



Escuela de Ciencias e
Ingeniería

**DEL PULSO MAREAL A LA EVIDENCIA:
VALORACIÓN DEL POTENCIAL MAREOMOTRIZ EN LA
BAHÍA DE TUMACO, PACÍFICO COLOMBIANO**

Documento de tesis para optar al título de Maestría en Energías Renovables

Autora: Antonia Ramón Jaramillo
Directora: Andrea Devis Morales
Codirector: David Andrade

Universidad del Rosario
Escuela de Ciencias e Ingeniería
Maestría en Energías Renovables
Bogotá, Colombia
2026

Dedicatoria

A mi familia y a todos los que amo.

A quienes vivieron este proceso conmigo, en cada momento, y que constantemente me impulsaron a seguir, incluso cuando yo dudaba de lograrlo.

En especial, a mi mamá, por estar presente en cada etapa, de principio a fin, con una paciencia y un amor que me dieron la fuerza para culminar este camino.

Esta tesis, nacida de mi amor por el mar, también es suya.

Agradecimientos

Esta tesis lleva en cada página la huella de quienes creyeron en ella.

A la Universidad del Rosario, por ser la institución que despertó en mí el deseo de saber más y que hizo posible que una pregunta sobre el mar se convirtiera en una tesis.

A mi directora, Andrea Devis Morales, por creer en mí antes de que yo creyera en este proyecto, por correr siempre a mi lado y por enseñarme que el mar tiene soluciones que apenas empezamos a entender.

A mi codirector, David Andrade, por aceptar la aventura, por su disposición a explorar un tema innovador y poco común, y por ayudarme a construir algo que vale la pena.

Resumen

Del pulso mareal a la evidencia. Esa es la apuesta de esta tesis, demostrar que la marea de la bahía de Tumaco puede convertirse en energía real para un territorio donde la electricidad define las condiciones de vida. Tumaco forma parte de las Zonas No Interconectadas de Colombia (ZNI), donde la generación eléctrica depende mayoritariamente del diésel, con altos costos operativos y una vulnerabilidad estructural frente al abastecimiento de combustible.

Para cuantificar ese potencial, se implementó un modelo hidrodinámico local con Delft3D-FLOW, validado satisfactoriamente frente al mareógrafo de Tumaco ($r = 0.973$, $RMSE = 0.215$ m, $skill = 0.986$), que permitió superar las limitaciones de resolución de los productos globales disponibles y revelar la estructura real del recurso dentro de la bahía.

Los resultados mostraron que la bahía no es energéticamente uniforme. Las corrientes se organizan en corredores definidos por su propia geometría costera, y el más intenso, denominado P1, alcanza velocidades medias de 0.85 m s⁻¹ y picos superiores a 1.40 m s⁻¹, con una densidad de potencia promedio de 452.7 W m⁻² y una energía cinética acumulada anual de $3,977.1$ kWh m⁻² año⁻¹. Un recurso persistente, predecible y ubicado cerca del corazón urbano e insular del municipio.

Con base en esas condiciones, se identificaron tecnologías compactas y modulares compatibles con el sitio, cuya implementación piloto de 100 kW podría abastecer el consumo básico de aproximadamente 243 hogares y evitar cerca de 200 toneladas de CO₂ al año, dando forma a una transición energética local impulsada por el propio mar.

Palabras clave: Energía Mareomotriz, Corrientes de Marea, Caracterización Hidrodinámica, Zonas No Interconectadas, Bahía de Tumaco, Potencial Energético

Abstract

From tidal pulse to evidence. That is the premise of this thesis, to demonstrate that the tides of Tumaco bay can become real energy for a territory where electricity defines the conditions of life. Tumaco is part of Colombia's Non - Interconnected Zones, where electricity generation depends primarily on diesel, with high operating costs and structural vulnerability to fuel supply.

To quantify this potential, a local hydrodynamic model was implemented using Delft3D-FLOW, satisfactorily validated against the Tumaco tide gauge ($r = 0.973$, $RMSE = 0.215$ m, $skill = 0.986$), which made it possible to overcome the resolution limitations of globally available products and reveal the actual structure of the resource within the bay.

The results showed that the bay is not energetically uniform. Currents organize into corridors defined by the bay's own coastal geometry, and the most intense one, referred to as P1, reaches mean velocities of 0.85 m s^{-1} and peaks above 1.40 m s^{-1} , with an average power density of 452.7 W m^{-2} and an annual accumulated kinetic energy of $3,977.1 \text{ kWh m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$. A persistent, predictable resource located near the urban and insular core of the municipality. Based on these conditions, compact and modular technologies compatible with the site were identified, whose 100 kW pilot implementation could supply the basic consumption of approximately 243 households and avoid around 200 tonnes of CO_2 per year, giving shape to a local energy transition driven by the sea itself.

Keywords: Tidal Energy, Tidal Currents, Hydrodynamic Characterization, Non - Interconnected Zones, Tumaco Bay, Energy Potential

Tabla de contenido

Dedicatoria.....	2
Agradecimientos.....	3
Resumen	4
Abstract.....	5
Tabla de contenido.....	6
Lista de Figuras	9
Lista de Tablas.....	11
Lista de abreviaturas y siglas.....	12
1. Introducción.....	14
1.1 Contexto y motivación.....	15
1.2 Planteamiento del problema	16
Pregunta de investigación.....	17
1.3 Justificación científica, técnica y social	17
1.3.1 Científica	17
1.3.2 Técnica.....	17
1.3.3 Social y Territorial.....	18
1.4 Objetivos.....	18
Objetivo general	18
Objetivos específicos.....	19
2. Marco teórico y estado del arte.....	20
2.1 Fundamentos básicos de la marea y la energía mareomotriz	20
2.2 Análisis armónico y rango mareal	21
2.3 Hidrodinámica costera en sistemas someros e insulares	22
2.4 Tecnologías mareomotrices	23
2.5 Estado del arte: Evaluaciones de potencial y casos comparables.....	24
3. Metodología general.....	26

3.1	Área de estudio	26
3.2	Datos	27
3.2.1	Batimetría	27
3.2.2	Series de nivel del mar.....	27
3.2.3	Reanálisis oceánico.....	28
3.2.4	Modelación numérica con DELFT3D - FLOW	28
3.3	Cálculo Potencial y Selección Tecnológica.....	29
3.4	Herramientas Computacionales	30
4.	Resultados y análisis.....	31
4.1	Área de estudio - Base física y territorial	31
4.1.1	Metodología específica.....	31
4.1.2	Ubicación y delimitación del área	32
4.1.3	Batimetría y unidades morfológicas	33
4.1.4	Contexto social y energético.....	34
4.1.5	Contexto climático - oceánico	36
	Síntesis 4.1	37
4.2	Hidrodinámica de la bahía de Tumaco	37
4.2.1	Metodología específica.....	37
4.2.2	Caracterización mareal y análisis armónico	40
4.2.3	Circulación superficial total y descomposición por componentes (CMEMS GLOBCURRENT, 1994 – 2024)	44
4.2.4	Limitaciones de los productos de reanálisis en el entorno costero.....	48
4.2.5	Variabilidad espacial reciente del campo superficial (CMEMS GLORYS12, 2022 - 2026).....	49
	Síntesis 4.2.....	51
4.3	Modelamiento de la Marea – DELFT3D - FLOW	52
4.3.1	Metodología específica.....	52
4.3.2	Análisis comparativo de los experimentos numéricos	57

4.3.3	Validación del modelo hidrodinámico	60
4.3.4	Resultados Hidrodinámicos: Corrientes mareales	64
	Síntesis 4.3.....	71
4.4	Estimación del potencial energético mareomotriz.....	72
4.4.1	Metodología específica.....	72
4.4.2	Intensidad energética del recurso energético mareal.....	73
	Síntesis 4.4.....	79
4.5	Comparación y selección de tecnología para Tumaco	79
4.5.1	Criterios de selección.....	79
4.5.2	Comparación Tecnológica.....	82
4.5.3	Propuesta tecnológica preliminar para Tumaco	85
	Síntesis 4.5.....	93
5.	Discusión general	95
6.	Conclusiones.....	100
6.1	Conclusiones principales	100
6.2	Limitaciones del estudio	101
6.3	Recomendaciones y trabajo futuro	102
7.	Referencias	105

Lista de Figuras

Figura 1. Localización del área de estudio y dominio de análisis para la Bahía de Tumaco, Nariño (Colombia). Fuente: Mapa Base QGIS.	32
Figura 2. Batimetría del área de estudio y rasgos morfológicos principales. Fuente: GEBCO 2024 Grid.....	33
Figura 3. Sectorización territorial A - M para lectura socioenergética del sistema. Fuente: Elaboración propia a partir de digitalización de coordenadas.....	34
Figura 4. Cobertura espacial de productos de los Copernicus Marine (CMEMS) y ubicación del Mareógrafo en la Bahía de Tumaco. Fuentes: CMEMS GLOBCURRENT, CMEMS GLORYS/GLORYS12 y Mareógrafo de Tumaco (UHSLC ID 303).	39
Figura 5. Comportamiento de Nivel del Mar en la Bahía de Tumaco. Periodo 1951 - 2018. Fuente: Mareógrafo de Tumaco (UHSLC ID 303).	40
Figura 6. Comportamiento anual del Nivel Mar en la Bahía de Tumaco (Año de referencia 2016). Fuente: Mareógrafo de Tumaco (UHSLC ID 303).	41
Figura 7. Reconstrucción armónica del nivel del mar y residual del ajuste para Tumaco (Año de referencia 2016). Fuente: Mareógrafo de Tumaco (UHSLC ID 303).	43
Figura 8. Predicción armónica independiente y error asociado para Tumaco (2017, mes evaluado). Fuente: Mareógrafo de Tumaco (UHSLC ID 303).....	43
Figura 9. Ciclo anual de la corriente total en la Bahía de Tumaco.....	44
Figura 10. Ciclo anual de la componente geostrofica en la Bahía de Tumaco.....	45
Figura 11. Ciclo anual de la componente Ekman en la Bahía de Tumaco.....	46
Figura 12. Ciclo anual de la componente mareal en la Bahía de Tumaco.	47
Figura 13. Señal típica (RMS), error típico (RMS), SNR y contribución energética relativa por componente. Periodo: 1994 - 2024	48
Figura 14. Análisis multianual mensual de la componente total de la corriente superficial. Fuente: CMEMS GLORYS/GLORYS12 (2022 – 2026).....	50
Figura 15. Dominio analizado para el modelo hidrodinámico y malla estructurada Grid – C. Fuente: Dashboard Delft.....	58
Figura 16. Dominio analizado para el modelo hidrodinámico y malla estructurada Grid – M. Fuente: Dashboard Delft.....	59
Figura 17. Dominio analizado para el modelo hidrodinámico y malla estructurada Grid – F. Fuente: Dashboard Delft.....	60

Figura 18. Serie Temporal de anomalías del nivel del mar modelada (TPXO8 + GEBCO2023 - Grid Fine) vs. Observaciones mareógrafo de Tumaco.....	62
Figura 19. Diagrama de dispersión entre niveles del mar observados y simulados para la configuración TPXO8 + GEBCO2023 – Grid Fine.	63
Figura 20. Campo de velocidad media de corriente y localización de puntos representativos de análisis en la Bahía de Tumaco.....	65
Figura 21. Caracterización temporal y estadística de las corrientes mareales en P1. Fuente: Modelación DELFT - FLOW 3D	66
Figura 22. Caracterización temporal y estadística de las corrientes mareales en P2.....	68
Figura 23. Caracterización temporal y estadística de las corrientes mareales en P3.....	69
Figura 24. Caracterización temporal y estadística de las corrientes mareales en P4.....	70
Figura 25. Serie temporal anual de la densidad de potencia cinética en los puntos P1, P2, P3 y P4. Fuente: Modelación DELFT - FLOW 3D.....	74
Figura 26. Intensidad energética del recurso energético mareal.	75
Figura 27. Variabilidad intraquincenal de la densidad de potencia cinética en un periodo representativo. Fuente: Modelación DELFT - FLOW 3D	75
Figura 28. Promedio mensual de densidad de potencia en los puntos P1, P2, P3y P4. Fuente: Modelación DELFT - FLOW 3D	77
Figura 29. Energía cinética acumulada por unidad de área en los puntos P1, P2, P3 y P4.Fuente: Modelación DELFT - FLOW 3D.....	78
Figura 30. Panel de referencia visual con ejemplos representativos de cada familia tecnológica. Fuente: Elaboración propia	83
Figura 31. Magnitud de Velocidad Mareal, isobatas y sectores de referencia en la Bahía de Tumaco. Fuente: Modelación DELFT - FLOW 3D	86
Figura 32. Turbina mareomotriz de eje horizontal Tocardo T-1 durante instalación. Fuente: (QED Naval Limited, 2026). Recuperado de https://qednaval.co.uk/technology/	87
Figura 33. Turbina hidrocínética de eje vertical EnviroGen (New Energy Corporation). Fuente: (New Energy Corporation, 2025). Recuperado de https://www.newenergycorp.ca/about-the-tech	88
Figura 34. Plataforma hidrocínética flotante de eje vertical GKinetic. Fuente: (GKinetic Energy, 2022). Recuperada de https://www.gkinetic.com/hydrokinetic-turbines/#wwd....	89

Lista de Tablas

Tabla 1. Constituyentes mareales principales.....	21
Tabla 2. Intervalos del factor de forma (F) para la clasificación del régimen mareal.....	22
Tabla 3. Clasificación del rango mareal según su amplitud vertical.....	22
Tabla 4. Constituyentes mareales principales estimados por análisis armónico (Año de referencia 2016). Fuente: Mareógrafo de Tumaco (UHSLC ID 303).	42
Tabla 5. Configuración técnica de los experimentos hidrodinámicos (Delft3D - FLOW, año 2016, Δt (min) = 1.0).....	57
Tabla 6. Métricas de validación del nivel del mar para todas las configuraciones del modelo Delft3D-FLOW, utilizando el registro del mareógrafo de Tumaco correspondiente al año 2016.	61
Tabla 7. Densidad de potencia cinética asociada a los percentiles en los hotspots P1, P2, P3 y P4 de la Bahía de Tumaco.	76
Tabla 8. Densidad de potencia promedio y energía cinética acumulada anual en los hotspots analizados.	78
Tabla 9. Comparación entre familias tecnológicas mareomotrices. Fuentes: (IEA - OES, 2024; IRENA, 2020; Korte et al., 2024; Lewis et al., 2015).	85
Tabla 10. Potencia hidráulica incidente estimada para rotores representativos bajo velocidades características del hotspot P1 en la Bahía de Tumaco. Fuentes: (ABS Alaskan, Inc., 2026a, 2026b; QED Naval Limited, 2026)	90
Tabla 11. Potencia eléctrica estimada por unidad bajo escenarios (Conservador, Moderado y Optimista) de coeficiente de potencia, para las velocidades características del hotspot P1 en la Bahía de Tumaco. Fuentes: Tabla 10. (Bachant & Wosnik, 2015; Batten et al., 2008).	92
Tabla 12. Disponibilidad operacional estimada de las tecnologías preseleccionadas a partir de la curva de excedencia de velocidad en el hotspot P1. Fuente: Estimado por interpolación de la curva de excedencia de P1.	93

Lista de abreviaturas y siglas

ADCP - Acoustic Doppler Current Profiler (Perfilador acústico Doppler de corrientes)

ADI - Alternating Direction Implicit (Esquema numérico implícito alternante)

APD - Average Power Density (Densidad de potencia promedio)

CAPEX - Capital Expenditure (Inversión de capital)

CCCCP - Centro de Control de Contaminación del Pacífico

CMEMS - Copernicus Marine Environment Monitoring Service

COP - Peso colombiano

CREG - Comisión de Regulación de Energía y Gas

CUPS - Costo Unitario de Prestación del Servicio

DANE - Departamento Administrativo Nacional de Estadística

Delft3D-FLOW - Modelo hidrodinámico Delft3D-FLOW

DIMAR - Dirección General Marítima

EA - Energía acumulada anual

ENSO - El Niño Oscilación Sur

FNCER - Fuentes No Convencionales de Energía Renovable

GEBCO - General Bathymetric Chart of the Oceans

GLOBCURRENT - CMEMS Global Ocean Surface Currents (Producto de corrientes superficiales globales de Copernicus)

GLORYS12 - Global Ocean Physics Reanalysis (Reanálisis global de física oceánica de Copernicus)

HAT - Horizontal Axis Turbine (Turbina de eje horizontal)

IEA - OES - International Energy Agency Ocean Energy Systems

IDEAM - Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales

IEC - International Electrotechnical Commission

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change

IPSE - Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas para las Zonas No Interconectadas

IRENA - International Renewable Energy Agency

MAE - Mean Absolute Error (Error absoluto medio)

NetCDF - Network Common Data Format

O&M - Operations and Maintenance (Operación y mantenimiento)

OPEX - Operational Expenditure (Gasto operativo)

OWC - Oscillating Water Column (Columna de agua oscilante)

PCH - Pequeña Central Hidroeléctrica

REN21 - Renewable Energy Policy Network for the 21st Century

RMSE - Root Mean Square Error (Error cuadrático medio)

SIG - Sistema de Información Geográfica

SIN - Sistema Interconectado Nacional

SNR - Signal to Noise Ratio (Relación señal - ruido)

TEC - Tidal Energy Converter (Convertidor de energía mareal)

TPXO - Modelo global de mareas

UHSLC - University of Hawaii Sea Level Center

UPME - Unidad de Planeación Minero Energética

VAWT - Vertical Axis Water Turbine (Turbina de eje vertical)

ZCIT - Zona de Convergencia Intertropical

ZNI - Zonas No Interconectadas

1. Introducción

La transición energética ha dejado de ser exclusivamente un objetivo ambiental para convertirse en un requisito operativo para garantizar la estabilidad de economías y territorios en un escenario de cambio climático, volatilidad en el precio de los combustibles y presión por seguridad energética. En este contexto, el sistema eléctrico global ha acelerado la incorporación de renovables. En 2023, las adiciones anuales de capacidad renovable a nivel mundial crecieron cerca de 50% y alcanzaron alrededor de 510 GW, el mayor incremento en dos décadas (IEA, 2024).

En ese panorama, las energías marinas ocupan un lugar particular, no compiten por suelo, se ubican cerca de centros costeros de demanda y, en el caso de la energía mareomotriz, se apoyan en un atributo clave para sistemas renovables, la alta predictibilidad. La dinámica de las mareas responde a forzamientos astronómicos que permiten anticipar con precisión sus ciclos, por eso, la energía asociada a corrientes y rangos mareales se considera una fuente renovable local y predecible, con potencial interés para comunidades costeras e insulares (IRENA & OEE, 2023; Kempener & Neumann, 2014).

A nivel internacional, la experiencia acumulada demuestra viabilidad técnica en distintos contextos, aunque con escalas y tecnologías diferentes. Para el año 2023, la energía oceánica seguía teniendo una participación marginal, con una capacidad operativa global de 513 MW, dominada por proyectos de marea de rango (tidal range), como Sihwa (254 MW, Corea del Sur) y La Rance (240 MW, Francia). En contraste, las tecnologías de corrientes de marea y oleaje han avanzado principalmente mediante prototipos y proyectos, desde el año 2010, la capacidad acumulada es de 41 MW en corrientes de marea (tidal stream) y 27 MW en oleaje (wave), reflejando un sector en transición desde proyectos piloto hacia proyectos de mayor escala (REN21, 2024). En América Latina, sin embargo, sigue siendo algo innovador y la literatura regional aún no se convierte en proyectos comerciales consolidados, lo que hace especialmente relevantes las evaluaciones rigurosas del recurso en contextos donde la necesidad energética es estructural.

Ese es el caso de San Andrés de Tumaco, distrito y municipio perteneciente al departamento de Nariño, un territorio costero donde el mar estructura la vida cotidiana y la conectividad territorial. Aun así, el acceso a energía continua y de calidad sigue siendo una barrera para la educación, la salud, y la productividad. Tumaco se sitúa en el desafío más amplio de las Zonas No Interconectadas (ZNI) en Colombia, que abarcan cerca del 52% del territorio nacional y requieren soluciones energéticas adaptadas a condiciones geográficas y

socioambientales particulares (Ramírez, 2025). La pregunta que guía esta tesis surge de esta tensión, ¿En qué medida el recurso mareomotriz de la bahía de Tumaco puede contribuir, de forma realista, a una discusión energética basada en evidencia para un territorio costero con restricciones operativas?

Con ese propósito, esta investigación busca valorar el potencial mareomotriz de la bahía de Tumaco mediante la caracterización hidrodinámica del sistema, la estimación de métricas energéticas asociadas y un análisis de compatibilidad tecnológica con un enfoque territorial. La tesis se estructura en capítulos que avanzan de lo contextual a lo cuantitativo, primero se presenta el problema y el estado del arte, luego se describen datos, fuentes y metodología, posteriormente se desarrolla la caracterización oceanográfica, seguido del modelamiento hidrodinámico y la estimación del potencial energético, y finalmente se discuten tecnologías, criterios de selección y conclusiones.

1.1 Contexto y motivación

Tumaco enfrenta una paradoja difícil de ignorar. Es un municipio costero con alta riqueza ambiental y una ubicación estratégica en el Pacífico colombiano, pero con una insuficiencia energética que limita de forma directa su desarrollo social, económico y ambiental. En un territorio donde el mar define las dinámicas del día a día, la energía no es solo un servicio, es una condición mínima para sostener educación, salud, cadenas productivas y seguridad alimentaria. Esta tesis nace como una apuesta por explorar alternativas que contribuyan a reducir desigualdades territoriales, mejorar la calidad de vida y aportar a metas de sostenibilidad, abordando un recurso local con una ventaja clave para sistemas aislados, la predictibilidad del ciclo mareal (Kempener & Neumann, 2014).

En Colombia, las ZNI representan un reto estructural, no solo por la dispersión poblacional y los costos logísticos, sino por una matriz de generación que, en muchas localidades, sigue dependiendo de combustibles fósiles. En marzo del año 2025, el Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas para las Zonas No Interconectadas (IPSE) identifica 1,664 localidades en ZNI y reporta una capacidad instalada total de 335,271 kW, donde 78% corresponde a generación diésel y 22% a fuentes no convencionales de energía renovable (FNCER), principalmente soluciones solares, además de aportes menores de pequeñas centrales hidroeléctricas, biomasa y residuos (Ramírez, 2025). Esta dependencia de los combustibles fósiles condiciona costos, operación y emisiones, y refuerza la necesidad de diversificar con opciones renovables que se adapten a territorios costeros.

En el caso de Tumaco, el entorno marino es un componente estructural del territorio y de su dinámica cotidiana. Las mareas y las corrientes modulan procesos físicos y ecológicos relevantes como la navegación local, el transporte, el depósito de sedimentos, el funcionamiento de ecosistemas costeros y, por tanto, son una señal clave para comprender el sistema. En ese marco, la Dirección General Marítima (DIMAR) dispone de pronósticos oficiales de mareas para la bahía de Tumaco, lo que evidencia el carácter periódico y predecible del fenómeno, permitiendo considerarlo como un recurso apto de evaluación energética (DIMAR, 2026). Esta convergencia entre una necesidad energética real y un forzamiento mareal anticipable constituye el punto de partida de la presente investigación.

1.2 Planteamiento del problema

Aunque Colombia ha avanzado en cobertura eléctrica, persisten brechas profundas en regiones apartadas. Las ZNI, que abarcan cerca del 52% del territorio nacional concentran localidades con esquemas autónomos, restricciones técnicas y económicas que dificultan la continuidad y calidad del suministro. En ese contexto, la dependencia de combustibles fósiles sigue siendo estructural. En marzo de 2025 se reportaron 262,056 kW (78%) en generación diésel y 73,215 kW (22%) en FNCER dentro de la capacidad instalada en ZNI. (Ramírez, 2025).

Esta estructura se traduce en costos operativos elevados y en una vulnerabilidad directa frente al abastecimiento de combustible. En las ZNI, la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios analiza el Costo Unitario de Prestación del Servicio (CUPS) y muestra que su comportamiento está fuertemente influido por el componente de generación, asociado, entre otros factores, al precio del combustible y a la indexación por variaciones económicas. En el comparativo departamental para prestadores con generación diésel o pequeñas centrales hidroeléctricas (PCH), el informe sectorial de 2023 reporta para Nariño valores promedio de $G = 1,406.5$ COP/kWh (Generación), junto con $D = 126.3$ COP/kWh (Distribución) y $C = 126.6$ COP/kWh (Comercialización), lo que ilustra la magnitud de los costos que pueden enfrentar los esquemas de prestación en ZNI (Aldana et al., 2023).

En el municipio de Tumaco, esta realidad energética convive con un recurso biofísico que todavía no se ha traducido en una valoración técnica del potencial hidrocínético mareomotriz a escala de bahía, con supuestos y trazabilidad explícitos. Aunque la autoridad marítima dispone de pronósticos oficiales de mareas para Tumaco, y a nivel internacional se reconoce el valor de la energía mareal por su rango, carácter predecible y su aplicabilidad en

comunidades costeras (IRENA & OEE, 2023; Kempener & Neumann, 2014), en Colombia la evidencia disponible para este sitio no permite aún discutir su potencial con cifras consistentes y comparables. Esta brecha limita la priorización técnica de alternativas renovables marinas en el Pacífico colombiano y dificulta orientar esfuerzos de investigación.

Pregunta de investigación
¿Cuál es el potencial de energía hidrocínética mareomotriz en la bahía de Tumaco, y cómo se distribuye espacial y temporalmente según su caracterización hidrodinámica?

1.3 Justificación científica, técnica y social

1.3.1 Científica

Valorar energía mareomotriz exige entender la hidrodinámica local con resolución suficiente para capturar canales, gradientes, interacción marea - batimetría y variabilidad espacio - temporal. Es común usar productos generados por modelos numéricos globales como línea base, sin embargo, la representación realista de la variabilidad oceánica cerca de la costa puede ser desafiante para reanálisis globales por razones como resolución horizontal insuficiente, complejidad batimétrica y limitaciones de asimilación de datos en zonas costeras (Castillo-Trujillo et al., 2023; Sanikommu et al., 2023). En un sistema costero - insular como Tumaco, estas limitaciones son especialmente relevantes porque las aceleraciones de interés energético ocurren en escalas controladas por la geometría y los estrechamientos.

En energía de corrientes de marea, además, la comunidad científica resalta que la evaluación del recurso y la caracterización requieren enfoques multiescala y modelamiento hidrodinámico adecuado al sitio, porque la estimación energética depende críticamente de la estructura del flujo (Thiébot et al., 2020). Por ello, esta tesis aporta una caracterización del recurso mareal en Tumaco integrando observaciones disponibles, reanálisis y modelación local para describir patrones y magnitudes con trazabilidad explícita.

1.3.2 Técnica

Para Colombia, las ZNI demandan soluciones que sean confiables, mantenibles y coherentes con el territorio. Los datos oficiales muestran que la matriz actual en ZNI continúa dominada por combustibles fósiles, y que la transición requiere diversificación tecnológica (Ramírez, 2025). En ese marco, la energía mareomotriz se vuelve técnicamente relevante porque

su perfil es predecible y puede complementar otras renovables variables (como solar y eólica), mejorando la planificación operativa de microredes (IRENA & OEE, 2023). La justificación técnica de esta tesis es producir insumos concretos para decidir dónde el recurso es más intenso y persistente, qué magnitudes energéticas son razonables y qué tecnologías podrían adaptarse a condiciones locales.

1.3.3 Social y Territorial

En territorios como Tumaco, mejorar acceso y calidad de energía no es un lujo, es una exigencia de bienestar y de oportunidades. Una transición energética justa es clave territorial, implica que las zonas históricamente rezagadas participen de alternativas modernas y sostenibles. Las ZNI abarcan una proporción significativa del país y requieren soluciones “*adaptadas a sus condiciones geográficas, climáticas y sociales*” (Ramírez, 2025). En esa línea, esta tesis se justifica socialmente porque busca aportar evidencia para que la discusión sobre energías marinas en el Pacífico colombiano sea verificable y situada, conectada con el recurso físico real de la Bahía, y con restricciones ambientales, logísticas e institucionales del territorio.

El aporte central es entregar una valoración trazable del potencial mareomotriz de la bahía de Tumaco que conecte la hidrodinámica local, las métricas energéticas y los criterios tecnológicos y de viabilidad, con un enfoque reproducible y útil para la toma de decisiones. Adicionalmente, la bahía de Tumaco enfrenta presiones ambientales concretas que refuerzan la urgencia de una transición energética limpia. La región ha sido afectada por derrames de hidrocarburos asociados a la infraestructura de oleoductos, así como por procesos de tala y degradación del manglar, ecosistema costero de alta sensibilidad ecológica y valor protector para las comunidades locales (INVEMAR, 2006). En este contexto, la energía mareomotriz no solo representa una alternativa de generación limpia, sino también una opción coherente con la protección de los ecosistemas costeros que sustentan la vida en el territorio.

1.4 Objetivos

Objetivo general

Valorar el potencial hidrocínético mareomotriz de la bahía de Tumaco mediante la caracterización hidrodinámica del sistema y el análisis de viabilidad de tecnologías de aprovechamiento, considerando el contexto de las Zonas No Interconectadas (ZNI) y las restricciones socioambientales del territorio.

Objetivos específicos

1. Caracterizar la dinámica mareal e hidrodinámica de la bahía de Tumaco, identificando patrones espaciales y temporales relevantes para el aprovechamiento energético.
2. Estimar métricas de potencial energético mareomotriz y delimitar zonas con mayor intensidad y persistencia del recurso.
3. Evaluar el desempeño de productos globales como línea base e implementar un modelo hidrodinámico local que mejore la representación del flujo mareal en la Bahía.
4. Analizar tecnologías mareomotrices potencialmente compatibles con las condiciones del sitio e integrar los resultados físicos, energéticos y tecnológicos, junto con restricciones socioambientales, en una discusión de viabilidad orientada a soportar decisiones y líneas futuras de investigación.

2. Marco teórico y estado del arte

Entender y cuantificar la energía mareomotriz exige un lenguaje común entre física, oceanografía y energía. Se definen los conceptos mínimos para describir y predecir la marea, interpretar cómo esos cambios en el nivel del mar se transforman en corrientes intensas en bahías y canales, y conectar el régimen hidrodinámico con requisitos de operación tecnológica. Con esa base, el estado del arte muestra qué se ha logrado internacionalmente en despliegue, evaluaciones y lecciones técnicas y cómo se ha abordado el tema en Colombia.

2.1 Fundamentos básicos de la marea y la energía mareomotriz

La energía mareomotriz se origina por la acción combinada de las fuerzas gravitacionales que ejercen la Luna y el Sol sobre los océanos, junto con la rotación de la Tierra. Estas fuerzas producen variaciones periódicas en el nivel del mar, conocidas como mareas, observables en ciclos de pleamar, el nivel máximo del mar y bajamar, conocido como nivel mínimo del mismo. La diferencia vertical entre ambos niveles constituye el rango mareal, principal determinante del potencial energético aprovechable (NOAA, 2023a; Parker, 2007).

Las mareas pueden clasificarse, según su ciclo diario, en tres tipos principales, las semidiurnas, con dos pleamares y dos bajamares aproximadamente iguales, seguidas de las diurnas, una pleamar y una bajamar por día y finalmente las mixtas, dos con uno o dos ciclos diarios con desigualdad de altura (NOAA, 2023b).

La representación armónica del nivel del mar puede expresarse como:

$$\eta(t) = Z_0 + \sum_{i=1}^n H_i \cos(\omega_i t + \phi_i)$$

donde Z_0 es el nivel medio del mar, H_i la amplitud, ω_i la velocidad angular y ϕ_i la fase del armónico i .

La superposición de constituyentes explica la alternancia entre mareas vivas (máximo rango mareal) y mareas muertas (mínimo rango mareal). Durante las mareas vivas coincidentes con las fases de luna nueva y llena, la atracción lunar y solar se combinan, mientras que durante las muertas, en cuartos crecientes o menguantes, las fuerzas se oponen parcialmente (Parker, 2007).

Desde el punto de vista energético, el recurso mareal puede entenderse como energía potencial asociada a la diferencia de niveles y una energía cinética ligada al movimiento

de las corrientes. La primera puede aprovecharse mediante estructuras de embalse, mientras que la segunda es utilizada por turbinas sumergidas en zonas de corrientes intensas (IRENA, 2020).

La energía hidrocínética mareomotriz, enfoque central de esta investigación, aprovecha la energía cinética de las corrientes de marea sin necesidad de estructuras de embalse ni modificación del nivel del mar. Este aprovechamiento es análogo al de los aerogeneradores, con la diferencia de que la alta densidad del agua de mar permite extraer cantidades significativas de energía con velocidades relativamente bajas. Las corrientes mareales son bidireccionales, alternando entre flujo de entrada y salida con período determinado astronómicamente, característica que debe considerarse tanto en el diseño de turbinas como en la estimación del recurso (IEC, 2013; IRENA, 2020).

Para corrientes, el potencial energético disponible se define por la ecuación:

$$P = \frac{1}{2} \rho A v^3$$

donde, P es la potencia (W), ρ la densidad del agua (kg/m^3), A el área transversal (m^2) y v la velocidad de la corriente (ms^{-1}). Dado que la potencia es proporcional al cubo de la velocidad, esto implica que pequeños aumentos en v generan incrementos significativos en la energía disponible (Bryden et al., 2007; IEC, 2013; Thomas & Roland, 2021)

2.2 Análisis armónico y rango mareal

El análisis armónico representa el nivel del mar como la suma de oscilaciones sinusoidales con frecuencias astronómicas conocidas (Ver Tabla 1). Para cada constituyente, el ajuste estima amplitud y fase, que dependen de la respuesta local del sistema y del periodo analizado (Hicks, 2006; Parker, 2007).

Esta descomposición permite reconstruir la señal periódica, generar predicción armónica en periodos futuros en entornos costeros donde conviven varios procesos.

Constituyente	Banda	Origen astronómico	Periodo aproximado
M ₂	Semidiurna	Lunar principal	12.42 h
S ₂	Semidiurna	Solar principal	12.00 h
K ₁	Diurna	Lunisolar	23.93 h
O ₁	Diurna	Lunar	25.82 h

Tabla 1. Constituyentes mareales principales

Para clasificar el régimen mareal se usa el factor de forma

$$F = \frac{A K_1 + A O_1}{A M_2 + A S_2}$$

donde A corresponde a la amplitud de cada constituyente. Valores bajos indican dominancia semidiurna, valores altos dominancia diurna, y valores intermedios corresponden a marea mixta (Ver Tabla 2) (Nidzieko, 2010). Este indicador constituye un diagnóstico físico, pero condiciona el patrón de máximos y mínimos, y la programación operativa asociada al ciclo mareal (Hicks, 2006).

Intervalo de F	Régimen mareal
$0 \leq F < 0.25$	Semidiurna
$0.25 \leq F < 1.5$	Mixta - Principalmente semidiurna
$1.5 \leq F < 3.0$	Mixta - Principalmente diurna
$F \geq 3.0$	Diurna

Tabla 2. Intervalos del factor de forma (F) para la clasificación del régimen mareal

De manera complementaria al tipo de marea, el rango mareal constituye una de las variables más relevantes para describir la dinámica del nivel del mar. El rango se define como la diferencia vertical entre la pleamar y la bajamar, y representa la amplitud de la oscilación mareal en un sitio determinado. Esta magnitud permite caracterizar la intensidad con la que la marea se manifiesta (Hicks, 2006; Parker, 2007).

