

3.2.3. DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE SALINIDAD Y TURBIDEZ EN EL ESTUARIO DEL GUADALQUIVIR

M. Díez-Minguito¹, S. Bramato¹, E. Contreras², M.J. Polo², M.A. Losada¹

1. Grupo de Dinámica de Flujos Ambientales, Universidad de Granada. Centro Andaluz de Medio Ambiente. Avda. Mediterráneo s/n, 18006 Granada. mdiezm@ugr.es, sbramato@ugr.es, mlosada@ugr.es

2. Grupo de Dinámica Fluvial e Hidrología, Universidad de Córdoba. Campus de Rabanales, Ed. Leonardo da Vinci, Área de Ingeniería Hidráulica, 14071 Córdoba. o02coare@uco.es, mjpolo@uco.es.

En esta contribución se analiza la variabilidad espacio-temporal a escala pro-mediomareal de salinidad y la turbidez en el estuario del Guadalquivir. Se han determinado los flujos de concentración de sal y sólidos en suspensión a lo largo de todo el estuario.

INTRODUCCIÓN

El interés de este estudio es doble. Por una parte, tiene una proyección de servicio público bien definida. El estuario del Guadalquivir y su entorno es una zona socioeconómicamente muy notoria donde confluyen múltiples intereses y presiones, y que requiere una gestión integral basada en el conocimiento y en una decidida estrategia de monitorización. El conocimiento científico-técnico del estuario es aún muy limitado, pero, para lograr ese objetivo, la instalación de la extensa red de monitorización en tiempo real (Navarro et al. 2011) ha supuesto un avance cualitativo y cuantitativo. Por otra parte, el estuario del Guadalquivir presenta varias singularidades: (i) una morfología cuasi-unidimensional, (ii) un régimen de descargas condicionado por la elevada regulación de la cuenca aguas arriba y con frecuentes eventos impulsivos asociados a la ocurrencia de avenidas o necesidades de riego aguas abajo (Contreras y Polo, 2011) y (iii) una reflexión mareal importante en la presa de Alcalá del Río. Todos ellos afectan directamente la dinámica y el transporte de sustancias y requieren un estudio profundo. Los resultados que aquí se presentan se centran en dos de las sustancias que más repercusión social, económica y ecológica están teniendo en la actualidad: salinidad y turbidez.

Conocer la distribución espacio-temporal de salinidad, en particular, la intrusión salina, posibilita identificar los mecanismos de control de la circulación estuarina. Además, tiene una repercusión importante puesto que las zonas de cultivo adyacentes al estuario dependen del control de la intrusión. Y a su vez, conocer instantáneamente la ubicación de la intrusión salina permite valorar si esos mismos son viables o no. La turbidez de las aguas es un fenómeno común en estuarios, sin embargo, en el estuario del Guadalquivir es un problema especialmente grave (es uno de los estuarios más turbios del mundo) que afecta sensiblemente a la falta de luz en la columna de agua, reclutamiento de especies (González-Ortegón et al. 2010), calidad de las aguas, etc. Además, su estudio es relevante en el transporte de sólidos en suspensión, que tiene consecuencias en los cambios morfológicos del estuario a largo plazo.

INSTRUMENTACIÓN

En este trabajo se hace uso de ocho estaciones de calidad ambiental o sensores CTDs los cuales registran datos cada 30 min (Fig.1). Miden conductividad, temperatura y, mediante sensores externos, oxígeno disuelto, clorofila y turbidez. La concentración de sales disueltas en el seno del fluido o salinidad *S* se obtiene a partir de las medidas de conductividad. En este trabajo expresaremos la salinidad en unidades prácticas de salinidad (psu), que es aproximadamente el peso en gramos de la sal disuelta en 1 kg de agua. La turbidez se caracteriza en unidades nefelométricas de formacina (FNU) y, mediante calibración de las



muestras tomadas en varias campañas, proporciona una estimación de la concentración de los sólidos totales en suspensión. La relación entre ambos, descrita con detalle en Navarro, et al. (2011), es un factor 1.6015 mg/l/FNU.

El nivel del mar se ha registrado mediante ocho mareógrafos, que proporcionan un dato de nivel en mbar cada 10min, fondeados entre la desembocadura y Sevilla a lo largo del cauce. Seis correntímetros perfiladores ADCPs suministran datos de corriente. Al igual que los CTDs, los correntímetros están montados en las boyas de balizamiento y miden desde la superficie libre hasta el fondo. Proporcionan un dato por metro, con 4 perfiles cada hora. En el mapa de la zona de estudio (Fig.1) se muestran las ubicaciones de estos equipos.

