

# Desarrollo de un Método para Monitorear Procesos de Sedimentación en la Bahía de Mayagüez Utilizando Imágenes MODIS

VILMALIZ RODRÍGUEZ-GUZMÁN<sup>1</sup> Y FRANCISCO TORRES-VEGA<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Geología, <sup>2</sup>Departamento de Ingeniería Civil  
Universidad de Puerto Rico en Mayagüez, P.O. Box 9017 Mayagüez, Puerto Rico, 00681-9017

RESUMEN.- En este proyecto se utilizaron las ventajas que nos ofrece las herramientas de percepción remota para desarrollar un algoritmo que pudiera estimar la concentraciones de sedimentos suspendidos en la Bahía de Mayagüez. Actualmente estas concentraciones son medidas realizando trabajos de campo, los cuales se hacen periódicamente, pero con este nuevo método se desea establecer un monitoreo constante que pueda estudiar cómo los ríos que desembocan en la bahía afectan la abundancia y distribución de sedimentos en el área. Los datos medidos por el espectroradiómetro GER-1500, las concentraciones de sedimentos suspendidos y los datos de reflectancia producto de las imágenes de MODIS ya pre-procesadas fueron los parámetros utilizados para el desarrollo de este algoritmo. El producto final de este algoritmo fue capaz de estimar la concentración de sedimentos suspendidos en la Bahía de Mayagüez de forma aceptable para los propósitos de este trabajo. Este algoritmo fue aplicado a una imagen de MODIS (banda 1) correspondiente al día posterior a un evento de tormenta y se calculó descarga total de SS asociada a este evento. El programa ENVI fue de gran importancia para el desarrollo de este estudio porque fue la interfase que nos proveyó las herramientas necesarias para realizar el pre-procesamiento de las imágenes crudas, aplicarles el algoritmo generado y finalmente, interpretar, analizar y desplegar los productos obtenidos.

## INTRODUCCIÓN

La Bahía de Mayagüez está localizada en la costa oeste de Puerto Rico, delimitada por los pueblos de Añasco y Mayagüez. En esta bahía pueden observarse una gran variedad de procesos biológicos, químicos y geomorfológicos que son influenciados por la presencia y abundancia de sedimentos suspendidos (SS). Los sedimentos suspendidos comprenden material compuesto de clastos que son derivados de rocas pre-existentes y que pueden ser transportados en suspensión. La concentración de SS es considerado uno de los parámetros más importantes de calidad de agua (Wang et al., 2005) y puede producir contaminación no puntual. En el ambiente costero la presencia de SS reduce la entrada de luz a la columna de agua y, a su vez, la productividad primaria causando una posible detrimetación del hábitat.

Variaciones espaciales y temporales en la concentración de sedimentos suspendidos (SS) son causadas tanto por procesos naturales como por procesos antropogénicos. Muchos estudios han sido desarrollados para entender y definir mejor estas relaciones (Grove, 1977; Miller et al. 1994; Cruise et al., 1994; Gilbes et al., 1996). Se ha encontrado que la presencia de sedimentos en la bahía, además de estar asociada a la descarga de los ríos (Río Grande de Añasco, Río Yagüez y Río Guanajibo), está significativamente afectada por

eventos de resuspensión (Morelock, 1983). Un estudio de los procesos de sedimentación en un área costera envuelve definir aspectos relacionados a la producción, transporte y deposición de sedimentos. Sin embargo, el monitoreo de campo de estos procesos puede requerir de mucho tiempo y dinero, factores que limitan las posibilidades de desarrollo de este tipo de estudio. Esta limitación puede reducirse al integrar componentes basados en percepción remota como herramientas de trabajo para producir datos a través de información espectral. No obstante, antes de utilizar percepción remota para una aplicación específica, se debe definir la relación entre los parámetros de interés (e.g. sedimentos suspendidos) y los datos espectrales a ser utilizados. A través de este estudio se proyecta establecer la relación entre datos de campo (concentración de SS y Remote Sensing reflectance ( $R_{rs}$ ), y datos de las bandas 1 y 2 del sensor MODIS.

Este trabajo está enfocado en el desarrollo de un método que para monitorear la distribución y abundancia de SS asociados a descarga de los ríos utilizando imágenes de MODIS. Para lograr este fin principal se establecieron tres objetos generales: (1) Desarrollar un algoritmo que permita estimar la concentración de SS utilizando datos de MODIS, (2) Validar el algoritmo resultante utilizando imágenes MODIS y datos *in situ* y (3) Aplicar el algoritmo

producido a una imagen correspondiente a un día después de un evento de tormenta para estimar descarga total de SS.

## METODOLOGÍA

### Datos de Campo

Algunos parámetros utilizados en el desarrollo del algoritmo son datos de campo obtenidos durante varias visitas al área de estudio (Fig. 1). En cada visita y para cada estación se midió la concentración de SS y se tomaron medidas de *Remote Sensing reflectance* ( $R_{rs}$ ) utilizando un espectroradiómetro (GER-1500). Las medidas de SS corresponden a todo material mayor a  $0.7 \mu\text{m}$  en tamaño a 1 metro de profundidad (aprox.). Con el GER-1500 se obtienen medidas de  $R_{rs}$  entre los largos de onda de 370 nm a 1,000 nm aproximadamente. Para relacionar los datos medidos por este instrumento con los datos de las imágenes de MODIS a ser utilizadas, se realizó un promedio del rango de medidas entre 620nm-670nm y 841nm-876nm correspondientes a las bandas 1 y 2 del sensor MODIS, respectivamente.