Desde el punto de vista físico, el rango mareal está asociado a la variación del nivel del mar en el tiempo y el espacio, y por tanto se relaciona con los gradientes que impulsan el movimiento del agua en sistemas costeros y estuarinos. Por esta razón, el rango constituye un parámetro clave en estudios de recursos energéticos asociados a la marea. En términos de clasificación, los ambientes costeros pueden agruparse según la magnitud de su rango mareal (Ver Tabla 3) Se consideran ideales zonas costeras con rangos macromareales para maximizar la producción energética (D. Pugh & Woodworth, 2014).

Rango mareal (m)	Clasificación
< 2.0	Micromareal
2.0 - 4.0	Mesomareal
> 4.0	Macromareal

Tabla 3. Clasificación del rango mareal según su amplitud vertical

2.3 Hidrodinámica costera en sistemas someros e insulares

En bahías someras, estuarios y pasos insulares, la dinámica mareal puede describirse con las ecuaciones de aguas someras, donde el intercambio está controlado por el balance entre el gradiente del nivel del mar y la fricción de fondo. La consecuencia es que la marea no se expresa de manera uniforme en un dominio, la amplitud y la fase varían espacialmente y las corrientes máximas tienden a concentrarse donde la

geometría canaliza el flujo, reduciendo el área efectiva de paso (D. Pugh & Woodworth, 2014; Vallis, 2017).

El entorno oceánico local puede entenderse a partir de tres componentes principales. La primera es de origen geostrófico de escala regional asociada a gradientes de presión. La segunda responde al forzamiento del viento y la tercera corresponde a las mareas, de carácter oscilatorio y forzamiento astronómico. Distinguir entre ellas es clave para no mezclar fenómenos que operan a escalas muy diferentes. La corriente observada es la superposición de estas contribuciones, sin embargo, la marea persiste como oscilación periódica aun cuando los aportes no mareales varían estacionalmente (Pugh, 1987; Pugh & Woodworth, 2014; Roisin, 2011).

La batimetría y la geometría del sistema controlan por dónde puede circular el agua y qué tan restringido es el intercambio. Por eso, cambios pequeños en profundidad o en el ancho de un canal pueden modificar de manera importante las velocidades locales. A medida que la marea entra en la Bahía, la fricción y la geometría del lugar hacen que llegue más débil y con retraso. Esto es relevante energéticamente porque define cuándo ocurren las corrientes máximas y la simetría entre la fase de entrada y salida del flujo, lo que afecta la direccionalidad y las cargas sobre un convertidor (Pugh, 1987; Pugh & Woodworth, 2014).

Los productos de modelos de reanálisis son valiosos como línea base regional y, a veces, como insumo para condiciones de borde, sin embargo, cerca de la costa su desempeño puede verse limitado por resolución espacial insuficiente para representar canales, estrechos y por batimetría suavizada. Esto puede traducirse en sesgos de magnitud y dirección dentro de bahías someras, por ello, cuando el objetivo es identificar hotspots en estrechamientos, el reanálisis debe leerse como contexto y punto de partida, no como sustituto de un modelamiento local (Etienne, 2024a; Lellouche et al., 2025).

2.4 Tecnologías mareomotrices

Un convertidor mareomotriz de corrientes (TEC) transforma parte de la energía cinética del flujo en electricidad. En términos operativos, el desempeño real se representa con una curva de potencia y velocidades características, que vinculan hidrodinámica con energía generable. Como ninguna turbina puede extraer toda la energía del flujo sin alterar su paso, se utiliza el coeficiente de potencia C_p como fracción de potencia cinética que puede convertirse en potencia útil, y luego se

consideran pérdidas mecánicas y eléctricas del sistema (Adcock et al., 2021; IEC, 2013).

En términos tecnológicos, pueden distinguirse tres familias de convertidores. La primera son los diques mareales, que aprovechan el desnivel entre pleamar y bajamar almacenando y liberando agua a través de turbinas, la segunda son las turbinas de corriente de marea, que capturan energía cinética con rotores sumergidos, dentro de esta familia dominan los diseños de eje horizontal, HAT, y de eje vertical, VAWT, con implicaciones directas sobre direccionalidad, profundidad operativa y estrategia de instalación y mantenimiento, y la tercera, son las columnas de agua oscilante (OWC) y dispositivos híbridos, que convierten la oscilación del nivel del mar en energía neumática para accionar turbinas. (IRENA, 2020; Schuler & Dupont, 2025).

2.5 Estado del arte: Evaluaciones de potencial y casos comparables

A nivel global, la energía mareomotriz ha avanzado desde la demostración hacia proyectos piloto, con mayor presencia de iniciativas planificadas y experiencia operativa consolidada. Europa y Asia continúan concentrando gran parte del desarrollo, impulsados por políticas de innovación, infraestructura portuaria especializada y experiencia técnica acumulada (Schuler & Dupont, 2025). En rango de marea, se destacan proyectos como La Rance, ubicado en Francia, con una capacidad instalada de 240 MW, derivada de sus 24 turbinas en funcionamiento, ha estado en operación desde 1966 y continúa hasta el día de hoy (TETHYS, 2019b), y Sihwa Lake, establecido en Corea del Sur, con 254 MW, provenientes de las 10 turbinas instaladas, en el año 2011 empezó su operación continua, de hecho, actualmente es la instalación mareomotriz más grande del mundo (TETHYS, 2019a). Ambos casos muestran que, cuando existen condiciones geomorfológicas y de infraestructura adecuadas, las obras mareomotrices pueden sostener operación de largo plazo e integrarse a sistemas eléctricos regionales, en el caso de Sihwa, además, el diseño combina generación con funciones de gestión costera y control de inundaciones.

En corrientes de marea, los avances se han consolidado principalmente a través de proyectos por fases y plantas integradas a infraestructura costera. Un proyecto bandera es el de MeyGen, construido en Escocia, es el mayor proyecto de corrientes de marea en operación, su primera fase cuenta con 6.5 MW instalados y se proyecta una expansión progresiva hasta 398 MW, lo que lo posiciona como uno de los desarrollos más avanzados en conversión de energía cinética mareal (TETHYS, 2025).

En las tendencias recientes, se evidencia un interés creciente por configuraciones que reduzcan costos de instalación y mantenimiento, incluida la recuperación a superficie en algunas tecnologías. La evidencia sobre impactos ambientales establecen que los riesgos pueden gestionarse mediante planificación espacial, monitoreo y operación adaptativa (IEA - OES, 2025; Shields et al., 2011).

En Colombia, el aprovechamiento de la energía mareomotriz permanece en una fase exploratoria, sin proyectos operativos conectados a red. Esto no implica ausencia de recurso, sino una combinación de incertidumbre técnica, ausencia de financiación para proyectos pilotos y limitaciones del marco regulatorio y capacidades especializadas (IRENA, 2020).

Aun así, existe base oceanográfica relevante, la Dirección General Marítima (DIMAR) y el Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Pacífico (CIOH) han documentado el régimen medio y extremo del nivel del mar, así como la dinámica mareal en esteros y ríos con influencia oceánica en la bahía de Tumaco (Fuentes & Galindo, 2011; Tejada Vélez et al., 2003), de igual manera, el Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras (INVEMAR) ha desarrollado diagnósticos integrales del entorno biofísico y socioeconómico del sistema, destacando la complejidad geomorfológica de la bahía de Tumaco, la influencia fluvial y la presencia de canales y estrechamientos naturales que condicionan la circulación costera (INVEMAR, 2006).

En el ámbito académico, algunos estudios han utilizado modelos numéricos para explorar corrientes mareales en el Pacífico colombiano y estimar la disponibilidad del recurso, incluyendo evaluaciones de energía hidrocínética en aguas costeras colombianas y modelación de plantas mareomotrices en la bahía de Buenaventura (Aguilar & Bayona, 2021; Parrado & Rueda-Bayona, 2024; Rueda-Bayona, Cabello Eras, et al., 2023; Rueda-Bayona, García Vélez, et al., 2023).

Colombia cuenta con información oceanográfica e instituciones con capacidad técnica, pero aún son escasas las evaluaciones integradas a escala de bahía que combinen observación, reanálisis, modelación local y métricas energéticas comparables para orientar una discusión tecnológica y territorial.

3. Metodología general

Esta tesis se desarrolló como un flujo reproducible que permitió pasar del conocimiento base del sitio a una recomendación tecnológica. El proceso inició con la delimitación del área de estudio y la consolidación de insumos, como la batimetría y las series de nivel del mar. Posteriormente, se construyó una línea base multianual de la circulación a partir de dos niveles de información complementarios, por un lado, producto de reanálisis global con descomposición física utilizado para caracterizar el contexto no mareal regional y discutir incertidumbre asociada, y, por otro, un producto de física oceánica de mayor resolución espacial empleado para describir con mayor detalle la estructura espacial de la corriente total en el entorno oceánico local mediante análisis multianuales. En paralelo, el análisis armónico de las series de nivel del mar permitió describir el comportamiento mareal a partir de la estación ubicada en la bahía de Tumaco. Con ese marco, el proyecto avanzó hacia el modelo hidrodinámico y, a partir de sus salidas, se estimó el potencial energético de la bahía de Tumaco. Finalmente, el potencial calculado se tradujo en criterios técnicos para filtrar tecnologías y cerrar con una selección recomendada.

La metodología está diseñada para que cada capítulo sea autónomo y trazable, es decir, cada resultado se asocia explícitamente con su fuente de datos, el periodo usado y la herramienta de procesamiento, de forma que el lector pueda seguir esta tesis de forma clara.

3.1 Área de estudio

La bahía de Tumaco, localizada en el Pacífico suroccidental colombiano, ubicada en el departamento de Nariño, se interpreta como un entorno costero - estuarino donde interactúan procesos oceánicos y aportes continentales. Con el fin de mantener consistencia entre datasets, análisis y figuras, se adoptó un recorte espacial fijo en coordenadas geográficas, definido por los límites $W = -78.93^\circ$, $E = -78.51^\circ$, $S = 1.7374^\circ$ y $N = 2.0355^\circ$. Este recorte se empleó de forma transversal en el recorte de batimetría, la extracción de series, el cálculo de estadística multianual y la definición posterior de dominios de modelación.

Este recorte abarcó la bahía y su zona inmediata de influencia, incluyendo el frente costero y los canales principales asociados al sistema estuarino (Rivas et al., 2014).

3.2 Datos

3.2.1 Batimetría

La batimetría se obtuvo a partir del GEBCO 2024 Grid, un modelo global continuo de elevación del terreno marino y terrestre con resolución de 15 arc - second (≈ 450 m en el ecuador). Este producto fue desarrollado en el marco de GEBCO y el proyecto Seabed 2030, integrando múltiples fuentes de información batimétrica y topográfica para entregar una superficie global estandarizada que permitió representar la geometría del fondo marino en el área de estudio y sustentar la preparación de insumos cartográficos y de modelación. (Descripción oficial GEBCO 2024: <https://www.gebco.net/data-products-gridded-bathymetry-data/gebco2024-grid>; documento técnico: https://www.gebco.net/sites/default/files/documents/GEBCO_grid_2024.pdf; DOI/registro del dataset: https://www.bodc.ac.uk/data/published_data_library/catalogue/10.5285/1c44ce99-0a0d-5f4f-e063-7086abc0ea0f) (GEBCO & The Nippon Foundation, 2024).

3.2.2 Series de nivel del mar

Las series de nivel del mar se obtuvieron de la estación Tumaco (UHSLC ID: 303) distribuida por el University of Hawai'i Sea Level Center / Joint Archive for Sea Level (UHSLC/JASL), ubicada 78.730° W y 1.817° N, dentro del sector central de la bahía de Tumaco. Esta base de datos reúne registros mareográficos globales con control de calidad y documentación asociada, lo que permite describir el comportamiento mareal a partir de observaciones y estimar sus constituyentes mediante análisis armónico. Se trabajó con la serie horaria (PT1H) descargada para el periodo 1951-11-01 a 2018-12-08. Adicionalmente, esta serie constituye la fuente observacional utilizada para la validación del modelo hidrodinámico Delft3D-FLOW, mediante la comparación entre los niveles del mar simulados y los registros del mareógrafo para el año 2016 (Ver Sección 4.3.3). (DOI: <https://uhslc.soest.hawaii.edu/datainfo/>; colección JASL en NOAA/NCEI: <https://accession.nodc.noaa.gov/JIMAR-JASL>) (Caldwell et al., 2015).

3.2.3 Reanálisis oceánico

La caracterización multianual de las corrientes superficiales en la bahía de Tumaco se desarrolló combinando dos productos. Para analizar las variaciones temporales, se empleó el producto Copernicus Marine - GLOBCURRENT (MULTIOBS_GLO_PHY_MYNRT_015_003), que proporciona la corriente total y sus componentes geostrofica, mareal y Ekman, junto con campos de incertidumbre reportados. La corriente total resulta de la suma de estas tres componentes, calculadas de forma independiente: la componente geostrofica se deriva de altimetría satelital, la componente Ekman se estima mediante un modelo empírico aplicado al esfuerzo del viento ERA5, y la componente mareal proviene del atlas global FES2022 (Etienne, 2024a). Se trabajó con el periodo 1994-01-01 a 2024-12-31, utilizando resolución espacial $1/4^\circ$ y seleccionando la resolución temporal diaria para el análisis multianual. (Ficha del producto: https://data.marine.copernicus.eu/product/MULTIOBS_GLO_PHY_MYNRT_015_003/description;

QUID: <https://documentation.marine.copernicus.eu/QUID/CMEMS-MOB-QUID-015-003.pdf>.

En complemento, para representar con mayor detalle la estructura espacial de la corriente total en el entorno oceánico de la bahía de Tumaco, se incorporó el producto Global Ocean Physics Analysis and Forecast (GLOBAL_ANALYSISFORECAST_PHY_001_024), que corresponde a un sistema operacional de análisis y pronóstico global de física oceánica de Mercator Ocean a $1/12^\circ$ (0.083°). A partir de sus variables de velocidad u (componente zonal, E – W de la corriente) y v (componente meridional, N – S de la corriente) se calculó la magnitud de la corriente y se construyeron análisis multianuales para el periodo 2022-01-06 a 2026-02-18. (Ficha del producto: https://data.marine.copernicus.eu/product/GLOBAL_ANALYSISFORECAST_PHY_001_024/description) (Etienne, 2024a; Lellouche et al., 2025; O. Le Galloudec et al., 2025).

3.2.4 Modelación numérica con DELFT3D - FLOW

Con el fin de comprender en mayor detalle la dinámica de las corrientes en la bahía de Tumaco y, a partir de ello, identificar zonas potenciales de mayor aprovechamiento energético, se realizó una modelación hidrodinámica con el

modelo Delft3D - FLOW. Esta herramienta numérica resuelve la propagación de la marea y la circulación, a partir de la batimetría preparada y de un forzamiento mareal representado mediante el atlas global TPXO (Tide Model Driver with Optimum Interpolation), un modelo global de mareas que proporciona constantes armónicas para reconstruir la señal mareal en las fronteras abiertas del modelo (Egbert & Erofeeva, 2002). Dado que se evaluaron alternativas de forzamiento, se emplearon las versiones TPXO7.2 y TPXO8 como configuraciones comparables para las condiciones de borde del modelo, cuya comparación sistemática se presenta en la Sección 4.3.2. (Manual Delft3D-FLOW: https://content.oss.deltares.nl/delft3d4/Delft3D-FLOW_User_Manual.pdf; portal TPXO y cómo citar: <https://www.tpxo.net> y <https://www.tpxo.net/tpxo-products-and-registration>) (Deltares Systems, 2026; Egbert & Erofeeva, 2002, 2010).

3.3 Cálculo Potencial y Selección Tecnológica

Para cuantificar el recurso mareomotriz asociado a corrientes, se utilizó como métrica base la densidad de potencia cinética del flujo:

$$p(t) = \frac{1}{2} \rho U(t)^3$$

donde ρ representa la densidad del agua de mar y $U(t)$ la velocidad instantánea de la corriente obtenida a partir del modelo hidrodinámico. En toda la tesis se adoptó $\rho = 1022 \text{ kg/m}^3$ para mantener consistencia entre simulación y cálculo energético. Este valor es coherente con las condiciones termohalinas características de la bahía de Tumaco, donde la influencia de precipitaciones intensas y descargas fluviales reduce la salinidad superficial por debajo de los valores oceánicos típicos, con registros en torno a 29 UPS reportados para el sistema, lo que resulta en densidades menores a los 1025 kg/m^3 del océano abierto (Devis Morales, 2002).

A partir de estas series se estimaron indicadores energéticos representativos del recurso, incluyendo percentiles de velocidad característicos, la densidad de potencia promedio (Average Power Density, APD) y la energía cinética acumulada por unidad de área durante el periodo simulado. Estas métricas permitieron comparar la intensidad y persistencia del recurso en diferentes sectores de la bahía de Tumaco.

Con base en la caracterización energética obtenida y considerando las condiciones hidrodinámicas, geomorfológicas y operativas de la bahía de Tumaco, se identificaron tecnologías mareomotrices potencialmente compatibles con las condiciones del sistema,

considerando requisitos de instalación, operación, mantenimiento y madurez tecnológica. Las métricas energéticas utilizadas cuantifican el recurso cinético disponible en el flujo ($p(t)$, APD y E_A) y, en la comparación tecnológica, la potencia hidráulica incidente sobre el área barrida del rotor ($P = \frac{1}{2}\rho AU^3$). En ambos casos, los valores representan potencia del flujo antes de conversión y no corresponden a la potencia eléctrica generada. La conversión a electricidad dependería de la eficiencia del dispositivo y de su estrategia de control (Grabbe, 2008; IEC, 2013).

3.4 Herramientas Computacionales

Los datos se procesaron principalmente en formato NetCDF y se procesaron mediante una combinación de GNU Octave y Python, según el tipo de tarea. En Octave se utilizó el paquete netcdf para la lectura, preparación y tratamiento de la batimetría y productos base.

En Python, el procesamiento multianual del reanálisis, el análisis armónico del nivel del mar y la generación de figuras y tablas se realizaron en un entorno Conda con librerías científicas y de cartografía, entre ellas numpy, xarray, scipy, netCDF4, y herramientas geoespaciales como cartopy, pyproj y shapely.

Para el análisis armónico se empleó la librería `t_tide`, utilizada como paquete en Python, desarrollada por R. Pawlowicz, B. Beardsley, and S. Lentz para el análisis armónico clásico de series de nivel del mar. Esta herramienta permite estimar constituyentes armónicos, amplitudes y fases, así como cuantificar la contribución de cada componente en la señal observada. La librería se encuentra disponible públicamente a través del repositorio del autor y puede obtenerse desde: https://www.eoas.ubc.ca/~rich/#T_Tide (Eaton, 2025; Hoyer & Hamman, 2017; Pawlowicz et al., 2002).

4. Resultados y análisis

En este capítulo se presentan y discuten los hallazgos principales de la investigación siguiendo una secuencia que va desde el escenario físico - territorial hasta la evidencia hidrodinámica que sustenta la valoración del recurso mareomotriz en la bahía de Tumaco.

Para mantener trazabilidad, cada subcapítulo conserva la misma estructura. Primero, se presenta una metodología específica, luego se exponen los resultados cuantitativos apoyados en figuras y tablas, seguido se desarrolla la interpretación física y energética, orientada a explicar los patrones observados y su relevancia para el aprovechamiento del recurso, y finalmente se incluye una síntesis parcial que resume los puntos clave y enlaza con el siguiente apartado.

4.1 Área de estudio - Base física y territorial

Este apartado establece el marco espacial y físico desde el cual se interpretan los resultados hidrodinámicos posteriores. La bahía de Tumaco no presenta un fondo uniforme, su configuración costero - insular, sus bajas profundidades y sus corredores estuarinos controlan dónde la marea se canaliza y se acelera o se disipa. Por ello, antes de entrar a las variables hidrodinámicas, se define el dominio de trabajo y se describe la batimetría y el contexto territorial que condiciona la circulación.

En esta investigación, el dominio principal de trabajo se delimitó para cubrir tanto la Bahía interna y la franja occidental de transición hacia el océano Pacífico, capturando el gradiente entre ambientes costeros, someros y geoméricamente fragmentados, y sectores más profundos donde el intercambio con mar abierto es dominante.

4.1.1 Metodología específica

La construcción del marco físico - territorial se realizó combinando cartografía de referencia y preparación reproducible de insumos. Primero, se elaboró un mapa de ubicación en un entorno SIG para contextualizar el dominio dentro de Colombia y del departamento de Nariño, y comunicar de manera clara el área de estudio (Ver Sección 4.2.1).

La base cuantitativa del capítulo, como lo es la batimetría, las figuras analíticas y la sectorización se generó mediante GNU Octave a partir de la base de datos batimétricos de GEBCO 2024 Grid (GEBCO & The Nippon Foundation, 2024). Para

representar la batimetría marina, se transformó el campo de elevación a profundidad positiva mediante la relación $depth = -elevation$, y se aplicó una máscara de tierra. El mapa batimétrico del área de estudio se muestra en la Figura 2 (Ver Sección 4.1.3). Sobre esta ventana local se definió una sectorización interna en unidades A - M, usada como referencia cartográfica y de lectura socioenergética (Ver Sección 4.1.4). Esta sectorización se construyó mediante la digitalización de coordenadas a partir de la identificación de territorios aledaños y elementos presentes en la Bahía, como poblados y asentamientos, con el fin de contextualizar la dinámica territorial y los posibles beneficiarios del recurso. Algunos de estos sectores coinciden con unidades territoriales reportadas en la literatura para Tumaco. Finalmente, se superpuso una línea de costa de referencia digitalizada manualmente a partir de Google Earth para mejorar la geometría insular. Esta línea de costa se empleó únicamente como referencia cartográfica y no como máscara del dominio, ya que no corresponde a un polígono cerrado ni pretende sustituir una línea oficial.

4.1.2 Ubicación y delimitación del área

La bahía de Tumaco se localiza en el litoral Pacífico del suroccidente de Colombia, en el departamento de Nariño, y está asociada al municipio de San Andrés de Tumaco. La figura 1 muestra el dominio espacial adoptado para el análisis, previamente definido en la Sección 3.1. (Tejada Vélez et al., 2003).

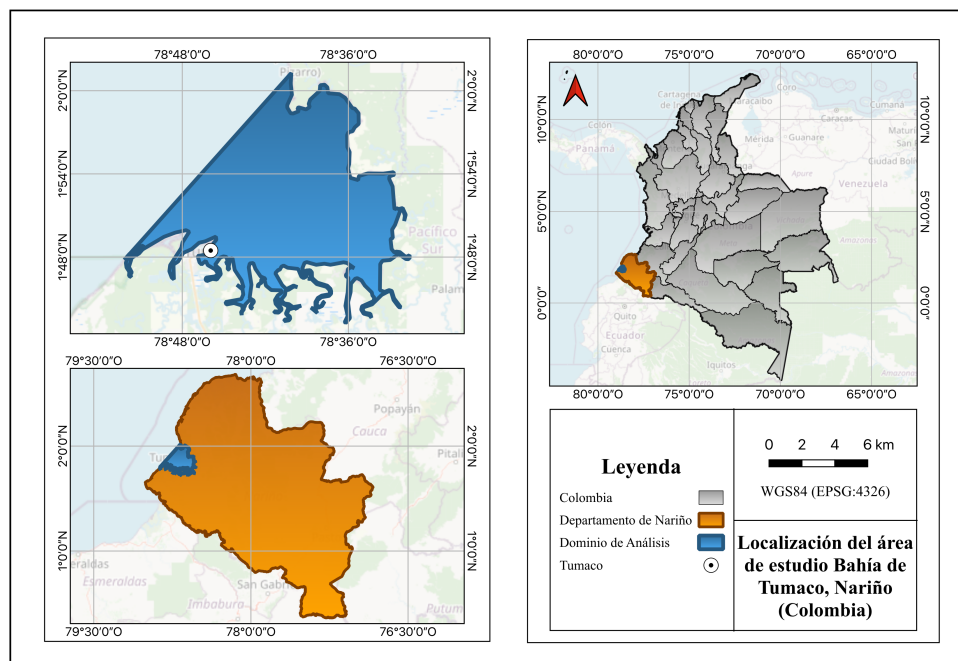


Figura 1. Localización del área de estudio y dominio de análisis para la Bahía de Tumaco, Nariño (Colombia). Fuente: Mapa Base QGIS.

La figura 1 permite contextualizar el sistema de estudio dentro del entorno costero - insular de la región y visualizar la relación entre la Bahía interna y su conexión con el océano Pacífico, proporcionando una referencia espacial para la interpretación de los resultados presentados en las secciones posteriores.

4.1.3 Batimetría y unidades morfológicas

La figura 2 muestra la batimetría del área de estudio, partiendo de un contraste funcional entre un interior predominantemente somero, con profundidades que van de 0 metros bordeando la costa, hasta 10 m llegando a mar abierto, fragmentado por islas, planicies intermareales, y un sector occidental más profundo asociado a la conexión con el océano, partiendo de los 35 m hasta los 60 m en adelante. Este contraste define dónde el flujo mareal encuentra mayor fricción y disipación y dónde puede sostener un intercambio más eficiente con mar abierto lo cual es fundamental para interpretar la distribución espacial de corrientes.

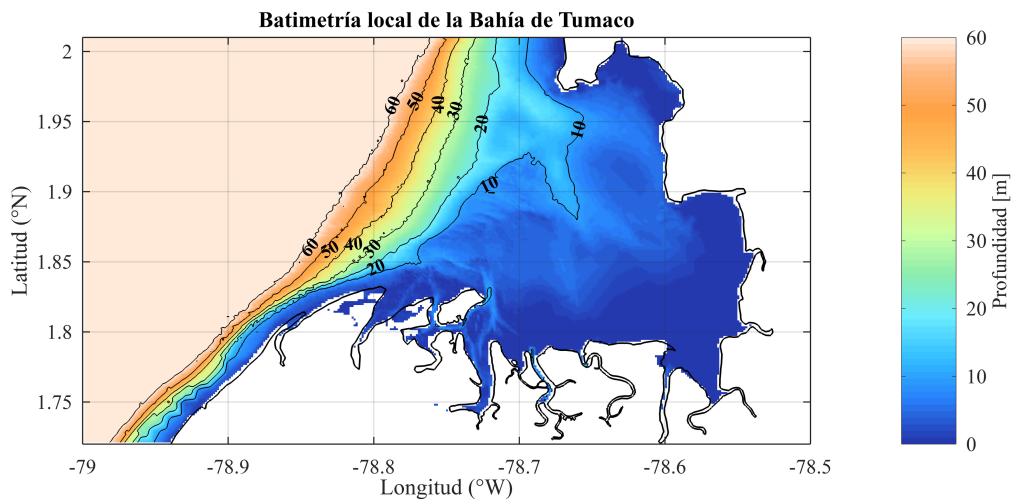


Figura 2. Batimetría del área de estudio y rasgos morfológicos principales. Fuente: GEBCO 2024 Grid

En el interior de la Bahía dominan profundidades bajas (< 10 m) asociadas a ambientes someros y de alta complejidad geométrica. En la figura 2, esto se expresa a través de la continuidad de las isóbatas (líneas de igual profundidad) y la variación espacial, coherente con la presencia de bancos, bajos y canales internos. Estas condiciones favorecen un comportamiento amortiguador, es decir que, al ser un entorno más somero y geomorfológicamente irregular, la fricción del fondo aumenta y el movimiento mareal tiende a perder intensidad a medida que el flujo se interna hacia zonas aún más someras (Du et al., 2018; Dykstra et al., 2022; Parker, 2007).

Hacia el occidente, se observa profundización rápida, coherente con un intercambio más directo con mar abierto. En conjunto, esta organización establece un sistema caracterizado por un corredor de intercambio dominante con el mar abierto y una bahía interna somera.

4.1.4 Contexto social y energético

La configuración territorial de Tumaco es costero - insular, la cabecera municipal se organiza sobre las islas de Tumaco, El Morro y La Viciosa, mientras que el componente rural se distribuye en un conjunto amplio de veredas y asentamientos dispersos (RIMISP, 2017). Esta estructura se refleja en los patrones del censo, que distingue población en cabecera municipal y en centros poblados y rural dispersos (DANE, 2018). En consecuencia, la provisión de infraestructura y servicios incluido el suministro eléctrico, enfrenta mayores retos operativos fuera del núcleo urbano, un rasgo consistente con diagnósticos institucionales en ZNI (Superservicios, 2017).

En términos del marco sectorial, parte importante del territorio se encuentra bajo la definición de ZNI, entendidas como localidades sin conexión al Sistema Interconectado Nacional (IPSE, 2024). En estos contextos, la prestación del servicio suele enfrentar restricciones estructurales asociadas a operación y logística, reflejadas en indicadores de continuidad y desempeño reportados por entidades de control (Aldana et al., 2023). Además, el componente económico es determinante, el costo del servicio y la incertidumbre operativa afectan directamente a los hogares y actividades productivas. (Superservicios, 2025).

Delimitación de sectores A - M en la Bahía de Tumaco sobre isóbatas batimétricas

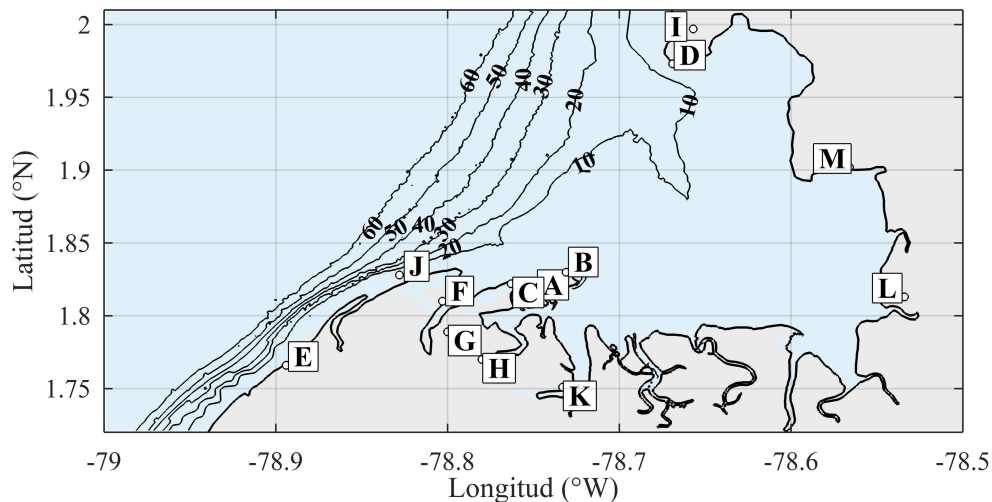


Figura 3. Sectorización territorial A - M para lectura socioenergética del sistema. Fuente: Elaboración propia a partir de digitalización de coordenadas.

En la figura 3, la sectorización A - M organiza el territorio desde una perspectiva socioenergética. El sector (A) Tumaco corresponde al núcleo urbano insular y concentra la mayor parte de la población, servicios e infraestructura del distrito. Según el Censo Nacional de Población y Vivienda de 2018, el municipio registró 253,637 habitantes y cerca de 44,804 hogares. Este núcleo concentra la mayor parte de la infraestructura, servicios y actividad económica, y se encuentra conectado al Sistema Interconectado Nacional (SIN), lo que implica una mayor continuidad del servicio frente a las zonas rurales e insulares (DANE, 2018).

Alrededor de este núcleo se configura un sistema urbano - insular compuesto por sectores como (B) Isla El Morro, (C) Isla El Bajito, (D) Punta Cascajal y (G) Isla La Viciosa. Estas áreas mantienen una relación funcional directa con el casco urbano, tanto en términos de movilidad como de servicios, pero presentan condiciones intermedias en el acceso a la energía. Aunque la cercanía a la red eléctrica principal favorece la cobertura, esta no es continua y, en algunos casos, el suministro depende de soluciones locales o esquemas de respaldo, lo que refleja una transición entre el sistema interconectado y formas de provisión más localizadas propias de territorios insulares (RIMISP, 2017).

Más allá de esta franja cercana, el territorio se fragmenta en una red de asentamientos rurales dispersos, como (I) Isla del Gallo, (L) Chagüí y (M) Curay, organizados en torno a ríos, esteros y unidades territoriales mayores como corregimientos y consejos comunitarios. En el caso de Tumaco, esta estructura incluye múltiples veredas y cuencas hidrográficas entre ellas las de los ríos Chagüí y Curay, donde las condiciones de acceso a servicios básicos están fuertemente condicionadas por la dispersión poblacional y la conectividad fluvial. En estos sectores, el acceso a la energía no responde a un esquema continuo, sino a sistemas aislados característicos de las ZNI (Agencia de Renovación del Territorio, 2018).

En este contexto, los esquemas de provisión energética en las ZNI no solo presentan limitaciones en la continuidad del servicio, sino que también implican costos operativos significativamente más altos que los del sistema interconectado. Esta condición está asociada principalmente a la dependencia de combustibles fósiles, las dificultades logísticas del territorio y la operación en pequeña escala. Estos factores incrementan la vulnerabilidad del sistema frente a variaciones en el abastecimiento y el precio del combustible. Esto se traduce en sistemas energéticos menos eficientes,

más costosos y con mayores restricciones para garantizar un suministro continuo en comunidades rurales e insulares (IPSE, 2024).

Finalmente, la sectorización también permite diferenciar áreas con condiciones físicas y ambientales particulares. Sectores como (E) Travesía y (J) Bocagrande, con mayor exposición al océano abierto, contrastan con zonas internas como (H) Chapilar, que funcionan como corredores de circulación. Por su parte, áreas como (F) Bajito Vaquería y (K) Pinal Salado están dominadas por manglares y condiciones de poca profundidad, lo que implica una alta sensibilidad ambiental y restricciones claras para la intervención. La lectura territorial muestra que el aprovechamiento del recurso mareomotriz no puede evaluarse únicamente desde la intensidad del flujo, sino que debe entenderse en relación con un territorio (IPSE, 2024; RIMISP, 2017).

4.1.5 Contexto climático - oceánico

El litoral Pacífico colombiano se caracteriza por altas tasas de precipitación asociadas al desplazamiento de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) y al transporte de humedad en la franja costera. En esta dinámica el chorro de viento de bajo nivel Chocó transporta humedad y contribuye a la ocurrencia de lluvias intensas en el occidente de Colombia (Yepes et al., 2019). En Tumaco, esta señal hidroclimática es relevante para el sistema estuarino, porque condiciona las entradas de agua dulce y los cambios en la salinidad (Guzmán et al., 2014; Mosquera et al., 2022).

La región presenta un forzamiento eólico estacional asociado a la variabilidad del chorro de Panamá y el chorro del Chocó, con cambios en dirección e intensidad del viento a escala intra - anual. En el Pacífico colombiano, se ha reportado que durante el primer semestre predomina, los vientos alisios del noreste (Chorro de Panamá), mientras que hacia el segundo semestre se intensifican los alisios del suroeste (Chorro de Chocó), esto asociado a la dinámica atmosférica regional, con efectos en la formación de nubes y la lluvia (Bayona et al., 2007). Por su parte, el chorro de Panamá tiene su periodo más activo entre diciembre y abril, y su extensión e intensidad pueden variar interanualmente, incluida su relación con fases cálidas de El Niño Oscilación Sur (ENSO) (Ordóñez-Zuniga et al., 2021).

