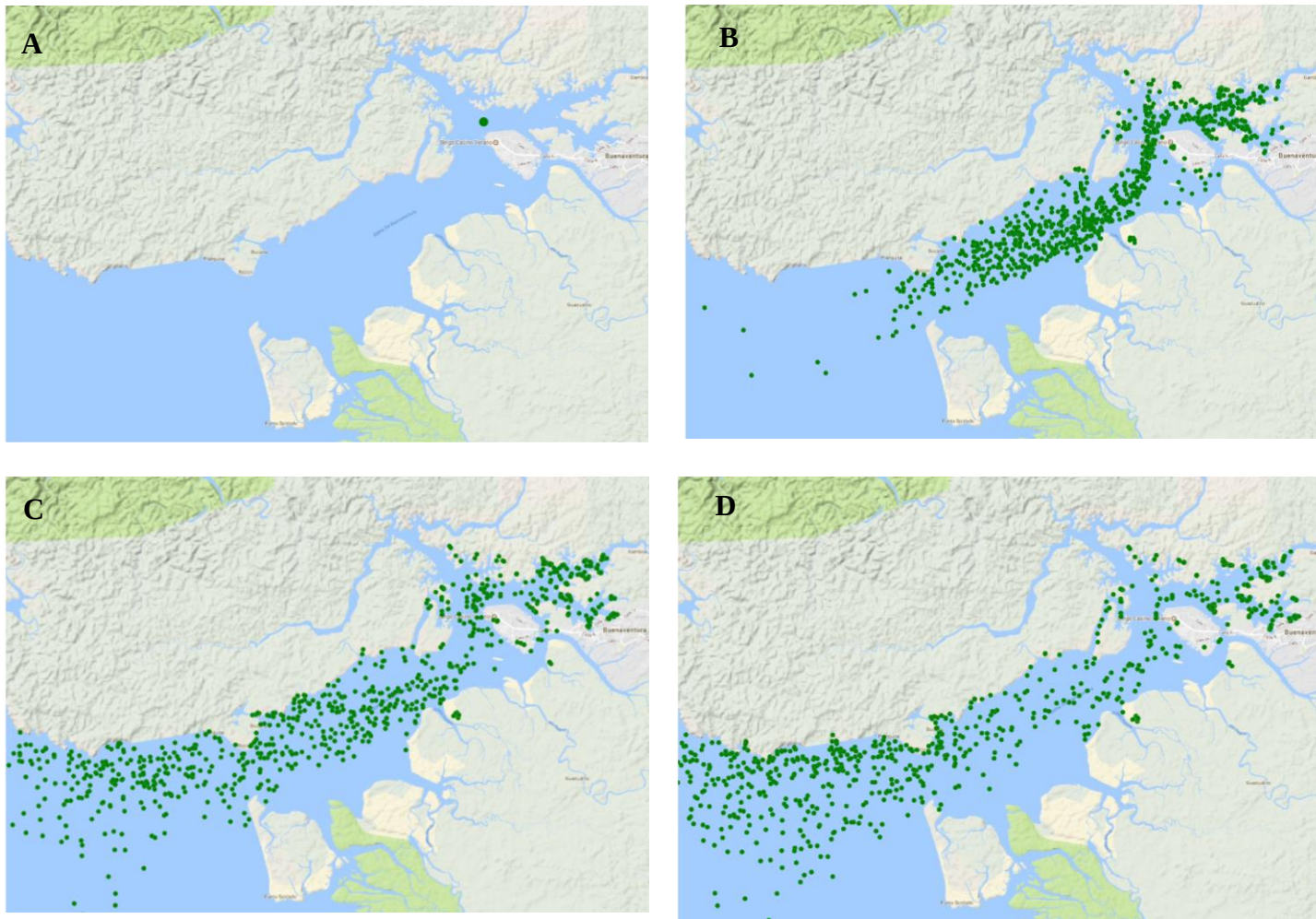


Figura 34. Desplazamiento neto de las partículas vertidas en el Muelle en la bahía de Buenaventura para un ciclo cuasiquincenal de marea viva - marea muerta. Escenario 2: Marea viva máxima (rango de 4.89 m) y caudales fluviales máximos. A) Instante $t=0$ días, B) Instante $t=5$ días, C) Instante $t=10$ días y D) Instante $t=15$ días

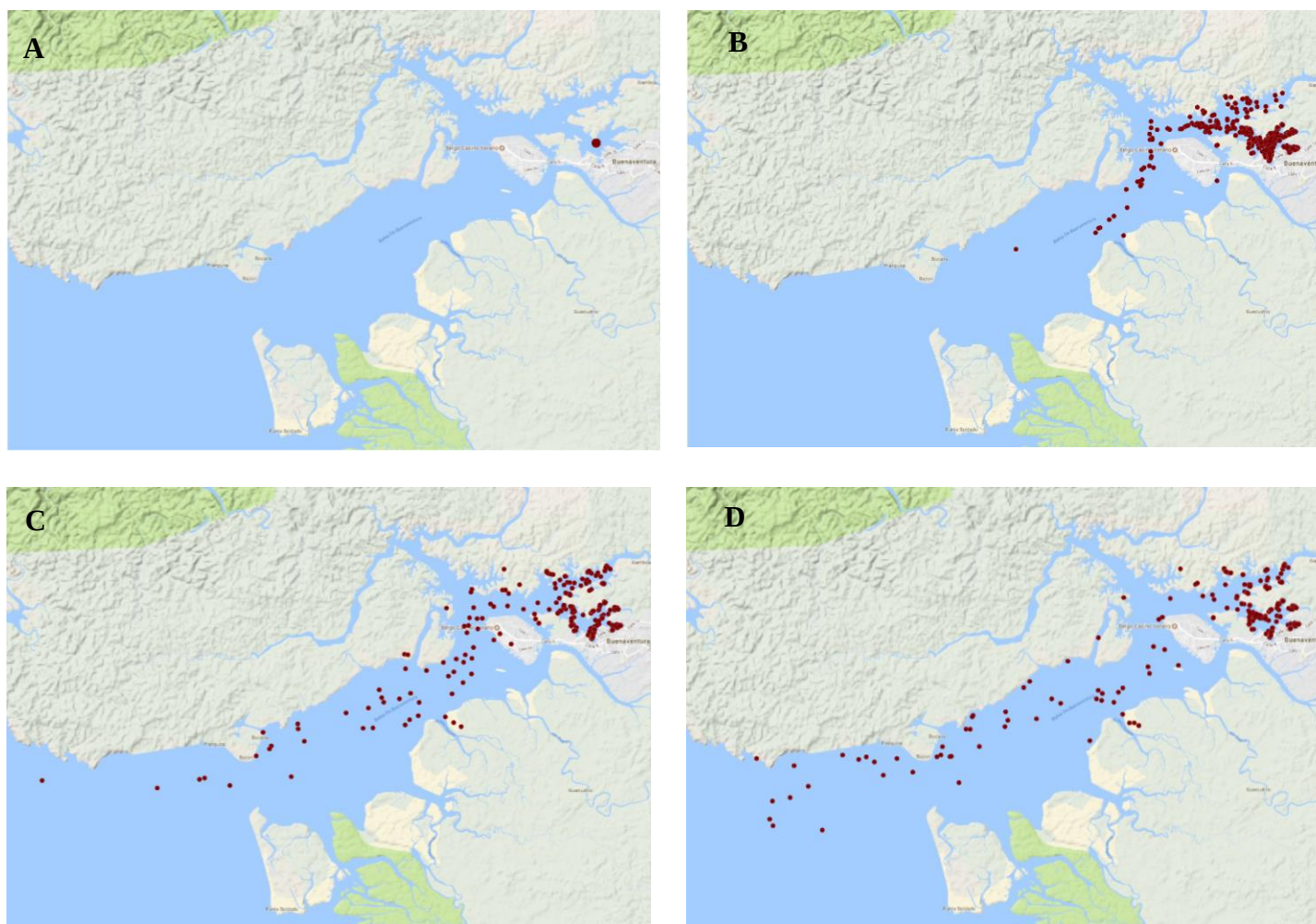


Figura 35. Desplazamiento neto de las partículas vertidas en el estero Aguacate en la bahía de Buenaventura para un ciclo cuasiquincenal de marea viva - marea muerta. Escenario 2: Marea viva máxima (rango de 4.89 m) y caudales fluviales máximos. A) Instante $t=0$ días, B) Instante $t=5$ días, C) Instante $t=10$ días y D) Instante $t=15$ días

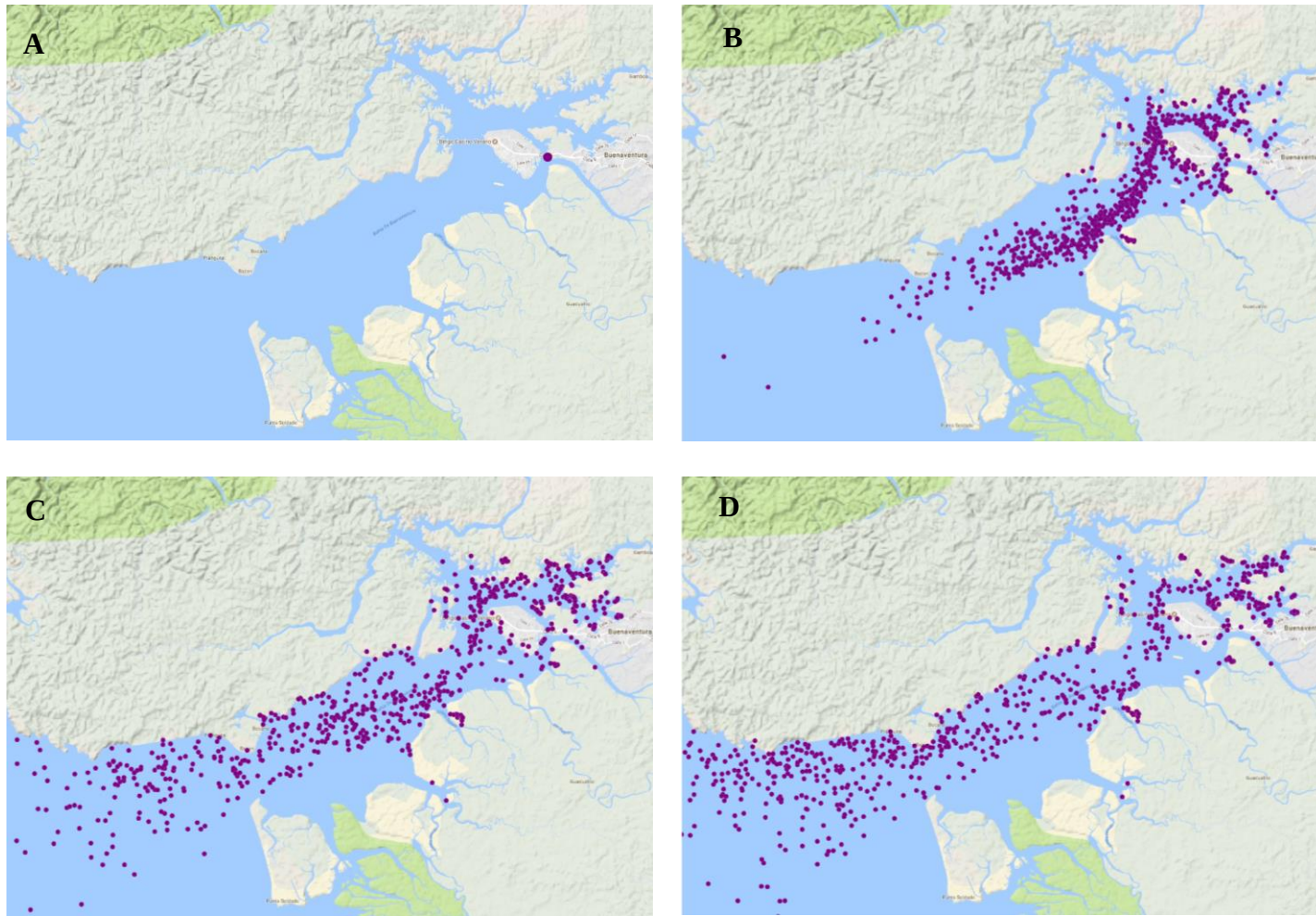


Figura 36. Desplazamiento neto de las partículas vertidas en la desembocadura del río San Antonio en la bahía de Buenaventura para un ciclo cuasiquincenal de marea viva - marea muerta. Escenario 2: Marea viva máxima (rango de 4.89 m) y caudales fluviales máximos. A) Instante $t=0$ días, B) Instante $t=5$ días, C) Instante $t=10$ días y D) Instante $t=15$ días

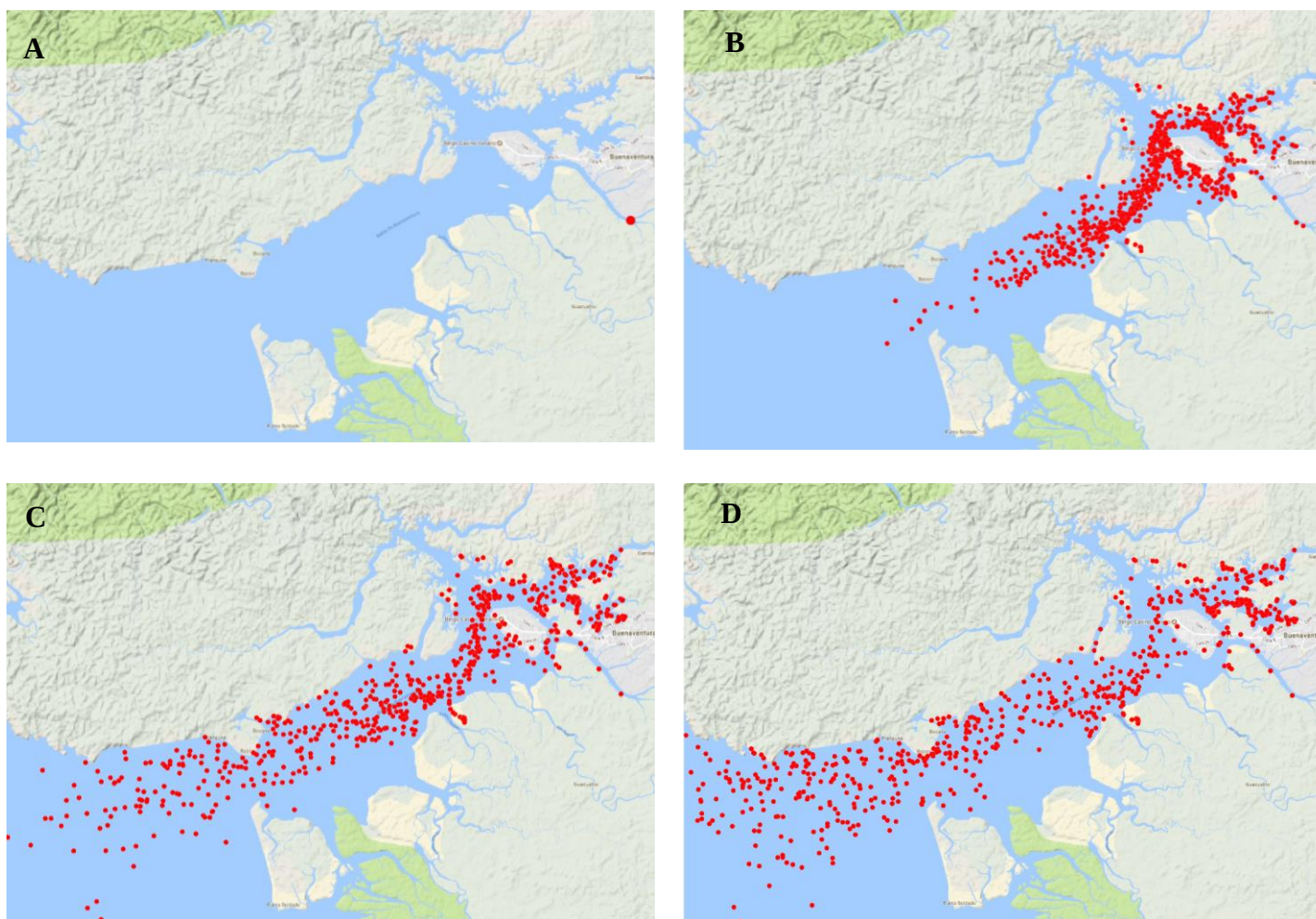


Figura 37. Desplazamiento neto de las partículas vertidas en la parte alta del río San Antonio en la bahía de Buenaventura para un ciclo cuasiquincenal de marea viva - marea muerta. Escenario 2: Marea viva máxima (rango de 4.89 m) y caudales fluviales máximos. A) Instante $t=0$ días, B) Instante $t=5$ días, C) Instante $t=10$ días y D) Instante $t=15$ días

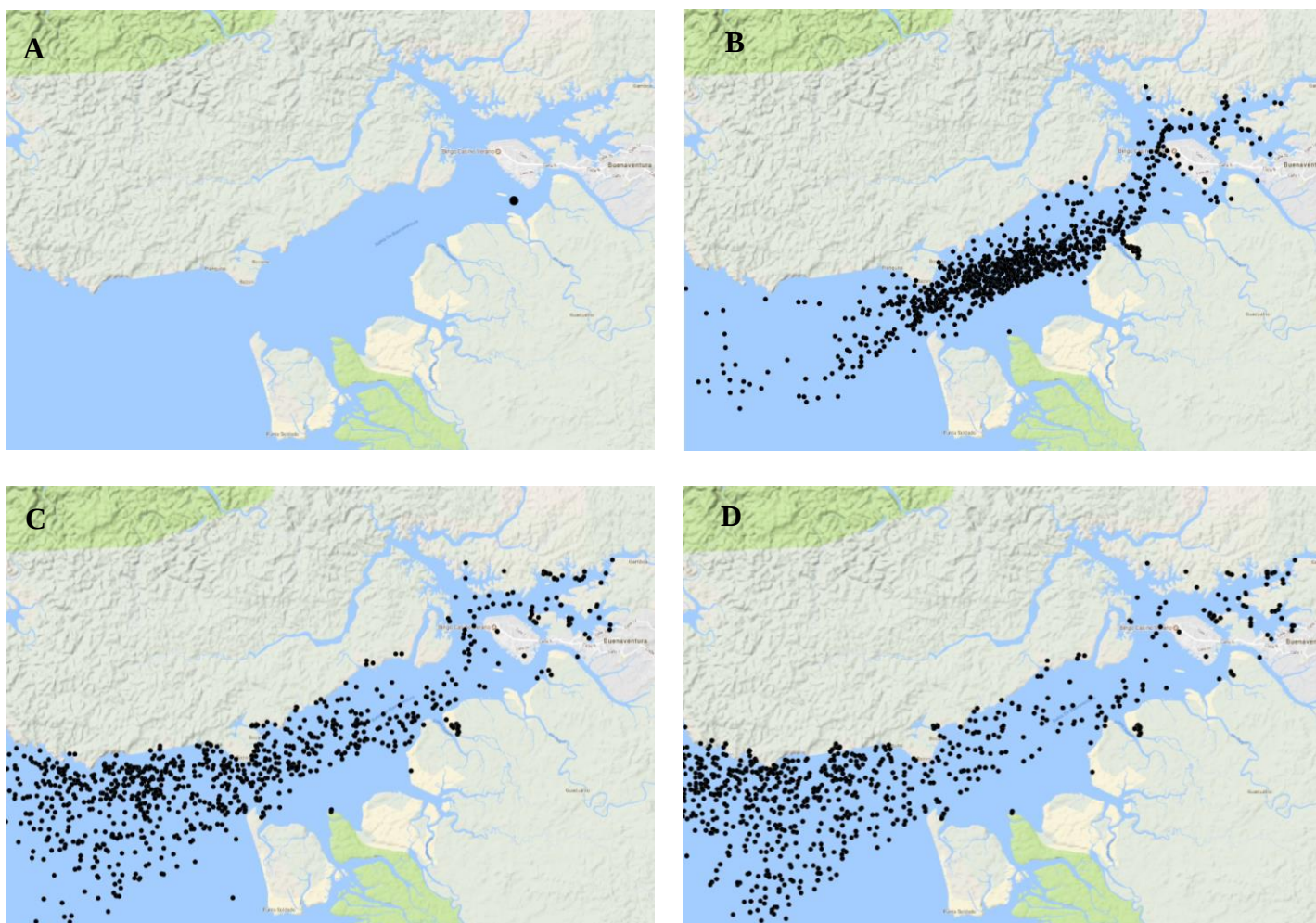


Figura 38. Desplazamiento neto de las partículas vertidas en el delta del río Dagua en la bahía de Buenaventura para un ciclo cuasiquincenal de marea viva - marea muerta. Escenario 2: Marea viva máxima (rango de 4.89 m) y caudales fluviales máximos. A) Instante $t=0$ días, B) Instante $t=5$ días, C) Instante $t=10$ días y D) Instante $t=15$ días

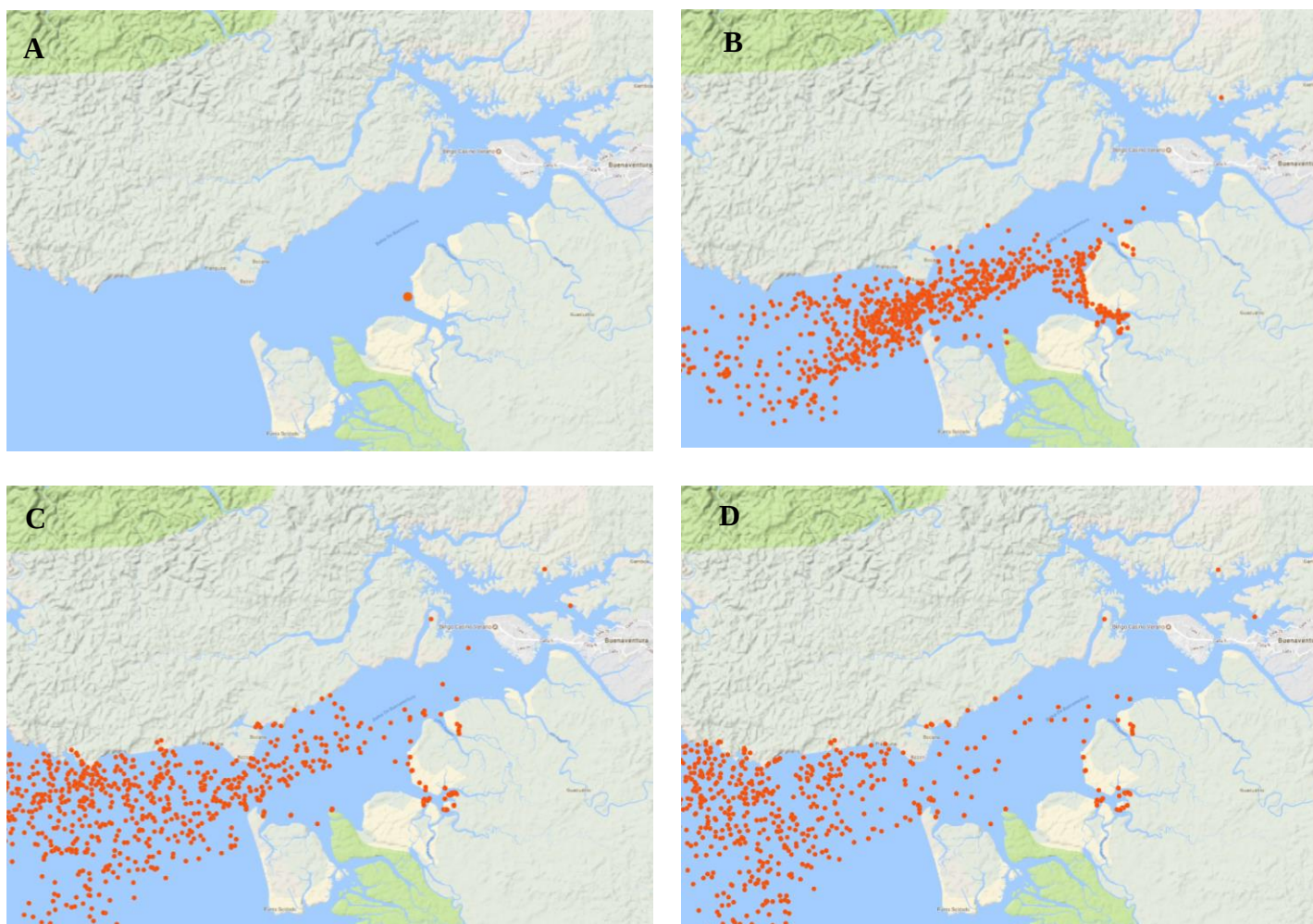


Figura 39. Desplazamiento neto de las partículas vertidas en la desembocadura del río Limones en la bahía de Buenaventura para un ciclo cuasiquincenal de marea viva - marea muerta. Escenario 2: Marea viva máxima (rango de 4.89 m) y caudales fluviales máximos. A) Instante $t=0$ días, B) Instante $t=5$ días, C) Instante $t=10$ días y D) Instante $t=15$ días

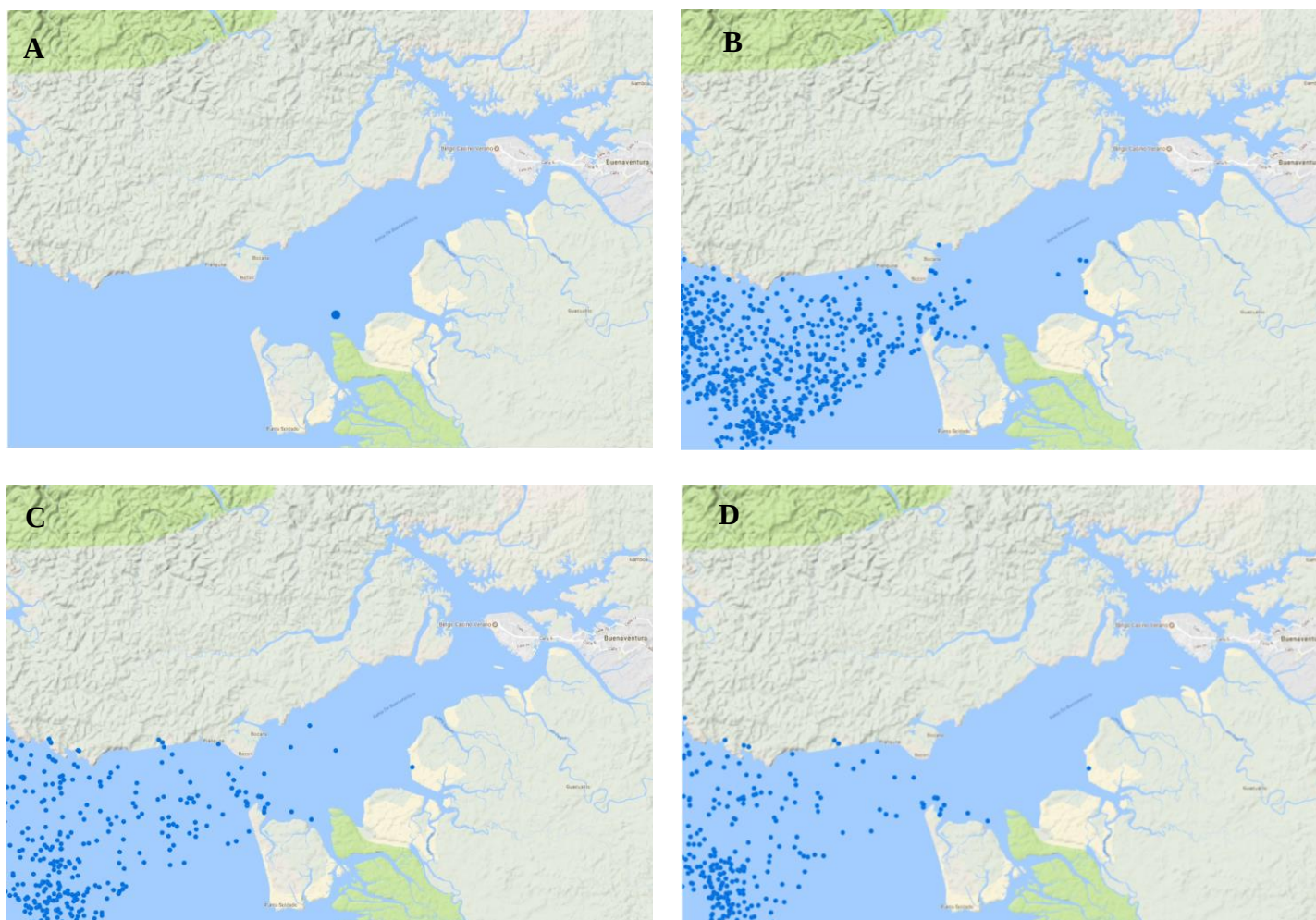


Figura 40. Desplazamiento neto de las partículas vertidas en la desembocadura del río Anchicayá en la bahía de Buenaventura para un ciclo cuasiquincenal de marea viva - marea muerta. Escenario 2: Marea viva máxima (rango de 4.89 m) y caudales fluviales máximos. A) Instante $t=0$ días, B) Instante $t=5$ días, C) Instante $t=10$ días y D) Instante $t=15$ días

9.3 Escenario 3: Marea Viva Máxima (rango = 4.23 m) y Caudales Fluviales Mínimos

En las Figuras 41 y 42 se presentan los resultados de las corrientes residuales Eulerianas en la bahía de Buenaventura, donde es posible observar el patrón de circulación y la magnitud de las velocidades residuales.

En las Figuras 43 a 51 se muestran los resultados de las corrientes residuales Lagrangianas en la bahía de Buenaventura, en las cuales es posible apreciar el desplazamiento neto de los trazadores o partículas para cada uno de los diferentes sitios de vertimientos.

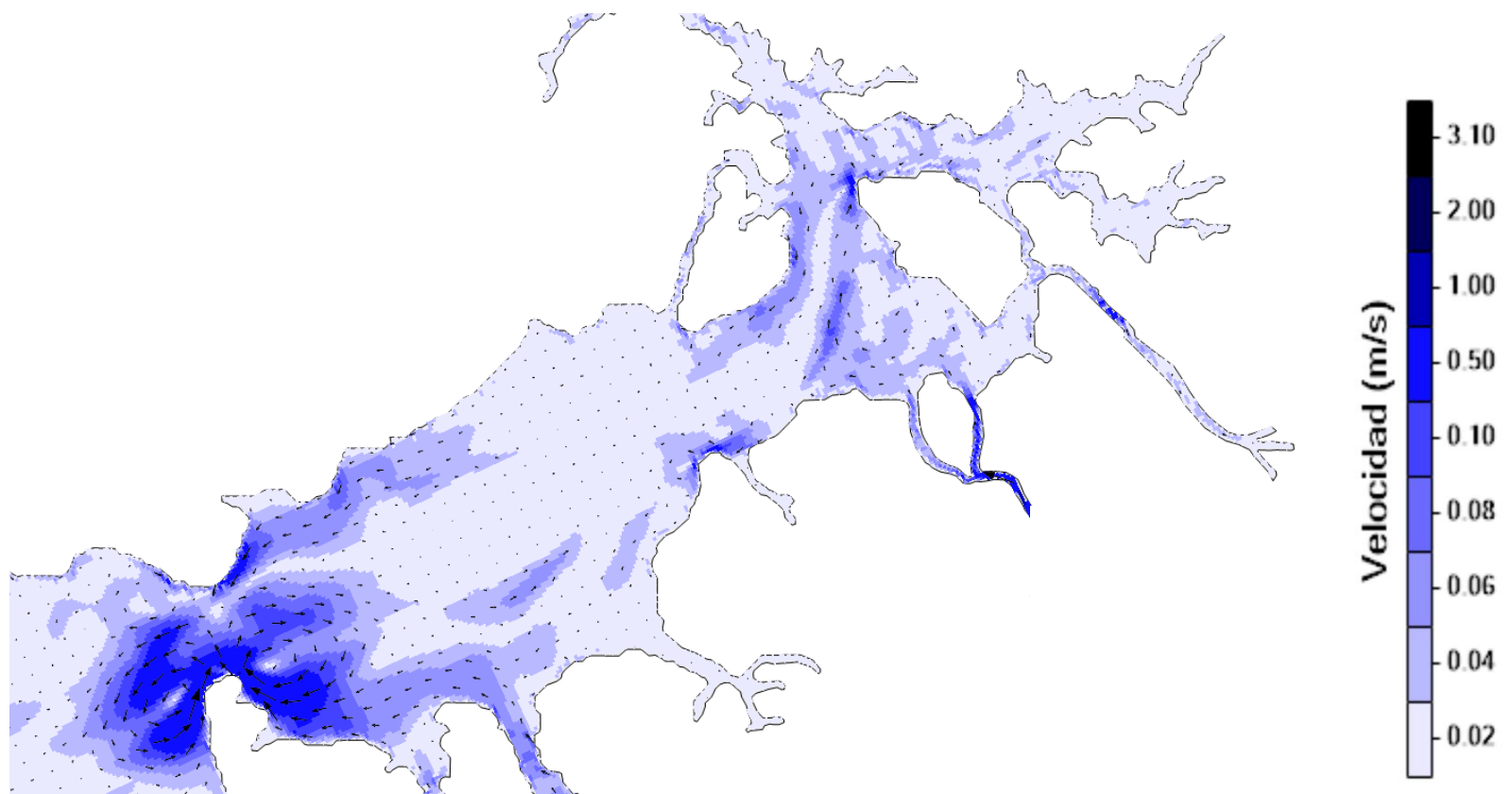


Figura 41. Corrientes residuales Eulerianas en la bahía de Buenaventura para un ciclo cuasiquincenal de marea viva - marea muerta. Escenario 3: Marea viva media (rango de 4.23 m) y caudales fluviales mínimos

