SIOP 2026 | COQUIMBO XI Seminario Internacional de Ingeniería y Operación Portuaria

XI SEMINARIO INTERNACIONAL DE INGENIERÍA Y OPERACIÓN PORTUARIA

ANÁLISIS COMPARATIVO DE FORMULACIONES DE TRANSPORTE LONGITUDINAL DE SEDIMENTOS EN COSTA MEDIANTE MODELACIÓN NUMÉRICA

PATRICIA CARVAJAL OSORIO[1], **LUIS ZAMORANO RIQUELME**[2], **CARLOS REIHER NÚÑEZ**[3]

RESUMEN

Este estudio presenta un análisis comparativo del transporte longitudinal de sedimentos mediante modelación numérica bidimensional (TELEMAC-2D/TOMAWAC/GAIA) y formulaciones empíricas, dos aproximaciones ampliamente utilizadas en ingeniería costera. Para ello, se generó un amplio conjunto de datos representativo de las condiciones de la costa chilena, con el objetivo de precisar bajo qué escenarios ambos enfoques ofrecen resultados convergentes o divergentes. Aunque la altura significativa (H_{m0}) es la variable de mayor impacto, suele ser un dato conocido mediante modelos propagados; en cambio, el índice de rotura (γ) es la principal fuente de incertidumbre, ya que suele asumirse entre 0,7 y 0,8 a pesar de variar entre 0,4 y 1,2, generando diferencias de hasta un orden de magnitud en ambas metodologías. Finalmente, más allá del costo computacional que tienen los modelos 2D, los resultados señalan que en playas disipativas ($\Omega \geq 6$) ambas aproximaciones convergen a resultados similares, mientras que en playas reflectivas ($\Omega < 1$) las discrepancias se amplifican críticamente. Si bien validar definitivamente ambas opciones requiere mediciones de campo, ante la falta de estas, la modelación numérica ofrece una ventaja: al resolver la hidrodinámica completa, reduce de mejor manera el margen de error geométrico e hidrodinámico frente a las fórmulas simplificadas cuando se adopta un mismo parámetro de rotura.

Palabras clave: transporte longitudinal de sedimentos, ingeniería costera, modelación numérica bidimensional, formulaciones empíricas de transporte longitudinal, sensibilidad paramétrica, TELEMAC-2D.

---

[1] Ingeniera civil, Depto. de Ingeniería en Obras Civiles, Universidad de Santiago de Chile, patricia.carvajal@usach.cl
[2] Jefe de Ingeniería y Desarrollo, Instituto Nacional de Hidráulica, luiszamorano@inh.cl
[3] Ingeniero Civil, Académico Depto. de Ingeniería en Obras Civiles, Universidad de Santiago de Chile carlos.reiher@usach.cl

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Motivación

El transporte longitudinal de sedimentos es uno de los procesos importantes en la dinámica costera, ya que influye directamente en la evolución de las playas, el equilibrio sedimentario del litoral y la vulnerabilidad de la infraestructura frente a la erosión o la acreción. En Chile, la extensa longitud del borde costero y la presencia de infraestructura expuesta a un oleaje de alta energía hacen especialmente relevante su estimación.

Tradicionalmente, este fenómeno se ha abordado mediante formulaciones empíricas simplificadas; sin embargo, con el incremento en la capacidad de cómputo y la mayor accesibilidad de las herramientas computacionales, los modelos numéricos bidimensionales acoplados con módulos de transporte de sedimentos (como TELEMAC-2D, Delft3D, MIKE 21 o XBeach) se utilizan cada vez más para caracterizar la morfodinámica en escenarios complejos. A pesar de su uso extendido, existe una notable variabilidad e incertidumbre entre las distintas metodologías, incluso bajo condiciones hidrodinámicas equivalentes. Los procesos en la zona de rompiente son altamente complejos debido a su carácter tridimensional y a la intensa disipación turbulenta asociada. Para simplificar esta física, se han establecido relaciones que vinculan el transporte con la interacción entre el oleaje, las corrientes inducidas, la granulometría y la geometría del perfil de playa. Esto ha dado origen a diversas formulaciones empíricas que, si bien permiten estimar órdenes de magnitud representativos del transporte longitudinal, exhiben marcadas discrepancias entre sí debido a los distintos supuestos físicos adoptados y a la ponderación de las variables de entrada.

Por su parte, los modelos numéricos 2D constituyen representaciones más detalladas de los procesos hidrodinámicos y sedimentológicos en la rompiente. En este ámbito coexisten enfoques de fase promediada (como TELEMAC-2D/TOMAWAC, MIKE 21 FM/HD-SW y Delft3D) y de fase resuelta (como XBeach en modo no hidrostático), requiriendo estos últimos un costo computacional significativamente mayor para resolver no linealidades como la asimetría, el apuntamiento (skewness) y la oblicuidad del oleaje. No obstante, ambos esquemas continúan dependiendo de parametrizaciones empíricas para representar la disipación turbulenta por rotura, lo que introduce incertidumbre ante la frecuente escasez de datos de campo para su calibración.