El ENSO modula el clima regional y se expresa en el océano mediante anomalías de temperatura y del nivel del mar. En Tumaco, esta conexión se ha documentado a partir de series locales, por un lado, el índice multivariado propuesto para la costa occidental de Colombia integra temperatura superficial del mar, temperatura del aire

y precipitación en Tumaco y muestra que buena parte de la variabilidad interanual de estas variables está asociada a la señal ENSO del Pacífico ecuatorial (Rodríguez-Rubio, 2013). Esto significa que, estos procesos actúan como moduladores no mareales de las condiciones del sistema, mientras que la marea mantiene su periodicidad astronómica como forzante dominante para la hidrodinámica local.

Síntesis 4.1

La bahía de Tumaco es un sistema costero - insular somero con corredores de intercambio hacia mar abierto y un interior somero de mayor disipación por fricción. La batimetría y la geometría del sistema modulan la circulación superficial, por lo que es esperable encontrar aceleraciones del flujo en pasos y estrechamientos. En paralelo, la organización territorial y el contexto ZNI introducen restricciones logísticas y socioambientales que deben considerarse al discutir compatibilidad tecnológica. Finalmente, el clima regional actúa como modulador hidrodinámico local por su efecto en las variaciones de temperatura y salinidad del agua del mar (cambios en la densidad), si bien la marea constituye un forzante periódico que no se ve afectado por estas oscilaciones estacionales e interanuales propias de esta región costera del Pacífico ecuatorial oriental.

4.2 Hidrodinámica de la bahía de Tumaco

Este capítulo construye una línea base hidrodinámica para la bahía de Tumaco combinando observaciones mareográficas y productos de modelos de reanálisis. Primero, se caracteriza la señal mareal medida en la costa, mediante un análisis armónico, identificando los constituyentes dominantes, verificando la capacidad de reconstrucción y predicción. Luego se usan datos de dos modelos de reanálisis como contexto regional para describir la variabilidad temporal de la corriente superficial total y su descomposición en las componentes no mareales (Ekman y geostrofica) y mareales. Finalmente, se evalúa la variabilidad espacial de las corrientes superficiales y se discuten las limitaciones de estas bases de datos para interpretar procesos costeros de pequeña escala.

4.2.1 Metodología específica

La caracterización mareal se basó en la serie de nivel del mar de la estación Tumaco del UHSLC, utilizada como referencia observacional para caracterizar la marea y para estimar amplitudes y fases de los principales constituyentes y evaluar la reconstrucción armónica frente a la señal registrada. La serie se sometió primero a

un control de calidad básico, los valores faltantes se transformaron a NaN y se verificó consistencia de unidades, expresando el nivel del mar en metros (m) conforme al Sistema Internacional de Unidades (Ver Sección 4.2.2.) (Caldwell et al., 2015).

Con la serie depurada, se analizaron los armónicos mediante la librería T_TIDE (Pawlowicz et al., 2002), aplicado en un entorno de Python. El procedimiento entrega un conjunto de constituyentes de la marea, con sus respectivas amplitudes y fases. La reconstrucción de la marea a partir de la suma de los armónicos y la comparación con los datos del mareógrafo permite diferenciar, la señal periódica mareal y el residual no mareal, causado por condiciones atmosféricas locales (Ver Sección 4.2.2.).

Para describir la circulación superficial regional se emplearon dos productos de Copernicus Marine, GLOBCURRENT utilizado para analizar la variabilidad temporal de la corriente superficial total y sus componentes geostrofica Ekman y mareal, GLORYS12 / Global Ocean Physics Analysis and Forecast, incorporado para visualizar con mayor detalle los patrones espaciales estacionales de la corriente total.

Dado que la resolución de productos de los modelos de reanálisis globales es gruesa en comparación con la escala de la Bahía, se evaluó explícitamente su cobertura dentro del dominio, contabilizando los píxeles con datos válidos de velocidad (Figura 4).

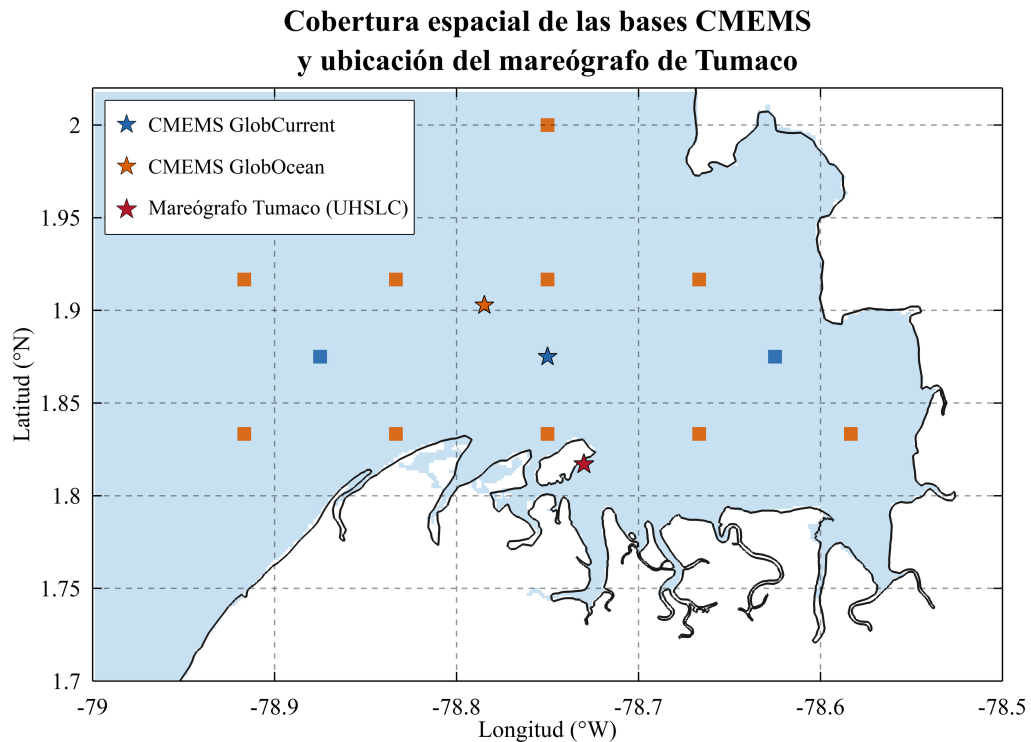


Figura 4. Cobertura espacial de productos de los Copernicus Marine (CMEMS) y ubicación del Mareógrafo en la Bahía de Tumaco. Fuentes: CMEMS GLOBCURRENT, CMEMS GLORYS/GLORYS12 y Mareógrafo de Tumaco (UHSLC ID 303).

La Figura 4 evidencia que el entorno inmediato de la Bahía está representado por un número limitado de píxeles de los productos globales. En particular, el producto GlobCurrent aporta únicamente dos celdas válidas dentro del dominio costero, mientras que GLORYS presenta una cobertura mayor, con quince píxeles en el área analizada. Esta diferencia responde directamente a la resolución espacial de cada producto y permite dimensionar el nivel de detalle con el que el reanálisis logra representar la dinámica dentro de un sistema costero somero y altamente canalizado como la Bahía.

Adicionalmente, en la figura se incluye la ubicación del mareógrafo de Tumaco, cuyos registros de nivel del mar constituyen la base observacional empleada en el análisis armónico desarrollado en este capítulo.

Considerando esta limitación espacial, para cada componente de corriente se calculó la climatología mensual de tres indicadores complementarios: la velocidad media como magnitud escalar $\text{mean}(|U|) = \text{promedio de } \sqrt{(u^2 + v^2)}$, que representa la intensidad promedio del flujo independientemente de su dirección, y las componentes vectoriales promedio zonal U_{mean} y meridional V_{mean} , que indican la dirección predominante del flujo, positivo hacia el este y norte respectivamente.

Estos tres indicadores son distintos entre sí, $\text{mean}(|U|)$ cuantifica la intensidad media, mientras que U_{mean} y V_{mean} describen la orientación predominante de la corriente, a partir del promedio espacial dentro del área de estudio para el período 1994 - 2024. Finalmente, para determinar la incertidumbre del producto de reanálisis CMEMS GLOBCURRENT, se comparó la señal típica de cada componente estimada como $\text{RMS}(|U|)$ promediada espacialmente, con el error típico reportado directamente por el producto GLOBCURRENT como campo de incertidumbre, estimado como $\text{RMS}(|\text{err}|)$, donde $|\text{err}| = \sqrt{\text{err}_u^2 + \text{err}_v^2}$. Con estas magnitudes se calculó la razón señal - ruido $\text{SNR} = \text{señal}/\text{error}$, un valor $\text{SNR} > 1$ indica que la componente supera su propio error y puede considerarse representativa del campo de corrientes. Un valor $\text{SNR} < 1$ indica que el error domina y los resultados deben interpretarse con cautela. Complementariamente, se evaluó la importancia energética de cada componente mediante el indicador, $w = \langle |U_i|^2 \rangle / \langle |U_{\text{total}}|^2 \rangle$. Un valor cercano a 1 indica dominancia energética, un valor cercano a 0 indica que su aporte al flujo total es poco significativo (Ver Sección 4.2.5) (Etienne, 2024b).

4.2.2 Caracterización mareal y análisis armónico

El comportamiento del nivel del mar en Tumaco muestra una señal periódica dominante y coherente en el tiempo (Ver Figura 5). A escala multidecadal (1951 - 2018), la serie presenta oscilaciones regulares entre pleamar y bajamar, propias de un régimen fuertemente controlado por la marea astronómica.

A partir del análisis armónico del nivel del mar, el rango mareal característico de la bahía de Tumaco se sitúa en 4.06 m, lo que confirma el carácter macromareal del sistema y la predominancia de las componentes semidiurnas en la dinámica local.

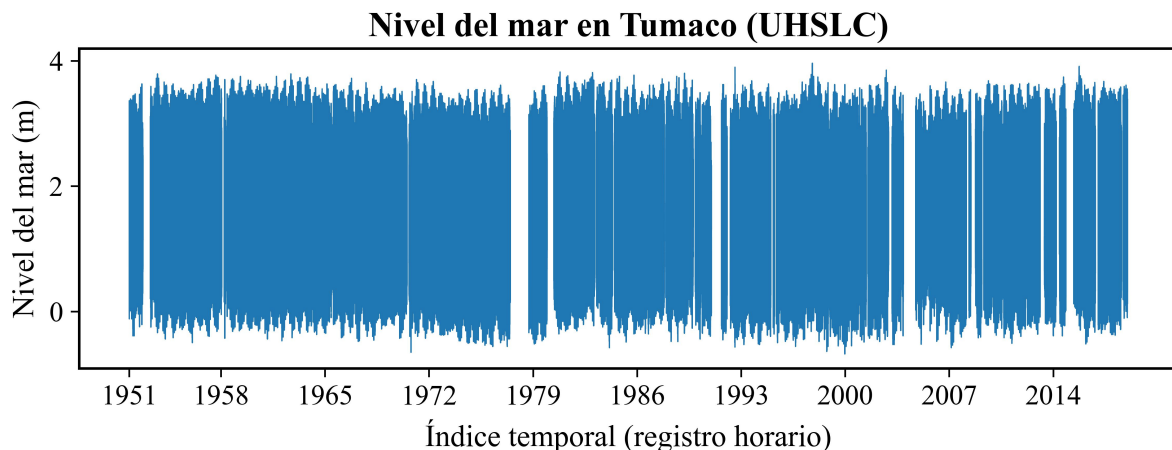


Figura 5. Comportamiento de Nivel del Mar en la Bahía de Tumaco. Período 1951 - 2018.
Fuente: Mareógrafo de Tumaco (UHSLC ID 303).

Los espacios en blanco visibles en la serie corresponden a períodos sin registro, atribuibles a mantenimientos, fallas del sistema u otras circunstancias que impidieron la toma de datos. El tratamiento de estos valores y su efecto sobre el análisis armónico se describe en la Sección 4.2.1, donde se detalla el procedimiento de control de calidad aplicado a la serie, el cual no afecta los resultados obtenidos.

La figura 5 muestra el nivel del mar en Tumaco a partir de un registro horario de largo plazo. Las variaciones observadas corresponden a oscilaciones continuas del nivel del mar respecto a un nivel de referencia del mareógrafo. A lo largo de toda la serie se identifica una señal altamente repetitiva y persistente, lo que evidencia la dominancia de un forzamiento astronómico en la variabilidad del nivel del mar en la región.

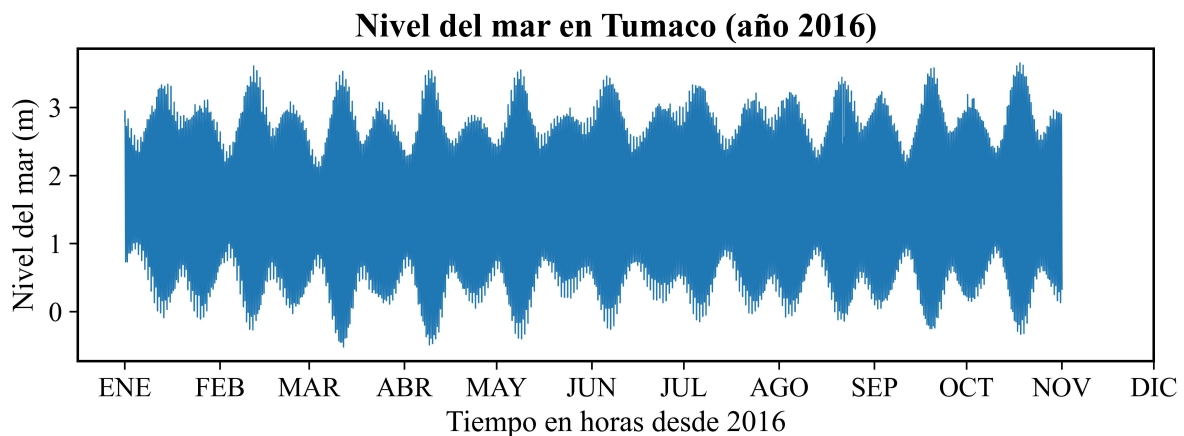


Figura 6. Comportamiento anual del Nivel Mar en la Bahía de Tumaco (Año de referencia 2016). Fuente: Mareógrafo de Tumaco (UHSLC ID 303).

En la figura 6 se evidencia el análisis detallado de un año representativo. La elección de 2016 responde a que es el año más reciente con registro horario completo disponible en la serie del mareógrafo. Dado que la marea astronómica es periódica y predecible, el comportamiento semidiurno documentado es representativo del régimen mareal del sistema independientemente del año seleccionado. Este análisis permitió observar con mayor claridad la estructura temporal anteriormente mencionada. La serie mostró dos ciclos mareales principales por día y una modificación estructurada del rango mareal asociada a la alternancia entre mareas vivas y muertas.

El análisis armónico para 2016 indica que M2 fue la constituyente dominante, seguida por S2, mientras que las componentes diurnas K1 y O1 presentaron amplitudes menores, aunque aportaron a la modulación diaria del nivel del mar (Ver

Tabla 4). Esta jerarquía de constituyentes es físicamente coherente con la literatura sobre mareas. M2 y S2 corresponden a los forzamientos lunisolar semidiurnos de mayor amplitud y concentran la mayor fracción de la energía mareal astronómica en numerosos ambientes costeros (Parker, 2007), lo que se confirma en los resultados obtenidos para Tumaco (Ver Tabla 4), donde M2 supera en más de tres veces la amplitud combinada de K1 y O1. Estas últimas representan la contribución diurna que modula el patrón diario del nivel del mar, pero su aporte energético es secundario frente a las componentes semidiurnas, razón por la cual el régimen mareal de la Bahía se clasifica como semidiurno y la energía disponible para aprovechamiento mareomotriz responde principalmente al pulso de M2 (Parker, 2007).

Armónico	Amplitud (m)	Fase (°)
O1	0.0227	56.306
K1	0.1067	56.859
M2	1.1967	250.165
S2	0.3207	306.977

Tabla 4. Constituyentes mareales principales estimados por análisis armónico (Año de referencia 2016). Fuente: Mareógrafo de Tumaco (UHSLC ID 303).

A partir de estas amplitudes se calculó el *form factor* F siguiendo la expresión definida en la sección 2.2, obteniendo $F \approx 0.09$ para el año evaluado. Este valor clasificó y confirmó los patrones previamente identificados, el régimen mareal se clasifica como semidiurno ($F < 0.25$), confirmando que la dinámica del nivel del mar estuvo dominada por constituyentes semidiurnas y que las contribuciones diurnas fueron secundarias (Byun et al., 2023; Byun & Hart, 2020).

Desde una perspectiva física, este régimen implicó una transferencia regular y frecuente de energía entre el océano y la Bahía, con dos pulsos mareales diarios relativamente simétricos. Desde el punto de vista energético, esta estabilidad y periodicidad refuerza la predictibilidad del forzamiento mareal, lo cual es fundamental para cualquier evaluación posterior del potencial mareomotriz, pues reduce la incertidumbre asociada a la disponibilidad del recurso.

La reconstrucción del nivel del mar a partir del modelo armónico mostró un ajuste consistente frente al registro observado por el mareógrafo durante el año analizado, reprodujo de manera estable la fase y la amplitud de los ciclos mareales dominantes (Figura 7).

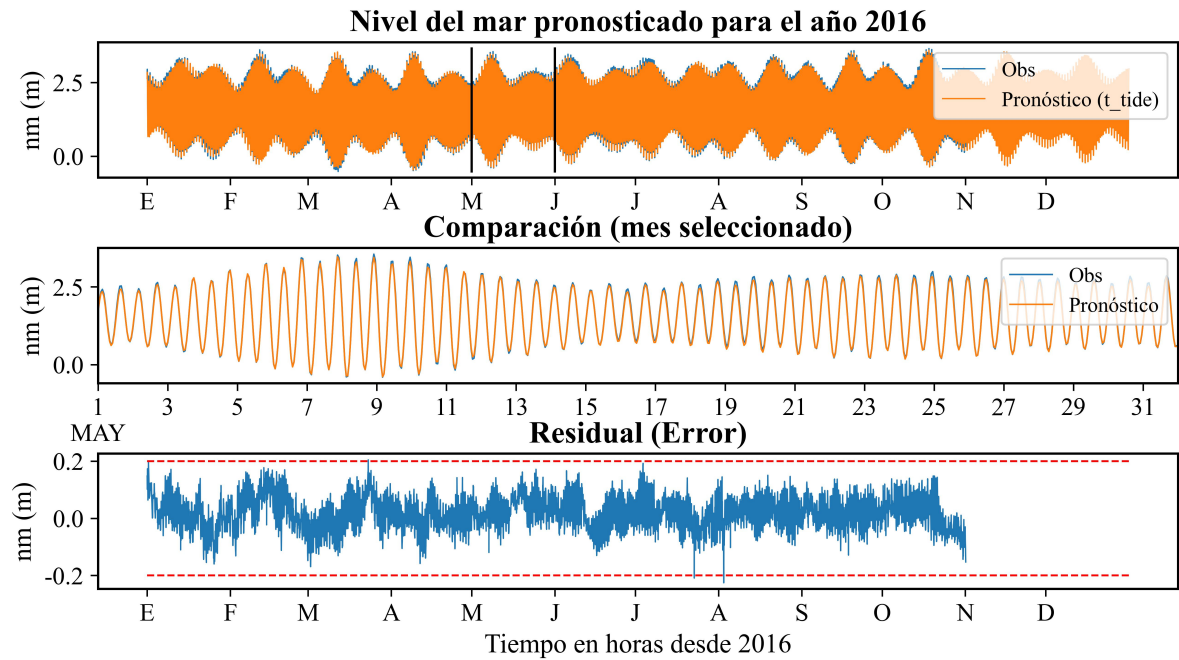


Figura 7. Reconstrucción armónica del nivel del mar y residual del ajuste para Tumaco (Año de referencia 2016). Fuente: Mareógrafo de Tumaco (UHSLC ID 303).

La comparación entre la observación, la reconstrucción y el residual asociado permitió separar la señal mareal predecible de la fracción no explicada por el ajuste armónico, atribuible a procesos no mareales (Marea Meteorológica) (Pawlowicz et al., 2002).

En la figura 8 se muestra el análisis a escala mensual donde se confirma que la predicción (Año 2017) mantuvo coherencia en fase y amplitud dentro del periodo evaluado, y que el error de este es bajo y se mantiene sin amplificación progresiva.

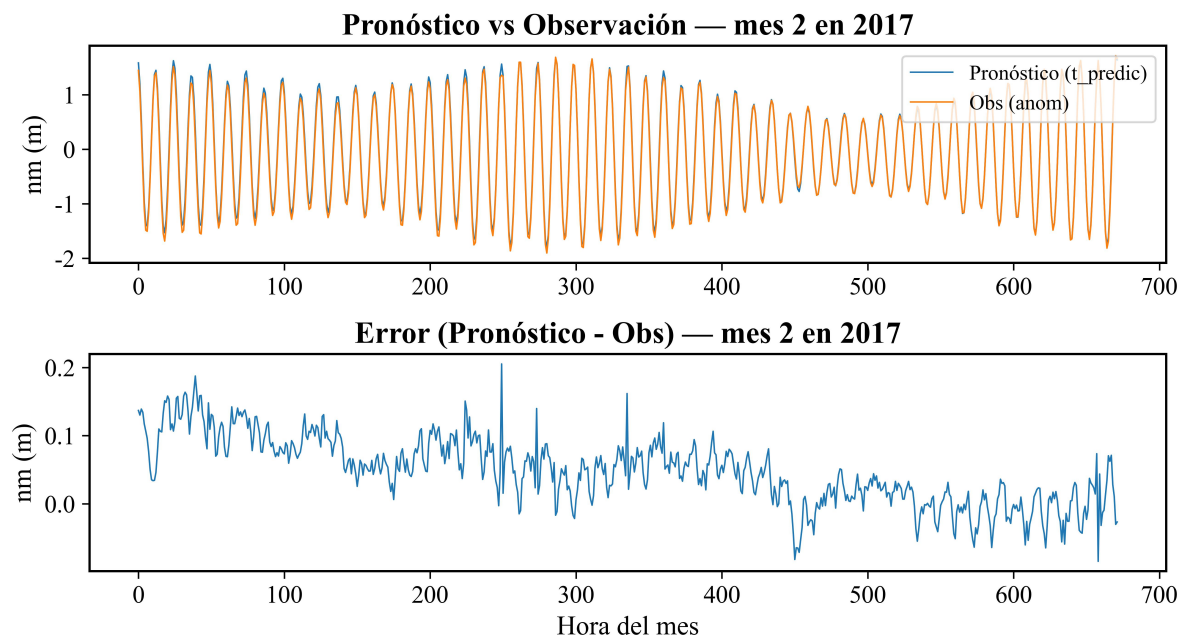


Figura 8. Predicción armónica independiente y error asociado para Tumaco (2017, mes evaluado). Fuente: Mareógrafo de Tumaco (UHSLC ID 303).

Estos resultados respaldaron la interpretación de la marea como el forzante principal de la hidrodinámica de este sistema costero, mostrando que es altamente predecible y que el rango mareal supera los 4 m, lo que sustenta la evaluación del potencial energético.

4.2.3 Circulación superficial total y descomposición por componentes (CMEMS GLOBCURRENT, 1994 – 2024)

La obtención de cada componente analizada en esta sección se describe en la Sección 3.2.3. La corriente superficial total estimada por CMEMS GLOBCURRENT, correspondiente a la velocidad horizontal en la superficie del océano promediada espacialmente dentro del dominio, mostró un comportamiento estacional marcado en el dominio analizado durante el periodo 1994 - 2024 (Ver Figura 9). La magnitud media de la velocidad superficial presentó un máximo relativo durante el primer cuatrimestre del año, seguido por una fase de debilitamiento hacia mitad de año y una recuperación progresiva hacia el último trimestre.

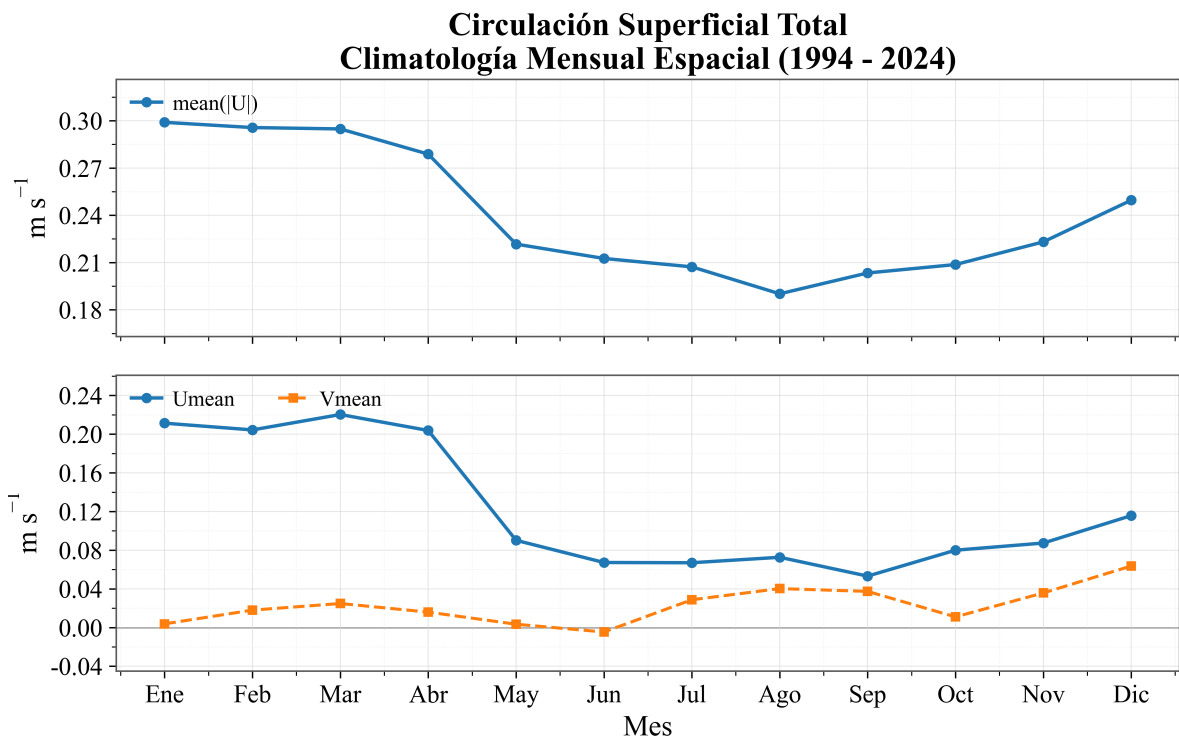


Figura 9. Ciclo anual de la corriente total en la Bahía de Tumaco.
Fuente: CMEMS GLOBCURRENT (1994-2024). Panel superior la magnitud de la corriente, panel inferior las componentes zonal (Umean) y meridional (Vmean)

Entre enero y marzo, la magnitud media de la velocidad superficial se mantiene relativamente alta y estable, con valores de mean(|U|) de 0.29 m s⁻¹. A partir de abril

0.279 m s⁻¹ comienza una disminución progresiva de la intensidad de la corriente, que se vuelve más marcada durante el periodo mayo - agosto. En ese intervalo la magnitud desciende desde 0.222 m s⁻¹ en mayo hasta alcanzar su mínimo anual en agosto 0.19 m s⁻¹. Posteriormente, entre septiembre y diciembre, la corriente muestra una recuperación gradual, aumentando desde 0.203 m s⁻¹ en septiembre hasta 0.25 m s⁻¹ en diciembre, lo que indica un cierre de año con intensidades nuevamente moderadas. Al descomponer la señal total, la componente geostrófica (corrientes causadas por gradientes de densidad) de CMEMS GLOBCURRENT mostró un ciclo anual propio y una contribución estructurante importante al flujo total, especialmente en el segundo semestre (Ver Figura 10).

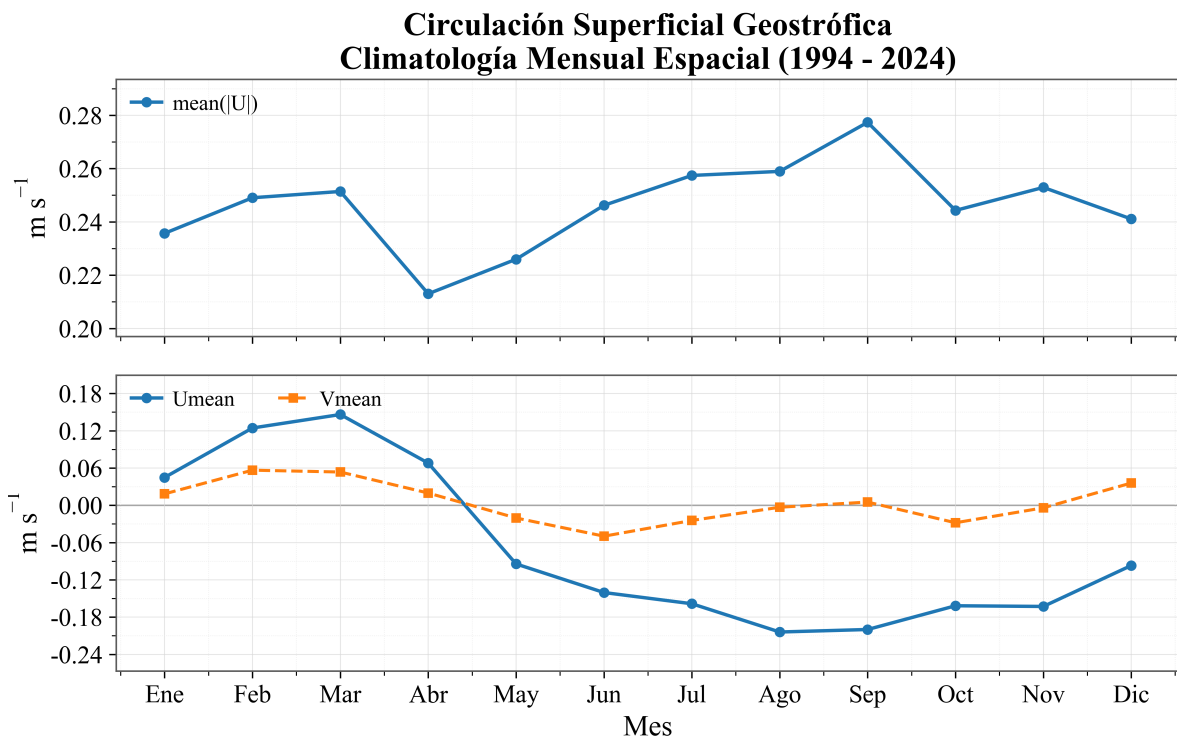


Figura 10. Ciclo anual de la componente geostrófica en la Bahía de Tumaco.
Fuente: CMEMS GLOBCURRENT (1994-2024). Panel superior la magnitud de la corriente, panel inferior las componentes zonal (Umean) y meridional (Vmean)

La componente geostrófica presenta una variabilidad estacional moderada a lo largo del año, con magnitudes relativamente estables pero con un fortalecimiento hacia el segundo semestre. La magnitud media de la velocidad superficial inicia en 0.236 m s⁻¹ en enero, aumenta ligeramente durante febrero 0.249 m s⁻¹ y marzo 0.251 m s⁻¹, y luego disminuye de forma notable en abril 0.213 m s⁻¹, que corresponde al valor más bajo del ciclo anual. A partir de mayo 0.226 m s⁻¹ la señal se recupera progresivamente, incrementándose durante junio 0.246 m s⁻¹ y julio 0.257 m s⁻¹,

hasta alcanzar su máximo anual en septiembre 0.277 m s^{-1} . Posteriormente, la magnitud disminuye ligeramente durante octubre 0.244 m s^{-1} y se mantiene en valores intermedios durante noviembre 0.253 m s^{-1} y diciembre 0.241 m s^{-1} .

En contraste, la componente Ekman (flujo causado por efecto del viento) estimada por CMEMS GLOBCURRENT presentó una estacionalidad aún más nítida y una direccionalidad notablemente coherente (Ver Figura 11).

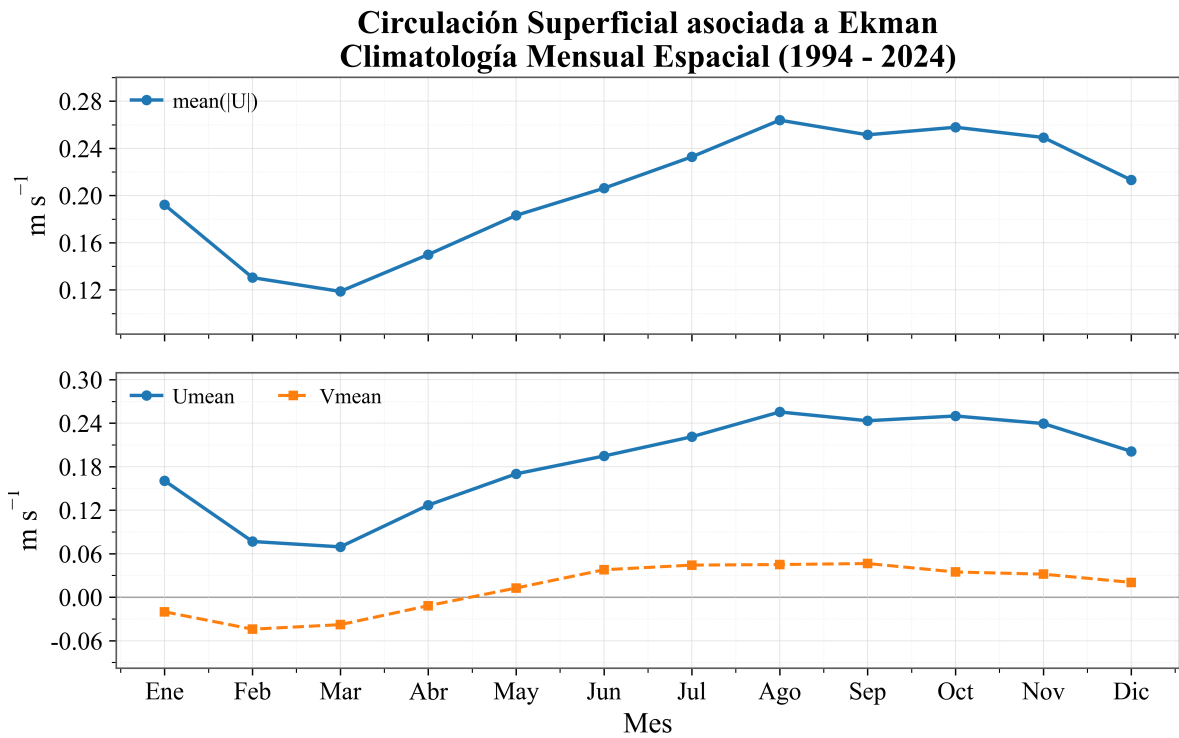


Figura 11. Ciclo anual de la componente Ekman en la Bahía de Tumaco.
Fuente: CMEMS GLOBCURRENT (1994-2024). Panel superior la magnitud de la corriente, panel inferior las componentes zonal (Umean) y meridional (Vmean)

La componente Ekman muestra una estacionalidad clara a lo largo del año, con una intensificación progresiva desde el primer trimestre hacia el segundo semestre. La magnitud media de la velocidad superficial es relativamente alta en enero 0.192 m s^{-1} , disminuye durante febrero 0.130 m s^{-1} y alcanza su valor mínimo en marzo 0.119 m s^{-1} . A partir de abril 0.150 m s^{-1} la señal comienza a fortalecerse de manera sostenida, aumentando durante mayo 0.183 m s^{-1} , junio 0.206 m s^{-1} y julio 0.233 m s^{-1} , hasta alcanzar su máximo anual en agosto 0.264 m s^{-1} . Durante el periodo septiembre - noviembre la magnitud se mantiene relativamente elevada $0.251 - 0.258 \text{ m s}^{-1}$ antes de disminuir ligeramente en diciembre 0.213 m s^{-1} .