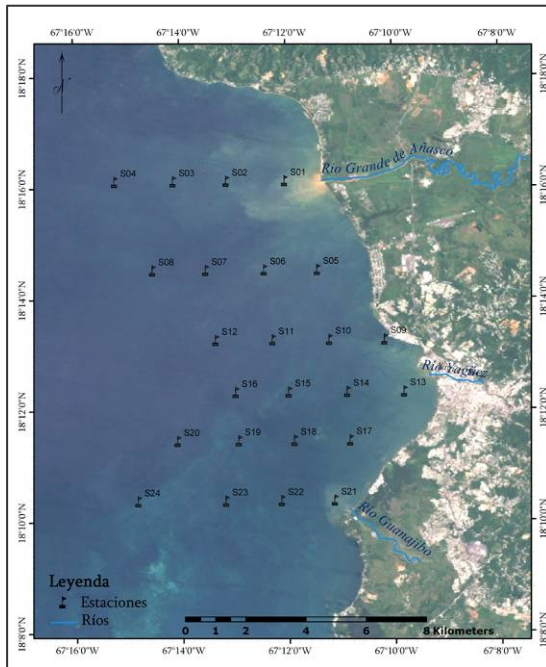


Figura 1. Área de estudio con las estaciones de muestreo

### Datos de MODIS

Se utilizaron datos del sensor MODIS correspondientes a los días en que se tomaron las medidas de campo. Las imágenes fueron obtenidas gratuitamente a través del Internet utilizando el servidor de NASA llamado Landweb. El producto

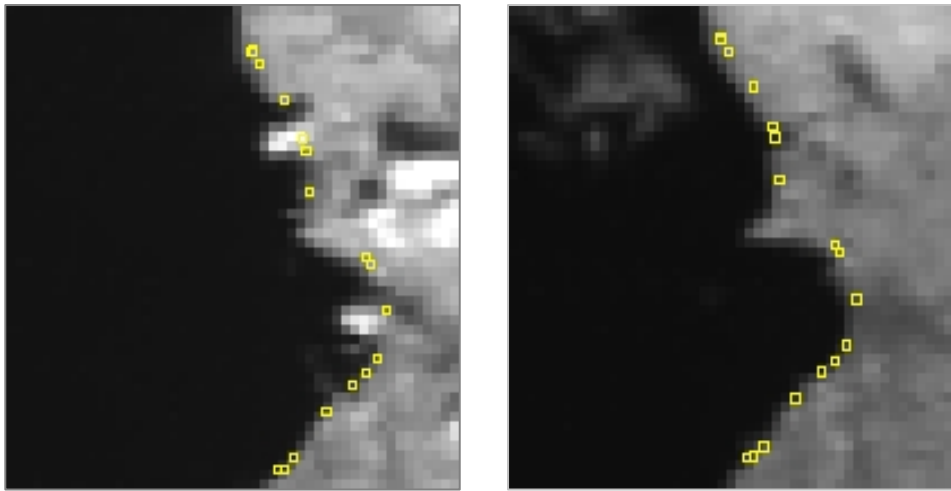
seleccionado fue MOD02QKM, el cual incluye información de reflectancia y radianza para las primera dos bandas (Banda 1/620-670 nm; Banda 2/841-876 nm).

En general, las imágenes requieren varios niveles de procesamiento para que sean útiles como herramientas de interpretación. En el caso de las imágenes obtenidas, fue necesario aplicarles un pre-procesamiento para eliminar ciertas distorsiones de carácter geométrico y radiométrico. Como medio para corregir las imágenes en forma cruda se utilizó el programa ENVI (v. 3.4), ya que cuenta con varias rutinas para este tipo de proceso. La primera parte de este proceso consistió en georeferenciar espacialmente las imágenes utilizando como sistema de coordenadas UTM NAD83 para la región de Puerto Rico. Para validar esta georeferenciación se tomaron puntos a lo largo de la línea de costa que delimita la Bahía de Mayagüez y luego se colocaron estos puntos sobre la Banda 2 para ver tan bien éstos representaban lo que se observaba en la imagen (Fig. 2). Una vez georeferenciada la imagen del área de estudio, entonces se procedió con la corrección atmosférica. Para hacer la corrección atmosférica se utilizó la rutina de "Dark Subtract" con la opción de "User Value". La Banda 2 de cada set de datos fue inspeccionada manualmente para determinar el valor mínimo de reflectancia para definirlo como "User Value".

### Desarrollo del Algoritmo

El producto final de este algoritmo será capaz de estimar la concentración de sedimentos suspendidos en la bahía de Mayagüez en base a datos de MODIS (MOD02QKM). Los datos medidos por el espectroradiómetro (GER-1500), las concentraciones de sedimentos suspendidos medidas en campo y los datos de reflectancia producto de las imágenes de MODIS ya pre-procesadas son los parámetros utilizados para el desarrollo de este algoritmo.

Inicialmente se realizó una comparación entre los promedios calculados de las medidas del GER-1500 y las concentraciones de SS medidas en el campo. Esta comparación consiste en graficar ambos parámetros medidos en campo y establecer una ecuación producto de una regresión lineal. Es importante reconocer que estamos asumiendo que la relación entre ambos parámetros es una lineal ( $Y = mX + b$ ) donde Y siendo la variable dependiente es igual a la concentración de sedimentos



**Figura 2.** Validación de georeferenciación; 19 de octubre de 2005 (izquierda) y 6 de diciembre de 2005 (derecha).

suspendidos y  $X$  siendo la variable independiente representa los valores medidos del GER-1500 o *Remote Sensing reflectance* ( $R_{rs}$ ). Como parámetro para determinar si esta relación es considerable o no estaremos utilizando el valor de  $R^2$ , teniendo como objetivo alcanzar una correlación o valor de  $R^2$  lo más cercano posible al valor de 1.