Frente a esta limitación, surge la interrogante de si el costo computacional y operacional de un modelo 2D se justifica frente al uso de formulaciones analíticas simplificadas. La motivación de este trabajo radica en evaluar comparativamente las diferencias y la sensibilidad de ambos métodos ante variaciones paramétricas en escenarios idealizados, focalizando la incertidumbre de la disipación por rotura en un parámetro común: el índice de rotura (γ). El objetivo principal es establecer criterio técnico de aplicabilidad para ambos enfoques según el régimen morfodinámico. Para ello, se analiza la convergencia de sus resultados, la mejora física de la modelación 2D frente a formulas empíricas y el impacto del índice de rotura en cada metodología.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Estimar y analizar comparativamente el transporte longitudinal de sedimentos mediante formulaciones empíricas tradicionales y un modelo numérico bidimensional hidrodinámico, para evaluar la sensibilidad de los resultados frente a variaciones paramétricas del oleaje de entrada, sedimento, e índice de rotura.1.2.2 Objetivos específicos

• Evaluar la variación del transporte longitudinal mediante una matriz de escenarios simulados con el sistema TELEMAC-2D–TOMAWAC–GAIA, considerando la altura significativa espectral, el período peak, la dirección media del oleaje, el índice de rotura, el diámetro medio del sedimento y la formulación interna de transporte de GAIA.

•Analizar el impacto del régimen de oleaje e índice de rotura en la respuesta de formulaciones empíricas y modelado numérico.

• Comparar los resultados del modelado numérico con las formulaciones empíricas tradicionales a partir de un análisis adimensional basado en el parámetro de Dean y numero de Iribarren.

1.3 Alcances y limitaciones

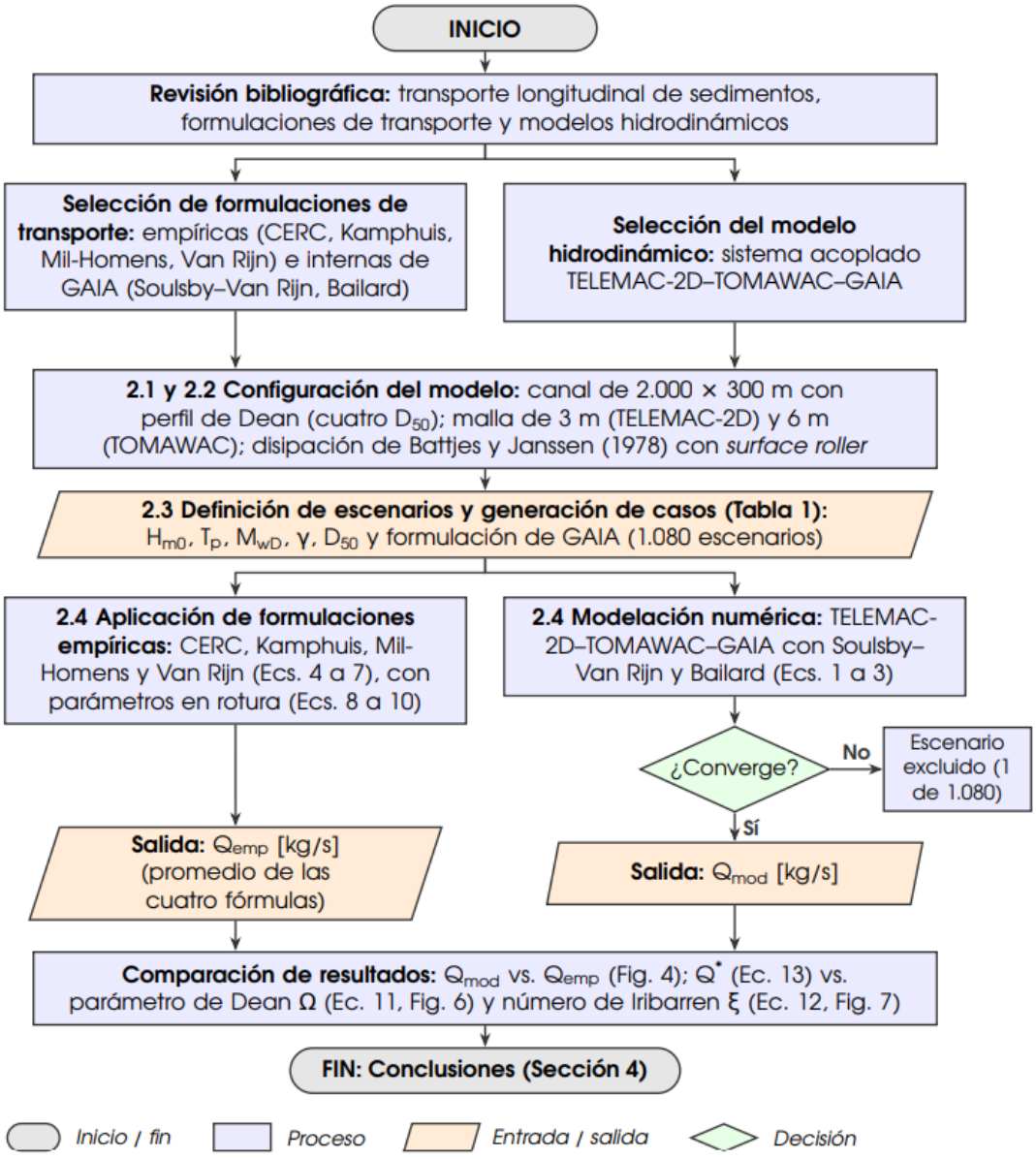
El estudio analiza escenarios costeros idealizados por un perfil de playa regido por el equilibrio de Dean (1977). Bajo un conjunto común de parámetros de entrada, se comparan las formulaciones empíricas de CERC, Kamphuis (1991), Mil-Homens et al. (2013) y Van Rijn (2014) con las

formulaciones de Soulsby-Van Rijn y Bailard del módulo GAIA. La modelación es bidimensional - sin transporte transversal - y se ejecutó en régimen hidrodinámico estacionario, omitiendo la variabilidad temporal del oleaje. Al tratarse de un dominio sintético que no representa una playa natural especifica, los resultados no corresponden a una calibración con datos de terreno; asimismo, el análisis granulométrico se limita a las variaciones del diámetro medio (D_{50}).

