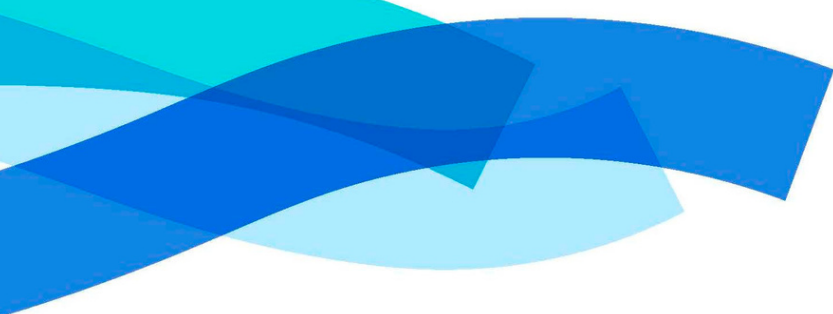




**Mirando los ríos desde el
mar. Viejos y nuevos
debates para una
transición hídrica justa**

**Olhar os rios a partir do
mar. Velhos e novos
debates para uma
transição hídrica justa**

Fundación Nueva Cultura del Agua

Editum. Ediciones de la Universidad de Murcia



Cómo citar esta obra:

Sánchez Gallardo, L.(Coord.). *Mirando a los ríos desde el mar. Viejos y nuevos debates para una transición hídrica justa*. Editum. Ediciones de la Universidad de Murcia; Fundación Nueva Cultura del Agua. <https://doi.org/10.6018/editum.3003>

DOI: [10.6018/editum.3003](https://doi.org/10.6018/editum.3003)

ISBN: 978-84-09-39675-7

Si el lector detecta algún error en el libro o bien quiere contactar con el autor, puede enviar un correo a publicaciones@um.es



Sánchez Gallardo, L.(Coord.). *Mirando a los ríos desde el mar. Viejos y nuevos debates para una transición hídrica justa*. Editum. Ediciones de la Universidad de Murcia; Fundación Nueva Cultura del Agua.
<https://doi.org/10.6018/editum.3003>

Se permite la reutilización y redistribución de los contenidos siempre que se reconozca la autoría y se cite con la información bibliográfica completa.

ESTUDIO DE LA EVOLUCIÓN HIDRODINÁMICA DEL ESTUARIO DE SUANCES DEBIDA AL CAMBIO CLIMÁTICO MEDIANTE LA POTENTIAL ENERGY ANOMALY

Jagoba Lupiola Chamorro, Team Ingeniería y Consultoría S.L., Parque Científico y Tecnológico de Bizkaia y IHCantabria - Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria; Javier F. Bárcena Gómez, IHCantabria - Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria; Javier García Alba, IHCantabria - Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria; Andrés García Gómez, IHCantabria - Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria.

Palabras clave: estuarios, cambio climático, Anomalía de la Energía Potencial (AEP), modelado 3D, estratificación y mezcla.

1. Introducción y objetivos

La competición entre mezcla y estratificación en estuarios determina la calidad de sus aguas (Valle-Levinson, 2010) y, por tanto, sus condiciones de vida y uso. Por este motivo, comprender el funcionamiento de los estuarios es de vital importancia, ya que, por ejemplo, 21 de las 30 mayores ciudades del mundo se encuentran junto a este tipo de sistemas acuáticos (Khojasteh et al. 2020).

El estudio de los procesos de mezcla y estratificación en estuarios ha sido objeto de numerosos trabajos durante décadas (Simpson, 1981; Geyer et al., 2008; Bárcena et al., 2015). Estos procesos se producen debido a la interacción entre los aportes mareales y fluviales que varían significativamente dependiendo de las características de cada estuario (Ralston et al., 2010). Además, debido al aumento del nivel del mar y las modificaciones del clima, puede que estas condiciones de mezcla y estratificación se vean modificadas por una mayor intrusión de aguas marinas en el estuario, generando un cambio en la biodiversidad de las zonas intermareales.