Para poder aplicar la ecuación producida a los datos de MODIS fue necesario definir la relación entre  $R_{rs}$  (GER-1500) y reflectancia (MODIS). Para esto, se escogieron tres de las imágenes más limpias y, utilizando ENVI, se extrajeron los valores de reflectancia de MODIS para cada estación de las cuales se tenían medidas de  $R_{rs}$ . En esta ocasión la variable dependiente serán los valores de  $R_{rs}$  y la variable independiente los valores de reflectancia (MODIS). Esta relación nos ayudó a conseguir valores de  $R_{rs}$  a partir la reflectancia medida por el sensor de MODIS. De esta forma, las ecuaciones definidas fueron aplicadas al producto de reflectancia de MODIS y obtener un producto de concentración de SS.

### Validación del Algoritmo

El proceso de validación nos sirve para evaluar si las estimaciones del algoritmo desarrollado están dentro de la realidad. Para realizar este proceso utilizamos seis imágenes de MODIS correspondientes a seis días en que se tomaron medidas de campo. A estas imágenes se le aplicaron las dos relaciones producto de análisis para desarrollar el algoritmo. Las ecuaciones fueron definidas en ENVI de la siguiente forma:

$$0.4033 * \text{float}(B1) - 0.006 \quad (1)$$

En donde, B1 = Banda 1 MODIS

$$452.41 * \text{float}(B1) + 2.9603 \quad (2)$$

En donde, B1 = producto de la ecuación 1

Los resultados estimados por el algoritmo fueron comparados con los datos medidos y entonces se determinó cuán cercano está el algoritmo desarrollado de la realidad.

### Eventos de Lluvia Significativos

El algoritmo desarrollado fue aplicado a una imagen obtenida del día posterior a un evento de lluvia significativo. Los eventos de lluvia significativos fueron definidos según los caudales diarios medidos por las estaciones del USGS para cada río dentro del área de estudio. La Figura 3 ilustra las cuencas de los ríos que contribuyen a la presencia de sedimentos suspendidos en la Bahía de Mayagüez. En el río Grande de Añasco se utilizó la estación 50144000 del USGS y para el río Guanajibo se utilizó la estación 50138000. A pesar de que la cuenca del río Yaguez está dentro del área de estudio, ésta no se consideró en el análisis debido a que no existen estaciones del USGS que midan los caudales diarios dentro de esta cuenca.

Para cada estación medida se consideró su data histórica, es decir, todos los caudales diarios medidos desde que comenzó a operar la estación. Con la data histórica se determinó el promedio diario histórico y la desviación estándar para cada río. Una vez determinados estos parámetros se seleccionó el año 2005 y se graficó el hidrograma de escorrentía. En el hidrograma se graficó una línea que representa el caudal promedio y otras líneas que representan el promedio, más un por ciento de la desviación estándar y el promedio menos un por

ciento de la desviación estándar. El por ciento de la desviación estándar se determinó mediante “trial

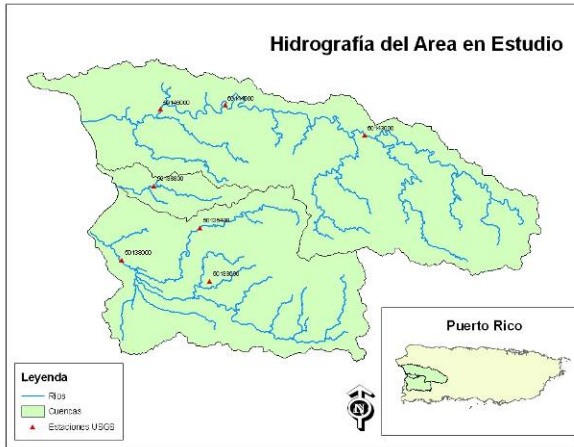


Figura 3. Hidrografía del área de estudio con estaciones del USGS

and error”, hasta que la línea correspondiente al promedio menos un por ciento de la desviación estándar concordó con el flujo base. De esta manera fue posible clasificar el año 2005 en caudales de eventos significativos, caudales promedios o caudales bases.

Se seleccionó una imagen correspondiente a un día posterior de un evento de tormenta en la cual no se detectaron nubes ni errores del instrumento. Esta imagen se pre-procesó de igual forma que en el ejercicio anterior y se le aplicaron las ecuaciones (1) y (2). Para este análisis fue necesario aplicar una tercera ecuación que convierte de concentración a masa de SS, asumiendo un volumen de agua de 31,250 m<sup>3</sup> por píxel (largo= 250 m; ancho= 250 m; profundidad= 0.5 m).

$$31.25 * \text{float}(B1) \quad (3)$$

En donde, B1 = producto de la ecuación 2

La aplicación de esta ecuación genera un producto de masa de SS (Kg) para todo el volumen de agua hasta 0.5 m de profundidad. Se definió un polígono del área de la bahía y se sumaron los valores de todos los píxeles que se encontraban dentro de este polígono. Para este procedimiento se convirtió el polígono a una región de interés y se exportó como un archivo Aschii utilizando ENVI. Este archivo fue luego abierto en Excel y se ejecutó la sumatoria.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Desarrollo del algoritmo