2 METODOLOGÍA

Este estudio adopta un enfoque cuantitativo y aplicado que estandariza las variables de entrada, garantizando que las fórmulas empíricas y el modelo numérico operen bajo condiciones físicas idénticas. La metodología (Figura 1) se estructura en las etapas de revisión bibliográfica, selección de formulaciones y del sistema numérico, definición de la matriz de escenarios, ejecución acoplada del sistema TELEMAC-2D–TOMAWAC–GAIA y procesamiento estadístico de resultados.

Figura 1. Diagrama de flujo de la metodología de trabajo



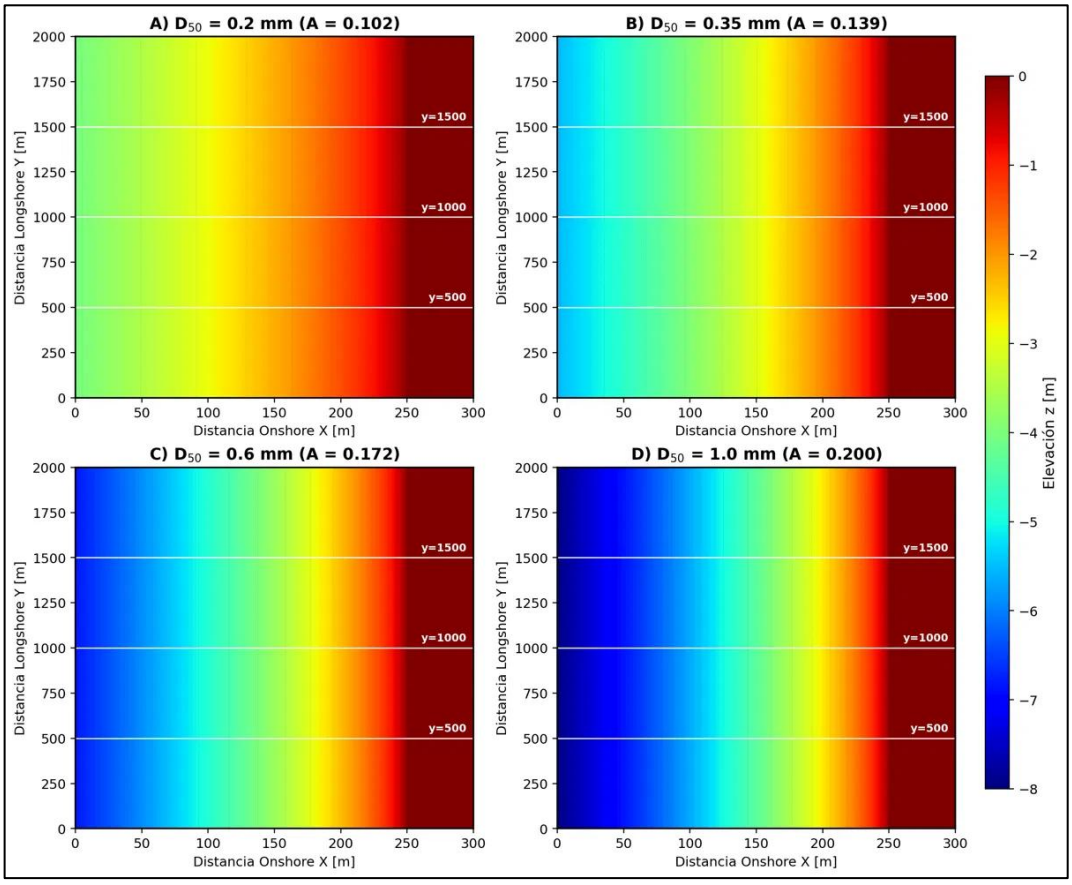
Fuente: Elaboración propia.

2.1 Configuración del dominio y perfil de equilibrio de Dean

El dominio computacional consiste en un canal prismático idealizado de 2.000 m de longitud paralela a la costa y 300 m de extensión transversal. La cota de fondo se definió a partir del perfil

de equilibrio de Dean (1977), lo que permite representar la variación de la profundidad en función del tamaño medio del sedimento. De este modo, se generaron cuatro configuraciones batimétricas asociadas a los diámetros estudiados (D_{50} = 0,20; 0,35; 0,60 y 1,00 mm), en las cuales un mayor tamaño de grano incrementa el parámetro de escala A, dando lugar a perfiles de mayor pendiente y profundidad (Figura 2). Para la extracción y evaluación del transporte longitudinal, se dispusieron tres transectos de control transversales en Y = 500, 1.000 y 1.500 m.

