



Detección Remota de Descargas a la Bahía de San Juan, Puerto Rico.

Jorge I. Wichy-Rosado

Departamento de Geología, Universidad de Puerto Rico, Mayagüez

Resumen.-La detección y manejo de descargas de aguas superficiales a cuerpos de aguas costeras, siempre es de vital importancia para proteger estos ecosistemas marinos. Las descargas excesivas de sedimentos, materia orgánica suspendida o disuelta, desechos residenciales e industriales, tienen un impacto nocivo sobre la fauna y flora de áreas costeras como esta. En este estudio se identifican la existencia y las principales descargas ricas en sedimentos suspendidos y de descargas termales de origen industrial, que desembocan hacia la Bahía de San Juan. El uso de imágenes de AVIRIS, IKONOS y Landsat-7 ETM+, a través del programa de interpretación visual ENVI v.4.5 fue posible detectar cinco descargas de origen fluvial y una corriente de marina, que convergen en interior de la Bahía de San Juan. Por medio de estas imágenes, se detectó que las descargas principales de aguas ricas en sedimentos suspendidos provienen del Río Bayamón (antiguo cauce), de los Caños de la Ciénaga las Cucharillas y San Fernando, y por último del Río Puerto Nuevo y el Caño San Martín. También se pudo demostrar la descarga de aguas termales a través del antiguo cauce del Río Bayamón, el cual colecta aguas de sistemas enfriamiento de la Central Termoelectrónica Palo Seco y en menor escala de la Destilería Bacardí. Además, se pudo detectar una corriente marina rica en sedimentos litorales, que entra entre el área del Condado (El Boquerón) y el Fuerte San Gerónimo, invadiendo parte de la Laguna del Condado y ganando acceso a la bahía a través del Canal San Antonio.

Palabras Clave.- AVIRIS, descargas termales, IKONOS, Landsat-7 ETM+, sedimentos suspendidos

Introducción

Este estudio se realiza en la Bahía de San Juan, ubicada en el municipio de San Juan, ciudad capital de Puerto Rico (Figura 1). La Bahía de San Juan se ubica en la costa norte de Puerto Rico entre las latitudes N 18° 25' a 18° 28' y longitud W 66° 04' a 66° 08'.

Esta bahía pertenece al designado Estuario de la Bahía de San Juan (EBSJ). Ella representa el cuerpo de agua de mayor extensión dentro de este sistema, con un área aproximada de 3,280 acres, según informa el Programa del Estuario de la Bahía de San

Juan. Agencias como la Junta de Calidad Ambiental de P.R. y el USGS, mantienen un monitoreo anual de la calidad de sus aguas para conocer el impacto de las descargas de los ríos y caños que drenan hacia ella.

Con este trabajo, se intenta la realización de la detección por medios remotos de la presencia de diversas descargas de hacia la Bahía de San Juan. En especial la identificación de descargas con sedimentos suspendidos y con aguas termales residuales, y definir la dinámica de las descargas dentro y fuera de la bahía.

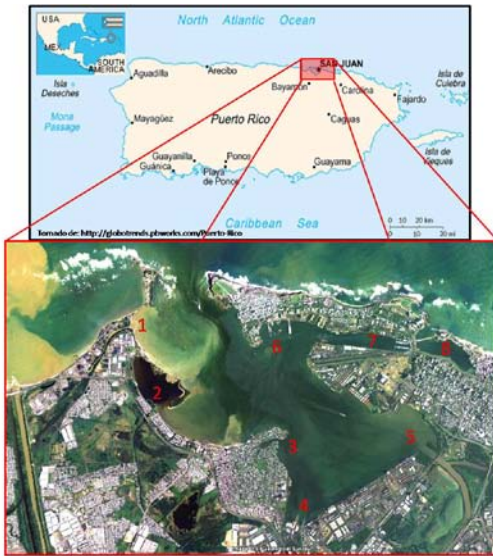


Figura. 1 Localización de la Bahía de San Juan de Puerto Rico.

Puntos de interés: 1.Río Bayamón, 2.Caño las Cucharillas, 3.Caño San Fernando, 4.Planta AEE Puerto Nuevo y caño "sin nombre", 5.Río Puerto Nuevo y Caño San Martín, 6.Muelles 1-4, 7.Canal San Antonio, y 8.Laguna del Condado.