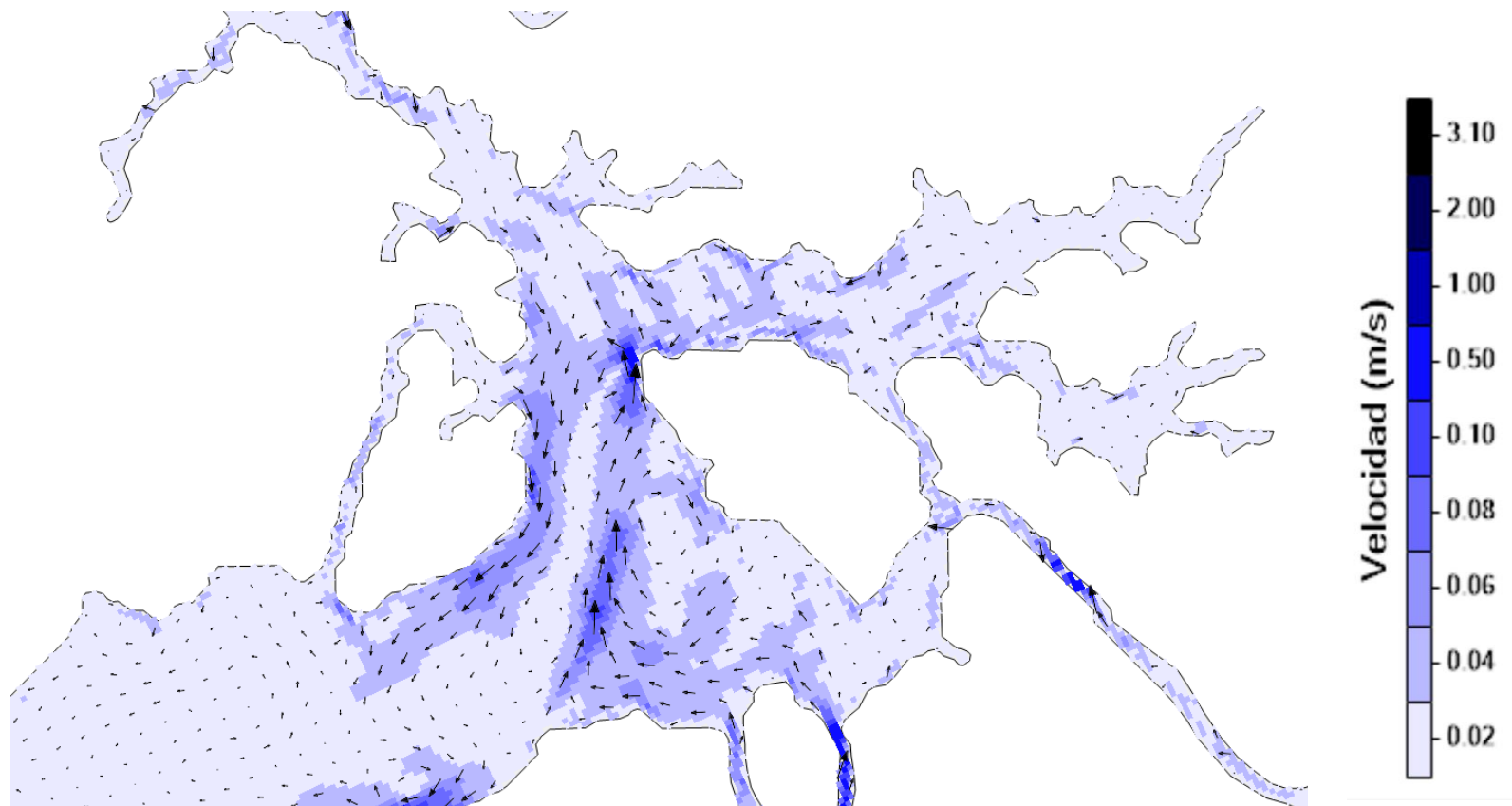


Figura 42. Corrientes residuales Eulerianas alrededor de la isla Cascajal para un ciclo cuasiquincenal de marea viva - marea muerta. Escenario 3: Marea viva media (rango de 4.23 m) y caudales fluviales mínimos

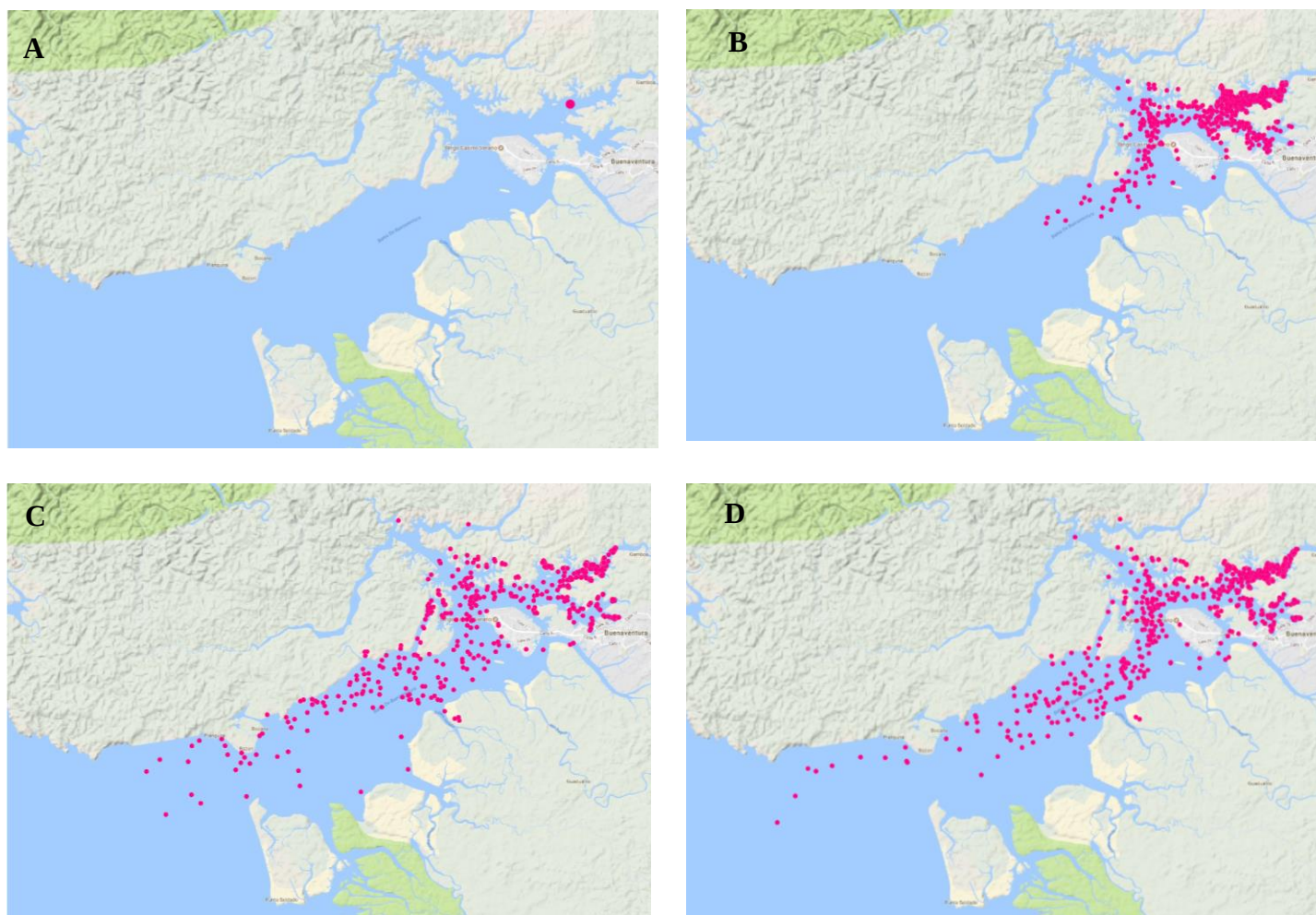


Figura 44. Desplazamiento neto de las partículas vertidas en el estero Gamboa en la bahía de Buenaventura para un ciclo cuasiquincenal de marea viva - marea muerta. Escenario 3: Marea viva media (rango de 4.23 m) y caudales fluviales mínimos. A) Instante $t=0$ días, B) Instante $t=5$ días, C) Instante $t=10$ días y D) Instante $t=15$ días

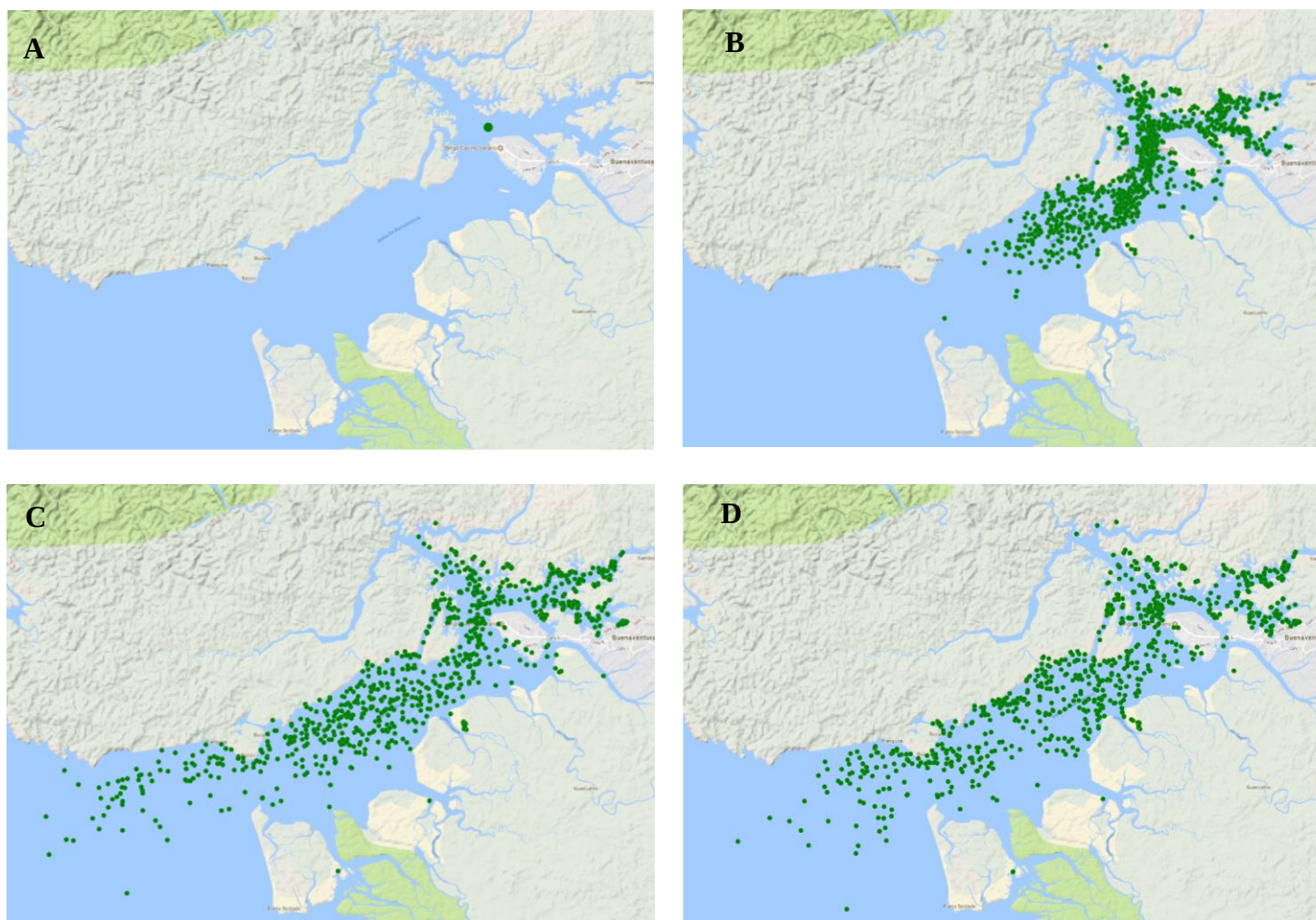


Figura 45. Desplazamiento neto de las partículas vertidas en el Muelle en la bahía de Buenaventura para un ciclo cuasiquincenal de marea viva - marea muerta. Escenario 3: Marea viva media (rango de 4.23 m) y caudales fluviales mínimos. A) Instante $t=0$ días, B) Instante $t=5$ días, C) Instante $t=10$ días y D) Instante $t=15$ días

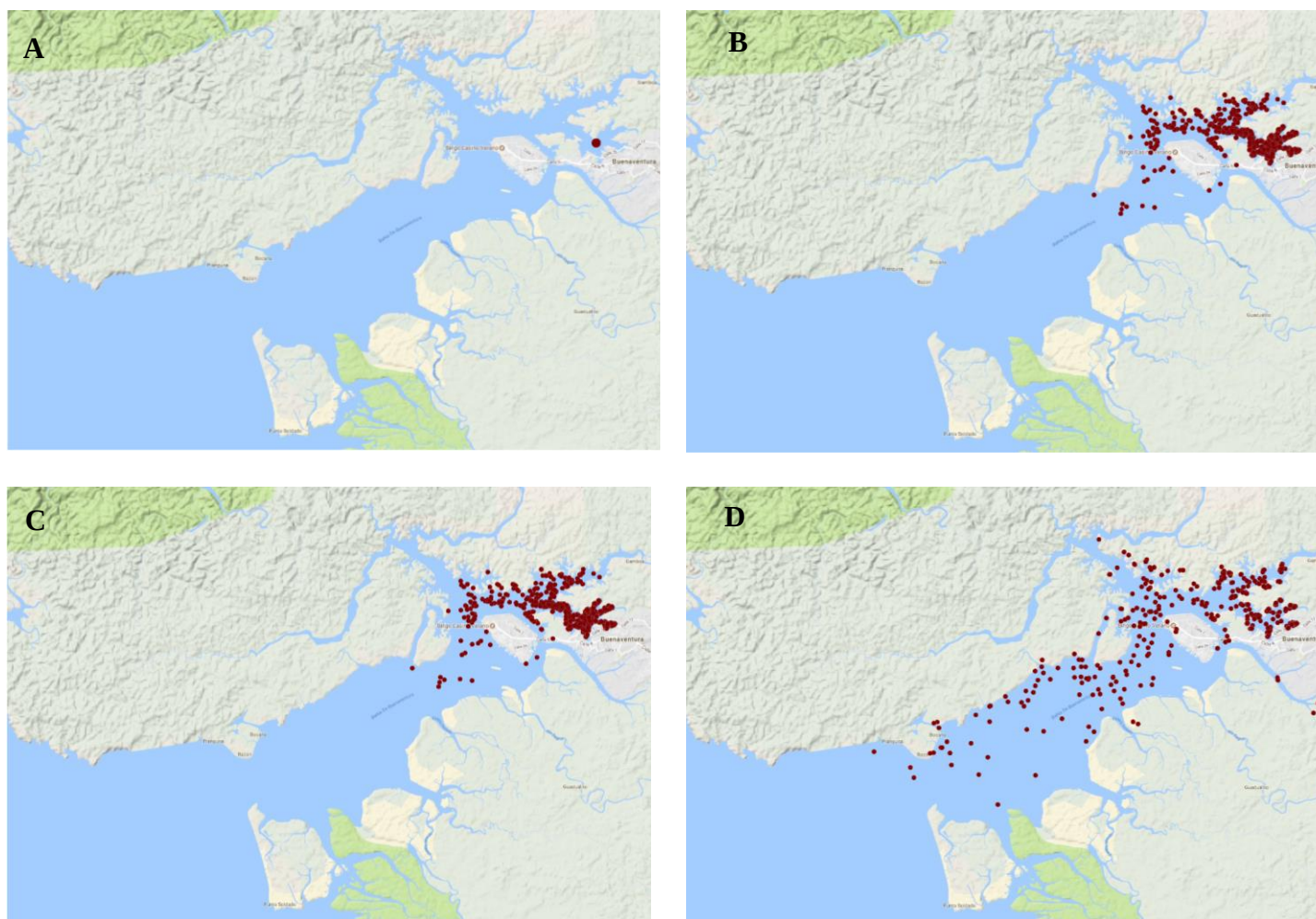


Figura 46. Desplazamiento neto de las partículas vertidas en el estero Aguacate en la bahía de Buenaventura para un ciclo cuasiquincenal de marea viva - marea muerta. Escenario 3: Marea viva media (rango de 4.23 m) y caudales fluviales mínimos. A) Instante $t=0$ días, B) Instante $t=5$ días, C) Instante $t=10$ días y D) Instante $t=15$ días

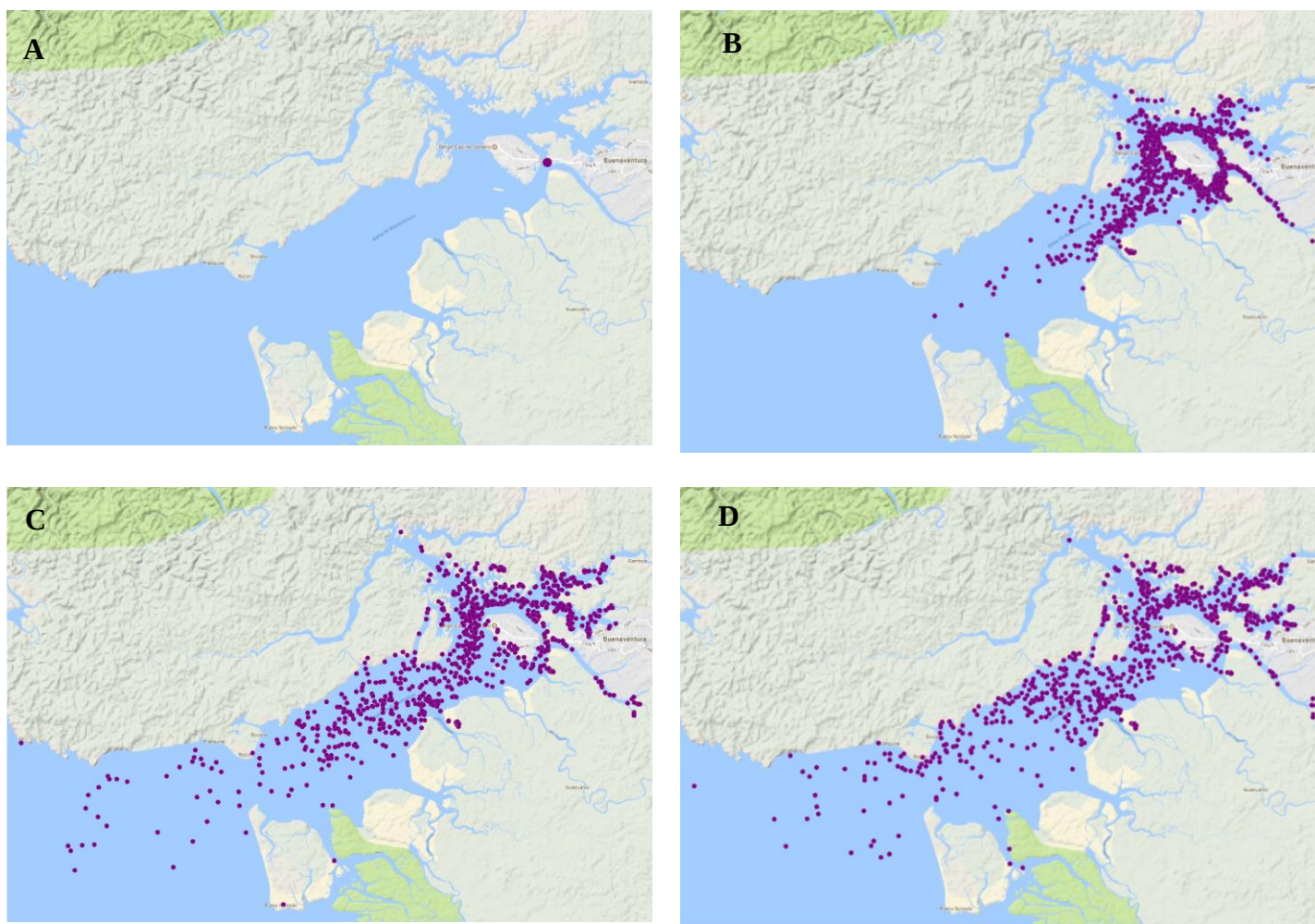


Figura 47. Desplazamiento neto de las partículas vertidas en la desembocadura del río San Antonio en la bahía de Buenaventura para un ciclo cuasiquincenal de marea viva - marea muerta. Escenario 3: Marea viva media (rango de 4.23 m) y caudales fluviales mínimos. A) Instante $t=0$ días, B) Instante $t=5$ días, C) Instante $t=10$ días y D) Instante $t=15$ días

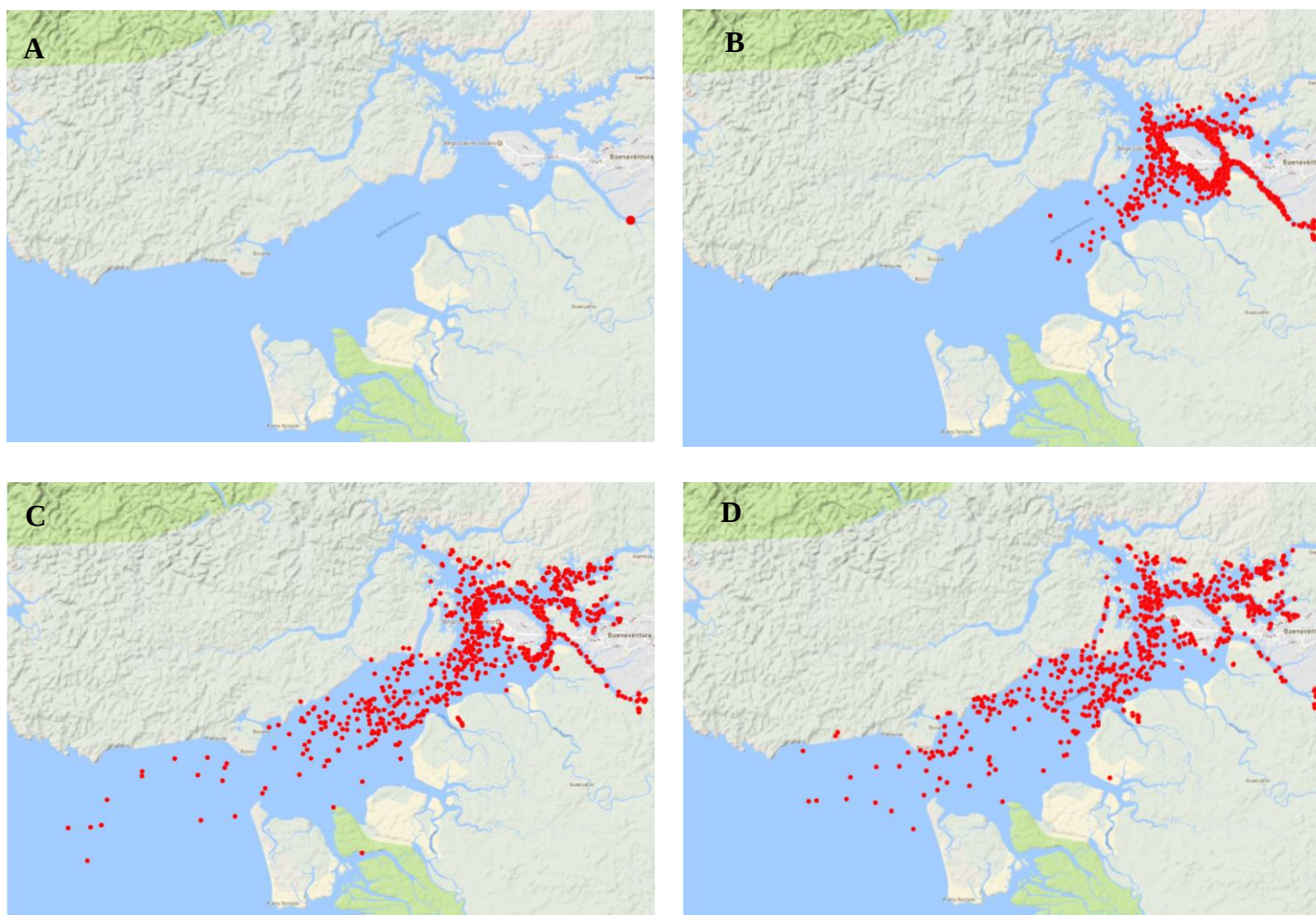


Figura 48. Desplazamiento neto de las partículas vertidas en la parte alta del río San Antonio en la bahía de Buenaventura para un ciclo cuasiquincenal de marea viva - marea muerta. Escenario 3: Marea viva máxima (rango de 4.23 m) y caudales fluviales mínimos. A) Instante $t=0$ días, B) Instante $t=5$ días, C) Instante $t=10$ días y D) Instante $t=15$ días

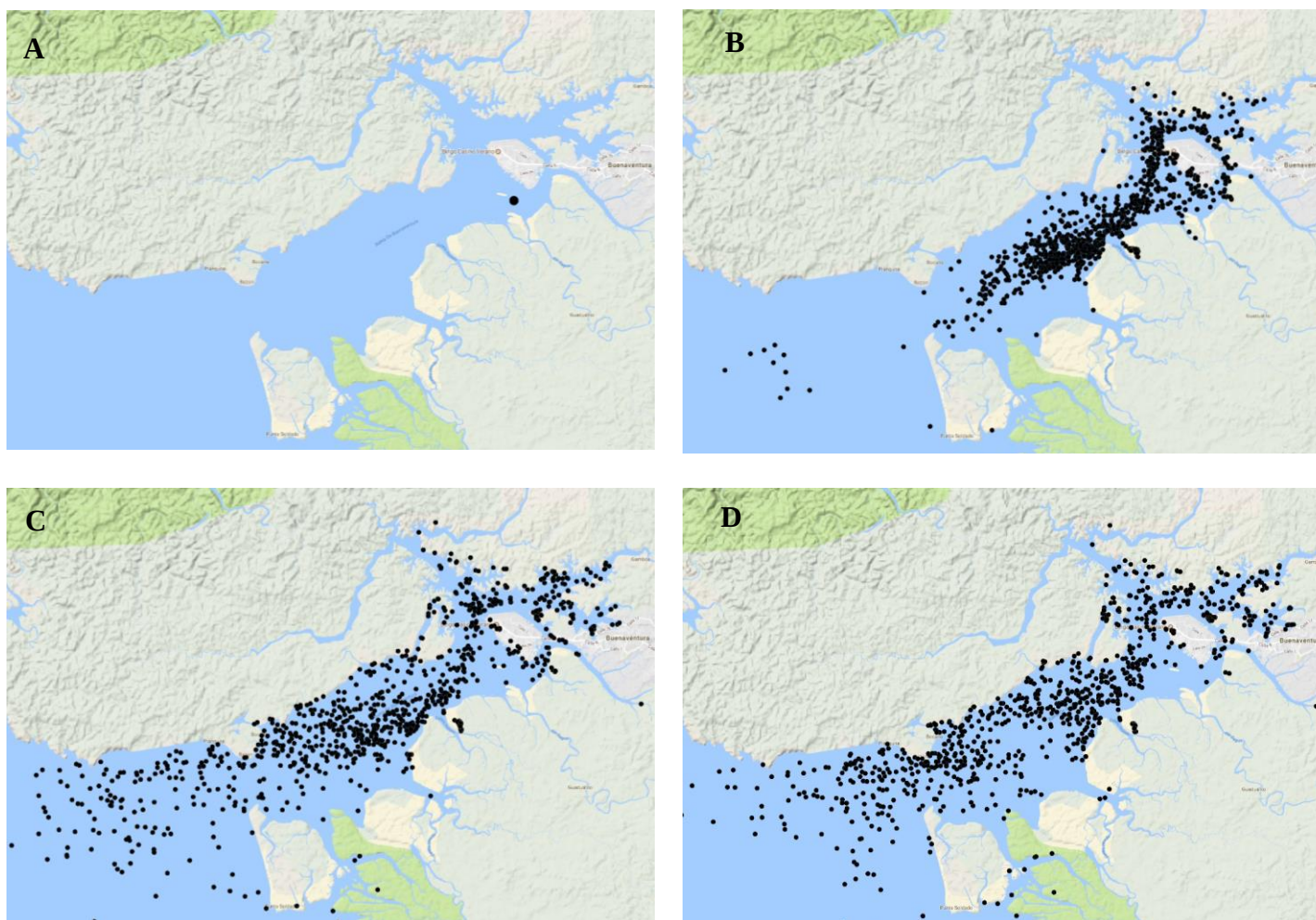


Figura 49. Desplazamiento neto de las partículas vertidas en el delta del río Dagua en la bahía de Buenaventura para un ciclo cuasiquincenal de marea viva - marea muerta. Escenario 3: Marea viva media (rango de 4.23 m) y caudales fluviales mínimos. A) Instante $t=0$ días, B) Instante $t=5$ días, C) Instante $t=10$ días y D) Instante $t=15$ días

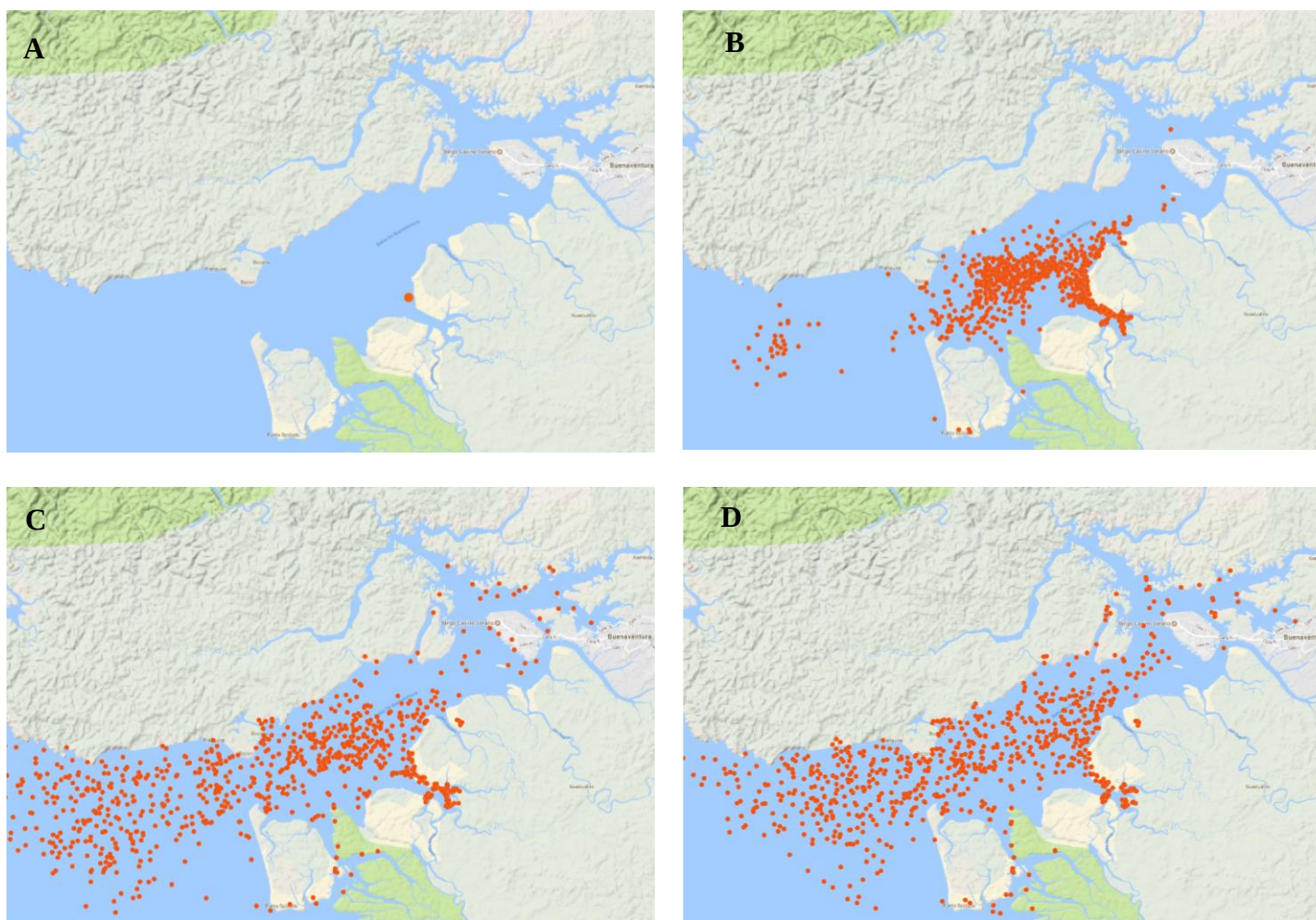


Figura 50. Desplazamiento neto de las partículas vertidas en la desembocadura del río Limones en la bahía de Buenaventura para un ciclo cuasiquincenal de marea viva - marea muerta. Escenario 3: Marea viva media (rango de 4.23 m) y caudales fluviales mínimos. A) Instante $t=0$ días, B) Instante $t=5$ días, C) Instante $t=10$ días y D) Instante $t=15$ días

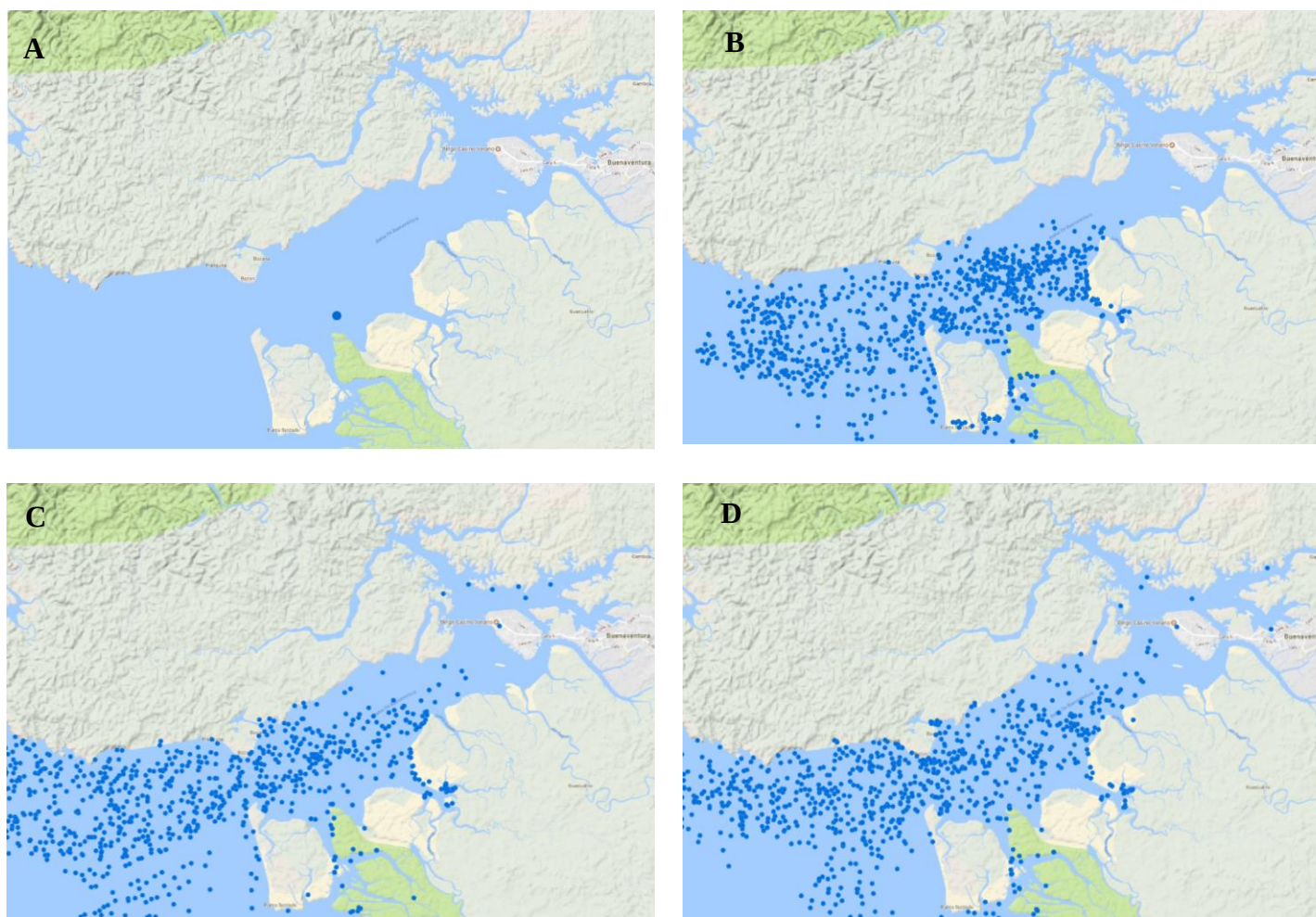


Figura 51. Desplazamiento neto de las partículas vertidas en la desembocadura del río Anchicayá en la bahía de Buenaventura para un ciclo cuasiquincenal de marea viva - marea muerta. Escenario 3: Marea viva media (rango de 4.23 m) y caudales fluviales mínimos. A) Instante $t=0$ días, B) Instante $t=5$ días, C) Instante $t=10$ días y D) Instante $t=15$ días

9.4 Escenario 4: Marea Viva Media (rango = 4.23 m) y Caudales Fluviales Máximos

En las Figuras 52 y 53 se presentan los resultados de las corrientes residuales Eulerianas en la bahía de Buenaventura, donde es posible observar el patrón de circulación y la magnitud de las velocidades residuales.

