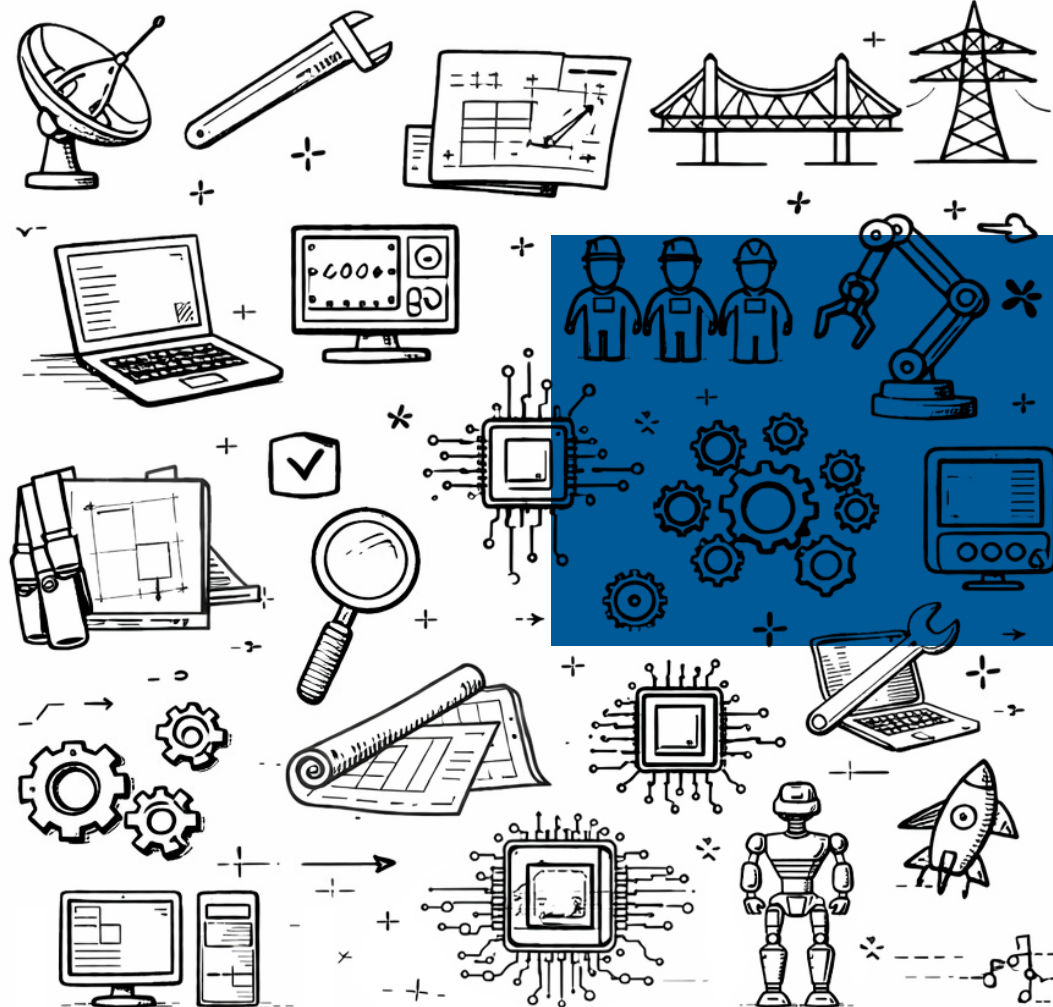




4

EL LENGUAJE DE LAS OLAS: PARTICIONAMIENTO ESPECTRAL DE SISTEMAS DE OLEAJE DURANTE EL VERANO BOREAL EN OCÉANO PACÍFICO COLOMBIANO

THE LANGUAGE OF WAVES: SPECTRAL PARTITIONING OF WAVE SYSTEMS DURING THE BOREAL SUMMER IN THE COLOMBIAN PACIFIC OCEAN

¹⁰ Darwin Aramburo Palacios

¹¹ Denis Alberto Castro Rodríguez

¹² Sandra Patricia Rivas Bonilla

¹⁰ Magister en Matemáticas Aplicada, Grupo de investigación en Gestión de la Ciencias, Tecnología, Ingeniería y Matemáticas (GESTEM+B); Grupo de Investigaciones pedagógicas en el área de las Matemáticas (INPEMA), Universidad Tecnológica del Chocó, d-darwin.aramburo@utch.edu.co, <https://orcid.org/0000-0002-9117-4676>, https://scienti.minciencias.gov.co/cvlac/visualizador/generarCurriculoCv.do?cod_rh=0001456090.

¹¹ Doctor en Ingeniería, Grupo de investigación en Gestión de la Ciencias, Tecnología, Ingeniería y Matemáticas (GESTEM+B); Grupo de Investigaciones pedagógicas en el área de las Matemáticas (INPEMA), Universidad Tecnológica del Chocó, dcastro@utch.edu.co, <https://orcid.org/0000-0002-6745-8310>, https://scienti.minciencias.gov.co/cvlac/visualizador/generarCurriculoCv.do?cod_rh=0001377349.

¹² Doctora en gestión, Grupo de investigación en Gestión de la Ciencias, Tecnología, Ingeniería y Matemáticas (GESTEM+B); Grupo de Investigaciones pedagógica en el área de las Matemáticas, (INPEMA), Universidad Tecnológica del Chocó, d-sandra.rivas@utch.edu.co, <https://orcid.org/0000-0002-7382-6554>, https://scienti.minciencias.gov.co/cvlac/visualizador/generarCurriculoCv.do?cod_rh=0001376075.

RESUMEN

El presente trabajo aborda la caracterización de sistemas de oleaje mediante en el punto de referencia 4.74°N, 80.9°W, ubicado en el Pacífico colombiano, durante el verano boreal (junio–julio–agosto). El análisis responde a la necesidad de comprender la dinámica multimodal de esta región, donde confluyen oleajes *swell* y oleajes de viento locales que condicionan la altura significativa (H_s), con implicaciones directas para la seguridad costera, la navegación, la pesca y la planificación portuaria. El objetivo fue comprender los patrones de oleaje identificando y describiendo los sistemas dominantes en la zona de estudio. Para tal fin, se aplicó una técnica de particionamiento espectral direccional sobre espectros 2D, lo que permitió determinar magnitud, frecuencia pico y dirección de propagación de cada sistema, así como su evolución intermensual.

Se identificaron cuatro sistemas principales: (i) un *swell* de largo periodo (≈ 0.07 Hz, ~ 14 s) proveniente del suroeste, que se consolida como el componente dominante; (ii) un mar de viento local (≈ 0.145 Hz, ~ 7 s) generado en la cuenca colombiana bajo la influencia del Chorro de Chocó; (iii) un mar de viento regional o *swell* joven del Pacífico oriental (≈ 0.145 Hz, ~ 7 s), de menor persistencia; (iv) una componente de periodo intermedio (≈ 0.11 Hz, ~ 9 s) procedente del sur-oriental, que se manifiesta de manera esporádica. Durante junio, el *swell* del suroeste y el mar de viento local se mantienen activos; en julio, el *swell* domina con H_s que superó los 2m en la segunda semana; y en agosto, el mar de viento local se refuerza, coherente con la intensificación estacional del Chorro de Chocó, mientras los sistemas secundarios reaparecen de forma limitada.

Estos resultados demuestran que el particionamiento espectral es una herramienta eficaz para descomponer la señal multimodal del oleaje, ofreciendo mayor sensibilidad que los parámetros escalares integrados del oleaje, permitiendo ubicar los momentos de mayor energía por sistemas de oleaje. Además, la metodología es transferible a otras latitudes del Pacífico y de distintas cuencas oceánicas, aportando conocimiento útil para la gestión costera, la planificación portuaria y la reducción del riesgo marino. En conclusión, el estudio revela que el *swell* del suroeste actúa como modo dominante y persistente, sobre el cual se modula la variabilidad del mar de viento local y regional, configurando un régimen multimodal que define la dinámica espectral en el Pacífico colombiano durante JJA.