Según estudios realizados en cuerpos de aguas interiores (río, quebradas o lagos) hasta sistemas costeros, la detección de las descargas ricas en sedimentos es posible mayormente en el rango visible del espectro electromagnético. Por ejemplo, para ambientes ríos, Karaska *et al.* (2004) describe que resulta útil referirse al largo de onda de los 610nm. Para este largo de onda y utilizando imágenes de AVIRIS y Landsat-4/5 TM, le fue posible realizar una detección confiable de sólidos suspendidos (comprende: sedimentos, materia orgánica e inorgánica) a través de la atenuación que ocurre a este largo de onda, con correlaciones que oscilan entre los 0.82

hasta los 0.95. En el caso de Ritchie *et al.* (2003) recomienda usar en sistemas multi e hiper-espectrales (Landsat-4/5 TM, AVIRIS, IKONOS, SeaWiFS, entre otros) los largos de onda entre los 700 a 800nm para determinar sedimentos suspendidos, lo que por experiencia le ha permitido realizar detecciones tanto de forma lineal en concentraciones de 0 a 50mg/l, como no-lineal en concentraciones de 50 a 150mg/l. Mientras que otros como Lunetta *et al.* (2009) advierten tener excelentes detecciones de sedimentos suspendidos y materia orgánica disuelta coloreada, en el rango de los 442 a 565nm, usando imágenes de AVIRIS en estudios de lagos, ríos y estuarios. Mientras que Merry *et al.* (2006), describe haber una fuerte relación entre los sedimentos suspendidos y el rango verde en el visible y el infrarrojo cercano, por lo que recomienda el uso de la banda 2 de Landsat-7 ETM+ (520 a 600nm) y la banda 4 (770 a 900nm). Otros como Doxaran *et al.* (2002) describen que hay cierta correlación entre la materia suspendida y el rango de 550 a 850nm, pero prefiere utilizar la razón de bandas 850/550 que le ha ofrecido correlaciones de hasta 0.91, en zonas de estuarios con alta turbidez.

Materiales y Métodos

Para realizar este estudio se utilizaron imágenes digitales de AVIRIS e IKONOS,

para la detección de descargas ricas en sedimentos u otros componentes suspendidos que brindan color y mayor reflectancia a las aguas fluviales y costeras que invaden la zona, y de Landsat-7 ETM+ para la detección de descargas termales de origen industrial. Las imágenes de AVIRIS, fueron provistas por el Dr. Fernando Gilbes (Director del Dpto. de Geología en la UPR en Mayagüez) y son parte de una misión realizada en Puerto Rico el 19 de agosto de 2004. Estas imágenes están disponibles en formato ENVI de aproximadamente 629x1183 pixeles de dimensión, comprimidas en formato BIP y con 17 metros de resolución espacial. Las imágenes IKONOS, también provistas por el Dr. Gilbes y son parte de una colección de imágenes de Puerto Rico; las mismas no registran las fechas en que fueron tomadas. Estas imágenes están disponibles en formato ERDAS en 6800x7300 pixeles de dimensión, comprimidas en formato BSQ y ofrecen 1 metro de resolución espacial. Por último, las imágenes de Landsat-7 ETM+ fueron adquiridas a través de la página web de NASA y el Visualizador Global de imágenes del USGS (USGS Global Visualization Viewer). Se seleccionaron imágenes del 24 de julio de 2000 y 11 de mayo de 2002, ya que ofrecían el menor porcentaje de cubierta de nubes para el área

de estudio. Las imágenes de Landsat-7 ETM+, están disponibles en formato GeoTIFF de 8000x7000 pixeles de dimensión y 60 metros (banda termal infrarroja, para la detección de descargas termales).

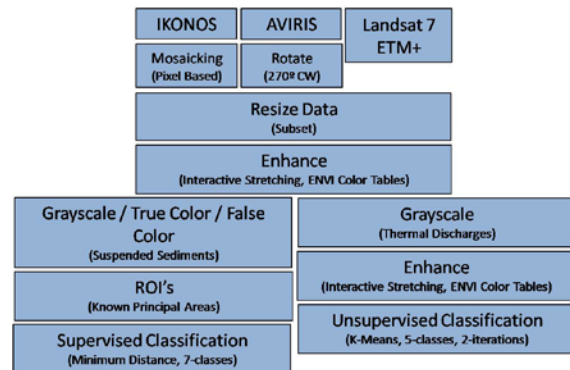


Figura 2. Metodología para el procesamiento de las imágenes.