Una vez caracterizado el estado no mareal, se evaluó la forma en que la componente mareal está representada dentro de CMEMS GLOBCURRENT (Ver Figura 12).

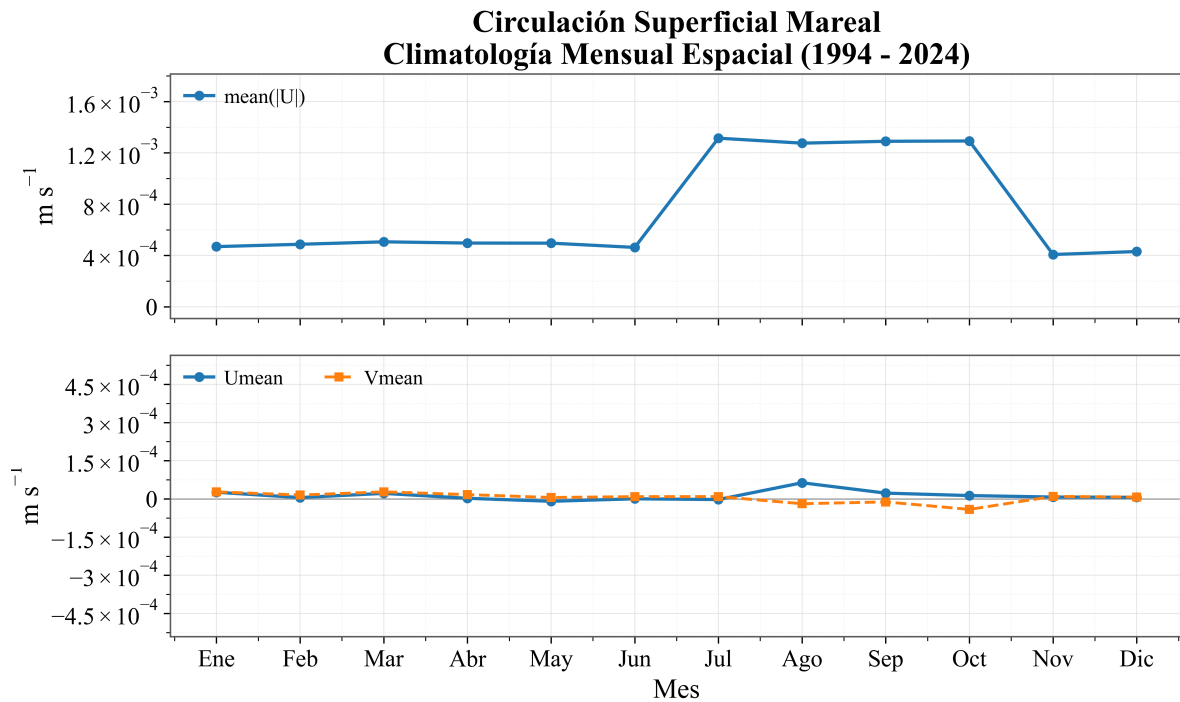


Figura 12. Ciclo anual de la componente mareal en la Bahía de Tumaco.
Fuente: CMEMS GLOBCURRENT (1994-2024). Panel superior la magnitud de la corriente,
panel inferior las componentes zonal (Umean) y meridional (Vmean)

A diferencia de las componentes geostrófica y de Ekman, la señal mareal asociada a la variabilidad estacional presentó magnitudes muy bajas en el dominio durante el periodo 1994 - 2024. Los valores de mean(|U|) oscilaron entre aproximadamente 4×10^{-4} y $1.6 \times 10^{-3} \text{ m s}^{-1}$, evidenciando una contribución reducida en la escala mensual.

A nivel estacional, se observa un incremento moderado entre julio y octubre. Sin embargo, incluso en estos meses, las magnitudes permanecen del orden de milímetros por segundo, lo que indica que la variabilidad estacional de la componente mareal es débil.

Los resultados muestran que la circulación superficial total no responde a un único mecanismo dominante, sino a la interacción entre componentes no mareales con distinta estacionalidad y grado de organización. La componente geostrófica aporta una estructura regional particularmente fuerte y coherente en el segundo semestre, mientras que la componente Ekman también se intensifica en ese periodo, pero con una direccionalidad aún más estable.

La componente mareal aparece fuertemente atenuada en esta base de datos de reanálisis. En términos prácticos, estos resultados muestran que esta fuente de información no representa adecuadamente las aceleraciones mareales relevantes dentro de esta bahía costera somera, donde la geometría y la batimetría local controlan el flujo.

4.2.4 Limitaciones de los productos de reanálisis en el entorno costero

En términos prácticos, esto implicó que el producto no resolvió con detalle los gradientes del flujo costa - océano ni los corredores internos de intercambio, y que la información disponible fue insuficiente para sustentar conclusiones robustas sobre el potencial mareomotriz dentro de la bahía a partir del modelo de reanálisis.

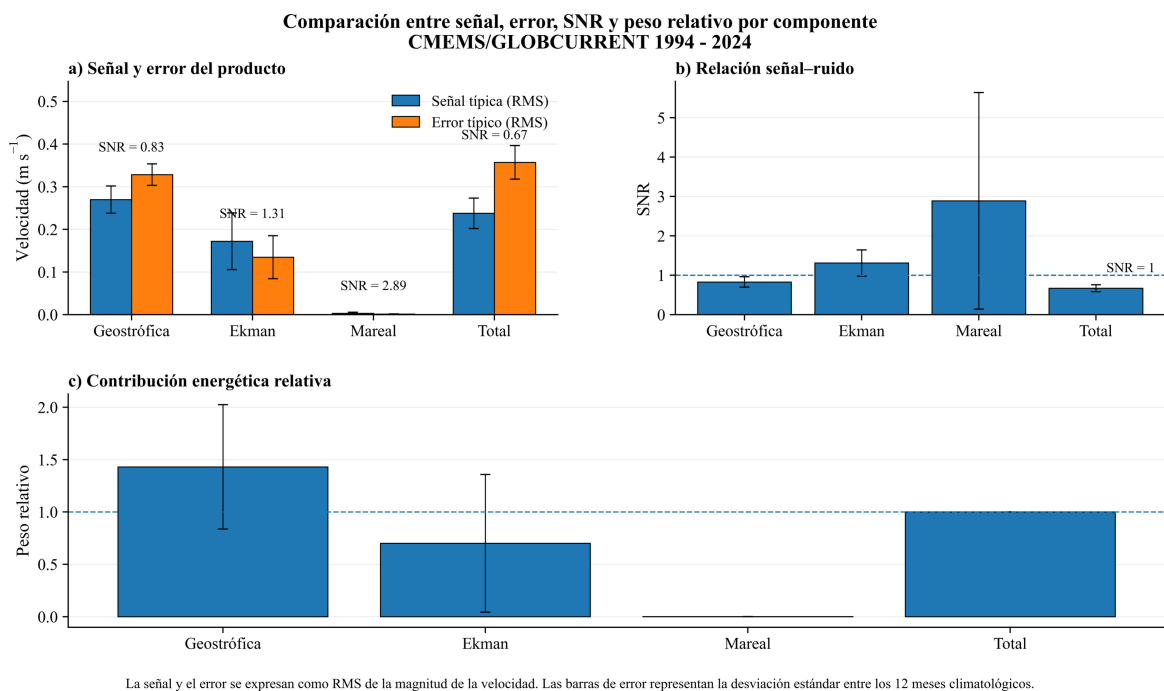


Figura 13. Señal típica (RMS), error típico (RMS), SNR y contribución energética relativa por componente. Periodo: 1994 - 2024

Para evaluar la confiabilidad del producto de reanálisis, se comparó la señal típica de cada componente de corriente estimada como el valor RMS de la velocidad promediado espacialmente con el error típico reportado por el propio producto (Ver Figura 13).

La componente geostrófica presenta una señal RMS de $0.27 m s^{-1}$ y un error asociado de $0.33 m s^{-1}$, lo que resulta en una relación señal - ruido $SNR = 0.83$. De manera análoga, la corriente total exhibe una señal de $0.25 m s^{-1}$ frente a un error de $0.34 m$

s^{-1} , con $SNR = 0.67$. En ambos casos el error supera a la señal, lo que indica que estas componentes deben interpretarse con cautela en zonas de alta variabilidad costera, aunque su utilidad para caracterizar el contexto regional de circulación superficial permanece válida.

La componente Ekman presenta una señal típica menor, cercana a 0.14 m s^{-1} , con un error aproximado de 0.11 m s^{-1} , lo que produce una relación señal - ruido $SNR = 1.31$. Este valor indica una separación más clara entre señal y error, por lo que la estimación de este componente resulta relativamente más robusta dentro del dominio analizado.

En contraste, la componente mareal presenta magnitudes extremadamente pequeñas dentro del producto, con valores de señal RMS del orden de 10^{-3} m s^{-1} y errores cercanos a $3 \times 10^{-4} \text{ m s}^{-1}$. Aunque esto produce una relación señal - ruido relativamente alta $SNR = 2.89$, la señal absoluta permanece en una escala milimétrica, lo que indica que la dinámica mareal aparece fuertemente atenuada en el reanálisis.

El análisis de la contribución energética relativa confirma este patrón. La mayor parte de la energía del flujo superficial se concentra en las componentes geostrófica y Ekman, mientras que la fracción asociada a la componente mareal es prácticamente nula a la escala del producto. En términos relativos, la componente geostrófica representa la mayor contribución energética con un valor de 1.4, seguida por la componente Ekman 0.7, mientras que la contribución mareal resulta despreciable.

Estos resultados establecen que el reanálisis CMEMS GlobCurrent describe la componente mareal fuertemente suavizada. Esto ocurre porque los reanálisis globales tienden a resolver procesos de escala regional, mientras que las aceleraciones mareales relevantes para el aprovechamiento energético dependen de gradientes locales asociados a batimetría, estrechamientos y canalización del flujo dentro de sistemas costeros.

4.2.5 Variabilidad espacial reciente del campo superficial (CMEMS GLORYS12, 2022 - 2026)

De manera complementaria al análisis anterior, se utilizó el producto CMEMS GLORYS/GLORYS12 Physics Analysis and Forecast para el periodo 2022 - 2026. La diferencia de periodos entre ambos productos responde a criterios metodológicos

específicos, GLOBCURRENT se seleccionó por su extensión temporal y disponibilidad de componentes desagregadas, mientras que GLORYS12 se empleó por su mayor resolución espacial, siendo este el periodo disponible al momento del análisis. Este producto permite examinar en detalle la estructura espacial y la variabilidad mensual del campo de corriente superficial en el entorno de la bahía de Tumaco. A diferencia del análisis previo, basado en promedios multianuales por componente, este producto permite visualizar la distribución espacial del flujo y su organización direccional dentro del dominio mediante mapas mensuales de velocidad superficial (Ver Figura 14).

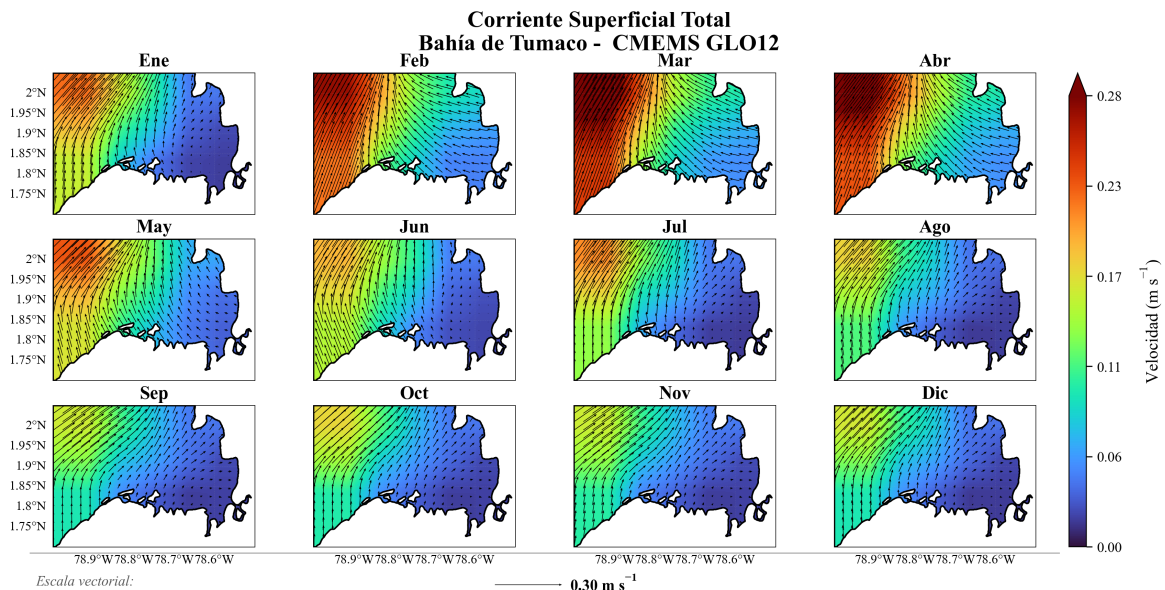


Figura 14. Análisis multianual mensual de la componente total de la corriente superficial.
Fuente: CMEMS GLORYS/GLORYS12 (2022 – 2026).

La figura 14 muestra que el campo de corriente superficial presenta un gradiente espacial persistente dentro del dominio, con velocidades significativamente mayores en el sector oceánico occidental y valores progresivamente menores hacia el interior de la bahía de Tumaco. A lo largo del año, las magnitudes más altas se concentran en el borde oceánico del dominio, donde las velocidades superficiales alcanzan aproximadamente $0.24 - 0.28 m s^{-1}$, particularmente durante enero, febrero, marzo y abril. En contraste, hacia el sector interno de la Bahía las velocidades se reducen de forma marcada, con valores generalmente inferiores a $0.10 - 0.12 m s^{-1}$, evidenciando un claro gradiente costa - océano del orden de $0.15 - 0.18 m s^{-1}$ dentro del dominio analizado. Este patrón espacial se mantiene relativamente estable durante el año, aunque con variaciones estacionales moderadas en la intensidad del flujo.

Durante el periodo intermedio (mayo - agosto) se observa una ligera reducción de las velocidades máximas en el sector oceánico, que descienden a valores cercanos a $0.20 - 0.24 \text{ m s}^{-1}$, mientras que en el interior de la Bahía las magnitudes permanecen generalmente por debajo de $0.08 - 0.10 \text{ m s}^{-1}$. En el último trimestre del año (septiembre - diciembre) se evidencia nuevamente un fortalecimiento moderado del gradiente regional, con velocidades que vuelven a situarse alrededor de $0.23 - 0.26 \text{ m s}^{-1}$ en el borde oceánico. En términos direccionales, los vectores muestran un patrón relativamente coherente a lo largo de todos los meses, con una orientación dominante hacia el noreste que se mantiene consistente entre paneles, lo que indica que el flujo superficial está controlado principalmente por procesos de circulación regional de mayor escala.

A pesar de la mayor resolución temporal del producto CMEMS GLORYS12, el campo de velocidad dentro del área de la Bahía continúa mostrando un patrón espacial suavizado, sin evidenciar aceleraciones locales intensas asociadas a canales, estrechamientos o variaciones batimétricas finas. Las velocidades dentro del sistema costero permanecen generalmente por debajo de 0.10 m s^{-1} . Esto indica que, aunque GLORYS12 mejora la cobertura espacial respecto a GLOBCURRENT, aún no resuelve los procesos hidrodinámicos de menor escala que controlan la aceleración local de corrientes mareales en ambientes costeros someros.

Debido a que los datos generados por los modelos de reanálisis no permiten evaluar con suficiente confiabilidad el potencial mareomotriz dentro de la bahía de Tumaco, se justifica la implementación de un modelo hidrodinámico de mayor resolución para representar adecuadamente la propagación de la marea y las aceleraciones locales del flujo.

Síntesis 4.2

El análisis armónico del nivel del mar en Tumaco muestra un régimen semidiurno dominado por M2 y S2, junto con una reconstrucción y predicción armónica consistente, lo que confirma que la marea es altamente predecible. El rango mareal de 4.06 m obtenido a partir del registro mareográfico, refuerza la hipótesis de corrientes mareales intensas y evidencia un sistema con una disponibilidad energética significativa.

A escala regional, los reanálisis describen un campo superficial estructurado por componentes no mareales y un gradiente oceánico - costero persistente. Sin embargo, la componente mareal en los reanálisis aparece fuertemente atenuada y los gradientes costeros

se suavizan, por lo que estos datos, producto de reanálisis globales no son adecuados para identificar hotspots mareales (sitios con intenso flujo de corrientes de marea) dentro de la Bahía. En consecuencia, la evaluación del recurso dentro de este sistema costero requiere la implementación de un modelo numérico local capaz de resolver la geometría, la batimetría y la propagación mareal a escala de bahía.

4.3 Modelamiento de la Marea – DELFT3D - FLOW

Este capítulo muestra la implementación de un modelo hidrodinámico en la bahía de Tumaco con Delft3D-FLOW para simular la propagación de la marea desde el océano hacia el interior del sistema y obtener campos coherentes de nivel del mar y corrientes mareales. El objetivo es doble ya que busca representar con mayor fidelidad la dinámica dentro de canales y estrechamientos que no resuelven los reanálisis globales, y a su vez producir series de velocidad aptas para estimar métricas energéticas comparables entre sitios.

4.3.1 Metodología específica

El modelo hidrodinámico de la bahía de Tumaco se implementó en Delft3D - FLOW. En el modelo, la marea ingresa por la frontera oceánica como una señal periódica impuesta mediante constantes armónicas extraídas del atlas global TPXO (Egbert & Erofeeva, 2002). Esta señal genera pendientes espaciales de la superficie libre (ζ), que producen gradientes de presión que impulsan el flujo horizontal. Al entrar en una bahía somera y canalizada, la geometría y la batimetría redistribuyen el intercambio y lo concentran en corredores estrechos, mientras que la fricción de fondo disipa energía y ajusta progresivamente la amplitud y la fase hacia el interior. (Deltares Systems, 2026; Gerritsen et al., 2008).

Formulación física y ecuaciones resueltas

Delft3D-FLOW resuelve las ecuaciones de Navier - Stokes bajo la aproximación hidrostática y, en este caso, bajo la hipótesis de aguas someras. Delft3D - FLOW puede representar ambos efectos cuando se utiliza una formulación con estructura vertical (Gerritsen et al., 2008).

La ecuación de conservación de masa, integrada en profundidad, se expresa como:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = 0$$

donde $h = H + \zeta$ es la profundidad total, H la profundidad, es decir, la batimetría positiva hacia abajo, ζ la elevación de la superficie libre, y u, v las velocidades horizontales (zonales (E-W) y meridionales (N-S)) promediadas en profundidad. Esta ecuación garantiza la conservación local y global de volumen. En su forma promediada en profundidad, la ecuación de momento horizontal para la componente u se expresa como:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - fv = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \nu_h \nabla_h^2 u + \frac{\tau_{wx} - \tau_{bx}}{\rho h}$$

donde u, v, w son las componentes de velocidad, f el parámetro de Coriolis, ρ_0 la densidad de referencia, ν_h la viscosidad horizontal, $-g\partial\zeta/\partial x$ el gradiente de presión hidrostática asociada a la pendiente de la superficie libre, τ_{wx} el esfuerzo cortante superficial inducido por el viento y τ_{bx} el esfuerzo cortante de fondo, que representa la resistencia que ejerce el lecho marino sobre el flujo en dirección opuesta al movimiento. En esta tesis no se incluyó forzamiento atmosférico, por lo que el balance de fuerzas se centra en el gradiente de presión mareal, la advección y la fricción de fondo. Delft3D-FLOW utiliza un esquema implícito alternante (ADI) que favorece estabilidad numérica sin sacrificar conservación (Deltares Systems, 2026). La rugosidad de fondo se representó mediante el coeficiente de Manning n , que en Delft3D-FLOW se ingresa directamente. El valor adoptado y su justificación en función de las condiciones del fondo de la Bahía se detallan en la Sección 4.3.2. (Montaje del modelo hidrodinámico). El modelo lo convierte internamente a un coeficiente de fricción tipo Chézy usando $C = H^{1/6}/n$, donde H es la profundidad. El esfuerzo cortante de fondo τ_{bx} se calcula a partir de este coeficiente de fricción. En términos metodológicos, esto implica que n controla cuánta energía se disipa por fricción, valores mayores aumentan la resistencia del fondo y tienden a reducir las velocidades y a modificar el desfase de la onda mareal hacia el interior, valores menores hacen lo contrario (Deltares Systems, 2026; Gerritsen et al., 2008).

Montaje del modelo hidrodinámico

El modelo hidrodinámico se implementó en modo bidimensional barotrópico (movimiento del flujo mareal es uniforme; en toda la columna de agua oscila con la misma dirección desde la superficie hasta el fondo), con el objetivo de reproducir la propagación de la marea desde el océano hacia el interior de la Bahía y sus canales, y obtener campos de nivel del mar y corrientes dinámicamente coherentes para la

estimación del recurso mareomotriz. Bajo esta configuración, el modelo resuelve las ecuaciones de flujo de superficie libre bajo aproximación hidrostática, en una formulación promediada en la columna de agua, lo que permite representar la respuesta integrada del sistema frente al forzamiento mareal.

La marea, impuesta en las fronteras abiertas, genera oscilaciones periódicas de la superficie libre, estas oscilaciones producen pendientes espaciales que, a su vez, inducen gradientes de presión horizontales responsables del movimiento del agua. A medida que la señal mareal entra en una bahía somera y altamente canalizada como Tumaco, la geometría del dominio y la distribución batimétrica (Ver Sección 4.1.3) modulan la propagación de la onda, concentrando el flujo en corredores preferenciales y generando zonas de aceleración local que resultan fundamentales para la identificación del potencial energético (Deltares Systems, 2026).

El montaje del modelo se estructuró de manera secuencial, garantizando la coherencia entre la configuración numérica y la representación física del sistema. En primer lugar, se definió el dominio de cálculo, abarcando tanto la bahía de Tumaco como una franja oceánica adyacente que permite imponer condiciones de frontera sin distorsionar la dinámica interna. Sobre este dominio se construyeron tres mallas estructuradas de distinta resolución espacial: coarse (0.025° , aprox. 2.75 km), medium (0.0125° , aprox. 1.37 km) y fine (0.00833° , aprox. 0.92 km), lo que permite evaluar la sensibilidad del modelo a la discretización del dominio. Posteriormente, se incorporó la batimetría a partir del producto global GEBCO, la cual fue interpolada sobre cada una de las mallas, manteniendo coherencia con la línea de costa y la máscara continental (Deltares Systems, 2026; GEBCO & The Nippon Foundation, 2024).

El forzamiento del modelo se definió exclusivamente mediante la marea astronómica en las fronteras abiertas, implementada a partir de constantes armónicas provenientes del Atlas global TPXO, descrito en la Sección 3.2.3. En Delft3D - FLOW, estas constantes permiten reconstruir la señal de nivel del mar como una superposición de constituyentes sinusoidales. La señal impuesta en la frontera genera una onda que se propaga hacia el interior de la Bahía, donde es modificada por efectos de confinamiento geométrico, variaciones de profundidad y una fricción de fondo homogénea representada mediante un coeficiente de Manning uniforme (Egbert & Erofeeva, 2002).

La parametrización de la fricción de fondo se realizó mediante un coeficiente de Manning, elección que se fundamenta en la naturaleza sedimentaria de la bahía de Tumaco, que corresponde a un ambiente costero - estuarino con amplia presencia de manglares, planicies intermareales y fondos blandos. La literatura técnica y ambiental disponible para Tumaco y la costa baja nariñense describe sedimentos superficiales que van desde arenas finas muy finas hasta limos arenosos, lodos y mezclas de limos y arcillas, asociados a un sustrato de baja complejidad topográfica (INVEVAR, 2006; Prada & Hernandez, 2020).

En este contexto, el valor adoptado de $n = 0.020$ se asume como un parámetro, consistente con un fondo predominantemente sedimentario y con la necesidad de mantener una parametrización homogénea en ausencia de mediciones directas de rugosidad de fondo en la Bahía (Bagatur & Hamidi, 2014). Los experimentos de sensibilidad realizados evaluaron el efecto de la resolución de malla y del forzamiento mareal (TPX07.2 vs TPX08), no la variación espacial del coeficiente de Manning, dado que no se dispone de mediciones de rugosidad distribuida en el sistema. Finalmente, el modelo se configuró para simular el año 2016, con una densidad del agua de 1022 kg m^{-3} y sin inclusión de forzamientos atmosféricos ni descargas fluviales. El paso de tiempo se estableció en 1 minuto, intervalo en el cual el modelo resuelve las ecuaciones hidrodinámicas. Este valor corresponde al recomendado por el propio software, determinado a partir de los parámetros de configuración del modelo mediante la herramienta de estimación automática del paso de tiempo disponible en Delft3D - FLOW. Con el fin de optimizar el almacenamiento y el análisis posterior de resultados, las variables de salida fueron registradas con una resolución temporal horaria.

Dominio, mallas e insumos

El dominio se seleccionó para incluir la Bahía y los principales corredores de intercambio, además de una franja oceánica externa suficiente para imponer condiciones abiertas (Ver Sección 4.3.2). Para evaluar de forma objetiva la sensibilidad a la discretización espacial, se plantearon tres mallas alternativas, Grid - C (coarse), Grid - M (mid) y Grid - F (fine), que se compararon bajo el mismo conjunto de forzantes y parámetros.

La batimetría base del modelo proviene de la GEBCO Grid, y se interpoló desde la grilla original hacia la malla numérica del modelo conservando la máscara tierra -

mar coherente con la línea de costa del dominio (Deltares Systems, 2026; GEBCO & The Nippon Foundation, 2024). El forzamiento mareal en fronteras abiertas se definió mediante constantes armónicas del Atlas TPXO para los principales constituyentes mareales. En esta tesis se evaluaron dos configuraciones, TPXO 7.2 combinado con GEBCO 2019 y TPXO 8 combinado con GEBCO 2023. TPXO 7.2 es una versión consolidada ampliamente utilizada en modelación mareal costera, mientras que TPXO 8 es una versión más reciente que incorpora datos adicionales de satélites y una representación mejorada del campo mareal global (Egbert & Erofeeva, 2002, 2010). Se probaron todos los forzantes mareales y todas las batimetrías globales disponibles en el modelo, con el fin de evaluar sistemáticamente la sensibilidad del modelo ante diferentes insumos y determinar cuál combinación representaba con mayor detalle los comportamientos hidrocinéticos de la Bahía. Esta estrategia, junto con la variación de resolución espacial, constituye el diseño experimental de la tesis.

Periodo Simulado, diseño experimental y validación

El año 2016 se seleccionó como periodo de simulación por la disponibilidad de registros del mareógrafo de Tumaco para ese mismo intervalo (Ver Sección 4.2.2). Esta decisión permite contrastar posteriormente el nivel del mar modelado con observaciones independientes, evaluando amplitud, fase y posibles sesgos sistemáticos. Simular un año completo garantiza la captura de la modulación quincenal de mareas vivas y muertas y la interacción entre constituyentes principales como M2, S2, K1 y O1 (Pugh & Woodworth, 2014).

La validación del modelo se realizó comparando los niveles del mar simulados con los medidos por el mareógrafo Tumaco (UHSLC ID 303). Para cada simulación se extrajo la serie temporal del nodo de la malla más cercano a la ubicación del mareógrafo y se evaluó el desempeño del modelo mediante el sesgo sistemático (BIAS), que representa la diferencia promedio entre los valores simulados y observados e indica si el modelo sobreestima o subestima sistemáticamente la señal, el error cuadrático medio (RMSE) y el error absoluto medio (MAE), los cuales cuantifican la magnitud promedio de las diferencias entre los niveles del mar simulados y observados, el coeficiente de correlación de Pearson, que evalúa la capacidad del modelo para reproducir la variabilidad temporal de la señal mareal, y el skill score de Willmott, que resume el grado de concordancia global entre las

simulaciones y las observaciones, calculados sobre las series completas de nivel del mar, permitiendo evaluar simultáneamente la dinámica temporal y la magnitud de las diferencias (Deltares Systems, 2026; D. Pugh & Woodworth, 2014; Wilks, 2011; Willmott, 1981).

Con base en estas métricas se seleccionó la configuración TPXO8 + GEBCO2023 con malla Fine como experimento base para los análisis posteriores. A partir de esa configuración se analizaron los campos espaciales de velocidad para identificar zonas de mayor aceleración mareal dentro de la Bahía y seleccionar puntos representativos del sistema. Para dichos puntos se extrajeron las series temporales completas de velocidad, que constituyen la base de la estimación del potencial energético mareomotriz en el capítulo siguiente.

4.3.2 Análisis comparativo de los experimentos numéricos

Con el fin de evaluar la sensibilidad del campo de corrientes frente a la resolución espacial de la malla y la combinación de forzamiento mareal y batimetría, se ejecutaron seis simulaciones anuales para 2016 manteniendo fijos el dominio y parámetros físicos. Se variaron únicamente la resolución de la grilla, la combinación de forzamiento mareal y la batimetría global (Ver Tabla 5) (Deltares Systems, 2026).

Exp	Grilla	M × N	Δx (°)	Δy (°)	Configuración de borde	Batimetría	ρ (kg/m ³)	Manning (n)
E1	Coarse	20 × 20	0.025	0.025	TPXO 7.2	GEBCO 2019	1022	0.02
E2	Coarse	20 × 20	0.025	0.025	TPXO 8	GEBCO 2023	1022	0.02
E3	Medium	40 × 40	0.0125	0.0125	TPXO 7.2	GEBCO 2019	1022	0.02
E4	Medium	40 × 40	0.0125	0.0125	TPXO 8	GEBCO 2023	1022	0.02
E5	Fine	60 × 60	0.00833	0.00833	TPXO 7.2	GEBCO 2019	1022	0.02
E6	Fine	60 × 60	0.00833	0.00833	TPXO 8	GEBCO 2023	1022	0.02

Tabla 5. Configuración técnica de los experimentos hidrodinámicos (Delft3D - FLOW, año 2016, Δt (min) = 1.0)

La Tabla 5 resume la configuración técnica de los experimentos. En ella, la grilla indica el nivel de resolución espacial empleado (coarse, medium y fine), mientras que M × N representa el número de celdas en cada dirección de la malla. Los parámetros Δx y Δy corresponden al tamaño angular de cada celda, el cual controla el nivel de detalle con el que se resuelven la geometría costera y los gradientes del flujo.

Por su parte, la configuración de borde define el conjunto de constantes armónicas utilizadas para forzar la marea en las fronteras abiertas del modelo (TPXO 7.2 y TPXO 8), mientras que la batimetría corresponde al producto global empleado para representar la profundidad del dominio.

Finalmente, la densidad del agua (ρ) y el coeficiente de fricción de fondo Manning (n) se mantuvieron constantes en todas las simulaciones ($\rho = 1022 \text{ kg/m}^3$ y $n = 0.020$), garantizando que las diferencias observadas en los resultados respondan exclusivamente a la resolución espacial y a los datos de entrada.

Bajo esta configuración, el análisis de los campos de velocidad muestra que en la grilla coarse, los experimentos E1 y E2 produjeron patrones espaciales de velocidad altamente consistentes, con magnitudes máximas aproximadas entre 0.8 y 0.85 m s^{-1} . Las diferencias entre ambos experimentos fueron menores y localizadas. En esta resolución, el patrón está dominado por la geometría general del dominio y por el forzamiento mareal de gran escala, y la corrida resulta útil como verificación de estabilidad numérica y del comportamiento general del sistema.

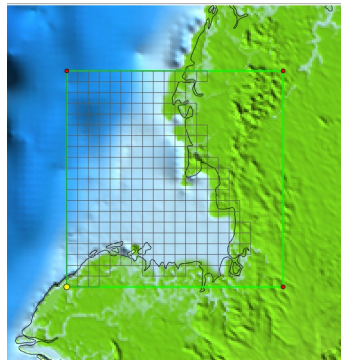


Figura 15. Dominio analizado para el modelo hidrodinámico y malla estructurada Grid – C.
Fuente: Dashboard Delft

Para interpretar la escala de esta discretización, es importante resaltar que, un grado equivale aproximadamente a 111 km . Bajo esta conversión, el tamaño de celda de la grilla coarse ($\Delta x = \Delta y = 0.025^\circ$) corresponde a aproximadamente $2.78 \text{ km} \times 2.78 \text{ km}$. Esto implica que cada celda integra procesos que ocurren dentro de varios kilómetros, lo que suaviza los gradientes espaciales y limita la representación de aceleraciones locales del flujo.

Al refinar la malla a medium, las diferencias entre configuraciones se hicieron más evidentes. El experimento E3 mostró un patrón más canalizado en el corredor principal, con máximos cercanos a 1.0 m s^{-1} . En contraste, el experimento E4 produjo un campo más conservador, con máximos alrededor de 0.60 m s^{-1} y una distribución

espacial más difusa. Este comportamiento indica que el refinamiento espacial comienza a resolver con mayor precisión los gradientes batimétricos y la geometría de los canales internos, haciendo visible una sensibilidad que en la grilla coarse no era claramente distinguible. En consecuencia, la magnitud estimada del recurso cinético depende no solo de la resolución, sino también de la combinación específica de modelo mareal global y batimetría empleada.

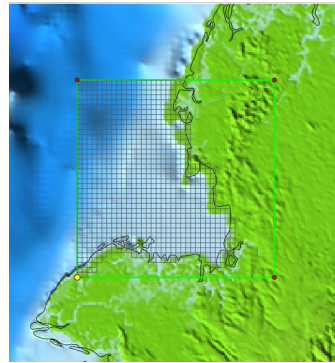


Figura 16. Dominio analizado para el modelo hidrodinámico y malla estructurada Grid – M.
Fuente: Dashboard Delft

En términos físicos, la grilla medium ($\Delta x = \Delta y = 0.0125^\circ$) equivale aproximadamente a $1.39 \text{ km} \times 1.39 \text{ km}$ por celda, lo que representa una mejora significativa en la capacidad del modelo para capturar la geometría costera y los estrechamientos del sistema. Esta mayor resolución permite intensificar los gradientes de presión asociados a la propagación de la marea, favoreciendo la aparición de flujos más canalizados y velocidades máximas más representativas del sistema real.

En la grilla fine, el patrón espacial se mantuvo consistente con los niveles anteriores, lo que refuerza la robustez geométrica del sistema. En el experimento E5, las magnitudes máximas se estabilizaron en el rango $0.85 - 1.4 \text{ m s}^{-1}$, mostrando mayor detalle espacial sin evidenciar inestabilidades numéricas. Para el experimento E6, las velocidades máximas se mantuvieron alrededor de 1.2 m s^{-1} .