PALABRAS CLAVE: oleaje, particionamiento espectral, altura significativa, mar de viento, Pacífico colombiano.

¿Cómo citar este capítulo?

En APA: Aramburo, D., Castro, D. y Sandra, R. (2026). El lenguaje de las olas: Particionamiento espectral de sistemas de oleaje durante el verano boreal en Océano Pacífico colombiano. En Bejarano-Díaz, D. y Guzmán-Brand, V. (Ed.). Ingeniería, ciencia y tecnología: perspectivas desde la investigación aplicada (pp. 69-85). Editorial TEINCO.

DOI del capítulo: <https://doi.org/10.64351/978-628-97363-5-9.cap.4>

ABSTRACT

This study addresses the characterization of wave systems at the reference point 4.74°N, 80.9°W, located in the Colombian Pacific, during the boreal summer (June–July–August). The analysis addresses the need to comprehend the multimodal dynamics of this region, where long-period swells and locally generated wind seas converge, influencing the significant wave height (H_s) and having direct implications for coastal safety, navigation, fishing activities, and port planning. The objective was to understand wave patterns by identifying and describing the dominant systems in the study area. To this end, a directional spectral partitioning technique was applied to 2D wave spectra, enabling the determination of the magnitude, peak frequency, and propagation direction of each system, as well as their intramonthly evolution.

Four main systems were identified: (i) a long-period swell (≈ 0.07 Hz, ~ 14 s) originating from the southwest, consolidated as the dominant component; (ii) a local wind sea (≈ 0.145 Hz, ~ 7 s) generated in the Colombian basin under the influence of the Chocó Jet; (iii) a regional wind sea or young swell from the Eastern Pacific (≈ 0.145 Hz, ~ 7 s), with lower persistence; and (iv) an intermediate-period component (≈ 0.11 Hz, ~ 9 s) coming from the southeast, occurring sporadically. During June, the southwestern swell and the local wind sea remain active; in July, the swell dominates, with H_s exceeding 2 m during the second week; and in August, the local wind sea intensifies—consistent with the seasonal strengthening of the Chocó Jet—while the secondary systems reappear only marginally.

These results demonstrate that spectral partitioning is an effective tool to decompose the multimodal wave signal, offering greater sensitivity than integrated scalar wave parameters and enabling the identification of periods of maximum energy by the wave system. Moreover, the methodology is transferable to other latitudes of the Pacific and to different ocean basins, providing useful knowledge for coastal management, port planning, and marine risk reduction. In conclusion, the study reveals that the southwestern swell acts as the dominant and persistent mode, upon which the variability of the local and regional wind seas is modulated, shaping a multimodal regime that defines the spectral dynamics in the Colombian Pacific during JJA.

KEYWORDS: wave, spectral partitioning, significant wave height, swell, wind sea, Colombian Pacific.

How to cite this chapter?

In APA: Aramburo, D., Castro, D. and Sandra, R. (2026). El lenguaje de las olas: Particionamiento espectral de sistemas de oleaje durante el verano boreal en Océano Pacífico colombiano. In Bejarano-Díaz, D. and Guzmán-Brand, V. (Ed.). Ingeniería, ciencia y tecnología: perspectivas desde la investigación aplicada (pp. 69-85). Editorial TEINCO.

Chapter DOI: <https://doi.org/10.64351/978-628-97363-5-9.cap.4>

INTRODUCCIÓN

El Océano Pacífico constituye uno de los escenarios más dinámicos e impredecibles de la Tierra. Las olas que llegan a las costas no son simples, representan la superposición de múltiples trenes de oleaje generados por vientos locales (*wind sea*) y por tormentas lejanas (*swell*), que se propagan a lo largo de miles de kilómetros (Ardhuin et al., 2010; Hanson & Phillips, 2001; Kistner & Caichac, 2024; Portilla-Yandún et al., 2009; Qu et al., 2024; Semedo et al., 2011; Yu, 2025). Para describir rigurosamente esta complejidad se utilizan los espectros bidimensionales de oleaje, los cuales distribuyen la energía en función de la frecuencia y la dirección. No obstante, los espectros rara vez son unimodales, lo que dificulta su interpretación directa. Por ello, en las últimas dos décadas se han desarrollado técnicas de particionamiento espectral, con el fin de descomponer los espectros en sistemas coherentes de oleaje que permiten identificar, rastrear y caracterizar las diferentes contribuciones energéticas (Mazzaretto et al., 2024; Portilla-Yandún & Cavaleri, 2019; Wyatt et al., 2022; Zheng et al., 2024).

Los trabajos pioneros de Hanson y Phillips (2001) y de Portilla et al. (2009, 2015) marcaron un antes y un después en este campo, pues establecieron metodologías que hoy son referencia obligada para diferenciar entre componentes de viento y *swell*. Más recientemente, la investigación se ha diversificado hacia la aplicación de técnicas de inteligencia artificial y de aprendizaje profundo, como el método automático PI-ViT-GAN aplicado a espectros satelitales (Lv et al., 2024) o los modelos híbridos de seguimiento multimodal (Zheng et al., 2024). Estos avances muestran cómo el particionamiento espectral no solo es una herramienta de análisis, sino también un puente hacia aplicaciones operacionales en oceanografía y climatología.

La importancia de entender los sistemas de oleaje trasciende el ámbito académico. Estudios como los de Mazzaretto et al. (2024), que realizaron un análisis costero global de sistemas espectrales, o los de Wyatt et al. (2024), quienes demostraron la capacidad de los radares HF para separar *swell* y *wind sea*, ponen en evidencia que estas metodologías tienen un impacto directo en la gestión costera. En el mismo sentido, el trabajo de Liu et al. (2025) sobre el uso de espectros SAR para comparar particiones con el modelo WW3 confirma que el monitoreo espectral de alta resolución es esencial para validar y mejorar los sistemas de predicción numérica.

El problema central que orienta este capítulo radica en la escasa articulación entre el análisis espectral y los sistemas de prevención de desastres naturales. A pesar de que existen tecnologías específicas para la detección temprana de tsunamis como boyas de presión de fondo (Angeli et al., 2025) o radares costeros (Dzvonkovskaya et al., 2018), aún son limitados los estudios que vinculan directamente la lectura fina de espectros de oleaje con episodios de alerta. En este sentido, investigaciones recientes como la de Constantinou et al. (2023), quien aplica *deep learning* para detectar ondas internas asociadas a tsunamis, son ejemplo valioso de cómo la ciencia espectral se puede conectar con fenómenos extremos.

Desde una perspectiva científica, analizar espectros de oleaje particionados durante un periodo crítico (junio–agosto de 2025), permite comprender mejor cómo se manifiestan dinámicas oceánicas anómalas en la región del Pacífico Oriental; desde un plano social, este análisis constituye una oportunidad para fortalecer la cultura de prevención en comunidades costeras del Pacífico colombiano, donde la vulnerabilidad frente a tsunamis es alta y los mecanismos de monitoreo presentan un nivel de desarrollo limitado. En este sentido, los objetivos de esta investigación son analizar espectros de oleaje obtenidos en la cuenca del Pacífico Oriental entre junio y agosto de 2025; aplicar técnicas de particionamiento espectral para identificar y caracterizar sistemas dominantes de *swell* y *wind sea*; y, finalmente, discutir la relevancia de estos resultados en el marco de los sistemas de alerta temprana y la transferencia de conocimiento hacia la sociedad.

