

Análisis de los cambios de densidad en el estuario del río Guadalquivir mediante la Anomalía Longitudinal de la Energía Potencial (ALEP)

Cobos, Manuel; Baquerizo, Asunción; Díez-Minguito, Manuel; Losada, Miguel Ángel.

Instituto Interuniversitario de Investigación del Sistema Tierra en Andalucía. Universidad de Granada. Avda. Del Mediterráneo s/n, 18006, Granada, España (mcobosb@ugr.es, abaqueri@ugr.es, mdiezm@ugr.es, mlosada@ugr.es).

Resumen

El objetivo de este estudio es analizar el origen, intensidad y persistencia de los procesos estuarinos a partir de la anomalía de la energía potencial en estuarios débilmente estratificados o bien mezclados. Para ello, se propone una modificación de la densidad de referencia, densidad media vertical, por la densidad media vertical en una sección situada aguas abajo del punto en cuestión. La nueva formulación da lugar a la variable ‘anomalía longitudinal de la energía potencial’ (ALEP). Esta se aplica al estuario del río Guadalquivir, el cual se segmenta en cinco tramos donde se asume que los procesos son homogéneos. Los resultados indican que la aplicación de la ALEP aporta información sobre los procesos estuarinos que producen cambios espaciales y temporales en la salinidad, la temperatura y la concentración de sólidos en suspensión.

Palabras clave: anomalía longitudinal de la energía potencial

1. Introducción

Los intercambios de masa que se producen entre los estuarios y las masas de aguas adyacentes de ríos, mares y océanos, se rigen, entre otros, por los procesos de mezcla y estratificación de la columna de agua. Hace casi 50 años se concibió el concepto de anomalía de energía potencial aplicado a la detección de frentes oceánicos (Simpson y Hunter, 1974). La anomalía de la energía potencial es una medida de la estratificación de la columna de agua que se utiliza ampliamente en estuarios, lagos, plumas y en mares costeros (Hofmeister et al., 2009; Yang et al., 2017; Garvine and Whitney, 2006; Zhao et al., 2018). Para una posición dada en el sistema de coordenadas definido por los ejes x , y y z (longitudinal, transversal y vertical), la anomalía de la energía potencial se describe matemáticamente como:

$$\phi_s(x, y, t) = \frac{g}{d} \int_{-h}^{\eta} (\rho(x, y, z, t) - \bar{\rho}(x, y, t)) z dz \quad (1)$$

donde g es la constante de gravedad, $d = \eta + h$ es la profundidad total del estuario donde $z=0$ define la posición de la superficie libre, t es el tiempo, $\rho(x, y, z, t)$ es la densidad y $\bar{\rho}(x, y, t)$ es la densidad media vertical en el mismo punto.

Gracias a la dependencia de ϕ_s con la densidad, y por ende, con la salinidad, temperatura y la concentración de sólidos en suspensión, su análisis aporta información sobre los procesos estuarinos subyacentes. A su vez, los cambios naturales o antropogénicos sobre las condiciones morfológicas del estuario y forzamientos sobre él (ocupación de llanos mareales, protección de márgenes, profundización del canal principal, reducción de descargas) producirá cambios en los procesos que indirectamente serán recogidos por ϕ_s . En la figura 1 se muestra cómo un incremento de las condiciones de mezcla por fondo modifica el perfil de densidad vertical y ϕ_s pasa de un valor dado (a) a cero (c).