Figura 2. Vista en planta de las batimetrías generadas mediante el perfil de equilibrio de Dean para las cuatro configuraciones bajo estudio (D50 = 0,20; 0,35; 0,60 y 1,00 mm), dominio de 300 m (transversal) × 2.000 m (longitudinal)

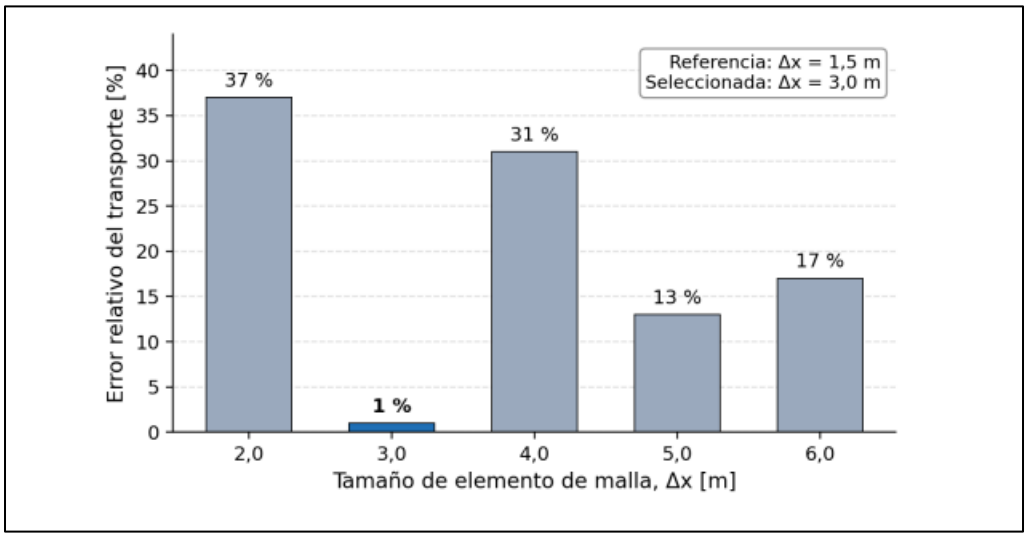


Fuente: Elaboración propia.

Dado que la resolución espacial es crítica para resolver adecuadamente los intensos gradientes hidrodinámicos y sedimentológicos en la zona de rompiente evitando la difusión numérica y

asegurando la estabilidad del cálculo, se llevó a cabo un análisis riguroso de sensibilidad de malla. Tomando como base el caso de referencia littoral-t2d-tom del manual de GAIA v9.0, se evaluaron distintas densidades de discretización hasta alcanzar la independencia de malla. Como resultado de esta sensibilidad, se determinó que una malla refinada con un tamaño de celda de 3,0 m para TELEMAC-2D y 6,0 m para TOMAWAC garantiza una precisión numérica adecuada, manteniendo un error relativo inferior al 1-2 % respecto a la malla de máxima resolución de referencia.

Figura 3. Error relativo del transporte longitudinal según el tamaño de elemento de la malla, respecto de la malla de referencia (Δx = 1,5 m)



Fuente: Elaboración propia.

2.2 Parametrización hidrodinámica y sensibilidad de los procesos de rotura

Para evaluar la disipación y la tasa de rompimiento del oleaje, se evaluaron los modelos de disipación de energía de Battjes y Janssen (1978), Thornton y Guza (1983) y Roelvink (1993), seleccionándose el modelo de Battjes y Janssen (1978) con el módulo de surface roller activado, por su amplia validación en la literatura especializada (Lippmann et al., 1996; Battjes & Stive, 1985). Adicionalmente, se evaluó la sensibilidad del transporte frente al índice de rotura (γ = 0,4; 0,7 y 0,9), observándose variaciones de hasta un orden de magnitud entre los extremos evaluados, lo que justificó su incorporación como variable independiente dentro de la matriz de simulación.

2.3 Matriz de simulación

La combinación sistemática de las variables de forzamiento hidrodinámico y sedimentológico generó un total de 1.080 escenarios (5 valores de H_{m0} ; 3 de T_p ; 3 de M_{wD} ; 3 de γ ; 4 de D50 ; 2 formulaciones de transporte de GAIA), ejecutados de forma automatizada. Un escenario no logró completar la simulación por problemas de convergencia numérica, consolidándose 1.079 simulaciones válidas (0,09 % de exclusión) (Tabla 1). Las Ecuaciones (1) a (3) describen las formulaciones matemáticas implementadas en GAIA.

Soulsby – Van Rijn (1997):

$$q_s = A_{sb} * U_c * \left[\left(U_c^2 + \frac{0.018}{C_D} U_{rms}^2\right)^{0.5} - U_{cr}\right]^{1.2} \quad (1)$$

Bailard (1981):

$$q_t = q_b + q_s \quad (2)$$

$$q_t = \frac{C_f \epsilon_b}{tan\emptyset}\left[\langle |u|^2 u\rangle - \frac{tan\beta}{tan\emptyset}\langle |u|^3\rangle \hat{\imath}\right] + \frac{C_f \epsilon_s}{w_s}\left[\langle |u|^3 u\rangle - \frac{\epsilon_s}{w_s} tan\beta \langle |u|^5\rangle \hat{\imath}\right] \quad (3)$$

q_t: Tasa de transporte total (volumétrico) por unidad de ancho [m²/s]

U_c: Velocidad de la corriente en el nodo [m/s]

U_{rms}: Velocidad orbital del oleaje en el nodo [m/s]

A_{sb}: Coeficiente de transporte [m⁴/N]

C_D: Coeficiente de arrastre local [adimensional]

q_b, q_s: Tasa de transporte total (volumétrico) por unidad de ancho, de fondo y suspensión, respectivamente [m²/s]

u: Vector de velocidad instantánea del flujo [m/s]

C_f: Coeficiente de fricción del lecho [adimensional]

ϵ_b, ϵ_s: Coeficientes de eficiencia para el transporte de fondo (valor típico 0,1) y suspensión (valor típico 0,02) [adimensional]

$tan\emptyset$: Ángulo de fricción interna del sedimento (aproximadamente 0,63 para arena) [Adimensional]

$tan\beta$: Pendiente local del fondo [Adimensional]

w_s: Velocidad de caída del sedimento [m/s]

Tabla 1. Parámetros de la matriz de simulación

Parámetro	Símbolo	Valores	Unidad
Altura significativa espectral	H_{m0}	0,5 – 1,0 – 1,8 – 2,5 – 4,0	m
Período peak	T_p	10 – 12 – 15	s
Dirección media del oleaje	M_{wD}	15° – 30° – 45°	°
Índice de rotura	γ	0,4 – 0,7 – 0,9	adimensional
Diámetro medio del sedimento	D_{50}	0,20 – 0,35 – 0,60 – 1,00	mm
Formulación interna de transporte (GAIA)	q_s	Soulsby–Van Rijn / Bailard	kg/s

Fuente: Elaboración propia.