En cuanto a la transferencia tecnológica y educativa, el uso del particionamiento espectral se puede integrar en sistemas numéricos como WW3 o SWAN, ampliando las capacidades de predicción de oleaje en tiempo real. Además, el ejercicio

pedagógico de enseñar a “leer” un espectro de oleaje constituye una herramienta valiosa para estudiantes universitarios y comunidades costeras, pues traduce conceptos físicos complejos en una narrativa accesible sobre cómo el mar comunica riesgos y oportunidades. Los avances recientes en particionamiento muestran que la frontera entre investigación y aplicación práctica se acorta rápidamente. Incorporar estas herramientas en protocolos de prevención en el Pacífico colombiano no solo contribuiría a salvar vidas en escenarios extremos, sino que también reforzaría la confianza de la sociedad en la ciencia.

Las conclusiones preliminares que emergen de este marco introductorio son claras: en primer lugar, el particionamiento espectral es indispensable para comprender la coexistencia de sistemas de oleaje y su dinámica temporal. Adicionalmente, la integración de estos análisis con protocolos de alerta temprana aún es incipiente, pero constituye un área de gran potencial. Finalmente, el estudio del periodo junio–agosto 2025, que abarca un episodio real en el que se presentó una alerta de tsunami, ofrece un caso único para sensibilizar a la comunidad sobre la necesidad de unir ciencia y prevención en el Océano Pacífico.

OBJETIVOS E HIPÓTESIS

Objetivo general

- Analizar los espectros de oleaje registrados en la cuenca del Océano Pacífico Oriental entre junio y agosto de 2025, aplicando técnicas de particionamiento espectral para identificar sistemas dominantes de oleaje.

Objetivos específicos

- Aplicar técnicas de particionamiento espectral con el fin de descomponer los espectros en sistemas coherentes de *wind sea* y *swell*.
- Describir la evolución temporal y espacial de los sistemas de oleaje comparando su variabilidad entre los meses del verano boreal.
- Analizar los parámetros escalares de los sistemas de oleaje encontrados en la zona de estudio, tales como altura significativa (H_s), periodo pico (T_p), periodo medio (T_m) y dirección media (D_p), con el fin de caracterizar su dinámica.

Hipótesis

En coherencia con los objetivos anteriormente propuestos, se plantea como hipótesis que el particionamiento espectral identifica de manera robusta sistemas coexistentes aún bajo alta variabilidad atmosférica-oceánica; que entre junio y agosto emergen diferencias significativas en la intensidad y frecuencia relativa de *swell* y *wind sea*, asociadas a forzamientos estacionales y remotos del Pacífico; así como que la integración del particionamiento y del análisis de parámetros escalares fortalece la transferencia tecnológica y la educación científica, contribuyendo a la mejora de los sistemas de alerta temprana y a la concientización social sobre riesgos costeros.

MARCO CONCEPTUAL O TEÓRICO

El estudio de los procesos oceánicos ha avanzado notablemente en las últimas décadas, impulsado por la necesidad de comprender la dinámica natural del mar y de responder a los riesgos asociados a fenómenos extremos como los tsunamis.

En este marco, los espectros de oleaje se han consolidado como una herramienta fundamental para describir la distribución de energía de las olas en función de la frecuencia y la dirección. La aplicación de técnicas de particionamiento espectral permite descomponer estos espectros en sistemas coherentes, mientras que el análisis de parámetros escalares por sistemas de oleaje facilita la interpretación de la información para fines de investigación, monitoreo y prevención. Este apartado reúne los principales fundamentos teóricos y metodológicos que sustentan la investigación, incluyendo los aportes de autores clásicos, desarrollos recientes y contribuciones regionales en el Pacífico Oriental.

El oleaje es la expresión visible de la interacción entre procesos atmosféricos y oceánicos, se origina principalmente a partir de la transferencia de energía del viento a la superficie del mar, generando sistemas de olas locales (*wind sea*), caracterizados por periodos cortos, direcciones variables y alta irregularidad. Estos sistemas suelen coexistir con oleajes lejanos (*swell*), generados por tormentas remotas que pueden viajar miles de kilómetros con notable regularidad direccional y espectral (Aramburo et al. 2022; Portilla-Yandún et al., 2015). En consecuencia, el oleaje observado en un punto específico rara vez es simple; por el contrario, representa la superposición de múltiples trenes que aportan energía simultáneamente. Esta complejidad ha sido ampliamente documentada en la literatura, mostrando cómo la interacción entre *wind sea* y *swell* define la dinámica oceánica regional y global (Ardhuin et al., 2010; Kalappurakal et al., 2025).

Para representar esta diversidad de sistemas de oleaje, se utilizan los espectros direccionales de oleaje, los cuales distribuyen la energía en dos dimensiones: frecuencia y dirección, estos permiten cuantificar no solo la energía total, sino también identificar picos dominantes que corresponden a distintos sistemas oceánicos. La teoría espectral, perfeccionada a partir de los años setenta y consolidada con observaciones de boyas, radares y satélites, reveló que los espectros rara vez son unimodales; pues en la mayoría de los casos se observa la coexistencia de varios picos de energía, lo que condujo al desarrollo de metodologías orientadas a separar, identificar y caracterizar cada contribución mediante particionamiento espectral (Hanson et al., 2001; Portilla et al., 2009).

El particionamiento espectral consiste en descomponer un espectro complejo en subsistemas coherentes de oleaje. Los avances iniciales de esta metodología se remontan a finales del siglo XX, pero fueron Hanson y Phillips (2001) quienes establecieron un procedimiento automatizado que permitió detectar picos espectrales y asociarlos a sistemas específicos. Posteriormente, los aportes de Portilla et al. (2009) introdujeron un método sistemático de particionamiento bidimensional que ha sido ampliamente utilizado para diferenciar entre *wind sea* y *swell*. Este enfoque fue extendido por Portilla-Yandún et al. (2015) y Portilla-Yandún y Cavaleri (2019), quienes aplicaron el particionamiento a análisis estadísticos de largo plazo, evaluando la persistencia, variabilidad y distribución de los sistemas de oleaje.

El desarrollo reciente ha llevado el particionamiento espectral a nuevas fronteras metodológicas, por ello, Lv et al. (2024) presentaron un algoritmo automático basado en redes neuronales generativas y visión computacional para espectros satelitales; mientras que Zheng et al. (2024) combinaron el particionamiento con técnicas de seguimiento de sistemas espectrales multimodales. A escala global, Mazzaretto et al. (2024) llevaron a cabo un análisis comparativo de los sistemas costeros de oleaje, demostrando la utilidad del particionamiento para evaluar riesgos regionales. Por otra parte, en contextos de monitoreo operativo, Wyatt et al. (2022) mostraron que los radares de alta frecuencia pueden separar *wind sea* y *swell*, mientras que Liu et al. (2025) propusieron banderas de calidad para espectros SAR al compararlos con el modelo WW3. Estas innovaciones reflejan la versatilidad del particionamiento como herramienta científica y aplicada.

Más allá de la identificación de sistemas, el análisis espectral permite obtener parámetros escalares para los distintos sistemas de oleaje que sintetizan la información contenida en los espectros. La altura significativa (H_s) se utiliza como

indicador de la energía total; el periodo pico (T_p) señala la frecuencia dominante; el periodo medio (T_m) resume la media temporal de los trenes de olas, y la dirección media (D_p) refleja la orientación predominante del oleaje. Estos parámetros son esenciales en la ingeniería costera, la navegación, los pronósticos marinos y la comunicación con comunidades no técnicas. Su utilidad radica en que convierten la complejidad de los espectros en valores fácilmente interpretables, sin perder su relación con la dinámica subyacente.