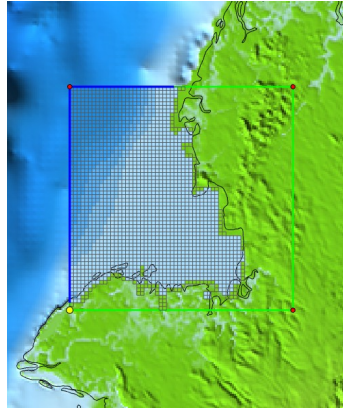


Figura 17. Dominio analizado para el modelo hidrodinámico y malla estructurada Grid – F.
Fuente: Dashboard Delft

A esta escala, la resolución de la malla ($\Delta x = \Delta y = 0.00833^\circ$) corresponde aproximadamente a $0.92 \text{ km} \times 0.92 \text{ km}$ por celda, lo que permite representar variaciones espaciales cercanas al kilómetro. Esto se traduce en una mejor definición de zonas de aceleración del flujo, especialmente en sectores donde la geometría impone limitaciones al movimiento de la marea.

El refinamiento de la malla desde coarse hasta fine produjo incrementos progresivos en las velocidades máximas, comportamiento esperado en modelos hidrodinámicos costeros donde una mayor resolución permite resolver con mayor detalle los gradientes locales asociados a la geometría del sistema. No se descarta que mallas de resolución superior pudieran producir incrementos adicionales en las magnitudes. Sin embargo, la localización espacial de las zonas de mayor aceleración del flujo se mantuvo consistente entre los tres niveles de resolución evaluados, lo que indica que la identificación del recurso potencial es físicamente robusta e independiente de la discretización empleada, confirmando que las zonas de mayor intensidad de flujo no dependen solamente de la resolución de la malla, sino que corresponden a una característica física del sistema, controlada por la interacción entre la geometría de la Bahía y el forzamiento mareal en las fronteras abiertas.

4.3.3 Validación del modelo hidrodinámico

Con el fin de establecer la confiabilidad del modelo hidrodinámico utilizado en el presente proyecto, se realizó una validación mediante la comparación entre los niveles del mar simulados y los registros observados del mareógrafo de Tumaco. Este tipo de validación permite evaluar si el modelo reproduce adecuadamente la amplitud, la fase y la variabilidad temporal de la señal mareal.

Experimento	Bias (m)	MAE (m)	RMSE (m)	Coefficiente de correlación de Pearson	Skill score de Willmott
E1	-0.026	0.144	0.187	0.980	0.990
E2	-0.024	0.140	0.180	0.981	0.991
E3	-0.022	0.137	0.175	0.982	0.991
E4	-0.756	0.761	0.867	0.397	0.370
E5	-0.812	0.815	0.932	-	0.000
E6	-0.041	0.163	0.215	0.973	0.986

Tabla 6. Métricas de validación del nivel del mar para todas las configuraciones del modelo Delft3D-FLOW, utilizando el registro del mareógrafo de Tumaco correspondiente al año 2016.

Los resultados de la validación muestran comportamientos contrastantes entre los distintos experimentos del modelo, evidenciando la influencia conjunta del modelo mareal global utilizado, la batimetría empleada y la resolución espacial de la malla numérica. En términos generales, los experimentos E1, E2 y E3 presentan los mejores indicadores estadísticos, con coeficientes de correlación cercanos a 0.98 y valores de RMSE inferiores a 0.19 m. Estos resultados indican una correspondencia muy alta entre la señal mareal simulada y la observada en el mareógrafo.

Dentro de este grupo se observa además un comportamiento consistente con el refinamiento progresivo de la malla. A medida que la resolución espacial aumenta desde el experimento E1 hasta el experimento E3, el RMSE disminuye gradualmente de 0.187 m a 0.175 m, mientras que la correlación aumenta ligeramente de 0.980 a 0.982. Este patrón sugiere que el incremento en la resolución espacial permite representar con mayor detalle la propagación de la onda mareal dentro de la Bahía, aunque las diferencias entre resoluciones resultan relativamente pequeñas. Esto indica que incluso las mallas de resolución intermedia, como el experimento E3, logran capturar de forma adecuada la dinámica mareal dominante del sistema.

En contraste, los experimentos E4 y E5 muestran una mayor sensibilidad a la combinación de forzamiento mareal y batimetría. En el experimento E4, el RMSE alcanza 0.867 m y la correlación se reduce a 0.397, lo que indica una capacidad limitada del modelo para reproducir la señal observada bajo esa configuración espacial. Un caso peculiar es el experimento E5, donde el RMSE aumenta hasta 0.932 m y el MAE alcanza 0.815 m. En esta simulación el modelo genera una señal prácticamente constante en el punto de comparación, lo que impide calcular de manera confiable el coeficiente de correlación. Desde el punto de vista estadístico, este comportamiento ocurre cuando una de las series presenta una varianza cercana

a cero, lo que hace que el cálculo de la correlación no sea numéricamente estable. En términos físicos, este resultado sugiere que bajo esta combinación específica de forzamiento mareal y resolución espacial el modelo no logra representar adecuadamente la señal mareal observada en el mareógrafo.

Finalmente, el experimento E6 mantiene un desempeño estadístico elevado, con una correlación de 0.973 y un skill score de 0.986, confirmando que la configuración TPXO8 + GEBCO2023 con malla Fine logra representar adecuadamente la dinámica mareal del sistema a pesar de no alcanzar los valores más bajos de RMSE.

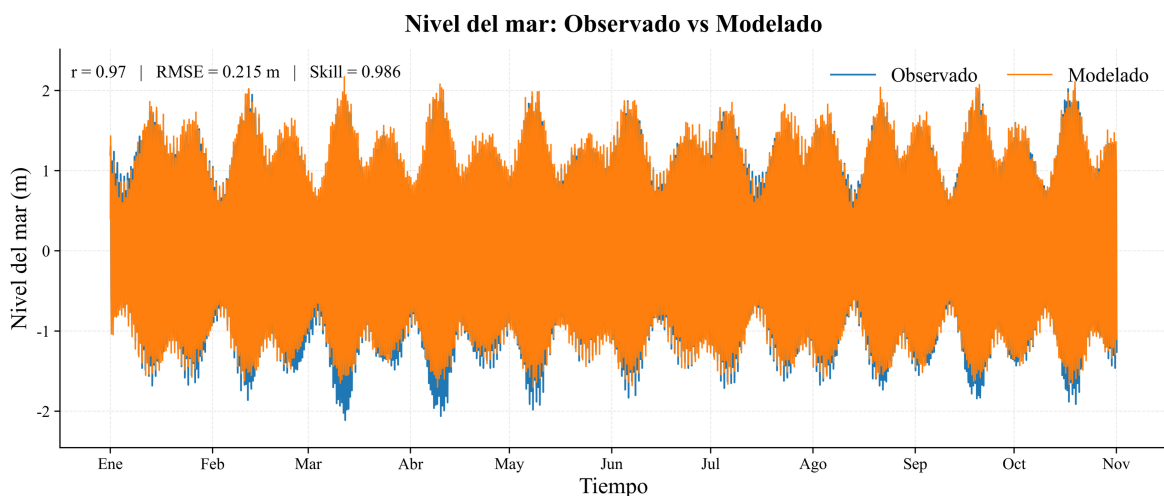


Figura 18. Serie Temporal de anomalías del nivel del mar modelada (TPXO8 + GEBCO2023 - Grid Fine) vs. Observaciones mareógrafo de Tumaco
Fuente de Datos: Mareógrafo (UHSLC ID 303).

La Figura 18 muestra la comparación entre la serie temporal observada y la simulada para la configuración seleccionada. En esta figura se observa que el modelo reproduce de manera consistente la periodicidad de la señal mareal a lo largo del periodo simulado. Los ciclos de marea alta y baja presentan una correspondencia clara entre ambas series, y el modelo logra capturar la modulación quincenal característica de las mareas vivas y muertas. Este comportamiento indica que el modelo reproduce adecuadamente la propagación de la onda mareal desde el océano hacia el interior de la Bahía. La buena correspondencia entre ambas series indica que el modelo reproduce correctamente tanto la fase como la amplitud relativa de las oscilaciones mareales.

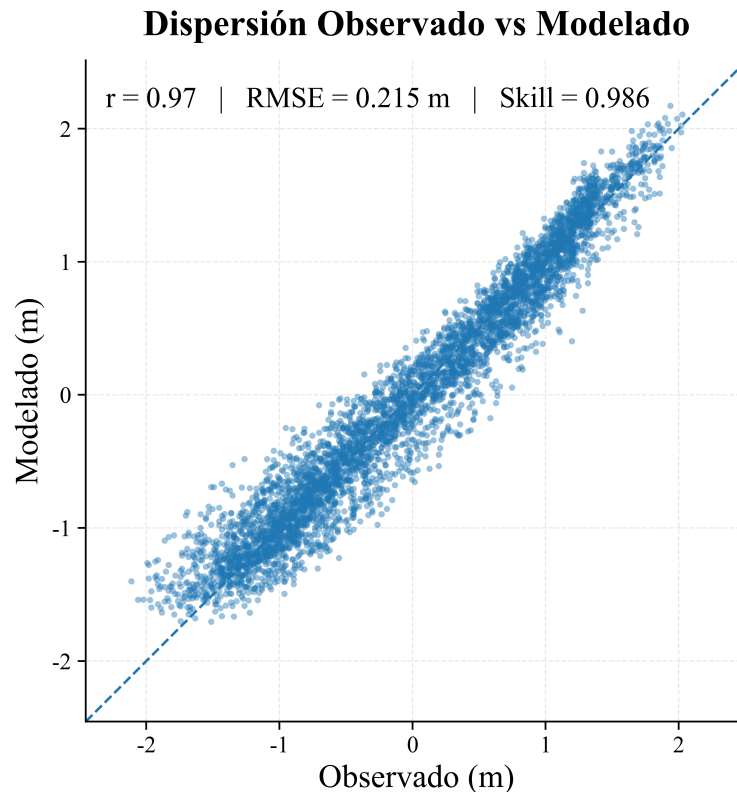


Figura 19. Diagrama de dispersión entre niveles del mar observados y simulados para la configuración TPX08 + GEBCO2023 – Grid Fine.
Fuente de Datos: Mareógrafo de Tumaco (UHSLC ID 303).

De manera complementaria, la figura 19 presenta el diagrama de dispersión entre los valores observados y simulados. La distribución de los puntos alrededor de la diagonal uno a uno indica una buena correspondencia entre ambas series. Aunque se observa cierta dispersión asociada a diferencias locales entre ambas señales, la mayor parte de los valores se concentra en torno a la relación lineal esperada, lo que confirma la capacidad del modelo para reproducir la dinámica temporal del nivel del mar en la estación de Tumaco. Este comportamiento es consistente con los valores elevados de correlación $r = 0.973$ y skill score 0.986 obtenidos para esta configuración del modelo.

A partir de este análisis se observa que las configuraciones con TPX07.2 + GEBCO2019 presentan el mejor ajuste estadístico global. Sin embargo, la configuración TPX08 + GEBCO2023 con grilla Fine mantiene valores elevados de correlación y skill, lo que indica que el modelo reproduce de manera consistente la amplitud relativa y la fase de la señal mareal observada en Tumaco.

Considerando estos resultados y con el objetivo de utilizar los insumos oceanográficos más actualizados disponibles, se seleccionó la configuración TPXO8 + GEBCO2023 con grilla Fine como experimento base para los análisis posteriores. Es importante señalar que la validación presentada se realizó exclusivamente con datos de nivel del mar del mareógrafo de Tumaco, que constituye la única fuente de observaciones continuas disponible para el área de estudio. La validación de los campos de velocidad de corriente mediante mediciones in situ, como perfiles ADCP, no fue posible dentro del alcance de esta investigación. Esta limitación es reconocida y se incorpora como una recomendación prioritaria para estudios futuros (Ver Sección 6.2).

4.3.4 Resultados Hidrodinámicos: Corrientes mareales

El campo de corrientes (Ver Figura 20) mostró que la Bahía no responde de manera homogénea al forzamiento mareal. Por el contrario, la velocidad se organiza en corredores preferenciales de flujo, dentro de los cuales la marea se canaliza y alcanza mayores magnitudes, mientras que en sectores adyacentes predominan corrientes más débiles. Esto es coherente con el comportamiento esperado en sistemas someros y canalizados, la geometría y la batimetría concentran el intercambio y generan zonas persistentes de aceleración (Barbarelli & Nastasi, 2021).

Bajo ese criterio, y a partir de la inspección del campo anual de corrientes, se identificaron cuatro puntos representativos dentro del sistema. El punto P1 corresponde al hotspot principal, localizado en el corredor central de mayor aceleración, P2 representa una zona secundaria hacia el sector suroccidental del núcleo principal, P3 corresponde a un corredor lateral hacia el sector oriental de la Bahía y P4 ubicado en el margen oriental del dominio, alejado de los corredores de mayor aceleración mareal.

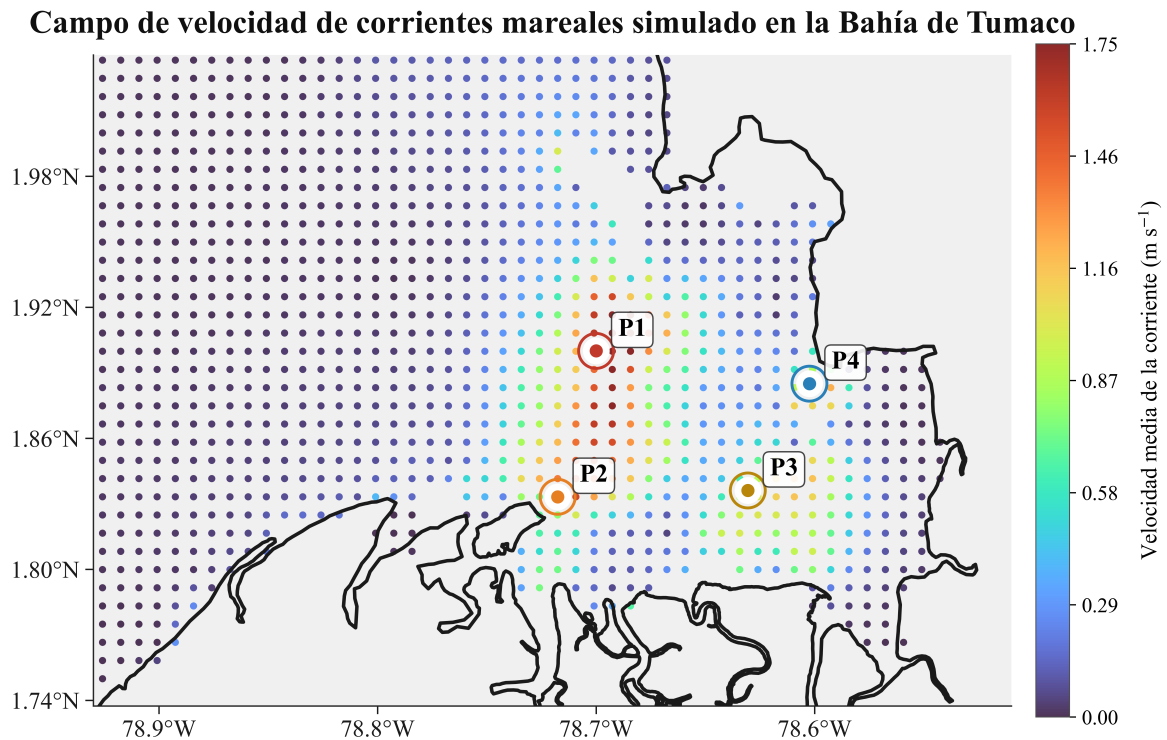


Figura 20. Campo de velocidad media de corriente y localización de puntos representativos de análisis en la Bahía de Tumaco.
Fuente: Modelación DELFT - FLOW 3D

En la figura 20 se evidencia un campo de velocidad media de corriente obtenido con el modelo hidrodinámico Delft3D - FLOW para la configuración TPX08 + GEBCO2023 - Grid Fine (E6). Los colores representan la magnitud de la velocidad de la corriente, obtenida como el valor promedio en la columna de agua, de igual forma, la figura muestra con claridad que el patrón de corrientes en la bahía de Tumaco está estructurado alrededor de un núcleo central de alta velocidad, en el que se localiza el punto P1. En esta zona, las magnitudes alcanzan aproximadamente $1.6 - 1.75 m s^{-1}$, de acuerdo con la escala de colores. Esto indica que no se trata de una aceleración puntual, sino de un corredor mareal estable, donde la geometría local concentra el intercambio de agua entre sectores de la Bahía (Barbarelli & Nastasi, 2021; Bryden et al., 2007).

Alrededor de ese hotspot principal se distinguen otras zonas con potencial de corriente mareal. La primera corresponde a P2, situado al suroccidente del núcleo principal. En este sector las velocidades son menores que en P1, pero siguen siendo elevadas en relación con el resto del dominio, con valores del orden de $0.8 - 1.4 m s^{-1}$. En términos físicos, P2 representa una región donde la marea todavía conserva capacidad de aceleración, pero donde el flujo comienza a redistribuirse espacialmente.

La segunda zona secundaria corresponde a P3, localizada hacia el sector oriental. Allí las velocidades son más moderadas, aproximadamente entre 0.6 y 0.9 m s⁻¹. Este punto resulta importante porque evidencia que la aceleración mareal no se limita a un único núcleo, sino que se prolonga a través de un corredor lateral que también participa en la circulación interna de la Bahía. Aunque P3 no concentra las máximas magnitudes, su comportamiento es hidrodinámicamente relevante como parte de la circulación mareal interna de la Bahía.

Adicionalmente, el punto P4, ubicado hacia el sector oriental externo del dominio, presenta velocidades aún menores, generalmente entre 0.4 y 0.7 m s⁻¹, lo que indica una región donde el flujo pierde intensidad a medida que se aleja del corredor principal. Aunque este sector muestra una aceleración más débil, su comportamiento confirma la extensión espacial del sistema de circulación mareal.

Con el fin de caracterizar el comportamiento dinámico de las corrientes en estos cuatro corredores, se extrajeron series temporales completas de velocidad, las cuales muestran una señal claramente dominada por la dinámica mareal, caracterizada por ciclos semidiurnos asociados al forzamiento de marea impuesto en la frontera oceánica del modelo. A lo largo del año se observa una alternancia regular de máximos y mínimos de velocidad que reflejan las fases de pleamar y bajamar del sistema.

Caracterización temporal y estadística de la velocidad de corriente en P1

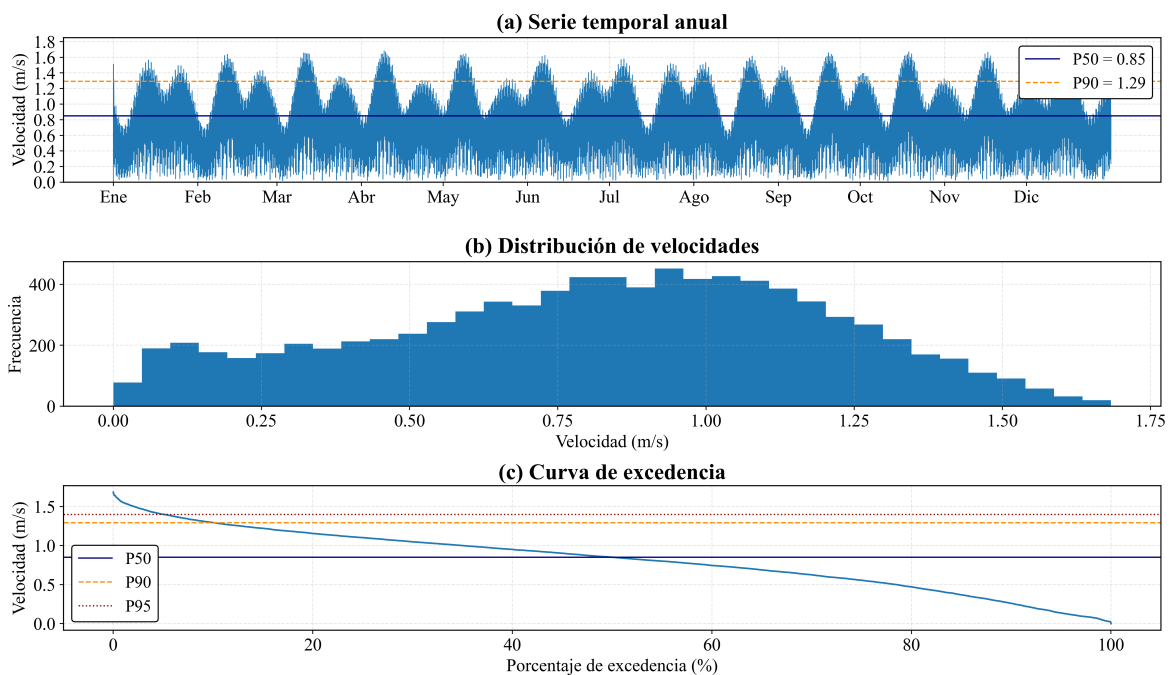


Figura 21. Caracterización temporal y estadística de las corrientes mareales en P1. Fuente: Modelación DELFT - FLOW 3D

La figura 21 presenta la caracterización temporal y estadística de las corrientes mareales en el punto P1. La serie temporal anual (Fig. 21a) evidencia una señal claramente dominada por la dinámica mareal, con ciclos semidiurnos característicos del forzamiento astronómico. A lo largo del año se observa una alternancia regular de máximos y mínimos de velocidad, modulada por el ciclo de mareas vivas y muertas, lo que genera periodos de mayor y menor aceleración del flujo.

En este punto se registran las mayores magnitudes de velocidad dentro del dominio modelado, con valores máximos cercanos a 1.70 m s^{-1} . La mediana de la serie alcanza aproximadamente 0.85 m s^{-1} , mientras que los percentiles superiores indican que el $P90 = 1.29 \text{ m s}^{-1}$ y el $P95 = 1.40 \text{ m s}^{-1}$. Esto significa que durante el 10 % del tiempo las corrientes superan 1.29 m s^{-1} , y durante el 5 % del tiempo superan 1.40 m s^{-1} , evidenciando condiciones de flujo altamente energéticas dentro del sistema.

El histograma de velocidades (Fig. 21b) muestra una distribución amplia que se extiende desde valores cercanos a cero hasta aproximadamente 1.7 m s^{-1} , con una concentración significativa de ocurrencias entre 0.8 y 1.2 m s^{-1} . La curva de excedencia (Fig. 21c) confirma la persistencia del recurso. Las velocidades superiores a 0.85 m s^{-1} ocurren aproximadamente durante el 50 % del tiempo, mientras que velocidades superiores a 1.29 m s^{-1} se presentan cerca del 10 % del tiempo, y velocidades superiores a 1.40 m s^{-1} durante aproximadamente el 5 % del tiempo. Estos resultados posicionan al punto P1 como el sector de mayor potencial energético dentro de la Bahía.

Caracterización temporal y estadística de la velocidad de corriente en P2

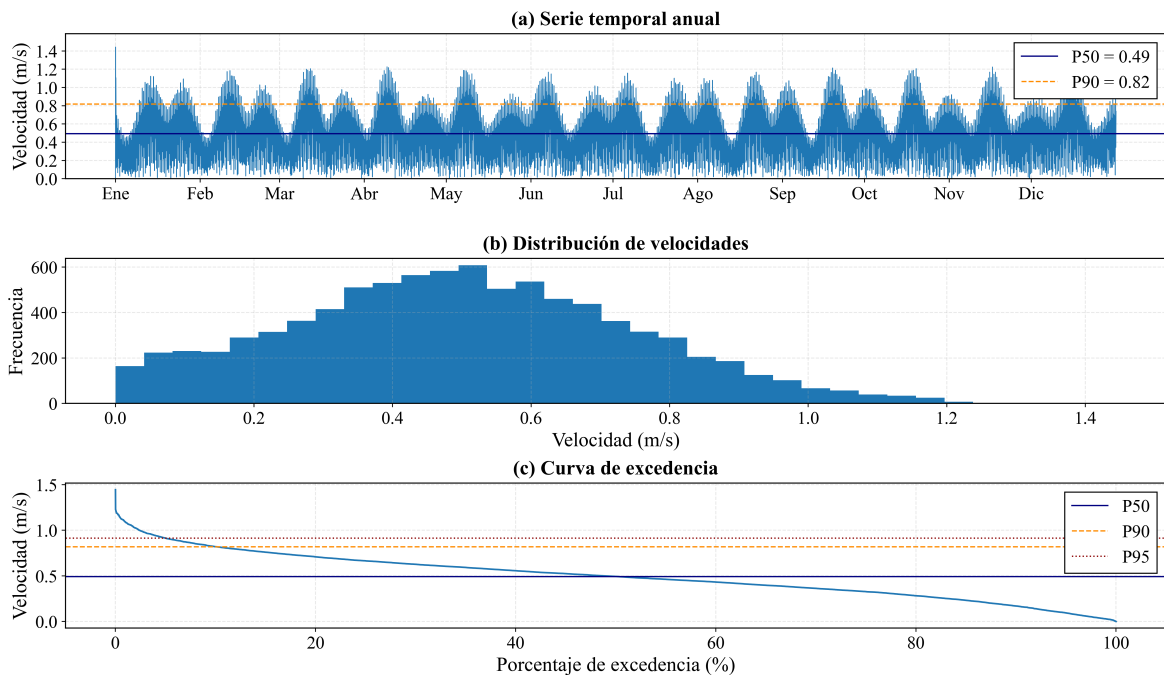
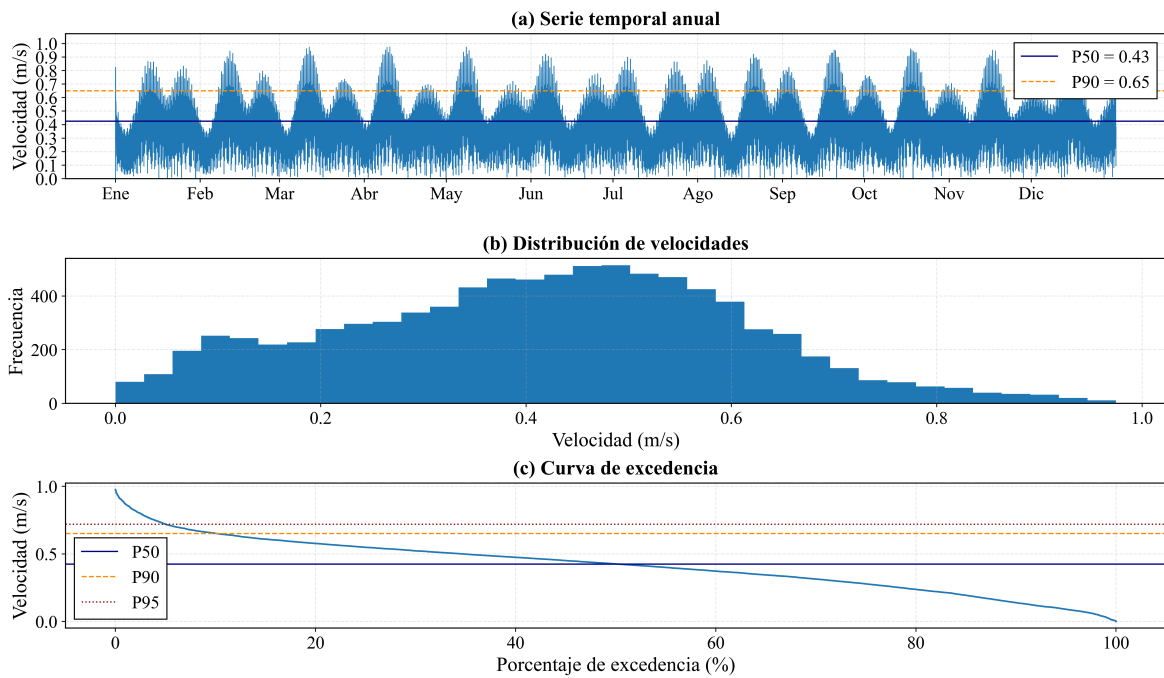


Figura 22. Caracterización temporal y estadística de las corrientes mareales en P2.
Fuente: Modelación DELFT - FLOW 3D

La figura 22 presenta la caracterización hidrodinámica del punto P2, localizado en un corredor secundario hacia el sector suroccidental del hotspot principal. La serie temporal anual (Fig. 22a) muestra una dinámica similar a la observada en P1, dominada por ciclos semidiurnos asociados a la propagación de la marea dentro de la Bahía.

Sin embargo, las magnitudes de velocidad son menores. La mediana de la serie se sitúa alrededor de 0.49 m s^{-1} , mientras que los percentiles superiores alcanzan $P90 = 0.82 \text{ m s}^{-1}$ y $P95 = 0.91 \text{ m s}^{-1}$. Los máximos instantáneos alcanzan valores cercanos a 1.4 m s^{-1} , aunque estos ocurren con menor frecuencia que en el hotspot principal. El histograma de velocidades (Fig. 22b) muestra una distribución centrada principalmente entre 0.3 y 0.7 m s^{-1} , con una cola que se extiende hasta aproximadamente 1.2 m s^{-1} durante los eventos de mayor aceleración mareal. La curva de excedencia (Fig. 22c) muestra que las velocidades superan 0.49 m s^{-1} durante el 50 % del tiempo, 0.82 m s^{-1} durante el 10 % del tiempo y 0.91 m s^{-1} durante el 5 % del tiempo. Aunque las magnitudes son menores que en P1, la persistencia de velocidades medias es considerable.

Caracterización temporal y estadística de la velocidad de corriente en P3



**Figura 23. Caracterización temporal y estadística de las corrientes mareales en P3.
Fuente: Modelación DELFT - FLOW 3D**

La figura 23 presenta el análisis del punto P3, localizado en un corredor lateral hacia el sector oriental de la Bahía. La serie temporal (Fig. 23a) evidencia nuevamente una señal claramente mareal, con ciclos semidiurnos regulares que reflejan la propagación de la marea dentro del sistema.

Las magnitudes de velocidad en este punto son más moderadas. La mediana de la serie alcanza aproximadamente 0.43 m s^{-1} , mientras que los percentiles superiores corresponden a $P90 = 0.65 \text{ m s}^{-1}$ y $P95 = 0.72 \text{ m s}^{-1}$. Las velocidades máximas registradas se aproximan a 1.0 m s^{-1} , lo que confirma que este corredor participa en la dinámica mareal de la Bahía, aunque con menor intensidad que los sectores occidentales. El histograma de velocidades (Fig. 23b) muestra una distribución más concentrada, principalmente entre 0.2 y 0.6 m s^{-1} , lo que sugiere un régimen más estable pero menos energético.

La curva de excedencia (Fig. 23c) indica que las velocidades superan 0.43 m s^{-1} durante el 50 % del tiempo, 0.65 m s^{-1} durante el 10 % del tiempo y 0.72 m s^{-1} durante el 5 % del tiempo. Esto confirma que este corredor posee un recurso mareal moderado, aunque persistentemente activo dentro de la circulación interna de la Bahía.

Caracterización temporal y estadística de la velocidad de corriente en P4

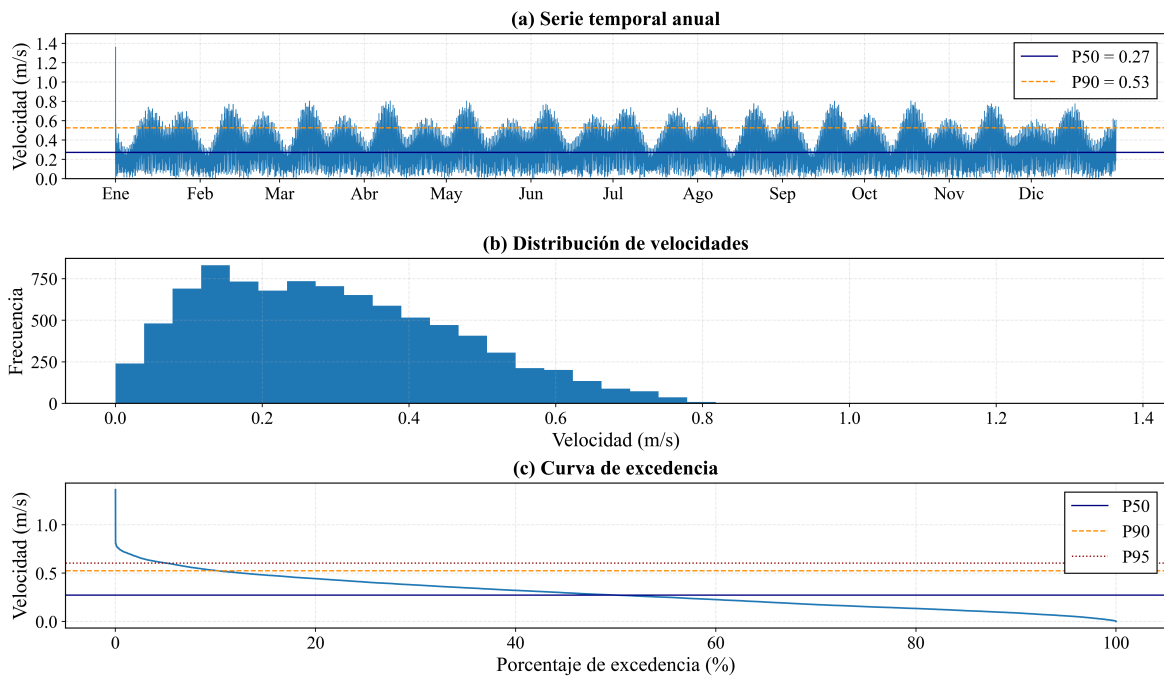


Figura 24. Caracterización temporal y estadística de las corrientes mareales en P4.
Fuente: Modelación DELFT - FLOW 3D

La figura 24 presenta la caracterización hidrodinámica del punto P4, ubicado en el sector oriental de la Bahía, fuera del corredor principal de aceleración. La serie temporal anual (Fig. 24a) muestra unas velocidades moderadas. La mediana de la serie se sitúa en 0.27 m s^{-1} , mientras que los percentiles superiores alcanzan $P90 = 0.53 \text{ m s}^{-1}$ y $P95 = 0.60 \text{ m s}^{-1}$. Los valores mínimos se aproximan a 0 m s^{-1} , mientras que los máximos instantáneos alcanzan valores cercanos a 1.2 m s^{-1} , aunque estos eventos ocurren de manera puntual y con baja frecuencia. La amplitud de variación se concentra principalmente entre 0.15 y 0.55 m s^{-1} , lo que indica un régimen dominado por velocidades bajas a moderadas.

El histograma de velocidades (Fig. 24b) muestra una distribución asimétrica positiva, con mayor frecuencia entre 0.1 y 0.4 m s^{-1} y una disminución progresiva hacia valores mayores. Más del 75 % de las velocidades se concentran por debajo de aproximadamente 0.5 m s^{-1} , lo que confirma el carácter moderado del flujo en este sector.

La curva de excedencia (Fig. 24c) muestra que las velocidades superan 0.27 m s^{-1} durante el 50 % del tiempo, 0.53 m s^{-1} durante el 10 % del tiempo y aproximadamente 0.60 m s^{-1} durante el 5 % del tiempo. Lo que muestra que el punto P4 presenta el menor potencial cinético entre los puntos analizados, coherente

con su ubicación fuera del corredor principal de aceleración del flujo. Sin embargo, la persistencia de velocidades moderadas sugiere que este sector participa de manera secundaria en la dinámica mareal general del sistema.

