

Variaciones de turbidez de las aguas de la bahía de Cádiz determinadas a partir del análisis de imágenes Landsat TM

Cádiz bay waters turbidity variations from Landsat TM images analysis

J.M. Gutiérrez, A. Luna del Barco, J.M. Parrado, E. Sánchez (*), A. Fernández-Palacios (**) y J. Ojeda (*).

Dpto. de Cristalografía y Mineralogía, Estratigrafía, Geodinámica y Petrología y Geoquímica (Univ. Cádiz)
Apto. 40. 11510- Puerto Real (Cádiz).

(*) Dpto. de Geografía Física y Análisis Geográfico Regional. (Univ. Sevilla).

(**) Servicio de Teledetección (Consejería de Medio Ambiente, Junta de Andalucía).

ABSTRACT

Landsat TM images has been analysed to obtain extent and direction data about turbidity flumes in several hydrodynamic sinoptic situations in Cadiz bay waters. Results are beside data from water samples. Five turbidity levels has been differentiated: very high turbidity, high, middle, low and very low, and three geographic sectors: a) Inner zone, closed to coast and with shoal waters of high and very high turbidity. This sector is very affected by littoral processes (tidals, surge and continental contribution); b) Middle zone, with middle and low turbidity waters, unaffected by continent contributions and surge, although if by tidal ebb; c) Outer zone, with low and very low turbidity waters, little or nothing affected by coastal dynamic, except at moments of spring tides and great fluvial growings.

Study of analysed Landsat images demonstrates that for a point given, turbidity range variation is very big and depends of each hydrodynamic concrete situation, and is controled by same factor as: hydrodynamic system (tides, surge and currents), climate and meteorology, coast and sea bottom physiography and continental contributions rates.

Key words: turbidity flume, remote sensing, Landsat TM, Cadiz bay.

Geogaceta, 27 (1999), 79-82

ISSN: 0213683X

Introducción

Las técnicas de teledetección permiten estimar la dirección y alcance de las plumas de turbidez y son útiles para validar los modelos de transporte sedimentario (Forget *et al.*, 1998; Baban, 1995; Balopoulos *et al.*, 1986). La capacidad de ofrecer una visión sinóptica del medio y de la distribución espacial de la turbidez, permite su uso en estudios de dinámica litoral, utilizando la turbidez como un trazador natural detectable por las bandas reflectivas de los satélites (Baban, 1993, 1995).

En la bahía de Cádiz, debido al régimen de vientos, oleaje y mareas, se generan flujos de materia en suspensión que siguen diferentes direcciones, según las condiciones. Estos flujos son visibles debido a la existencia de plumas de turbidez que se desplazan desde el interior de la bahía hacia mar abierto. Bernal (1986) y Guillemot (1987), a partir de imágenes *Landsat*, mostraron que, en determinadas condiciones hidrodinámicas, flujos de materia en suspensión traspasan el ámbito de la bahía y llegan a la plataforma

continental. Gutiérrez Mas *et al.* (1999), determinan la concentración y mineralogía de la fracción fina en suspensión y establecen las trazas de estos flujos sobre el fondo de la bahía de Cádiz.

En este trabajo se aborda el estudio y análisis de imágenes *Landsat TM*, con objeto de relacionar diferentes situaciones hidrodinámicas con el desarrollo y comportamiento de las plumas de turbidez. Se establecen rangos, se comparan situaciones y se elabora un modelo preliminar de comportamiento.

Características de la zona de estudio

En la bahía de Cádiz se diferencian claramente dos sectores: una bahía externa, con características de ensenada, costas arenosas y pequeños acantilados, bien conectada con mar abierto y con la plataforma continental, y una bahía interna (*Saco*), más abrigada y ocupada en gran parte por ambientes mareales de aguas someras. Ambas están comunicadas por el estrecho de Puntales, accidente de gran importancia en la renovación de las aguas de la bahía interna.

El régimen de mareas es mesomareal, con una amplitud máxima de 3.7 m y media de 2.18 m. El oleaje tipo *sea* (mar de viento) presenta enfrentamientos levanteponiente con predominio de la componente del Este, mientras que en el tipo *swell* (mar de fondo) domina la componente Oeste. Las corrientes litorales están controladas esencialmente por el oleaje: el del NO genera corrientes hacia el SE; el del SO hacia el Norte y con levante la corriente se dirige al Oeste.