El procesamiento de las imágenes, como se muestra en la Figura 2, se realizó con la ayuda del programa ENVI versión 4.5. Para las imágenes de AVIRIS fue necesario realizar una rotación de 270° a favor de las manecillas del reloj, ya que la imagen tenía el norte desplazado 90°. Mientras que las imágenes de IKONOS y Landsat-7 ETM+, ya que presentaban estar georeferenciadas. Sólo la imagen de IKONOS, es producto de la unión en mosaico basado en pixeles de cuatro imágenes individuales. Luego de estos ajustes, se extrajo la porción de la imagen que comprende el área de estudio, por medio de la herramienta de “Resize Data”. A las imágenes se le resaltan los colores con el “Interactive Stretching”, o se

le añaden colores con el “ENVI Color Tables” para facilitar la detección preliminar de descargas existentes.

Se procede a crear imágenes en color verdadero, falso y en escala de grises para las imágenes de sedimentos suspendidos, de AVIRIS e IKONOS. Mientras que las de Landsat-7 ETM+, se trabajan en escala de grises solamente. Para la imagen de color verdadero, se utilizó en AVIRIS la siguiente selección de bandas: R=B₃₃ (653.24nm), G=B₂₀ (559.10nm) y B=B₁₀ (452.70nm), mientras que en IKONOS: R=B₁ (650nm), G=B₂ (550nm) y B=B₃ (450nm). Para la imagen de color falso, en AVIRIS se usó: R=B₂₇ (616.60nm), G=B₃₃ (653.24nm) y B=B₃₇ (691.50nm), mientras que en IKONOS: R=B₃ (450nm), G=B₂ (550nm) y B=B₁ (650nm). Mientras que las imágenes en escala de grises, se eligió la banda 20 (559.10nm) en AVIRIS, la banda 2 (550nm) en IKONOS y la banda 6-2 (Low Gain, 11,450nm) en Landsat-7 ETM+. De este modo, nos aseguramos de detectar sedimentos suspendidos, tal como lo sugiere Lunetta et al. (2009) usando bandas de 442 a 565nm, y Merry (2006) que sugiere bandas en el verde de 500 a 600nm. Se realiza un segundo realce de colores, para definir finalmente los detalles de la imagen. En AVIRIS la imagen de color verdadero y falso se le realizó el siguiente ajuste de

“stretch”: R=326:5402, G=764:5930 y B=1689:6339, mientras que IKONOS no fue necesario tal ajuste. En las imágenes de Landsat-7 ETM+, resultó útil usar el filtro “Sharpen [18]” y un “stretch” de 150:160 para la imagen de julio-2000 y de 149:160 para la de mayo-2002. En las imágenes de sedimentos suspendidos se realiza una selección de regiones de interés, usando la herramienta “ROI Tool”, seleccionando aéreas cercana a la desembocadura de los ríos y canales principales, para más adelante realizar una clasificación supervisada con siete clases por el método de “Minimum Distance”. Las siete clases seleccionadas son: Río Bayamón (rojo), Caño Cucharillas (verde), Caño San Fernando (azul), Río Puerto Nuevo y Caño Martín Peña (amarillo), océano (magenta), deriva litoral de sedimentos (maroon) y área de Planta A.E.E. Puerto Nuevo y caño “sin nombre” (verde mar). En esta clasificación se definirá la dispersión de las aguas acarreadas por los ríos y canales principales hacia el interior de la bahía, siguiendo la señal espectral de cada descarga.

Por otro lado, las imágenes de Landsat-7 se manejan en escala de grises, con un segundo realce de colores interactivamente y finalmente se le añade una paleta de colores, para resaltar los plumachos de descargas termales. Para estas imágenes se utiliza la

paleta de colores “Rainbow+Black”. Finalmente se le realiza una clasificación no-supervisada por el método de “K-Means” con cinco clases y dos iteraciones, con lo que se logra resaltar la descarga termal en contraste con las demás aguas de la bahía.



Figura 3. Imágenes de color verdadero.