Figura 1. Zona de estudio. Incluye la ubicación de los equipos de la red de monitorización empleados en este trabajo, compuesta por correntímetros perfiladores (triángulos verdes), mareógrafos (cuadrados blancos) y CTDs (círculos rojos). El origen de coordenadas longitudinal al cauce se ha establecido en la desembocadura, concretamente, en el CTD frente a Sanlúcar (36°46.78 N, 6°23.45 W). El ramal a la altura de Sevilla, separado del cauce principal por una esclusa, forma parte de las instalaciones del Puerto de Sevilla.

RESULTADOS

En condiciones normales (Díez-Minguito, et al. 2011), la marea controla la distribución de salinidad y sólidos en suspensión. La salinidad (Fig.1, panel superior) decrece monótonamente desde la desembocadura hasta la presa de cabecera como ya previamente comprobaron otros autores (Baonza et al. 1978). Se trata, por tanto, de un estuario positivo. La resolución espacial y temporal de la RMTR es suficiente para determinar la posición instantánea de la intrusión salina. En un estuario dominado por la marea, la variabilidad espacio-temporal de la intrusión salina depende, esencialmente, de los flujos mareales asociados al transporte y difusión de sal, los aportes de agua dulce y la acción del viento. El punto de intrusión (estimado donde la salinidad en el fondo es 2psu) oscila a escala submareal casi a la altura del km 70. Los máximos de se presentan durante mareas vivas superando los 75 km, mientras que los mínimos tienen lugar durante mareas muertas, retrocediendo hasta los 65 km. El desplazamiento submareal es del orden de 10km.

El estuario está poco estratificado o bien mezclado (Fig.1, b). El número de Froude densimétrico, que expresa la importancia relativa de la contribución fluvial respecto de la estabilidad por boyancia del sistema, es menor que 1, del orden de 10^{-1} . El número de Richardson, que proporciona información adicional sobre los efectos dinámicos del grado de estratificación vertical del estuario, es igualmente mucho menor que 1 en todos sus tramos y del orden de 10^{-3} . Durante las mareas muertas, las variaciones de salinidad en la columna no superan 2psu a escala mareal. En términos de densidad, las diferencias relativas entre superficie y fondo no superan el 0.3%.

Asimismo, puesto que la red de monitorización registra datos de elevaciones y corriente, se determinan para ambas propiedades (salinidad y turbidez) los flujos medio-mareales advectivos netos y su descomposición en diferentes puntos del estuario en flujo no mareal, deriva de Stokes, bombeo mareal y flujos verticales. Este análisis permite identificar cuáles son los procesos que controlan el transporte de sal y material en suspensión (Fischer, H.B., 1976). Con respecto a la salini-

dad, los términos más relevantes son, en ese orden, la deriva no mareal, la deriva de Stokes y el bombeo mareal asociado a la correlación cruzada entre salinidad, elevación y la corriente a lo largo del canal. Los términos de flujos verticales son, como cabría esperar en un estuario bien mezclado, muy inferiores al resto.

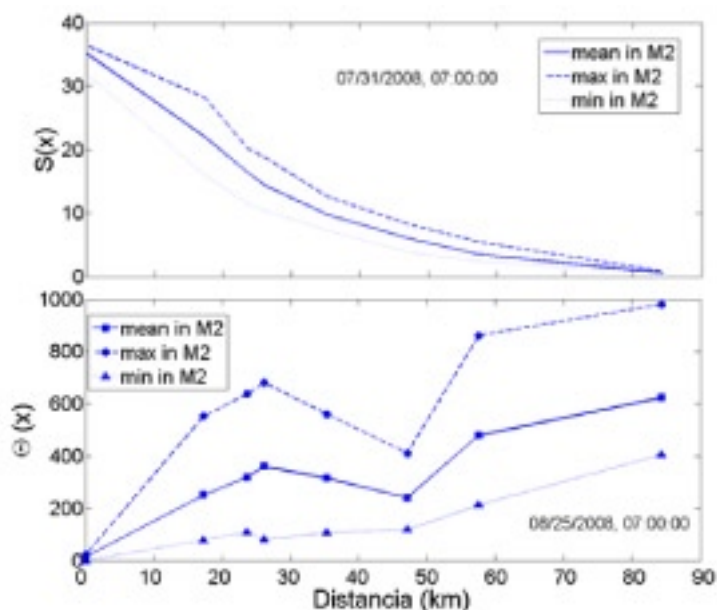


Figura 2. Perfiles de salinidad (panel superior) y turbidez (panel inferior) longitudinales promediados en la vertical (máximo, mínimo y medio-mareal en las fechas indicadas) en régimen de aguas bajas.