En las Figuras 54 a 62 se muestran los resultados de las corrientes residuales Lagrangianas en la bahía de Buenaventura, en las cuales es posible apreciar el desplazamiento neto de los trazadores o partículas para cada uno de los diferentes sitios de vertimientos.

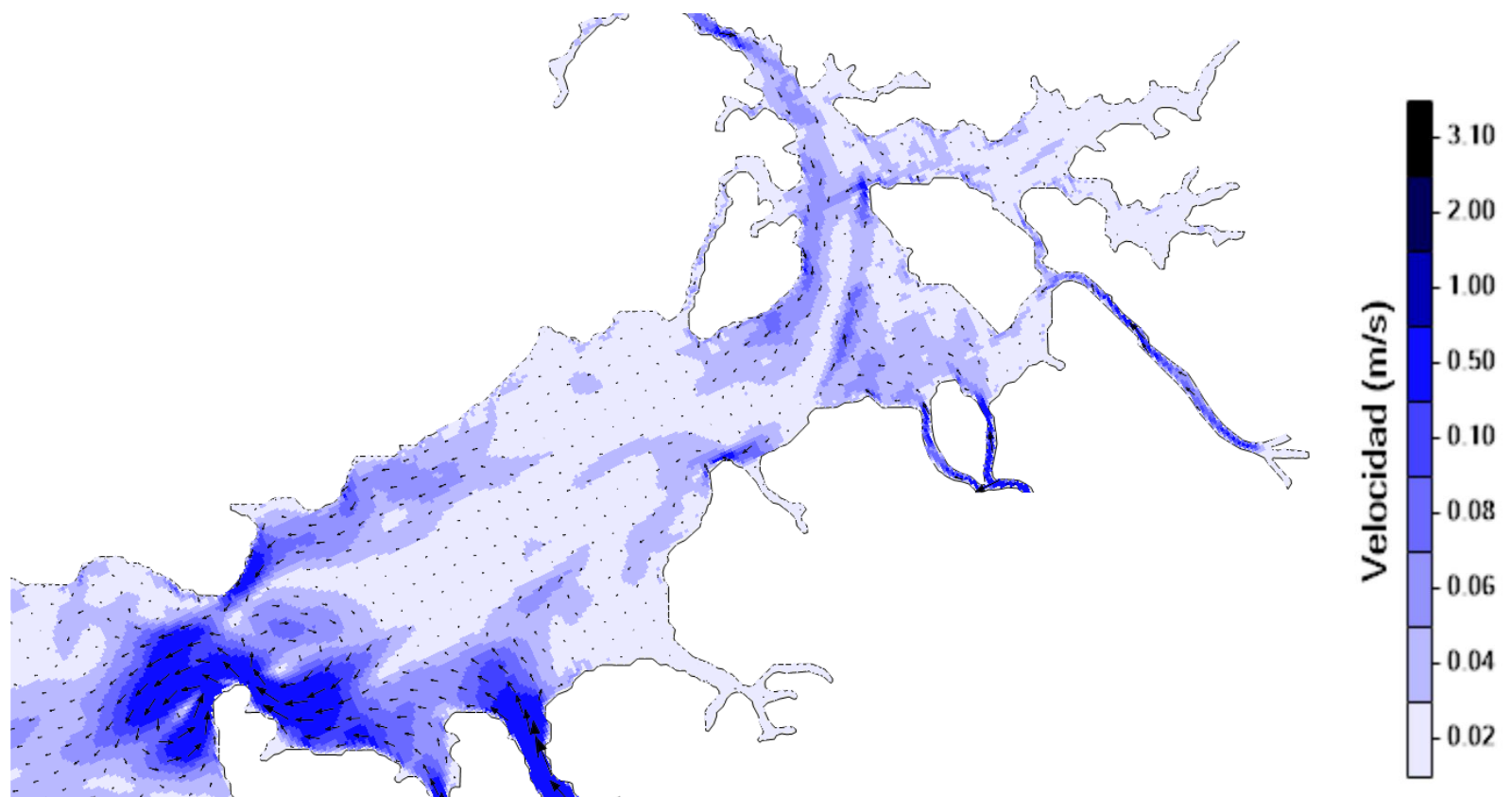


Figura 52. Corrientes residuales Eulerianas en la bahía de Buenaventura para un ciclo cuasiquincenal de marea viva - marea muerta. Escenario 4: Marea viva media (rango de 4.23 m) y caudales fluviales máximos

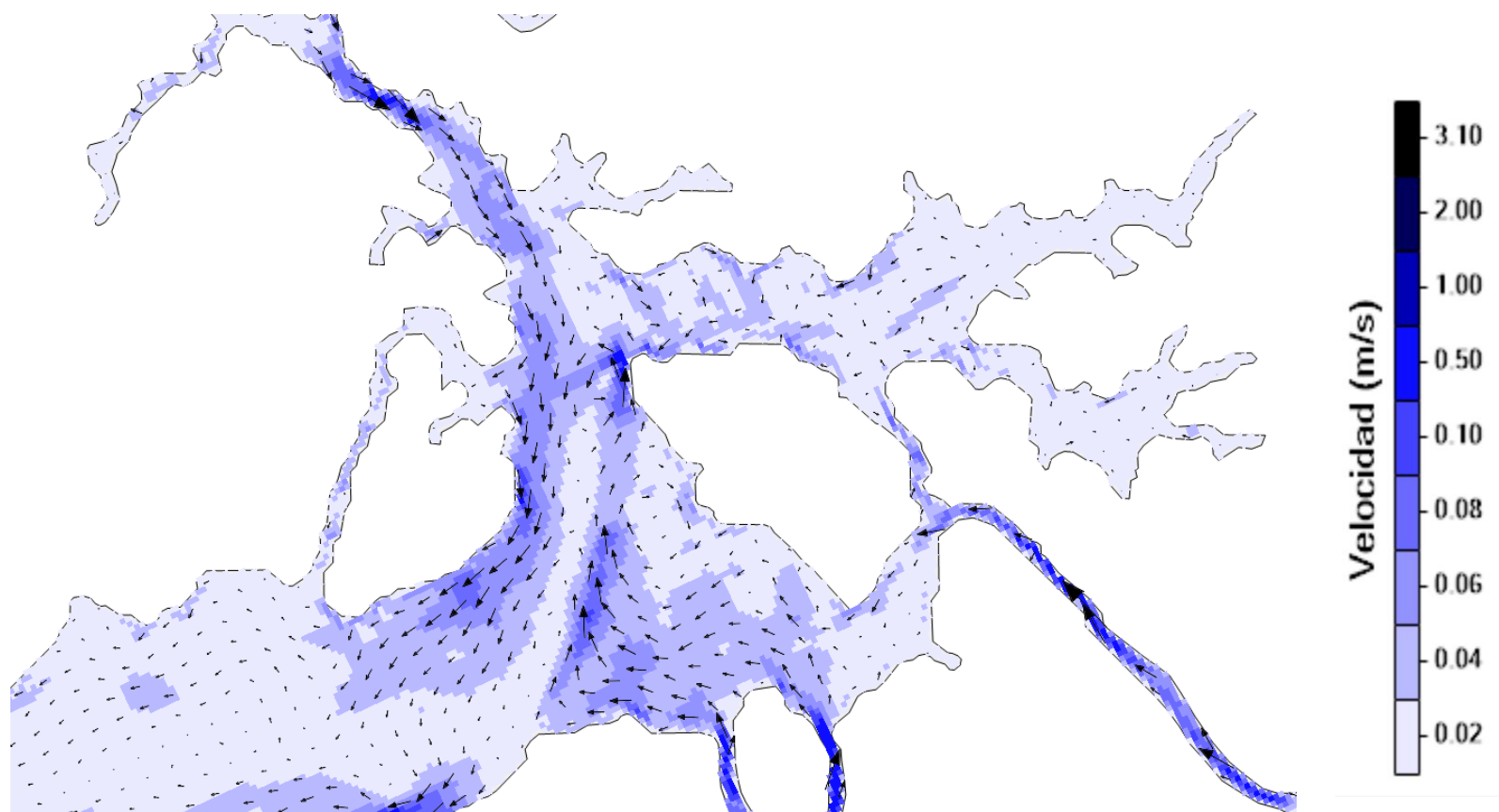


Figura 53. Corrientes residuales Eulerianas alrededor de la isla Cascajal para un ciclo cuasiquincenal de marea viva - marea muerta. Escenario 4: Marea viva media (rango de 4.23 m) y caudales fluviales máximos

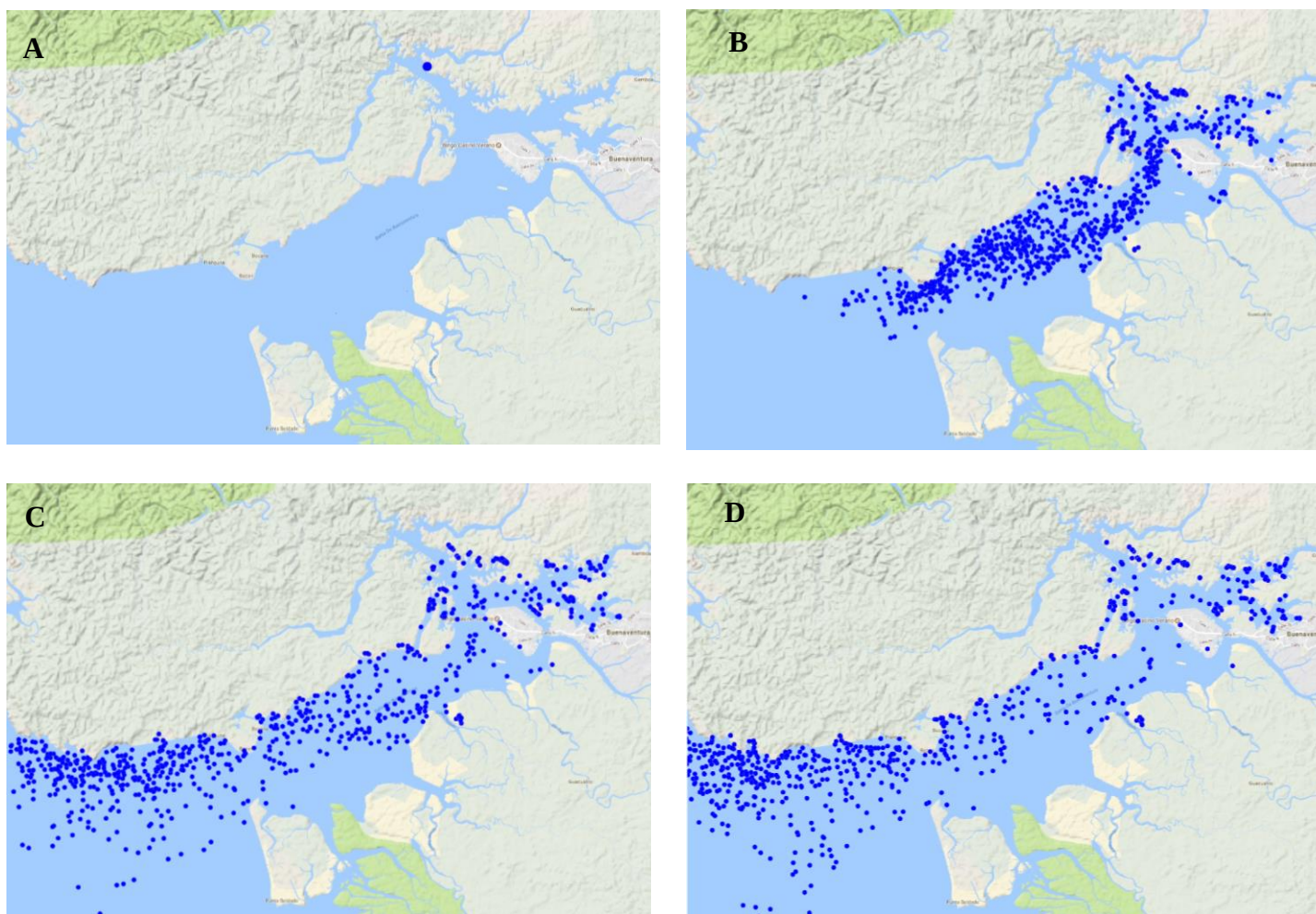


Figura 54. Desplazamiento neto de las partículas vertidas en el estero San Antonio en la bahía de Buenaventura para un ciclo cuasiquincenal de marea viva - marea muerta. Escenario 4: Marea viva media (rango de 4.23 m) y caudales fluviales máximos. A) Instante $t=0$ días, B) Instante $t=5$ días, C) Instante $t=10$ días y D) Instante $t=15$ días

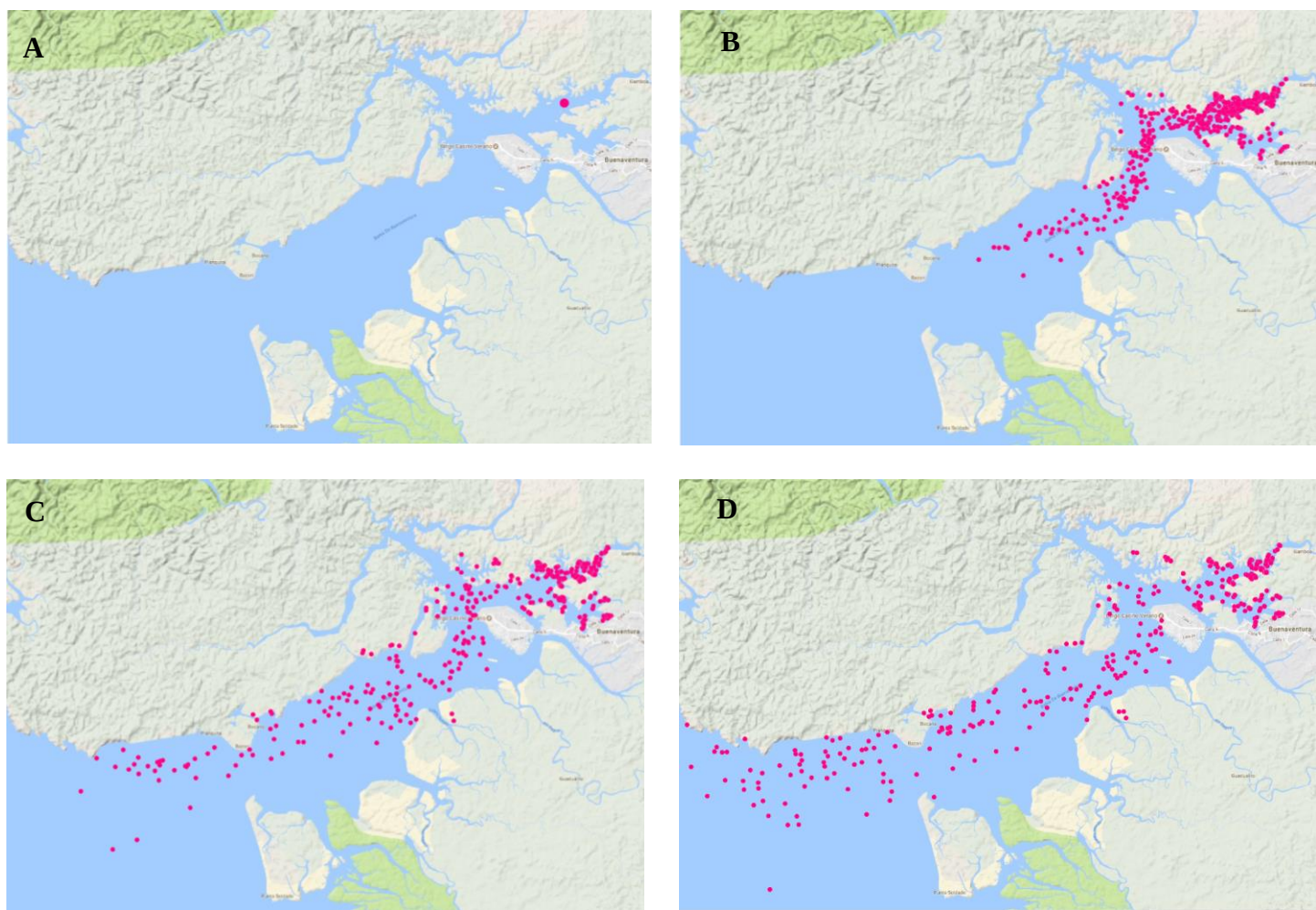


Figura 55. Desplazamiento neto de las partículas vertidas en el estero Gamboa en la bahía de Buenaventura para un ciclo cuasiquincenal de marea viva - marea muerta. Escenario 4: Marea viva media (rango de 4.23 m) y caudales fluviales máximos. A) Instante $t=0$ días, B) Instante $t=5$ días, C) Instante $t=10$ días y D) Instante $t=15$ días

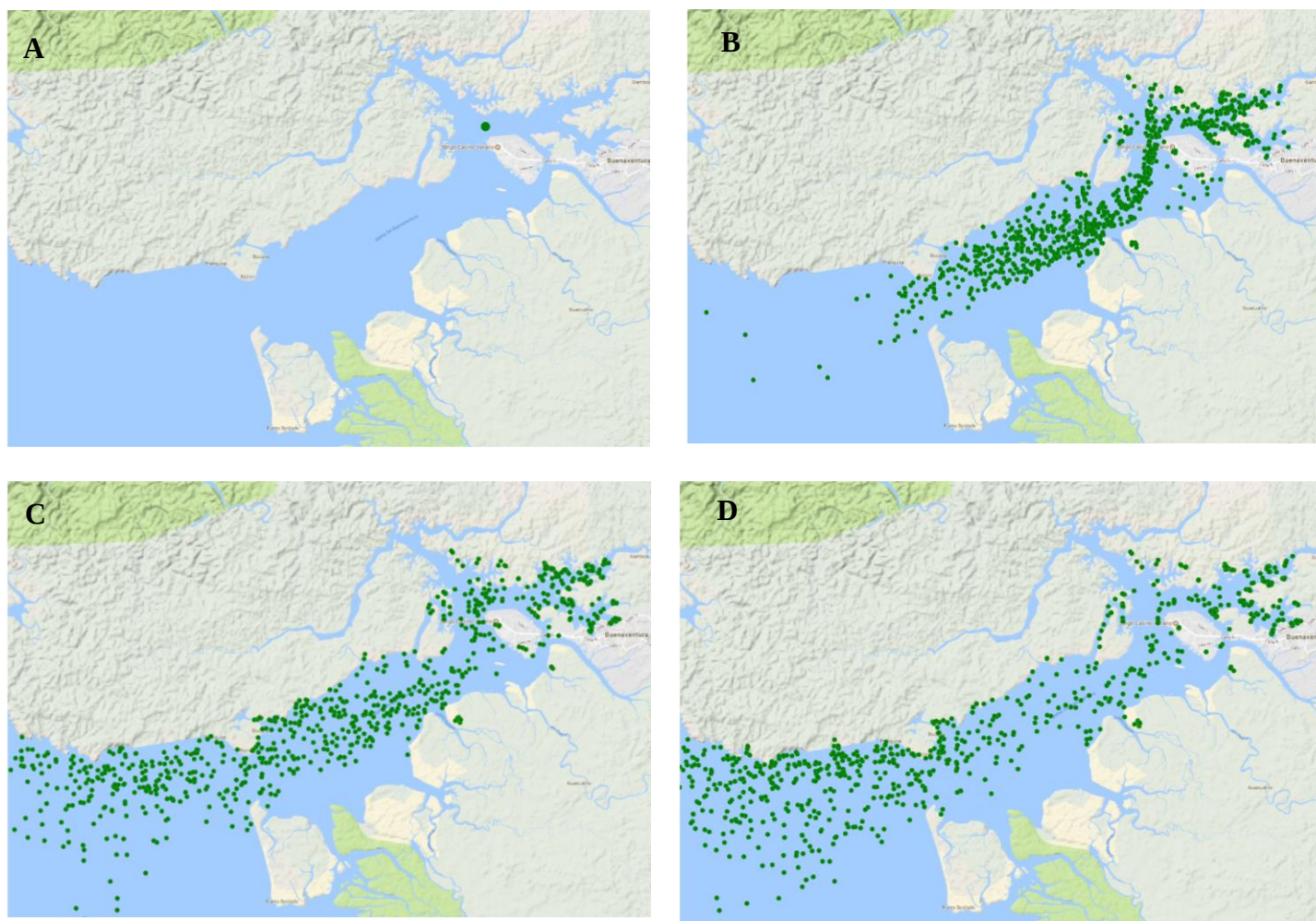


Figura 56. Desplazamiento neto de las partículas vertidas en el Muelle en la bahía de Buenaventura para un ciclo cuasiquincenal de marea viva - marea muerta. Escenario 4: Marea viva media (rango de 4.23 m) y caudales fluviales máximos. A) Instante $t=0$ días, B) Instante $t=5$ días, C) Instante $t=10$ días y D) Instante $t=15$ días

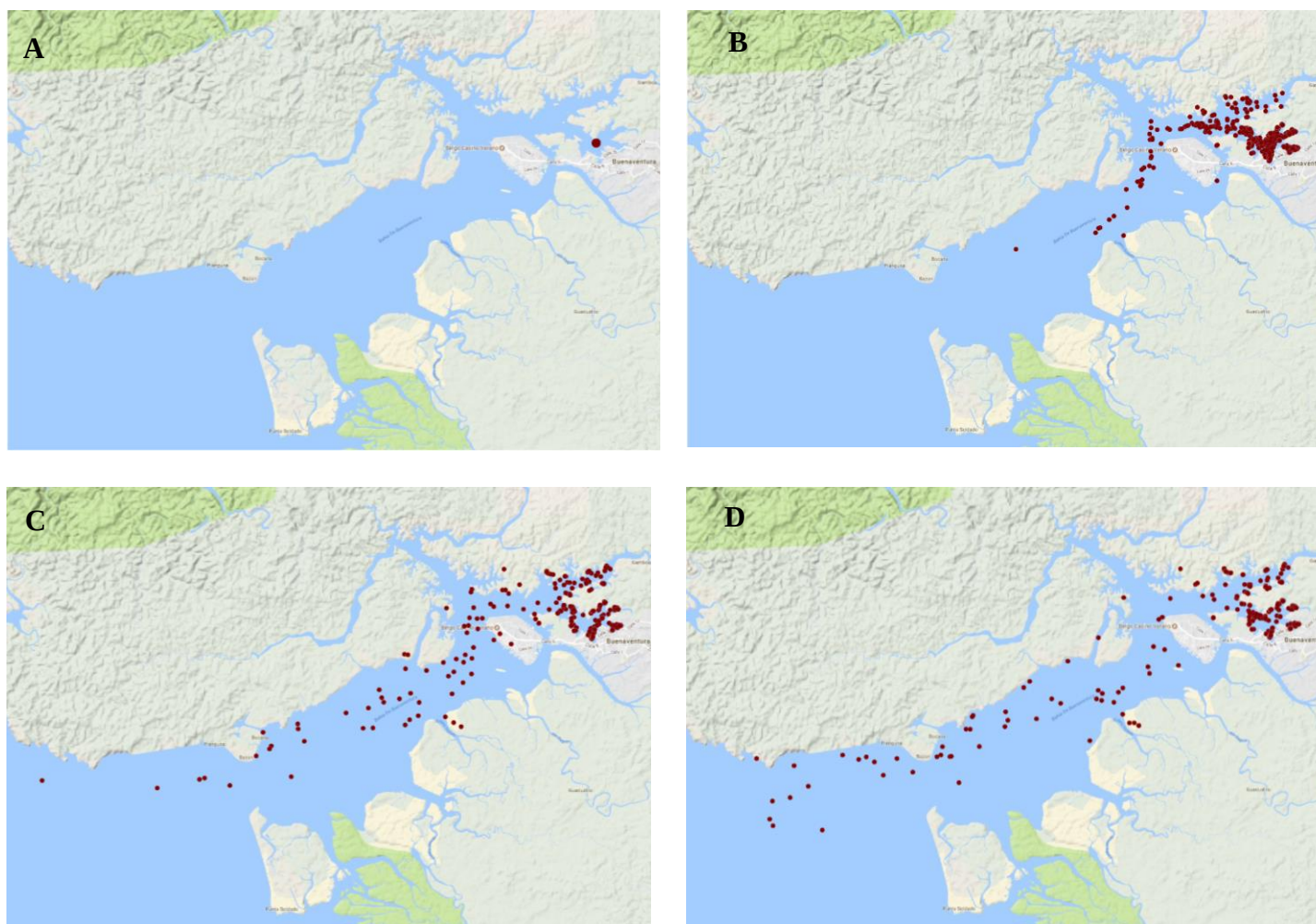


Figura 57. Desplazamiento neto de las partículas vertidas en el estero Aguacate en la bahía de Buenaventura para un ciclo cuasiquincenal de marea viva - marea muerta. Escenario 4: Marea viva media (rango de 4.23 m) y caudales fluviales máximos. A) Instante $t=0$ días, B) Instante $t=5$ días, C) Instante $t=10$ días y D) Instante $t=15$ días

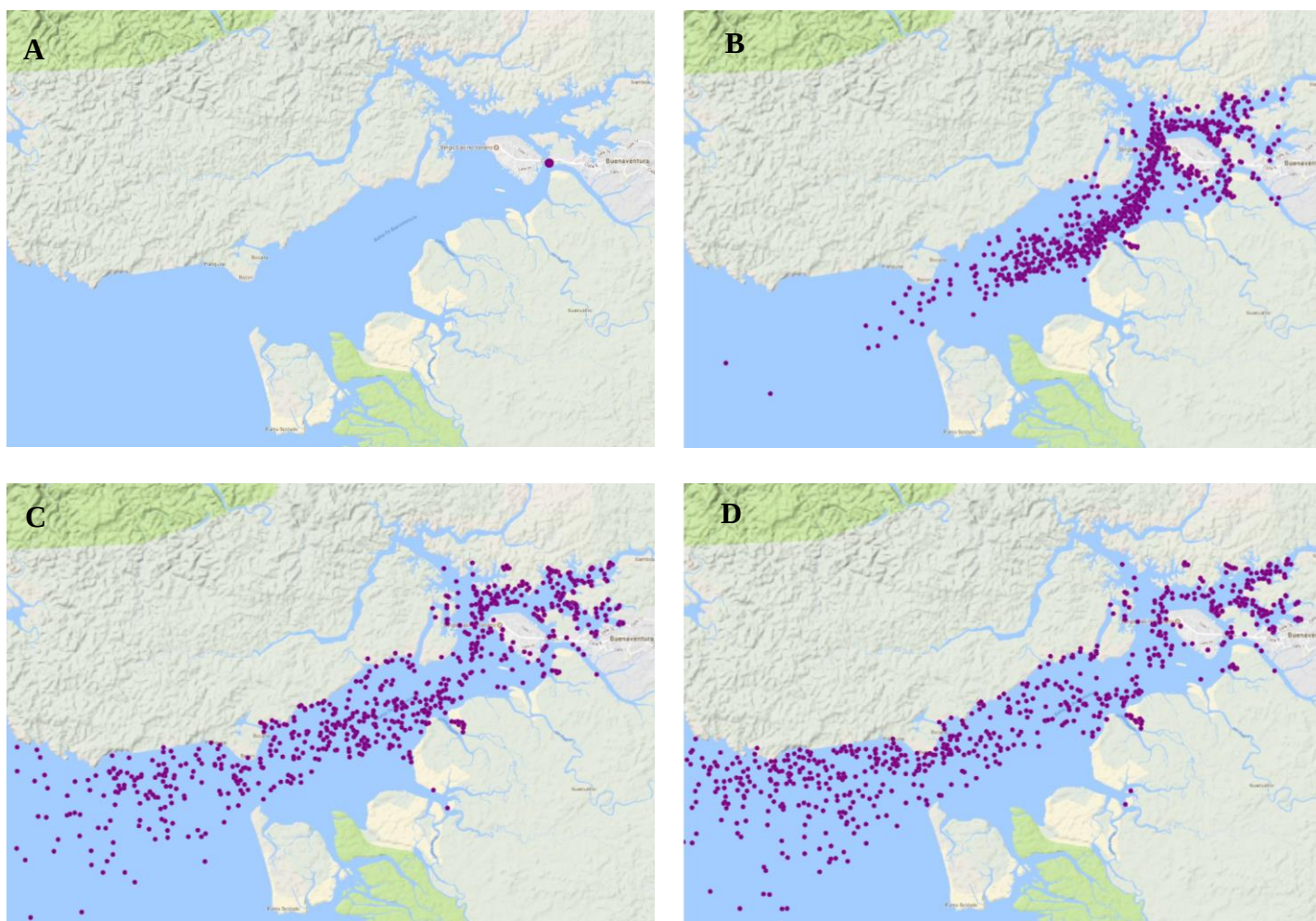


Figura 58.. Desplazamiento neto de las partículas vertidas en la desembocadura del río San Antonio en la bahía de Buenaventura para un ciclo cuasiquincenal de marea viva - marea muerta. Escenario 4: Marea viva media (rango de 4.23 m) y caudales fluviales máximos. A) Instante $t=0$ días, B) Instante $t=5$ días, C) Instante $t=10$ días y D) Instante $t=15$ días

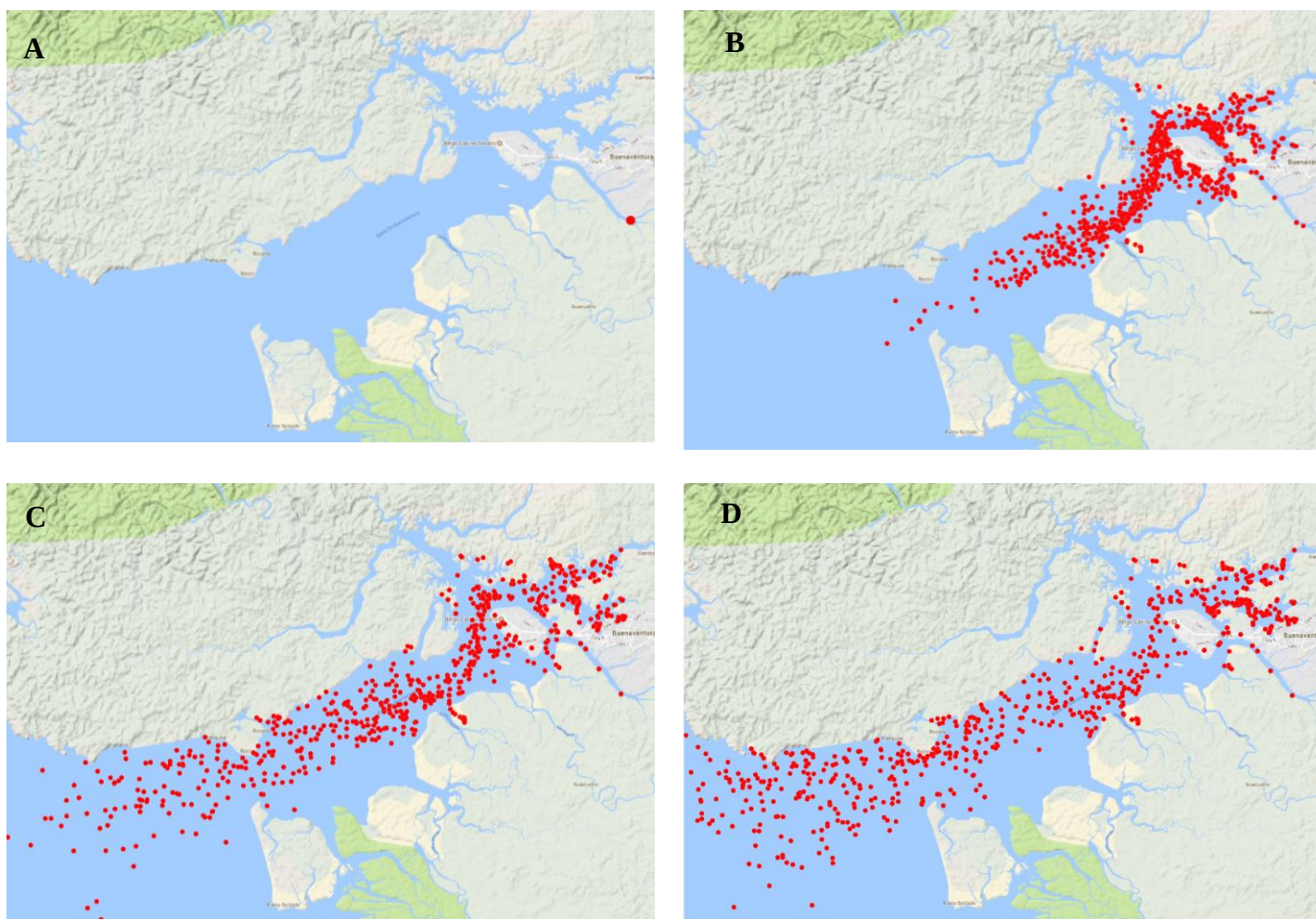


Figura 59. Desplazamiento neto de las partículas vertidas en la parte alta del río San Antonio en la bahía de Buenaventura para un ciclo cuasiquincenal de marea viva - marea muerta. Escenario 4: Marea viva media (rango de 4.23 m) y caudales fluviales máximos. A) Instante $t=0$ días, B) Instante $t=5$ días, C) Instante $t=10$ días y D) Instante $t=15$ días

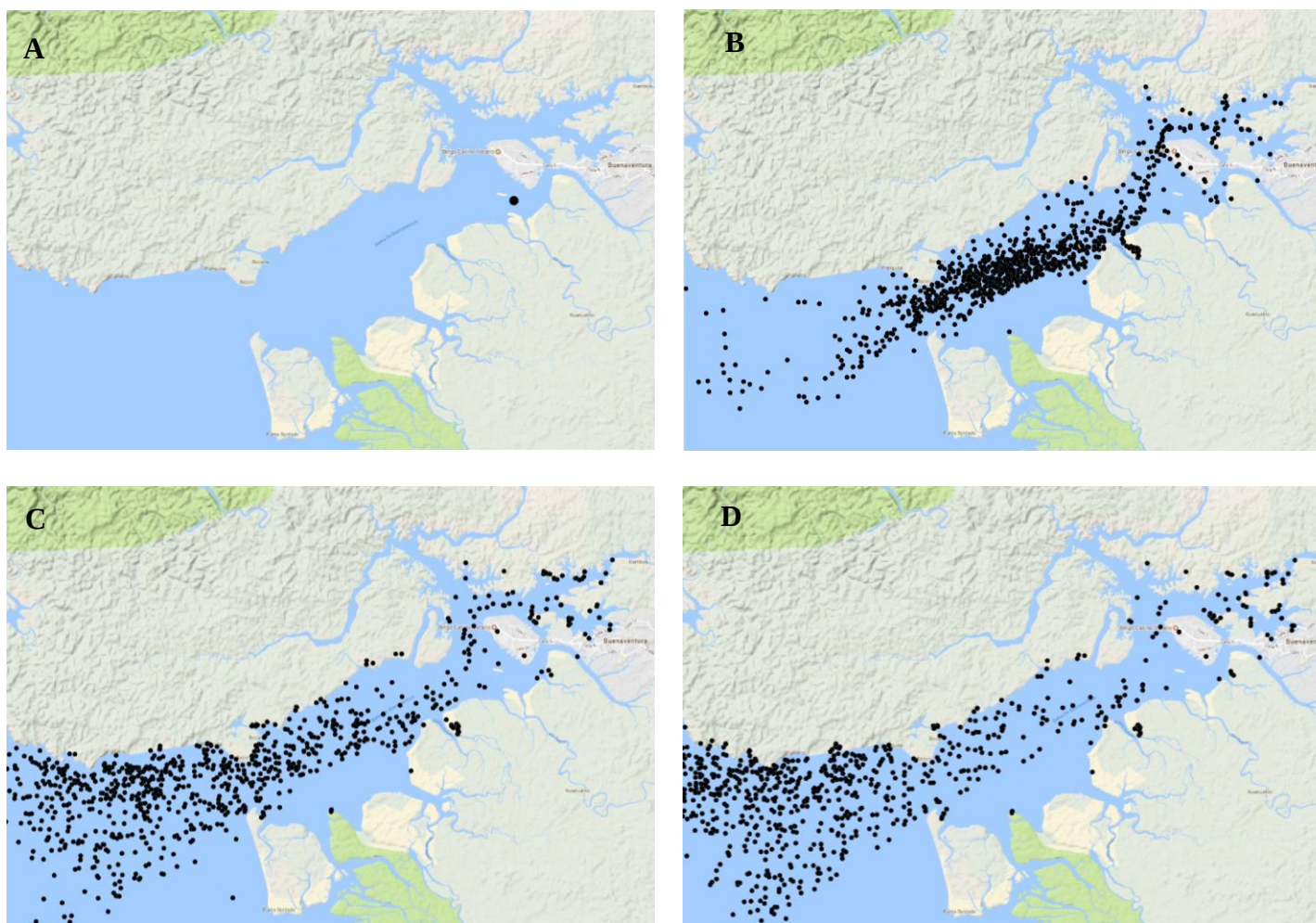


Figura 60. Desplazamiento neto de las partículas vertidas en el delta del río Dagua en la bahía de Buenaventura para un ciclo cuasiquincenal de marea viva - marea muerta. Escenario 4: Marea viva media (rango de 4.23 m) y caudales fluviales máximos. A) Instante $t=0$ días, B) Instante $t=5$ días, C) Instante $t=10$ días y D) Instante $t=15$ días