Resultados y Discusión

Según las imágenes de AVIRIS e IKONOS en color verdadero (Figura 3), las descargas de sedimentos más pronunciadas son la del Río Bayamón, seguido por la del Caño de la Ciénaga las Cucharillas y en menor grado las descargas del Caño San Fernando y el área de la Planta de A.E.E. de Puerto Nuevo

y el caño “sin nombre”. El Río Puerto Nuevo en conjunto con el Caño Martín Peña, a penas genera signos de descargas en la esquina sureste de la bahía. En contraste con el área de los muelles 1 al 4, de donde se distingue una descarga de tono relativamente claro.



Figura 4. Imágenes de color falso.

En las imágenes de color falso (Figura 4), se puede apreciar un poco mejor la descarga del Río Puerto Nuevo y el Caño Martín Peña, que corre disimuladamente por el borde este de la bahía hacia el área de los muelles 1 al 4; ya que se utilizaron bandas cercanas a los 610nm que menciona Karaska

(2004) y los 700nm que sugiere Ritchie (2003). Pero en la imagen de AVIRIS, este movimiento no es apreciable, ya que se resaltan ciertas ondulaciones en la superficie del agua que impiden la visibilidad de este desplazamiento.



Figura 5. Imágenes en escala de grises.

En la escala de grises (Figura 5), se obtuvo un resultado similar al detectado en las imágenes de color falso. Pero al utilizar la imagen de escala de grises con la paleta de color “Rainbow+Black” (Figura 6), se puede confirmar lo observado en las imágenes de color verdadero. Esto resulta acorde con lo descrito por Doxaran *et al.* (2002), que establece una notable señal espectral para

los sedimentos suspendidos en el rango de 550 a 850nm, rango comprendido en las bandas utilizadas para las imágenes de color verdadero.

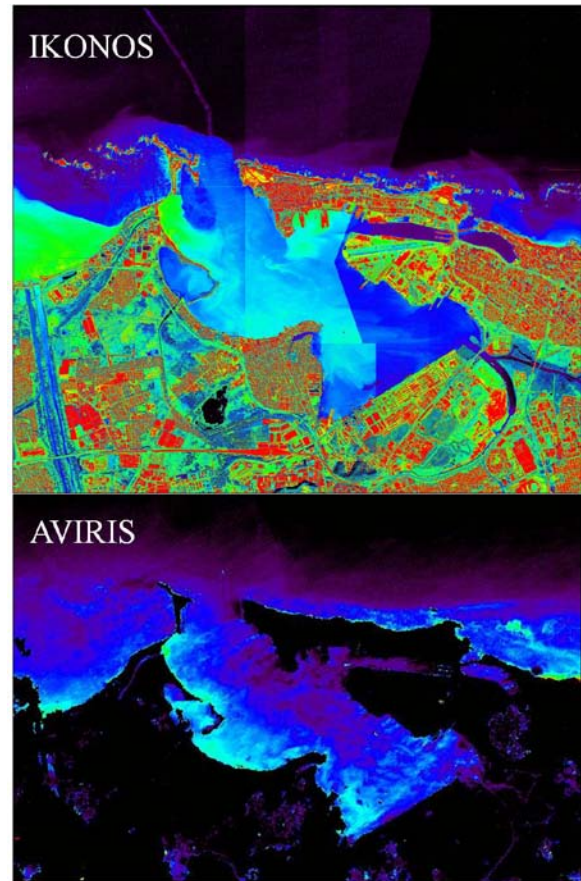


Figura 6. Imágenes en escala de grises y paleta de colores “Rainbow+black”.

En la clasificación supervisada por el método de “Minimum Distance” (Figura 7), se confirma que las principales descargas provienen del Río Bayamón (rojo) y los caños de la Ciénaga las Cucharillas (verde) y San Fernando (azul). Además, se observa en la imagen de AVIRIS un flujo de agua de mar (magenta) junto con deriva de sedimentos litorales (maroon) que entra a través del Canal San Antonio hacia el

interior de la bahía. En la clasificación con la imagen de IKONOS, este flujo aparece teñido de color magenta en la laguna del Condado y Canal San Antonio y de verde-mar desde el área de los muelles 1 al 4 hasta la entrada de la bahía (cerca al Morro).

