



USANDO TELEDETECCIÓN PARA IDENTIFICAR LA INCIDENCIA DE SEDIMENTOS DEL CANAL DEL DIQUE EN SISTEMAS ACUÁTICOS COSTEROS

Max J. Moreno-Madriñán^{a*}, Douglas L. Rickman^b, Daniel E. Irwin^c

- ^a Department of Environmental Health, Fairbanks School of Public Health at Indiana University, IUPUI, Indianapolis, IN 46202, USA; E-Mails: mmorenom@iu.edu
- ^b Global Hydrology and Climate Center, Earth Science Office at NASA Marshall Space Flight Center, Huntsville, AL 35805, USA; E-Mails: drickman@hiwaay.net
- ^c SERVIR, Earth Science Office at NASA Marshall Space Flight Center, Huntsville, AL 35805, USA; E-Mails: daniel.irwin@nasa.gov

RESUMEN

En este estudio de caso, se usó tecnología de teledetección para analizar la distribución espacial de plumas de sedimentos suspendidos del Canal del Dique, Colombia, en el Mar Caribe y cuerpos de agua costeros. Especialmente para distinguir si dichos sedimentos alcanzan las aguas del complejo coralino de Islas del Rosario. Del “Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS)”, se utilizó el producto de reflectancia de superficie (MOD09GQ) para estimar la reflectancia de la superficie del agua (RSA) como sustituto de la concentración de sedimentos suspendidos. Considerando el valor medio de RSA en el primer trimestre de cada año (el cual corresponde al trimestre más seco del año) se determinó la variación temporal interanual en las Islas del Rosario, en las dos bocas principales del Canal del Dique y en la boca principal del río de donde este se desprende, el Río Magdalena. Complementariamente, se usó teledetección para estimar las tendencias interanuales de precipitación en la cuenca hidrográfica del Río Magdalena y se analizó su posible relación con las tendencias de RSA. La precipitación se estimó usando el producto 3B43 V7 de la misión “Tropical Rainforest Measuring Mission (TRMM)”. No se detectaron incrementos o decrementos en las tendencias interanuales de RSA en alguno de los sitios durante el periodo de estudio 2001-2014 ($p > 0,05$), pero se detectaron correlaciones significativas entre las tendencias interanuales en RSA en cada desembocadura de la cuenca hidrográfica ($r = 0,57-0,90$, $p < 0,05$) y entre éstas y la variación interanual de precipitación en la cuenca ($r = 0,63-0,67$, $p < 0,05$). Se detectaron mayores valores de RSA durante los meses de La Niña en comparación a los meses de El Niño. Con esta tecnología fue posible identificar una intersección espacial entre las plumas de sedimentos del Canal del Dique y el sistema coralino de Islas del Rosario.

Introducción

Sedimentos provenientes del Canal del Dique, un brazo artificial del Río Magdalena, Colombia, han sido planteados entre los principales factores de deterioro en el complejo coralino de Islas del Rosario a 30 km de Cartagena, Colombia (Ilustraciones 1 y 2) (Díaz et al., 2000). Así mismo, escorrentías y máximas descargas de agua se han reportado como los principales determinantes físicos de la descarga de sedimentos a nivel del Río Magdalena (Restrepo et al., 2006a). A nivel del Canal del Dique, además de los factores mencionados, se destacan también los dragados que constantemente se llevan a cabo para mantener la navegabilidad del canal (Restrepo et al., 2006b, Mogollón-Velez, 2013). A pesar de claros argumentos científicos sugiriendo el detrimento causado

por sedimentos del Canal del Dique en los corales del Rosario, hay aún necesidad de métodos de cotejo que permitan, de una manera eficiente en términos de tiempo y dinero, un monitoreo constante. Dicho monitoreo, podría verificar la interacción de las plumas de sedimentos en los ecosistemas de interés.

La tecnología de teledetección brinda enormes ventajas entre las cuales está la disponibilidad de archivos con datos retrospectivos, la facilidad de cubrir grandes extensiones de terreno y largos periodos de tiempo y los bajos costos desde que una gran cantidad de bases de datos son de acceso libre al público. El producto para reflectancia de superficie de MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) de 250 m a 620-