Para el estudio de los procesos de mezcla y estratificación, se ha elaborado un modelo tridimensional validado y calibrado de alta resolución sobre el que se ha aplicado el uso de la Anomalía de Energía Potencial (AEP) (Simpson, 1981), definida en la ecuación 1 como la cantidad de energía mecánica (por m³) necesaria para homogeneizar instantáneamente la columna de agua con una densidad determinada (densidad media de la columna de agua).

Ecuación 1. Anomalía de la Energía Potencial (AEP).

$$\phi = \frac{1}{H} \int_{-h}^{\eta} gz(\bar{\rho} - \rho) dz = -\frac{1}{H} \int_{-h}^{\eta} gz\tilde{\rho} dz$$

Fuente: Simpson (1981).

En esta ecuación, ρ es el perfil vertical de densidades sobre la columna de agua H , donde H es la altura total del agua desde el fondo ($-h$) hasta η , la coordenada vertical de la superficie del agua en un instante dado, z la coordenada vertical, g la aceleración de la gravedad, $\bar{\rho}$ es la densidad media de la columna de agua y ρ' es la fluctuación de la densidad en la columna de agua. Además, cabe indicar que el valor de ρ' aumenta con la estratificación.

Por tanto, el objetivo de este estudio es: (1) realizar un análisis detallado de la hidrodinámica actual del estuario de Suances con especial atención a los procesos de mezcla y estratificación para, posteriormente, (2) llevar a cabo proyecciones a futuro en dicho estuario considerando cambios en las condiciones fluviales (caudal y temperatura) y en las del mar (nivel, temperatura y salinidad).

2. Metodología

El estuario de Suances es un estuario mesomareal ubicado en la costa cántabra, cuenta con una longitud aproximada de 12 km, 150 m de anchura media y una superficie de 339,7 ha con un 76% ocupado por zonas intermareales. En cuanto a las actuaciones antropogénicas, cabe destacar que el 50% de la canal principal está bordeada por diques que alteran sus condiciones hidrodinámicas. La batimetría de la canal principal varía entre 1 y 8 m, estando las zonas intermareales más elevadas unos 3,2 m sobre el nivel medio de mar. La mayor profundidad se localiza en la zona costera adyacente siendo de 43 m.

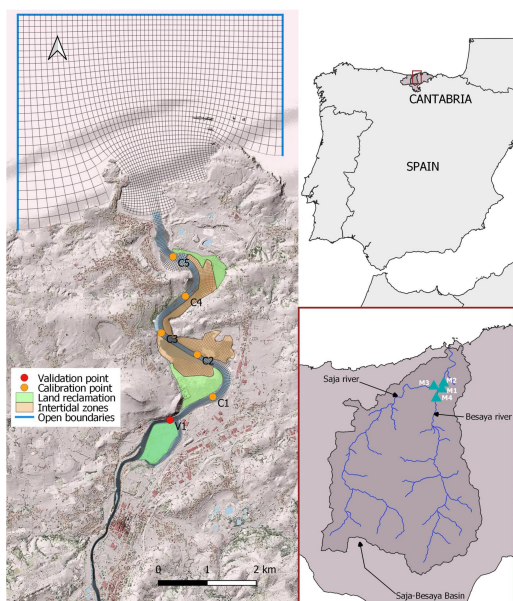


Figura 1. A) localización del estuario de Suances, la malla del modelo, la batimetría empleada y los contornos abiertos, así como los puntos de calibración y validación del modelo hidrodinámico. B) localización de Cantabria en España. C) cuenca fluvial del Saja-Besaya que desemboca en el estuario de Suances con las estaciones meteorológicas utilizadas en el estudio. Fuente. Elaboración propia

El modelo numérico empleado ha sido el Delft3D-FLOW (Lesser et al. 2004). Para este modelo, se ha implementado una malla curvilínea que cubre al estuario y su zona costera adyacente (figura 1) con una distribución vertical de 20 capas sigma equidistantes. Los contornos abiertos del modelo se corresponden con la zona costera y el límite de influencia mareal, donde se han incluido los forzamientos de la marea (nivel, temperatura y salinidad) y del río (caudal, temperatura y salinidad), respectivamente. Por último, se ha incluido un modelo del flujo de calor para modelar las interacciones de la atmósfera con la superficie libre del estuario alimentado con los datos medidos en las estaciones meteorológicas (irradiancia solar, temperatura del aire y humedad relativa).