El vínculo entre particionamiento espectral y prevención de riesgos se hace patente en el caso de los tsunamis. Aunque estos fenómenos no tienen el mismo origen que el oleaje generado por viento, su paso a través del océano puede alterar patrones espectrales y producir señales detectables en datos de alta resolución. Dzvonkovskaya et al. (2018) mostraron que los radares de alta frecuencia pueden registrar corrientes superficiales anómalas inducidas por tsunamis, mientras que Constantinou et al. (2023) exploraron la aplicación de algoritmos de aprendizaje profundo para detectar ondas internas relacionadas con estos eventos. Angeli et al. (2025) revisaron los métodos de detección mediante boyas de presión de fondo, destacando la importancia de sistemas multiparamétricos para alertas más confiables. Estos aportes sugieren que la integración entre la ciencia del oleaje y los sistemas de alerta temprana es no sólo posible, sino también necesaria.

En este panorama internacional, es importante reconocer los aportes de investigadores latinoamericanos que han profundizado en el estudio de los sistemas espectrales en el Pacífico. Al respecto, Aramburo et al. (2022) analizaron el impacto del fenómeno ENSO en la variabilidad del oleaje en el Pacífico, distinguiendo entre *wind sea* y *swell*. Su investigación demostró cómo las fases cálida y fría de ENSO modifican los parámetros escalares y la energía relativa de los sistemas espectrales, aportando evidencia sobre la sensibilidad del Pacífico a forzamientos climáticos de gran escala.

El océano Pacífico, escenario de alta actividad sísmica y volcánica, es también el espacio donde confluyen forzamientos climáticos de gran escala como ENSO y riesgos asociados a tsunamis. La alerta emitida el 30 de julio de 2025, tras un sismo de magnitud 8,8 en Kamchatka, constituye un recordatorio reciente de la vulnerabilidad de las costas y de la necesidad de contar con herramientas robustas para el monitoreo. Analizar espectros de oleaje particionados en torno a este evento representa una oportunidad no solo para contribuir a la ciencia básica, sino también para transferir conocimiento a la sociedad y a comunidades costeras.

La literatura científica señala que el futuro del análisis espectral reside en la integración de observaciones, modelos numéricos y algoritmos de inteligencia artificial. Qu et al. (2024) introdujeron el método WA-PO para espectros satelitales SWIM, mientras que Yu (2025) desarrolló un enfoque que incorpora viento y topografía en la separación de oleajes alrededor de islas. Estas innovaciones, junto con la validación de métodos híbridos y la comparación de modelos de reanálisis y observaciones, amplían las perspectivas para investigaciones aplicadas en prevención y gestión costera.

En conclusión, el marco conceptual de esta investigación se sustenta en tres pilares fundamentales. Primero, la naturaleza multimodal del oleaje, que exige representaciones espectrales bidimensionales y su descomposición en sistemas coherentes. Segundo, la evolución metodológica del particionamiento espectral, desde los aportes fundacionales de Hanson y Phillips (2001) y Portilla et al. (2009, 2015) hasta las innovaciones recientes basadas en inteligencia artificial y monitoreo operacional (Liu et al., 2025; Lv et al., 2024; Mazzaretto et al., 2024; Zheng et al., 2024). Tercero, la relevancia social de este conocimiento, ejemplificada en la vinculación entre análisis espectral y prevención de tsunamis (Angeli et al., 2025; Constantinou et al., 2023; Dzvonkovskaya et al., 2018), y reforzada por las investigaciones de Aramburo y Montoya (2022) que contextualizan estas metodologías en el Pacífico Oriental Tropical.

MATERIALES Y MÉTODOS

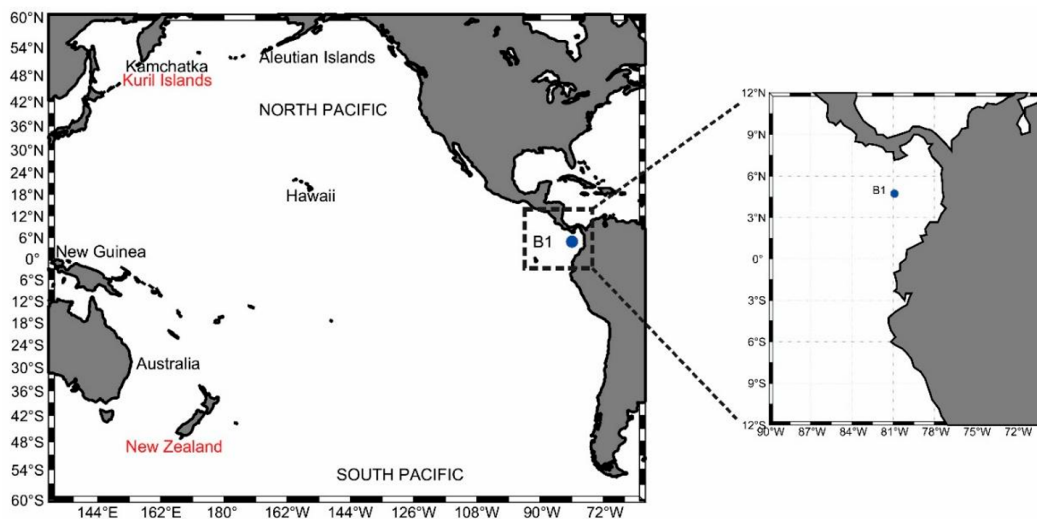
Tipo de estudio y enfoque

Este estudio es cuantitativo, de alcance descriptivo-explicativo. Se apoya en análisis espectral direccional del oleaje para identificar y caracterizar sistemas mediante particionamiento bidimensional (frecuencia–dirección), complementado con el cálculo de parámetros escalares (H_s , T_p , T_m , D_p) por sistema. El enfoque descriptivo permite detallar la estructura multimodal (swell de largo período, mar de viento local y componentes intermedias) y su variación intratemporal. El componente explicativo vincula esos patrones con fuerzas atmosféricas y remotas (ej. Chorro del Chocó y swells australes), sustentando inferencias físicas sobre el modo dominante y las ventanas de intensificación.

Área de estudio

La zona de análisis se ubica en el Pacífico oriental, en una región expuesta a la superposición de *wind sea* (generado localmente por alisios) y *swell* (proveniente de tormentas remotas de ambos hemisferios). El periodo de estudio se delimitó a junio–agosto de 2025 para capturar la estacionalidad boreal. Se trabajó con una boya virtual (B1) en la coordenada (4.74°N, -80.9°W), (Ver Figura 23).

Figura 23. Ubicación de la Boya Virtual (B1)



Nota. Elaboración propia.

DATOS Y FUENTES

Reanálisis de oleaje (ERA5/ECMWF)

Debido a que el estudio se enfoca en clima espectral, se utilizaron datos del *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF), proyecto de reanálisis ERA5 (Dee et al., 2011), disponible desde 1959 a la actualidad, con espectros de oleaje direccionales en intervalos de 6 horas (00:00, 06:00, 12:00 y 18:00 UTC). Para este estudio (junio–agosto de 2025), se emplearon 368 espectros por boya (92 días×4 horarios), es decir, cada espectro consta de 30 bandas de frecuencia (distribución geométrica de 0.0345 Hz a 0.547 Hz) y 24 bandas direccionales (de 7.5° a 352.5° con paso 15°), conformando

una malla espectral 30×24 (frecuencia×dirección). La confiabilidad de estos datos ha sido ampliamente evaluada (Aarnes & Krogstad, 2001; Dee et al., 2011; Jiang & Mu, 2019; Portilla-Yandún et al., 2015; Roome et al., 2024). Se complementó con viento a 10 m de ERA5 (resolución espacial $\sim 0.75^\circ \times 0.75^\circ$) para diagnóstico sinóptico.