El análisis conjunto de las series temporales, histogramas y curvas de excedencia permite identificar diferencias claras entre los cuatro corredores analizados. El punto P1 concentra las mayores velocidades y la mayor persistencia de corrientes energéticas, lo que lo posiciona como el sector de mayor potencial energético dentro del dominio modelado. El punto P2 representa un corredor secundario con velocidades intermedias y una frecuencia significativa de ocurrencia de flujos superiores a 0.8 m s^{-1} , lo que sugiere condiciones potencialmente aprovechables dependiendo de la tecnología considerada. El punto P3 presenta un régimen más moderado, aunque su comportamiento confirma la extensión espacial del sistema de circulación mareal dentro de la Bahía. Finalmente, el punto P4 muestra las menores magnitudes de velocidad y una menor persistencia de corrientes intensas. No obstante, su señal persistente confirma que la dinámica mareal se extiende por la Bahía, aunque con un potencial energético menor.

Síntesis 4.3

El modelo Delft3D-FLOW reproduce con fidelidad la propagación de la marea en la bahía de Tumaco, resolviendo corredores internos de aceleración que los reanálisis globales no logran capturar a esta escala. El análisis comparativo muestra que el comportamiento general del campo de corrientes es consistente entre experimentos, mientras que la magnitud de las velocidades exhibe una sensibilidad a la resolución espacial y a los insumos globales empleados.

La validación con el mareógrafo de Tumaco (UHSLC ID 303) muestra un desempeño elevado para la configuración TPXO7.2 + GEBCO2019 con malla Medium (E3), con indicadores estadísticos sólidos ($r = 0.982$, $\text{RMSE} = 0.175 \text{ m}$). La configuración TPXO8 + GEBCO2023 con malla Fine (E6) mantiene indicadores satisfactorios ($r = 0.973$, $\text{skill} = 0.986$, $\text{RMSE} = 0.215 \text{ m}$) y, al incorporar los insumos oceanográficos más actualizados, se adopta como experimento base para los análisis energéticos posteriores.

Sobre esta configuración se identifican cuatro puntos representativos. El punto P1, en el corredor central de mayor aceleración, concentra las velocidades más altas del dominio (mediana 0.85 m s^{-1} , máximos $\sim 1.70 \text{ m s}^{-1}$), posicionándolo como el sector de mayor potencial energético. Los puntos P2 y P3 representan corredores secundarios con

velocidades intermedias y moderadas que confirman la extensión espacial de la circulación mareal, mientras que P4 presenta las menores magnitudes aunque con una señal persistente y coherente con la dinámica general del sistema.

4.4 Estimación del potencial energético mareomotriz

4.4.1 Metodología específica

La cuantificación del recurso mareomotriz asociado a corrientes se basa en que la energía disponible corresponde a la energía cinética del flujo. Para describir la intensidad del recurso se emplea la densidad de potencia cinética por unidad de área transversal al flujo, que depende del cubo de la velocidad.

Para cada punto de análisis, la densidad de potencia cinética instantánea:

$$p(t) = \frac{1}{2} \rho U(t)^3$$

donde $p(t)$ representa la densidad de potencia instantánea (W m^{-2}), ρ corresponde a la densidad del agua (kg m^{-3}) y $U(t)$ es la velocidad instantánea de la corriente (m s^{-1}). En este estudio se utilizó una densidad del agua de $\rho = 1022 \text{ kg m}^{-3}$, valor consistente con el empleado en las simulaciones hidrodinámicas realizadas con Delft3D-FLOW.

A partir de la serie temporal de densidad de potencia $p(t)$, se construyó una caracterización estadística del recurso con el objetivo de describir tanto las condiciones típicas del flujo como los episodios de mayor intensidad energética. Para ello se calcularon percentiles de velocidad (U_{50}, U_{90}, U_{95}), los cuales representan respectivamente las condiciones medianas del flujo, los niveles de velocidad asociados a episodios frecuentes de mayor energía y los eventos más intensos dentro del régimen mareal.

Posteriormente, se estimó la densidad de potencia promedio o Average Power Density (APD), como el promedio temporal de la serie $p(t)$:

$$APD = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N p_i$$

donde p_i corresponde a la densidad de potencia calculada en cada instante de la serie temporal. Este indicador representa la intensidad energética media del flujo durante la serie exportada del modelo es horaria e incluye ambos extremos del periodo (2016-01-01 00:00 a 2017-01-01 00:00), por lo que contiene $N = 8,785$ marcas de tiempo.

Finalmente, se calculó la energía cinética acumulada por unidad de área mediante integración discreta en el tiempo. Dado que la energía se acumula sobre intervalos, se usaron $N - 1 = 8,784$ intervalos horarios de duración $\Delta t = 3,600$ s:

$$E_A = \sum_{i=1}^{N-1} p(t) \Delta t$$

Esta magnitud representa la energía total que atravesó una unidad de área en el sitio durante el año simulado. Para facilitar la interpretación, E_A se convirtió a $\text{kWh m}^{-2} \text{ año}^{-1}$ usando $1 \text{ kWh} = 3.6 \times 10^6 \text{ J}$ (Bryden et al., 2007; IEC, 2013).

4.4.2 Intensidad energética del recurso energético mareal

La evaluación del potencial energético mareomotriz en la bahía de Tumaco muestra un recurso estructurado por la dinámica de la marea, con una señal persistente en el tiempo y una distribución espacial heterogénea dentro de la Bahía. Lo que establece que el recurso no solo está presente, sino que mantiene una recurrencia suficiente para ser considerado energéticamente aprovechable desde el punto de vista del flujo disponible.

La primera evidencia de esa estructura aparece en la serie anual de densidad de potencia instantánea. La figura 25 muestra una señal activa durante todo el año, sin periodos largos de desaparición del recurso. La energía disponible se organiza en pulsos repetitivos, regulares y bien definidos, que se suceden de enero a diciembre. Esto indica que el recurso tiene continuidad temporal dentro del dominio y que su variación responde al pulso mareal, no a episodios aislados. En P1, los máximos instantáneos alcanzan de manera repetida valores del orden de 2.0 a 2.4 kW m^{-2} , con varios eventos cercanos al límite superior de la figura. En P2, los máximos se concentran en torno a 0.7 - 0.95 kW m^{-2} , mientras que en P3 raramente superan 0.4 - 0.5 kW m^{-2} . El punto P4 presenta las menores magnitudes de densidad de potencia, con valores máximos generalmente inferiores a 0.25 - 0.30 kW m^{-2} , y una señal más atenuada a lo largo del año.

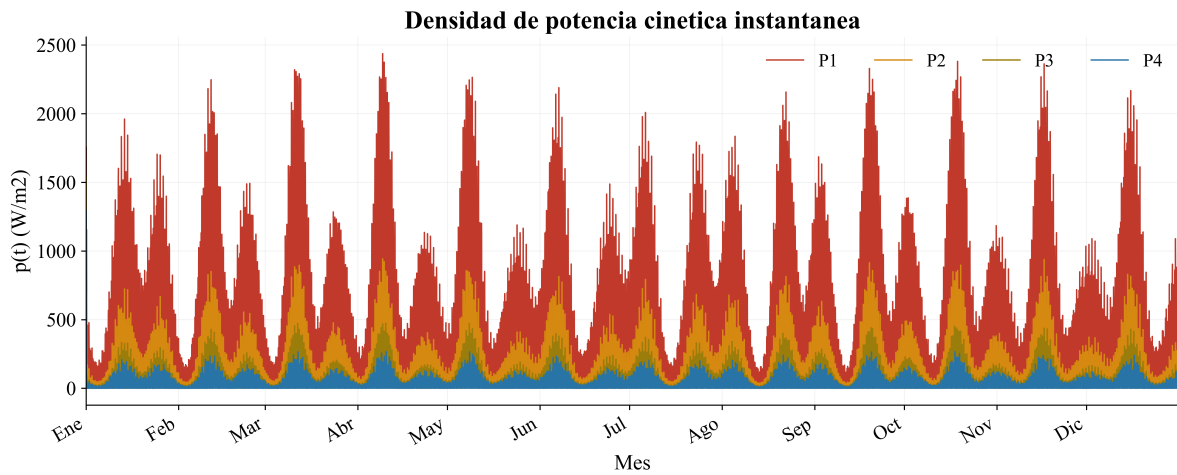


Figura 25. Serie temporal anual de la densidad de potencia cinética en los puntos P1, P2, P3 y P4. Fuente: Modelación DELFT - FLOW 3D

La comparación entre velocidad y potencia ayuda a entender por qué la diferencia entre puntos se vuelve tan marcada en términos energéticos. En la serie de velocidad, los tres puntos siguen el mismo patrón general, una señal periódica, modulada, con oscilaciones repetitivas a lo largo del año. P1 alcanza velocidades máximas cercanas a $1.6 - 1.7 \text{ m s}^{-1}$, P2 se mueve alrededor de $1.0 - 1.2 \text{ m s}^{-1}$ en sus eventos más intensos, y P3 se mantiene aproximadamente entre 0.8 y 0.9 m s^{-1} , mientras que P4 presenta las menores magnitudes, generalmente entre 0.6 y 0.7 m s^{-1} . Cuando esa misma señal se transforma en densidad de potencia, la distancia entre curvas se amplifica de forma clara. Esto es un resultado físico directo de la relación cúbica entre velocidad y potencia. Un aumento moderado en velocidad genera un aumento mucho mayor en energía disponible. Por eso P1, que ya era el punto más rápido, pasa a concentrar una fracción muy superior del recurso energético del dominio. Esa relación también queda reflejada en los percentiles, P1 alcanza 315.4 , 1104.5 y 1405.4 W m^{-2} en P50, P90 y P95, respectivamente. P2 desciende a 61.4 , 281.2 y 388.6 W m^{-2} , mientras que P3 presenta valores de 39.4 , 141.9 y 190.4 W m^{-2} . P4, en coherencia con sus menores velocidades, registra 10.4 , 74.7 y 113.9 W m^{-2} .

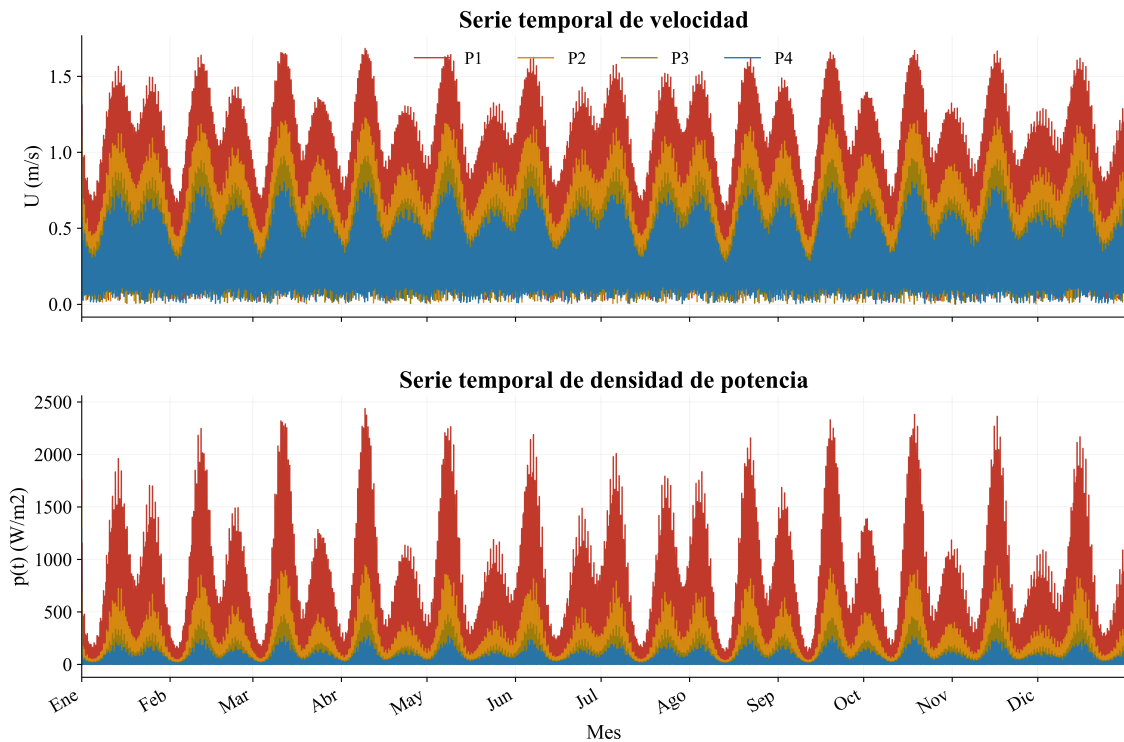


Figura 26. Intensidad energética del recurso energético mareal.
Fuente: Modelación DELFT - FLOW 3D

La modulación de esa intensidad se aprecia con más claridad en la figura intraquincenal. Entre el 2 y el 10 de abril, la amplitud de la señal aumenta de manera progresiva, hasta concentrar los máximos más altos del periodo, después de ese núcleo central, la amplitud cae de nuevo hacia el 16 de abril. Ese patrón es muy claro y es consistente con la transición desde las mareas muertas hacia las mareas vivas y luego de regreso hacia las mareas muertas. La energía del dominio, no es plana ni constante a escala de días, se organiza en ventanas de alta intensidad y ventanas de menor intensidad, pero ambas responden a una lógica mareal ordenada y predecible.

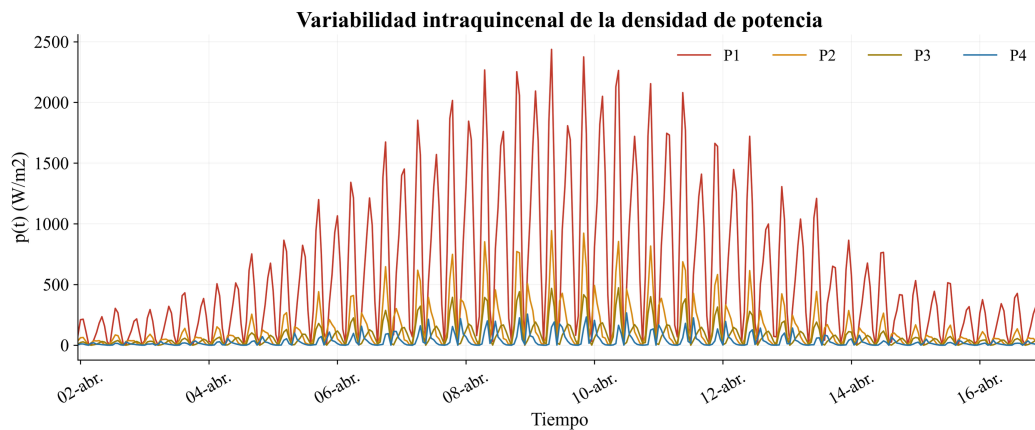


Figura 27. Variabilidad intraquincenal de la densidad de potencia cinética en un periodo representativo. Fuente: Modelación DELFT - FLOW 3D

El comportamiento de P1 en la figura 27 es especialmente relevante. Al inicio del intervalo, sus picos son todavía bajos, del orden de 200 - 400 W m⁻². A medida que avanza la ventana temporal, la señal crece rápidamente hasta superar 2000 W m⁻² en varios eventos, con un máximo cercano a 2400 - 2450 W m⁻² en el centro del periodo. Posteriormente, la amplitud disminuye con la misma claridad con la que había aumentado. Esta respuesta muestra que P1 no solo concentra el mayor recurso, sino también la mayor sensibilidad a la modulación mareal.

En P2, la misma estructura está presente, pero con menor intensidad. La figura muestra un incremento gradual desde valores bajos hasta máximos cercanos a 900 - 950 W m⁻², seguido por una atenuación progresiva hacia el final del intervalo. En P3, la respuesta es aún más contenida, con máximos del orden de 400 - 450 W m⁻². P4 presenta la señal más disminuida de los cuatro sectores analizados, los valores iniciales se mantienen por debajo de 50 - 80 W m⁻², y durante el centro del periodo apenas alcanzan máximos cercanos a 150 - 200 W m⁻², antes de disminuir nuevamente hacia el final del intervalo. Este comportamiento confirma que la magnitud del recurso disminuye progresivamente desde el corredor principal hacia los sectores laterales de la Bahía, pero a su vez reafirma que la Bahía tiene un recurso bien definido y con un mayor rendimiento concentrado durante las fases de mareas vivas.

Punto	p50 (W m ⁻²)	p90 (W m ⁻²)	p95 (W m ⁻²)
P1	315.4	1104.5	1405.4
P2	61.4	281.2	388.6
P3	39.4	141.9	190.4
P4	10.4	74.7	113.9

Tabla 7. Densidad de potencia cinética asociada a los percentiles en los hotspots P1, P2, P3 y P4 de la Bahía de Tumaco.

La figura 28 muestra la estabilidad del recurso a lo largo del año. Aquí la señal es mucho más suave y permite ver si la intensidad media cambia al pasar los meses. P1 se mueve aproximadamente entre 425 y 475 W m⁻², P2 entre 103 y 117 W m⁻², P3 entre 55 y 62 W m⁻² y P4, por su parte, presenta los valores más bajos, con un rango aproximado entre 25 y 32 W m⁻². No hay saltos bruscos ni meses excepcionalmente altos o bajos. Las curvas no se intersectan en ningún punto del periodo. La jerarquía espacial del dominio se mantiene intacta de enero a diciembre.

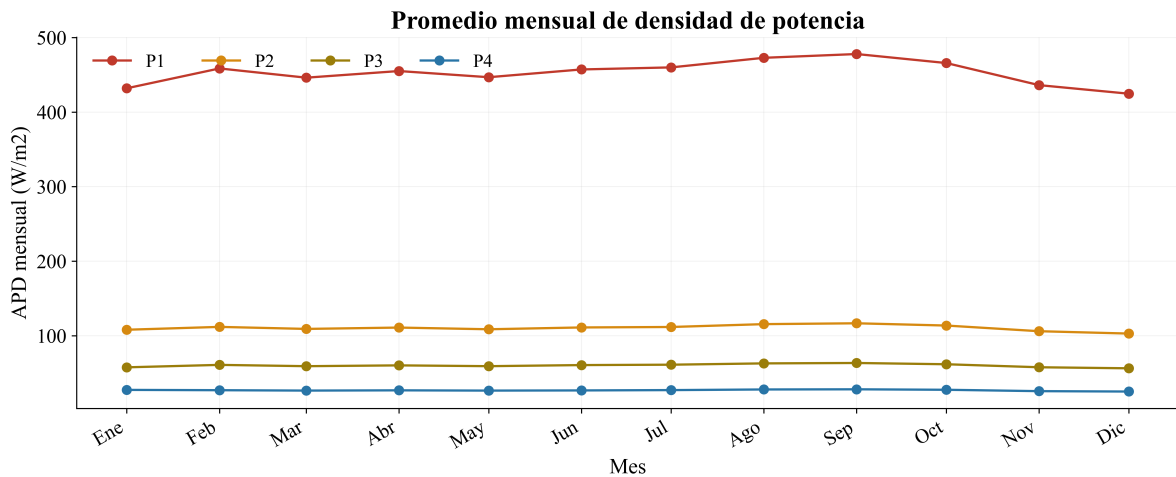


Figura 28. Promedio mensual de densidad de potencia en los puntos P1, P2, P3 y P4. Fuente: Modelación DELFT - FLOW 3D

El comportamiento mensual de P1 muestra como la curva parte en enero cerca de 432 W m^{-2} , sube en febrero, baja levemente en marzo, vuelve a aumentar de abril a julio y alcanza su tramo más alto entre agosto y octubre, con un máximo visual cercano a 475 W m^{-2} en septiembre. Después cae de nuevo en noviembre y diciembre, cerrando el año en torno a 425 W m^{-2} . En P2 la forma es casi la misma, pero comprimida, con valores alrededor de 110 W m^{-2} y un máximo cercano a 117 W m^{-2} en septiembre. P3 repite el patrón con valores aún menores, en torno a 60 W m^{-2} . P4, aunque con menores magnitudes, también muestra un comportamiento estable a lo largo del año, con fluctuaciones suaves y sin variaciones abruptas.

El potencial energético del dominio no depende de una estación puntual. Hay meses más intensos y meses más débiles, pero en general, la señal es constante. Esa estabilidad también está respaldada por los valores anuales de APD, 452.7 W m^{-2} en P1, 110.5 W m^{-2} en P2, 60.0 W m^{-2} en P3 y aproximadamente 27.0 W m^{-2} en P4.

La energía cinética acumulada integra toda esa información y ofrece la medida más clara del potencial anual del dominio. La figura 29 muestra cuatro curvas crecientes durante todo el año, lo que indica que el recurso aporta energía de forma continua cuando se integra en el tiempo. No aparecen tramos horizontales prolongados, incluso en las fases de menor intensidad, la energía sigue aumentando. La diferencia entre puntos se expresa en la pendiente, P1 acumula energía mucho más rápido que P2, P3 y P4 desde el inicio del año, y esa separación se amplía de manera progresiva.

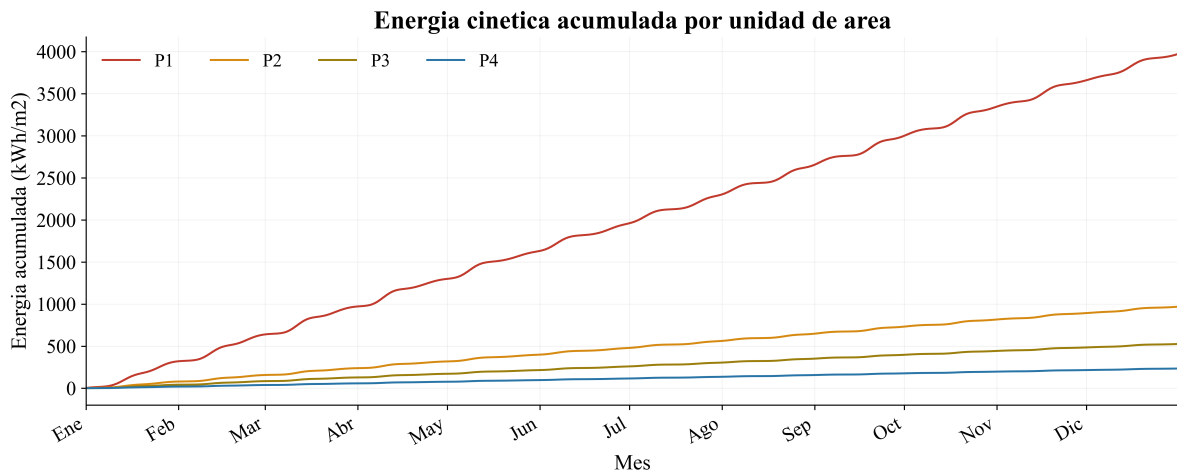


Figura 29. Energía cinética acumulada por unidad de área en los puntos P1, P2, P3 y P4. Fuente: Modelación DELFT - FLOW 3D

La curva de P1 alcanza cerca de $3977.1 \text{ kWh m}^{-2}$ al final del año, mientras que P2 llega a 970.7 kWh/m^2 , P3 a 527.3 kWh m^{-2} y P4 valores cercanos a 235.1 kWh m^{-2} . P1 acumula aproximadamente cuatro veces más energía que P2, más de siete veces la de P3, y cerca de diecisiete veces la de P4, evidenciando una distribución espacial altamente heterogénea del potencial energético. La Bahía dispone de un recurso anual energéticamente significativo, pero ese recurso no está distribuido de manera uniforme, está fuertemente concentrado en un corredor principal. La forma de las curvas también es útil, no son líneas rectas, sino trayectorias con pequeños cambios de pendiente. Esto indica que la acumulación responde a la dinámica mareal del sistema, durante las ventanas más energéticas la pendiente aumenta, y durante las fases menos intensas el crecimiento sigue, pero más despacio.

Punto	APD (W m^{-2})	(E_A) ($\text{kWh m}^{-2} \text{ año}^{-1}$)
P1	452.7	3977.1
P2	110.5	970.7
P3	60.0	527.3
P4	26.8	235.1

Tabla 8. Densidad de potencia promedio y energía cinética acumulada anual en los hotspots analizados.

Estos resultados consolidan la jerarquía energética del sistema, donde P1 presenta los mayores niveles de intensidad y acumulación anual, seguido por P2 en una condición intermedia, P3 como el punto de menor aporte y P4 como el punto de menor contribución energética. En este contexto, el corredor principal concentra la mayor proporción del potencial cinético dentro del dominio hidrodinámico de la bahía de Tumaco.

Síntesis 4.4

El recurso energético mareal en la bahía de Tumaco presenta una distribución espacial no uniforme, concentrándose en corredores donde la aceleración del flujo incrementa de manera sostenida la intensidad energética. El hotspot principal P1 domina claramente el sistema, con picos de densidad de potencia que superan los 2 kW m^{-2} en eventos intensos, un APD de 452.7 W m^{-2} y una energía acumulada anual de $3,977.1 \text{ kWh m}^{-2} \text{ año}^{-1}$. En contraste, P2 alcanza valores intermedios, con máximos cercanos a 0.9 kW m^{-2} , un APD de 110.5 W m^{-2} y una energía anual de $970.7 \text{ kWh m}^{-2} \text{ año}^{-1}$, mientras que P3 con una intensidad moderada del recurso, con picos alrededor de $0.4 - 0.5 \text{ kW m}^{-2}$, un APD de 60.0 W m^{-2} y $527.3 \text{ kWh m}^{-2} \text{ año}^{-1}$ y P4 como el punto de menor contribución energética del sistema 0.25 kW m^{-2} , un APD cercano a 27.0 W m^{-2} y una energía acumulada anual aproximada de $235.1 \text{ kWh m}^{-2} \text{ año}^{-1}$. Esta diferencia es consistente en todas las escalas analizadas, desde la variabilidad instantánea hasta la integración anual, lo que confirma que, dentro del dominio modelado, P1 concentra la mayor fracción del recurso cinético disponible y se configura como el sitio más favorable para un eventual aprovechamiento mareomotriz.

4.5 Comparación y selección de tecnología para Tumaco

Este capítulo presenta la caracterización hidrodinámica y energética del hotspot principal en criterios para discutir compatibilidad tecnológica en la bahía de Tumaco. Una tecnología mareomotriz solo es apropiada si se adapta al sitio de instalación, no solo en energía disponible, sino en operación real, mantenimiento, logística y riesgos ambientales. Por ello, la comparación combina lo que el recurso ofrece distribución de velocidades, direccionalidad y variabilidad con lo que cada familia tecnológica requiere para operar de forma confiable y mantenible (Blunden & Bahaj, 2007; Bryden et al., 2007).

4.5.1 Criterios de selección

La dirección del flujo entra como criterio estructural porque condiciona eficiencia y fatiga. Un régimen bidireccional y relativamente alineado favorece tecnologías que pueden operar durante flujo y reflujos con pérdidas menores, en cambio, un régimen con rotación marcada incrementa el castigo por operar fuera del eje principal y suele exigir soluciones de control u orientación más complejas. En Tumaco, este criterio se formula a partir del patrón direccional del corredor principal identificado en el

modelo, y se priorizan tecnologías con buen desempeño bajo inversión del sentido del flujo y cambios moderados de orientación (Cornett, 2008).

La velocidad es el criterio que define si el proyecto genera energía de forma sostenida o solo en picos. No es suficiente con que existan corrientes fuertes ocasionales, una tecnología se vuelve viable cuando el sitio ofrece una fracción significativa del tiempo con velocidades útiles para arrancar y mantener operación eficiente. En ese sentido, el criterio se expresa como compatibilidad entre el régimen local y el comportamiento típico del convertidor. Si el hotspot muestra velocidades moderadas persistentes, la prioridad es una tecnología que entregue buena potencia en ese rango, si predominan picos cortos y alta variabilidad, la prioridad se desplaza hacia robustez de control y tolerancia a cambios sin penalizar disponibilidad. En Tumaco, este criterio se ancla con la síntesis hidrodinámica obtenida en el hotspot principal, donde el régimen de velocidad se describe como moderado y persistente, con percentiles característicos de $U_{50} = 0.85 \text{ m s}^{-1}$, $U_{90} = 1.29 \text{ m s}^{-1}$ y $U_{95} = 1.40 \text{ m s}^{-1}$ (Cornett, 2008).

A partir de velocidad y dirección aparece la variabilidad como riesgo operativo. En ambientes costeros, cambios rápidos de velocidad y dirección o contrastes muy fuertes entre horas o zonas cercanas tienden a aumentar cargas dinámicas, acelerar fatiga y forzar estrategias de operación más conservadoras. Esto no significa que el sitio no sea viable, sino que la tecnología debe ser escogida con prudencia. Si la variabilidad es alta, se priorizan soluciones con control robusto, tolerancia mecánica y mantenimiento practicable, aunque su potencia nominal sea menor. En Tumaco, la variabilidad se resume como moderada y dominada por el ciclo mareal, principalmente intra - mareal, y entra en la matriz como un criterio explícito de confiabilidad y disponibilidad (Cornett, 2008).

El criterio de potencia cierra el bloque técnico porque convierte la hidrodinámica en una medida comparable entre opciones. La potencia del flujo depende de la velocidad, pero en la selección tecnológica importa sobre todo la parte aprovechable, la que puede transformarse en electricidad con eficiencias realistas, disponibilidad y restricciones de operación. Esta distinción es vital para no sobredimensionar expectativas, un hotspot puede tener alta potencia instantánea, pero si solo ocurre en ventanas cortas o bajo direcciones poco favorables, la energía anual y el factor de planta se reducen (Cornett, 2008). En el hotspot principal, la densidad de potencia promedio estimada es 452.7 W m^{-2} (Ver Sección 4.4.2.), y el recurso se concentra en

un corredor dominante P1, acompañado por corredores secundarios de menor intensidad representados por P2, P3 y P4. Con eso, la selección prioriza tecnologías que puedan operar eficientemente en rangos de velocidad moderados y mantener producción estable bajo condiciones mareales variables.

Pasando al bloque logístico, el criterio más pesado suele ser instalación y mantenimiento (O&M), porque en tecnologías emergentes el costo real se define por el ciclo completo, desde cómo se despliega el sistema, cuántas intervenciones requiere, cuánto dura cada intervención y qué tan fácil es restablecer operación. La evidencia sectorial abierta sobre tidal stream es consistente en que la reducción de costos depende en gran parte de mejoras en confiabilidad, estrategias de instalación y mantenimiento, además de estandarización industrial, por eso, una tecnología con mantenimiento más simple puede ser preferible incluso si su captura hidrodinámica es ligeramente menor (Offshore Renewable Energy (ORE) & Industry Energiser project (TIGER), 2024; Vivid Economics, 2019). En Tumaco, esto se traduce en un criterio concreto, se prioriza la opción que funcione con la logística disponible, acceso multimodal para personal y carga liviana mediante el Aeropuerto La Florida, capacidad de apoyo marítimo - portuario bajo la Capitanía de Puerto, y programación de intervenciones según ventanas operacionales definidas por el pronóstico meteomarinero oficial, donde se evidencian los patrones de viento, oleaje y lluvia y que además puedan instalarse y mantenerse sin requerir equipos muy especializados difíciles de conseguir localmente (Aerocivil, 2023; DIMAR, 2024).

De la mano de O&M aparece la modularidad como criterio de diseño y de gestión del riesgo. Un enfoque modular permite iniciar con un piloto una o pocas unidades, confirmar desempeño bajo condiciones reales de Tumaco y luego escalar por etapas. Este criterio es importante porque captura algo que el recurso por sí solo no garantiza. De esta manera existe la posibilidad de aprender y corregir sin que el proyecto quede atrapado en una única decisión irreversible. En un contexto como Tumaco, donde la implementación debe ser territorialmente viable, la modularidad no es un lujo, debe ser una estrategia que funcione como reducción de riesgo técnico, financiero y operativo (IRENA, 2020).

Finalmente, la cadena de suministro y soporte técnico se incorpora como criterio porque determina la disponibilidad en el tiempo. En ambientes marinos, los tiempos fuera de servicio pueden crecer rápidamente si los repuestos son exclusivos del fabricante, si el soporte del fabricante es limitado o si la logística de importación es

lenta. Por eso, se favorecen tecnologías con madurez industrial, historial operacional y trazabilidad de repuestos, aunque la solución inicial requiera componentes importados. Este criterio se conecta con la madurez tecnológica: a mayor evidencia de operación y estandarización, menor incertidumbre sobre disponibilidad y costos de mantenimiento (IRENA, 2020; Offshore Renewable Energy (ORE) & Industry Energiser project (TIGER), 2024).

En cuanto al bloque ambiental, la selección tecnológica se centra en riesgos conocidos y gestionables y en la capacidad real de implementar monitoreo y medidas de mitigación desde el diseño. Para convertidores de corrientes de marea, las rutas de interacción más relevantes suelen agruparse en interacción con fauna, ruido submarino especialmente durante instalación y en menor medida en operación, alteración local de hábitat y los bentos asociada a anclajes, y efectos vinculados a infraestructura y cables submarinos. La decisión tecnológica, por tanto, no busca garantizar cero impacto, sino priorizar configuraciones con huella e infraestructura reducidas que faciliten un manejo proporcional del riesgo, dispositivos que puedan ubicarse, señalizarse y monitorearse en su zona de influencia, y que reduzcan la complejidad de obras en fondo ante alta incertidumbre ecológica (Garavelli et al., 2024; Phillips et al., 2025; Polagye et al., 2010; Rueda-Bayona et al., 2026).

En el componente regulatorio y de gobernanza marítima, el criterio se enfoca en que la opción tecnológica sea implementable bajo el marco institucional colombiano para actividades e infraestructura en jurisdicción marítima. Esto implica que la alternativa seleccionada debe poder integrarse a requisitos de ocupación y administración del espacio marítimo, seguridad de navegación y señalización, coexistencia con usos, y trazabilidad técnica del proyecto. En Tumaco, este criterio también orienta a preferir configuraciones con huella controlable y despliegue gradual, porque facilitan la gestión de permisos, el relacionamiento con actores locales y la adaptación del proyecto a restricciones operacionales (DIMAR, 2023; Márquez et al., 2020).

4.5.2 Comparación Tecnológica

La comparación tecnológica para Tumaco se organiza como una matriz comparativa, utilizada como un mecanismo de disciplina técnica que permite contrastar lo que el sitio ofrece frente a lo que cada familia tecnológica exige para operar de forma estable y mantenible. Bajo este enfoque, se analizaron tres familias tecnológicas

relevantes para un entorno como la bahía de Tumaco, turbinas de eje horizontal ancladas al fondo, plataformas flotantes con rotor sumergido y turbinas de eje vertical.