Para la calibración y validación del modelo se han empleado dos campañas de campo. La primera campaña, empleada para la calibración del modelo, se inició el 16/04/2015 alargándose hasta el 12/05/2015. Los sensores utilizados fueron: 2 correntímetros de perfil de velocidad acústica Doppler (ADCP) y 3 sensores de presión y temperatura (nivel de agua y temperatura). Con estos dispositivos se midieron continuamente, cada 10 minutos, 5 puntos de niveles de agua y temperatura (ver figura 1, puntos C1 a C5) y 2 puntos de perfiles de velocidad (ver figura 1, puntos, C3 y C5). Además, se tomaron muestras de salinidad del fondo y de la superficie de la columna de agua en los puntos C1 y C5 al inicio y final de la campaña durante un ciclo de marea. La segunda campaña, empleada para la validación del modelo, comenzó el 22/12/2020 y se alargó hasta el 31/03/2021. Para esta campaña, se diseñó un soporte especial de bajo coste (ver figura 1, punto V1) que se ancló en el fondo del estuario para medir varios parámetros en la columna de agua a diferentes profundidades. Los sensores utilizados fueron: un ADCP y 4 sensores de presión que medían continuamente cada 15 minutos. Finalmente, como complemento a esta segunda campaña, se realizó una nueva batimetría de detalle del tramo más interno de la ría (figura 1).

El nivel, temperatura y salinidad de la marea en el contorno se ha anidado del sistema Iberian-Biscay-Ireland (IBI) de Copernicus (Sotillo et al. 2015) mientras que los caudales fluviales se han calculado por medio de un modelo hidrológico acoplado, específico para este estuario, con base en la precipitación y temperatura del aire recogidas en las estaciones meteorológicas (figura 1). En la figura 2 se muestran los valores de BIAS y SKILL obtenidos de la calibración y validación del modelo hidrodinámico implementado en el estuario de Suances. Dichos valores confirman la fiabilidad del modelo para reproducir la hidrodinámica del estuario.