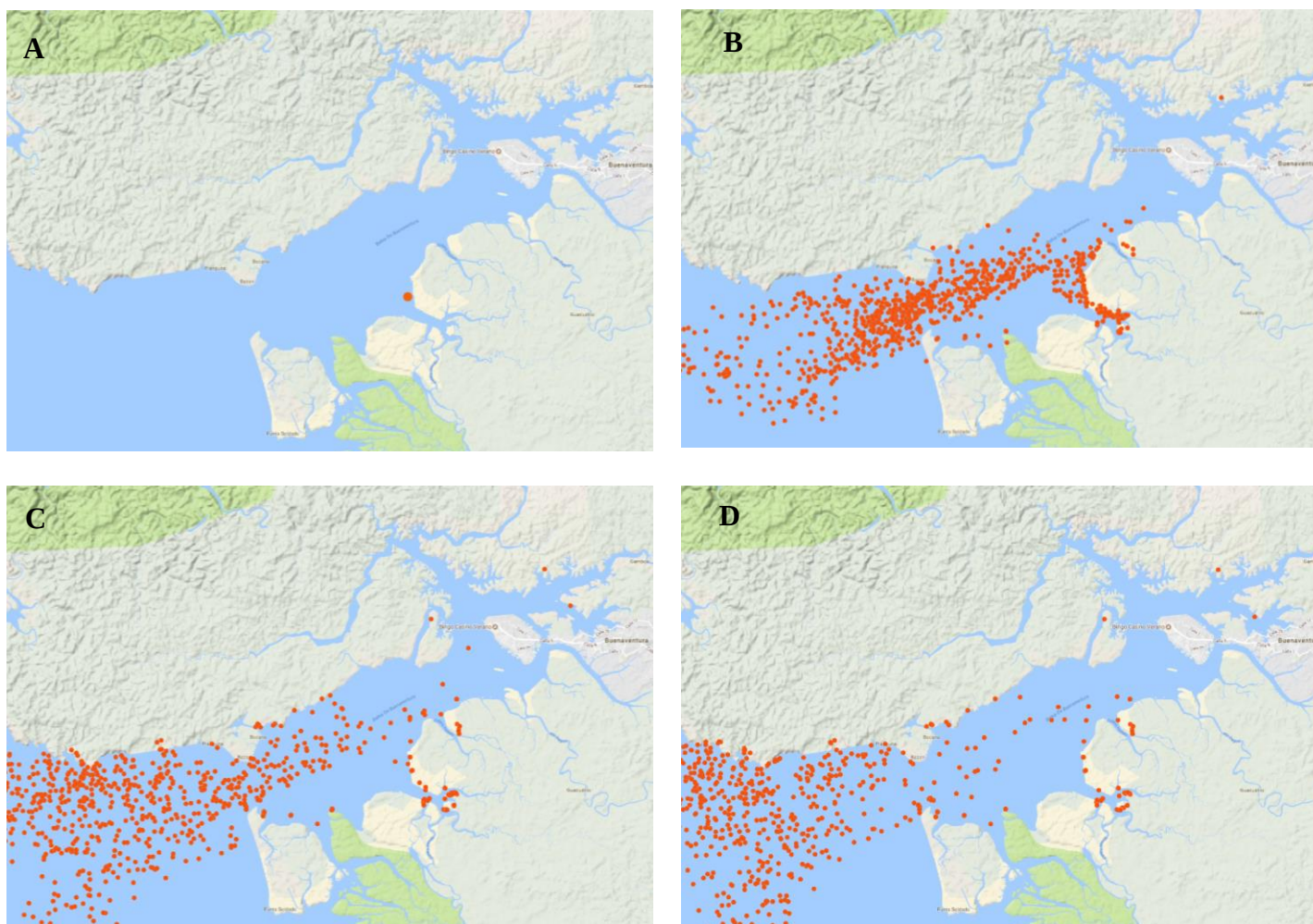


Figura 61. Desplazamiento neto de las partículas vertidas en la desembocadura del río Limónes en la bahía de Buenaventura para un ciclo cuasiquincenal de marea viva - marea muerta. Escenario 4: Marea viva media (rango de 4.23 m) y caudales fluviales máximos. A) Instante $t=0$ días, B) Instante $t=5$ días, C) Instante $t=10$ días y D) Instante $t=15$ días

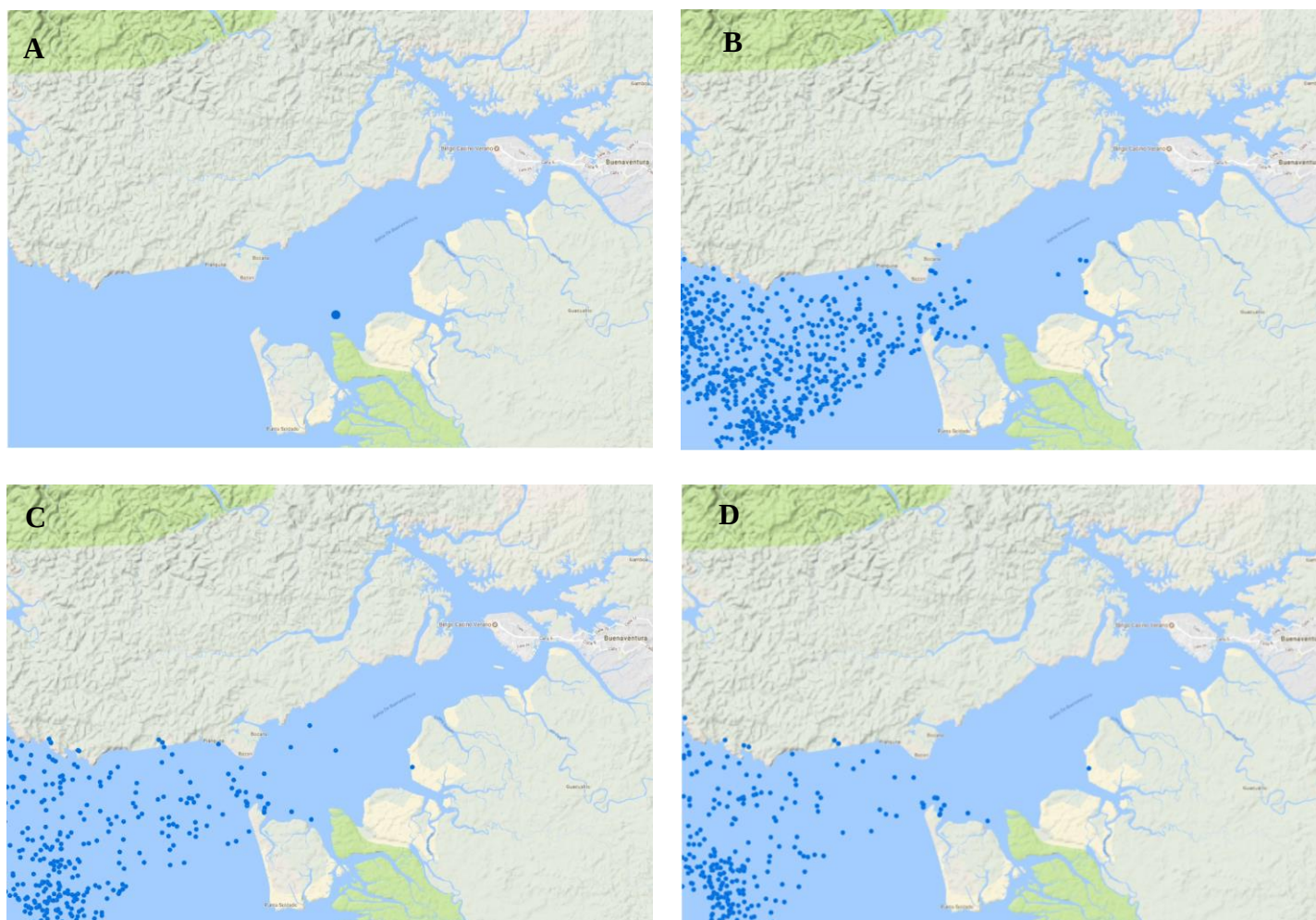


Figura 62. Desplazamiento neto de las partículas vertidas en la desembocadura del río Anchicayá en la bahía de Buenaventura para un ciclo cuasiquincenal de marea viva - marea muerta. Escenario 4: Marea viva media (rango de 4.23 m) y caudales fluviales máximos. A) Instante $t=0$ días, B) Instante $t=5$ días, C) Instante $t=10$ días y D) Instante $t=15$ días

9.5 Escenario 5: Marea Viva Mínima (rango = 3.54 m) y Caudales Fluviales Mínimos

En las Figuras 63 y 64 se presentan los resultados de las corrientes residuales Eulerianas en la bahía de Buenaventura, donde es posible observar el patrón de circulación y la magnitud de las velocidades residuales.

En las Figuras 65 a 73 se muestran los resultados de las corrientes residuales Lagrangianas en la bahía de Buenaventura, en las cuales es posible apreciar el desplazamiento neto de los trazadores o partículas para cada uno de los diferentes sitios de vertimientos.

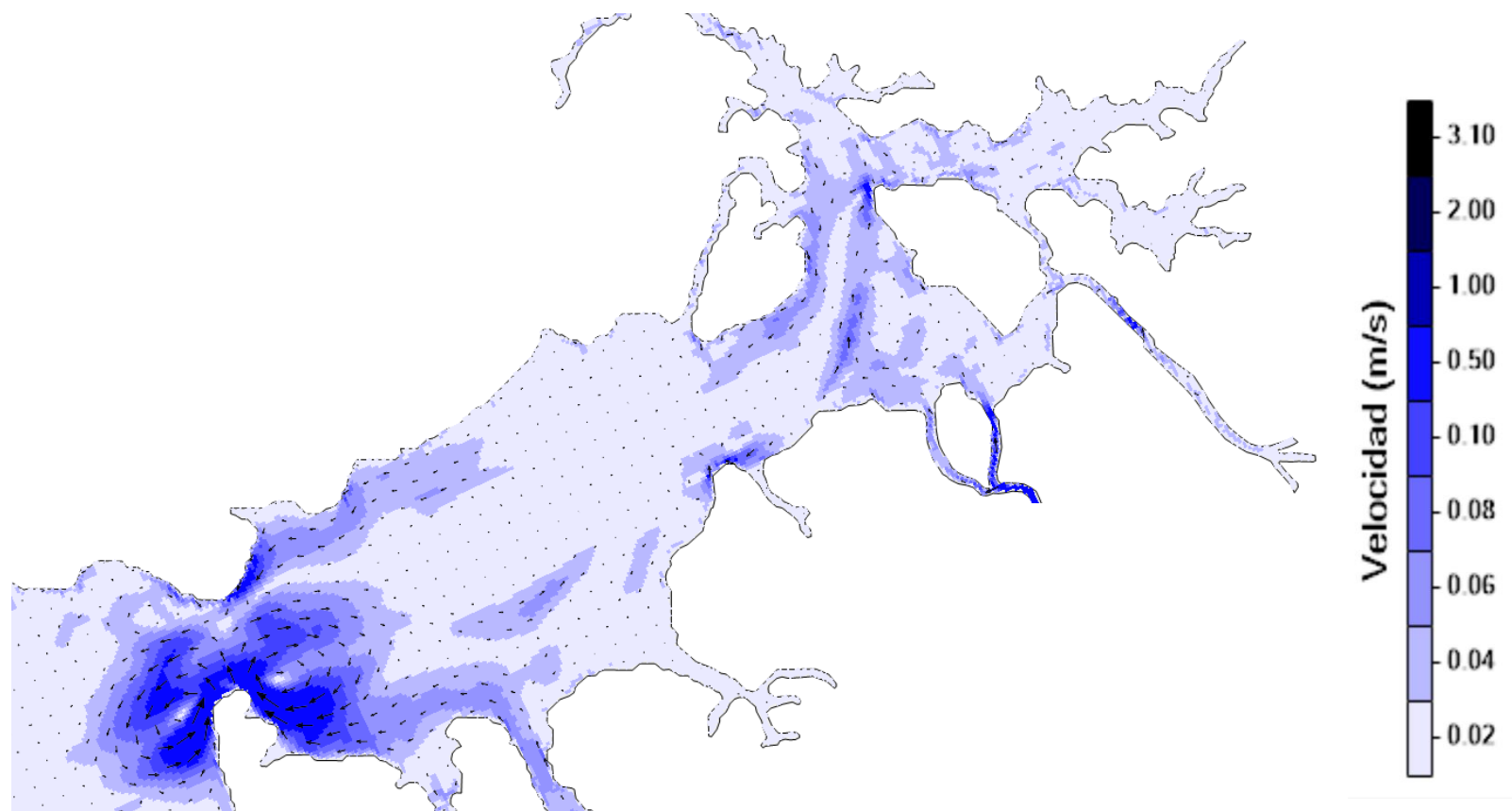


Figura 63. Corrientes residuales Eulerianas en la bahía de Buenaventura para un ciclo cuasiquincenal de marea viva - marea muerta. Escenario 5: Marea viva mínima (rango de 3.54 m) y caudales fluviales mínimos

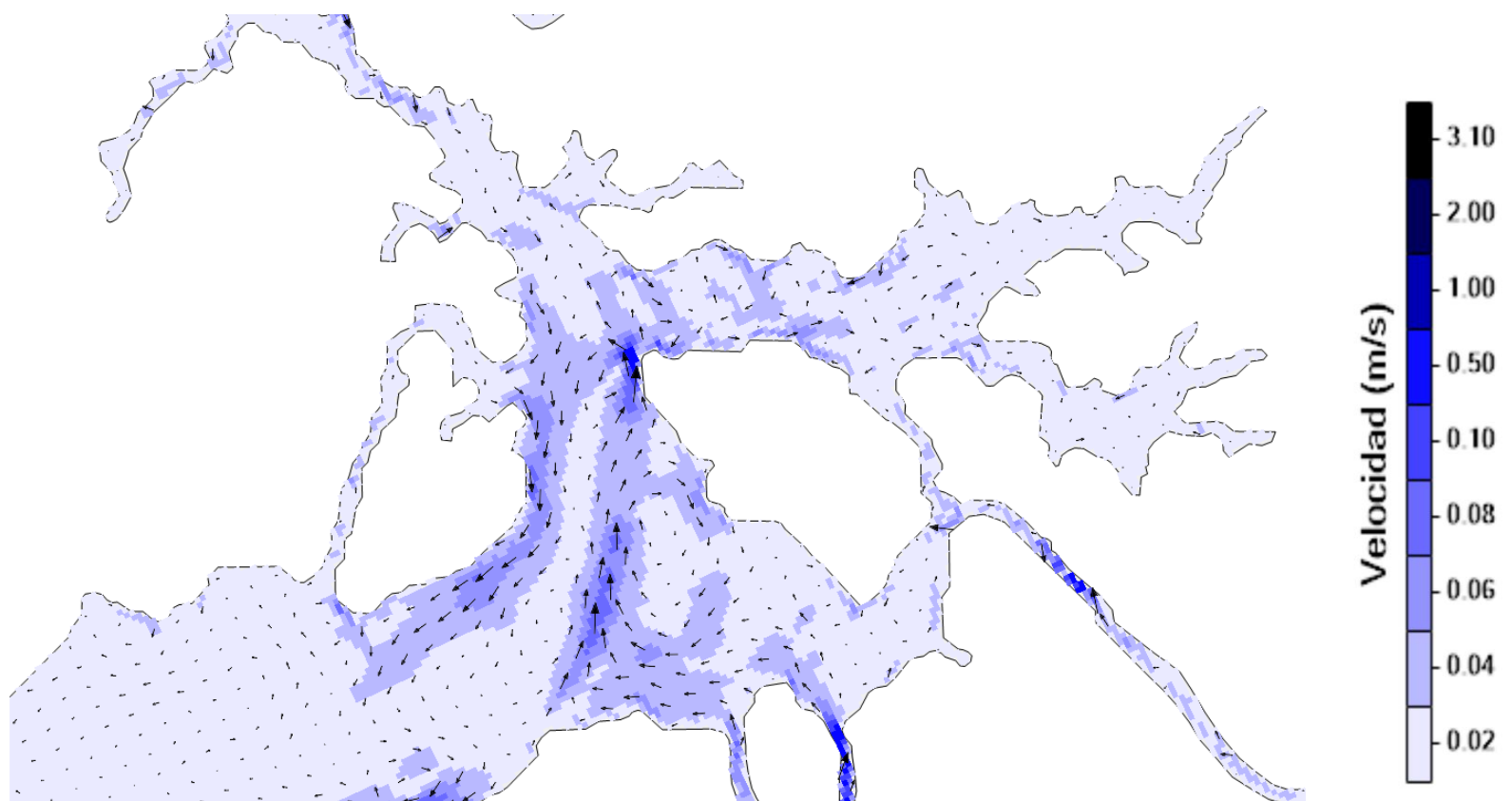


Figura 64. Corrientes residuales Eulerianas alrededor de la isla Cascajal para un ciclo cuasiquincenal de marea viva - marea muerta. Escenario 5: Marea viva mínima (rango de 3.54 m) y caudales fluviales mínimos

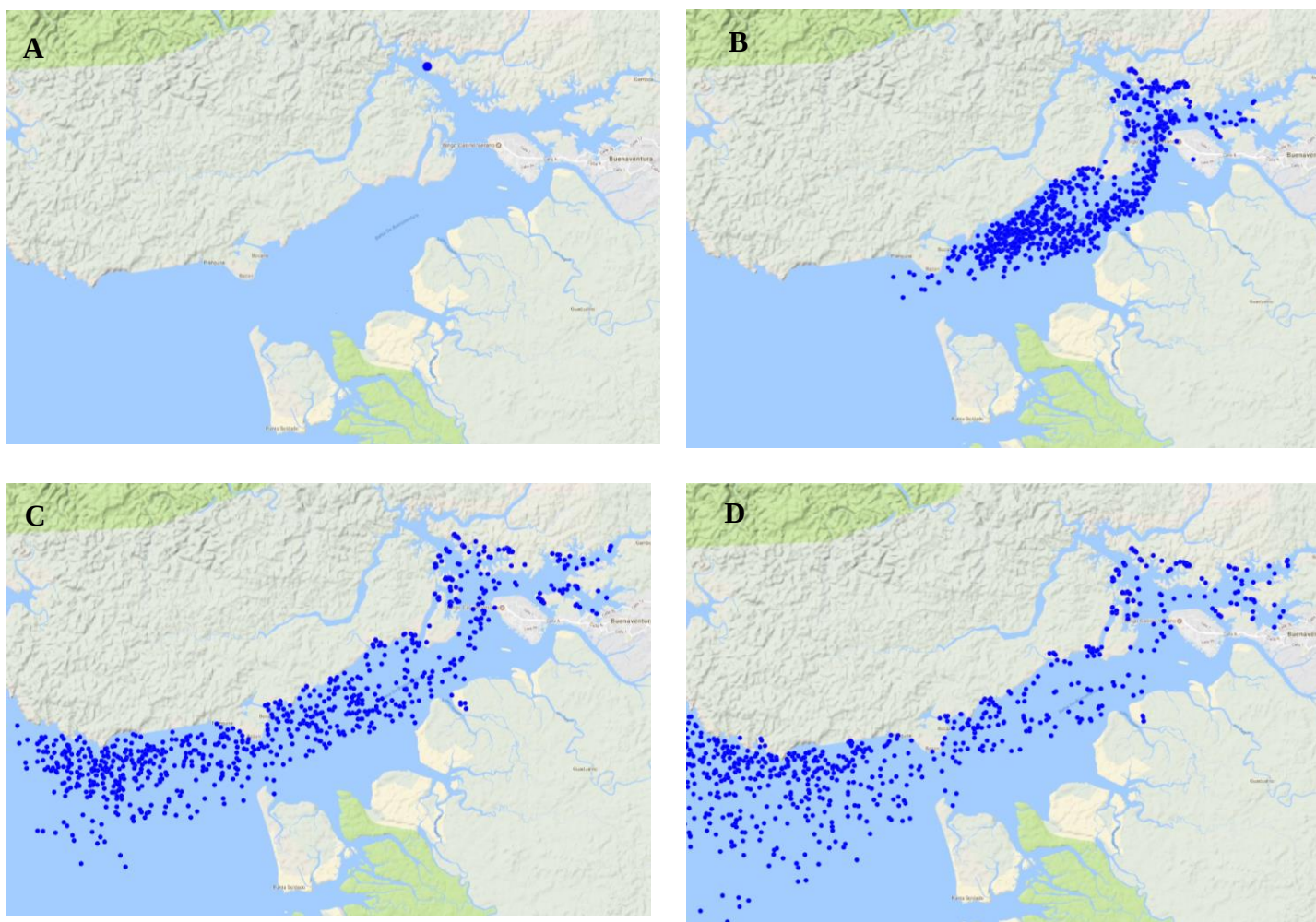


Figura 65. Desplazamiento neto de las partículas vertidas en el estero San Antonio en la bahía de Buenaventura para un ciclo cuasiquincenal de marea viva - marea muerta. Escenario 5: Marea viva mínima (rango de 3.54 m) y caudales fluviales mínimos. A) Instante $t=0$ días, B) Instante $t=5$ días, C) Instante $t=10$ días y D) Instante $t=15$ días

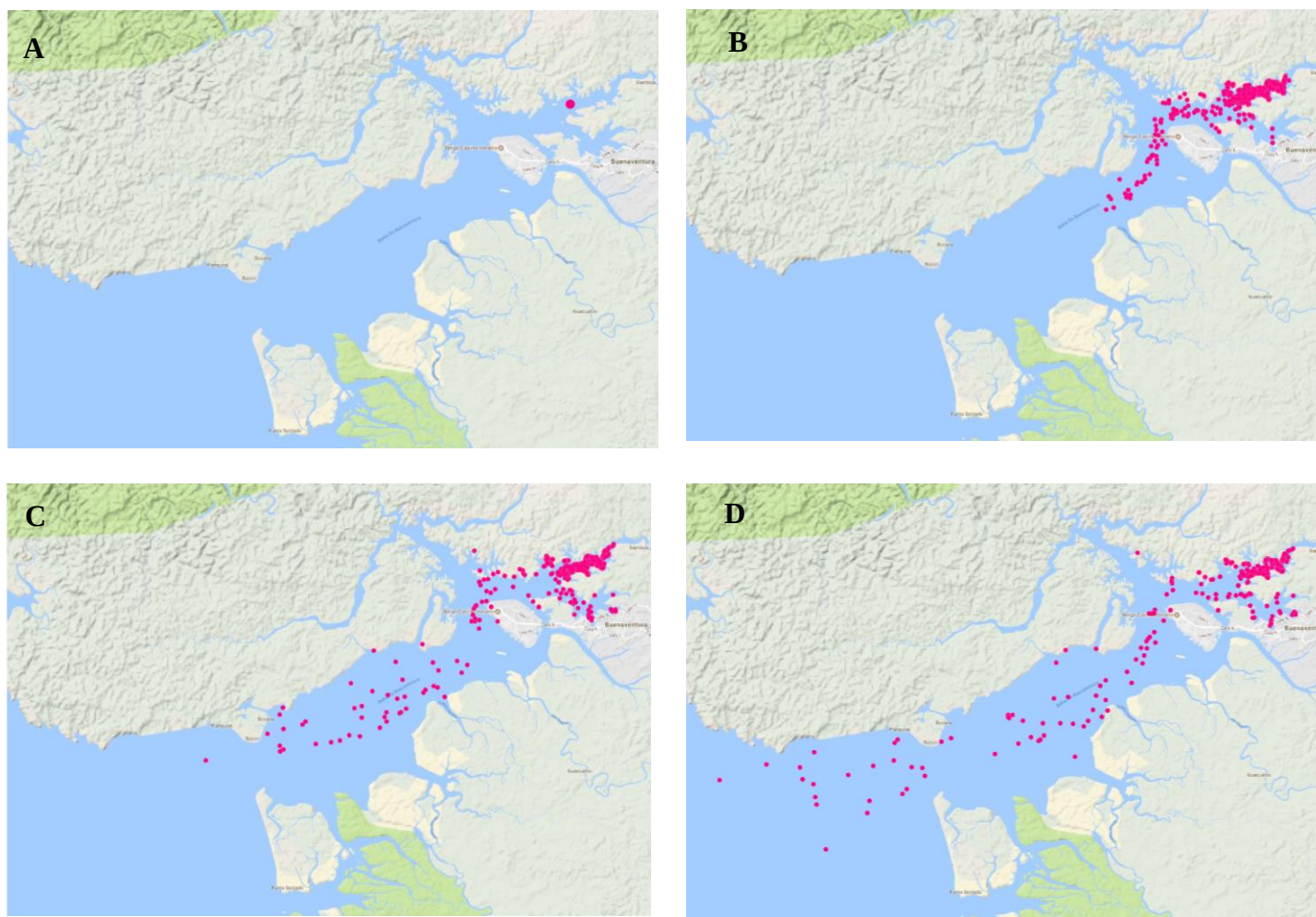


Figura 66. Desplazamiento neto de las partículas vertidas en el estero Gamboa en la bahía de Buenaventura para un ciclo cuasiquincenal de marea viva - marea muerta. Escenario 5: Marea viva mínima (rango de 3.54 m) y caudales fluviales mínimos. A) Instante $t=0$ días, B) Instante $t=5$ días, C) Instante $t=10$ días y D) Instante $t=15$ días

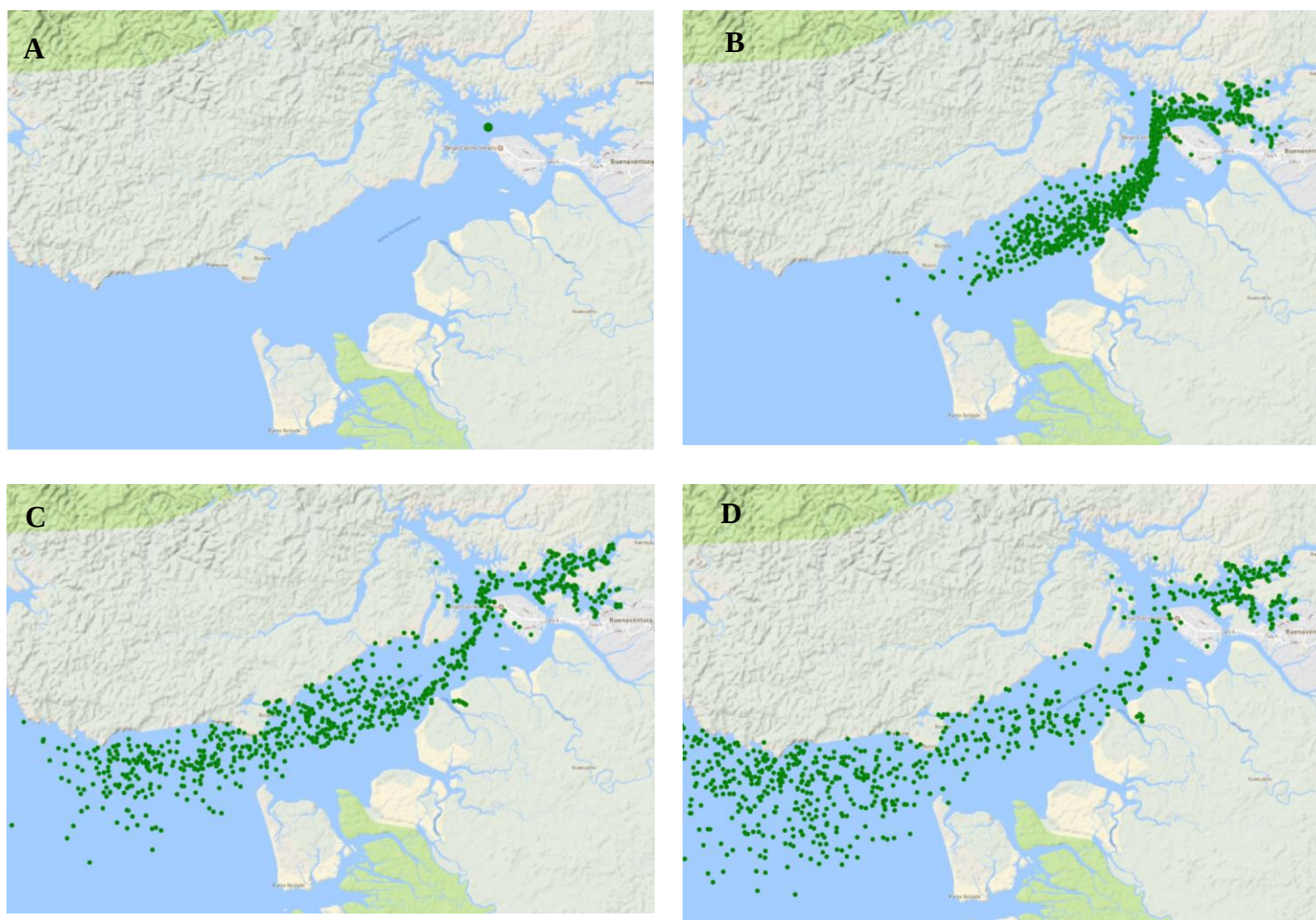


Figura 67. Desplazamiento neto de las partículas vertidas en el Muelle en la bahía de Buenaventura para un ciclo cuasiquincenal de marea viva - marea muerta. Escenario 5: Marea viva mínima (rango de 3.54 m) y caudales fluviales mínimos. A) Instante $t=0$ días, B) Instante $t=5$ días, C) Instante $t=10$ días y D) Instante $t=15$ días

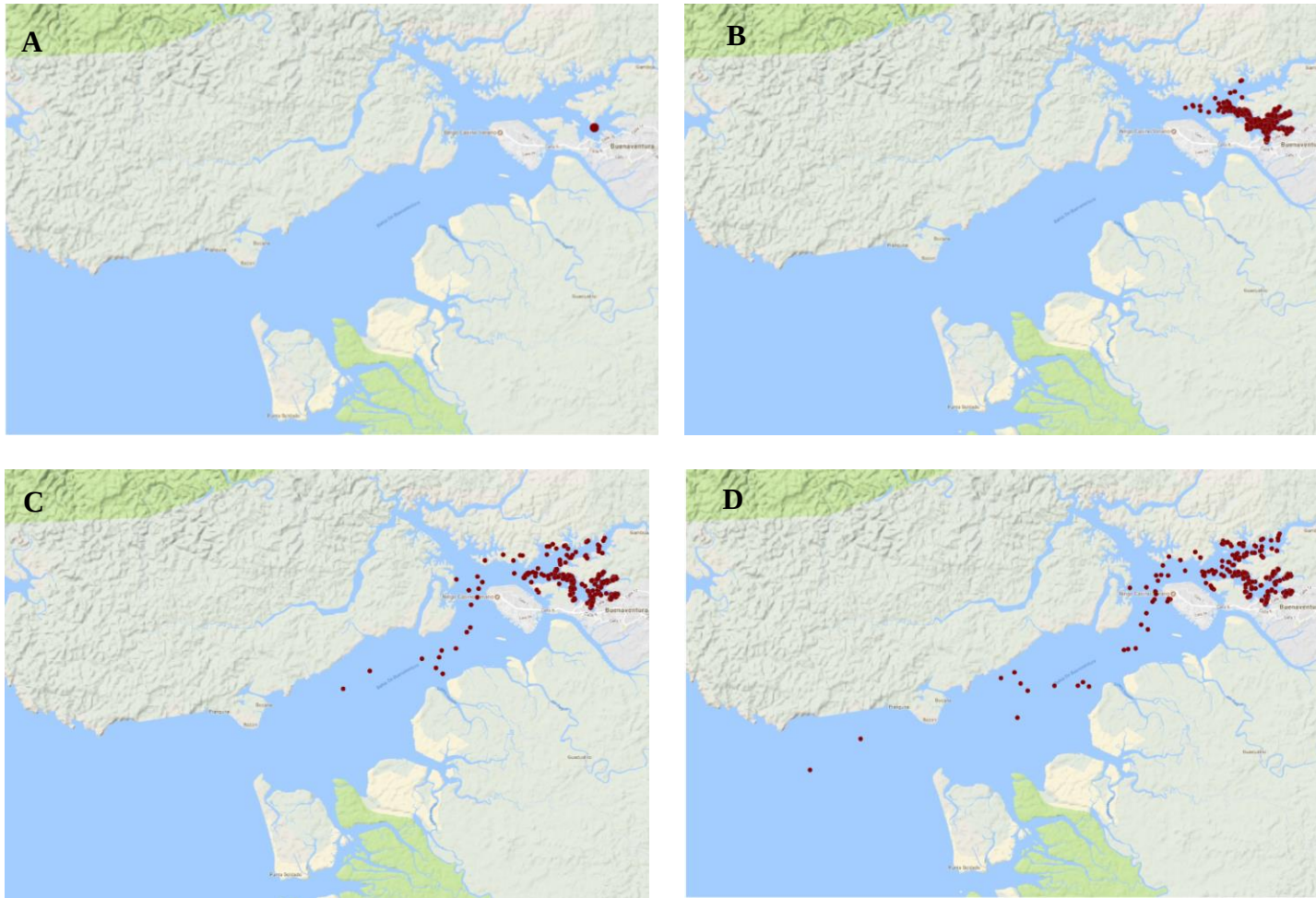


Figura 68. Desplazamiento neto de las partículas vertidas en el estero Aguacate en la bahía de Buenaventura para un ciclo cuasiquincenal de marea viva - marea muerta. Escenario 5: Marea viva mínima (rango de 3.54 m) y caudales fluviales mínimos. A) Instante $t=0$ días, B) Instante $t=5$ días, C) Instante $t=10$ días y D) Instante $t=15$ días