Metodos

Las imágenes *Landsat TM* utilizadas corresponden a situaciones hidrodinámicas y meteorológicas diferentes, y han sido seleccionadas en la Librería de Imágenes de Satélite de la Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía, entre las que mostraban mejor geometría, morfología, tamaño y orientación de las plumas de turbidez y funcionamiento dinámico en el entorno de la bahía de Cádiz.

El procesado de las imágenes se ha realizado según la metodología descrita

por Ojeda *et al.* (1995), resumida a continuación: 1) Aplicación de una máscara, específica a cada imagen, seleccionando un umbral en una banda del infrarrojo próximo, para separar el continente del mar; 2) Clasificación de las imágenes, dividiendo el conjunto de números digitales de cada una en intervalos y asignando a cada uno un color.

Los resultados se han comparado con datos de concentración de materia en suspensión, turbidez y clorofila, obtenidos en una campaña de toma de muestras de agua realizada en la bahía de Cádiz, simultáneamente al paso del satélite *Landsat* por la vertical de la zona.

Resultados y discusión

Bajo un punto de vista global, los resultados indican que las aguas de la bahía de Cádiz muestran un rango de turbidez alto, dependiendo de la situación geográfica de cada punto, condicionado por la influencia de factores como la localización de fuentes de aportes de materia en suspensión, como desembocaduras de ríos y caños, el oleaje y la acción de los flujos mareales, que de forma continua afectan a la bahía.

Los resultados de la campaña de muestreo realizada en aguas de la bahía (Gutierrez Mas *et al.*, 1999), muestra valores de concentración de sólidos en suspensión medios de 6.5 mg/l, que aparecen en la zona norte de la bahía, entre la punta de Santa Catalina y Rota. Los valores más bajos (mínimo de 1.37 mg/l), aparecen en las partes más alejadas de la bahía y en la plataforma continental. También se dan contenidos bajos de materia en suspensión en el sector SO de la bahía interna. Los valores más altos se dan en el canal principal, en un sector de la bahía interna, en el estrecho de Puntales y frente a las desembocaduras del río Guadalete, río San Pedro y del estrecho de Puntales en la bahía externa, donde se alcanzan valores de 14 mg/l.

Valores de turbidez promedios de 6.02 ntu se dan en el margen norte de la bahía, entre la punta de Santa Catalina y Rota. Los más bajos (1.15 ntu), se dan en las aguas más externas de la bahía, en la plataforma continental y en el sector SO de la bahía interna. Los más altos (10.84 ntu) se dan en los caños mareales, en el estrecho de Puntales y frente a las desembocaduras del río Guadalete y río San Pedro.

De forma cualitativa, teniendo en cuenta los datos anteriores y los obtenidos de la observación de las imágenes, se han establecido varios grados de turbidez:



Figura 1. Mapa de situación geográfica.

Figure 1.- Geographic situation.

a) *Aguas de muy baja turbidez.*- Se trata de aguas atlánticas con poca o nula influencia costera y continental. Se encuentran a varios kilómetros de la costa pero, en ciertas condiciones, se mezclan con las aguas más turbias y próximas a la costa.

b) *Aguas de baja turbidez.*- Se dan en el sector sur de la bahía interna, en una zona confinada y poco afectada por las mareas que favorece la precipitación de materia en suspensión y, por tanto, el descenso de la turbidez. Aguas similares a éstas aparecen en ciertas circunstancias en la periferia de la bahía

c) *Aguas de turbidez media.*- Bordean la zona litoral en una banda de 0,5 y 2 km de ancho, y están bien representadas en la parte oriental de la bahía externa. Se dan también en el litoral SO de la bahía, cuando sopla viento de levante.

d) *Aguas de turbidez alta* y e) *muy alta.* Se dan en la parte oriental de la bahía externa, cerca de las desembocaduras del río Guadalete y río San Pedro. Las plumas turbias superan el dique del Guadalete y giran al Oeste y NO. Las aguas

de la zona de la playa de Valdelagrana presentan también turbidez alta, debido a la acción de removilización del oleaje rompiente.