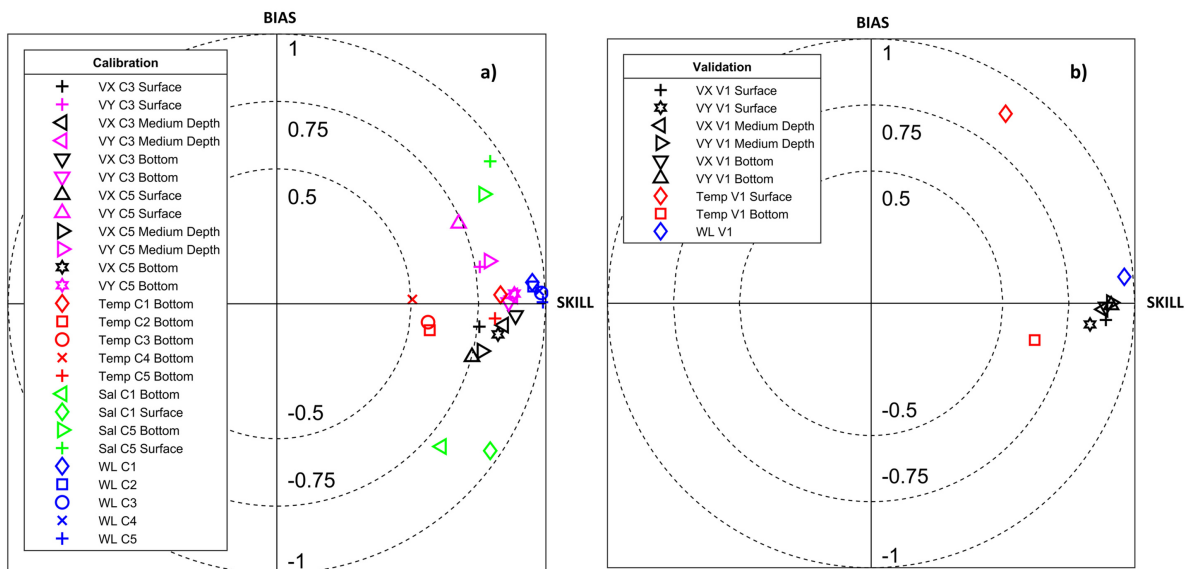


Figura 2. Diagrama de objetivos con los resultados de SKILL y BIAS obtenidos para la calibración (a) y la validación (b) del modelo. Nótese que las unidades de BIAS para la temperatura, la velocidad de la corriente, la salinidad y el nivel del agua están en ° C, m/s, psu y m, respectivamente. Fuente: Elaboración propia.

Para llevar a cabo el análisis de la competición entre mezcla y estratificación en el estuario, se ha empleado la AEP (ecuación 1). En primer lugar, se ha analizado el año 2020 para, a continuación, modelar de nuevo el año completo sustituyendo los forzamientos reales del año 2020 por aquellos adaptados al cambio climático para los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5 en los años 2050 y 2100.

3. Resultados

En la figura 3 se puede observar cómo existe una influencia significativa de la descarga del río en la localización de la zona de mayor estratificación. Durante caudales bajos, dicha zona se localiza entre los kilómetros cuatro y ocho, con un valor máximo de que oscila por la alternancia de las mareas vivas y muertas. En la desembocadura del estuario, los valores de son muy bajos durante las mareas vivas; aumentando su magnitud en las mareas muertas. Por otro lado, durante los eventos de caudal alto, la zona de mezcla se desplaza hacia la desembocadura tanto como la magnitud del caudal del río. En estos casos, se observan zonas con valores de muy bajos en la cabecera del estuario, ya que la descarga fluvial homogeneiza esta zona.

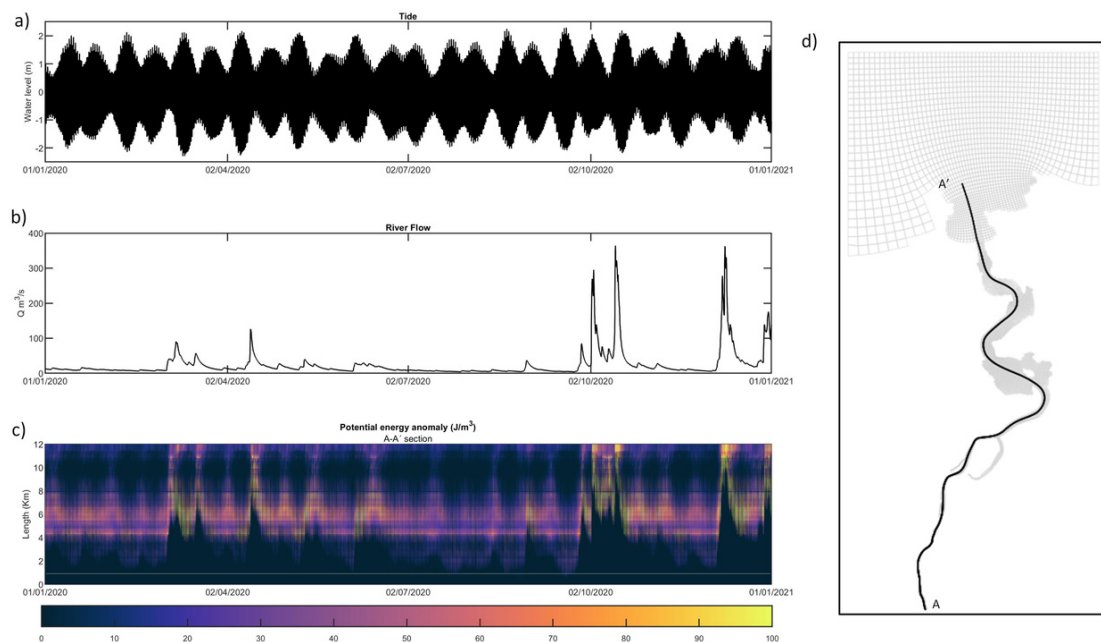


Figura 3. Forzamientos empleados de a) Niveles de marea y b) caudal del río para el año 2020, c) Diagrama de Hovmöller que muestra para el año 2020 con perfiles horarios y su valor a lo largo del año la sección A-A' y d) sección A-A'. Fuente: Elaboración propia.