Se logró definir una buena relación ( $R^2= 0.72$ ;  $n= 38$ ) entre la concentración de SS (mg/l) y las medidas de  $R_{rs}$  representativas de las bandas 1 y 2 de MODIS (Fig. 4). En la gráfica puede observarse la escasez de datos obtenidos bajo condiciones de concentraciones altas; la gran mayoría de las mediciones no pasan de 15 mg/l. Con este panorama es difícil conocer que tan representativa es la línea definida a la relación real que existe entre estos parámetros. Además este factor es indicativo de que las concentraciones de SS en la bahía son relativamente bajas. Esto representa una limitación

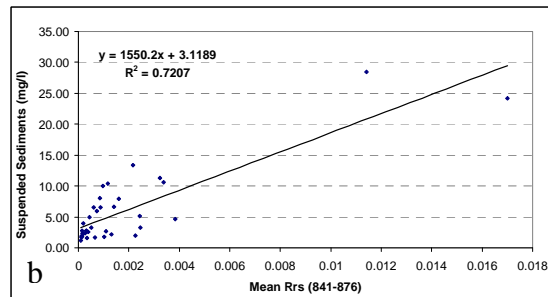
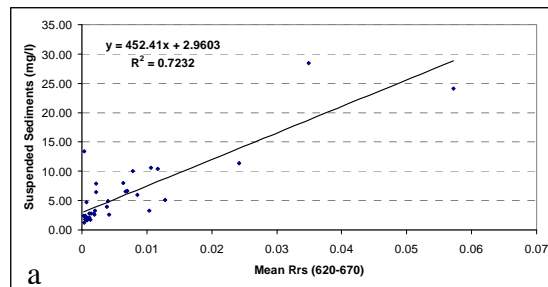


Figura 4: Relación entre concentración de SS y promedios de  $R_{rs}$  en base a la banda 1 (a) y banda 2 (b) de MODIS

para este tipo de estudio porque es más difícil detectar la señal emitida por los sedimentos cuando estos se encuentran en concentraciones bajas.

Considerando que ambos rangos de  $R_{rs}$  (620-670 nm; 842-876) mostraron una buena relación con las medidas (SS), se definió una relación incluyendo ambas bandas en una misma ecuación en miras de mejorar el algoritmo. El resultado de este ejercicio se ilustra en la Fig. 5, en donde puede observarse que los valores estimados se acercan bastante a los valores observados y el  $R^2$  aumentó a 0.78.

En términos generales, se observó que los datos obtenidos de MODIS son considerablemente mayores que los de  $R_{rs}$ , por lo que no fue posible

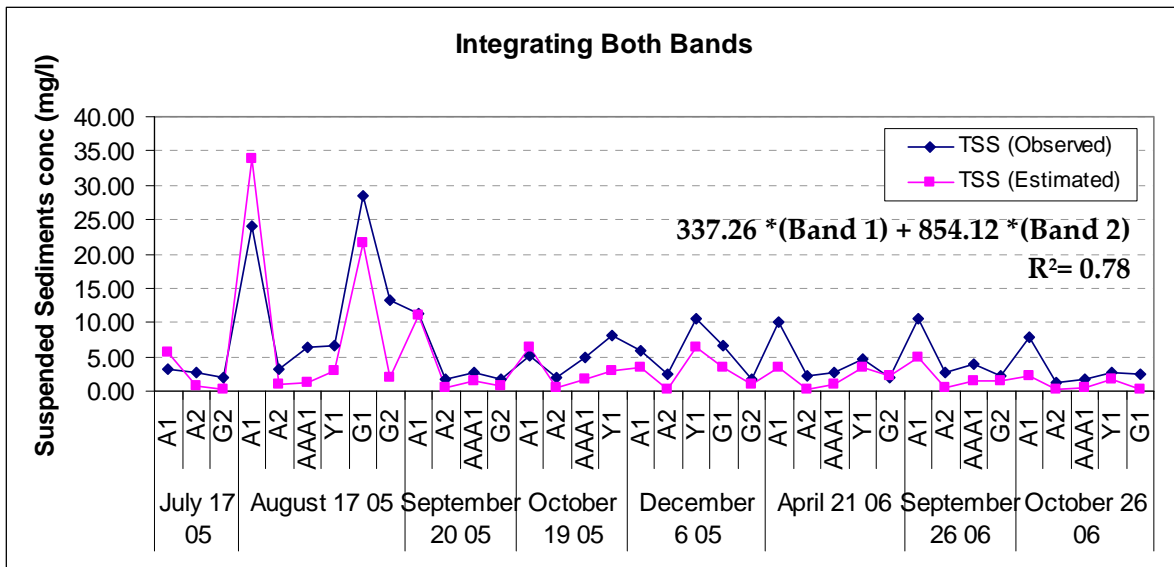


Figura 5. Resultado de la integración de ambas bandas (1 y 2) en una misma ecuación (Datos del GER-1500)

aplicar la ecuación definida directamente a los datos de MODIS. Se estableció la relación entre reflectancia del censor MODIS y  $R_{rs}$  medida *in situ* para ambas bandas utilizando datos de tres fechas diferentes (Fig. 6). Se observó una relación lineal significativa ( $R^2= 0.92$ ;  $n= 10$ ) entre los valores correspondientes a la banda 1, pero no se definió ninguna relación significativa utilizando los datos de la banda 2 ( $R^2= 0.13$ ;  $n=7$ ). Con estos resultados se determinó que la banda 2 no debe ser integrada en el algoritmo porque podría ser contraproducente.

#### Validación del algoritmo

Para propósitos de validación, estas ecuaciones fueron aplicadas a 6 imágenes que fueron incluidas en el análisis previo (Fig. 7). En estos productos puede observarse que la variabilidad espacial de los sedimentos responde a lo que se espera, considerando las descargas de los ríos y los eventos de resuspensión, los cuales son característicos de la región del río Guanajibo. En varios productos puede observarse lo que parece ser el efecto del fondo (Fig. 7d), esto debe estudiarse más en detalle a través de un análisis batimétrico del área.