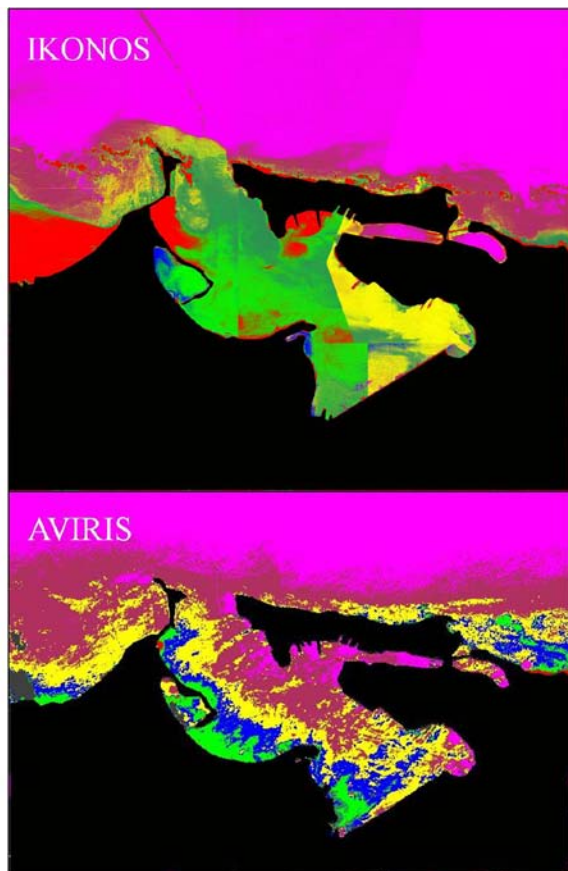


Figura 7. Clasificación supervisada por “Minimum Distance”.

Clases: (rojo)Río Bayamón, (verde)Caño Cucharillas, (azul)Caño San Fernando, (amarillo)Río Puerto Nuevo, (maroon)deriva sedimentos litorales y (verde-mar)Planta AEE Puerto Nuevo y caño “sin nombre”.

En cuanto a las imágenes de Landsat-7 ETM+, se puede observar en la imagen en escala de grises (Figura 8) presenta una tenue señal en la desembocadura del Río

Bayamón; que presenta valores digitales de hasta diez unidades más altos que los del resto de la bahía.

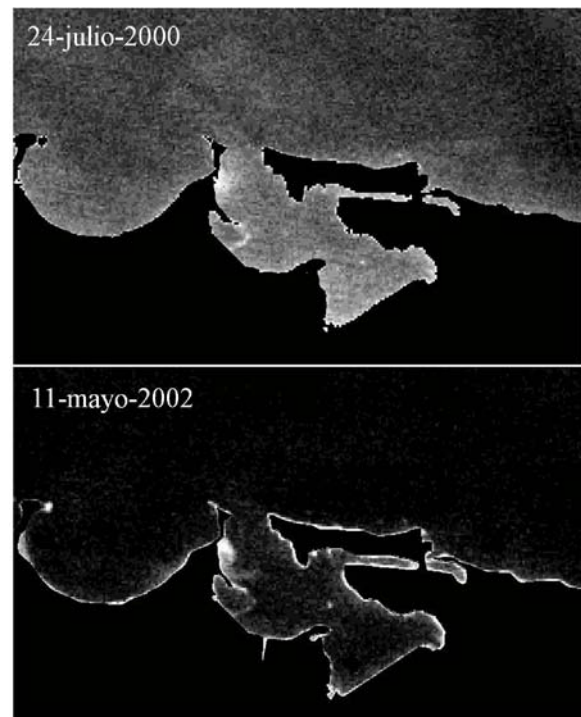


Figura 8. Imágenes en escala de grises de la banda 6 (low gain) de Landsat-7 ETM+.

Esta señal es un poco más evidente cuando aplicamos la paleta de colores “Rainbow+Black”, como se observa en la Figura 9. Podemos notar la presencia de un plumacho en los tonos rojo, naranja y amarillo.

En la clasificación no-supervisada por el método de “K-Means” (Figura 10), esta señal tenue aparece claramente identificada por las clases azul y amarillo, que son las clases de mayor valor digital (puede entenderse por relativa mayor temperatura). Esto demuestra la existencia de descargas termales a la bahía, a pesar de que las

mismas se originan a 1.28km de la desembocadura, desde las inmediaciones de la Central Termoeléctrica de Palo Seco en Cataño. Este antiguo cauce del Río Bayamón tiene un ancho variable de 10 a 25 metros.