2.4 Formulaciones empíricas y numéricas de referencia

El transporte fue estimado mediante las expresiones clásicas de CERC (1984), Kamphuis (1991), Mil-Homens et al. (2013) y Van Rijn (2014) (Ecs. 4-7), aplicadas sobre la misma matriz de parámetros de entrada. En paralelo, el módulo GAIA acoplado a TELEMAC-2D–TOMAWAC calcula el transporte mediante las formulaciones internas de Soulsby–Van Rijn (1997), que incorpora un umbral crítico de inicio de movimiento, y de Bailard (1981), basada en un enfoque energético del flujo. Para contrastar la consistencia física del modelo numérico se comparó una submuestra de resultados con datos experimentales de playas naturales reportados por Van Rijn (2014) (casos de Lake Worth y Leadbetter), obteniéndose órdenes de magnitud comparables, en particular para el índice de rotura γ = 0,7 y γ = 0,9.

CERC (1984):
$$Q_{t,mass} = 0.03 * k * \rho * g^{0.5} * H_{s,br}^{2} * h_b^{0.5} * (sin2\theta_{br}) * \left[\frac{\rho_s}{(\rho_s - \rho)}\right] \quad (4)$$

Kamphuis (1991):
$$Q_{t,mass} = 2.33 * \frac{\rho_s}{(\rho_s - \rho)} * T_p^{1.5} * (\tan\beta)^{0.75} * D_{50}^{-0.25} * H_{s,br}^{2} * (sin\,2\theta_{br})^{0.6} \quad (5)$$

Mil-Homens (2013):
$$Q_{t,mass} = 0.15 * \frac{\rho_s}{(\rho_s - \rho)} * T_p^{0.89} * (\tan\beta)^{0.86} * D_{50}^{-0.69} * H_{s,br}^{2.75} * [\sin(2\theta_{br})]^{0.5} \quad (6)$$

Van Rijn (2014):
$$Q_{t,mass} = 0.00018 * K_{swell} * g^{0.5} * \rho_s * (tan\beta)^{0.4} * (D_{50})^{-0.60} * \left(H_{s,br}\right)^{3.1} * sen(2\theta_{br}) \quad (7)$$

$Q_{t,mass}$: Tasa de transporte de sedimento de masa [Kg/s]

ρ_s: Densidad del sedimento [Kg/m^3]

ρ: Densidad del agua [Kg/m^3]

g: Gravedad [m/s^2]

$H_{s,br}$: Altura de la ola significativa en rotura [m]

h_{br} : Profundidad del agua en el punto de rotura [m]

θ_{br}: Ángulo de incidencia en rotura [°]

T_p: Periodo peak [s]

$tan\beta$: Pendiente de la playa [adimensional]

K_{swell}: Factor de corrección por swell

V_{wave}: Corriente inducida por rotura [m/s]

D_{50}: Diámetro medio del sedimento [m]

Finalmente, se presentan los parámetros adimensionales usados para la comparación de resultados. En primer lugar, el parámetro adimensional de Dean Ω (Ec. 8), que permite clasificar el estado morfodinámico de la playa; en segundo lugar, el número de Iribarren, ξ (Ec. 9), para caracterizar la interacción entre el oleaje incidente y la pendiente del perfil costero.

Parámetro de Dean:

$$\Omega = \frac{H_{m0}}{w_s * T_p} \quad (8)$$

Número de Iribarren

$$\varepsilon = \frac{tan\beta}{\sqrt{\frac{H_{m0}}{L_0}}} \quad (9)$$

H_{m0}: Altura de la ola significativa del espectro en aguas profundas [m]

L_0 : Longitud de onda en aguas profundas [m]

Para eliminar el efecto de la escala absoluta, el transporte se normalizó con la escala característica ρs g 0.5H2.5 s,br, asociada al flujo de energía del oleaje en la zona de rompiente (Komar e Inman, 1970; U.S. Army Corps of Engineers, 2002):

Transporte Adimensional:

$$Q^* = \frac{Q_{mass}}{\rho_s g^{0.5} H_s,br^{2.5}} \quad (10)$$

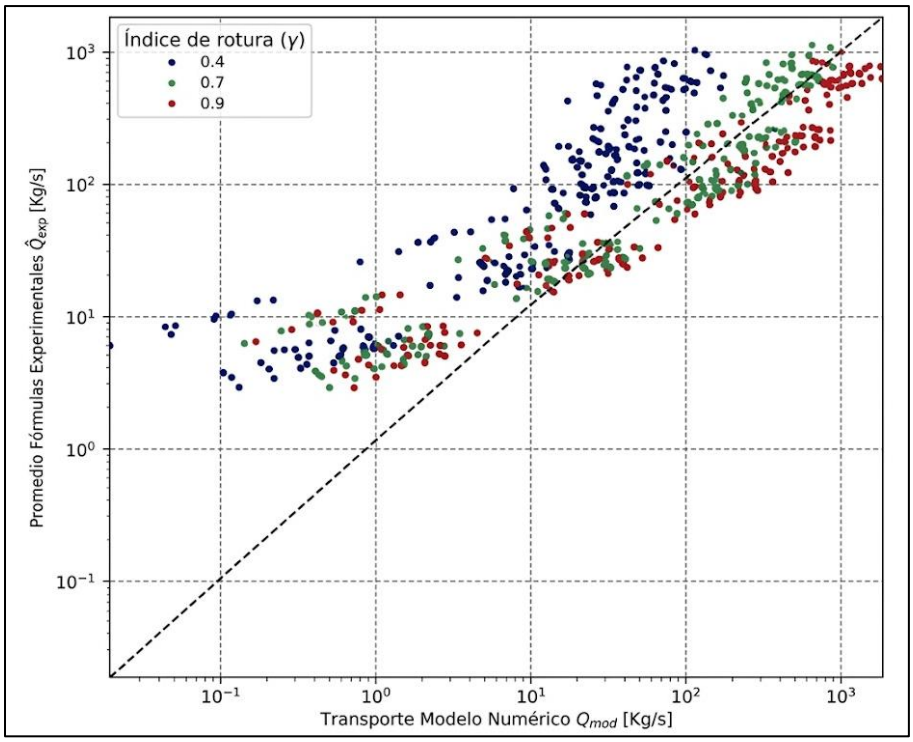
donde Q* es el transporte adimensional [-] y Qmass la tasa de transporte [kg/s]. Los valores de «Q* promedio» de las Figuras 6 y 7 corresponden al promedio de cada formulación para los escenarios con MwD = 45° incluidos en cada clase de Ω (Figura 6) o intervalo de ξ (Figura 7), considerando los tres índices de rotura (γ = 0,4; 0,7 y 0,9.

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Correlación entre el modelo numérico y las formulaciones empíricas

La Figura 3 compara, en escala logarítmica, el transporte del modelo numérico (Q_{mod}) con el promedio de las cuatro formulaciones empíricas (Q_{exp}), clasificado según el índice de rotura. La mayoría de los puntos se ubica sobre la línea de igualdad 1:1, lo que indica que las formulaciones empíricas entregan, en general, tasas mayores que el modelo numérico, especialmente para transportes entre 0,1 y 10 kg/s. Para γ = 0,4 la dispersión respecto de la diagonal es mayor, mientras que para γ = 0,7 y γ = 0,9 los resultados se concentran cerca de la línea de igualdad, en particular para transportes superiores a 100 kg/s. Esta tendencia es coherente con la comparación experimental de Van Rijn (2014), donde el caso Leadbetter LBB2 con γ = 0,7 entregó 204,15 kg/s frente a 197 kg/s medidos en terreno.

Figura 4. Correlación de las tasas de transporte longitudinal de sedimentos entre el modelo numérico y las formulaciones empíricas.

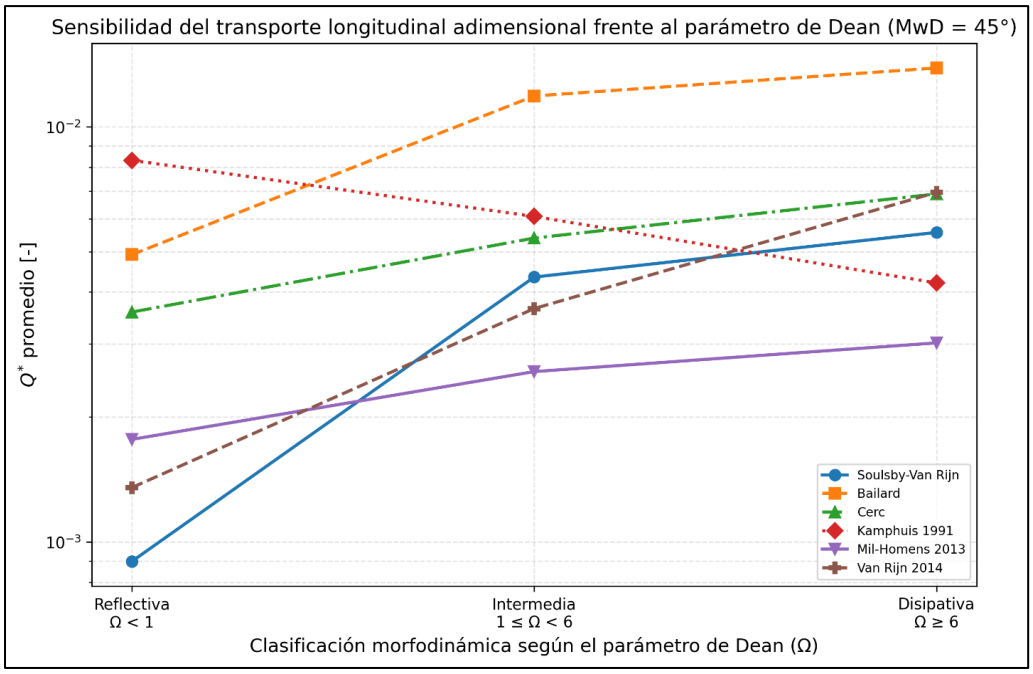


Fuente: Elaboración propia.