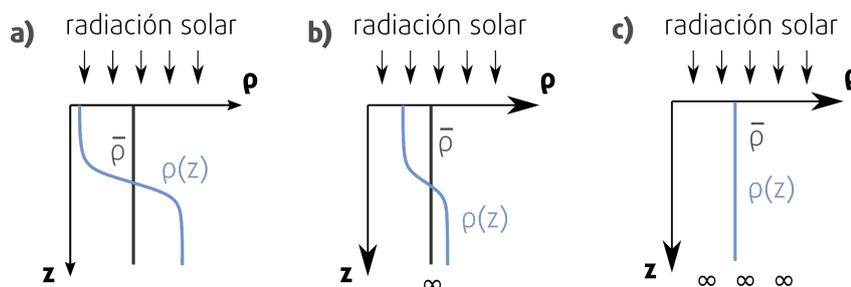


Fig. 1. Ejemplos de perfiles verticales de densidad $\rho(z)$ en condiciones de (a) estratificación fuerte, débil y mezcla completa. El símbolo ∞ indica agitación.

En la ecuación (1) se observa que el valor de referencia para designar condiciones de mezcla completa ($\phi_s = 0$) es la densidad media de la columna de agua. La información que aporta ϕ_s en muchos estuarios a lo largo del globo es esencial para su gestión, sin embargo, en estuarios débilmente estratificados o bien mezclados donde $\rho(x, y, z, t) \approx \bar{\rho}(x, y, t)$, como es el caso del estuario del río Guadalquivir (GRE), ϕ_s es aproximadamente constante e igual a cero, siendo muy limitada la información que aporta.

En este trabajo, se analizan las relaciones entre los cambios observados de densidad y los procesos estuarinos más significativos en el GRE a través del concepto anomalía longitudinal de la energía potencial (ALEP). Para ello, se propone una formulación que permita su evaluación en estuarios bien mezclados. Así, en la sección 2 se muestra el área de estudio y las observaciones in-situ que se disponen para su evaluación. En la sección 3 se describe y define la anomalía longitudinal de la energía potencial y una versión simplificada de ésta para su aplicación en estuarios estrechos y bien mezclados. En la sección 4 se presentan los resultados de la observación de las principales variables de las que depende la ALEP y su relación con ésta. La sección 5 cierra el trabajo.

2. Área de estudio

El GRE se localiza en el sur-oeste de España ($36^{\circ}43'N-37^{\circ}32'N$, $5^{\circ}56'O-6^{\circ}30'O$) y es el área de transición entre la cuenca del río del mismo nombre y el Golfo de Cádiz. El estuario comprende los últimos 110 km del río, donde el último tramo de 85 km es navegable hasta Sevilla. La presa de Alcalá del Río se encuentra en el extremo de aguas arriba. La profundidad mínima se mantiene en el canal ~ 7 metros para favorecer la navegación.



Fig. 3. Área de estudio: tramo bajo del río Guadalquivir. A lo largo del estuario se muestran los distintos dispositivos de medición que registraron variables meteocean durante el periodo de 2008 a 2010. En el subpanel se observa la localización del estuario.

En este trabajo se utilizan las mediciones de seis estaciones de calidad ambiental que registraron temperatura, salinidad y turbidez cada 30 minutos por la red de monitorización instalada por el Instituto de Ciencias Marinas de Andalucía desde 2008 a 2010 (Navarro et al., 2011). La superficie libre o nivel del mar fue registrado cada 10 minutos por el mareógrafo de Bonanza (Puertos del Estado) ubicado próximo a la desembocadura y los seis correntímetros. Las descargas de agua dulce de la presa se obtuvieron diariamente de la Agencia Andaluza del Agua.

3. Metodología

Se ha modificado el valor de referencia para condiciones de mezcla completa de la ecuación (1), la densidad media vertical, por la densidad media vertical situada en un punto aguas abajo del estuario, de forma similar a como lo hizo Garvine y Whitney (2006). Así, la anomalía longitudinal de la energía potencial (ALEP), ϕ , se define como la energía necesaria para homogeneizar instantáneamente el perfil longitudinal de densidad. Matemáticamente, se describe como:

$$\phi(x, y, t) = \frac{g}{\rho_0} \int_{-h}^{\eta} (\rho(x, y, z, t) - \bar{\rho}(x_0, y_0, t)) z dz \quad (2)$$