Teniendo en cuenta la calidad del agua predominante en cada zona, se han diferenciado tres sectores:

a) *Sector interno.*- Es la zona de menor profundidad e influencia continental. Las aguas son de turbidez alta y muy alta y están muy afectadas por la fisiografía del fondo y de la costa. Se encuentran bajo la acción directa del oleaje rompiente que removiliza el fondo, las corrientes mareales y las fuentes de aportes continentales, como ríos, arroyos y escorrentía superficial.

b) *Sector medio.*- Limita con el sector interno y es una zona de gran variabilidad que está afectada por los flujos mareales y el oleaje. Hacia mar adentro limitan con aguas menos turbias y menos influenciadas por la costa y el continente.

c) *Sector externo.*- Es el más alejado de la costa y se pone de manifiesto a partir de unos 5 km de distancia. Las aguas son de turbidez baja y muy baja, como

corresponde a las aguas atlánticas, más frescas y limpias. El límite interno, en ocasiones puede verse afectado por la dinámica costera, aunque menos que los sectores medio e interno. Mar adentro se prolonga con gran constancia, variando poco el grado de turbidez, salvo en eventos como la crecida de los ríos que desembocan en esta parte del Golfo de Cádiz y de mareas excepcionales que permiten que los flujos salientes de la bahía alcancen la zona.

Situaciones sinópticas analizadas

Se muestran 4 imágenes *Landsat* correspondientes a otras tantas situaciones hidrodinámicas características en la bahía de Cádiz:

Imagen A (2/10/86).- Tomada en marea entrante, 2 h y 30' después de la bajamar, con marea de media a viva, viento flojo del NE y marejadilla (Fig. 2A). En la imagen se observa la entrada de agua

de baja turbidez que penetra en la bahía por el canal Principal por efecto del flujo entrante y, en menor medida, por el canal Norte. La extensión relativamente importante de la pluma del río Guadalete está relacionada con la salida de agua en un momento de crecida relativa, saliendo el agua a presión hidrostática, con independencia del régimen de marea. En el caso de los caños mareales, se observa un repliegue de las plumas formadas durante la bajamar, por efecto del contraflujo ejercido por la marea entrante.

Este efecto se observa en la zona del estrecho de Puntales, donde la pluma de turbidez formada en el reflujó aparece seccionada por el centro del canal, quedando las aguas de turbidez alta en los márgenes Este y Oeste del mismo. En la bahía interna las aguas son de baja turbidez, debido a la baja removilización que el viento del NE produce en esta zona.

Las aguas de turbidez media aparecen en la parte externa y bordean la línea de

costa como una banda 0.5 a 1 km de ancho.

Imagen B (23/7/95).- Tomada en marea entrante, 1 hora antes de la pleamar, con marea muerta, viento fuerte de levante y marejadilla (Fig. 2B). Las aguas de baja turbidez penetran en la bahía externa y ocupan toda la zona, excepto las zonas costeras de aguas someras entre la desembocadura del río Guadalete y la del río San Pedro.

Las nubes de turbidez media, que durante la bajamar se dirigían desde la bahía interna a la externa, a través del estrecho de Puntales, se repliegan hacia el interior a causa de la marea entrante, y quedan atrapadas en el margen norte de esta parte de la bahía, propiciando la precipitación de partículas finas en el fondo. Cabe la posibilidad de que, en estas circunstancias, todavía exista un reflujó residual procedente de los caños y marismas que, por efecto de vasos comunicantes, no se invertirá hasta que se igualen