3.2 Sensibilidad frente al parámetro de Dean (Ω)

De acuerdo con Wright y Short (1984), el parámetro adimensional de Dean permite clasificar el estado morfodinámico de la playa en reflectivo ($\Omega < 1$), intermedio ($1 \leq \Omega < 6$) y disipativo ($\Omega \geq 6$), de acuerdo con Wright y Short (1984).Al normalizar el transporte mediante Q*, eliminando el efecto de la escala absoluta, la Figura 4 muestra que Soulsby–Van Rijn presenta la disminución relativa más marcada al reducirse Ω, evidenciando su mayor sensibilidad al cambio desde condiciones disipativas hacia reflectivas. En contraste, CERC varía de forma moderada (aproximadamente un factor 2), ya que su formulación no incorpora explícitamente el diámetro del sedimento ni el período peak. La formulación de Bailard, por su parte, conserva valores relativamente elevados en todas las categorías morfodinámicas, al no incorporar un umbral crítico de inicio de movimiento, mientras que Kamphuis (1991) muestra una disminución gradual desde playas reflectivas hacia disipativas, asociada a la influencia conjunta de la pendiente y el diámetro del sedimento en su formulación. Por su parte, Van Rijn (2014) presenta un aumento marcado de Q* con Ω (aproximadamente un factor 5 entre playas reflectivas y disipativas), con una tendencia similar a la de Soulsby–Van Rijn, mientras que Mil-Homens et al. (2013) entrega los valores más bajos en playas intermedias y disipativas, con una variación comparativamente leve (aproximadamente un factor 1,7).

Figura 5. Transporte longitudinal adimensional (Q*) en función del parámetro de Dean (Ω) para M_{wD} = 45°



Fuente: Elaboración propia.

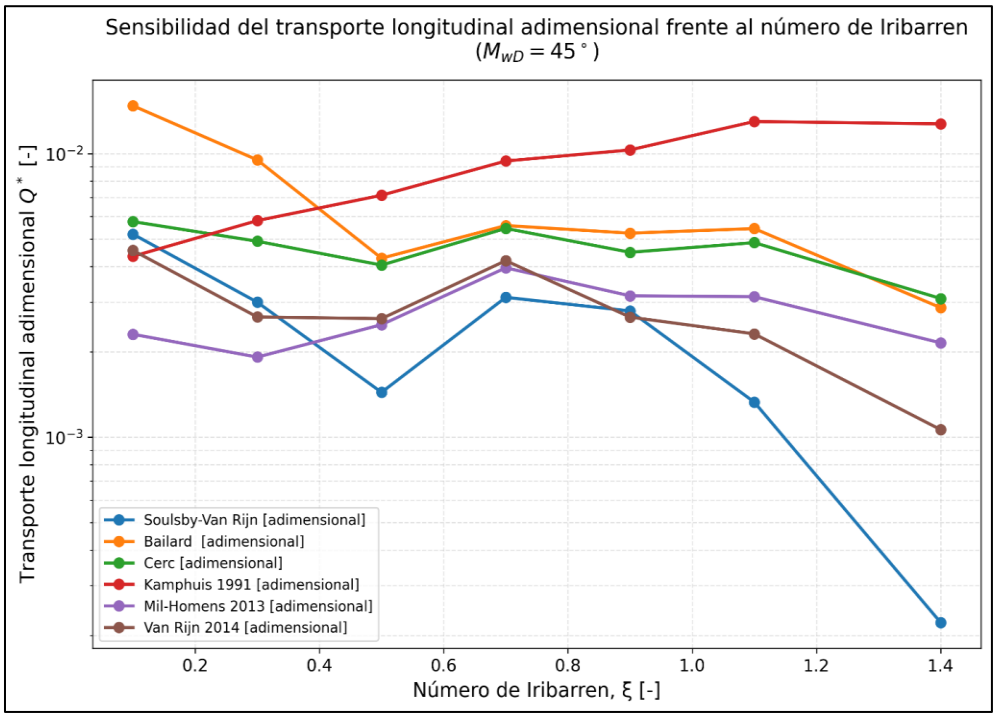
3.3 Sensibilidad adimensional frente al número de Iribarren (ξ)

El número de Iribarren (ξ), o parámetro de similitud de rompiente (Battjes, 1974), caracteriza la interacción entre el oleaje incidente y la pendiente del perfil costero. Valores bajos (ξ < 0,5) indican condiciones disipativas con rompientes progresivas tipo spilling, mientras que valores mayores representan condiciones más reflectivas con procesos de rotura más abruptos (plunging para 0,5 < ξ < 3,3 y surging para ξ > 3,3).

Para MwD = 45° (Figura 6), en el rango analizado (ξ ≈ 0,1–1,4), el transporte adimensional decrece, en general, al aumentar el número de Iribarren. En condiciones disipativas (ξ bajo), la energía se disipa progresivamente en una zona de surf extensa, favoreciendo la movilización del sedimento.

En cambio, a mayor ξ, la rotura se concentra en una franja más estrecha y cercana a la costa, lo que limita dicho transporte.

Figura 6. Transporte longitudinal adimensional (Q*) en función del número de Iribarren (ξ) para M_{wD} = 45°



Fuente: Elaboración propia.

En términos comparativos, la formulación de Bailard entrega sistemáticamente los mayores valores de Q*, debido a su dependencia directa de términos energéticos asociados al movimiento orbital del agua, mientras que Soulsby–Van Rijn presenta la caída más pronunciada hacia valores altos de ξ, al incorporar criterios de inicio de movimiento y resistencia del fondo. Kamphuis (1991) exhibe un comportamiento distintivo: su transporte adimensional aumenta con ξ, a diferencia del resto de las formulaciones, evidenciando una fuerte dependencia relativa de la pendiente del perfil.