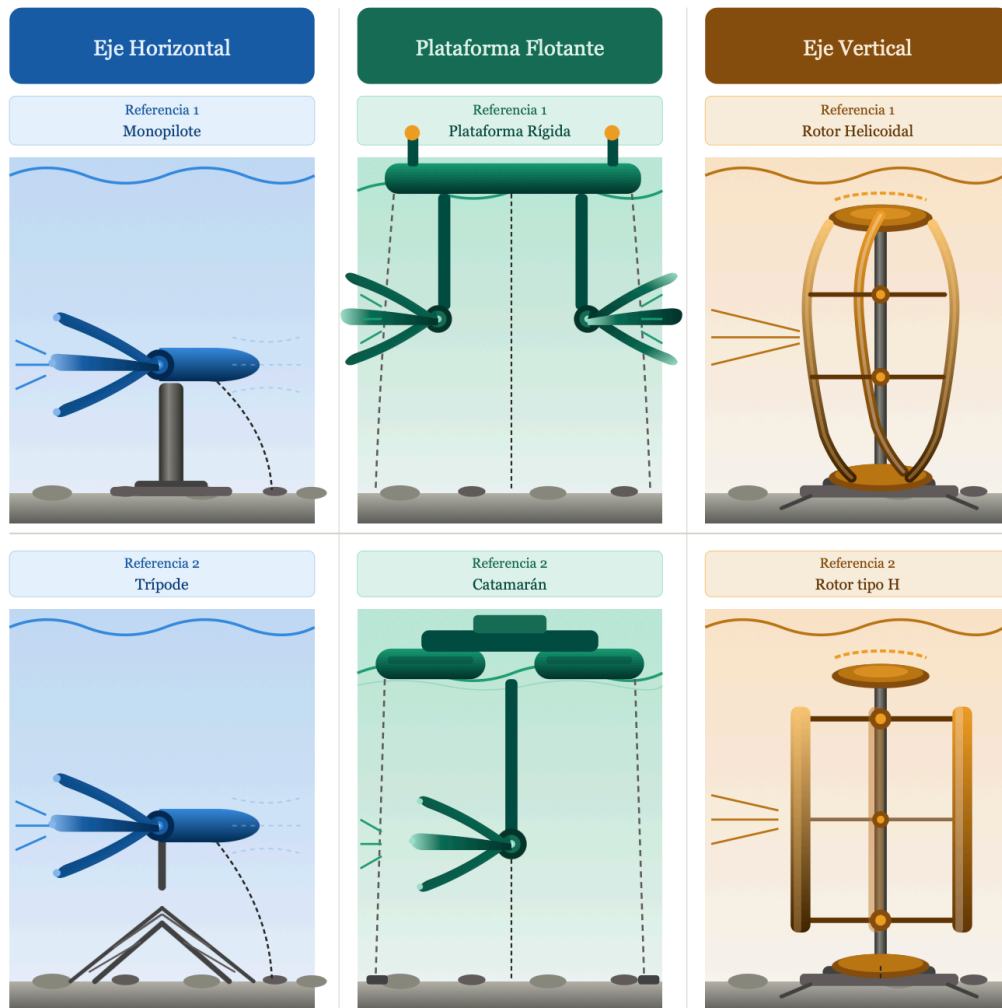


Figura 30. Panel de referencia visual con ejemplos representativos de cada familia tecnológica.
Fuente: Elaboración propia

Las turbinas de eje horizontal funcionan de manera equivalente a un aerogenerador submarino. Un rotor de eje horizontal intercepta la corriente y su rotación se transforma en electricidad mediante un generador instalado dentro de una estructura sellada que protege los componentes eléctricos y mecánicos. Esta tecnología es la que ha alcanzado mayor despliegue en mar abierto y concentra la mayor experiencia operacional dentro del sector mareomotriz (IRENA, 2020).

Desde el punto de vista de madurez tecnológica, las turbinas de eje horizontal concentran la mayor evidencia de operación bajo condiciones reales del mar y generación acumulada, situándose en los niveles más altos de desarrollo dentro del sector de corrientes de marea (IEA - OES, 2024).

Sin embargo, el principal desafío de esta familia es logístico. Estos sistemas requieren cimentaciones, operaciones offshore especializadas y, en muchos casos, el uso de grúas o buques de instalación de gran capacidad. La instalación y el mantenimiento offshore suelen concentrar una fracción importante del CAPEX y del OPEX en proyectos mareomotrices (IRENA, 2020). En un entorno como Tumaco, donde la estrategia logística prioriza infraestructura regional disponible, este aspecto se vuelve decisivo.

Las plataformas flotantes buscan mantener el mismo principio hidrodinámico de conversión de energía, pero desacoplar la instalación de una cimentación fija compleja. En estos sistemas, la estructura se ancla mediante líneas de amarre y puede recuperarse a superficie para mantenimiento, reduciendo la necesidad de intervenciones submarinas especializadas.

Desde el punto de vista estructural, estas plataformas requieren control de estabilidad frente a oleaje y corrientes variables, pero simplifican campañas de instalación y O&M, lo que se traduce en una reducción de costos de energía oceánica (IRENA, 2020). Para un sitio como Tumaco, con ventanas operacionales condicionadas por el pronóstico meteomarinero oficial y coordinación con Capitanía de Puerto, esta arquitectura resulta particularmente coherente con la estrategia logística definida.

En madurez, las plataformas flotantes están en fases avanzadas de demostración, aunque con menor número de unidades acumuladas en comparación con las turbinas de eje horizontal de fondo (IEA - OES, 2024). Aun así, su trayectoria reciente muestra consolidación progresiva.

Las turbinas de eje vertical capturan energía con un rotor cuyo eje es perpendicular al flujo horizontal. Su principal ventaja técnica es que no requieren sistemas activos de orientación, lo cual puede simplificar operación en flujos bidireccionales.

Al comparar las tres familias, emergen diferencias claras; las turbinas de eje horizontal concentran hoy los despliegues de 1 - 2 MW por dispositivo reportados públicamente, entre ellas la Orbital O2 (2 MW), la SIMEC Atlantis AR1500 (1.5 MW) y la Andritz HS1000 (1 MW), mientras que las de eje vertical alcanzan rangos similares en prototipos, aunque con menor trayectoria acumulada. La potencia nominal suele alcanzarse alrededor de $2.5 - 3.0 \text{ m s}^{-1}$, y los rangos de profundidad entre 25 - 50 m (Korte et al., 2024; Lewis et al., 2015).

En madurez, la evidencia sectorial sitúa a las turbinas de eje horizontal como las más consolidadas, seguidas por plataformas flotantes en demostración avanzada y luego

por eje vertical con mayor incertidumbre relativa, y en todos los casos la instalación y el O&M offshore representan una fracción determinante del costo total (IEA - OES, 2025; IRENA, 2020). Estas diferencias evidencian que la selección tecnológica para Tumaco no depende únicamente del desempeño de los dispositivos, sino de su compatibilidad con las condiciones específicas del hotspot P1, particularmente en términos de profundidad, logística de instalación y operación mantenible.

Familia tecnológica	Principio de operación	Madurez tecnológica	Adaptación a aguas someras	Complejidad de instalación	Ventaja principal	Limitación principal
Eje horizontal anclada al fondo	Rotor alineado con el flujo	Alta	Baja - Media	Alta	Mayor experiencia operativa	Requiere cimentaciones y logística offshore
Plataforma flotante eje horizontal	Rotor suspendido bajo plataforma	Media - Alta	Alta	Media	Mantenimiento en superficie	Sensibilidad a oleaje
Eje vertical	Rotor perpendicular al flujo	Media	Alta	Media	No requiere orientación	Menor madurez tecnológica

Tabla 9. Comparación entre familias tecnológicas mareomotrices. Fuentes: (IEA - OES, 2024; IRENA, 2020; Korte et al., 2024; Lewis et al., 2015).

4.5.3 Propuesta tecnológica preliminar para Tumaco

La preselección tecnológica preliminar para Tumaco se construye a partir de las condiciones específicas del hotspot P1. En este caso, el criterio central no es únicamente la magnitud del recurso, sino la compatibilidad entre la tecnología y un entorno somero, con profundidades del orden de 10 m o menores, velocidades características entre 1.29 y 1.4 m s⁻¹, régimen mareal bidireccional y una logística de instalación y mantenimiento que debe apoyarse en infraestructura regional y operaciones marítimas manejables. Bajo este enfoque, la comparación entre familias tecnológicas se traduce en una preselección de dispositivos que, muestran mayor coherencia con las condiciones observadas en la bahía de Tumaco (Ver Figura 31).

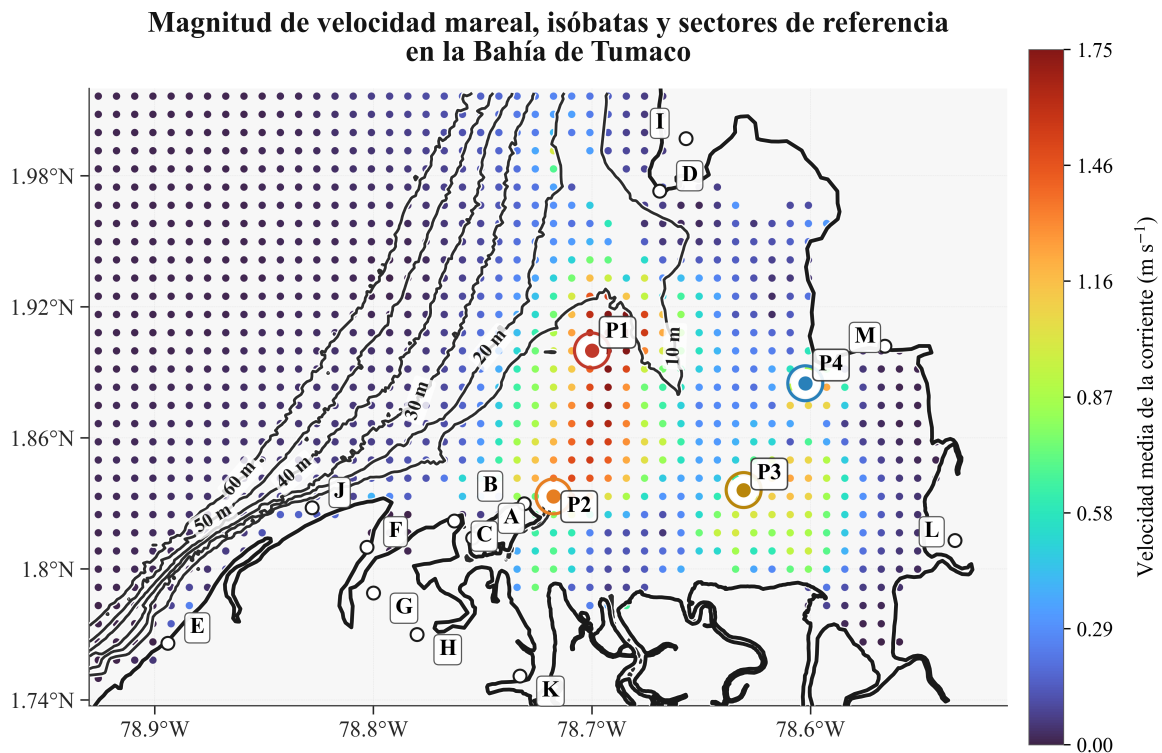


Figura 31. Magnitud de Velocidad Mareal, isobatas y sectores de referencia en la Bahía de Tumaco. Fuente: Modelación DELFT - FLOW 3D

Con ese filtro, las alternativas más defendibles para Tumaco son la Tocardo T-1, la EnviroGen de New Energy Corporation y la unidad hidrocínética flotante de GKinetic Energy. Las tres responden a lógicas distintas de implantación: una turbina de eje horizontal bidireccional, una turbina vertical de flujo cruzado y una plataforma flotante de eje vertical con autoalineación (GKinetic Energy, 2022; New Energy Corporation, 2025; QED Naval Limited, 2026).

La Tocardo T-1 es una turbina mareal de 50 - 100 kW, instalable en aguas someras de 4 m o más, con inicio de generación desde 0.4 m s^{-1} y operación hasta 6.8 m s^{-1} . Su ventaja más importante para Tumaco es que incorpora un sistema pasivo de reversa de palas que permite producción bidireccional, lo que la hace especialmente coherente con un régimen de flujo y reflujos. Su principal limitación no está en el recurso, sino en la escala aun siendo una solución pequeña para estándares mareomotrices, sigue siendo una máquina más pesada, con mayores exigencias estructurales y de instalación que las alternativas hidrocínéticas más ligeras (QED Naval Limited, 2026).



Figura 32. Turbina mareomotriz de eje horizontal Tocardo T-1 durante instalación. Fuente: (QED Naval Limited, 2026). Recuperado de <https://qednaval.co.uk/technology/>

La EnviroGen de New Energy Corporation representa una segunda ruta tecnológica atractiva para Tumaco. La empresa ofrece versiones verticales de flujo cruzado de 5 kW (EVG-005) y 25 kW (EVG-025), ambas con velocidad mínima de operación de 1.5 m s^{-1} , justo en el umbral inferior del rango característico adoptado para P1. La EVG-005 requiere profundidades mínimas de 1.25 m en montaje fijo o 1.4 m en montaje flotante, mientras que la EVG-025 requiere 3.0 m fija o 3.4 m flotante (New Energy Corporation, 2025). En términos de compatibilidad con Tumaco, su ventaja es que entra en régimen justo donde comienza el rango de velocidad del hotspot. Además, su configuración modular y su posibilidad de montaje fijo o flotante la vuelven más flexible ante restricciones logísticas. La limitación principal es que, aunque la empresa la ubica también en aplicaciones mareales, su posicionamiento comercial abarca aplicaciones más diversas y no se orienta exclusivamente al ámbito mareal, como ocurre con Tocardo. Por tanto, para un proyecto piloto en bahía abierta su adopción exigiría una validación local.



Figura 33. Turbina hidrocínética de eje vertical EnviroGen (New Energy Corporation). Fuente: (New Energy Corporation, 2025). Recuperado de <https://www.newenergycorp.ca/about-the-tech>

La tercera alternativa es la tecnología de GKinetic Energy, una plataforma flotante con dos turbinas de eje vertical dispuestas a ambos lados de un cuerpo central. Su interés para Tumaco radica en tres atributos muy concretos, la empresa reporta operación en profundidades desde 0.5 m para su unidad pequeña y 1.4 m para la de 12 kW, una velocidad de arranque de 0.6 m s^{-1} , y, sobre todo, capacidad de autoalinearse con flujos bidireccionales, la unidad de 12 kW alcanza una potencia nominal a 2.0 m s^{-1} . Esta opción resulta muy fuerte cuando el criterio dominante es la facilidad de despliegue, recuperación y mantenimiento, porque evita obras civiles pesadas y se comporta más como una unidad amarrada que como una instalación fija offshore. Su límite para Tumaco está en la escala, se trata de una solución más modular y distribuida, adecuada para pilotos, pero no para una estrategia de gran potencia por unidad (GKinetic Energy, 2022).



Figura 34. Plataforma hidrocínética flotante de eje vertical GKinetic. Fuente: (GKinetic Energy, 2022). Recuperada de <https://www.gkinetic.com/hydrokinetic-turbines/#wwd>

A partir de las tecnologías compatibles con las condiciones someras de Tumaco se evaluó la capacidad para interceptar el recurso energético disponible en el hotspot principal.

La potencia incidente en el plano del rotor se estimó como:

$$P = \frac{1}{2} \rho A U^3$$

donde P corresponde a la potencia cinética del flujo, ρ es la densidad del agua de mar, A el área barrida por el rotor y U la velocidad de la corriente. Para rotores circulares se usó:

$$A = \frac{\pi D^2}{4}$$

donde D corresponde al diámetro del rotor (Thiébot et al., 2021). Las velocidades utilizadas corresponden al rango característico adoptado para el hotspot principal, entre 1.29 m s^{-1} y 1.4 m s^{-1} , valores coherentes con el corredor de mayor interés tecnológico dentro de la bahía de Tumaco.

Para la estimación del área interceptada se utilizaron dimensiones representativas obtenidas a partir de la información técnica disponible de cada fabricante. En el caso de la Tocardo T-1, se adoptó un diámetro de rotor del orden de 4 m (QED Naval Limited, 2026). Para la tecnología EnviroGen, se emplearon las dimensiones de rotor disponibles en la documentación técnica, que indican alturas variables entre 1.5 y 3.4

m, dependiendo de la versión del dispositivo (ABS Alaskan, Inc., 2026b, 2026a). Por su parte, la tecnología GKinetic no reporta de manera explícita el tamaño del rotor en la información pública disponible, por lo que no fue posible estimar su área interceptada dentro del análisis cuantitativo.

Tecnología	Geometría del rotor	Área interceptada (m ²)	Potencia U90 (kW)	Potencia U95 (kW)	Compatibilidad con Tumaco
Tocado T-1	Rotor circular, D = 4.0 m	12.57	13.69	17.43	Alta
EnviroGen EVG-025	Rotor 3.4 m × 1.7 m	5.78	6.29	8.01	Alta
GKinetic floating unit	No reportada públicamente de forma explícita	N.D.	N.D.	N.D.	Media - alta

Tabla 10. Potencia hidráulica incidente estimada para rotores representativos bajo velocidades características del hotspot P1 en la Bahía de Tumaco. Fuentes: (ABS Alaskan, Inc., 2026a, 2026b; QED Naval Limited, 2026)

Nota: La potencia hidráulica incidente representa la potencia del flujo interceptada por el rotor y no corresponde a la potencia eléctrica generada por el dispositivo, la cual depende del coeficiente de potencia, las pérdidas mecánicas y la estrategia de control de cada convertidor. La estimación de la potencia eléctrica aprovechable, incorporando rangos de C_p representativos por familia tecnológica, se presenta en la Tabla 11.

Estos resultados muestran que, aun bajo condiciones someras y con dispositivos de escala moderada, el hotspot principal de la bahía de Tumaco presenta un recurso cinético capaz de sostener configuraciones tecnológicas compactas y modulares. La Tocado T-1 intercepta una mayor potencia del flujo debido a su mayor área barrida y a su diseño específicamente orientado a corrientes mareales bidireccionales. La EnviroGen EVG-025, aunque presenta un área de interacción menor, mantiene una alta compatibilidad con el sitio gracias a su operación en bajas profundidades y a su velocidad mínima de funcionamiento de 1.5 m s^{-1} (New Energy Corporation, 2025; QED Naval Limited, 2026). GKinetic Energy se mantiene como una alternativa tecnológicamente relevante dentro de la preselección por su operación en profundidades desde 0.5 m, su velocidad de arranque de 0.6 m s^{-1} , su capacidad de autoalinearse con flujos bidireccionales y su enfoque claramente orientado a despliegues modulares y logística simplificada (GKinetic Energy, 2022).

Bajo estos criterios, la Tocardo T-1 se posiciona como la alternativa más sólida dentro de las tecnologías específicamente mareales, debido a su compatibilidad con flujos bidireccionales y profundidades reducidas. La EnviroGen EVG-025 aparece como una solución modular altamente compatible con el rango hidráulico del hotspot principal, mientras que GKinetic Energy conserva un interés particular como opción piloto de baja complejidad logística.

Más allá de la comparación cualitativa, es posible avanzar hacia una estimación cuantitativa del potencial energético aprovechable por cada tecnología, incorporando el coeficiente de potencia (C_p), que representa la fracción de la potencia cinética del flujo que el convertidor transforma en energía eléctrica. Este parámetro está acotado teóricamente por el límite de Betz ($C_p \text{ máx} = 16/27 \approx 0.593$), aunque los dispositivos reales operan con valores considerablemente menores, que dependen del diseño del rotor, la velocidad de operación y las condiciones hidráulicas del sitio (IEC, 2013; IRENA, 2020).

Para turbinas de eje horizontal bidireccional como la Tocardo T-1, la literatura reporta rangos de C_p entre 0.30 y 0.40 bajo condiciones de operación en corrientes de marea (Batten et al., 2008). Para convertidores de flujo cruzado de eje vertical como la EnviroGen EVG-025, los valores típicos documentados se ubican entre 0.25 y 0.35, reflejando las diferencias aerodinámicas inherentes a este tipo de rotor (Bachant & Wosnik, 2015). Dado que las curvas de potencia certificadas por fabricante no se encuentran disponibles públicamente para los dispositivos analizados, se adoptó un enfoque de escenarios conservador, moderado y optimista para acotar el rango de potencia eléctrica estimada.

La potencia eléctrica por unidad se calculó aplicando el coeficiente de potencia sobre la potencia hidráulica incidente definida en la ecuación anterior:

$$P_e = C_p \cdot P$$

La Tabla 11 presenta los resultados para cada tecnología y escenario de C_p .

Tecnología	Escenario (C_p)	U90 (kW)	U95 (kW)
Tocardo T-1 (Eje horizontal, $A = 12.57 \text{ m}^2$)	0.30	4.1	5.3
	0.35	4.8	6.2
	0.40	5.5	7.0
EnviroGen EVG-025 (Eje vertical cruzado, $A = 5.78 \text{ m}^2$)	0.25	1.6	2.0
	0.30	1.9	2.4
	0.35	2.2	2.8
GKinetic floating unit (Área no reportada públicamente)	-	N.D.	N.D.

Tabla 11. Potencia eléctrica estimada por unidad bajo escenarios (Conservador, Moderado y Optimista) de coeficiente de potencia, para las velocidades características del hotspot P1 en la Bahía de Tumaco. Fuentes: Tabla 10. (Bachant & Wosnik, 2015; Batten et al., 2008).

Nota: Los valores de P_e corresponden a condiciones de velocidad de percentil. Los rangos de C_p son representativos de la literatura para cada familia tecnológica; las curvas de potencia certificadas por fabricante constituyen insumo necesario para una etapa de prefactibilidad.

Los resultados de la Tabla 11 permiten comparar el potencial eléctrico aprovechable bajo condiciones hidráulicas equivalentes. La Tocardo T-1 presenta una ventaja consistente en todos los escenarios: incluso en el escenario conservador ($C_p = 0.30$), su potencia eléctrica estimada bajo U90 supera en un factor superior a 2.5 a la de la EnviroGen EVG-025 en su escenario optimista ($C_p = 0.35$). Esta diferencia se explica por el mayor área de barrido del rotor (12.57 m^2 frente a 5.78 m^2) y por su diseño específicamente orientado a corrientes bidireccionales de baja velocidad (Batten et al., 2008; QED Naval Limited, 2026). Para la GKinetic, la ausencia de información pública sobre las dimensiones del rotor impide una estimación cuantitativa equivalente, por lo que su evaluación se mantiene en el plano de compatibilidad operacional.

La disponibilidad operacional de cada tecnología depende directamente de la compatibilidad entre su velocidad de arranque y la distribución de frecuencias de velocidad del hotspot P1. A partir de la curva de excedencia obtenida para P1 con la serie horaria modelada ($N = 8,784$ registros, año 2016), se estimó la fracción de tiempo durante la cual cada dispositivo se encontraría en condiciones de generar energía, considerando únicamente su umbral de arranque.

La Tocardo T-1, con una velocidad de arranque de 0.4 m s^{-1} (QED Naval Limited, 2026), permanece por encima de su umbral aproximadamente el 87% del tiempo anual, equivalente a 7,642 horas por año. La GKinetic, cuya velocidad de arranque reportada es 0.6 m s^{-1} (GKinetic Energy, 2022), alcanzaría una disponibilidad estimada de 75% del tiempo anual, valor obtenido por interpolación de la curva de excedencia de P1 entre los umbrales de arranque de las tecnologías evaluadas. La EnviroGen EVG-025, con un umbral de 1.5 m s^{-1} (New Energy Corporation, 2025), operaría únicamente el 3.5% del tiempo anual, dado que ese umbral se sitúa por encima del percentil U90 del hotspot principal (1.29 m s^{-1}). Estos valores se sintetizan en la Tabla 12.

Tecnología	Arranque (m s ⁻¹)	Disponibilidad (%)	h/año	h/mes	h/día
Tocado T-1	0.4	87	7,642	637	20.9
GKinetic	0.6	75	6,588	549	18.0
EnviroGen EVG-025	1.5	3.5	307	26	0.8

Tabla 12. Disponibilidad operacional estimada de las tecnologías preseleccionadas a partir de la curva de excedencia de velocidad en el hotspot P1. Fuente: Estimado por interpolación de la curva de excedencia de P1.

Los valores de la Tabla 12 evidencian una diferencia operacional determinante entre las tecnologías preseleccionadas. La Tocado T-1 y la GKinetic mantienen disponibilidades superiores al 75% del año, lo que se traduce en un funcionamiento prácticamente continuo bajo el régimen mareal de P1, coherente con la naturaleza predecible y recurrente del recurso. En contraste, la EnviroGen EVG-025, cuyo umbral de arranque supera el percentil U90 del hotspot, operaría menos de una hora por día en promedio, lo que limita sustancialmente su viabilidad como sistema de generación base en este contexto, independientemente de su Cp o de su área de barrido.

Esta diferencia de disponibilidad, combinada con la ventaja en potencia eléctrica estimada mostrada en la Tabla 11, refuerza cuantitativamente la preselección del Tocado T-1 como la alternativa más sólida para un desarrollo piloto en el hotspot P1 de la bahía de Tumaco. La cuantificación precisa de la energía anual generada requiere curvas de potencia certificadas por fabricante y una integración explícita sobre la distribución completa de velocidades del sitio, lo que constituye una tarea propia de la etapa de prefactibilidad (IEC, 2013; IRENA, 2020).

Síntesis 4.5

Este capítulo conectó el recurso mareal identificado en el hotspot principal de la bahía de Tumaco con criterios tecnológicos y territoriales de selección. La evaluación priorizó la coherencia entre velocidades características, régimen bidireccional, condiciones batimétricas someras y restricciones logísticas del sitio. La comparación entre diferentes configuraciones hidrocinéticas permitió identificar tecnologías compactas y modulares como las más compatibles con el contexto local. Bajo estas condiciones, la preselección preliminar destaca dispositivos adaptados a aguas someras y de fácil instalación y mantenimiento, planteando a la Tocado T-1, EnviroGen EVG-025 y GKinetic como alternativas coherentes para un desarrollo mareomotriz inicial en Tumaco, sin que ello constituya una selección definitiva. Los análisis de Cp y disponibilidad operacional (Tablas

11 y 12) respaldan cuantitativamente la preselección del Tocardo T-1 y sientan las bases para una etapa de prefactibilidad.

5. Discusión general

El análisis comienza en realidad antes de la hidrodinámica. Parte de un territorio donde la energía no es un dato técnico, sino una condición de vida. El trabajo sitúa a Tumaco dentro de una tensión muy concreta, un municipio costero, insular y disperso, con necesidades energéticas persistentes, enmarcado además en la discusión nacional de las Zonas No Interconectadas. La pregunta no era simplemente si en la bahía de Tumaco había marea, sino si esa marea podía convertirse en evidencia útil para pensar una transición energética situada, técnicamente defendible y territorialmente pertinente. En consecuencia, el valor de la investigación no está solo en haber modelado un sistema costero complejo, sino en haber construido un puente entre el recurso físico, la vulnerabilidad energética y la posibilidad de una solución real para el Pacífico colombiano.

La figura 3 organiza Tumaco como un sistema socioenergético A - M, donde el núcleo urbano - insular convive con islas, bordes costeros, manglares, esteros y corredores internos. Allí se vuelve visible un aspecto clave para la discusión: la energía no se demanda ni se distribuye de forma homogénea. El sector A (Tumaco) concentra población, servicios e infraestructura, los sectores B (Isla El Morro), C (Isla El Bajito), D (Punta Cascajal) y G (Isla La Viciosa) mantienen una relación funcional directa con ese núcleo y hacia fuera aparece una red de asentamientos más dispersos y más vulnerables desde el punto de vista operativo. Esta lectura territorial resulta relevante porque impide pensar el recurso mareomotriz como una posibilidad teórica y obliga a ubicarlo frente a usuarios potenciales, escalas de demanda, restricciones logísticas y sensibilidad ambiental.

Cuando el análisis avanza hacia la caracterización física del sistema, el primer hallazgo relevante es que Tumaco no es una bahía energéticamente uniforme. La figura 2 ya sugería un interior somero y geométricamente complejo, y las figuras 15, 16 y 17 muestran que, aun cambiando la resolución del modelo, la organización general del flujo se mantiene. Esto resulta decisivo, ya que indica que la concentración del recurso no surge de una decisión numérica arbitraria, sino de la propia geometría de la Bahía.

Esa robustez se refuerza con la validación. Las figuras 18 y 19 y la tabla 6 muestran que la configuración seleccionada, TPXO8 + GEBCO2023 - Grid Fine (E6), reproduce de manera satisfactoria la señal mareal observada en Tumaco, con MAE = 0.163 m, RMSE = 0.215 m, $r = 0.973$ y skill de Willmott = 0.986. Con esta base, la figura 20 marca un

punto de transición en la tesis. A partir de allí, el análisis deja de centrarse en la Bahía en general y comienza a identificar la localización del recurso. La ubicación de P1, acompañada por P2, P3 y P4, traduce la hidrodinámica en una geografía energética concreta.

Por la posición del hotspot principal respecto a la sectorización de la figura 3 y a la representación espacial de la figura 31, el corredor dominante se ubica en el eje central de la Bahía, en proximidad funcional al núcleo urbano - insular y a los sectores A, C y D, es decir, Tumaco, Isla El Bajito y Punta Cascajal, además de su continuidad con el sistema urbano - insular que incluye El Morro y La Viciosa. Esto no implica que el beneficio se limite únicamente a estas islas, pero sí sugiere que, en una primera fase, el recurso mejor localizado para una implantación piloto se encuentra más cerca del corazón poblado y operativo del municipio que de los sectores más remotos de la Bahía. Este hallazgo se fortalece al analizar la persistencia del flujo en las figuras 21, 22, 23 y 24 y su posterior traducción energética en las figuras 25 a 29. En P1, la serie de corrientes muestra una señal mareal claramente organizada, con $U_{50} = 0.85 \text{ m s}^{-1}$, $U_{90} = 1.29 \text{ m s}^{-1}$ y $U_{95} = 1.40 \text{ m s}^{-1}$. Cuando esta señal se lleva al plano energético, la diferencia frente a P2 y P3 se amplifica debido a la relación cúbica entre velocidad y potencia. Por ello, la tabla 7 reporta para P1 valores de 315.4 W m^{-2} , $1,104.5 \text{ W m}^{-2}$ y $1,405.4 \text{ W m}^{-2}$ asociados a los percentiles 50, 90 y 95, mientras que la tabla 8 resume un APD de 452.7 W m^{-2} y una energía cinética acumulada anual de $3,977.1 \text{ kWh m}^{-2} \text{ año}^{-1}$.

Estos resultados indican que el recurso no aparece de forma esporádica, sino en pulsos mareales recurrentes y organizados, con máximos instantáneos en P1 del orden de $2.0 - 2.4 \text{ kW m}^{-2}$, y una modulación intraquincenal coherente con el paso entre mareas muertas y mareas vivas. Finalmente, las figuras 28 y 29 consolidan esta lectura, mostrando que la jerarquía $P1 > P2 > P3 > P4$ se mantiene a escala mensual y anual, sin cambios en la organización espacial del recurso. Esto permite pasar de la identificación de corrientes a la delimitación de un corredor dominante con intensidad, persistencia y estabilidad suficientes para sustentar una discusión tecnológica.

Visto así, el recurso mareomotriz en Tumaco deja de ser un concepto teórico y comienza a dialogar directamente con el problema energético presentado en el Capítulo 1, donde se establece que, para marzo de 2025, las Zonas No Interconectadas en Colombia agrupaban 1,664 localidades y una capacidad instalada total de 335,271 kW, de la cual el 78% correspondía a generación diésel y el 22% a Fuentes No Convencionales de Energía Renovable. Asimismo, el informe sectorial 2023 de la Superintendencia de

Servicios Públicos Domiciliarios indica que el componente de generación del CUPS para Nariño alcanzó en promedio 1,406.5 COP/kWh, con costos adicionales de distribución y comercialización que refuerzan el peso económico de la prestación del servicio en estos esquemas. En este contexto, el diésel no es únicamente una tecnología de respaldo, de hecho, en muchos territorios constituye una forma de dependencia estructural, vulnerable al abastecimiento de combustible, a los costos logísticos y a la volatilidad de precios. Frente a este escenario, la energía mareomotriz aparece como una alternativa de diversificación basada en un recurso local, predecible y disponible de manera continua (Aldana et al., 2023; Ramírez, 2025).

A partir de ello surge una pregunta central: ¿qué implicaciones tiene esta caracterización del recurso para el desarrollo energético de Tumaco? En primer lugar, permite demostrar que el Pacífico colombiano no tiene que pensarse únicamente como consumidor periférico de combustibles importados, sino también como productor potencial de energía limpia a partir de su propia dinámica marina. Además, ayuda a identificar dónde conviene comenzar. La tesis respalda una estrategia localizada, en la cual el hotspot P1, por su intensidad energética y su cercanía relativa al núcleo urbano - insular, aparece como el mejor candidato para una fase piloto. Desde el punto de vista de los beneficiarios, esto sugiere que el primer impacto no tendría que buscarse en una electrificación dispersa de todo el municipio, sino en el refuerzo de cargas locales estratégicas e infraestructura cercana, vinculadas a los sectores más conectados del sistema urbano - insular, para luego escalar hacia otras zonas según la factibilidad técnica, el desempeño del sistema y la gobernanza local.

En este contexto, la incorporación de tecnologías mareomotrices compatibles con corrientes moderadas y profundidades someras refuerza la viabilidad del desarrollo energético local. La comparación tecnológica desarrollada en esta investigación muestra que dispositivos compactos y modulares, como Tocardo T-1 y EnviroGen EVG-025, presentan coherencia con las condiciones hidrodinámicas del hotspot principal. Bajo las velocidades representativas del sitio, la potencia hidráulica incidente estimada se sitúa entre 6.29 kW y 17.43 kW por unidad, según la geometría del rotor y el percentil de velocidad considerado.

En particular, la EnviroGen EVG-025 intercepta entre 6.29 kW (U90) y 8.01 kW (U95), mientras que la Tocardo T-1 alcanza entre 13.69 kW (U90) y 17.43 kW (U95). La incorporación de coeficientes de potencia representativos por familia tecnológica sitúa la potencia eléctrica estimada entre 1.6 y 5.5 kW para la EnviroGen EVG-025 y entre

4.1 y 7.0 kW para la Tocardo T-1, bajo los percentiles de velocidad característicos del hotspot principal (Tabla 11). Estos valores, aunque moderados frente a desarrollos mareomotrices de gran escala, resultan relevantes en contextos insulares, donde la generación modular puede implementarse de forma progresiva y con menor complejidad logística.

Desde esta perspectiva, la energía mareomotriz no se plantea como una sustitución inmediata del sistema energético existente, sino como una estrategia complementaria que permita reducir progresivamente la dependencia del diésel. Esta aproximación resulta coherente con la naturaleza del recurso identificado, caracterizado por una disponibilidad predecible y recurrente, que puede integrarse de manera gradual a sistemas híbridos de generación. Con base en eso, el desarrollo mareomotriz en la bahía de Tumaco puede representar una oportunidad para fortalecer la seguridad energética regional, reducir costos operativos asociados al transporte de combustibles y disminuir emisiones (IEA - OES, 2025).

Esta capacidad adquiere mayor relevancia cuando se compara con la demanda típica en Zonas No Interconectadas. Según la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), el consumo de subsistencia residencial en zonas aisladas se sitúa alrededor de 90 kWh/mes por usuario en regiones costeras por debajo de 1,000 msnm. Bajo esta referencia, a modo de ejercicio ilustrativo, una capacidad hipotética instalada de 100 kW con un factor de planta conservador del 30% podría generar aproximadamente 262,800 kWh/año, lo que equivaldría al consumo básico anual de aproximadamente 243 usuarios residenciales. Esta equivalencia permite dimensionar el impacto potencial de un proyecto piloto en comunidades costeras con demanda energética moderada, mostrando que incluso una fase inicial puede representar un aporte energético significativo para el territorio (UPME - PIEC, 2023).