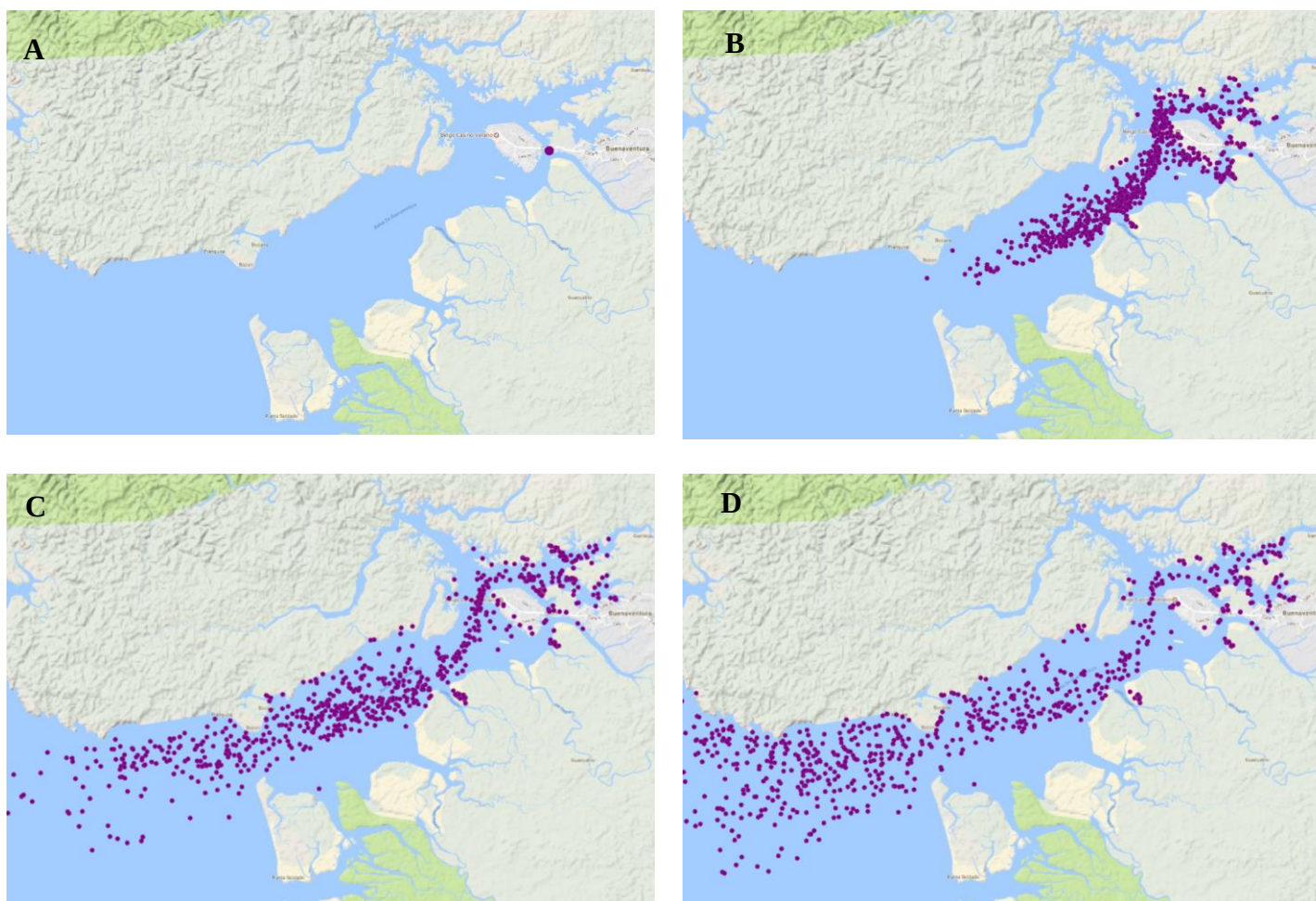


Figura 69. Desplazamiento neto de las partículas vertidas en la desembocadura del río San Antonio en la bahía de Buenaventura para un ciclo cuasiquincenal de marea viva - marea muerta. Escenario 5: Marea viva mínima (rango de 3.54 m) y caudales fluviales mínimos. A) Instante $t=0$ días, B) Instante $t=5$ días, C) Instante $t=10$ días y D) Instante $t=15$ días

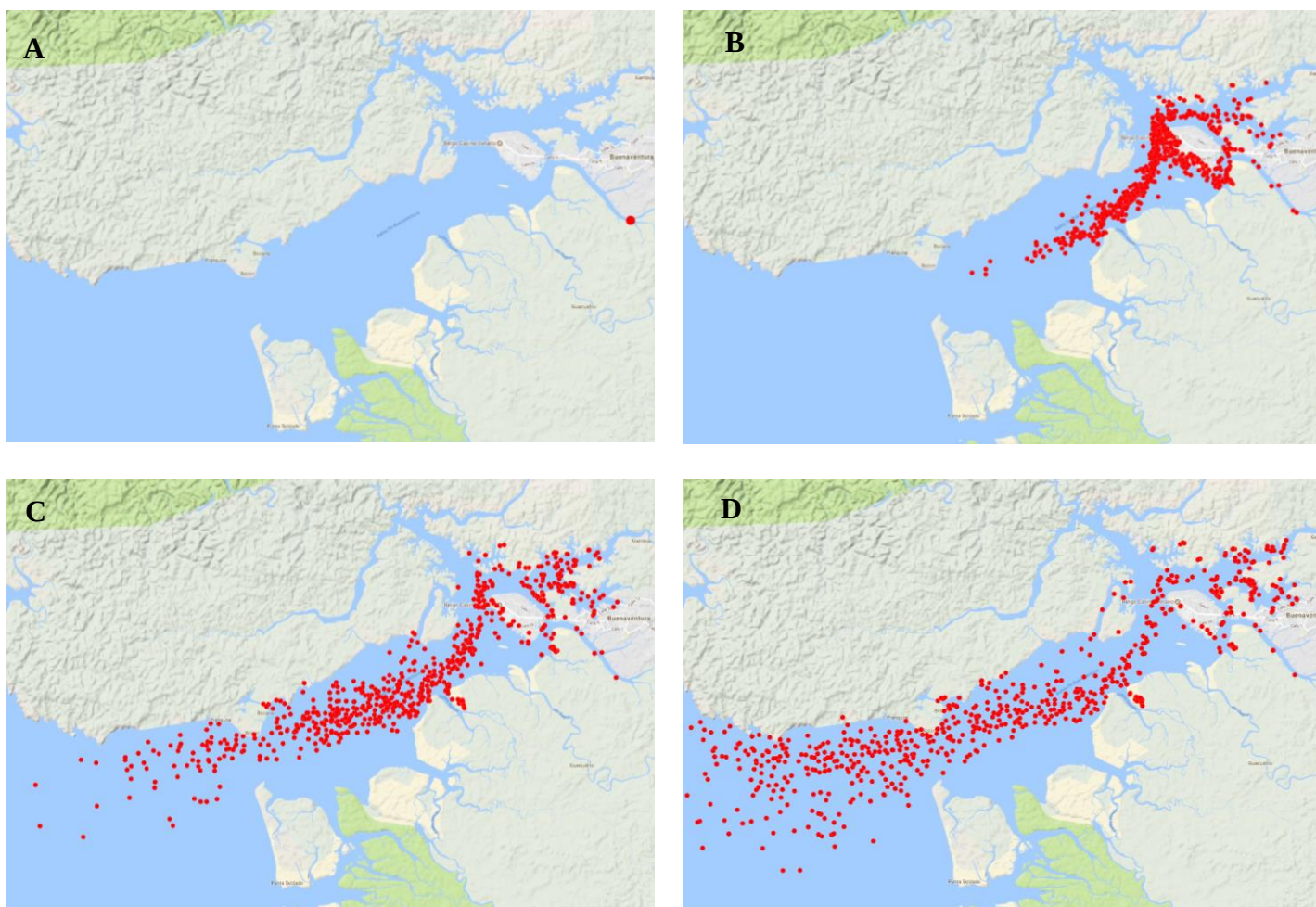


Figura 70. Desplazamiento neto de las partículas vertidas en la parte alta del río San Antonio en la bahía de Buenaventura para un ciclo cuasiquincenal de marea viva - marea muerta. Escenario 5: Marea viva mínima (rango de 3.54 m) y caudales fluviales mínimos. A) Instante $t=0$ días, B) Instante $t=5$ días, C) Instante $t=10$ días y D) Instante $t=15$ días

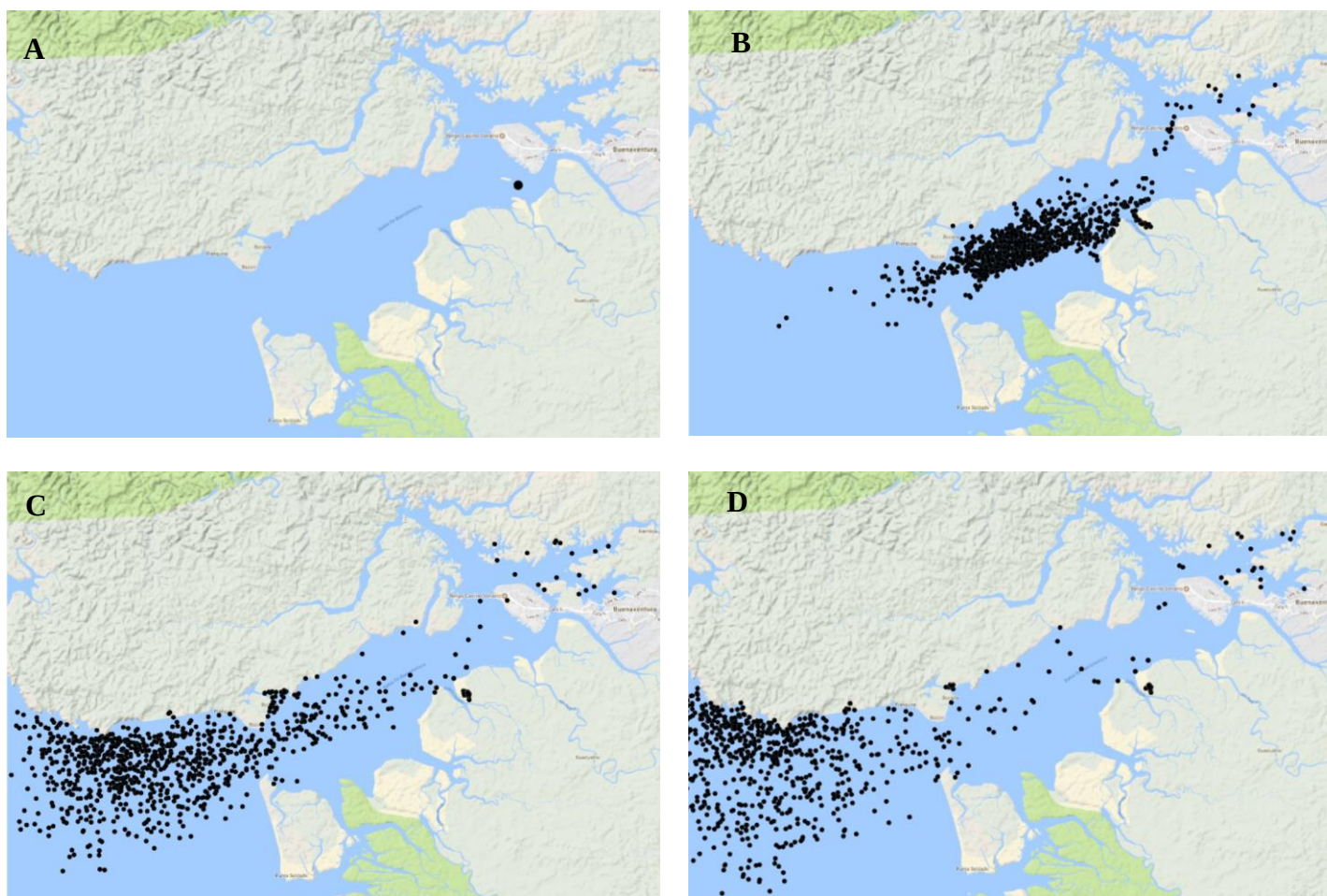


Figura 71. Desplazamiento neto de las partículas vertidas en el delta del río Dagua en la bahía de Buenaventura para un ciclo cuasiquincenal de marea viva - marea muerta. Escenario 5: Marea viva mínima (rango de 3.54 m) y caudales fluviales mínimos. A) Instante $t=0$ días, B) Instante $t=5$ días, C) Instante $t=10$ días y D) Instante $t=15$ días

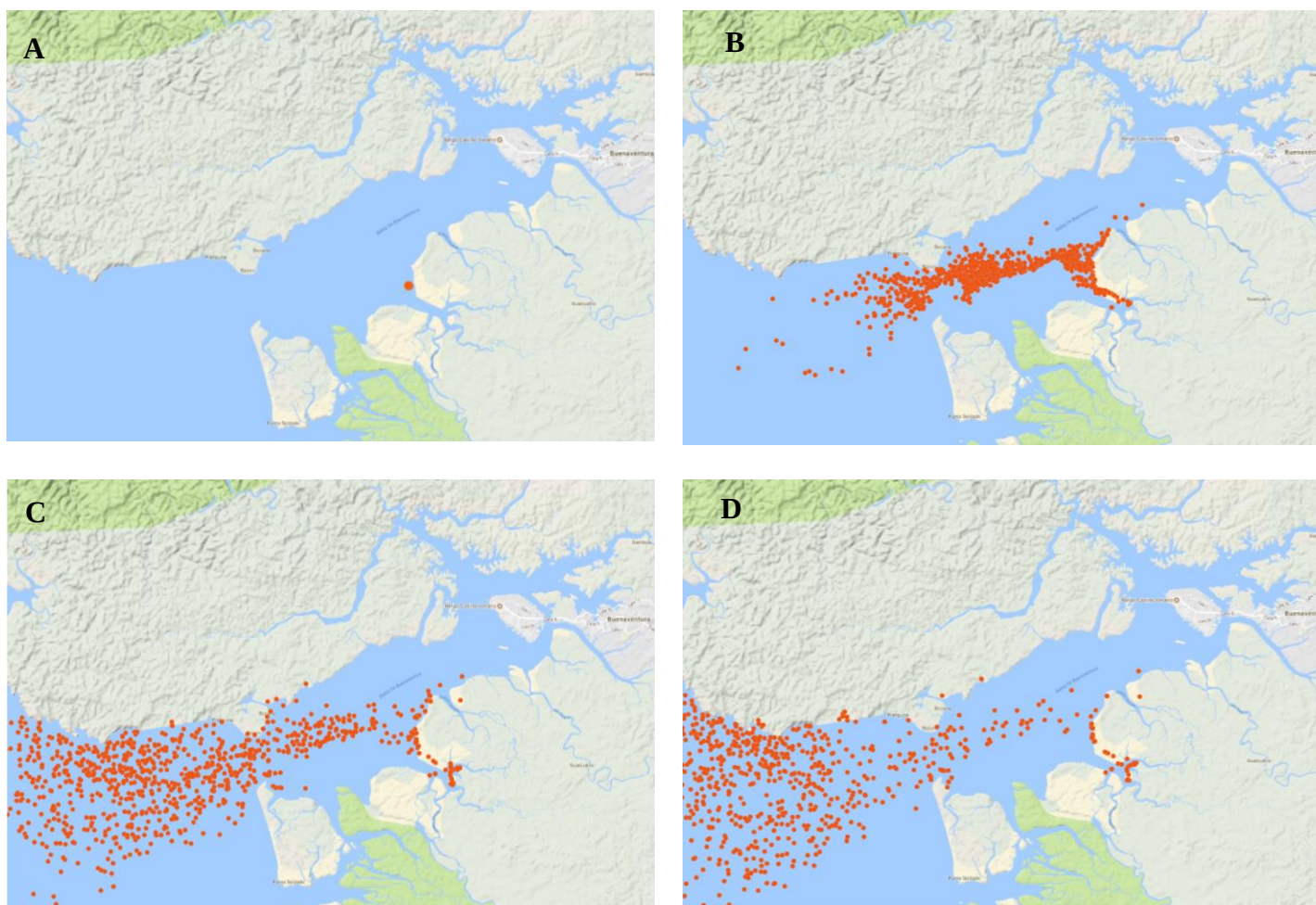


Figura 72. Desplazamiento neto de las partículas vertidas en la desembocadura del río Limónes en la bahía de Buenaventura para un ciclo cuasiquincenal de marea viva - marea muerta. Escenario 5: Marea viva mínima (rango de 3.54 m) y caudales fluviales mínimos. A) Instante $t=0$ días, B) Instante $t=5$ días, C) Instante $t=10$ días y D) Instante $t=15$ días

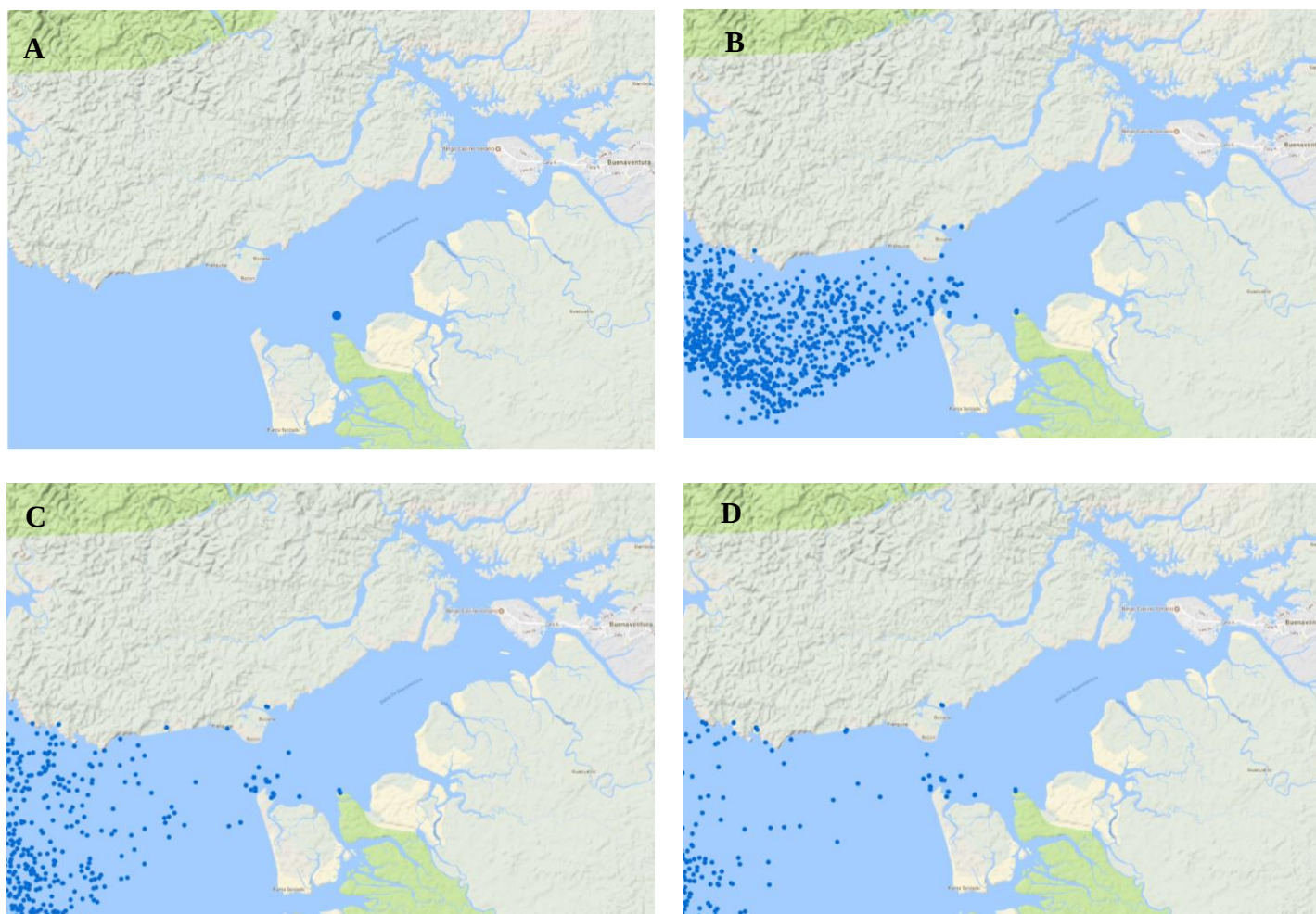


Figura 73. Desplazamiento neto de las partículas vertidas en la desembocadura del río Anchicayá en la bahía de Buenaventura para un ciclo cuasiquincenal de marea viva - marea muerta. Escenario 5: Marea viva mínima (rango de 3.54 m) y caudales fluviales mínimos. A) Instante $t=0$ días, B) Instante $t=5$ días, C) Instante $t=10$ días y D) Instante $t=15$ días

9.6 Escenario 6: Marea Viva Mínima (rango = 3.54 m) y Caudales Fluviales Máximos

En las Figuras 74 y 75 se presentan los resultados de las corrientes residuales Eulerianas en la bahía de Buenaventura, donde es posible observar el patrón de circulación y la magnitud de las velocidades residuales.

En las Figuras 76 a 84 se muestran los resultados de las corrientes residuales Lagrangianas en la bahía de Buenaventura, en las cuales es posible apreciar el desplazamiento neto de los trazadores o partículas para cada uno de los diferentes sitios de vertimientos.

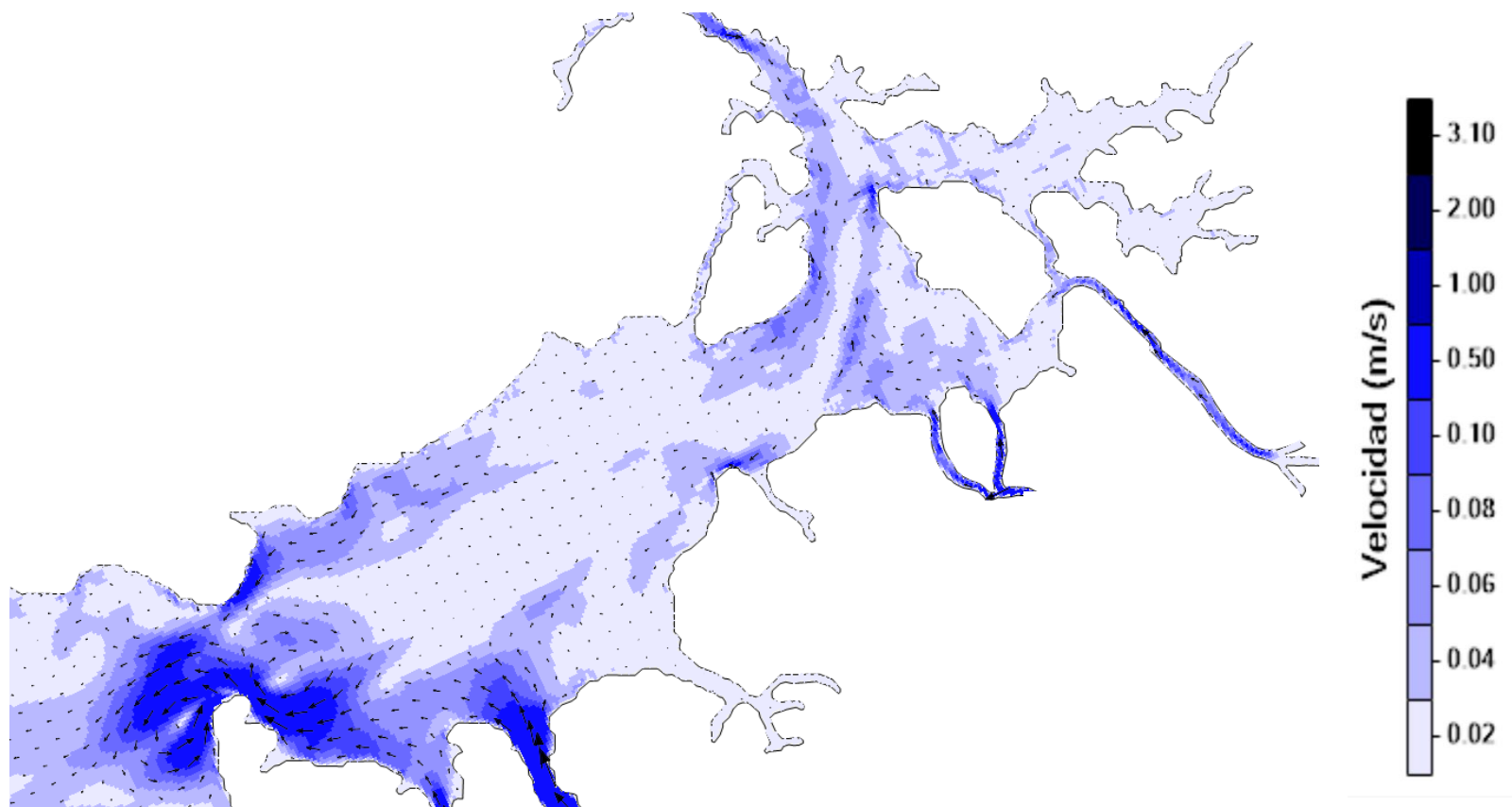


Figura 74. Corrientes residuales Eulerianas en la bahía de Buenaventura para un ciclo cuasiquincenal de marea viva - marea muerta. Escenario 6: Marea viva mínima (rango de 3.54 m) y caudales fluviales máximos

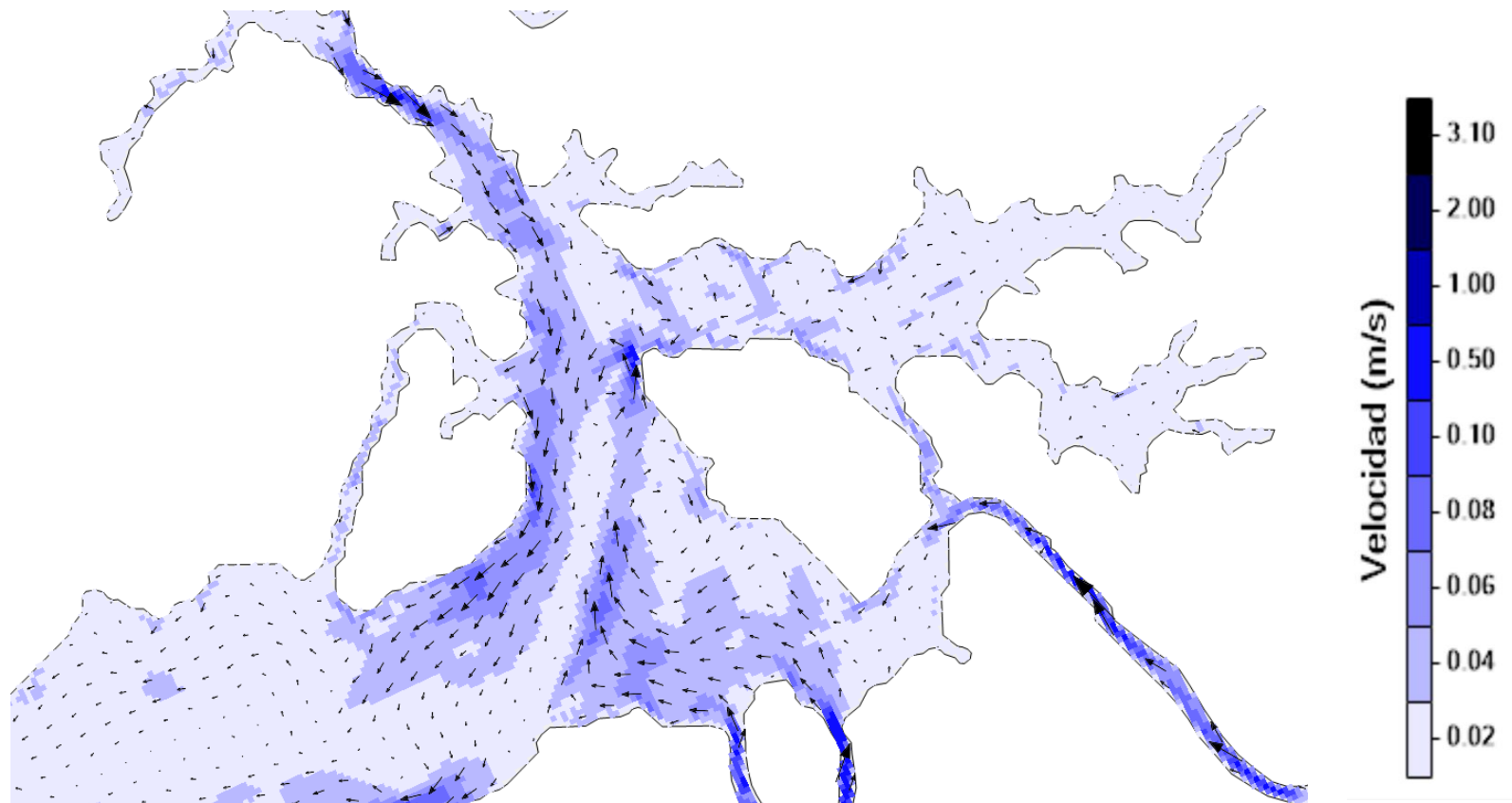


Figura 75. Corrientes residuales Eulerianas alrededor de la isla Cascajal para un ciclo cuasiquincenal de marea viva - marea muerta. Escenario 6: Marea viva mínima (rango de 3.54 m) y caudales fluviales máximos

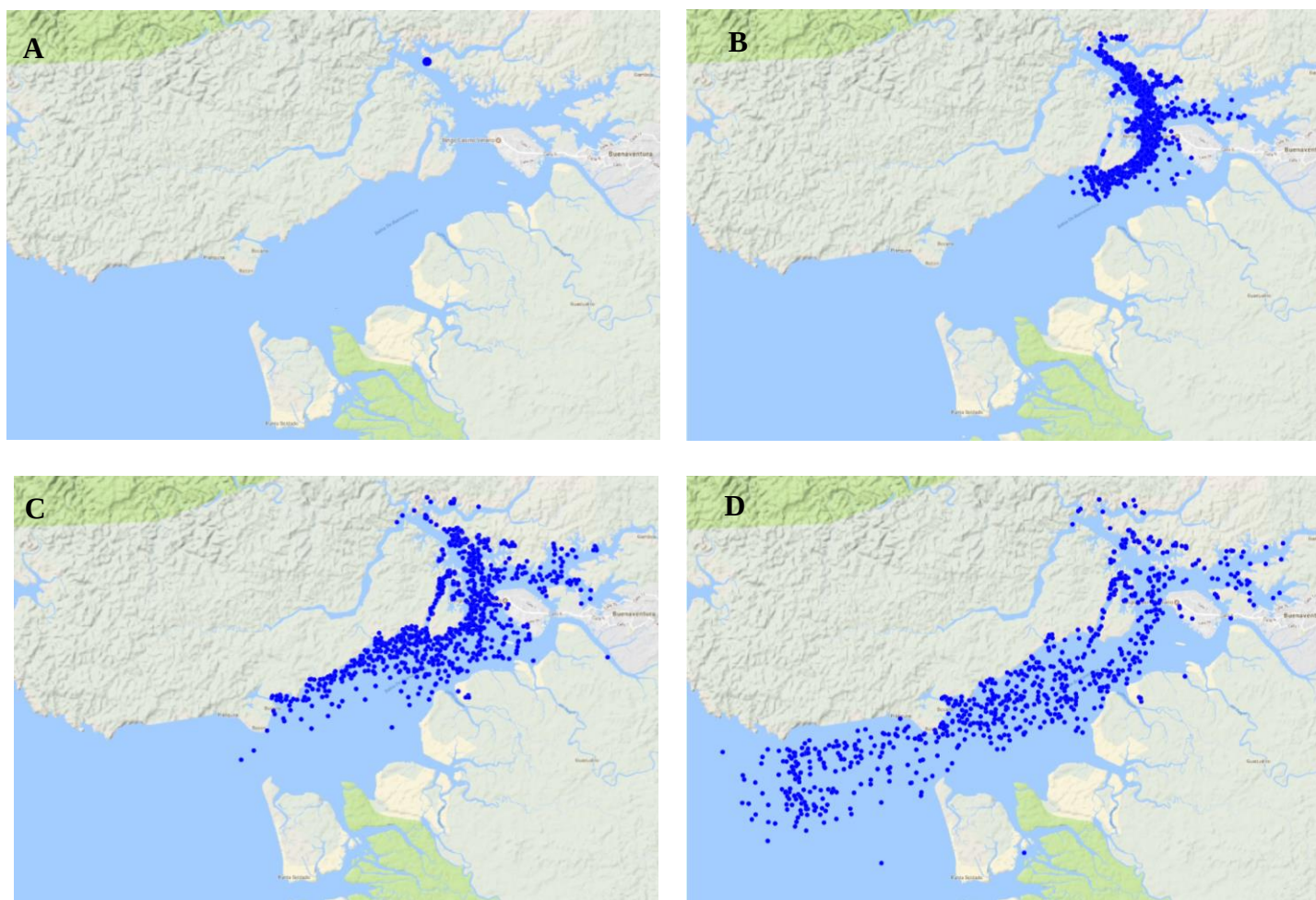


Figura 76. Desplazamiento neto de las partículas vertidas en el estero San Antonio en la bahía de Buenaventura para un ciclo cuasiquincenal de marea viva - marea muerta. Escenario 6: Marea viva mínima (rango de 3.54 m) y caudales fluviales máximos. A) Instante $t=0$ días, B) Instante $t=5$ días, C) Instante $t=10$ días y D) Instante $t=15$ días