Preprocesamiento y control de calidad

Se realizó lectura y estandarización de archivos NetCDF homogeneizando unidades, rejilla y metadatos. Se verificaron inconsistencias (no-negatividad de densidad espectral, monotonía de frecuencia, regularidad angular) y se descartaron espectros con más del 5% de celdas faltantes. Posteriormente, se calcularon pesos de integración: incrementos de frecuencia (df) y de dirección ($d\theta = 15^\circ$ en radianes) para integrar energía espectral de forma conservativa.

Particionamiento espectral bidimensional

Se aplicó un particionamiento 2D (frecuencia–dirección) inspirado en Hanson & Phillips (2001) y Portilla-Yandún et al. (2009), con criterios de:

- Detección de picos sobre densidad espectral suavizada.
- Crecimiento por vecindad hasta líneas de “valle” (gradiente descendente de energía).
- Fusión de particiones si el valle intermedio es poco profundo o si la separación angular/frecuencial no es físicamente significativa.
- Etiquetado como wind sea o swell usando wave age y coherencia direccional, apoyado en viento a 10 m.

Esta metodología fue basada en los aportes dados por Cahl y Voulgaris (2019).

Filtro de consistencia física

Antes de aplicar el proceso de identificación de sistemas espectrales, fue necesario implementar un conjunto de filtros destinados a garantizar la validez física y la coherencia interna de cada partición. Estos filtros actúan como un mecanismo de control de calidad, permitiendo descartar particiones ambiguas o físicamente irrelevantes y reteniendo únicamente aquellas que representan de manera consistente a un sistema de oleaje. Los resultados pueden detallarse en la Figura 24. A continuación, se describe la metodología para la selección del Filtro de consistencia física.

F1: consistencia pico-frecuencia, pico-dirección y energía acumulada (de energía mínima). El objetivo de **F1** fue asegurar que cada partición aceptada perteneciera al sistema espectral que se pretendía representar, considerando simultáneamente tres propiedades: su frecuencia pico, dirección pico y una proporción mínima de energía acumulada en los rangos (frecuencia y dirección) que definen a dicho sistema. Para ello se ensaya una familia de umbrales de energía acumulada $x \in \{10\%, 12\%, 14\%, 16\%, 18\%, 20\%, 22\%, 24\%, 26\%\}$, verificando la condición $E_{t,exc} \geq x \% \cdot E_t$, donde E_t es la energía total del espectro y $E_{t,exc}$ es la energía excedente contenida por la partición dentro de los rangos característicos (frecuencia y dirección) del sistema.

En el presente estudio se escogió $x = 14\%$ por ser suficientemente exigente para garantizar que una fracción mínima de la energía caiga en los rangos que definen el sistema; no ser tan estricto como para descartar particiones físicamente

relevantes pero dispersas; evitar un criterio laxo que clasifique particiones de baja energía como parte del sistema. Así, ensayos comparativos mostraron que 14% ofrece clasificaciones estables y reproducibles, aumentando la representatividad física sin sacrificar información de energía útil.

Cálculo de parámetros escalares

Para cada partición seleccionada se estimaron: altura significativa H_s (proporcional a $4\sqrt{m_0}$ con m_0 momento de orden 0), periodo pico T_p (frecuencia de máximo de densidad), y dirección pico D_p . Estos parámetros se calcularon tanto a escala diaria/mensual (promedios y dispersión).

Análisis estadístico y gráficos

Se generaron series de promedios diarios por sistema y mes (junio, julio, agosto), mapas polares, mapas de calor día×mes y barras de promedios mensuales de parámetros escalares para cada sistema de oleaje. Se calcularon anomalías mensuales respecto al promedio del trimestre y contrastes inter-mensuales (junio–julio–agosto) por sistema.

Herramientas y reproducibilidad

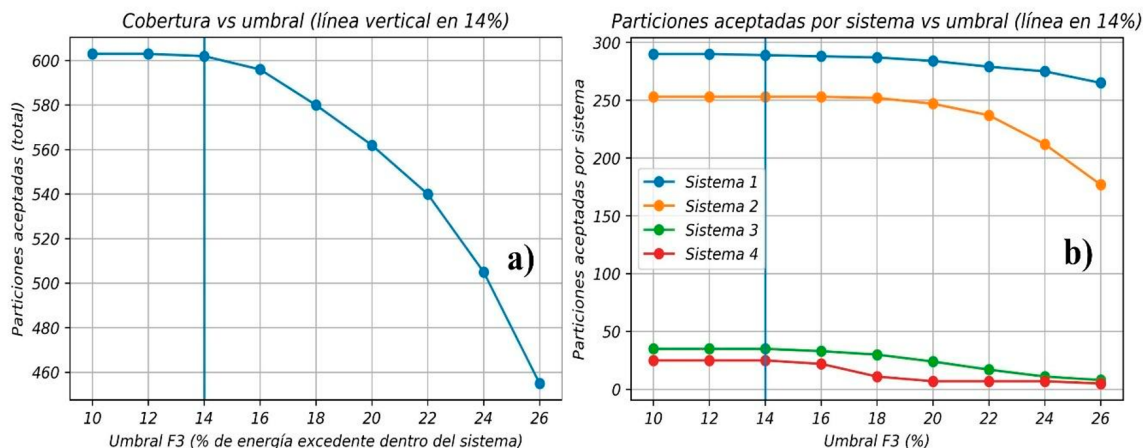
El flujo de trabajo se implementó en Python (lectura con *xarray*, análisis con *numpy/pandas*, gráficos con *matplotlib*; soporte con *wavespectra*) y rutinas propias para particionamiento, filtros y parámetros.

RESULTADOS

Análisis de sensibilidad del umbral F1: justificación de la elección del 14%

El umbral F1 corresponde al porcentaje mínimo de energía excedente dentro de cada sistema espectral para aceptar una partición. La elección de este valor es fundamental, ya que determina el balance entre cobertura total de particiones y representatividad de cada sistema individual. En la Figura 24 se muestran dos perspectivas complementarias: (a) el número total de particiones aceptadas y (b) las particiones aceptadas por sistema, en función del umbral.

Figura 24. Sensibilidad del número de particiones aceptadas frente al umbral



Nota. Elaboración propia.

La Figura 24a muestra la relación entre el número total de particiones aceptadas y el incremento progresivo del umbral F1. Se observa que, hasta valores cercanos al 14%, la cobertura permanece prácticamente constante en torno a las 600 particiones aceptadas. Sin embargo, a partir de este valor se presenta una caída marcada y sostenida, lo cual refleja una pérdida de información significativa. En este sentido, el umbral del 14% se comporta como un límite natural, ya que asegura la máxima cobertura posible antes de que se produzca el descenso abrupto en el número de particiones.

Por su parte, la Figura 24b evidencia el comportamiento de cada sistema de manera individual frente al mismo umbral. Los sistemas principales, Sistema 1 y Sistema 2, mantienen una alta estabilidad hasta alrededor del 14–16%, mientras que a valores más altos comienzan a experimentar una disminución progresiva, en especial el Sistema 2. En contraste, los sistemas de menor energía, como el Sistema 3 y el Sistema 4, son mucho más sensibles al incremento del umbral y tienden a desaparecer rápidamente cuando este supera el 14%.

Esto implica que valores más altos eliminan precisamente las particiones menos energéticas, reduciendo la representación integral de los sistemas espectrales. En conjunto, ambos paneles demuestran que la elección de un umbral F2 del 14% es coherente y robusta. Este valor permitió conservar la cobertura total prácticamente intacta, mantener la estabilidad de los sistemas dominantes y, al mismo tiempo, preservar las contribuciones de los sistemas secundarios que enriquecen la caracterización global.