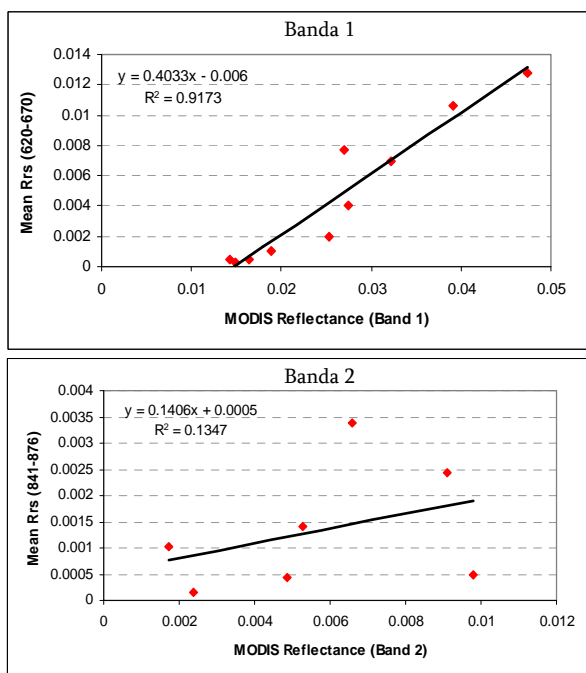
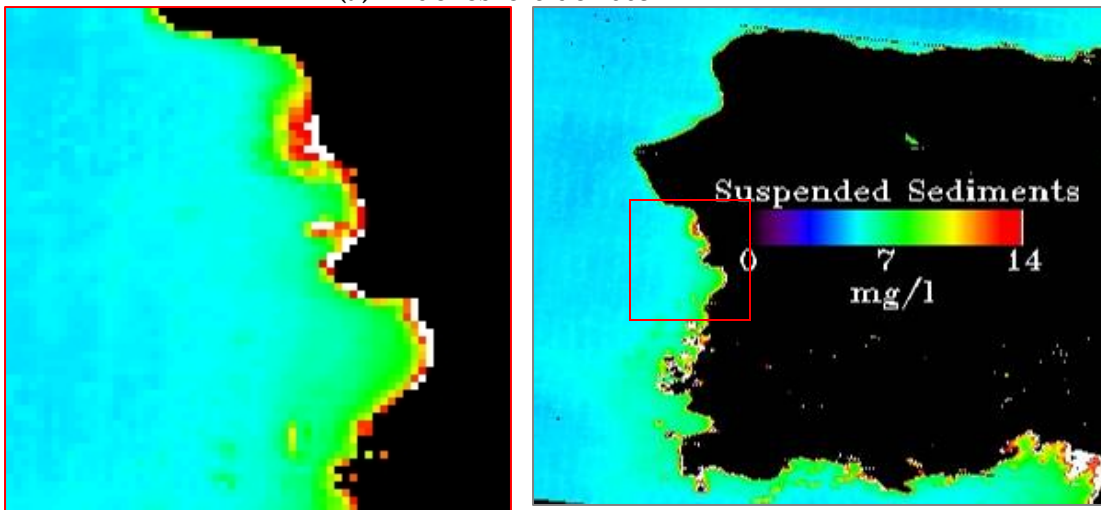


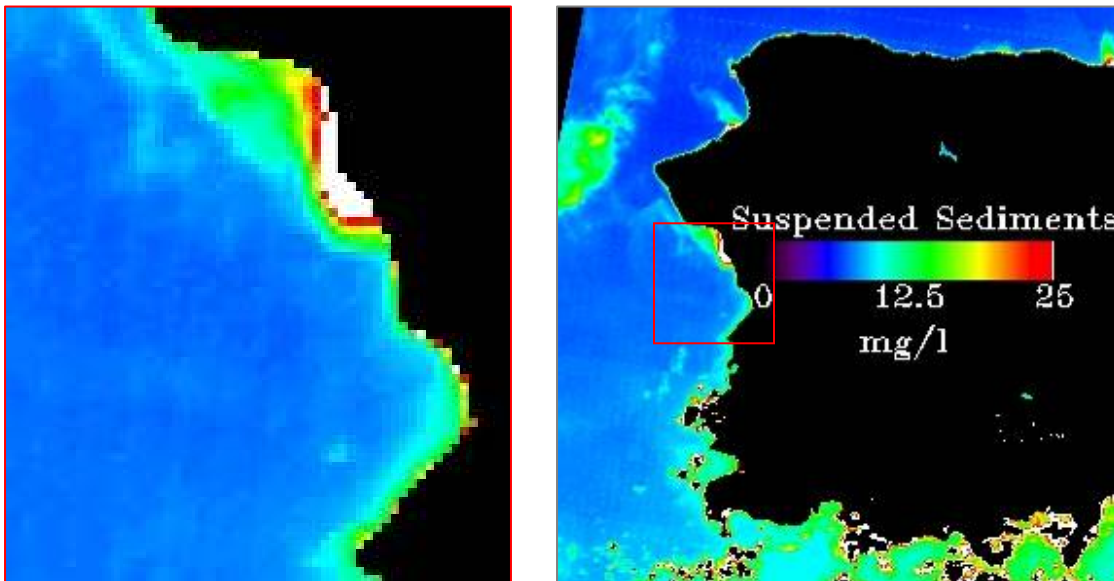
Figura 6. Relación entre  $R_{rs}$  y reflectancia de MODIS

Cuando se compararon los valores extraídos de los productos de las 6 imágenes con las medidas de SS para cada estación se observó que aunque las estimaciones están dentro del rango esperado, los valores sub-estiman en gran medida los valores observados (Fig. 8). En esta gráfica puede observarse que las estimaciones responden a las variaciones observadas, esto es indicativo de que los valores de reflectancia de la banda 1 son afectados por las concentraciones de sedimentos suspendidos. Las limitaciones de este algoritmo pueden atribuirse a varias razones: (1) no se contaba con muchos datos de concentraciones de SS altas que ayudaran a definir mejor la relación entre estos dos parámetros, (2) el censor no distingue la señal de SS en concentraciones tan bajas y (3) efectos de la atmósfera y/o el fondo.