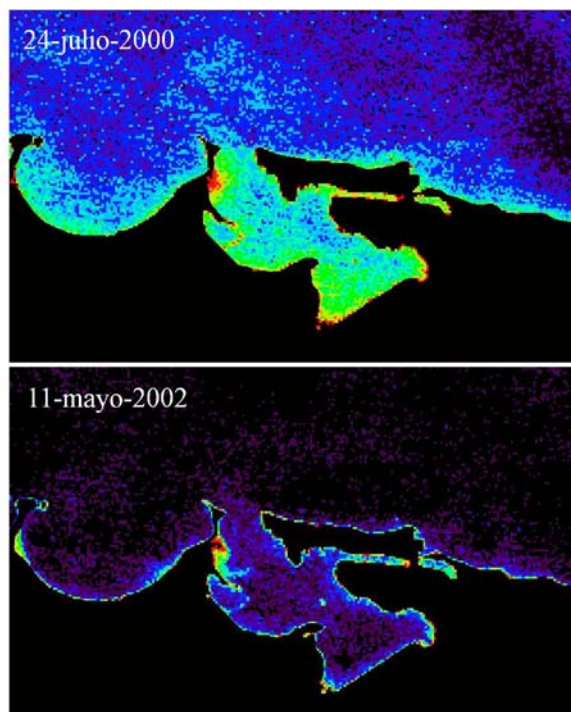


Figura 9. Imágenes en escala de grises y paleta de color “Rainbow+black” de la banda 6 (low gain) de Landsat-7 ETM+.

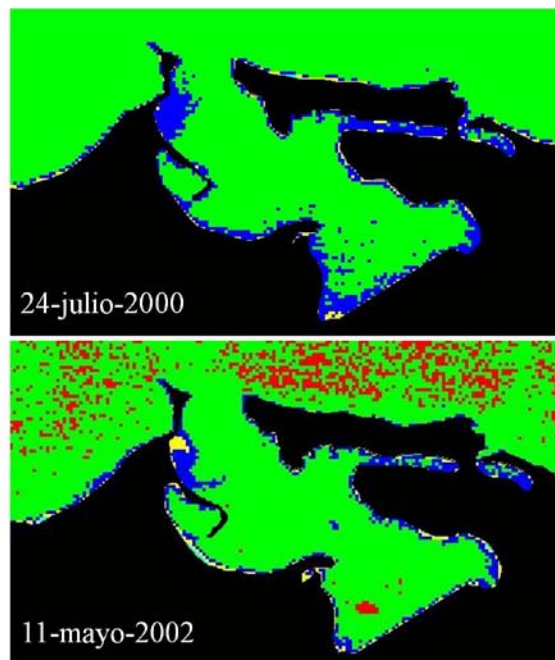


Figura 10. Clasificación no-supervisada por “K-Means” de la banda 6 (low gain) de Landsat-7 ETM+. Orden de clases, de menor a mayor valor digital (temperatura): rojo < verde < azul < amarillo.

Literatura Citada

- Doxaran, D., Froidefond, J.M., and Castaing, P. 2002. A reflectance band ratio used to estimate suspended matter concentrations in sediment-dominated coastal waters. *Int. J. Remote Sensing* 23(23): 5079-5085.
- Karaska, M.A., Huguenin, R.L., Beacham, J.L., Wang, M., Jensen, J.R., and Kaufman, R.S. 2004. AVIRIS measurements of chlorophyll, suspended minerals, dissolved organic carbon, and turbidity in Neuse river, North Carolina. *Photogrammetric Eng. & Remote Sensing*. 70(1):125-133.
- Lunetta, R.S., Knight, J.F., Paerl, H.W., Streicher, J.J., Peierls, B.L., Gallo, T., Lyon, J.G., Mace, T.H., and Buzzelli, C.P. 2009. Measurements of water color using AVIRIS imagery to assess the potential for an operational monitoring capability in the Palimco Sound Estuary, USA. *Int. J. of Remote Sensing*. 30(13):3291-3314.
- Merry, C.J., Zhang, L., and Lin, S. 2006. Using Landsat-7 & MODIS data for measuring suspended sediment in Lake Erie. *GSA*. 38(4):7-20.
- Ritchie, J.C., Zimba, P.V., and Everitt, J.H. 2003. Remote sensing techniques to assess water quality. *Photogrammetry Eng. & Remote Sensing*. 69(6):695-704.

Otras fuentes

Programa del Estuario de la Bahía de San Juan (EBSJ), <http://www.estuario.org/>