Desde el punto de vista ambiental, la sustitución parcial de generación diésel también representa una reducción significativa de emisiones. Los generadores diésel pequeños emiten en promedio alrededor de 0.76 kg CO₂/kWh generado, valor derivado del factor de emisión por defecto para Gas/Diesel Oil establecido por el IPCC (74,100 kg CO₂/TJ, base calorífica neta; IPCC, 2006, Vol. 2, Cap. 2, Tabla 2.2), considerando eficiencias del 35%. Bajo este rango, una instalación mareomotriz piloto de 262,800 kWh/año podría evitar aproximadamente 200 toneladas de CO₂ anuales, contribuyendo directamente a los objetivos de descarbonización del sector energético colombiano. Este beneficio ambiental resulta particularmente relevante en territorios costeros vulnerables al cambio

climático, donde la transición energética se convierte también en una estrategia de adaptación territorial (IPCC, 2006).

En este sentido, los resultados obtenidos no solo identifican un recurso energético, sino que proponen una ruta de transición energética situada para el Pacífico colombiano, donde el aprovechamiento del recurso marino responde tanto a necesidades locales como a objetivos globales de descarbonización. La bahía de Tumaco emerge así como un escenario técnicamente viable para la energía mareomotriz, con capacidad de contribuir a la diversificación de la matriz energética y al fortalecimiento de la seguridad energética en territorios costeros históricamente vulnerables.

6. Conclusiones

El presente estudio evaluó el potencial energético mareomotriz asociado a corrientes en la bahía de Tumaco mediante un enfoque integrado que combinó análisis de productos de reanálisis oceánico, modelación hidrodinámica con Delft3D-FLOW y estimación del recurso energético a partir de la densidad de potencia cinética del flujo. Este enfoque permitió caracterizar la dinámica mareal del sistema, identificar los corredores principales de aceleración de corrientes dentro de la Bahía y evaluar preliminarmente la compatibilidad entre el recurso identificado y diferentes tecnologías de conversión de corrientes de marea.

6.1 Conclusiones principales

La presente investigación demuestra que la bahía de Tumaco presenta un recurso hidrocínético mareomotriz asociado a corrientes con características energéticas relevantes, concentradas espacialmente en corredores hidrodinámicos definidos y persistentes.

El análisis comparativo entre productos de reanálisis global y la modelación hidrodinámica local evidenció que los reanálisis no logran representar adecuadamente las aceleraciones mareales en ambientes costeros someros como la bahía de Tumaco, lo que refuerza la necesidad de modelos locales de mayor resolución para la evaluación del recurso mareomotriz. A través de la modelación hidrodinámica con Delft3D - FLOW, validada frente a datos observacionales, se identificó que el recurso no se distribuye de manera homogénea en la Bahía, sino que se organiza en zonas de aceleración asociadas a la geometría costera y a la dinámica mareal semidiurna dominante, lo que permitió identificar el hotspot principal P1 como el sector con mayor intensidad energética y estabilidad temporal.

Los resultados muestran que el hotspot principal presenta velocidades características de $U_{50} = 0.85 \text{ m s}^{-1}$, $U_{90} = 1.29 \text{ m s}^{-1}$ y $U_{95} = 1.40 \text{ m s}^{-1}$, lo que se traduce en una densidad de potencia promedio de 452.7 W m^{-2} y una energía cinética acumulada anual de $3,977.1 \text{ kWh m}^{-2} \text{ año}^{-1}$. Estos valores, junto con la persistencia temporal del recurso, evidencian que la bahía de Tumaco dispone de un corredor energético con condiciones favorables para el desarrollo preliminar de proyectos mareomotrices de pequeña y mediana escala. La localización del hotspot principal adquiere relevancia territorial al situarse en proximidad funcional al núcleo urbano - insular de Tumaco y a sectores como Isla El

Bajito y Punta Cascajal, lo que sugiere que una eventual implementación piloto podría beneficiar inicialmente zonas con mayor demanda energética y conectividad operativa. Desde el punto de vista energético, la evaluación tecnológica preliminar muestra que dispositivos modulares compatibles con corrientes moderadas y profundidades someras, como Tocardo T-1 y EnviroGen EVG-025, presentan coherencia con las condiciones del hotspot principal. Bajo las velocidades representativas del sitio, estos dispositivos refuerzan la viabilidad técnica del aprovechamiento mareomotriz en la bahía de Tumaco.

La integración de los resultados físicos y energéticos con las restricciones territoriales del sitio evidenció que el desarrollo mareomotriz en la bahía de Tumaco debe considerar la sensibilidad ecológica de los ecosistemas costeros presentes, incluyendo manglares y hábitats estuarinos, así como los marcos de gobernanza marítima y las condiciones logísticas del territorio, elementos que condicionan la selección tecnológica, la estrategia de implementación y el mantenimiento a largo plazo.

La incorporación progresiva de energía mareomotriz también representa una oportunidad para reducir la dependencia del diésel en las Zonas No Interconectadas, donde la generación eléctrica continúa basada mayoritariamente en combustibles fósiles. La sustitución parcial de generación diésel mediante energía mareomotriz podría evitar aproximadamente 200 toneladas de CO₂ anuales bajo un escenario piloto hipotético de 100 kW, contribuyendo a los objetivos de descarbonización del sector energético colombiano y fortaleciendo la resiliencia energética en territorios costeros vulnerables al cambio climático.

Finalmente, los resultados obtenidos demuestran que la bahía de Tumaco presenta condiciones técnicas, energéticas y territoriales favorables para el desarrollo preliminar de energía mareomotriz asociada a corrientes de marea.

6.2 Limitaciones del estudio

La estimación del potencial mareomotriz presentada en esta tesis corresponde a una evaluación inicial del recurso basada en la modelación hidrodinámica y en la caracterización de la energía cinética del flujo, cuyos resultados deben interpretarse como una primera aproximación técnica al potencial energético de la bahía de Tumaco, orientada a identificar zonas favorables y evaluar la viabilidad preliminar del aprovechamiento mareomotriz.

En primer lugar, el modelo hidrodinámico se implementó en modo barotrópico bidimensional, por lo que las velocidades obtenidas representan valores promediados en la columna de agua. Aunque este enfoque es ampliamente utilizado en estudios de caracterización del recurso mareomotriz y permite identificar patrones espaciales robustos, puede no capturar completamente variaciones verticales en la estructura del flujo, particularmente aquellas asociadas a procesos de estratificación, descargas fluviales o efectos locales de fricción en ambientes someros.

En segundo lugar, la batimetría utilizada proviene del producto global GEBCO, cuya resolución espacial, aunque adecuada para evaluaciones regionales, puede no representar con suficiente resolución las características morfológicas de pequeña escala presentes en la bahía de Tumaco, como canales someros, bancos sedimentarios o estrechamientos entre islas. Dado que la distribución de corrientes mareales depende fuertemente de la geometría del fondo, estas limitaciones pueden influir en la estimación local de velocidades, particularmente en zonas donde el flujo se canaliza y se generan aceleraciones localizadas.

Adicionalmente, las simulaciones se realizaron considerando únicamente el forzamiento mareal astronómico, sin incluir de forma explícita otros forzamientos ambientales como el viento, el oleaje o las descargas fluviales. Aunque la dinámica del sistema en la bahía de Tumaco está dominada por la marea, estos procesos pueden introducir variabilidad adicional en la circulación, especialmente en escalas temporales cortas o durante eventos meteorológicos específicos.

Finalmente, la estimación energética se basa principalmente en la densidad de potencia cinética del flujo, que representa la energía teórica disponible por unidad de área. Si bien se incorporaron estimaciones de potencia eléctrica por unidad bajo escenarios de coeficiente de potencia representativos de la literatura (Tabla 11), la generación eléctrica real dependerá de factores adicionales como las curvas de potencia certificadas por fabricante, las pérdidas del sistema y las condiciones operativas específicas del sitio. Por esta razón, los valores presentados deben interpretarse como una primera aproximación al potencial aprovechable, no como una proyección de producción eléctrica, lo cual corresponde a una etapa de prefactibilidad.

6.3 Recomendaciones y trabajo futuro

Los resultados obtenidos en esta tesis constituyen una primera aproximación científica al potencial mareomotriz de la bahía de Tumaco y permiten identificar líneas prioritarias

para profundizar en la evaluación del recurso y su posible aprovechamiento energético en el Pacífico colombiano.

En primer lugar, se recomienda el desarrollo de campañas de medición in situ de corrientes mediante instrumentos como ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler), con el fin de validar directamente los campos de velocidad obtenidos en la modelación y caracterizar con mayor detalle la estructura vertical del flujo en los principales corredores mareales identificados, particularmente en el hotspot principal P1. Estas mediciones permitirían reducir la incertidumbre en la estimación del recurso y fortalecer la base técnica para futuras evaluaciones de factibilidad.

En segundo lugar, futuras investigaciones podrían incorporar modelación hidrodinámica tridimensional que permita evaluar la influencia de procesos baroclínicos, descargas fluviales y forzamientos atmosféricos sobre la dinámica del sistema. Este tipo de aproximación contribuiría a refinar la caracterización del recurso, especialmente en términos de variabilidad vertical, interacción marea-estuario y posibles efectos locales asociados a la geometría costera compleja de la bahía de Tumaco.

Asimismo, resulta relevante avanzar en evaluaciones ambientales preliminares que analicen la posible interacción entre dispositivos mareomotrices y los ecosistemas marinos presentes en la bahía de Tumaco, incluyendo manglares, estuarios y hábitats costeros. Este tipo de análisis permitiría integrar el aprovechamiento energético dentro de criterios de sostenibilidad y gestión costera, particularmente en un territorio con alta sensibilidad ecológica y socioambiental.

En el ámbito de la selección tecnológica, se recomienda avanzar hacia una evaluación de prefactibilidad técnica y económica que incorpore las curvas de potencia certificadas por fabricante para los dispositivos preseleccionados, permitiendo refinar las estimaciones de potencia eléctrica y disponibilidad operacional presentadas en esta tesis, e incluir estimaciones de CAPEX, OPEX y LCOE para el escenario piloto propuesto en P1.

Finalmente, desde una perspectiva energética regional, el potencial identificado podría explorarse en el contexto de sistemas energéticos híbridos, particularmente en zonas no interconectadas del Pacífico colombiano. En estos contextos, la integración de energía mareomotriz con otras fuentes renovables, como energía solar fotovoltaica y almacenamiento energético, podría contribuir a mejorar la confiabilidad y resiliencia del suministro eléctrico en comunidades costeras. Este enfoque permitiría avanzar hacia una

transición energética local basada en recursos marinos predecibles, reduciendo la dependencia del diésel y fortaleciendo la autonomía energética del territorio.

7. Referencias

- ABS Alaskan, Inc. (2026a). *NewEnergy Envirogen 5kW Hydro-kinetic Turbine*.
<https://absak.com/product/newenergy-envirogen-5kw-hydro-kinetic-turbine/>
- ABS Alaskan, Inc. (2026b). *NewEnergy Envirogen 25kW Hydro-kinetic Turbine*.
<https://absak.com/product/newenergy-envirogen-25kw-hydro-kinetic-turbine/>
- Adcock, T. A. A., Draper, S., Willden, R. H. J., & Vogel, C. R. (2021). The Fluid Mechanics of Tidal Stream Energy Conversion. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 53(1), 287-310. <https://doi.org/10.1146/annurev-fluid-010719-060207>
- Aerocivil. (2023, noviembre 17). *Socialización Modernización Aeropuerto La Florida de Tumaco—Nariño*. Aerocivil. <https://www.aerocivil.gov.co/>
- Agencia de Renovación del Territorio. (2018). *Pacto municipal para la transformacion regional*. [https://centralpdet.renovacionterritorio.gov.co/wp-content/uploads/Documentos/Pacifico%20y%20frontera/SAN%20ANDRES%20D E%20TUMACO.pdf](https://centralpdet.renovacionterritorio.gov.co/wp-content/uploads/Documentos/Pacifico%20y%20frontera/SAN%20ANDRES%20D%20E%20TUMACO.pdf)
- Aguilar, G. E. Q., & Bayona, J. G. R. (2021). Tidal Energy Potential in the Center Zone of the Colombian Pacific Coast. *Inge CuC*, 17(2), 65-75. <https://doi.org/10.17981/ingecuc.17.2.2021.07>
- Aldana, Y. M., Holguín, R. H. T., Bernal, H. H. S., & Díaz, S. S. (2023). *Informe sectorial de la prestacion del servicio de energia electrica vigencia 2023 ZNI*. <https://www.superservicios.gov.co/sites/default/files/inline-files/Informe-sectorial-de-la-prestacion-del-servicio-de-energia-electrica-vigencia-2023-ZNI.pdf>
- Bachant, P., & Wosnik, M. (2015). Performance measurements of cylindrical- and spherical-helical cross-flow marine hydrokinetic turbines, with estimates of exergy efficiency. *Renewable Energy*, 74, 318-325. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.07.049>

- Bagatur, T., & Hamidi, N. (2014). Evaluation With Stream Characteristics Of Downstream Flood Problems After Dam Construction. *Journal Of Environmental Engineering And Landscape Management*, 22, 96-104. <https://doi.org/10.3846/16486897.2013.852555>
- Barbarelli, S., & Nastasi, B. (2021). Tides and Tidal Currents—Guidelines for Site and Energy Resource Assessment. *Energies*, 14(19), 6123. <https://doi.org/10.3390/en14196123>
- Batten, W. M. J., Bahaj, A. S., Molland, A. F., & Chaplin, J. R. (2008). The prediction of the hydrodynamic performance of marine current turbines. *Renewable Energy*, 33(5), 1085-1096. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2007.05.043>
- Bayona, J. G. R., Rodríguez-Rubio, E., & Galvis, J. R. O. (2007). Caracterización Espacio Temporal Del Campo De Vientos Superficiales Del Pacífico Colombiano Y El Golfo De Panamá A Partir De Sensores Remotos Y Datos In Situ. *Boletín Científico CCCP*, 14, 49-68. https://doi.org/10.26640/01213423.14.49_68
- Blunden, L., & Bahaj, A. (2007). Tidal energy resource assessment for tidal stream generators. *Proceedings of The Institution of Mechanical Engineers Part A-journal of Power and Energy - PROC INST MECH ENG A-J POWER*, 221. <https://doi.org/10.1243/09576509JPE332>
- Bryden, I. G., Couch, S. J., Owen, A., & Melville, G. (2007). Tidal current resource assessment. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 221(2), 125-135. <https://doi.org/10.1243/09576509JPE238>
- Byun, D.-S., & Hart, D. E. (2020). A monthly tidal envelope classification for semidiurnal regimes in terms of the relative proportions of the S2, N2, and M2 constituents. *Ocean Science*, 16(4), 965-977. <https://doi.org/10.5194/os-16-965-2020>

- Byun, D.-S., Hart, D. E., Kim, S., & Ha, J. (2023). Classification of monthly tidal envelopes in mixed tide regimes. *Scientific Reports*, 13(1), 4786. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-31657-x>
- Caldwell, C. P., Merrifield, M. A., & Thompson, P. R. (2015). Sea level measured by tide gauges from global oceans. *Uhslc.Soest.Hawaii.Edu*. <https://doi.org/10.7289/V5V40S7W>
- Castillo-Trujillo, A. C., Young-Oh Kwon, Fratantoni, P., Chen, K., Seo, H., Alexander, M. A., & Saba, V. S. (2023). An evaluation of eight global ocean reanalyses for the Northeast U.S. Continental shelf. *Progress in Oceanography*, 219, 103126. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2023.103126>
- Cornett, A. (2008). *Guidance for Assessing Tidal Current Energy Resource*. Ocean Energy Systems. <https://www.ocean-energy-systems.org/publications/oes-reports/guidelines/document/guidance-for-assessing-tidal-current-energy-resource-2008/>
- DANE. (2018). *San Andrés de Tumaco—Nariño*. https://sitios.dane.gov.co/cnpv/app/views/informacion/perfiles/52835_infografia.pdf
- Deltares Systems. (2026). *Delft3D-FLOW User Manual*. https://content.oss.deltares.nl/delft3d4/Delft3D-FLOW_User_Manual.pdf
- Devis Morales, A. (2002). Análisis De Las Condiciones Oceanográficas Y Meteorológicas De La Bahía De Tumaco Y Su Relación Con Eventos De Escala Global. *Boletín Científico CCCP*, 9, 1-21. https://doi.org/10.26640/01213423.9.5_18
- DIMAR. (2023, enero 31). *Resolución número (0047-2023) MD-DIMAR [RESOLUCIÓN]*. https://www.dimar.mil.co/sites/default/files/normatividad/Resolucion_0047_2023.pdf

- DIMAR. (2024, septiembre 10). *Capitanía de Puerto de Tumaco conmemora 120 años de historia*. Portal Marítimo Colombiano. <https://www.dimar.mil.co/capitania-de-puerto-de-tumaco-conmemora-120-anos-de-historia>
- DIMAR. (2026, enero 26). *Pronóstico de Mareas Bahía Tumaco*. <https://cccp.dimar.mil.co/sites/default/MAREAS/Mareas/tumaco.html>
- Du, J., Shen, J., Zhang, Y. J., Ye, F., Liu, Z., Wang, Z., Wang, Y. P., Yu, X., Sisson, M., & Wang, H. V. (2018). Tidal Response to Sea-Level Rise in Different Types of Estuaries: The Importance of Length, Bathymetry, and Geometry. *Geophysical Research Letters*, 45(1), 227-235. <https://doi.org/10.1002/2017GL075963>
- Dykstra, S., Dzwonkowski, B., & Torres, R. (2022). The Role of River Discharge and Geometric Structure on Diurnal Tidal Dynamics, Alabama, USA. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 127. <https://doi.org/10.1029/2021JC018007>
- Eaton, J. W. (2025, octubre 1). *GNU Octave*. GNU Octave. <https://octave.org/index>
- Egbert, G. D., & Erofeeva, S. Y. (2002). *OSU TPXO Tide Models—TPXO Global Tidal Solutions*. OSU TPXO Models. <https://www.tpxo.net/global>
- Egbert, G. D., & Erofeeva, S. Y. (2010). *OSU Tidal Data Inversion*. https://g.hyyb.org/archive/Tide/TPXO/TPXO_WEB/tpxo8_atlas.html
- Etienne, H. (2024a). *Global Ocean Multi Observation Products MULTIOBS_GLO_PHY_MYNRT_015_003*.
- Etienne, H. (2024b). *Global Total (COPERNICUS-GLOBCURRENT), Ekman and Geostrophic currents at the Surface and 15m [Dataset]*. Copernicus Marine Service. https://data.marine.copernicus.eu/product/MULTIOBS_GLO_PHY_MYNRT_015_003/description

- Fuentes, J. E. G., & Galindo, M. G. P. (2011). Determinación del régimen medio y extremo del nivel del mar, en esteros y ríos con dinámica mareal en la Bahía de Tumaco. *Boletín Científico CIOH*, (29), 110-121. <https://doi.org/10.26640/22159045.234>
- Garavelli, L., Copping, A. E., Hemery, L. G., & Freeman, M. C. (2024, septiembre 24). *Environmental State of Science Report*. <https://doi.org/doi:10.2172/2438585>
- GEBCO & The Nippon Foundation. (2024). *GEBCO_grid_2024* (Versión 2024) [Dataset]. https://www.gebco.net/sites/default/files/documents/GEBCO_grid_2024.pdf
- Gerritsen, H., Goede, E., Platzek, F., Kester, J. van, Genseberger, M., & Uittenbogaard, R. (2008). *Validation Document Delft3D-FLOW; a software system for 3D flow simulations*. https://www.researchgate.net/publication/301363924_Validation_Document_Delft_3D-FLOW_a_software_system_for_3D_flow_simulations
- GKinetic Energy. (2022, septiembre 27). *Deployment Milestones to Fast Track Commercial Uptake*. <https://www.gkinetic.com/deployment-milestones-to-fast-track-commercial-uptake-press-release/>
- Grabbe, M. (2008). *Marine Current Energy Conversion*. <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2%3A290632/FULLTEXT01.pdf>
- Guzmán, Á. I., Ortíz, M. M. Z., Casanova-Rosero, R. F., Selvaraj, J. J., & Martínez, A. (2014). La condición ecológica de la bahía de Tumaco (Pacífico colombiano): Evaluación de la calidad del agua y del fitoplancton. *Boletín Científico CIOH*, 32, 3-16. <https://doi.org/10.26640/22159045.260>
- Hicks, S. D. (2006, diciembre). *Understanding Tides*. National Oceanic and Atmospheric Administration National Ocean Service. https://tidesandcurrents.noaa.gov/publications/Understanding_Tides_by_Steacy_finalFINAL11_30.pdf

- Hoyer, S., & Hamman, J. (2017). xarray: N-D labeled Arrays and Datasets in Python. *Journal of Open Research Software*, 5. <https://doi.org/10.5334/jors.148>
- IEA. (2024). *Executive summary – Renewables 2023 – Analysis*. IEA. <https://www.iea.org/reports/renewables-2023/executive-summary>
- IEA - OES. (2024). *Annual Report 2023*. Ocean Energy Systems. <https://www.ocean-energy-systems.org/publications/oes-annual-reports/document/oes-annual-report-2023/>
- IEA - OES. (2025). *Annual Report 2024*. Ocean Energy Systems. <https://www.ocean-energy-systems.org/publications/oes-annual-reports/document/oes-annual-report-2024/>
- IEC. (2013, mayo). *Marine energy – Wave, tidal and other water current converters*. <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/17558/a61d6b39562b4fbb8b0f9c0050b0a9ec/IEC-TS-62600-200-2013.pdf>
- INVEMAR. (2006). *Diagnóstico integral biofísico y socioeconómico relativo al impacto de las fuentes de contaminación terrestre en la bahía de Tumaco, Colombia y lineamientos básicos para un plan de manejo* (J. A. Garay Tinoco, D. I. Gómez López, & J. R. Ortiz Galvis, Eds.). Dirección General Marítima. <https://doi.org/10.26640/9789589810415.2006>
- IPCC. (2006, noviembre). *IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol2.html>
- IPSE. (2024). *INFORME MENSUAL DE LOCALIDADES SIN TELEMETRÍA DE LAS ZNI* (p. 43). Ministerio de Energía. https://ipse.gov.co/documentos_cmn/documentos/informe_mensual_localidades_sin_telemetria/2024/08-INFORME%20LOCALIDADES-SIN-TELEMETRÍA-ZNI-AGOSTO-2024.pdf

- IRENA. (2020). *Innovation outlook: Ocean energy technologies*. International Renewable Energy Agency. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Dec/IRENA_Innovation_Outlook_Ocean_Energy_2020.pdf
- IRENA & OEE. (2023). *Scaling up investments in ocean energy technologies*. https://www.oceanenergy-europe.eu/wp-content/uploads/2023/03/IRENA_OEE_Scaling_up_investment_ocean_energy_2023.pdf
- Kempener, R., & Neumann, F. (2014). *Tidal Energy Technology Brief*. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2014/Tidal_Energy_V4_WEB.pdf
- Korte, A., Windt, C., & Goseberg, N. (2024). Review and assessment of the German tidal energy resource. *Journal of Ocean Engineering and Marine Energy*, 10(1), 239-261. <https://doi.org/10.1007/s40722-023-00309-7>
- Lellouche, J.-M., Galloudec, O. L., Regnie, C., Gennip, V., Chune, S. L., Levier, B., Greiner, E., Drevillon, M., & Szczypta, C. (2025). *Global Ocean Physics Analysis and Forecast* [Dataset]. https://data.marine.copernicus.eu/product/GLOBAL_ANALYSISFORECAST_PHY_001_024/description
- Lewis, M., Neill, S. P., Robins, P. E., & Hashemi, M. R. (2015). Resource assessment for future generations of tidal-stream energy arrays. *Energy*, 83, 403-415. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.02.038>
- Márquez, I. D., Blanco, M. L. R., Olmos, A. V. A., de Barberi, C. B., Barrera, A. C., Blanco, M. L. C., & García, C. H. T. (2020). *Consejo Nacional De Política Económica Y Social Conpes*. <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Económicos/3990.pdf>

- Mosquera, Y. C. C., O, C. A. A., & Poveda, C. A. R. (2022). Influencia de la temperatura y salinidad en la velocidad del sonido en aguas someras de la bahía de Tumaco. *Boletín Científico CIOH*, 41(1). <https://doi.org/10.26640/22159045.2022.586>
- New Energy Corporation. (2025). *EnviroGen Technology*. New Energy Corporation. <https://www.newenergycorp.ca/about-the-tech>
- Nidziko, N. J. (2010). Tidal asymmetry in estuaries with mixed semidiurnal/diurnal tides. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 115(C8). <https://doi.org/10.1029/2009JC005864>
- NOAA. (2023a). *Tides and Water Levels: NOAA's National Ocean Service Education*. https://oceanservice.noaa.gov/education/tutorial_tides/tides01_intro.html
- NOAA. (2023b). *Types and Causes of Tidal Cycles - Tides and Water Levels: NOAA's National Ocean Service Education*. https://oceanservice.noaa.gov/education/tutorial_tides/tides07_cycles.html
- O. Le Galloudec, S. Law Chune, L. Nouel, E. Fernandez, C. Derval, M., Tressol, R. Dussurget, A. Biardeau, & M. Tonani. (2025, noviembre). *PRODUCT USER MANUAL For Global Ocean Physical Analysis and Forecasting Product GLOBAL_ANALYSISFORECAST_PHY_001_024*. EU Copernicus Marine Service. <https://documentation.marine.copernicus.eu/PUM/CMEMS-GLO-PUM-001-024.pdf>
- Offshore Renewable Energy (ORE) & Industry Energiser project (TIGER). (2024). *Tidal Stream Roadmap*. <https://cms.ore.catapult.org.uk/wp-content/uploads/2024/03/ORE-Catapult-Tidal-stream-roadmap-report-2024.pdf>
- Ordóñez-Zuniga, S. A., Correa-Ramirez, M. A., Ricaurte-Villota, C., & Bastidas-Salamanca, M. (2021). The Panama Low Level Jet: Extension, annual cycle and

- modes of variation. *Latin American Journal of Aquatic Research*, 49(5), 750-762.
<https://doi.org/10.3856/vol49-issue5-fulltext-2591>
- Parker, B. B. (2007, julio). *Tidal Analysis and Prediction*. National Oceanic and Atmospheric Administration National Ocean Service.
https://tidesandcurrents.noaa.gov/publications/Tidal_Analysis_and_Predictions.pdf
- Parrado, D., & Rueda-Bayona, J. G. (2024). Three-Dimensional Hydrodynamic and CFD Modeling of a Tidal Barrage Power Plant without Sluicing in Buenaventura, Colombia. *Infrastructures*, 9(8), 127. <https://doi.org/10.3390/infrastructures9080127>
- Pawlowicz, R., Beardsley, B., & Lentz, S. (2002). Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T_TIDE. *Computers & Geosciences*.
[https://doi.org/10.1016/s0098-3004\(02\)00013-4](https://doi.org/10.1016/s0098-3004(02)00013-4)
- Phillips, E., Wren, S., King, G., & San Martin, E. (2025). *Tidal Stream Energy Project: Collision Risk Data and Evidence Summary*.
https://tethys.pnnl.gov/sites/default/files/publications/Philips-et-al-2025_0.pdf
- Polagye, B., Cleve, B. V., Copping, A., & Kirkendall, K. (2010, marzo 25). *Environmental Effects of Tidal Energy*. <https://spo.nmfs.noaa.gov/sites/default/files/tm116.pdf>
- Prada, A. L. H., & Hernandez, C. E. (2020). *Desarrollo de Mapas de Sensibilidad Ambiental ante derrames de hidrocarburos a través de la metodología de Índice de Sensibilidad Ambiental para los litorales Caribe y Pacífico colombiano*.
<https://www.dimar.mil.co/sites/default/files/informes/Documento-tecnico-construccion-de-Mapas-de-Sensibilidad-Ambiental.pdf>
- Pugh, D. T. (1987). *Tides, surges and mean sea level*. Wiley.
- Pugh, D., & Woodworth, P. (2014). *Sea-level science: Understanding tides, surges, tsunamis and mean sea-level changes*. Cambridge University Press.

QED Naval Limited. (2026). *Technology* – QED Naval Limited.
<https://qednaval.co.uk/technology/>

Ramírez, D. (2025, mayo 15). Columna del Director: Zonas No Interconectadas: La Urgencia de una Transición Energética con Monitoreo Inteligente. *Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas para Las Zonas No Interconectadas - IPSE*. <https://ipse.gov.co/blog/2025/05/15/columna-del-director-zonas-no-interconectadas-la-urgencia-de-una-transicion-energetica-con-monitoreo-inteligente/>

REN21. (2024). *Market and Industry Trends | Ocean Power*. <https://www.ren21.net/gsr-2024/>

RIMISP. (2017). *Lectura Territorial de San Andrés de Tumaco*. https://www.rimisp.org/wp-content/files_mf/1514388162Producto2_LecturaTerritorialTumaco_GRANTFIDA1.pdf

Rivas, C. B., Machuca, M. C. Á., & Pinzón, D. C. N. (2014). Caracterización de la geomorfología costera y sus coberturas vegetales asociadas, a través de sensores remotos, en la costa de Tumaco, Nariño. *Boletín Científico CIOH*, 32, 27-46.
<https://doi.org/10.26640/22159045.262>

Rodríguez-Rubio, E. (2013). A multivariate climate index for the western coast of Colombia. *Advances in Geosciences*, 33, 21-26. <https://doi.org/10.5194/adgeo-33-21-2013>

Roisin, B. C. (2011). *Introduction to Geophysical Fluid Dynamics—Physical and Numerical Aspects* (Vol. 101). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/C2009-0-00052-X>

Rueda-Bayona, J. G., Cabello Eras, J. J., Caicedo-Laurido, A. L., Guzmán, A., & García Vélez, J. L. (2023). Hydrokinetic Energy and Transient Accelerations of Marine Currents in Colombian Nearshore Waters. *Water*, 15(15), 2725.
<https://doi.org/10.3390/w15152725>

- Rueda-Bayona, J. G., Franco, V. O., & Cabello Eras, J. J. (2026). Identifying materials in tidal energy technology and their effects to human health, ecosystems, and resources: A life cycle assessment perspective. *Cleaner Production Letters*, *10*, 100137. <https://doi.org/10.1016/j.clpl.2026.100137>
- Rueda-Bayona, J. G., García Vélez, J. L., & Parrado-Vallejo, D. M. (2023). Effect of Sea Level Rise and Access Channel Deepening on Future Tidal Power Plants in Buenaventura Colombia. *Infrastructures*, *8*(3), 51. <https://doi.org/10.3390/infrastructures8030051>
- Sanikommu, S., Langodan, S., Dasari, H. P., Zhan, P., Krokos, G., Abualnaja, Y. O., Asfahani, K., & Hoteit, I. (2023). Making the Case for High-Resolution Regional Ocean Reanalyses: An Example with the Red Sea. *Bulletin of the American Meteorological Society*, *104*(7), E1241-E1264. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-21-0287.1>
- Schuler, H., & Dupont, V. (2025, abril). *Ocean Energy Stats & Trends 2024* [Reporte]. Ocean Energy Europe. <https://www.oceanenergy-europe.eu/wp-content/uploads/2025/04/Ocean-Energy-Stats-Trends-2024.pdf>
- Shields, M., Woolf, D., Grist, E., Kerr, S., Jackson, A. C., Harris, R., Bell, M., Beharie, R., Want, A., Osalusi, E., & Side, J. (2011). Marine renewable energy: The ecological implications of altering the hydrodynamics of the marine environment. *Ocean & Coastal Management*, *54*, 2-9. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2010.10.036>
- Superservicios. (2017). *Zonas no interconectadas—ZNI*. <https://www.superservicios.gov.co/sites/default/files/inline-files/diagnosticozni-superservicios-oct-2017%20%281%29.pdf>

Superservicios. (2025). *Boletín Tarifario* ZNI.

<https://www.superservicios.gov.co/sites/default/files/2025-12/Boletin-Tarifario-ZNI-I-Trimestre-de-2025.pdf>

Tejada Vélez, C. E., Otero Díaz, L. J., Castro Suárez, L. Á., & Afanador Franco, F. (2003). *Aportes al entendimiento de la Bahía de Tumaco. Entorno oceanográfico, costero y de riesgos*. Dirección General Marítima. <https://doi.org/10.26640/9583352225.2003>

TETHYS. (2019a, julio). *Sihwa Tidal Power Plant | Tethys*. TETHYS. <https://tethys.pnnl.gov/project-sites/sihwa-tidal-power-plant>

TETHYS. (2019b, agosto). *La Rance Tidal Barrage | Tethys*. TETHYS. <https://tethys.pnnl.gov/project-sites/la-rance-tidal-barrage>

TETHYS. (2025, enero). *MeyGen Tidal Energy Project | Tethys*. TETHYS. <https://tethys.pnnl.gov/project-sites/meygen-tidal-energy-project>

Thiébot, J., Coles, D. S., Bennis, A.-C., Guillou, N., Neill, S., Guillou, S., & Piggott, M. (2020). Numerical modelling of hydrodynamics and tidal energy extraction in the Alderney Race: A review. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 378(2178), 20190498. <https://doi.org/10.1098/rsta.2019.0498>

Thiébot, J., Dirieh, N. D., Guillou, S., & Guillou, N. (2021). The Efficiency of a Fence of Tidal Turbines in the Alderney Race: Comparison between Analytical and Numerical Models. *Energies*, 14(4), 892. <https://doi.org/10.3390/en14040892>

Thomas, O. E., & Roland, U. (2021). Mathematical Modelling and Simulation of Tidal Energy. *International Journal of Science and Engineering Applications*, 10(03). <https://ijsea.com/archive/volume10/volume10issue3.pdf>

- UPME - PIEC. (2023). *República de Colombia Ministerio de Minas y Energía*.
https://docs.upme.gov.co/SIMEC/Energia%20Electrica/PIEC/2019-23/PIEC_2019-2023_VF.pdf
- Vallis, G. K. (2017). *Atmospheric and Oceanic Fluid Dynamics: Fundamentals and Large-Scale Circulation* (2.^a ed.). Cambridge University Press.
<https://doi.org/10.1017/9781107588417>
- Vivid Economics. (2019). *Energy Innovation Needs Assessment Tidal Stream*. Department for Business, Energy and Industrial Strategy.
<https://assets.publishing.service.gov.uk/media/5dc58a24ed915d395410b758/energy-innovation-needs-assessment-tidal-stream.pdf>
- Wilks, D. S. (2011). *Statistical methods in the atmospheric sciences* (3rd ed.). Elsevier.
https://librarysearch.abertay.ac.uk/discovery/fulldisplay?docid=alma991678649703201&context=L&vid=44UAD_INST:44UAD_V1&lang=en&search_scope=MyInst_and_CI&adaptor=Local%20Search%20Engine&isFrbr=true
- Willmott, C. I. (1981). *On the validation models*. Center for Climatic Research.
<https://www.researchgate.net/profile/Suman-Maity-3/post/Query-regarding-Index-of-Agreement-Calculation/attachment/5d471fe7cfe4a7968dbccac6/AS%3A788239338205184%401564942311802/download/wilmott1981.pdf>
- Yepes, J., Poveda, G., Mejía, J. F., Moreno, L., & Rueda, C. (2019). CHOCO-JEX: A Research Experiment Focused on the Chocó Low-Level Jet over the Far Eastern Pacific and Western Colombia. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 100(5), 779-796. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-18-0045.1>