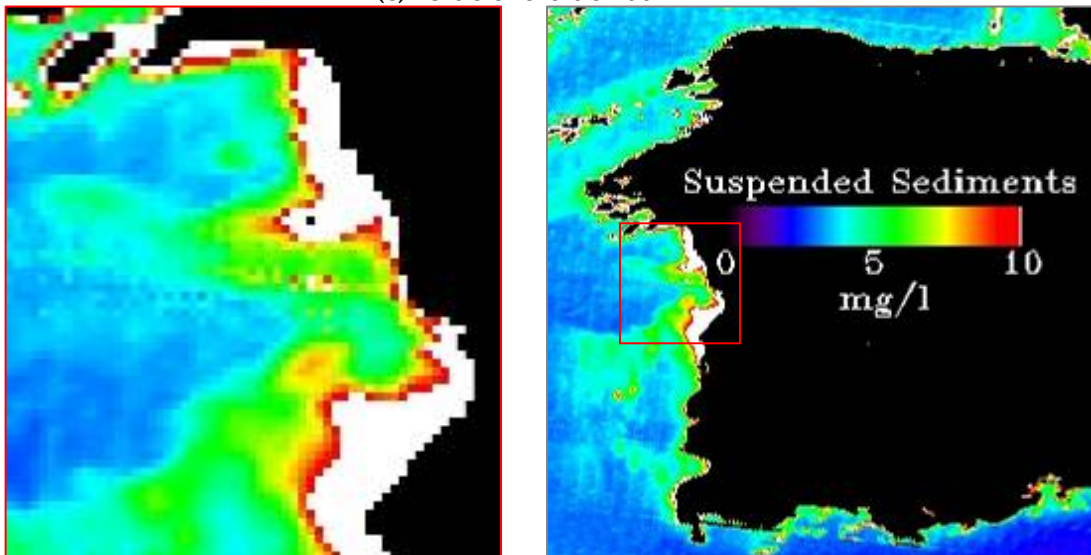
(a) 27 de febrero de 2003



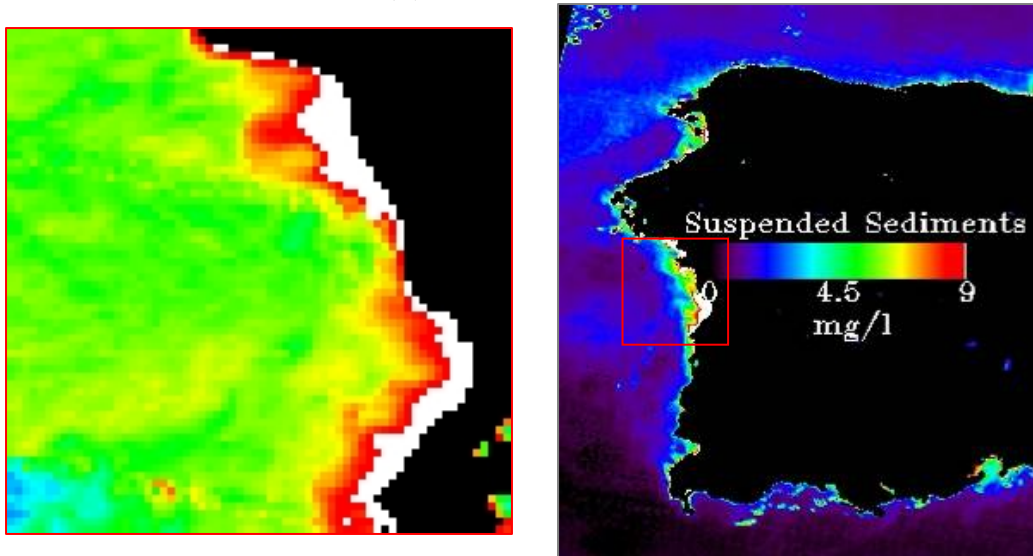
(b) 7 de octubre de 2003



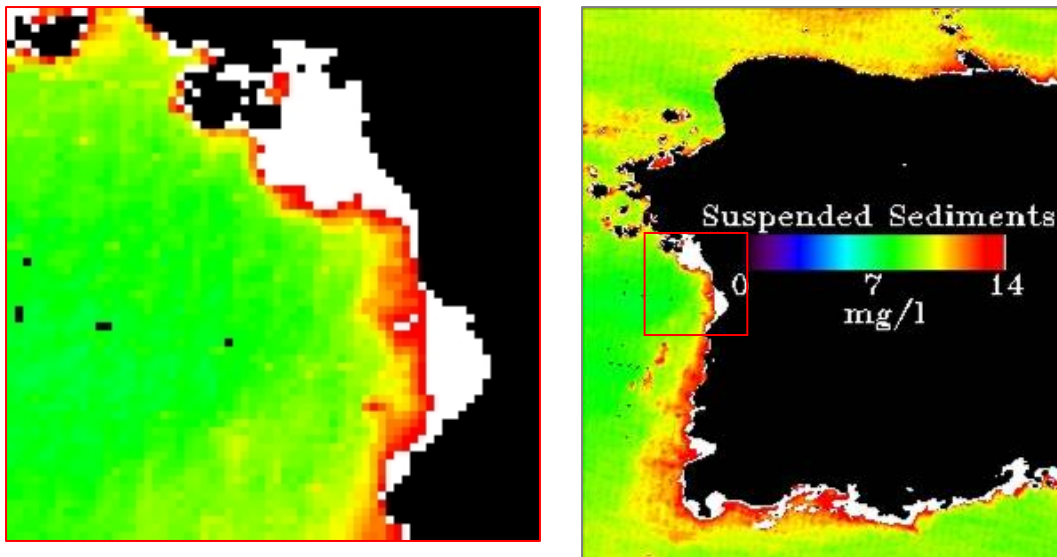
(c) 13 de enero de 2004



(d) 14 de enero de 2004



(e) 12 de febrero de 2003



(f) 8 de marzo de 2006