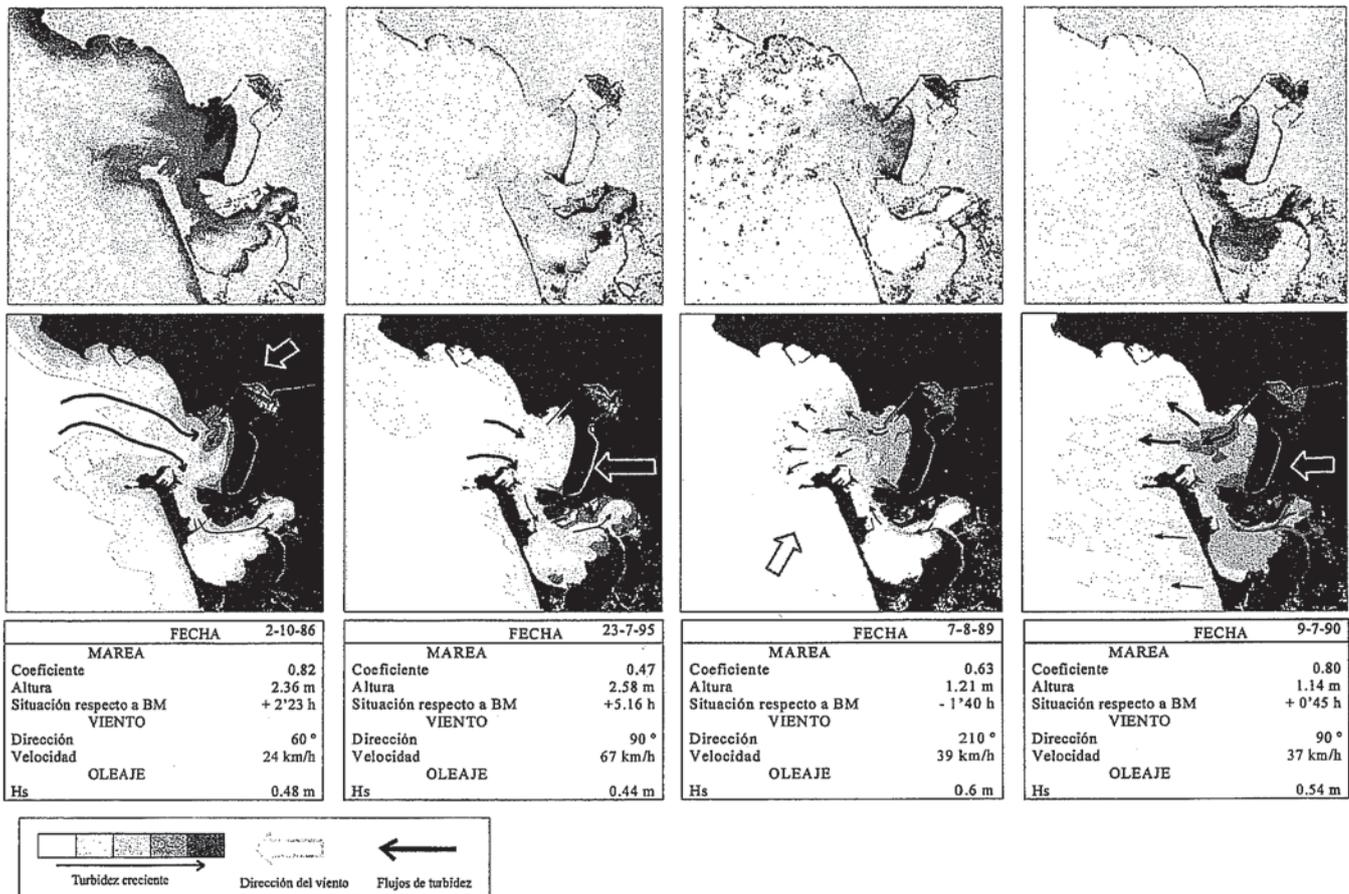


Figura 2.- Imágenes *Landsat TM* de la bahía de Cádiz, mostrando el desarrollo de nubes de turbidez en diferentes situaciones sinópticas: A) Fecha: 2/10/86. Iniciado el repunte de marea, con marea media, viento flojo del NE y marejadilla; B) Fecha: 23/7/95. Finalizando la marea entrante, con marea muerta, viento fuerte de levante y marejadilla; C) Fecha: 7/8/89. Finalizando el reflujó, con marea media-baja, viento medio del SO y marejada y D) Fecha: 9/6/90. Iniciándose el repunte de marea, con marea media, viento flojo de levante y marejada.

Figure 2.- *Landsat TM* images of Cadiz bay showing turbidity flumes in several hydrodynamic synoptic situations: A) Date: 2/10/86. High tide initiating, weak NW wind and short sea (middle tide); B) Date: 23/7/95. High tide ending, strong East wind and short sea (neap tide); C) Date: 7/8/89. Tidal ebb ending, middle SO wind and rough sea (middle tide); D) Date: 9/6/90. High tide initiating, weak East wind and rough sea (middle tide).

los niveles. Este hecho propiciará aún más el efecto de atrapamiento, tal y como se observa en las zonas de borde de marisma y desembocadura de caños (río arillo, caño de La Carraca). Sin embargo, el sector suroccidental de la bahía interna presenta aguas de baja turbidez debido al estancamiento y precipitación de partículas. En cuanto a las aguas costeras de la periferia de la bahía los valores de turbidez son medios y bajos.

Imagen C (7/8/89).- Tomada en situación de reflujo mareal 1h y 40' antes de la bajamar, con marea de media-baja, viento del moderado del SO y marejada (Fig. 2C). Las aguas de alta y muy alta turbidez están poco desarrolladas y no alcanzan más allá de la parte oriental de la bahía externa, por efecto del viento de poniente que se contraponen al reflujo mareal, y por una carrera de marea corta que limita las aguas de turbidez alta y muy alta a las proximidades de las desembocaduras de los ríos Guadalete y San Pedro.

Las aguas de turbidez media aparecen en la parte occidental de la bahía externa, en casi toda la externa y en las zonas litóricas periféricas. El bajo grado de turbidez de las aguas de la bahía interna, se debe a que esta parte de la bahía está protegida del viento del SO, por lo que, en estas circunstancias, no se remobiliza el sedimento del fondo.