donde $\bar{\rho}(x_0, y_0, t)$ es la densidad media de la columna de agua en punto situado aguas abajo (x_0, y_0) . En canales estrechos se puede asumir que el efecto de Coriolis es despreciable y, por lo tanto, el flujo de masa es uniforme transversalmente (Valle-Levinson, 2008). La ecuación (2) se simplifica a 2DV. Si se considera, que el estuario está débilmente estratificado o bien mezclado, $\rho(x, z, t)$ se puede aproximar por $\rho(x, t)$, obteniendo:

$$\phi(x, t) \approx \frac{gd(\bar{\rho}(x_0, t) - \rho(x, t))}{2} \quad (3)$$

Como ya apuntaron Díez-Minguito et al. (2012, 2013, 2014) y Losada et al. (2017), los procesos dominantes en el GRE dependen tanto de las condiciones de contorno (régimen de descargas o mareas, entre otros) como del espacio. Así, para explorar la variabilidad longitudinal, se ha segmentado el estuario en cinco tramos dentro de los cuales se asume que los procesos son homogéneos. La figura 4 muestra las características geométricas del estuario. La elección de los tramos tiene la singularidad de que coinciden con la posición de las estaciones de calidad del agua (CTDs) que se muestran en la figura 3, con la excepción del tercero (desde la desembocadura hacia aguas arriba) que no se ha utilizado al estar ubicado muy próximo al siguiente.

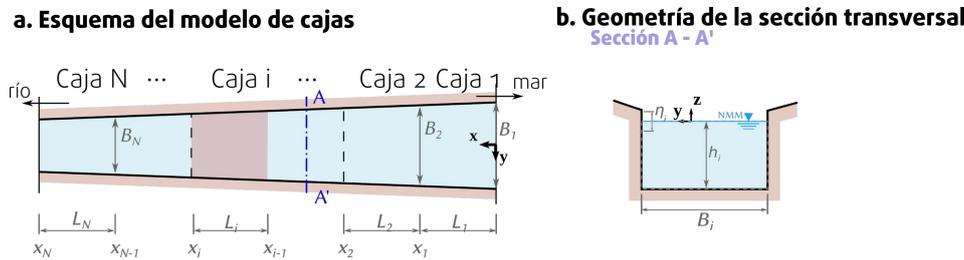


Fig. 4. (a) Esquema de la separación del estuario en cajas y (b) características geométricas de las cajas.

4. Resultados

4.1. Análisis de las observaciones

En la figura 5 se observa como la salinidad y concentración de material particulado en suspensión (MPS) cambia su comportamiento en función del régimen de descarga fluvial. Con descargas fluviales inferiores a $40 \text{ m}^3/\text{s}$ (periodo 1 en Figura 5), p.e. durante agosto-septiembre de 2008, el régimen de mareas domina los procesos de intercambio y mezcla en el estuario. Todas las variables muestran un comportamiento oscilatorio a excepción de la temperatura que muestra un patrón a escala anual. Durante la primera quincena de febrero de 2009 (2), la descarga alcanza los $400 \text{ m}^3/\text{s}$. Se aprecia un claro retroceso de la cuña salina ($S \sim 0$ psu en casi todo el estuario, exceptuando la desembocadura) y la puesta en suspensión del material del fondo con niveles que alcanzan los $10 \text{ kg}/\text{m}^3$ (aguas arriba). Durante la segunda quincena de febrero hasta mayo del mismo año se observa un periodo de recuperación (3), donde los caudales fluviales vuelven a estar por debajo de los $40 \text{ m}^3/\text{s}$. Se aprecia una recuperación paulatina de la salinidad con cada ciclo de mareas vivas y muertas a la vez que la concentración MPS se reduce. Durante este periodo se intensifica la amplitud de la oscilación de la densidad.