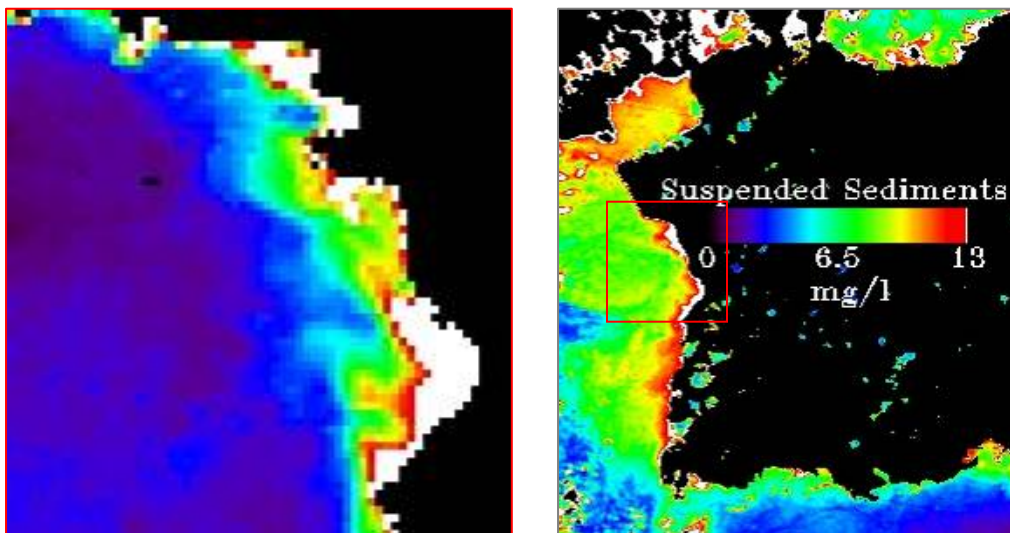


Figura 7. Productos de concentración de SS para seis diferentes fechas obtenidos con el algoritmo producido.

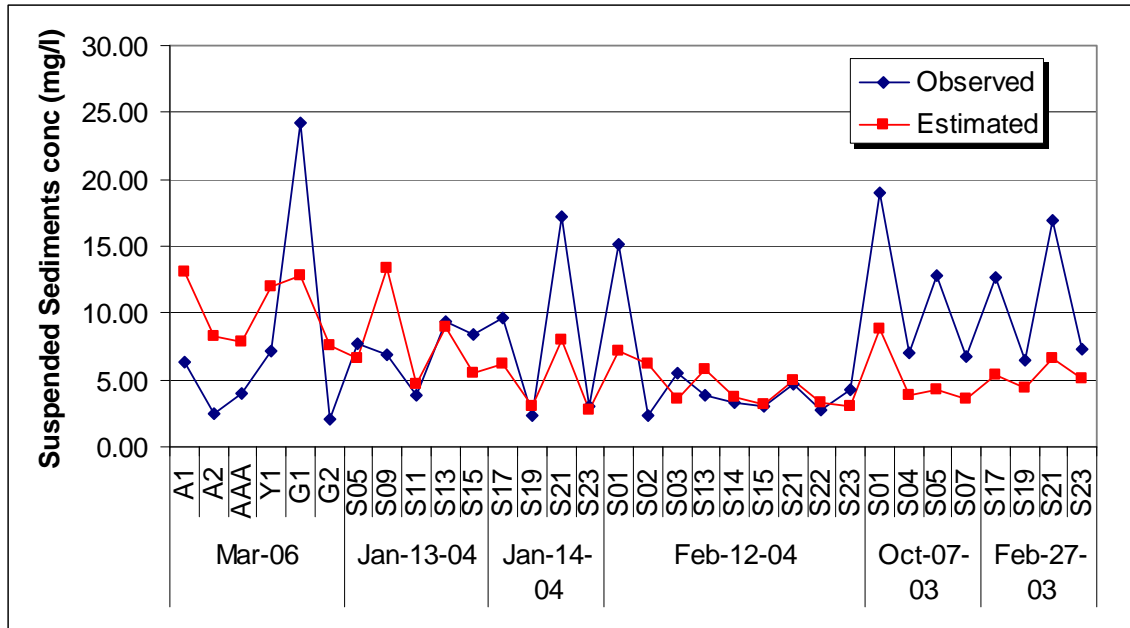


Figura 8. Comparación entre las estimaciones del algoritmo generado y las medidas de campo