4. Discusión

En cuanto a la adaptación del cambio climático (simulaciones actualmente en progreso), se ha visto como con las proyecciones de los forzamientos habrá un aumento de los caudales extremos que variarán según las estaciones del año. Además, debido al aumento del nivel del mar, se espera encontrar cambios significativos en las ubicaciones de las zonas de mezcla y estratificación, principalmente en los momentos de caudal bajo. Por otro lado, se prevé que las zonas de estratificación se extiendan con mayor intensidad en las zonas intermareales y que estas alcancen zonas aguas arriba del estuario superiores a las actuales debido al aumento del nivel del mar.

5. Conclusiones

Para este estudio se ha implementado un modelo tridimensional de alta resolución en el estuario de Suances, calibrado y validado con datos continuos obtenidos de dos campañas en dos años distintos, que ofrece un alto nivel de detalle y confiabilidad en los procesos hidrodinámicos del estuario. Además, se ha modelado el año 2020 con sus forzamientos reales, y se encuentra en proceso de cálculo las previsiones de cambio climático para los años 2050 y 2100, teniendo en cuenta los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5, con el objetivo de analizar la competición existente entre mezcla y estratificación en la columna de agua del estuario. Para ello, se ha aplicado la AEP como indicador de dicha competición.

Se ha observado como existe una gran variabilidad espaciotemporal en su estructura vertical, teniendo la marea un papel protagonista. La mayor parte del tiempo, la zona de mezcla se sitúa entre los kilómetros cuatro y ocho del estuario, variando según la subida y bajada de la marea. Sin embargo, cuando se produce una avenida, la marea pasa a tener un papel secundario puesto que el aporte fluvial desplaza el agua del estuario hacia la desembocadura, centrando la estratificación en esta zona. La influencia del río es extremadamente importante en el estuario ya que, cuanto mayor sea el caudal, mayor será el desplazamiento de la zona de mayor estratificación hacia el exterior del estuario.

6. Referencias

- Bárcena, J., Camus, P., García, A., & Álvarez, C. (2015). Selecting model scenarios of real hydrodynamic forcings on mesotidal and macrotidal estuaries influenced by river discharges using K-means clustering. *Environmental Modelling & Software*, 70-82. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2015.02.007>
- Geyer, W., Scully, M., & Ralston, D. (2008). Quantifying vertical mixing in estuaries. *Environmental Fluid Mechanics*, 495-509. <https://doi.org/10.1007/s10652-008-9107-2>
- Khojasteh, D., Hottinger, S., Felder, S., De Cesare, G., Heimhuber, V., Hanslow, D. J., & Glamore, W. (2020). Estuarine tidal response to sea level rise: The significance of entrance restriction. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 244(July). <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2020.106941>
- Lesser, G. R., Roelvink, J. A., van Kester, J. A., & Stelling, G. S. (2004). Development and validation of a three-dimensional morphological model. *Coastal Engineering*, 883-915. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2004.07.014>
- Ralston, D.K., Geyer, W.R., & Lerczak, J.A. (2010). Structure, variability, and salt flux in a strongly forced salt wedge estuary. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 115, C06005. <https://doi.org/10.1029/2009JC005806>
- Simpson, J. H. (1981). The shelf-sea fronts: implications of their existence and behaviour. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 302, 531-546. <https://doi.org/10.1098/rsta.1981.0181>
- Sotillo, M. G., Cailleau, S., Lorente, P., Levier, B., R. Aznar, R., Reffray, G., Amo- Baladrón, A., Chanut, J., Benkiran, M. & Alvarez-Fanjul, E. (2015) The MyOcean IBI Ocean Forecast and Reanalysis Systems: operational products and roadmap to the future Copernicus Service, *Journal of Operational Oceanography*, 63-79. <https://doi.org/10.1080/1755876X.2015.1014663>

Valle-Levinson, A. (2010). *Contemporary Issues in Estuarine Physics*. Cambridge: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511676567>