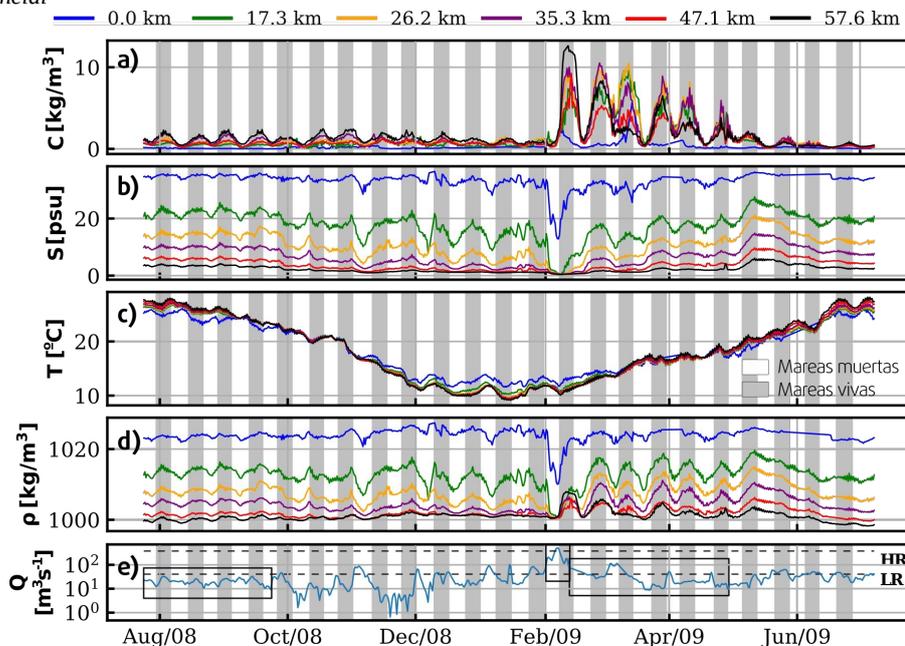


Fig. 5. Series temporales de los promedios mareales (M2) de (a) concentración de sólidos en suspensión, (b) salinidad, (c) temperatura, (d) promedio vertical de la densidad y (e) caudal de descarga desde la presa de cabecera. Las cajas que se muestran en el panel (e) indican condiciones de aguas bajas (izquierda), régimen de descargas (medio) y periodo de recuperación post-descarga (derecha). Las bandas verticales grises y blancas representan los periodos de mareas vivas y muertas, respectivamente.

4.2. Análisis de la ALEP

La ecuación (3) se ha aplicado entre secciones del estuario ($x_0 - x_1$, $x_1 - x_2$, ..., $x_4 - x_5$) para un profundidad constante igual a 7 metros.

En la figura 6.a se representa la serie temporal de anomalía longitudinal de la energía potencial para cada sección. En el panel b se observa el valor de ϕ_e para el estuario, calculado como la suma ponderada de ϕ por el área superficial entre secciones. En el periodo (1) se observa claramente como ϕ oscila con los ciclos de mareas vivas y muertas, presentando máximos en las últimas. La amplitud de la oscilación se va reduciendo de diciembre de 2008 hasta febrero de 2009 debido a que son más numerosos los pulsos de descarga que superan el umbral de dominio mareal ($40 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$) y va perdiendo fuerza la componente mareal. Durante el periodo (2) se alcanza el punto de máxima mezcla en el estuario del periodo de estudio, donde casi todo el estuario está compuesto de agua dulce y ϕ decrece drásticamente. Por lo tanto, en la desembocadura se observa el máximo gradiente de densidad. Así, ϕ en la desembocadura aumenta con Q_d , llegando a superar el valor de ϕ en $x=17.3 \text{ km}$. Se observa una reducción drástica también en ϕ_e motivada por la descarga de $531.16 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ (02/07/2009). Tras esta fase, comienza la recuperación del estuario, donde en primer lugar se observan picos negativos de ϕ en $x=26.2 \text{ km}$, $x=35.3 \text{ km}$, $x=47.1 \text{ km}$ y $x=57.6 \text{ km}$ con un desfase de varios días entre ellos. El sedimento puesto en suspensión se mantiene por turbulencia de las corrientes de marea. Por este motivo, desde el final de la descarga hasta comienzos de mayo se observan las mayores oscilaciones de ϕ ($\pm 150 \text{ Jm}^{-3}$ en $x=17.3 \text{ km}$ y $\pm 50 \text{ Jm}^{-3}$ en $x=26.2$ y $x=35.3 \text{ km}$). En terminos generales ϕ_e presenta un comportamiento similar.