4 CONCLUSIONES

El presente estudio evaluó de forma sistemática el desempeño comparativo entre formulaciones empíricas clásicas y la modelación bidimensional acoplada (TELEMAC-2D–TOMAWAC–GAIA) para la estimación del transporte longitudinal de sedimentos bajo condiciones representativas de la costa chilena. A partir de una matriz de 1.079 escenarios analizados, se obtienen las siguientes conclusiones:

El estado morfodinámico de la playa constituye el principal condicionante en la consistencia de los resultados entre el modelo 2D y las formulaciones empíricas. En regímenes de playas disipativas ($\Omega \geq 6$, ξ bajos), los enfoques empíricos y numéricos convergen a valores cercanos; por el contrario, en playas reflectivas ($\Omega < 1$, ξ altos), las diferencias se amplifican debido a la mayor sensibilidad frente a la pendiente y al tamaño de grano (D_{50}).

Respecto al comportamiento y sesgo de las formulaciones, se observó que la formulas empíricas sobreestiman las tasas respecto a la modelación numérica, especialmente en rangos de bajo transporte. Dicha correlación mejora sustancialmente cuando se adoptan índices de rotura elevados (γ = 0,7–0,9), alcanzando órdenes de magnitud coherentes con las observaciones experimentales de Van Rijn (2014).

Cuando se implementa un modelo numérico 2D acoplado como TELEMAC-2D + TOMAWAC + GAIA, se resuelve la hidrodinámica simplificada y acoplada al transporte de sedimento; sin embargo, el cálculo depende en gran parte de la ecuación interna de transporte de sedimentos que se seleccione dentro del módulo GAIA, de modo que no existe una respuesta única ni universal en el modelo numérico. Cambiar la formulación de transporte en GAIA modifica sustancialmente la tasa de transporte calculada, aun cuando el oleaje, la batimetría y las corrientes resueltas sean exactamente las mismas. De esta manera, mientras que un esquema energético como Bailard tiende a sobreestimar el transporte al omitir el umbral de movimiento, un esquema con tensión crítica como Soulsby–Van Rijn representa con mayor fidelidad la desactivación del transporte en perfiles reflectivos y arenas gruesas. Por lo tanto dependerá del modelador determinar cuál formulación será la más adecuada a considerar.

Desde una perspectiva aplicada, se recomienda el empleo de formulaciones empíricas para diagnósticos preliminares y etapas de perfil en costas disipativas. En contraste, para estudios de detalle, diseño de obras marítimas, balances sedimentarios y análisis de estabilidad de playas, en

particular sobre perfiles reflectivos, se justifica plenamente el uso de modelos numéricos 2D acoplados. Finalmente, en el ámbito de la investigación, resulta indispensable avanzar en campañas de medición en terreno que permitan validar de forma concluyente qué aproximación describe con mayor fidelidad la física local y refinar la calibración del índice de rotura.

5 REFERENCIAS

Bailard, J. A. 1981. An energetics total load sediment transport model for a plane sloping beach. Journal of Geophysical Research: Oceans, 86(C11), 10938–10954.

Battjes, J. A. 1974. Surf similarity. Proceedings of the 14th International Conference on Coastal Engineering. American Society of Civil Engineers.

Battjes, J. A., y J. P. F. M. Janssen. 1978. Energy loss and set-up due to breaking of random waves. Proceedings of the 16th International Conference on Coastal Engineering.

Battjes, J. A., y M. J. F. Stive. 1985. Calibration and verification of a dissipation model for random breaking waves. Journal of Geophysical Research: Oceans, 90(C5), 9159–9167.

Dean, R. G. 1977. Equilibrium beach profiles: U.S. Atlantic and Gulf coasts (Ocean Engineering Technical Report No. 12). University of Delaware.

Hervouet, J.-M. 2007. Hydrodynamics of free surface flows: Modelling with the finite element method. John Wiley & Sons.

Kamphuis, J. W. 1991. Alongshore sediment transport rate. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 117(6), 624–640.

Lippmann, T. C., A. H. Brookins, y E. B. Thornton. 1996. Wave energy transformation on natural profiles. Coastal Engineering, 27(1–2), 1–20.

Mil-Homens, J., R. Ranasinghe, J. S. M. van Thiel de Vries, y M. J. F. Stive. 2013. Re-evaluation and improvement of three commonly used bulk longshore sediment transport formulas. Coastal Engineering, 75, 29–39.

Roelvink, J. A. 1993. Dissipation in random wave groups incident on a beach. Coastal Engineering, 19(1–2), 127–150.

Soulsby, R. L. 1997. Dynamics of marine sands: A manual for practical applications. Thomas Telford.

TELEMAC-MASCARET Consortium. 2024. GAIA user manual (Version 9.0). EDF R&D, Laboratoire National d'Hydraulique et Environnement.

TELEMAC-MASCARET Consortium. 2024. TELEMAC-2D user manual (Version 9.0). EDF R&D, Laboratoire National d'Hydraulique et Environnement.

Thornton, E. B., y R. T. Guza. 1983. Transformation of wave height distribution. Journal of Geophysical Research: Oceans, 88(C10), 5925–5938.

U.S. Army Corps of Engineers. 1984. Shore protection manual (4th ed.). Coastal Engineering Research Center.

Van Rijn, L. C. 2014. A simple general expression for longshore transport of sand, gravel and shingle. Coastal Engineering, 90, 23–39.

Wright, L. D., y A. D. Short. 1984. Morphodynamic variability of surf zones and beaches: A synthesis. Marine Geology, 56(1–4), 93–118.