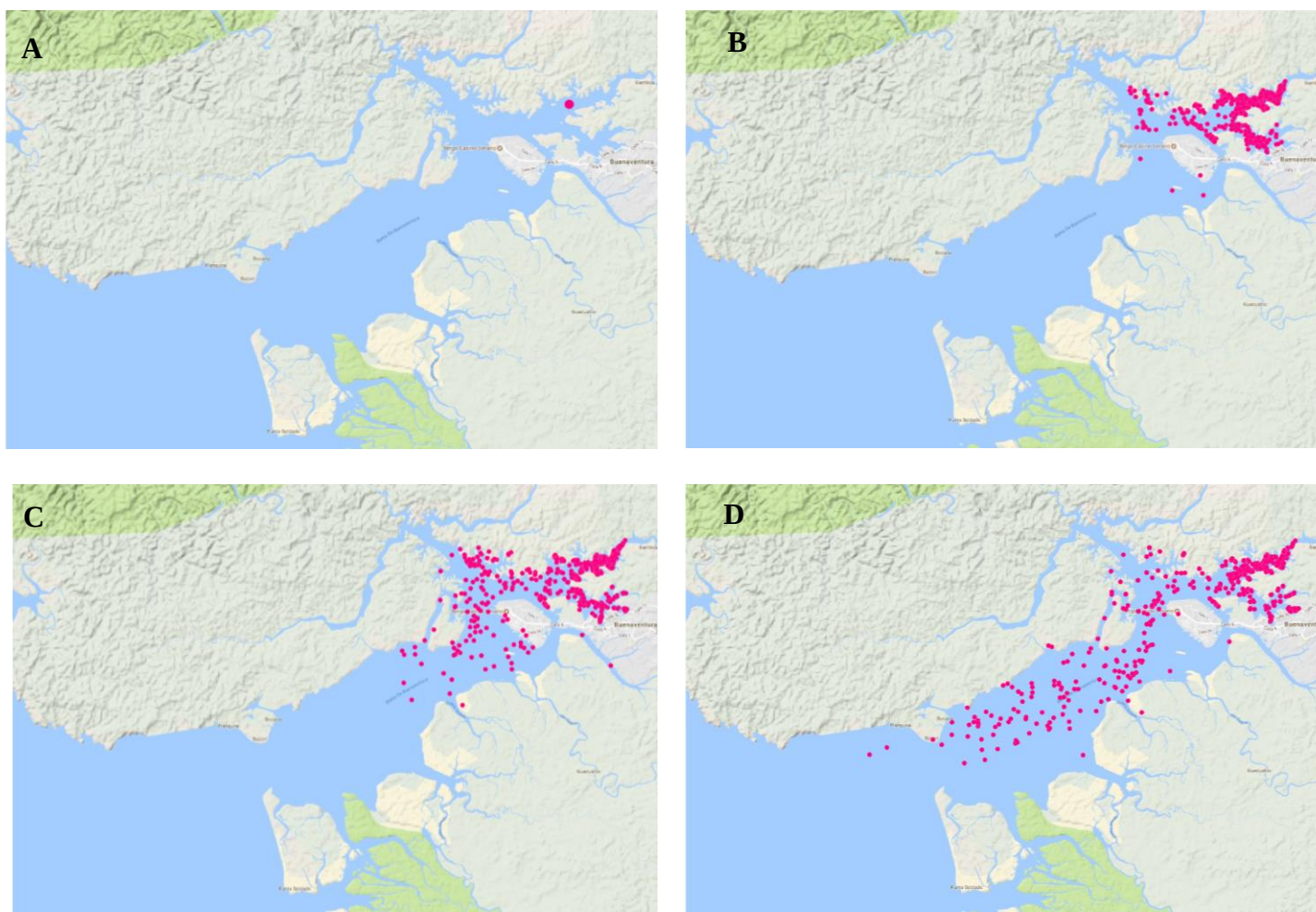


Figura 77. Desplazamiento neto de las partículas vertidas en el estero Gamboa en la bahía de Buenaventura para un ciclo cuasiquincenal de marea viva - marea muerta. Escenario 6: Marea viva mínima (rango de 3.54 m) y caudales fluviales máximos. A) Instante $t=0$ días, B) Instante $t=5$ días, C) Instante $t=10$ días y D) Instante $t=15$ días

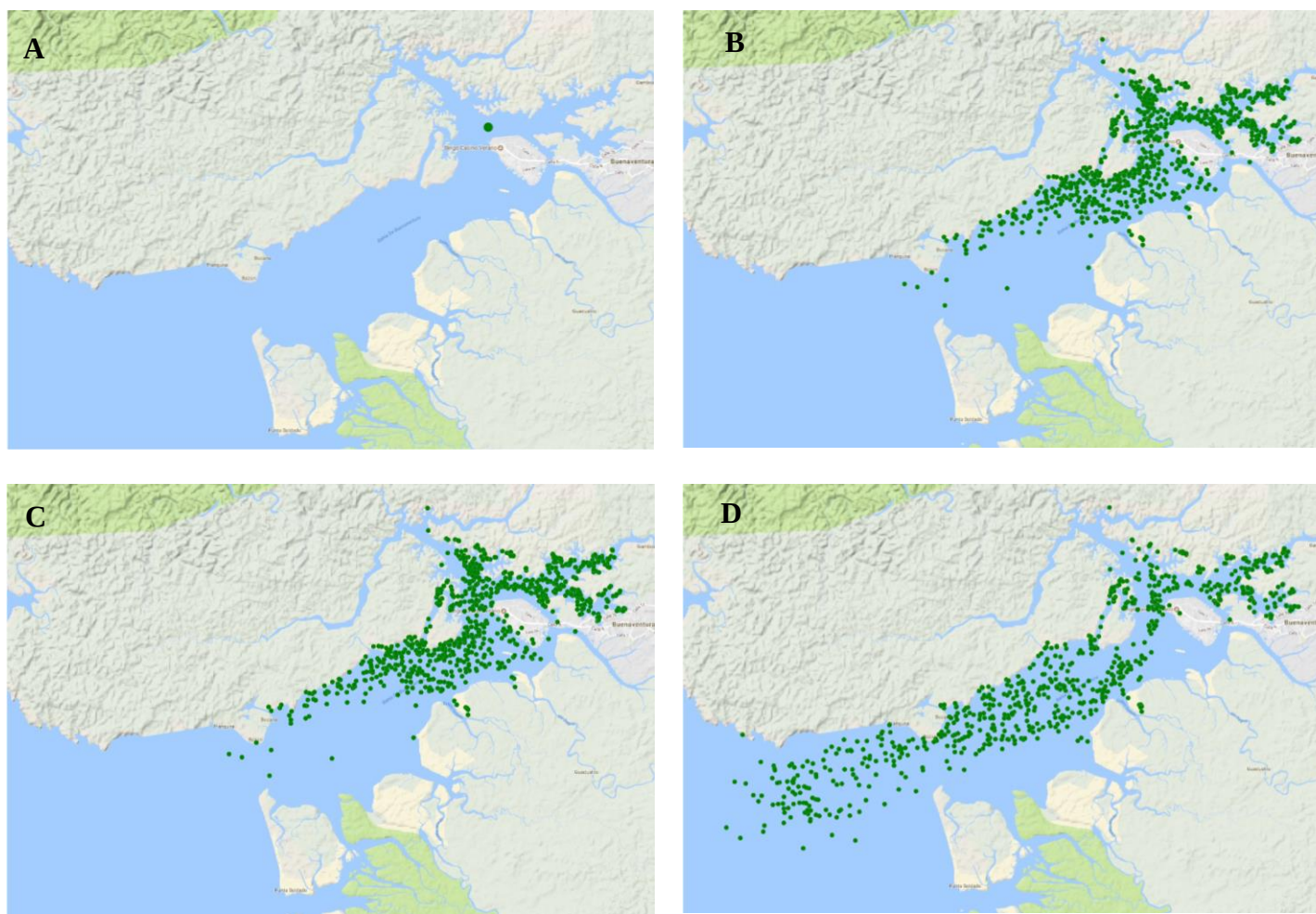


Figura 78. Desplazamiento neto de las partículas vertidas en el Muelle en la bahía de Buenaventura para un ciclo cuasiquincenal de marea viva - marea muerta. Escenario 6: Marea viva mínima (rango de 3.54 m) y caudales fluviales máximos. A) Instante $t=0$ días, B) Instante $t=5$ días, C) Instante $t=10$ días y D) Instante $t=15$ días

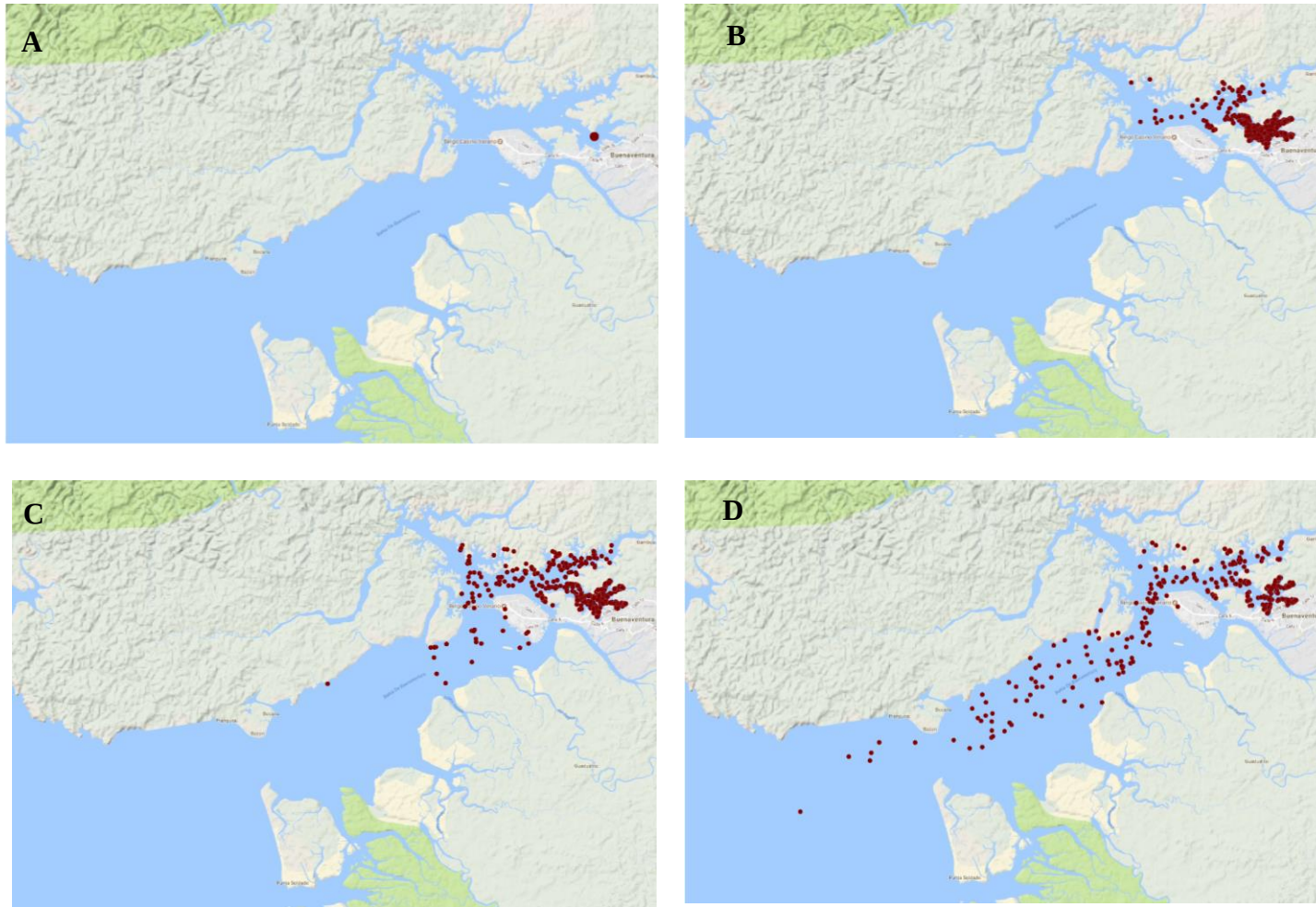


Figura 79. Desplazamiento neto de las partículas vertidas en el estero Aguacate en la bahía de Buenaventura para un ciclo cuasiquincenal de marea viva - marea muerta. Escenario 6: Marea viva mínima (rango de 3.54 m) y caudales fluviales máximos. A) Instante $t=0$ días, B) Instante $t=5$ días, C) Instante $t=10$ días y D) Instante $t=15$ días

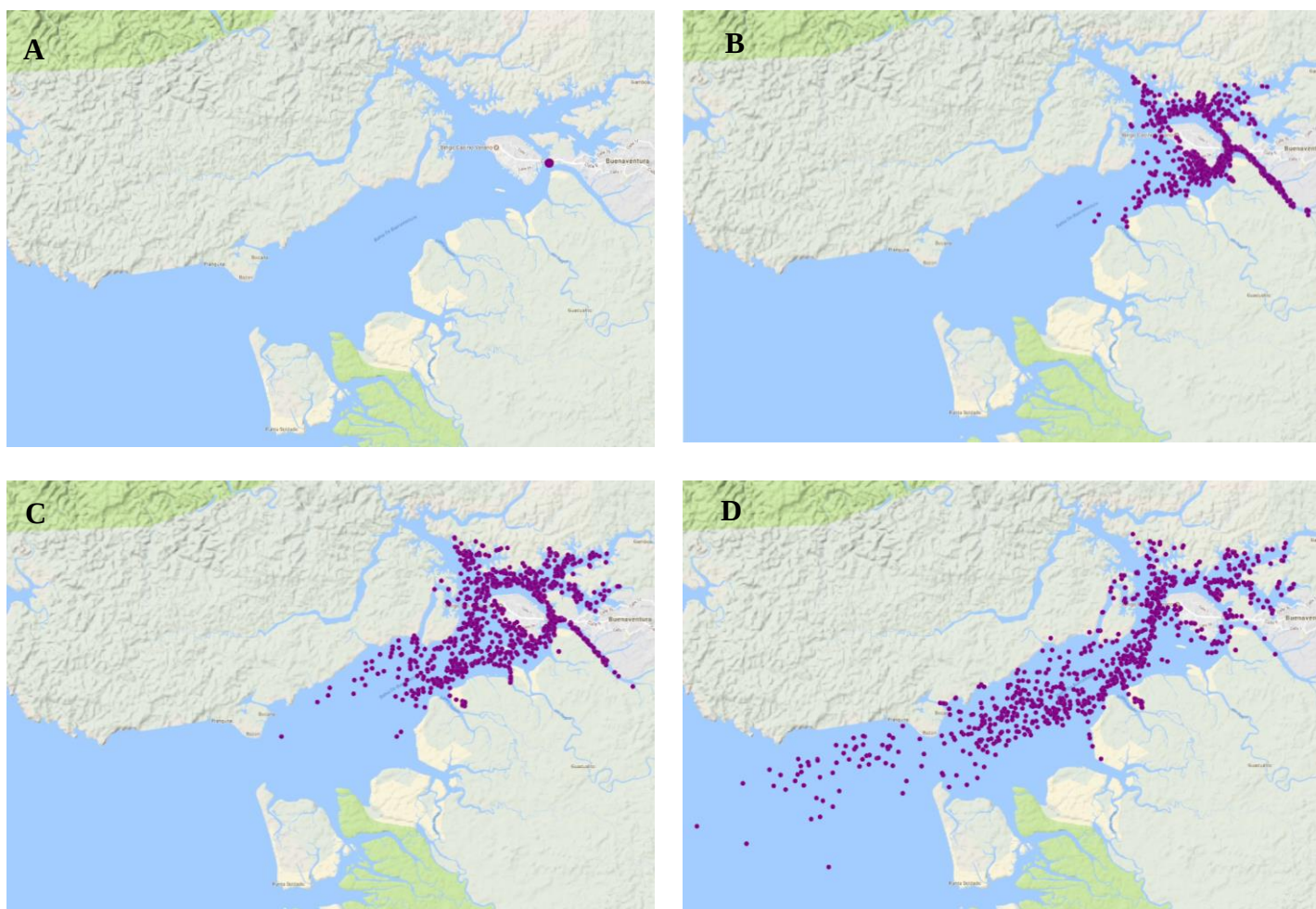


Figura 80. Desplazamiento neto de las partículas vertidas en la desembocadura del río San Antonio en la bahía de Buenaventura para un ciclo cuasiquincenal de marea viva - marea muerta. Escenario 6: Marea viva mínima (rango de 3.54 m) y caudales fluviales máximos. A) Instante $t=0$ días, B) Instante $t=5$ días, C) Instante $t=10$ días y D) Instante $t=15$ días

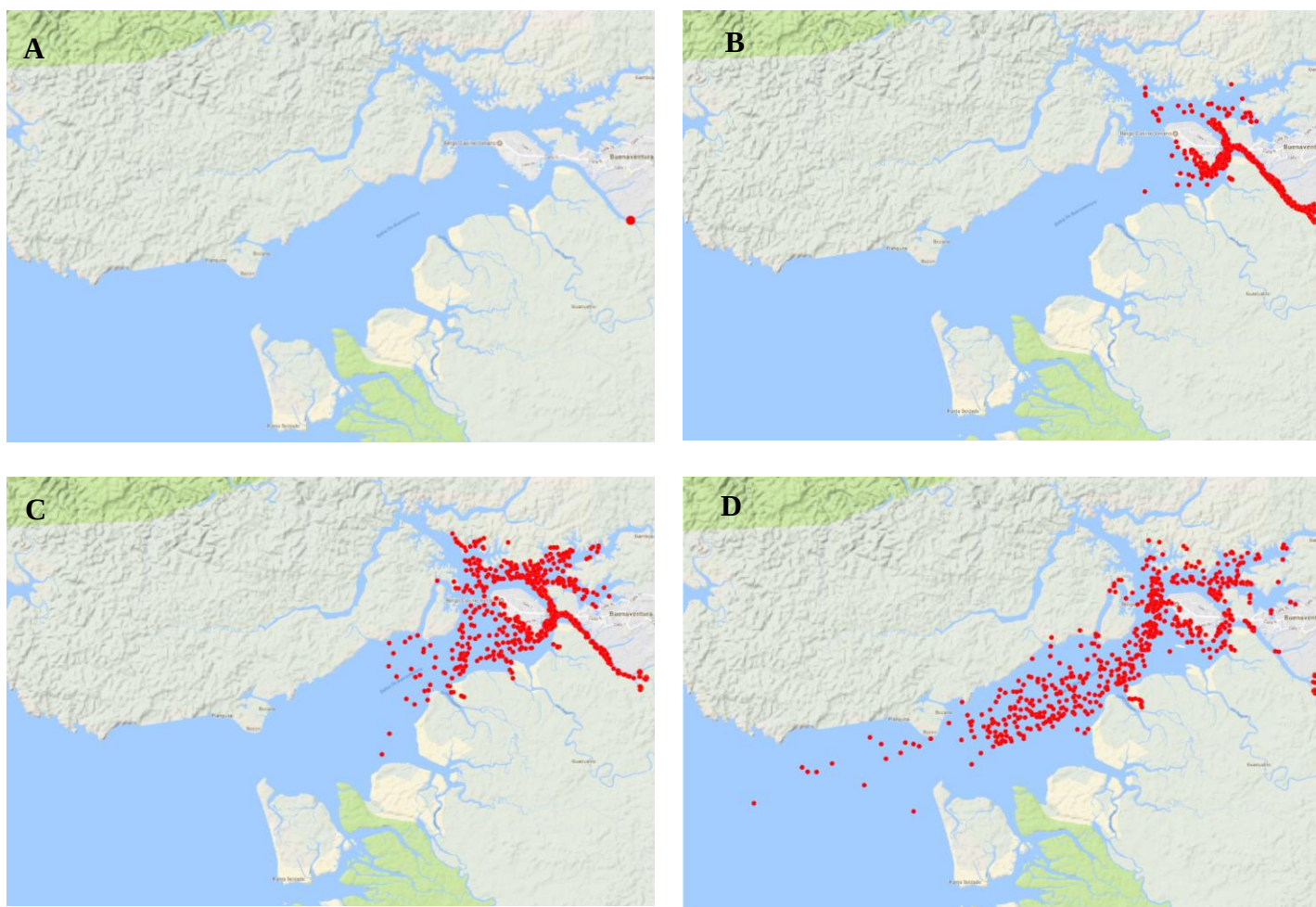


Figura 81. Desplazamiento neto de las partículas vertidas en la parte alta del río San Antonio en la bahía de Buenaventura para un ciclo cuasiquincenal de marea viva - marea muerta. Escenario 6: Marea viva mínima (rango de 3.54 m) y caudales fluviales máximos. A) Instante $t=0$ días, B) Instante $t=5$ días, C) Instante $t=10$ días y D) Instante $t=15$ días

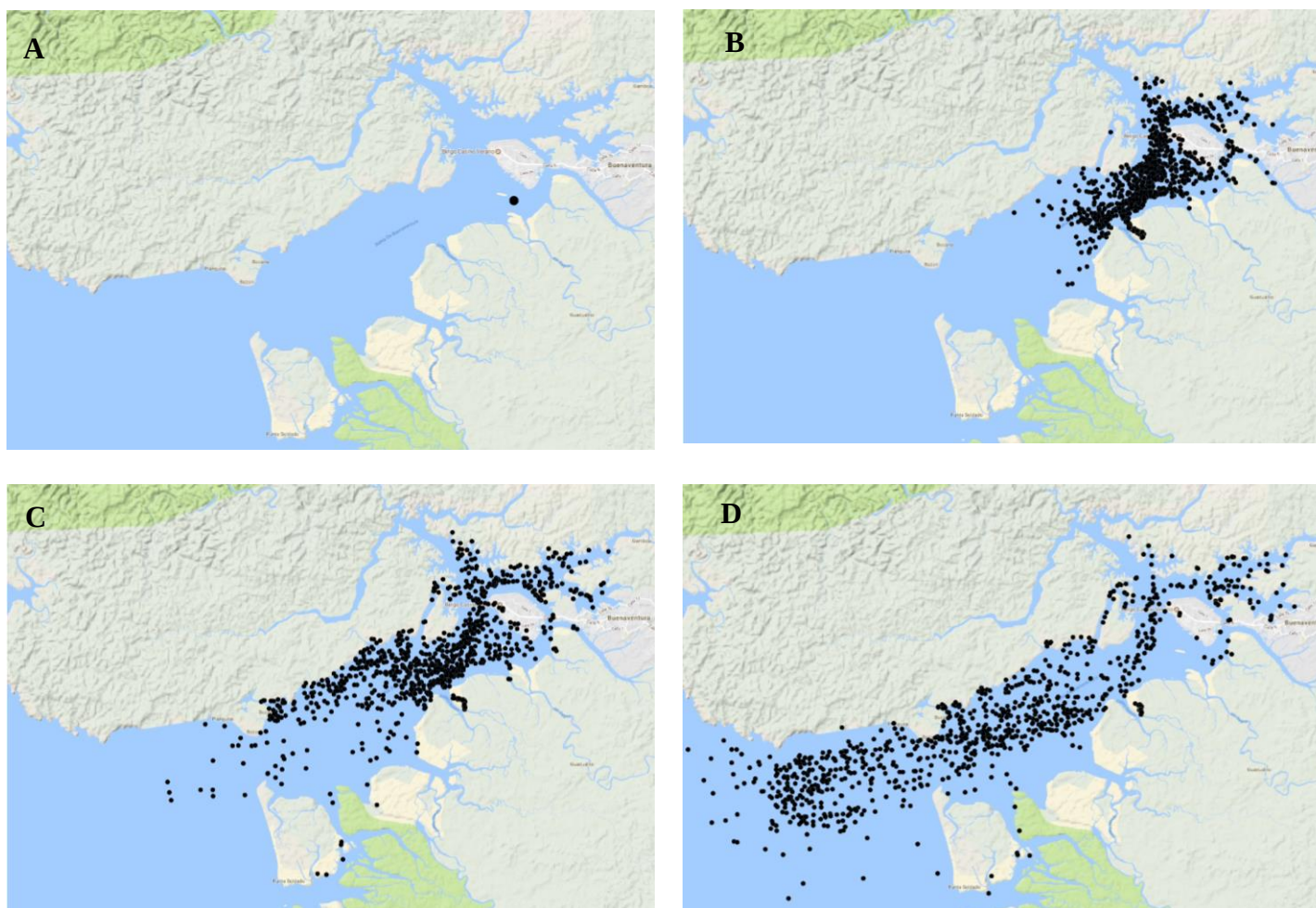


Figura 82. Desplazamiento neto de las partículas vertidas en el delta del río Dagua en la bahía de Buenaventura para un ciclo cuasiquincenal de marea viva - marea muerta. Escenario 6: Marea viva mínima (rango de 3.54 m) y caudales fluviales máximos. A) Instante $t=0$ días, B) Instante $t=5$ días, C) Instante $t=10$ días y D) Instante $t=15$ días

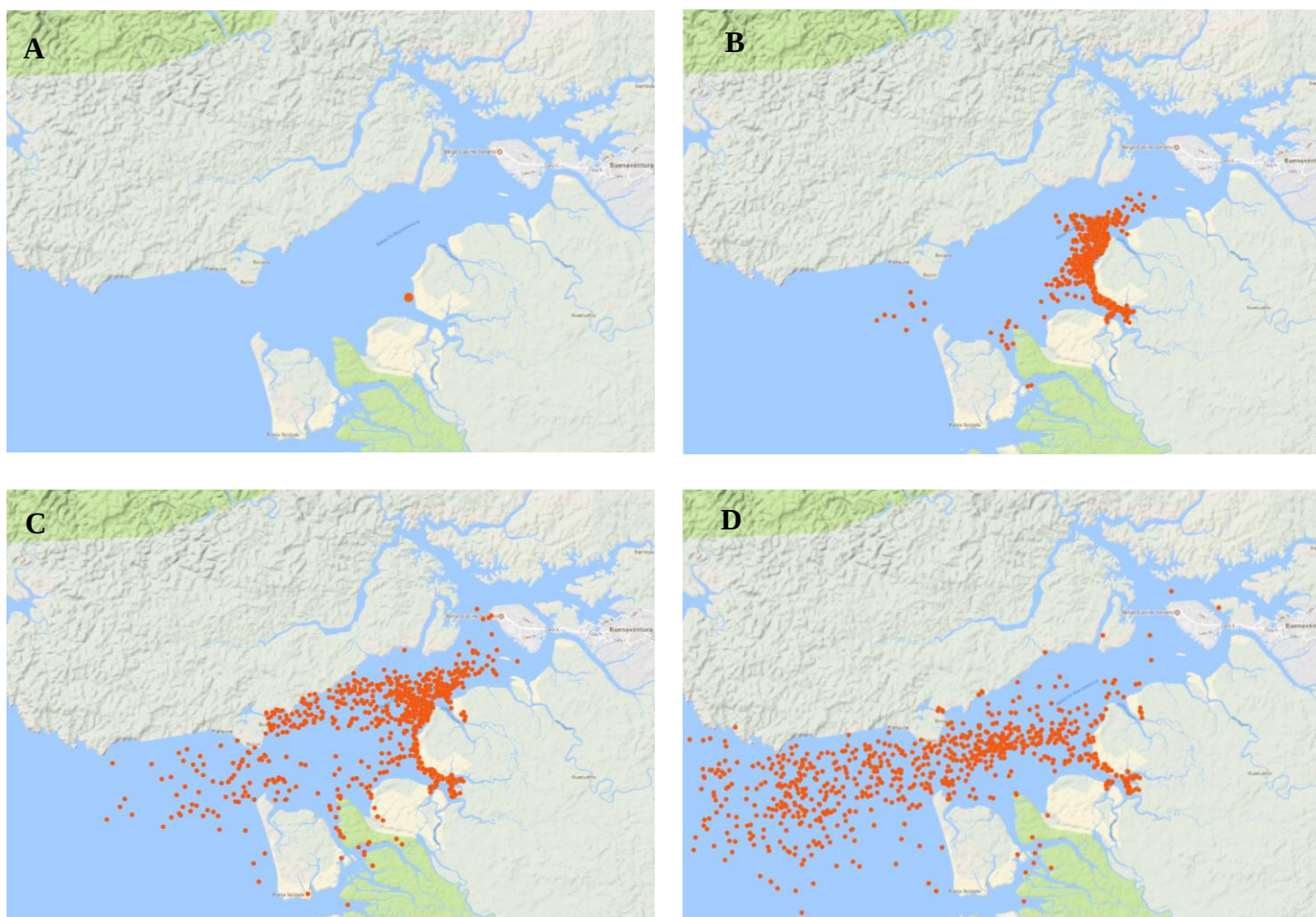


Figura 83. Desplazamiento neto de las partículas vertidas en la desembocadura del río Limones en la bahía de Buenaventura para un ciclo cuasiquincenal de marea viva - marea muerta. Escenario 5: Marea viva mínima (rango de 3.54 m) y caudales fluviales máximos. A) Instante $t=0$ días, B) Instante $t=5$ días, C) Instante $t=10$ días y D) Instante $t=15$ días

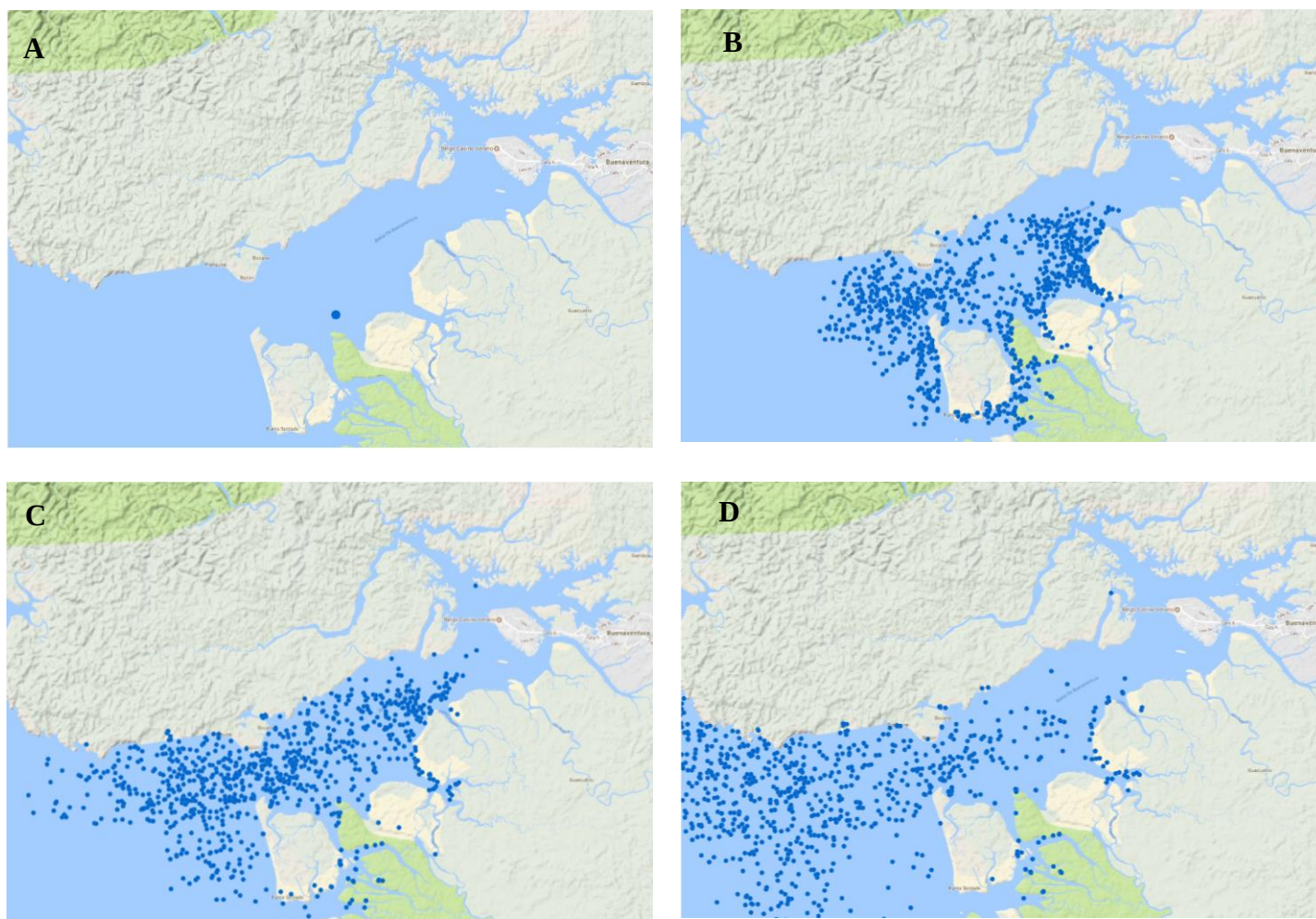


Figura 84. Desplazamiento neto de las partículas vertidas en la desembocadura del río Anchicayá en la bahía de Buenaventura para un ciclo cuasiquincenal de marea viva - marea muerta. Escenario 6: Marea viva mínima (rango de 3.54 m) y caudales fluviales máximos. A) Instante $t=0$ días, B) Instante $t=5$ días, C) Instante $t=15$ días

9.7 Análisis del Comportamiento de las Corrientes Residuales

Para cada uno de los escenarios planteados se consideraron diferentes ciclos cuasiquincenales de mareas vivas – mareas muertas: (i) con marea viva máxima (rango = 4.89 m), (ii) con marea viva media (rango = 4.23 m) y (iii) con marea viva mínima (rango = 4.89 m); además, se consideraron condiciones máximas y mínimas de caudales fluviales en los ríos y tributarios.

Los resultados obtenidos en la aplicación del módulo Lagrangiano están directamente relacionados con los resultados del modelo hidrodinámico implementado para la bahía de Buenaventura. Esto debido a que el modelo Lagrangiano utiliza el campo de velocidades calculado por el modelo hidrodinámico para así simular el movimiento de las partículas, representadas por un trazador inerte (conservativa) y de flotabilidad neutra (no sedimentable).

Por otra parte, es necesario señalar que no siempre es suficiente conocer las corrientes residuales Eulerianas para predecir las trayectorias y destinos de las partículas. Esto debido a que el promedio temporal de las corrientes en cierto sitio no siempre representa la dirección que tendrá una partícula a medida que pasa el tiempo. Si el flujo fuese homogéneo, entonces las partículas serían desplazadas por las corrientes a otro lugar donde las corrientes son similares y continuas, tanto en magnitud como en dirección; en estas condiciones las corrientes residuales Eulerianas representan muy bien la más probable trayectoria a seguir por las partículas. Pero si la corriente cambia notoriamente entre un sitio y otro (es decir, si hay cambios fuertes en magnitud y dirección de las velocidades mareales), al ser desplazadas las partículas se encontrarán en ambientes donde las velocidades son muy diferentes a la del lugar inicial y seguirán trayectorias regidas por las corrientes que van encontrando (Marinone, 1997).

El desplazamiento neto de las partículas (corrientes residuales Lagrangianas) en la bahía de Buenaventura coincide generalmente bastante bien con las sugeridas por los campos de velocidades promedio (corriente residual Euleriana) durante un ciclo de marea cuasiquincenal en gran parte de la bahía de Buenaventura. Sin embargo, en algunos sectores, como es cerca a Punta Soldado, las corrientes residuales Eulerianas presentan remolinos que sugieren que las partículas que alcanzan estos sectores podrían quedar atrapadas en ellos. Pero el desplazamiento neto de las partículas (es decir, las corrientes Lagrangianas) muestran que no es así, desplazándose finalmente hacia afuera de la bahía. Este comportamiento verifica lo indicado previamente, es decir, que para estimar con una mejor aproximación la trayectoria y destino final de las partículas de agua en un estuario es necesario determinar tanto las corrientes residuales Eulerianas como las Lagrangianas.

En términos generales, las corrientes residuales Lagrangianas, definidas por el desplazamiento neto de las partículas, indican una dirección ligeramente dominante hacia el exterior de la bahía. Este comportamiento es altamente significativo para la conservación de la bahía, pues indica que volúmenes importantes de contaminantes vertidos y sedimentos descargados por los tributarios

son transportados gradualmente por las corrientes hacia afuera de la bahía, facilitando la depuración natural de sus aguas.

Los resultados de la circulación residual Euleriana exhiben un patrón de flujo semejante en todos los escenarios; la principal diferencia entre ellos radica en la aparición y ampliación de zonas con velocidades residuales superiores a 0.02 m/s, lo cual se debe a la acción conjunta de las mareas y los aportes fluviales. Es decir, las corrientes residuales aumentan en la medida en que se incrementan las mareas (mayores rangos) y los aportes fluviales. Durante un ciclo cuasiquincenal con mareas vivas máximas y caudales fluviales máximos es posible observar áreas más amplias con velocidades residuales de mayor intensidad (pudiendo alcanzar valores entre 0.5 y 1.0 m/s), como ocurre en el sector de Punta Soldado, en la parte suroeste de la entrada a la bahía; al mismo tiempo, se puede apreciar una corriente débil (menor o igual a 0.02 m/s) en la parte media de la bahía y en los esteros Gamboa y Aguacate. Ahora bien, durante un ciclo cuasiquincenal con mareas vivas mínimas y caudales fluviales mínimos se conserva el mismo patrón de flujo, pero se reduce la extensión de las zonas con velocidades residuales de alguna consideración.