El estuario del Guadalquivir es de los más turbios del mundo. La mayor cantidad procede del propio estuario, puesto en suspensión por los esfuerzos tangenciales mareales en el lecho y márgenes. La turbidez en la columna de agua crece con la profundidad consecuencia del balance entre flotación y turbulencia. A escala promedio-mareal se observan dos óptimos de turbidez (Fig.1, panel inferior). El primero (estuario abajo) se debe principalmente al incremento de la capacidad de resuspensión por la circulación transversal en zonas con radios de curvatura pequeños. El segundo, estuario arriba, podría incluso alcanzar hasta la misma presa de Alcalá y está asociado a la presencia del punto nulo de la intrusión salina y al carácter estacionario de la propagación de onda en ese tramo del estuario (véase el trabajo de Baquerizo et al. (2011), en este mismo volumen).

El análisis de los balances netos promedio-mareales no sólo explica la distribución longitudinal de ambas propiedades, sino que da información adicional sobre los mecanismos que la generan. Los flujos de sal obtenidos son todos positivos (hacia cabecera). El término dominante es el asociado a la deriva euleriana, un orden de magnitud superior a la deriva de Stokes y al bombeo mareal. Los flujos asociados a la circulación vertical son muy inferiores al resto, lo cual es consistente con la baja estratificación.

En el caso del balance de sólidos en suspensión (determinado mediante el flujo mediomareal a lo largo de todo el estuario) los mecanismos que los controlan son los mismos que para la salinidad. Esto son, por orden de magnitud, la deriva no mareal y la de Stokes y el bombeo mareal relativo a los desfases entre la concentración de sólidos en suspensión, elevaciones y la corriente longitudinal. Estos dos últimos mecanismos llegan a compensar y superar al primero en ciertos ciclos de marea. Representan la correlación entre elevación, corriente y concentración cuyos desfases, típicamente asociados a los retardos en la deposición del sedimento y en el lavado o dispersión por la columna de agua del material erosionado.

CONCLUSIONES

Se ha analizado la distribución de salinidad y turbidez bajo régimen mareal en el estuario del Guadalquivir. La resolución espacial y temporal de la red de

monitorización instalada es suficiente para determinar la posición instantánea de la intrusión salina. La mayor cantidad de sólidos en suspensión procede del propio estuario, mantenidos por los esfuerzos turbulentos de origen mareal (y fluvial en régimen de avenidas) en lecho y márgenes. El análisis de los balances netos mareales no sólo explica la distribución longitudinal de ambas propiedades, sino que da información adicional sobre los mecanismos que la generan. Se han identificado los procesos dinámicos que las controlan, a saber, deriva no mareal, deriva de Stokes y bombeo mareal inducido por el desfase entre concentración de soluto, elevación y corriente longitudinal. Se ha puesto de manifiesto la presencia de dos máximos de turbidez: uno a 25 km, localizado en los tramos con radios de curvatura menores, y otro por encima del km 80. El primero está asociado a la circulación secundaria, el segundo al punto nulo de intrusión salina y, quizás en mayor medida, a la dinámica estacionaria del último tercio del estuario.

AGRADECIMIENTOS

El estudio está financiado por el MICINN (CTM2009-10520, Intercambio de masas de agua y de energía potencial entre el estuario del Guadalquivir y la plataforma continental interior) y por la JA (P09-TEP-4630, Influencia de los procesos litorales multiescala en la gestión costera).

REFERENCIAS

Baquerizo, A. M. Díez-Minguito, S. Bramato, M.A. Losada, (2011) "Reflexión de la onda de marea en el estuario del Río Guadalquivir". En este volumen, presentado en las XI Jornadas de Costas y Puertos, Las Palmas de Gran Canaria.

Baonza, E., Plata, A., Jiménez, J.A., Ruiz-Mateos, A., (1978). "Estudio del comportamiento dinámico del estuario del río Guadalquivir". Proceedings of Isotope Hydrology.

Contreras, E. y M.J. Polo, (2011). "Influence of reservoirs and land use changes on the river contribution: the case study of the Guadalquivir Estuary". Geophysical Research Abstracts. Vol 13, EGU2011-12719.

Díez-Minguito, M., A. Baquerizo, M. Ortega-Sánchez, G. Navarro y M.A. Losada. "Tide transformation in the Guadalquivir estuary (SW Spain) and process-based zonation". Pendiente de publicación en Journal of Geophysical Research – Oceans.

Fischer, H.B., (1976). Mixing and Dispersion in Estuaries. Annual Review of Fluid Mechanics 8, 107–133.

González-Ortegón, E., Subida, M.D., Cuesta, J.A., Arias, A.M., Fernández-Delgado, C., Drake, P., (2010). "The impact of extreme turbidity events on the nursery function of a temperate European estuary with regulated freshwater inflow". Estuarine Coastal Shelf Sci. 87, 311–324.

Navarro, G., F.J. Gutiérrez, M. Díez-Minguito, M.A. Losada, J. Ruiz (2011). "Temporal and spatial variability in the Guadalquivir estuary: a challenge for real-time telemetry". Ocean Dynamics, Vol.61(6), 753-765.