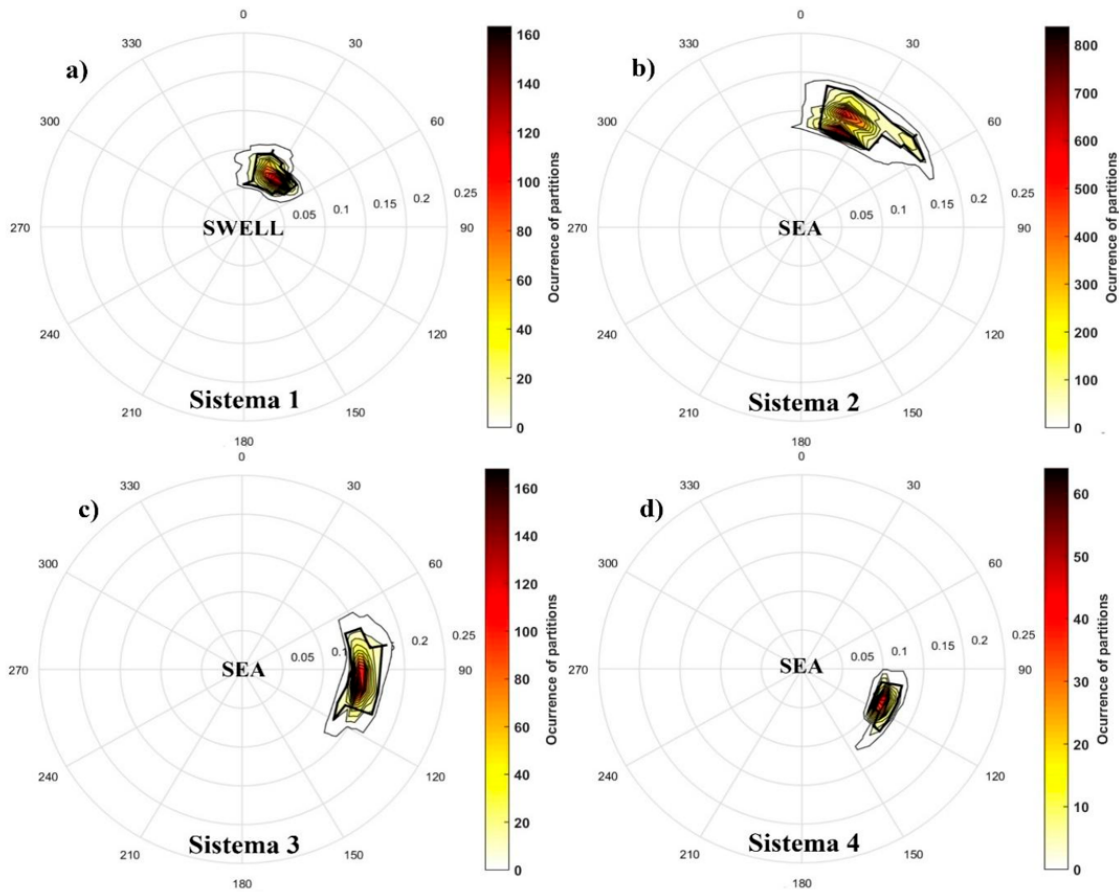
Sistemas de oleaje identificados en el punto de referencia (4.74°N, 80.9°W) en el Océano Pacífico

En la Figura 25 se presentan los sistemas de oleaje identificados en el punto de referencia del Pacífico colombiano. En los paneles 25a–25d se muestran mapas polares de ocurrencia en el espacio frecuencia–dirección, donde se aprecia la persistencia y el rumbo dominante de cada sistema. Cada panel (25a–25d) corresponde a un gráfico polar frecuencia–dirección; el radio indica la frecuencia pico y el ángulo la dirección de propagación del oleaje, representados en convención oceanográfica; es decir, 0° en el Norte y aumentando en sentido horario según la procedencia de las olas, permitiendo distinguir *windsea* y *swell*.

La Figura 25a, presenta el Sistema 1, el cual exhibe una frecuencia pico baja (≈ 0.07 Hz, periodo ~ 14 s) con dirección dominante $\sim 28.8^\circ$. La baja frecuencia y el largo periodo son característicos de un *swell* generado en altas latitudes del Pacífico suroeste, específicamente en el entorno de Nueva Zelanda, donde intensos sistemas de baja presión producen oleajes de gran desarrollo (fetch extenso) que se propagan miles de kilómetros hacia el noreste. Este tren de oleaje llega al Pacífico colombiano con poca dispersión direccional, tal como describen Portilla et al. (2018), quienes documentan la persistencia global de estos *swells* australes.

El Sistema 2 (Figura 25b) tiene una frecuencia pico alta (≈ 0.145 Hz, periodo ~ 7 s) con dirección $\sim 23.7^\circ$. Esto corresponde a un mar de viento local (*windsea*) generado por la acción directa de los vientos sobre la cuenca colombiana. Su orientación noroeste está en coherencia con la influencia estacional del Chorro de Bajo Nivel del Chocó (Chocó Jet), un flujo intenso de sur a norte que canaliza humedad desde el Pacífico hacia Centroamérica y genera forzamientos locales que producen mares de viento en este sector (Poveda & Mesa, 2000). Este sistema, por tanto, es representativo de la dinámica atmosférica regional que impacta directamente en la generación de oleaje.

Figura 25. Particiones espectrales de oleaje en (4.74°N, 80.9°W).



Nota. Elaboración propia.

En la Figura 25c, el Sistema 3 presenta una frecuencia pico ~ 0.145 Hz (≈ 7 s) y dirección $\sim 95.1^\circ$ (desde el este). Corresponde a un mar de viento regional o un *swell* joven aún cercano a su zona de generación en el Pacífico oriental ecuatorial. Esta interpretación es consistente con los criterios operativos de separación *windsea/swell* que asocian frecuencias más altas y mayor “juventud” espectral a oleaje de viento local o en fase temprana, y frecuencias más bajas a *swell* remoto de largo recorrido (Portilla et al., 2009; Wang & Swail, 2001). Para el contexto costero, la coexistencia de este componente regional con *swells* remotos es habitual y ha sido documentada en análisis climatológicos recientes de sistemas de oleaje (Mazzaretto et al., 2024).