### Aplicación del algoritmo

Esta sección presenta el resultado del componente de aplicación de este estudio, el cual intenta estimar descarga total de SS para un evento de lluvia. Se identificaron un total de 83 días con eventos de lluvia significativos para el año 2005; esto representó un 23 por ciento del total de días en un año. Basándonos en conocimiento previo del área, este por ciento resulta razonable. La fecha de la imagen seleccionada para este análisis fue del 26 de octubre de 2005, y la descarga asociada a este evento fue de 718 cf/s (río Grande de Añasco). La mayor concentración de SS puede observarse cerca de la desembocadura del río Añasco, y un plumacho bastante extenso puede observarse en la región del Guanajibo (Fig. 9). La descarga total estimada para el evento de lluvia seleccionada fue de 392.32 T. En este momento no se cuenta con información para comparar este resultado con otras medidas o estimaciones. En trabajos futuros se revisará la literatura para comparar la estimación obtenida con descargas medidas de otras zonas costeras asociadas a cuencas de drenaje similares a la Bahía de Mayagüez.

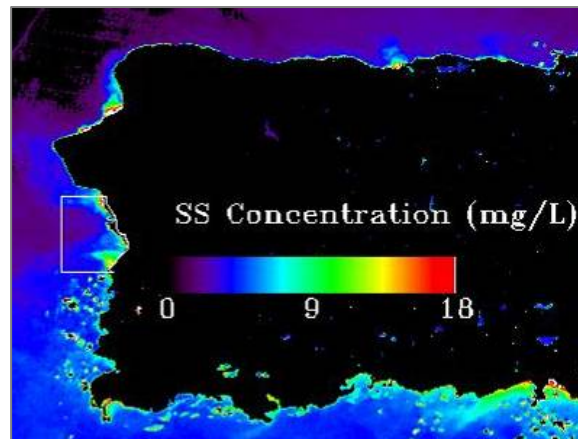


Figura 9. Concentración de SS asociado a un evento de lluvia significativo

### CONCLUSIONES

Desarrollar un algoritmo que pueda estimar la concentración de sedimentos suspendidos para la Bahía de Mayagüez es de gran utilidad debido a que se reduce la necesidad de trabajos de campo y pueden estudiarse áreas más extensas. Las técnicas de percepción remota presentan herramientas y ventajas que nos ayudaron a desarrollar un método base que permitirá monitorear variaciones espaciales y temporales de sedimentos suspendidos en la Bahía de Mayagüez. Mediante este estudio mostramos el procedimiento necesario para el desarrollo de varias relaciones que, trabajando en



combinación, nos dan como resultado un valor estimado de SS.

Se encontró que las correcciones geométricas y radiométricas que se incluyen en el pre-procesamiento de las imágenes presentan una etapa muy crucial dentro de todo el proceso. Se evidenció que el no realizar una buena corrección atmosférica durante este proceso puede alterar el valor de los resultados obtenidos y producir interpretaciones incorrectas. En cuanto a la corrección geométrica, se encontró que la rutina incluida en ENVI para georeferenciar imágenes MODIS, es bastante confiable. El programa ENVI fue de gran importancia y utilidad en este trabajo debido a que fue la interfase que nos proveyó las herramientas necesarias para trabajar las imágenes MODIS en términos de pre-procesamiento y análisis.

Aunque durante el desarrollo del algoritmo se consideró como alternativa utilizar las Bandas 1 y 2, se concluyó que usando solo la banda 1 se obtienen resultados más efectivos. Esto es debido a que no se logró definir una buena relación entre los valores de reflectancia de MODIS de la Banda 2 y los valores promedios de  $R_s$  representativos de esta misma banda. Los resultados del algoritmo producido fueron capaz de detectar variaciones espaciales a lo largo de la bahía, sin embargo, bajo condiciones de concentraciones altas de sedimentos suspendidos las estimaciones tendieron a sub-estimar las medidas de campo. Para propósitos de este trabajo, esta diferencia entre el valor estimado y el real se mantuvo dentro de un rango aceptable considerando todos los factores que influyen los valores de reflectancia de los cuales no tenemos control.

*Agradecimientos.*- Queremos agradecer al Dr. Fernando Gilbes y al Dr. Jorge Rivera-Santos por su guía y orientación. Gracias al Sr. Patrick Reyes el procesamiento de los datos de campo. José Martínez contribuyó en la obtención y el pre-procesamiento de las imágenes.

## LITERATURA CITADA

Cruise, J.F., Miller, R.L., 1994. Hydrologic Modeling of Land Processes in Puerto Rico Using Remotely Sensed Data. *Water Resources Bulletin*, 30(3): 419-428.

Gilbes, F., López, J.M., Yoshioka, P.M., 1996. Spatial and temporal variations of phytoplankton chlorophyll  $\alpha$  and suspended particulate matter in Mayagüez Bay, Puerto Rico. *Journal of Plankton Research*, 18(1): 29-43.

Grove, K., 1977. Sedimentation in Añasco bay and river estuary: Western Puerto Rico. *Master thesis*. University of Puerto Rico at Mayagüez, Department of Marine Sciences.

Miller, R.L., Cruise, J.F., Otero, E., López, 1994. Monitoring Suspended Particulate in Puerto Rico. *Water Resources Bulletin: American Water Resources Association*, 30(2): 271-283.

Morelock, J., Grove, K., Hernández, M.L., 1983. Oceanography and patterns of shelf sediments Mayagüez, Puerto Rico. *Journal of Sedimentary Petrology*. 53(2): 0371-0381.

Wang, X., Wang, Q., Liu, G., Li, H., 2005. A study on the Quantitative Remote Sensing Model for the Suspended Sediment Concentration in Coastal Water with ASTER Conference paper, Report no. A290054.