En general, los resultados del modelo numérico ratifican la información de campo existente y el conocimiento que se tiene del comportamiento hidrodinámico y del transporte de sedimentos, por lo que los patrones espaciales de la circulación y el desplazamiento neto de las partículas permiten el establecimiento de vías preferenciales de transporte. En la bahía de Buenaventura la variabilidad del flujo residual espacial está estrechamente relacionado con el forzamiento mareal y la interacción de la circulación estuarina con los contornos y la batimetría del fondo.

En la entrada al estero Aguadulce y en la margen externa de la isla Cangrejo se producen corrientes residuales que se dirigen en sentido suroeste con magnitudes aproximadas entre 0.02 a 0.08 m/s; el área del canal de acceso comprendida entre el delta del río Dagua y el muelle ubicado en la isla Cascajal presentan corrientes con dirección norte con velocidades residuales entre 0.02 y 0.5 m/s.

Al verter las partículas en el sector de confluencia del río Dagua se observa una gran dispersión de las partículas. Una parte de ellas se desplaza hacia la entrada de la bahía para luego salir de ella y otra cantidad importante se dirige hacia las zonas de los terminales marítimos, alcanzando algunas de ellas los esteros Gamboa, Aguacate, San Antonio y Aguadulce. Este último resultado obtenido es muy importante pues puede explicar en buena medida las altas tasas de sedimentación que se presentan en las dársenas de acceso y muelles de los terminales de Buenaventura, ya que los sedimentos que alcanzan estos sectores pueden decantarse durante los períodos de las pleamares y las bajamares, cuando las velocidades mareales y los esfuerzos cortantes asociados son prácticamente nulos.

Las partículas vertidas en la confluencia del río Anchicayá también muestran una gran dispersión en su desplazamiento aunque se puede apreciar que un porcentaje considerable de las partículas se desplazan hacia la entrada de la bahía para finalmente salir de la misma. Cantidades menores de

partículas se dirigen hacia la isla de Cascajal, alcanzando, algunas de ellas, la zona de muelles de los terminales marítimos de Buenaventura. Estos resultados permiten deducir que la mayor parte de los sedimentos descargados por el río Anchicayá al interior de la bahía son arrastrados por las corrientes mareales hacia afuera de la bahía, y una fracción menor es transportada en dirección noreste, hacia la parte norte de la isla Cascajal, pudiendo así contribuir, en menor proporción con respecto al río Dagua, al fenómeno de sedimentación en los sectores próximos a los terminales marítimos.

Las partículas vertidas en el estero San Antonio, tanto aguas arriba como en su confluencia, tienden a salir de él: una fracción menor de las partículas se dirige por El Piñal hacia la parte norte de la isla Cascajal y los esteros Aguacate y Gamboa, mientras que la fracción mayor restante de las partículas se dirige hacia la parte sur de la Isla Cascajal. Durante los intervalos de flujo y reflujo mareal las partículas avanzan hacia la entrada de la bahía y retroceden en cada ciclo mareal simple, pero se observa un ligero desplazamiento neto del grueso de las partículas hacia la entrada de la bahía; al final del ciclo cuasiquincenal de mareas vivas – mareas muertas una fracción importante de las partículas se desplaza en la misma dirección hacia la entrada de la bahía. Es decir, las partículas provenientes del estero San Antonio requerirán un tiempo mayor para salir de la bahía (se estima entre uno y dos ciclos cuasiquincenales más). También se debe indicar que algunas partículas que alcanzan los esteros Gamboa y Aguacate finalmente permanecen en ellos durante todo el ciclo cuasiquincenal simulado; las muy bajas velocidades en los sectores próximos a las orillas de las canales pueden explicar este comportamiento.

En conjunto, las corrientes residuales Eulerianas estimadas para los diferentes escenarios propuestos (diferentes rangos de mareas vivas máximas y descargas fluviales máximas y mínimas) muestran el mismo patrón o comportamiento tanto en la magnitud como en la dirección de las velocidades promedio calculadas para el ciclo cuasiquincenal de mareas vivas – mareas muertas, pues las diferencias observadas entre ellas son muy pequeñas. En gran parte del área circundante a la isla Cascajal las velocidades residuales se hallan entre 0.02 m/s y 0.04 m/s. Solo en el extremo noroccidental de la isla y en un área muy reducida, muy cerca del inicio del muelle 1 del terminal marítimo de la Sociedad Portuaria Regional de Buenaventura las velocidades mareales residuales alcanzan valores máximos de cerca de 0.5 m/s.

10 CONCLUSIONES

En este proyecto se investigó el comportamiento de las corrientes residuales Eulerianas y Lagrangianas en la bahía de Buenaventura mediante la aplicación del modelo matemático hidrodinámico MOHID y su módulo de Trazadores Lagrangianos. Las conclusiones más destacadas del estudio son las siguientes:

Características de la Bahía

- La bahía de Buenaventura corresponde a un sistema estuarino, con una hidrodinámica muy compleja, donde interactúan mareas, corrientes mareales, oleaje, descargas de aguas fluviales, vientos, la configuración del lecho marino y los accidentes geomorfológicos. Como consecuencia de esto, la dinámica de los procesos de transporte de sedimentos y las diferentes sustancias contaminantes que llegan a la bahía (a través de ríos y esteros y vertimientos de aguas residuales domésticas, agrícolas e industriales) también resulta altamente compleja.
- Las mareas en la bahía de Buenaventura son de tipo semidiurno, con un ciclo de aproximadamente 12 horas 25 minutos, presentando cerca de dos pleamares y dos bajamares en un día. El rango mareal es muy variable, pudiendo fluctuar desde 1.4 m durante mareas muertas mínimas hasta 5.4 m durante mareas vivas máximas, de acuerdo con los registros históricos disponibles.
- La marea se amplifica desde la entrada de la bahía hasta la isla Cascajal, incrementándose el rango mareal alrededor de un 9.5%, en promedio, debido a factores como la reducción en la sección hidráulica hacia el interior de la bahía y la baja resistencia al flujo (rugosidades bajas).
- Los mayores flujos y las máximas velocidades de las corrientes se presentan a lo largo de los canales más profundos sobre toda la bahía, esto es, a lo largo del canal de acceso al puerto y en el estero Aguadulce.
- Las velocidades de las corrientes mareales durante el reflujo de la marea (saliente de la bahía) tienden a ser ligeramente superiores a las velocidades durante el flujo mareal (entrante de la bahía), y el período correspondiente al flujo mareal es casi 30 minutos más largo que el período de reflujo.

Modelación Hidrodinámica y de Trazadores Lagrangianos

- Para la modelación de los procesos hidrodinámicos y de transporte se implementó el modelo matemático MOHID, el cual permitió incluir los diferentes factores más relevantes de las características hidrodinámicas al interior de la bahía, tales como, las mareas, las condiciones

climáticas (temperatura, nubosidad, humedad relativa y radiación solar), las descargas fluviales y la interacción de ríos tributarios y esteros con las corrientes mareales.

- La extensión del área simulada de la bahía fue de 1050 Km², que cubre alrededor de 16 Km en la bahía exterior hasta incluir todos los esteros y ríos afluentes representados. La malla computacional del área simulada tiene un total de 700*600 celdas, todas ellas de igual tamaño (50 m x 50 m). Dado que no se disponía de la información batimétrica hasta el límite de influencia mareal en los ríos y los esteros, estos se esquematizaron teniendo en cuenta la información disponible de los volúmenes oscilantes para mareas máximas, las longitudes máximas de influencia mareal y la morfología media de los cauces.
- La calibración del modelo hidrodinámico se realizó con base en la información de campo disponible, principalmente los registros de campo del año 1997 de la Universidad del Valle y su Laboratorio de Proyectos Hidráulicos del Pacífico; esto debido a que no se dispone de información actualizada y suficiente para este propósito. Los valores adoptados de la rugosidad del lecho de la bahía (coeficiente de Manning $n = 0.028 \text{ s/m}^{1/3}$), la viscosidad turbulenta ($1 \text{ m}^2/\text{s}$) y los componentes armónicos de la marea astronómica permitieron representar de manera aceptable las condiciones hidrodinámicas al interior de la bahía. La diferencia máxima obtenida entre los niveles de marea medidos y los calculados por el modelo fue de cerca de 0.3 m.
- La rugosidad del lecho y la viscosidad turbulenta no son parámetros sensibles en la determinación de los niveles de agua en la bahía, aunque sí son ligeramente sensibles en la determinación de las velocidades mareales.
En contraste, las mareas impuestas en la frontera de mar (definidas por los valores de las amplitudes y las fases de las componentes armónicas de la marea astronómica) son altamente sensibles o influyentes en la determinación de las condiciones hidrodinámicas al interior de la bahía, pues una ligera variación en las amplitudes y fases de los componentes armónicos puede originar variaciones apreciables tanto en los niveles de marea como en la intensidad de las corrientes.
- El modelo hidrodinámico implementado permitió representar de manera aceptable las características hidrodinámicas de las mareas en la bahía de Buenaventura, como son: el patrón general y promedio de las corrientes de flujo y reflujo de la marea; la ligera amplificación de la onda de marea desde la entrada de la bahía hacia la región del puerto (cerca de un 9.5 %), debido a factores como la reducción en la sección hidráulica hacia el interior de la bahía y la baja resistencia al flujo; y, el moderado dominio de las corrientes del reflujo sobre las corrientes del flujo mareal. Esto último significa que en promedio las corrientes del reflujo son ligeramente mayores y de una duración un poco más corta que las corrientes del flujo mareal.

Corrientes Residuales

- Para el estudio de las corrientes residuales desde los enfoques Lagrangianos y Eulerianos se plantearon, simularon y evaluaron 6 escenarios de ciclos cuasiquincenales de mareas vivas – mareas muertas: (i) 2 escenarios con marea viva máxima (rango de 4.89 m) considerando caudales fluviales máximos y mínimos; (ii) 2 escenarios con marea viva media (rango de 4.23m) con caudales fluviales máximos y mínimos; y (iii) 2 escenarios con marea viva mínima (rango de 3.54 m) con caudal fluvial máximo y mínimo.
- Las corrientes residuales Eulerianas determinadas para los diferentes escenarios propuestos (diferentes rangos de mareas vivas máximas y descargas fluviales máximas y mínimas) muestran en general el mismo patrón, tanto en la magnitud como en la dirección de las velocidades promedio para el ciclo cuasiquincenal de mareas vivas – mareas muertas, por cuanto las diferencias observadas entre los distintos escenarios son muy pequeñas. En gran parte del área circundante a la isla Cascajal las velocidades residuales se hallan entre 0.02 m/s y 0.04 m/s. Solamente en el extremo noroccidental de la isla y en un área muy reducida, muy cerca del inicio del muelle 1 del terminal marítimo de la Sociedad Portuaria Regional de Buenaventura las velocidades mareales residuales alcanzan valores máximos de cerca de 0.5 m/s.
- Las corrientes residuales Lagrangianas, definidas por el desplazamiento neto de las partículas, indican una dirección ligeramente dominante hacia el exterior de la bahía. Este comportamiento es significativo para la conservación de la bahía, pues indica que volúmenes importantes de contaminantes vertidos y sedimentos descargados por los tributarios pueden ser transportados gradualmente por las corrientes hacia afuera de la bahía. A pesar de esto, el vertimiento continuo de altas cargas contaminantes impacta negativamente la calidad de las aguas de la bahía, especialmente, en las zonas más próximas a la isla Cascajal.
- Los resultados de la circulación residual Euleriana exhiben un patrón de flujo semejante en todos los escenarios; la principal diferencia entre ellos radica en la aparición y ampliación de zonas con velocidades residuales superiores a 0.02 m/s, lo cual se debe a la acción conjunta de las mareas y los aportes fluviales. Es decir, las corrientes residuales aumentan en la medida en que se incrementan las mareas (mayores rangos) y los aportes fluviales. Durante un ciclo cuasiquincenal con mareas vivas máximas y caudales fluviales máximos es posible observar áreas más amplias con velocidades residuales de mayor intensidad (pudiendo alcanzar valores entre 0.5 y 1.0 m/s), como ocurre en el sector de Punta Soldado, en la parte suroeste de la entrada a la bahía; al mismo tiempo, se puede apreciar una corriente débil (menor o igual a 0.02 m/s) en la parte media de la bahía y en los esteros Gamboa y Aguacate. Ahora bien, durante un ciclo cuasiquincenal con mareas vivas mínimas y caudales fluviales mínimos se conserva el mismo patrón de flujo, pero se restringe la extensión de las zonas con velocidades residuales de alguna consideración

- El transporte neto de partículas indican una dirección ligeramente predominante de las corrientes hacia la bahía exterior, con algunas excepciones debidas a la existencia de corrientes residuales que se dirigen desde el delta del río Dagua hacia la zona norte de la isla Cascajal y a los esteros Gamboa y Aguacate. Este comportamiento respalda la hipótesis ya presentada en estudios anteriores acerca de que la bahía de Buenaventura podría encontrarse en equilibrio dinámico, debido a zonas de sedimentación donde se presentan corrientes residuales no tan fuertes como para arrastrarlos hacia fuera de la bahía, como ocurre en las cercanías de la isla Cascajal, en los esteros Gamboa y Aguacate; y zonas donde las partículas pueden ser transportadas mar afuera e incluso ocurrir erosión en algunos sectores donde se presentan las mayores corrientes. En este sentido, la bahía de Buenaventura depura de manera natural importantes volúmenes de contaminantes vertidos y sedimentos aportados por las descargas continentales, contribuyendo a su propia conservación y equilibrio ecológico.
- Aunque la modelación implementada en la presente investigación no implicó la aplicación de un modelo sedimentológico, genera información valiosa para el entendimiento de los procesos de transporte de sedimentos en la bahía. Existe una estrecha relación entre las corrientes residuales y los procesos de transporte y sedimentación en la bahía, especialmente en las zonas de aproximación a los muelles de los terminales marítimos. Buenaventura.

11 RECOMENDACIONES

Teniendo en cuenta las limitaciones en la información de campo disponible, durante el proceso de esquematización e implementación del modelo matemático se debieron realizar algunas suposiciones y simplificaciones. Debido a esto se hace necesario en próximos estudios actualizar y optimizar la calibración del modelo realizada en el presente estudio. Para ello se presentan las siguientes recomendaciones:

- Efectuar campañas de mediciones de campo que sean continuas y simultáneas en la bahía de Buenaventura, las cuales incluyan todo el ciclo cuasi-quincenal de mareas vivas – mareas muertas, en todas las secciones de frontera y en diferentes secciones y sitios de control seleccionados convenientemente (a lo largo del canal de navegación, alrededor de la isla Cascajal, en las confluencias de ríos afluentes y esteros, etc.), registrando diferentes variables, tales como, perfiles de velocidades, niveles de marea, salinidad, temperatura, etc. En la frontera de mar, localizada sobre la bahía exterior, y en la entrada de la bahía (La Bocana-Punta Soldado) se deberá efectuar el registro de los niveles de marea y realizar el análisis armónico de mareas. También se debe realizar mediciones del patrón de flujo en toda la extensión de la bahía considerando diferentes condiciones mareales y de descargas de los tributarios.
- Realizar una nivelación de precisión en toda la bahía y los ríos y esteros afluentes y establecer puntos fijos (BM's) que sirvan de referencia y apoyo para futuros trabajos batimétricos y topográficos y diferentes campañas de monitoreo.
- Considerando el comportamiento altamente complejo y dinámico de la bahía de Buenaventura resulta necesario realizar batimetrías periódicas en toda la bahía. Igualmente se requiere efectuar batimetrías periódicas en ríos tributarios y esteros hasta el límite de influencia de la marea.
- Para futuros estudios relacionados con la gestión integral de la bahía, y especialmente con la calidad de sus aguas, se deberán considerar otros aspectos y parámetros importantes, tales como los tiempos de residencia de las aguas, al igual que los sitios y cantidad y calidad de los vertimientos que se realicen al interior de la bahía.
- A futuro y siempre y cuando se disponga de la información de campo suficiente se recomienda implementar un modelo tridimensional con el fin de estudiar en mayor detalle la generación de flujos residuales dentro del estuario y su influencia en los procesos de mezcla horizontal y vertical.

12 BIBLIOGRAFÍA

Ayala, C. (2015). *Informe de Modelación hidrodinámica y de calidad de agua de la bahía de Buenaventura*, INVEMAR-CVC. Convenio No.061 de 2014, Santa Marta. p. 100.

Bárcena Gómez, J. (2015). *Desarrollo de una metodología para delimitar zonas de mezcla de vertidos industriales en estuarios*. (Tesis doctoral). Universidad de Cantabria. Recuperada de la base de datos Biblioteca Universidad del valle. (tdx.10803.329011).

Barreto, I., Ezzatti, P. & Fossati, M. (2009). *Estudio inicial del modelo MOHID*. Reporte Técnico RT 09-10. Universidad de la República. Montevideo, Uruguay.

Barrios, P. & Ramírez, L. (2012). *Dinámica y constaminación de lagunas costeras y estuarios*. Dinámica ambiental de ecosistemas acuáticos costeros. Elementos y ejemplos prácticos de diagnóstico. Primera edición, México, Instituto Politécnico Nacional. Pp. 97-138.

Cáceres, M., Valle-Levinson, A., Fierro, J., Bello, M. & Castillo, M. (2007). *Características del flujo residual en canales Pulluche y Chacabuco*. Revista Ciencia y Tecnología del Mar; Vol. 30 (2): 17 - 36, 2007.

Castillo, M. & Valenzuela, C. (2006). *Régimen de circulación en canales y fiordos australes*. Comité Oceanográfico Nacional - Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Valparaíso, p. 59-62.

CCBUN - Cámara de Comercio de Buenaventura. (2016). *Ventajas Competitivas*. Recuperado el 4 de Mayo de 2016 de: <http://www.ccbun.org/categorias/11/23/ventajas-competitivas>

Collazos, M. (2014). *Definición de objetivos de calidad de vertimientos en la bahía de Buenaventura desarrollo de la fase 1*, (tesis de pregrado). Universidad Autónoma de Occidente, Cali, Colombia. p. 12.

Consorcio Dragado Buenaventura. (2015). *Estudio y diseño de simulación de profundización del canal de acceso al puerto de Buenaventura*. Valle del Cauca. p. 31.

Consorcio Dragado Buenaventura. (2015). *Estudio y diseño del dragado de profundización del canal de acceso al puerto de Buenaventura*. Valle del Cauca. Estudios Modelo de Simulación Hidrosedimentológico. Documento: 2838-00-HY-RP-001. Revisión No. 01.

Consorcio Dragado Buenaventura. (2016). *Estudio y Diseño del Dragado de Profundización del Canal de Acceso al Puerto de Buenaventura*. Valle del Cauca. Estudios Modelo de Simulación Hidrosedimentológico. Documento: 2838-00-HY-RP-001. Revisión 01.

Córdoba, D., (2011). *Las ecuaciones de Navier-Stokes*. Barcelona. Recuperado el 12 de Junio de 2016 de: <http://garf.ub.es/milenio/img/Navier-Stokes.pdf>

Coss, R. (2003). *Simulación un enfoque práctico*. Limusa, México D.F.

Crites, R., Tchobanoglous. (2000). *Tratamiento de aguas residuales en pequeñas poblaciones*. Santafé de Bogotá: McGraw-Hill. Colombia. p. 776

Feng, S., (1986). *A three-dimensional weakly nonlinear dynamics on tide-induced Lagrangian residual current and mass-transport*. Chin. J. Oceanol. Limnol. 4 (2), 139–158. <http://dx.doi.org/10.1007/BF02850431>.

Fernández, M. (2011). *Revisión de un modelo regional de marea astronómica implementado sobre la región suroeste del Océano Atlántico*. Tesis de Maestría en Mecánica de los Fluidos Aplicada. Universidad de la República.

Fernández, M., Santero, P., Fossati, M., Dufrechou, E. & Ezzatti, P. (2011). *Estudio de un modelo hidrodinámico sobre arquitecturas multi-core*. Reporte Técnico RT 11-16. Universidad de la República. Montevideo, Uruguay.

Fischer, H., List, E., Koh, R. & Imberger, J. (1979). *Mixing in inland and coastal waters*. Ecademic Press Inc.

García-Silva, G. & Marinone, S.G. (1997). *Modelado de corrientes residuales en el Golfo de California mediante la utilización de diferentes tamaños de malla*. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California, México, Ciencias Marinas, Vol. 23, No. 4, 1997. pp. 505-519.

Gimenés, R. (2005). *Frío Industrial, Mantenimiento y Servicios a la Producción*. España: Marcombo S.A.

Gomes, N., Neves, R., Kenov, I., Campuzano, F. & Pinto, L. (2015). *Tide and Tidal Currents in the Cape Verde Archipelago*. Journal of Integrated Coastal Zone Management / Revista de Gestão Costeira Integrada, 15 (3): 395-408.

Gómez, M. & Padilla, E. (1990). *Geología, geomorfología y geofísica*, Volumen 2, 50 p. En: Prefactibilidad y declaratoria ambiental Puerto Industrial de Aguadulce. Universidad del Valle, Sede Regional Pacífico, Comité de Acción Ecológica CAE, Alcaldía de Buenaventura, Cali.

Gonzáles, M. (2003). *Modelos matemáticos discretos en las ciencias de la naturaleza: teoría y problemas*. Díaz de Santos, Madrid.

IDEAM. Subdirección de Meteorología. Bogotá, D.C. p. 21. Recuperado el 12 de Junio de

2016, de
[http://www.ideam.gov.co/documents/21021/23877/Caracterizaci%C3%B3n+de+la+Marea+\(2010\).pdf/a8ed71d8-3d7f-4a88-bed5-796c542aff4f](http://www.ideam.gov.co/documents/21021/23877/Caracterizaci%C3%B3n+de+la+Marea+(2010).pdf/a8ed71d8-3d7f-4a88-bed5-796c542aff4f)

Ji, Z. (2008). *Hydrodynamics and water quality: modelling rivers, lakes, and estuaries*. Jhon Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.

Laboratorio de Proyectos Hidráulicos del Pacífico. (1998). *Estudio para la modelación matemática hidrodinámica y sedimentológica de la bahía de Buenaventura*. Programa de campo Hidrosedimentológico. Ministerio de Transporte Dirección General de Transporte Marítimo. Universidad del Valle.

Maderos, L. (2009). *Las Mareas*. Recuperado el 22 de Mayo de 2016, de http://www.rodamedia.com/navastro/mareas/mareas_LMederos.pdf

Málikov, I. (2010). *Régimen de la marea en diferentes puntos de las costas colombianas*.

Mancera, J., Pinto, G., & Vilardy, S. (2013). *Patrones de distribución espacial de masas de agua en la bahía de Santa Marta, Caribe Colombiano: Importancia relativa del upwelling y outwelling*. Boletín de Investigaciones Marinas Y Costeras, 42(2), 329–360.

MARETEC. (2002). *Hydrodynamic Module user Guide*, manual pdf. Marine and Environmental Tecnology Center. Recuperado el 7 de febrero de 2017 de: <http://maretec.mohid.com/PublicData/products/Manuals/HydrodynamicsUserManual.pdf>

Marinone, S., Lavín, M. (1997). *Mareas y corrientes residuales en el Golfo de California*, en: M.F. Lavín, editor, Contribuciones a la Oceanografía Física en México, Monografía No. 3, Unión Geofísica Mexicana, p. 113-139.

Martins, F. (1999). *Modelação Matemática Tridimensional de Escoamentos Costeiros e Estuarinos usando uma Abordagem de Coordenada Vertical Genérica*. Ph. D, Thesis, Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico, 1999.

Moffatt & Nichol Int. (1998). *Estudio de la factibilidad y diseño para la profundidad del canal de acceso al puerto de Buenaventura*. Hidroestudios. Santafé de Bogotá, Valle del Cauca.

Montero, P. (1999). *Estudio de la Hidrodinámica de la Ría de Vigo Mediante un Modelo de Volúmenes Finitos*. Universidad de Santiago de Compostela.

Muñoz, D. (2015). *Estudio de la Dispersión de Hidrocarburos por Derrame Accidental en la Bahía de Buenaventura Colombia*. Universidad del Valle, Cali - Colombia.

Neves, R., Leitão, P., Braunschweig, F., Villarreal, M. & Pina, P. (2006). *MOHID Modelling*

System Description.

Otero, L. (2005). *Aplicación de un Modelo Hidrodinámico Bidimensional para Describir las Corrientes y la Propagación de Onda de Marea en la Bahía de Buenaventura*. Boletín Científico CCCP, (12): 9-21.

Palacios, C., Quirós, L., (2006). *Caracterización hidrodinámica de la bahía de Buenaventura*. Universidad del Valle. Cali.

Peng, X., Xinyan, M. & Wensheng, J. (2015). *Mapping tidal residual circulations in the outer Xiangshan Bay using a numerical model*. Journal of Marine Systems 154 (2016) 181-191. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2015.10.002>

Pérez V., G. J. (2007). *Historia , geografía y puerto como determinantes de la situación social de Buenaventura*, (91), 1–37.

Posada, B., Rozo, D., (2014). *Los espacios oceánicos y zonas costeras e insulares de Colombia*. Pp. 12-21. En: INVEMAR. Informe del estado de los ambientes y recursos marinos y costeros en Colombia: Año 2013. Serie de Publicaciones Periódicas No. 3. Santa Marta. 192p

Plan de Ordenamiento Territorial de Buenaventura (2001). *Secretaria de Planeación y Ordenamiento Territorial, Diagnóstico General y Prospectiva*. Volumen 1.

Quispe, J. (2007). *Simulación de la hidrodinámica en la Bahía de Paracas, Pisco-Perú; utilizando forzantes físicos*. Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Lima, Perú.

Ramírez, C. (1995). *Hydrodynamics and sediment transport processes in Buenaventura Bay, Colombia*. International Institute for Infrastructural, Hydraulic and Environmental Engineering. Delft, The Netherlands, 162 p.

Ramírez, C. (1999). *Estudio hidrodinámico y sedimentológico de la Bahía de Buenaventura mediante la implementación del modelo matemático Mike21*. Ministerio de Transporte. Dirección General de Transporte Marítimo, Laboratorio de Proyectos Hidráulicos del Pacífico Universidad del Valle, Cali, Colombia.

Ramírez, C. (2016). *Modelación de Flujo Libre*. Cali, Colombia; Notas de Clase.

Refsgaard. J. Knudsen, J. (1996). *Operational validation and intercomparison of different types of hydrological models*. Water Resour. Res., 32, 2189-2202.

Restrepo, S. (2010). *Solución de la Ecuación de Navier-Stokes por Diferencias Finitas*. Recuperado el 19 de Enero 2017 de

<http://repository.poligran.edu.co/bitstream/10823/122/1/0411010077.pdf>

Sánchez, M. (2004). *En El Sistema Lagunar Bahía Magdalena – Bahía Almejas , Baja California Sur , México : Modelación Y Experimentación*. Doctor En Ciencias Marinas. Departamento de Oceanología. La Paz, BCS, México, 228 p.

Sámano, M. (2011). *Desarrollo e Integración de Modelos Numéricos de Calidad del Agua en un Sistema de Información Geográfica*. Universidad de Cantabria. Departamento de Ciencias y Técnicas del Agua y del Medio Ambiente. Tesis Doctoral.

SOCIEDAD PORTUARIA REGIONAL DE BUENAVENTURA S.A. (1995). *Estudio para el Dragado de la Zona de Maniobras y Muelles del Terminal Marítimo de Buenaventura*. HASKONING – Universidad del Valle.

Sosa, D. (2010) *Simulación de dispersión de contaminantes a futuro en las playas de Puerto Escondido Oaxaca*. Universidad del Mar Campus Puerto Escondido.

Torres, C. (2015). *Aplicación del modelo numérico MOHID para el estudio hidrodinámico y de transporte de la Ciénaga Mallorquín*. Universidad de la Costa, Barranquilla – Colombia.

Universidad de Granada (2010). *Propuesta metodológica para diagnosticar y pronosticar las consecuencias de las actividades humanas en el estuario del Guadalquivir*. Recuperado el 31 de enero de 2017 de: <http://portal.apsevilla.com/wps/wcm/connect/4aaed18045d53b679e5eff9f290472a1/Cap06.pdf?MOD=AJPERES>

Vaz, N., Dias, J.M., 2014. *Residual currents and transport pathways in the Tagus estuary, Portugal: the role of freshwater discharge and wind*. In: Green, A.N. and Cooper, J.A.G. (eds.), proceedings 13th International Coastal Symposium (Durban, South Africa), Journal of Coastal Research, Special Issue No. 70, pp. 610-615, ISSN 0749-0208.

Vilas, F., Bernabéu, A., Rubio, B. & Rey, D. (2010). *Estuarios, rías y llanuras intermareales. En: Sedimentología del proceso físico a la cuenca sedimentaria*. Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Madrid, p.619-665.

Vivas-Aguas, L., Tosic, M., Sánchez, J., Narváez, S., Cadavid, B., Bautista, P., Betancourt, J., Parra, J., Carvajalino, M., & Espinosa, L., (2012). *Diagnóstico y evaluación de la calidad ambiental marina en el Caribe y Pacífico colombiano*. Red de vigilancia para la conservación y protección de las aguas marinas y costeras de Colombia. -REDCAM. Informe técnico 2011. INVEMAR. Santa Marta, 229 p.

Vivas-Aguas, L., Vargas, M., Guillen, K., Villarraga, M., & Sánchez, D., (2014).

Vulnerabilidad de la población costera frente a la contaminación orgánica y microbiológica en la bahía de Buenaventura. Serie de Publicaciones Generales del Invemar No. 76, Santa Marta, 24 p.

Xuan, J., Yang, Z., Huang, D., Wang, T. & Zhou, F. (2014). *Tidal residual currents and its role in the mean flow on the Changjiang Bank*. Journal of Marine Systems 154 (2016) 66-81. https://doi.org/10.1016/elsevier_cm_policy

ANEXO A. INFORMACIÓN HISTÓRICA

PRECIPITACIÓN MEDIA MENSUAL MULTIANUAL (mm) (Aeropuerto Buenaventura)													
Año	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Vr. Anual
1946	301.5	257.3	184.2	1119.0	745.7	709.1	459.5	3776.3	-	-	-	-	7552.6
1947	863.7	-	666.8	-	878.0	-	830.2	1224.0	952.6	1193.0	-	608.3	7219.6
1948	480.3	245.8	229.8	613.6	-	555.8	-	337.2	97.2	595.9	870.2	698.6	4724.4
1961	107.6	-	269.0	8.0	361.0	-	596.0	-	331.2	-	352.5	-	2037.3
1962	435.0	127.0	447.0	379.4	-	455.8	-	587.9	547.1	586.4	316.6	-	3890.2
1963	86.0	119.0	149.1	655.0	457.0	375.7	792.6	756.1	719.0	-	1134.0	671.1	5914.6
1964	260.0	426.0	337.0	-	440.8	734.2	406.0	490.0	767.0	963.0	897.0	615.0	6336.0
1965	638.0	352.0	476.0	538.0	402.4	538.4	310.0	521.3	732.9	645.9	481.7	225.4	5862.0
1966	337.8	350.1	397.9	329.7	-	501.4	621.8	-	676.0	-	187.3	-	3402.0
1967	297.0	-	269.0	-	362.0	-	210.2	-	607.2	445.2	409.0	546.0	3145.6
1968	204.5	260.0	209.0	551.5	883.5	746.5	468.0	687.3	-	763.5	519.7	641.8	5935.3
1969	498.8	209.9	481.9	429.5	534.7	461.0	463.3	439.0	977.0	811.0	552.0	517.2	6375.3
1970	176.0	433.0	237.0	453.0	904.0	750.0	646.0	440.0	663.0	815.0	731.5	589.5	6838.0
1971	492.5	204.5	399.0	359.0	753.0	625.0	535.0	-	978.0	657.5	901.0	601.2	6505.7
1972	481.5	177.0	171.0	308.0	465.0	470.5	445.5	431.0	510.0	719.5	406.5	425.0	5010.5
1973	101.0	263.0	-	136.0	409.0	642.7	448.0	-	289.0	538.0	481.8	1002.0	4310.5
1974	107.9	148.1	321.0	228.0	-	424.3	428.4	243.5	408.3	889.2	882.8	927.3	5008.8
1975	372.5	327.6	528.7	422.3	771.6	467.1	505.7	625.5	693.1	867.9	921.7	663.7	7167.4
1976	371.3	342.9	417.6	596.5	477.9	343.7	427.0	366.2	467.8	846.5	609.9	383.4	5650.7
1977	329.5	338.2	616.4	344.3	891.8	650.0	615.4	712.8	675.4	1086.0	671.5	658.7	7590.0
1978	238.8	131.4	462.7	473.7	843.3	399.1	836.8	466.8	1105.0	807.6	755.1	487.6	7007.9
1979	203.3	312.6	511.6	406.3	487.0	501.8	662.0	873.7	826.5	776.8	870.5	163.4	6595.5
1980	110.4	-	49.1	-	188.4	275.6	730.0	422.9	681.1	546.8	505.5	727.3	4237.1
1981	428.8	268.5	350.3	918.3	780.3	518.8	372.1	-	718.2	771.0	1118.0	613.6	6857.9
1982	342.3	151.9	291.2	602.6	720.0	442.0	560.5	795.4	734.0	642.6	406.3	331.7	6020.5
1983	553.0	286.3	-	506.6	265.2	310.4	427.6	428.3	368.8	557.7	499.2	622.9	4826.0
1984	343.2	-	513.9	313.9	424.3	610.9	525.7	519.5	693.4	727.6	1029.0	454.6	6156.0
1985	254.1	198.4	-	224.4	564.5	763.9	452.9	667.2	595.4	797.0	1041.0	698.0	6256.8
1986	279.7	121.2	340.0	543.0	630.0	681.0	370.0	732.0	838.0	1056.0	649.4	-	6240.3
1987	337.0	314.0	442.0	472.0	443.0	407.0	421.2	464.6	570.0	669.0	766.0	597.0	5902.8
1988	402.0	455.0	185.0	600.5	-	529.0	548.0	-	504.9	-	370.2	693.0	4287.6
1989	381.0	295.0	137.0	454.0	505.0	574.0	763.0	494.0	772.0	988.0	715.0	492.0	6570.0
1990	820.0	320.0	415.0	798.0	617.0	416.0	642.0	739.0	1030.0	957.0	711.0	647.0	8112.0
1991	354.0	340.0	357.0	545.0	622.2	529.0	541.0	437.0	940.0	742.0	757.0	509.0	6673.2
1992	615.3	236.0	554.0	452.0	285.0	449.7	580.0	572.3	794.8	709.5	579.2	908.5	6736.3
1993	484.3	293.9	489.9	622.7	511.6	527.3	524.9	871.8	780.5	501.3	877.0	520.9	7006.1
1994	330.2	298.6	691.3	437.4	730.0	663.8	431.4	518.1	764.0	550.0	695.5	407.7	6518.0
1995	353.4	-	103.0	-	349.0	476.8	634.0	782.8	679.0	517.0	581.0	655.0	5131.0
1996	487.0	253.1	381.6	-	517.1	-	604.3	-	547.1	-	679.0	-	3469.2
1997	231.0	204.0	336.0	679.0	430.0	458.0	478.0	265.4	732.8	383.0	673.4	356.5	5227.1
1998	487.5	576.0	400.3	358.0	549.0	372.1	386.0	792.0	791.0	718.0	968.0	535.0	6932.9