1er CONGRESO IBEROAMERICANO SOBRE SEDIMENTOS Y ECOLOGÍA
QUERÉTARO, QUERÉTARO MÉXICO, 21-24 JULIO 2015

670 nm de longitud de onda, ha sido ampliamente utilizado para estimar concentración de sedimentos suspendidos y turbidez de aguas estuarinas (Chen et al, 2007, Hu et al, 2004, Rodríguez-Guzmán et al., 2009; Petus et al., 2010; Moreno-Madrián et al., 2010; Doxaran et al., 2009). Este trabajo estudia el caso de las Islas del Rosario, la Bahía de Barbacoas y la Bahía de Cartagena, y su relación con las descargas de sedimentos provenientes del Río Magdalena, especialmente aquellas del Canal del Dique. Dicho estudio explora la aplicabilidad de usar tecnología de teledetección para monitorear las distribuciones espaciales de plumas de sedimentos y sus potenciales intersecciones con ecosistemas costeros de particular interés. Complementariamente, este estudio investiga el uso de la teledetección para detectar asociaciones entre las fluctuaciones interanuales de sedimentos y turbidez (estimados por medio de la reflectancia del agua) en las desembocaduras y los regímenes interanuales de lluvias y de cobertura del suelo en la cuenca hidrográfica. Con similar objetivo pero con distinto enfoque, los resultados de este estudio han sido recientemente publicados por los autores del presente artículo (Moreno-Madrián et al, 2015).

Metodología

Tres puntos fueron localizados con GoogleEarth™ en las proximidades de cada una de las tres desembocaduras principales del Río Magdalena y en las aguas de las Islas del Rosario (Ilustración 1). Los tres puntos de cada desembocadura fueron distribuidos formando un semi arco de forma tal que la distancia entre cada punto fuera de 300 m y la distancia entre cada punto y un punto medio del canal, donde este hace contacto con la bahía, fuera también de 300 m. Los tres puntos en las Islas del Rosario fueron ubicados a lo largo de una línea imaginaria entre el punto oeste más extremo de la Isla de Barú y el punto este más extremo en la Isla del Rosario. Un total de 12 puntos distribuidos en grupos de a tres, cada grupo de tres correspondiendo a un sitio de monitoreo, resultando en cuatro sitios de monitoreo: tres desembocaduras y uno en las islas.

Se descargaron imágenes de satélite del producto diario L2G Global SIN de 250 m de resolución espacial (MOD09GQ) que cubrieran los cuatro sitios de monitoreo descritos y las aguas costeras anexas durante el periodo de 2001 a 2014. Dichas imágenes provienen del sensor MODIS a bordo del satélite Terra y se descargaron de la página de 'EOS Clearing House (ECHO)' del sistema de datos e información de observaciones de la Tierra de NASA, 'Earth Observing System Data and Information System (EOSDIS, 2014)'. Se usó las imágenes de la banda 1, la cual corresponde a una longitud de onda entre

620 y 670 nm. Este es un producto diseñado para estudios en tierra firme. Sin embargo, desde que las placas alcanzan a cubrir también las aguas costeras adyacentes, se les puede estudiar gracias al contenido de sedimentos suspendidos de origen terrígeno que causa reflectancia de la superficie del agua (RSA). Este producto viene con corrección atmosférica, cuya detallada descripción puede encontrarse en el artículo de Doxaran et al. (2009).

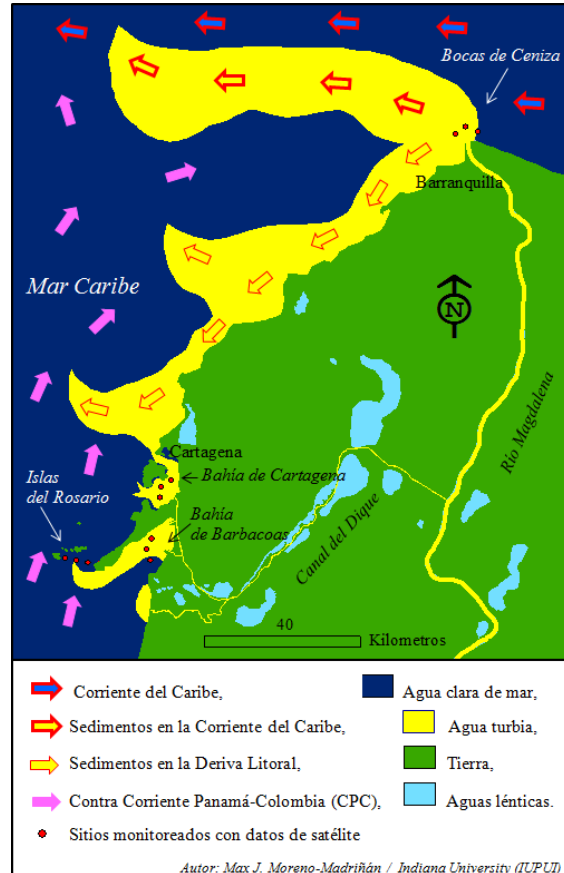


Ilustración 1. Ubicación de las Islas del Rosario, los sitios de monitoreo y dispersión de los sedimentos del Río Magdalena en el Mar Caribe.