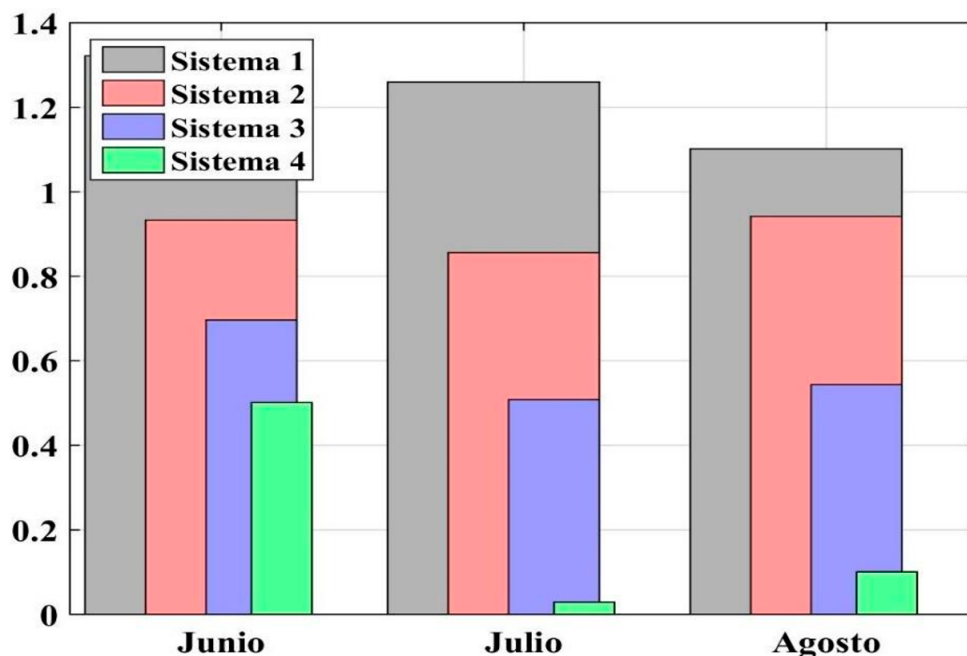
Por último, el Sistema 4 (Figura 25d) tiene una frecuencia intermedia (≈ 0.11 Hz, periodo ~ 9 s) y dirección $\sim 113.7^\circ$. Este patrón sugiere un *swell* secundario generado en latitudes medias del Pacífico suroriental, posiblemente asociado a frentes fríos australes o sistemas de baja presión en la costa de Chile y Perú. Aunque su energía es menor, su persistencia en la señal confirma la importancia de considerar trenes secundarios de *swell* en la caracterización espectral (Portilla-Yandún, 2015). En conjunto, los cuatro sistemas identificados evidencian la superposición de forzantes remotas y locales, las cuales son un *swell* de origen en el Pacífico suroeste (región de Nueva Zelanda), evidenciado en la Figura 25a; un mar de viento local asociado al Chocó Jet (Figura 25b); un mar de viento regional o *swell* joven proveniente del Pacífico oriental ecuatorial (no un *swell* transoceánico de largo período (Figura 25c); y un *swell* secundario procedente del Pacífico suroriental (Figura 25d). Esta combinación multimodal refleja la complejidad de la dinámica espectral en el Pacífico colombiano, donde interactúan trenes remotos de gran escala con oleajes de viento regional modulados por los chorros atmosféricos.

Variación mensual de la altura significativa media por sistema de oleaje en el punto de referencia

La figura 26 muestra la contribución relativa de cada sistema de oleaje (Sistemas 1–4) durante los meses de junio, julio y agosto. Cada barra apilada representa la altura significativa media (H_s) asociada a los sistemas previamente identificados: el *swell* del suroeste (Sistema 1); el mar de viento local vinculado al Chorro de Chocó (Sistema 2); el mar de viento regional o *swell* joven del Pacífico oriental (Sistema 3); el *swell* secundario del Pacífico suroriental (Sistema 4).

A lo largo de junio, julio y agosto se evidencia una señal claramente multimodal en H_s , donde coexisten trenes remotos y mares de viento regionales. En junio se observa el mayor equilibrio entre componentes: el Sistema 1 (*swell* del suroeste, asociado a tormentas invernales en el entorno de Nueva Zelanda) domina pero comparte protagonismo con el Sistema 2 (mar de viento local forzado por el Chorro de Chocó); mientras que el Sistema 3 (*windsea/swell* joven desde el Pacífico oriental) y el Sistema 4 (*swell* secundario del sureste, latitudes medias Perú–Chile) mantienen aportes apreciables. Esta configuración sugiere un campo de oleaje rico en interacciones, con llegada sostenida de *swell* austral y respuesta simultánea a vientos regionales.

Figura 26. Altura significativa media (H_s) por sistema de oleaje durante el verano boreal (JJA)



Nota. Elaboración propia.

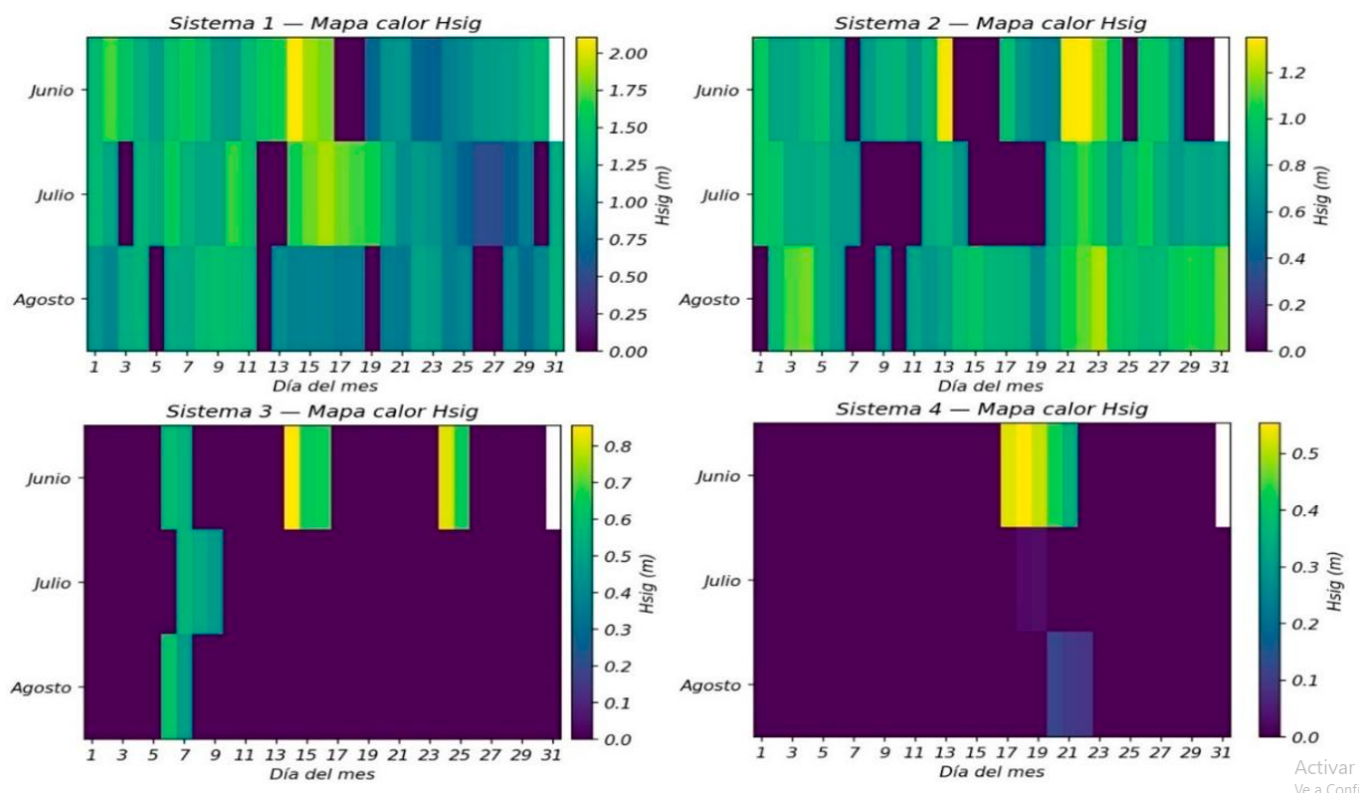
Para agosto se recupera la influencia de los vientos regionales: el Sistema 2 vuelve a crecer y queda cercano al Sistema 1, coherente con el fortalecimiento estacional del Chorro de Chocó a finales del verano boreal. El Sistema 3 también repunta levemente, sugiriendo mayor actividad convectiva en el Pacífico oriental, mientras que el Sistema 4 reaparece de forma modesta.

En julio se refuerza el liderazgo del Sistema 1, cuyo H_s alcanza el máximo del trimestre, consistente con el pico del invierno austral y la propagación eficiente de trenes de largo recorrido hacia el Pacífico colombiano. En contraste, disminuye la contribución del Sistema 2, al igual que la del Sistema 3 y el Sistema 4 prácticamente se extingue, indicando que la señal remota del suroeste impone el régimen de oleaje y relega los componentes de menor energía.