1999	373.0	378.0	330.0	765.0	595.0	826.0	676.0	955.0	501.0	828.0	674.0	960.0	7861.0
2000	319.0	415.0	466.0	283.9	601.4	518.3	744.9	836.0	865.0	1124.0	489.0	6662.5	13325.0
2001	151.0	377.0	335.0	406.3	771.9	514.8	671.0	699.9	749.6	814.2	1120.0	692.6	7303.3
2002	593.8	237.8	436.8	511.1	635.0	430.2	686.4	767.1	777.1	731.9	529.4	558.8	6895.4
2003	656.2	381.4	461.0	658.9	647.9	527.3	359.6	1064.0	776.7	759.2	478.2	710.3	7480.7
2004	332.9	108.9	239.9	478.2	832.6	521.6	642.1	593.8	1033.0	869.5	604.7	433.0	6690.2
2005	574.3	248.6	361.8	415.4	767.4	673.5	999.6	591.3	690.6	959.1	902.6	432.0	7616.2
2006	339.9	182.6	658.8	755.8	736.5	732.7	558.2	760.7	763.3	742.9	852.4	511.0	7594.8
2007	582.4	192.2	330.3	755.8	870.6	-	381.6	748.1	611.2	957.0	871.9	640.6	6941.7
2008	370.1	270.1	442.9	401.2	480.7	528.7	499.4	635.9	616.6	1150.0	755.1	6150.7	12301.4
2009	404.3	320.8	475.9	371.3	742.7	599.4	486.0	651.3	617.5	966.7	888.5	705.4	7229.8
2010	237.2	385.8	476.7	371.5	610.5	421.3	730.4	922.5	1189.0	941.7	858.6	-	7145.2
2011	183.4	105.3	213.3	477.0	464.3	615.9	555.5	560.8	919.2	659.2	913.4	798.9	6466.2
2012	234.9	200.1	494.8	529.1	554.8	697.5	538.3	929.3	587.4	1063.0	682.1	723.7	7235.0
2013	208.1	502.5	347.2	229.9	862.4	416.2	775.8	832.2	1169.0	482.9	937.4	6763.6	13527.2
2014	458.7	170.9	385.1	674.2	533.5	374.4	413.6	707.3	3717.7	3.0	-	-	7438.4
2015	564.2	374.5	574.1	496.9	448.8	2458.5	-	-	-	-	-	-	4917.0
2016	257.8	397.2	225.7	643.2	670.5	534.8	401.4	3130.6	-	-	-	-	6261.2
Media Mensual	369.8	275.8	376.3	492.5	582.4	549.2	550.4	757.3	766.2	762.6	706.1	957.9	

PRECIPITACIÓN MEDIA MENSUAL MULTIANUAL (mm) (Colpuertos)													
Año	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Vr. Anual
1969	401.3	504.4	327.9	505.0	513.7	1131.0	746.3	-	650.4	543.7	532.4	-	10647.4
1970	419.4	378.3	-	421.1	-	527.2	-	690.4	-	693.1	648.3	493.6	4271.4
1971	708.8	328.4	335.8	277.8	695.6	701.1	543.0	855.6	687.9	882.3	662.7	846.5	7525.5
1972	596.5	247.1	423.7	401.0	627.1	452.7	554.0	525.0	555.6	569.6	391.9	280.7	5624.9
1973	200.3	214.5	536.1	752.0	723.3	461.5	562.3	925.6	737.0	1203.0	727.9	885.2	7928.7
1974	253.9	93.1	360.1	349.3	645.5	591.2	-	432.5	954.8	1080.0	1084.0	1240.0	7084.4
1975	266.8	383.6	353.2	397.7	1073.0	562.1	607.9	873.9	727.2	1054.0	1119.0	807.7	8226.1
1976	262.7	277.6	609.9	388.2	349.0	449.3	358.5	700.5	-	837.7	-	795.6	5029.0
1977	195.8	415.0	351.4	513.1	-	634.2	-	545.5	-	619.4	-	771.4	4045.8
1978	304.2	273.5	431.8	507.5	656.9	-	646.1	9.0	647.0	-	783.2	-	4259.2
1979	241.6	-	279.6	228.3	531.0	584.0	565.6	968.8	1072.0	814.3	870.6	463.8	6619.6
1980	393.9	327.9	347.5	328.0	757.9	392.9	908.3	884.2	777.8	831.1	1217.0	682.0	7848.5
1981	298.4	444.6	555.5	800.9	809.5	500.8	600.2	942.6	769.0	1285.0	-	1255.0	8261.5
1982	413.5	-	250.1	224.8	466.9	599.8	552.8	437.3	-	1084.0	998.7	601.1	5629.0
1983	483.8	-	156.8	454.0	212.1	211.8	514.1	510.7	-	928.4	530.0	690.8	4692.5
1984	381.2	498.0	3.0	484.9	358.2	561.9	643.3	923.4	781.1	851.3	1203.0	670.4	7359.7
1985	340.9	213.7	318.5	774.1	907.4	478.9	894.5	822.7	996.3	1078.0	606.7	639.0	8070.7
1986	347.1	238.7	358.5	575.4	901.1	908.6	814.3	881.2	1005.0	895.0	839.4	271.0	8035.3
1987	253.5	-	357.0	377.8	474.5	367.1	336.9	295.7	-	550.5	-	710.3	3723.3
1988	354.7	578.2	192.8	720.3	455.6	616.0	635.5	-	821.9	1040.0	731.2	871.6	7017.8
1989	321.8	253.2	73.4	578.9	416.3	901.1	874.3	541.8	925.6	997.1	890.1	497.7	7271.3
1990	780.8	296.7	652.5	620.7	626.5	551.2	818.5	946.2	1152.0	1114.0	862.8	671.3	9093.2
1991	398.5	205.9	-	426.7	480.4	929.0	849.2	653.4	552.7	1010.0	704.0	755.0	6964.8

1992	786.4	296.7	486.2	276.1	653.8	274.8	-	669.7	736.7	1146.0	761.3	351.0	6438.7
1993	646.8	256.0	361.2	571.2	788.7	513.7	509.2	1258.0	987.9	978.8	785.8	1070.0	8727.3
1994	446.3	287.0	374.5	-	373.2	-	712.7	628.0	650.0	616.6	1126.0	872.1	6086.4
1995	199.7	300.0	380.4	963.8	788.2	587.5	630.8	701.6	1061.0	713.6	998.1	1124.0	8448.7
1996	531.6	260.9	451.9	799.6	1048.0	549.3	905.3	1001.0	1305.0	733.4	1070.0	902.1	9558.1
1997	187.7	181.1	240.5	535.1	496.5	445.1	486.7	409.4	-	424.7	502.0	274.9	4183.7
1998	224.6	280.9	409.3	310.9	613.4	558.8	465.9	619.6	835.9	1018.0	1149.0	744.4	7230.7
1999	372.2	409.3	381.7	876.9	-	758.5	1008.0	1282.0	575.9	926.4	758.1	1039.0	8388.0
2000	375.9	272.5	544.9	392.3	559.2	-	444.9	809.7	846.3	712.5	904.5	571.7	6434.4
2001	472.9	412.2	323.9	433.5	894.1	606.7	795.8	866.6	974.1	964.3	1372.0	699.2	8815.3
Media Mensual	389.8	314.8	362.2	508.3	629.9	580.3	654.7	729.4	837.9	881.1	1021.4	727.4	

TEMPERATURA MEDIA MENSUAL MULTIANUAL (°C) (Aeropuerto Buenaventura)													
Año	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Vr. Anual
1962	28.0	26.7	27.3	27.8	28.0	27.5	28.3	26.8	27.1	26.9	26.7	25.7	27.2
1965	26.8	26.4	26.4	25.9	26.4	26.2	26.6	26.4	26.4	-	-	-	26.4
1966	27.1	27.4	26.4	27.0	26.2	26.1	25.4	25.5	26.4	-	-	-	26.4
1967	25.9	26.2	26.4	26.1	25.7	26.1	25.7	25.3	25.5	25.0	25.1	25.7	25.7
1968	25.7	25.6	25.8	25.9	25.8	25.3	25.7	26.2	26.1	25.6	25.8	26.0	25.8
1969	25.8	26.1	26.6	26.9	26.9	26.6	26.6	25.6	26.3	25.5	26.2	26.1	26.3
1970	26.1	26.2	26.5	26.8	26.7	26.1	25.7	25.6	25.4	25.6	25.2	25.1	25.9
1971	25.1	25.3	25.4	25.2	25.1	25.0	25.2	24.9	-	25.0	24.9	25.0	25.1
1972	25.1	25.6	26.0	-	25.8	25.5	25.5	25.7	25.5	25.3	25.5	25.4	25.5
1973	25.6	25.6	25.6	25.6	26.0	25.2	25.5	25.3	25.5	25.4	26.4	26.5	25.7
1974	26.8	26.7	25.8	25.9	25.6	25.3	25.4	25.3	25.6	25.6	25.8	-	25.8
1975	25.5	25.2	25.6	25.7	25.5	25.6	25.2	25.5	25.5	25.3	25.1	25.0	25.4
1976	25.4	-	25.2	-	25.6	25.5	3.0	25.2	-	25.5	25.5	25.4	22.9
1977	25.7	-	25.4	26.3	3.0	26.1	3.0	25.4	-	25.4	-	25.6	20.7
1979	25.6	-	25.6	25.8	25.7	25.6	25.9	-	25.7	-	25.8	24.0	25.5
1981	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1983	-	-			-	-	-	-	-	-	-	-	-
1985	25.4	-	25.4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	25.4
1986	25.6	25.6	25.9	-	25.7	3.0	-	-	-	-	-	-	21.2
1991	26.9	-	26.8	-	26.3	-	25.8	-	26.5	-	-	-	26.5
1992	26.0	-	26.8	-	26.9	-	26.9	-	*	25.9	-	26.0	26.4
1993	26.0	-	26.3	-	26.7	-	26.8	-	26.8	-	26.5	-	26.5
1996	25.2	-	25.2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	25.2
1997	24.9	26.1	-	26.4	-	26.1	-	26.6	3.0	26.4	-	26.9	23.3
1998	27.4	-	27.4	27.3	27.2	-	27.1	-	26.5	-	26.0	-	27.0
1999	25.4	-	25.5	-	25.9	25.8	25.6	25.3	25.3	25.4	25.2	25.1	25.5
2000	24.7	-	25.3	-	25.7	-	25.8	25.9	3.0	25.7	25.4	25.7	23.0
2001	25.7	-	26.2	-	26.1	-	26.5	26.0	25.8	-	26.0	-	26.0
2002	25.8	26.2	-	26.4	26.2	-	26.4	25.8	25.6	-	25.9	25.9	26.0

2003	25.9	-	25.9	-	26.6	-	26.1	-	25.8	-	25.7	-	26.0
2004	26.0	26.4	26.5	25.9	26.0	-	25.9	-	25.9	25.7	-	25.8	26.0
2005	26.2	-	26.0	26.7	-	27.4	27.1	-	26.5	26.5	26.3	26.3	26.6
2006	25.7	26.0	26.3	26.1	26.2	25.9	26.1	26.4	26.2	26.4	26.2	26.2	26.1
2007	26.5	-	26.4	25.6	26.2	25.8	25.7	25.7	25.2	25.4	25.2	25.2	25.7
2008	24.9	25.6	26.3	26.7	26.5	26.1	26.0	26.0	26.1	25.9	25.5	25.6	25.9
2009	25.5	26.1	25.9	26.4	-	26.4	26.2	26.4	26.4	26.6	25.9	26.3	26.2
2010	26.5	26.9	27.1	27.1	26.8	26.3	25.7	25.9	25.7	25.6	24.8	24.9	26.1
2011	25.6	26.1	26.5	26.6	26.5	-	26.3	-	26.0	26.5	26.1	25.3	26.2
2012	25.7	25.8	26.3	26.5	26.4	26.3	26.2	26.3	26.2	25.8	-	26.2	26.2
2013	26.4	26.1	26.7	27.3	26.4	26.2	-	26.0	-	26.0	-	26.0	26.3
2014	26.3	26.5	26.7	27.1	-	27.0	27.4	27.4	-	26.3	-	26.8	26.8
Media Mensual	25.9	26.1	26.1	26.4	25.5	25.2	24.8	25.9	24.5	25.8	25.7	25.7	

TEMPERATURA MEDIA MENSUAL MULTIANUAL (°C) (Colpuertos)													
Año	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Vr. Anual
1969	27.1	27.2	26.7	26.4	25.7	26.3	25.8	26.1	25.8	26.3	-	-	26.3
1970	25.9	25.9	25.6	25.2	25.8	25.5	24.2	23.8	25.0	25.2	-	-	25.2
1971	25.2	25.0	24.3	25.4	25.5	25.3	25.2	25.3	25.4	25.0	24.8	24.9	25.1
1972	24.6	25.9	26.4	25.9	25.1	25.6	25.7	24.7	25.1	25.3	25.5	26.4	25.5
1973	26.2	26.6	26.4	26.6	25.6	25.2	25.3	24.9	24.6	23.5	23.3	24.7	25.2
1974	24.9	25.8	25.6	26.0	26.2	25.8	25.1	25.0	25.2	25.1	24.9	25.1	25.4
1975	25.6	25.8	26.5	25.9	25.4	25.5	24.9	25.5	25.0	25.0	25.5	-	25.5
1976	25.8	26.3	26.9	27.2	27.2	27.3	26.9	25.5	25.5	26.0	26.5	-	26.5
1977	25.8	25.8	26.5	25.4	25.5	25.8	26.3	25.9	-	-	-	-	25.9
1978	27.2	27.7	27.5	26.7	26.0	26.0	26.0	26.3	26.7	-	-	-	26.7
1979	26.5	3.0	26.3	-	25.9	26.2	-	26.0	25.9	25.9	26.0	25.4	23.7
1980	26.3	26.1	26.7	26.8	26.3	26.3	26.0	25.9	25.6	25.7	25.7	25.8	26.1
1981	25.5	-	26.1	26.7	26.1	26.0	25.6	25.9	25.5	25.8	25.3	25.3	25.8
1982	26.2	-	26.6	-	26.4	26.3	-	26.1	26.4	26.2	26.4	-	26.3
1983	27.7	-	27.7	-	27.4	-	27.4	-	27.5	-	27.3	27.3	27.5
1984	25.7	-	-	26.2	26.4	-	25.9	-	25.6	-	25.4	25.3	25.8
1985	24.9	25.8	25.8	26.1	26.1	25.8	25.4	25.5	25.4	25.4	25.4	25.5	25.6
1986	25.6	-	26.3	26.0	25.9	-	25.8	-	26.1	26.0	25.6	-	25.9
1987	26.3	27.0	27.1	27.1	26.8	26.6	26.6	-	26.7	-	26.3	-	26.7
1988	26.4	26.5	26.5	26.1	26.2	25.4	-	25.4	25.6	-	25.4	25.3	25.9
1989	25.8	25.8	26.2	26.4	-	26.0	-	25.8	26.1	25.7	25.6	25.8	25.9
1990	26.3	26.4	26.4	26.3	-	26.5	26.3	26.1	26.0	25.8	25.7	25.8	26.1
1991	26.3	26.6	27.0	-	26.6	26.5	26.2	26.0	26.5	26.4	25.9	26.0	26.4
1992	26.3	26.7	27.2	-	27.2	-	27.1	-	26.9	25.9	26.3	25.8	26.6
1993	26.0	-	26.4	27.2	27.1	-	27.0	-	26.7	-	26.9	-	26.8
1994	25.9	26.4	-	26.5	-	26.5	26.2	26.1	25.8	-	26.1	-	26.2
1995	27.0	27.3	26.5	26.7	-	26.6	26.3	-	26.2	-	26.5	25.8	26.5

1996	26.1	26.7	27.0	27.5	-	27.0	-	26.8	-	27.0	-	26.4	26.8
1997	26.2	-	26.8	27.2	-	26.8	-	27.5	-	27.2	-	27.6	27.0
1998	28.1	28.1	-	28.1	28.3	28.0	27.1	26.5	26.4	26.6	26.3	25.6	27.2
1999	25.6	25.7	26.2	26.0	-	26.1	-	26.3	-	26.1	26.0	-	26.0
2000	25.6	26.7	26.6	-	27.4	27.2	-	26.6	-	-	-	26.7	26.7
Media Mensual	26.1	25.5	26.5	26.4	26.3	26.2	26.0	25.8	25.9	25.8	25.8	25.8	

HUMEDAD RELATIVA MEDIA MENSUAL MULTIANUAL (%) (Apto. B/ventura)													
Año	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Vr. Anual
1962	95	94	83	78	80	86	-	-	-	-	-	-	86.0
1965	84	86	85	88	86	86	85	85	86	-	-	-	85.7
1966	84	83	87	85	88	86	88	87	86	-	-	-	86.0
1967	88	86	86	87	88	85	87	88	88	89	90	87	87.4
1968	87	86	87	87	87	88	87	85	86	87	87	86	86.7
1969	88	87	87	85	86	86	86	87	87	88	86	87	86.7
1970	87	87	87	88	84	85	88	97	88	89	89	90	88.3
1971	89	87	88	87	88	89	88	88	-	89	89	89	88.3
1972	89	87	84	-	85	87	87	87	88	89	87	88	87.1
1973	88	88	88	88	85	88	87	88	86	87	85	82	86.7
1974	82	82	85	85	87	88	85	88	85	84	85	-	85.1
1975	83	86	85	84	84	85	84	85	85	87	86	86	85.0
1976	87	-	87	-	86	-	86	-	87	88	87	87	86.9
1977	89	87	-	85	-	88	-	88	-	86	-	86	87.0
1979	85	-	85	86	86	85	87	-	88	-	87	-	86.1
1983	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1985	88	-	88	-	-	-	-	-	-	-	-	-	88.0
1986	88	-	85	-	84	-	86	-	-	-	-	-	85.8
1991	87	-	88	-	88	-	89	-	88	-	-	-	88.0
1992	89	-	87	-	86	-	-	86	-	-	89	-	87.4
1993	87	-	87	-	86	-	87	-	85	-	86	-	86.3
1996	91	-	91	-	-	-	-	-	-	-	-	-	91.0
1997	89	-	86	-	86	-	87	-	87	-	85	-	86.7
1998	87	86	88	87	87	87	88	88	87	88	89	89	87.6
1999	86	87	86	88	88	88	88	88	88	89	90	89	87.9
2000	88	88	88	86	90	88	89	89	89	89	90	-	88.5
2001	81	87	88	88	89	90	89	90	89	91	90	91	88.6
2002	90	89	90	89	89	90	91	90	89	89	89	89	89.5
2003	89	90	87	89	90	89	89	88	90	90	89	89	89.1
2004	88	87	89	90	91	88	88	89	89	89	88	88	88.7
2005	89	88	87	86	86	87	88	90	90	88	89	88	88.0
2006	88	89	88	89	90	91	91	89	90	90	90	90	89.6
2007	91	89	93	90	82	93	91	91	91	92	92	92	90.6
2008	92	88	86	87	87	89	87	87	88	88	90	89	88.2

2009	89	88	88	87	88	89	88	88	88	90	89	90	88.5
2010	90	89	89	87	88	81	89	88	87	89	91	90	88.2
2011	89	89	84	85	88	90	87	86	88	88	89	89	87.7
2012	87	87	88	86	88	81	88	88	89	89	88	89	87.3
2013	89	89	89	85	88	90	89	88	-	89	89	89	88.5
2014	87	88	85	86	85	85	84	81	-	-	-	-	85.1
Media Mensual	87.8	87.5	87.1	86.6	86.8	87.4	87.6	87.9	87.7	88.6	88.3	88.4	

HUMEDAD RELATIVA MEDIA MENSUAL MULTIANUAL (%) (Colpuertos)													
Año	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Vr. Anual
1969	84	85	86	86	87	85	86	86	87	86	-	-	85.8
1970	86	83	86	88	85	86	89	91	89	87	-	-	87.0
1971	90	89	88	87	86	-	87	91	90	86	89	89	88.4
1972	88	86	84	84	86	85	86	87	86	84	85	85	85.5
1973	85	83	85	84	85	87	86	87	86	87	88	86	85.8
1974	85	82	82	83	82	84	81	82	-	81	82	84	82.5
1975	81	81	82	82	80	82	78	82	82	81	81	-	81.1
1976	79	76	78	78	78	78	78	78	77	86	79	-	78.6
1977	89	91	89	91	91	89	89	90	-	-	-	-	89.9
1978	85	87	88	83	80	78	79	78	82	-	-	-	82.2
1979	77	-	79	-	80	79	-	80	79	80	79	82	79.4
1980	87	-	87	-	-	-	-	-	-	-	-	-	87.0
1981	86	-	86	84	89	88	87	87	88	88	89	90	87.5
1982	85	-	85	-	87	87	-	87	87	86	86	-	86.3
1983	84	-	84	-	85	-	85	-	84	-	85	84	84.4
1984	86	-	-	86	86	-	88	-	88	-	88	89	87.3
1985	88	-	88	-	88	-	88	-	89	-	88	-	88.2
1986	88	-	-	84	-	86	-	88	-	89	-	87	87.0
1987	87	-	86	-	85	-	86	-	87	-	89	-	86.7
1988	87	88	-	87	-	89	-	89	-	90	-	-	88.3
1989	90	-	89	86	-	89	91	-	91	90	-	92	89.8
1990	89	-	89	90	-	90	-	89	90	-	89	-	89.4
1991	90	90	-	90	90	-	90	-	92	-	92	90	90.5
1992	92	91	90	90	91	-	90	90	90	90	91	91	90.5
1993	91	-	90	88	88	-	88	91	-	90	-	90	89.5
1994	91	-	89	-	87	87	88	88	90	-	92	-	89.0
1995	86	-	84	-	86	-	86	-	87	-	88	-	86.2
1996	86	82	83	-	83	-	87	89	-	89	85	-	85.5
1997	84	-	82	-	83	-	84	-	82	-	83	-	83.0
1998	83	83	84	83	83	85	85	87	85	89	86	90	85.3
1999	91	91	90	89	89	-	92	87	88	88	87	81	88.5
2000	87	87	83	85	85	86	84	-	86	-	86	-	85.4

Media Mensual	86.5	85.6	85.6	85.8	85.4	85.3	86.1	86.5	86.5	86.7	86.4	87.3	
----------------------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	--

VEL. DEL VIENTO MEDIA MENSUAL MULTIANUAL (m/s) (Aeropuerto Buenaventura)													
Año	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Vr. Anual
1946-2005	-	-	0.8	0.6	0.9	0.0	0.6	0.5	0.9	0.8	0.9	0.7	0.7
2006	1.1	0.8	0.7	0.7	-	0.8	0.8	0.9	0.6	0.7	0.7	0.4	0.7
2007	-	0.9	0.9	0.9	0.9	1.0	1.1	1.1	1.1	1.2	1.1	1.1	1.0
2008	0.9	1.0	1.0	1.1	1.0	-	-	-	-	-	0.8	1.2	1.0
2009	1.0	1.1	0.9	-	-	1.0	-	1.1	-	-	1.1	-	1.0
2010	0.9	-	1.0	1.0	1.1	-	-	-	1.1	-	0.9	-	1.0
2011	0.6	-	0.5	0.7	0.9	0.8	-	-	1.1	1.0	1.1	1.1	0.9
2012	0.9	0.7	0.4	0.4	0.5	-	-	-	-	-	-	-	0.6

DIRECCIÓN DEL VIENTO (Aeropuerto Buenaventura)													
Año	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	
2004	-	-	-	-	-	-	-	-	SW	SE	S	S	
2005	E	SW	S	W	W	W	W	W	W	-	-	-	
2006	SW	SW	W	SW	-	W	W	W	W	W	W	W	
2007	SW	W	W	SW	SW	SW	SW	SW	SW	SW	W	SW	
2008	SW	SW	W	W	W	NE	SW	-	-	-	SW	W	
2009	W	W	NW	NW	W	W	W	W	W	W	W	SW	
2010	W	N	W	W	W	W	W	W	W	NE	NW	W	
2011	W	-	NW	NW	W	SW	SW	-	SW	SW	SW	SW	
2012	SW	SW	SW	SW	SW	SW	-	-	-	-	-	-	

VELOCIDAD DEL VIENTO MEDIA MENSUAL MULTIANUAL (m/s) (Colpuerto)													
Año	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Vr. Anual
1969-2001	0.7	2	0.9	0.2	0.1	0.1	0.4	0.5	0.4	0.2	0.2	0.6	0.53

DIRECCIÓN DEL VIENTO (Colpuerto)													
Año	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	
1982	SW	SW	S	NE									
1983	SW	S	SW	NE	SW	S	SW	SW	SW	S	W	SW	
1984	SE	SW	W	SW	SW	SW	SW	SW	S	SW	SW	SW	

1985	SW	SW	SW	SW	SW	SW	SW	W	SW	SW	S	-
1986	SW	SE	SW	S	NE	SW	W	SW	SW	-	-	-
1987	C	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1988	W	SW	SW	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1989	W	SW	SW	SW	SW	SW	-	-	-	-	-	-
1990	N	E	SW	SW	SW	S	SW	SW	-	-	-	-
1991	SW	W	SW	SW	SW	N	N	SW	E	SW	N	-
1992	S	NE	NE	NE	SW	S	N	SW	SW	N	S	N
1993	SW	SW	S	S	E	S	-	-	-	-	-	-
1994	SW	SW	SW	SW	S	-	-	-	-	-	-	-
1995	SW	SW	SW	E	SW	SW	SW	SW	NW	SW	SW	-
1996	SW	SW	SW	S	SE	S	SW	SW	S	S	W	-
1997	W	SW	SW	SW	SW	E	SW	SW	SW	S	S	-
1998	NE	S	S	SW	SW	SW	SW	SW	-	-	-	-
1999	W	SW	S	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2000	SW	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2001	W	SW	S	S	-	-	-	-	-	-	-	-

NUBOSIDAD MEDIA MENSUAL MULTIANUAL (Octas) (Aeropuerto Buenaventura)													
Año	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Vr. Anual
1964	7	8	7	8	8	8	7	8	8	8	8	8	8
1965	8	8	7	8	7	7	8	7	8	7	7	6	7
1966	7	6	7	7	7	7	7	7	7	6	7	7	7
1967	6	7	7	6	7	7	7	7	7	7	7	7	7
1968	7	8	7	7	7	7	7	7	7	7	7	6	7
1969	7	8	7	7	7	6	7	8	7	7	7	8	7
1970	7	8	7	8	7	7	7	7	7	7	7	7	7
1971	7	8	7	7	7	6	7	8	3	8	7	8	7
1972	7	7	6	6	6	6	6	6	6	7	6	6	6
1973	6	7	7	6	6	6	7	7	8	8	7	7	7
1974	7	7	7	7	7	7	8	7	8	8	6	7	7
1975	7	8	7	8	7	7	7	8	7	8	8	7	7
1976	7	7	8	7	7	7	6	8	7	7	7	7	7
1977	7	7	7	7	7	8	8	7	8	8	7	7	7
1978	6	8	7	7	7	7	7	7	8	8	8	7	7
1979	7	3	7	8	7	7	7	7	7	7	3	7	6
1980	2	6	3	6	6	7	7	7	6	7	7	6	6
1981	2	2	2	2	2	2	7	3	7	8	3	8	4
1982	6	3	7	7	7	3	6	7	6	7	7	7	6
1983	7	3	7	7	6	3	6	3	6	6	3	7	5
1984	6	3	7	8	8	3	7	3	7	3	7	7	6
1985	7	3	8	7	7	3	-	-	-	-	-	-	6
1987	7	3	8	3	7	7	7	7	7	3	7	7	6

1991	7	7	7	7	3	-	-	-	-	-	-	-	6
1992	7	7	3	7	6	3	7	3	7	7	7	7	6
1993	7	7	7	3	-	-	-	-	-	-	-	-	6
1996	6	1	6	6	6	5	3	5	3	-	-	-	5
1997	3	3	4	3	5	3	4	4	3	3	4	4	4
1998	7	3	5	5	5	6	3	6	6	7	7	7	5
1999	7	3	7	6	7	6	8	7	7	7	7	7	7
2000	7	7	3	7	7	7	3	7	7	7	7	3	6
2001	7	3	7	3	7	3	7	7	7	3	7	8	6
2002	7	7	3	8	7	3	7	7	7	3	7	8	6
2003	7	8	7	7	7	7	3	7	8	7	3	7	6
2004	7	7	8	7	8	3	7	7	7	3	-	-	6
2005	8	3	7	7	7	6	7	7	7	7	7	7	7
2006	7	7	7	7	6	6	7	7	7	7	7	7	7
2007	8	3	6	7	7	7	7	3	7	7	6	7	6
2008	7	7	6	6	6	6	7	7	7	7	7	7	7
2009	7	7	7	7	7	7	6	6	7	7	7	7	7
2010	7	7	7	6	7	7	7	7	7	7	7	7	7
2011	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	8	7	7
2012	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	3	7	7
2013	7	7	7	7	7	7	7	8	3	7	7	7	7
2014	7	7	7	3	7	8	7	7	7	7	3	-	6
Media Mensual	7	6	6	6	7	6	7	6	7	7	6	7	

NUBOSIDAD MEDIA MENSUAL MULTIANUAL (Octas) (Colpuertos)													
Año	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Vr. Anual
1969	5	6	6	6	6	6	6	6	6	3	-	-	6
1970	6	6	5	6	6	6	6	6	7	6	3	-	6
1971	6	6	6	6	6	3	6	6	6	6	7	7	6
1972	6	6	5	5	5	5	6	6	6	5	5	5	5
1973	5	6	5	6	6	6	6	6	7	7	6	3	6
1974	6	5	5	6	6	6	6	7	6	6	6	5	6
1975	5	6	5	5	6	6	6	6	6	7	7	7	6
1976	6	5	6	6	6	6	6	6	6	6	6	3	6
1977	5	6	6	6	6	6	6	6	3	-	-	-	6
1978	5	5	6	6	6	6	5	6	3	-	-	-	5
1979	4	3	5	3	5	5	5	5	5	5	5	5	5
1980	7	3	6	3	7	3	7	3	7	3	7	3	5
1981	7	3	7	7	2	7	2	2	7	7	7	3	5
1982	7	3	7	3	7	7	3	7	7	6	6	3	6
1983	5	6	6	6	3	6	6	3	7	3	6	6	5
1984	6	6	3	6	6	3	6	3	6	3	6	3	5

1986	7	5	6	3	6	3	6	3	6	3	6	6	5
1987	7	3	6	3	6	6	6	6	3	6	3	6	5
1988	6	3	6	3	6	3	6	3	6	3	6	3	5
1989	6	3	6	3	5	3	6	3	6	3	6	3	4
1990	5	3	6	3	6	6	6	3	6	3	6	3	5
1991	5	3	6	3	5	6	3	6	3	6	3	6	5
1992	6	6	6	6	6	5	6	6	6	3	6	3	5
1993	5	3	6	5	3	5	3	-	-	-	-	-	4
1994	6	3	6	3	6	3	6	3	6	3	-	-	5
1995	5	3	4	3	5	3	5	3	5	3	-	-	4
1996	5	3	4	4	5	5	5	5	5	5	6	6	5
1997	6	5	3	6	5	3	5	5	3	5	3	6	5
1998	5	3	6	3	5	3	6	3	6	3	6	6	5
1999	6	6	5	6	3	6	6	6	3	6	7	3	5
2000	5	5	5	3	4	4	4	4	4	3	-	-	4
Media Mensual	6	4	5	5	5	5	5	5	5	5	6	5	

BRILLO SOLAR MEDIA MENSUAL MULTIANUAL (Horas) (Colpuertos)													
Año	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Vr. Anual
2003	-	130.8	110.3	96.5	103.9	105.4	134.3	96.5	96.7	114.9	108.9	1098.2	108.9
2004	86.1	87.9	77.3	64.1	85.2	72.7	112.1	98.8	96	116.7	105.9	106.9	91.95
2005	75.8	38.7	-	102.4	129.1	114.4	82.1	112.7	111.9	71.1	76.9	72.5	82.1
2006	94.2	60.9	81.6	76	74.3	97.1	88.9	148	130	112	96.4	84.7	91.55
2007	88.5	123.4	54.2	-	107.1	73.8	-	100.4	115.2	85	106.5	92.8	96.6
2008	60.3	85.5	117.6	134.9	112.2	96.5	-	133.5	153.3	-	123.7	64.2	114.9
2009	68.7	105.8	73.9	103.3	112.7	150.7	120.3	97.7	100.7	106.3	-	74	103.3
2010	83.6	87.3	105.2	114	87.2	96.3	-	-	76.9	84.8	63.4	72.4	86
2011	96.5	99	130.7	125.2	98	98	95.7	129.4	91	93.2	66.2	45.1	97.25
2012	114.6	128.4	70.8	95.6	115.6	110.3	102	112.5	67.3	74	-	72.7	102
2013	70.6	75.5	80.1	100.8	84	82.7	-	118.4	82.9	65.4	760.4	-	82.8
2014	71.7	76.4	89.7	89.9	117	119.7	-	-	564.4	-	-	-	89.9
Media Mensual	84.0	87.6	94.7	104.0	98.8	100.4	116.1	119.2	91.8	101.1	85.8	85.0	

BRILLO SOLAR MEDIA MENSUAL MULTIANUAL (Horas) (Colpuertos)													
Año	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Vr. Anual
1980	139.7	115.4	123.8	130.3	3.0	122.9	112.1	-	140.2	118.2	-	74.0	108
1981	91.0	117.2	140.8	123.6	102.7	-	107.3	-	152.6	-	107.5	123.6	118
1982	161.6	116.9	-	119.6	117.0	129.8	135.6	139.5	131.5	117.0	127.5	-	130
1983	155.6	105.8	-	132.1	128.7	-	174.8	168.0	160.6	157.0	118.9	104.9	141
1984	165.5	145.9	-	112.2	132.4	134.5	137.2	-	92.6	116.5	108.3	129.0	127
1985	63.7	119.0	94.4	-	124.4	133.5	95.0	123.9	116.1	96.8	-	115.6	108
1986	88.6	113.4	94.2	-	96.3	102.0	-	132.9	108.9	106.4	119.4	151.7	111
1987	106.8	113.6	144.0	121.4	-	130.8	-	108.2	-	120.2	145.3	115.9	123
1988	115.9	96.4	90.3	89.9	113.8	-	91.1	129.3	112.0	99.1	-	91.3	103
1989	101.2	-	108.4	156.4	104.0	113.3	101.8	148.8	127.6	98.9	108.6	96.3	115
1990	148.2	95.5	-	79.4	106.7	-	95.5	101.5	131.8	-	97.9	111.6	108
1991	137.7	89.4	134.1	-	119.0	94.7	86.0	102.6	127.4	100.2	124.2	111.5	112
1992	91.8	76.6	73.0	-	124.7	126.5	139.8	119.2	144.6	-	107.9	93.3	110
1993	112.2	-	104.6	153.1	114.6	141.7	121.8	141.8	116.0	98.7	123.1	-	123
1994	110.2	-	96.6	-	65.4	-	85.3	-	108.6	95.3	-	116.6	97
1995	124.9	-	115.7	-	88.7	-	108.7	-	135.3	-	102.8	118.6	114
1996	118.8	-	130.5	-	118.0	121.7	109.7	88.4	104.6	125.8	129.3	117.3	116
1997	102.2	122.7	90.7	-	93.6	-	128.0	-	163.1	148.4	-	159.8	126
1998	133.6	123.5	149.2	166.7	132.7	-	125.2	118.8	96.6	113.1	1159.4	-	232
1999	90.2	-	100.2	149.5	139.5	151.0	-	151.3	-	104.2	-	112.1	125
2000	94.3	-	108.9	-	-	71.5	-	-	89.5	-	97.8	-	92
2001	163.6	115.8	-	107.7	116.4	-	41.0	-	97.1	139.4	125.4	119.4	114
Media Mensual	119	111	112	126	107	121	111	127	123	115	181	115	