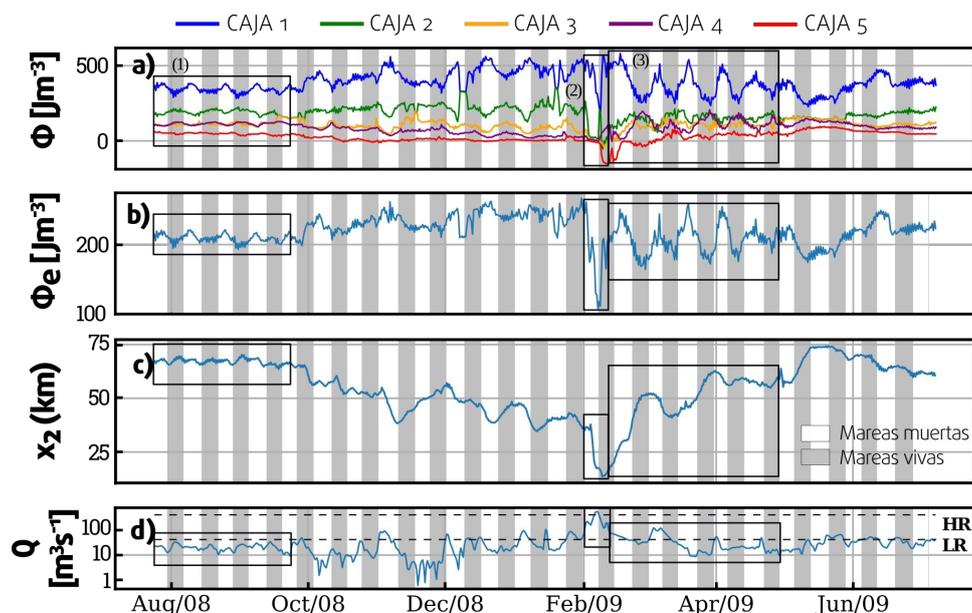


Fig. 6. Series temporales de anomalía longitudinal de la energía potencial (a) para cada caja (entre segmentos), (b) del estuario, (c) intrusión salina (iso-halina de 2 psu) y (d) caudal fluvial descargado por la presa de cabecera.

5. Conclusiones

En este estudio se han analizado los cambios espaciales y temporales que se observan en la salinidad, temperatura y concentración de sólidos en suspensión, partiendo de las observaciones y de la ALEP. Para ello, se ha propuesto un cambio de referencia de las condiciones de mezcla completa en la formulación de la anomalía de la energía potencial para aplicarla a estuarios con la columna de agua bien mezclada. La nueva referencia se establece aguas abajo del estuario y su versión simplificada, la cual asume homogeneidad transversal y mezcla vertical completa, se ha aplicado al estuario del río Guadalquivir.

Tras el análisis de las observaciones y de la ALEP se observa como la ALEP permite valorar de manera conjunta valorar el origen de estos. Como punto fuerte, destacar la variabilidad longitudinal de la ALEP da lugar a zonas de convergencia que se pueden relacionar con los máximos de turbidez. La discriminación entre régimen de aguas bajas, avenidas y periodo de recuperación se hace patente en la magnitud y variabilidad de la ALEP, con oscilaciones suaves en ciclos de mareas vivas y muertas durante el primero, desplazando hacia la desembocadura la posición del máximo gradiente longitudinal de densidad durante los episodios de avenidas y exhibiendo la máxima variabilidad durante el posterior periodo de recuperación.