Variabilidad diaria de Hs por sistema durante el verano boreal en 4.74°N, 80.9°W

En la Figura 27 se aprecia la variabilidad diaria de la altura significativa de cada sistema durante la temporada JJA. El Sistema 1 muestra una señal persistente a lo largo de los tres meses, con valores frecuentes entre 1.0 y 1.5 m y valores máximos que superan los 2.0 m en la primera quincena de junio y nuevamente hacia mediados de julio. Estos máximos reflejan la llegada recurrente del swell austral, coherente con la intensificación de las tormentas en el Pacífico suroeste durante el invierno austral. El Sistema 2 presenta una dinámica más intermitente, con picos que alcanzan entre 1.0 y 1.2 m, especialmente a mediados de junio y en la segunda quincena de julio–agosto. Esta intensificación está en consonancia con el fortalecimiento estacional del Chorro de Chocó, que en esta época del año potencia los mares de viento locales y explica la recurrencia de Hs superiores a 1.0 m en cortos periodos.

Figura 27. Evolución diaria de la altura significativa por sistemas de oleaje



Nota. Elaboración propia.

En contraste, el Sistema 3 se caracteriza por pulsos aislados y de menor energía, con valores que rondan los 0.6 – 0.8 m, más notorios durante junio y principios de agosto. Su comportamiento fragmentado refuerza su carácter de mar de viento regional o *swell* joven, asociado a forzamientos atmosféricos transitorios en el Pacífico oriental. Finalmente, el Sistema 4 muestra contribuciones puntuales, alcanzando valores máximos cercanos a 0.5 m hacia mediados de junio, lo que confirma su rol secundario y su dependencia de condiciones específicas en el Pacífico suroriental.

En relación con el tsunami del 30 de julio de 2025, cabe aclarar que los tsunamis poseen periodos mucho más largos (minutos a horas) que los analizados aquí (0.05 – 0.25 Hz), por lo cual no se registran en los espectros de viento y *swell*. Los valores de H_s alrededor de esas fechas no muestran anomalías atribuibles al tsunami, lo cual es consistente con estudios que señalan la imposibilidad de detectar estos eventos en registros espectrales de alta frecuencia (Portilla et al., 2009; Wang

& Swail, 2001). Así, los patrones observados responden exclusivamente a la dinámica multimodal de swells y mares de viento característica del Pacífico colombiano en la temporada boreal de JJA.

CONCLUSIONES

A partir de la investigación realizada, es posible concluir que el análisis espectral direccional durante el verano boreal (JJA) en 4.74° N, 80.9° W evidencia un régimen de oleaje claramente multimodal. El *swell* de largo período proveniente del suroeste (≈ 0.07 Hz; ~ 14 s) se confirma como el componente dominante y persistente, constituyendo el piso energético sobre el cual se modula la variabilidad intratemporal. El mar de viento local (≈ 0.145 Hz; ~ 7 s), vinculado al Chorro de Chocó, muestra una intensificación hacia finales de la temporada, mientras que el mar de viento regional/*swell* joven del Pacífico oriental y la componente de período intermedio del suroriente aparecen de forma intermitente y con menor contribución a la altura significativa.

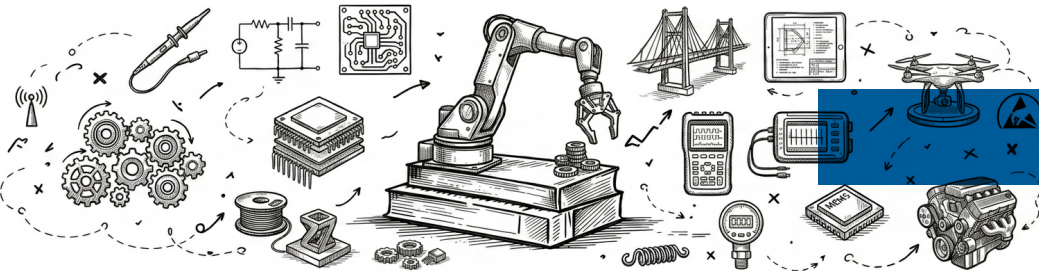
Asimismo, los resultados encontrados demuestran que el particionamiento espectral bidimensional aporta una sensibilidad diagnóstica superior a la de los promedios mensuales, al permitir identificar qué sistema concentra la energía y en qué ventanas temporales ocurre. Esta desagregación mejora la interpretación física del oleaje y ofrece insumos más accionables para la gestión costera, la operación portuaria y el diseño de infraestructura, al vincular magnitud, frecuencia pico y dirección de propagación con forzantes locales y remotas.

Comprender el comportamiento multimodal del oleaje mediante particionamiento espectral tiene un valor directo para la prevención y la gestión del riesgo en costas. Al distinguir qué sistemas (*swell* de largo período, mar de viento local y componentes intermedias) sostienen la altura significativa y cuándo se intensifican dentro de JJA, se obtienen insumos operativos para avisos tempranos, ventanas de navegación y pesca, y criterios de diseño en puertos y obras litorales. Además, su incorporación en la comunicación con comunidades costeras y en programas educativos fortalece la cultura de prevención, al traducir la complejidad espectral en mensajes claros y accionables.

Los resultados de este estudio muestran que el particionamiento espectral actúa como una herramienta capaz de “traducir” el lenguaje de las olas. Al descomponer la señal multimodal en sistemas coherentes de *swell* y mar de viento, se revela un alfabeto físico donde la frecuencia, la dirección y la energía permiten leer cuándo y cómo se organizan los trenes de oleaje en el Pacífico colombiano. Este lenguaje no es solo de interés académico, sino que ofrece claves operativas para la gestión costera, el diseño de infraestructura y la planificación de sistemas de alerta temprana, al transformar patrones espectrales complejos en información interpretable y accionable para la toma de decisiones y la educación de las comunidades costeras.

REFERI

- 86



REFERENCIAS

- Portilla-Yandún, J., & Cavaleri, L. (2019). Wave spectra partitioning for long-term statistical analysis of wind sea and swell systems. *Ocean Modelling*, 142, 101456. <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2019.101456>
- Qu, X., Li, H., & Liu, Z. (2024). Wave spectral partitioning for the SWIM spectrometer based on the wave age and parameter optimization method. *Marine Geodesy*, 47(5), 368–394. <https://doi.org/10.1080/01490419.2024.2373718>
- Semedo, A., Sušelj, K., Rutgersson, A., & Sterl, A. (2011). A global view on the wind sea and swell climate. *Journal of Climate*, 24(5), 1461–1479. <https://doi.org/10.1175/2010JCLI3718.1>
- Wang, D. W., & Swail, V. R. (2001). An operational method for separating wind sea and swell. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 18(12), 2052–2062. [https://doi.org/10.1175/1520-0426\(2001\)018<2052:AOMFSW>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(2001)018<2052:AOMFSW>2.0.CO;2)
- Wyatt, L. R., Wang, H., & Ning, D. (2022). Swell and wind-sea partitioning of HF radar directional data. *Journal of Operational Oceanography*, 17(2), 189–202. <https://doi.org/10.1080/1755876X.2022.2127232>
- Yu, X. (2025). Separating swell from mixed waves around island through wave action balance modeling. *Applied Ocean Research*, 161, 104687. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2025.104687>
- Zheng, X., Chen, G., & Liu, Z. (2024). Investigation of multimodal wave climate using spectral partitioning and wave system tracking techniques. *Coastal Engineering*, 193, 104202. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2024.104202>