Imagen D (9/7/90).- Tomada al inicio del repunte de la marea, 45 minutos después de la bajamar, con marea media, viento moderado de levante y marejada (Fig. 2D). Las aguas de turbidez alta y muy alta ocupan prácticamente toda la bahía interna y la parte oriental de la externa, por la remobilización del fondo producida por el viento de levante. Debido a una relativamente corta carrera de mareas, las plumas turbias no alcanzan la parte occidental de la bahía externa ni la plataforma interna, por lo que en estas zonas dominan las aguas de turbidez baja y muy baja, aunque presentan sus límites internos muy desgarrados por efecto del fuerte viento de levante.

Las aguas de turbidez media aparecen bien representadas al SO de la bahía, en correspondencia con las playas Victoria, Cortadura y de El Chato, dirigiéndose las plumas de turbidez hacia mar adentro, hasta unos 5 km de la costa, a favor de las corrientes generadas por el viento de levante.

Factores de control de la turbidez

Los valores del grado de turbidez de las aguas de la bahía de Cádiz sufren de forma continua fuertes variaciones, debido a los factores que la controlan y que se pueden agrupar en tres tipos principales: hidrodinámicos, fisiográficos y fuentes de aportes.

a) Los factores hidrodinámicos actúan fundamentalmente de dos formas: removilizando el fondo y transportando posteriormente el sedimento resuspendido. Los agentes más eficaces en la removilización del fondo son el oleaje y las corrientes mareales de gran velocidad. En el caso de la bahía interna el agente más eficaz a la hora de removilizar el sedimento es el viento de levante, mientras que el de poniente y norte apenas influyen, por encontrarse esta zona al abrigo del mismo. En el caso de la bahía externa, el agente más eficaz en la removilización es el viento y el oleaje del SO, especialmente las olas rompientes.

En cuanto al transporte, el principal agente son las corrientes de reflujo mareal, que transportan la materia en suspensión desde las zonas interiores a las externas e incluso a la plataforma. Otros agentes de transporte son las corrientes generadas por el oleaje. En el caso de temporal de levante, se generan corrientes hacia el Oeste que, sumadas al reflujo mareal, dan lugar a grandes nubes de turbidez que se dirigen mar adentro. Al contrario, el viento y oleaje de poniente se contraponen a las corrientes de reflujo mareal y favorecen el flujo entrante.

b) Los factores fisiográficos influyen controlando la profundidad y morfología del fondo, la forma de la costa y, a través

de ellos, el efecto de los agentes hidrodinámicos, favoreciendo o entorpeciendo la acción de los mismos, generando zonas abrigadas o expuestas y acelerando la corriente o frenandola.

c) Las fuentes de aportes controlan el grado de turbidez del agua, a partir del suministro de materia en suspensión al mar. Los grandes ríos que tienen su desembocadura al norte de la bahía de Cádiz (Guadalquivir, Odiel y Tinto y Guadiana) y en ella misma (Salado de Rota, Guadalete, etc.), junto a caños mareales y aportes procedentes de la escorrentía superficial, suministran gran cantidad de materiales finos, que es variable en función de la época del año, siendo máxima en los periodos húmedos, cuando se produce la crecida de los ríos (meses de otoño e invierno)

Agradecimientos

Nuestro agradecimiento a la Dirección General de Planificación de la Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía por la cesión de las imágenes *Landsat TM* utilizadas.

Este trabajo ha sido financiado por el Proyecto de Investigación MAR98-0796 de la CICYT.

Agradecimientos

- Baban, S. M. J. (1993): *Int. J. Remote Sens.* 14(7): 1247-1267.
 Baban, S. M. J. (1995): *Mar. Geol.* 123: 263-270.
 Bernal Ristori, E. (1986): *Bol. Inf. Serv. Geográf. Ejerc.* 62: 37-56.
 Forget, P. O., S. (1998): *Oceanol. Acta* 21(6): 739-749.
 Guillemot, E. (1987): *Thèse. Univ. Paris*, 146 pp.
 Gutiérrez Mas, J. M., Sánchez, A., Achab, M., Ruiz, J., Gonzalez, J.L., Parrado, J.M. y López, F. (1999): *Bol. Inst. Español Ocean.* 15. (En prensa)
 Ojeda, J., Sánchez, E., Fernández-Palacios, A. y Moreira, J.M. (1995): *J. Coastal Conserv.* 1: 109-118.