Agradecimientos

Este estudio ha sido parcialmente financiado por el Campus de Excelencia Internacional del Mar (CeI-MAR), por el proyecto AQUACLEW, que es parte RA4CS, y ERA-NET iniciado por el JPI Climate, y fundado por FORMAS (SE), DLR (DE), BMFWF (AT), IFD (DK), MINECO (ES), ANR (FR) con co-financiación de la Comisión Europea, y por el proyecto Multi-criteria analysis for Physical and bIotic Risk Assessment in EStuaries (PIRATES) que forma parte del Programa Estatal de investigación, desarrollo e innovación orientada a los RETOS de la sociedad (CTM2017-89531-R). Los datos de este estudio se han extraído de Navarro et al. (2019) [Creative Commons Attribution 4.0 Licencia internacional, derecho de acceso abierto].

Referencias

- DÍEZ-MINGUITO, M., BAQUERIZO, A., DE SWART, H., & LOSADA, M. (2014). Structure of the turbidity field in the Guadalquivir estuary: Analysis of observations and a box model approach. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 119 (10), 7190–7204.
- DÍEZ-MINGUITO, M., BAQUERIZO, A., ORTEGA-SÁNCHEZ, M., NAVARRO, G., & LOSADA, M. (2012). Tide transformation in the Guadalquivir estuary (sw Spain) and process-based zonation. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 117 (C3).
- DÍEZ-MINGUITO, M., CONTRERAS, E., POLO, M., & LOSADA, M. (2013). Spatio-temporal distribution, along-channel transport, and post-riverflood recovery of salinity in the Guadalquivir estuary (sw Spain). *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 118 (5), 2267–2278.
- HOFMEISTER, R., H. BURCHARD, and K. BOLDING (2009), A three-dimensional model study on processes of stratification and de-stratification in the limfjord, *Continental Shelf Research*, 29 (11-12), 1515–1524.
- GARVINE, R. W., y M. M. WHITNEY (2006). “An estuarine box model of freshwater delivery to the coastal ocean for use in climate models” en *Journal of Marine Research*, 64 (2), 173–194.
- LOSADA, M., DÍEZ-MINGUITO, M., & REYES-MERLO, M. (2017). Tidal-fluvial interaction in the Guadalquivir river estuary: Spatial and frequency-dependent response of currents and water levels. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 122 (2), 847–865.
- NAVARRO, G., F. J. GUTIÉRREZ, M. DÍEZ-MINGUITO, M. A. LOSADA, y J. RUIZ (2011). “Temporal and spatial variability in the Guadalquivir estuary: a challenge for realtime telemetry” en *Ocean Dynamics*, 61 (6), 753–765.
- NAVARRO, G., RUIZ, J., COBOS, M., BAQUERIZO, A., DÍEZ-MINGUITO, M., ORTEGA-SÁNCHEZ, M., & LOSADA, M. (2019, September). Atmospheric, hydrodynamic and water quality observations from environmental-quality stations, water level sensors, acoustic Doppler velocimeters, and meteorological stations located at the Guadalquivir river estuary (2008 – 2010). Retrieved from <https://doi.org/10.5281/zenodo.3459610> doi: 10.5281/zenodo.3459610.
- SIMPSON, J., y J. HUNTER (1974). “Fronts in the Irish sea” en *Nature*, 250 (5465), 404.
- VALLE-LEVINSON, A. (2008). Density-driven exchange flow in terms of the Kelvin and Ekman numbers. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 113 (C4).
- YANG, W., H. WEI, and L. ZHAO (2017), Observations of tidal straining within two different ocean environments in the East China sea: Stratification and near-bottom turbulence, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 122 (11), 8876–8893.
- ZHAO, Q., Y. REN, and J. X. WANG (2018), Temporal and spatial characteristics of potential energy anomaly in Lake Taihu, *Environmental Science and Pollution Research*, pp. 1–10.