Como control de calidad, aquellas imágenes donde más de uno de los 12 puntos escogidos estuviera cubierto con nubes o pixeles negros fueron descartadas. Esto resultó en pocas imágenes disponibles durante el periodo entre abril y mediados de junio (91-166 días Julianos) y el periodo entre alrededor del primer cuarto de agosto hasta noviembre (220-334 días Julianos) lo cual coincide a grosso modo con los dos periodos anuales de lluvias (Restrepo et al, 2006a). La disponibilidad de buenas imágenes durante el periodo lluvioso varió de año a año. Consecuentemente, las imágenes más apropiadas se encontraron más consistentemente en el periodo de diciembre a marzo (periodo seco mayor) y especialmente durante enero a marzo (0-90 días Julianos). En miras a

1er CONGRESO IBEROAMERICANO SOBRE SEDIMENTOS Y ECOLOGÍA
QUERÉTARO, QUERÉTARO MÉXICO, 21-24 JULIO 2015

mayor consistencia, este estudio solo utilizó imágenes de enero a marzo.

La función de 'extract values to point' de ArcGIS 10.2 se utilizó para extraer la RSA de cada uno de los puntos en las imágenes seleccionadas. El valor promedio de RSA fue calculado entre los tres puntos que conforman cada sitio de monitoreo para cada imagen. De entre estos valores promedios de las imágenes de enero a marzo se calculó el valor medio para esos tres meses (el primer cuarto del año) para cada año dentro del periodo 2001-2014. Se usó la media de los tres meses en vez del promedio aritmético para así contrarrestar la variabilidad en los datos entre un día con otro. Después de aplicar los criterios de exclusión, el número de imágenes disponibles para cada primer trimestre de los años considerados de 2001 al 2014 fue respectivamente, 12, 11, 10, 19, 12, 14, 14, 19, 14, 11, 18, 14, 12 y 16.

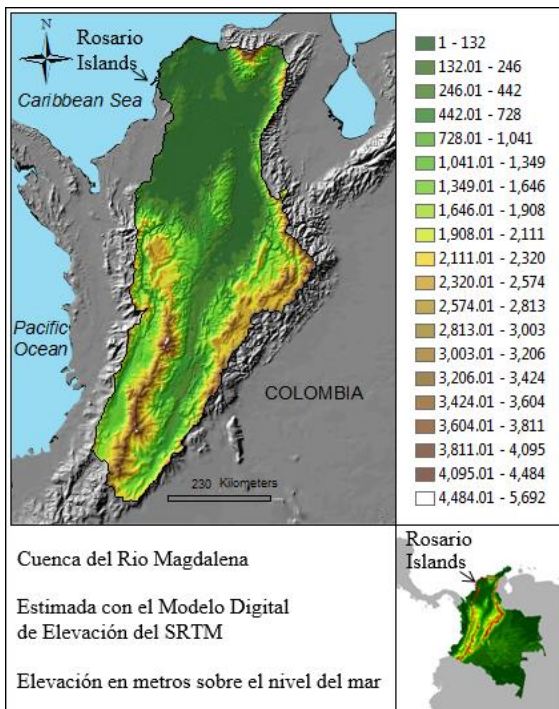


Ilustración 2. Ubicación de las Islas del Rosario y de la cuenca hidrográfica del Río Magdalena en Colombia y Sur América.

Los valores medios descritos fueron trazados en series de tiempo interanual por el periodo 2001-2014 (Ilustración 3) y las líneas de tendencia fueron analizadas por significancia usando el método de 'proc mixed' de la versión 9.4 del software estadístico SAS. Se asumió que estas líneas de tendencia de RSA representen una aproximación de las tendencias interanuales de sedimentos suspendidos en el agua durante el periodo de estudio en los cuatros sitios de monitoreo: la desembocadura de Bocas de Ceniza en el Mar Caribe, la

desembocadura de Pasacaballos en la Bahía de Cartagena, la desembocadura de Matunilla en la Bahía de Barbacoas y las Islas del Rosario.

Datos de un modelo de elevación digital (DEM) generado con información del transbordador espacial Endeavour 'Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)' fueron descargados de la página 'Global Data Explorer' del centro de distribución de archivos activos de procesos del terreno 'Land Processes Distributed Active Archive Center' (LP DAAC, 2013). Esta base de datos es parte de NASA EOSDIS. Dichos datos fueron procesados con ArcMap 10.2 y usados para delinear la cuenca del Río Magdalena (Ilustración 2), la cual drena por las tres desembocaduras descritas anteriormente, la primera directamente al Mar Caribe y las dos siguientes por medio del Canal del Dique a las Bahías de Cartagena y Barbacoas, respectivamente. Una vez creado un croquis de la cuenca, este se usó con la función de 'extract by mask' de ArcMap 10.2 para extraer la información de las imágenes de la misión de lluvia tropical, 'Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM).' TRMM es una misión conjunta ente NASA y la agencia nacional de desarrollo espacial de Japón, 'Japan's National Space Development Agency (JAXA).' El producto de TRMM utilizado fue el de precipitación acumulada mensual, 3B43 V7, cuyos datos se descargaron del sistema de visualización y análisis en línea conocido en inglés como 'Online Visualization and Analysis System (TOVAS).' TOVAS es manejado por medio del centro de servicios de información y datos de ciencias de la Tierra de Goddard, conocido en inglés como 'Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC, 2014).'

Se calculó un estimativo de la tendencia temporal interanual de lluvia para toda el área de la cuenca del Río Magdalena. Para esto se usaron los valores acumulados de lluvia en los tres primeros meses de cada año durante el periodo de estudio de 2001 a 2014. Solo se tomaron los tres primeros meses del año para explorar por asociación entre la tendencia de lluvias en la cuenca y la carga de sedimentos (RSA) en las desembocaduras y en las islas. Adicionalmente se calculó también la tendencia interanual de lluvia acumulada por año completo durante el periodo de 2001 a 2013. Para analizar si las tendencias en RSA aumentaron o disminuyeron de manera significativa durante el periodo de estudio se usó el método 'proc mixed' en SAS 9.4. Para analizar si la posible asociación entre la cantidad de lluvia durante los tres primeros meses de cada año y la RSA (o cantidad de sedimentos suspendidos) durante los mismos periodos fue significativa durante el periodo de 2001 a 2014, se utilizó el método 'proc corr' con correlación de Spearman en SAS 9.4.

1er CONGRESO IBEROAMERICANO SOBRE SEDIMENTOS Y ECOLOGÍA
 QUERÉTARO, QUERÉTARO MÉXICO, 21-24 JULIO 2015

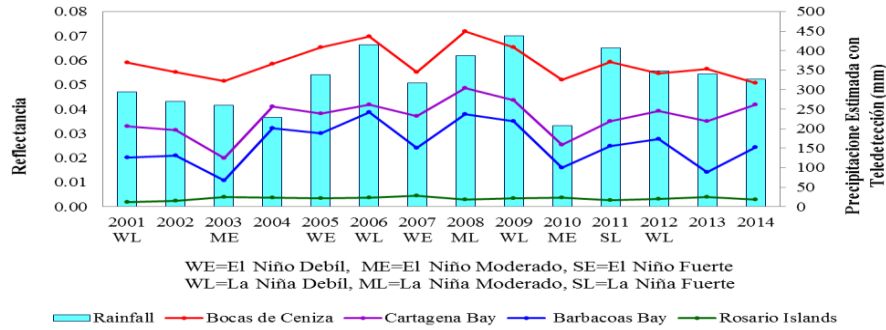


Ilustración 3. En líneas, series de tiempo de las tendencias interanuales del valor medio de RSA de las imágenes libres de nube durante los primeros 90 días de cada año. En barras, series de tiempo de precipitación acumulada durante los primeros 90 días de cada año.

Resultados

Considerando solo los tres primeros meses de cada año, el estudio de Moreno-Madriñán et al. (2015) no detectó un aumento o decremento significativo en la RSA durante el periodo comprendido entre 2001 y 2014 ($p > 0.05$) (Ilustración 3). De igual manera, el estudio no detectó aumento o decremento en la tendencia interanual de lluvia acumulada en la cuenca durante los tres primeros meses de cada año ($p > 0.05$) durante el mismo periodo interanual. Sin embargo, sí se detectó un aumento significativo en la tendencia interanual de lluvia acumulada durante el año entero durante el periodo interanual de 2001 a 2013 ($p < 0.01$).

Considerando los tres primeros meses de cada año, El estudio de Moreno-Madriñán et al. (2015), también encontró una asociación significativa entre la tendencia interanual de lluvia acumulada y la RSA en las desembocaduras de la cuenca del Río Magdalena. Las correlaciones de Spearman (r) fueron 0.67 ($p < 0.01$), 0.64 ($p < 0.05$) y 0.63 ($p < 0.05$), para las desembocaduras de la Bahía de Cartagena, Bocas de Ceniza, y la Bahía de Barbacoas, respectivamente, durante el periodo 2001-2014. Sin embargo, no se detectó correlación significativa en las Islas del Rosario ($p > 0.05$).

La tendencia en la RSA en las Islas del Rosario no estuvo tampoco correlacionada con sus equivalentes en alguna de las tres desembocaduras ($p > 0.05$) durante el periodo de estudio. Lo mismo no fue el caso cuando se compararon las tres desembocaduras entre sí. Especial atención se le da a la tendencia en RSA en la desembocadura de la Bahía de Barbacoas por su mayor influencia en las Islas del Rosario como se explicará en la discusión. La tendencia de RSA en la Bahía de Barbacoas estuvo significativamente correlacionada con sus equivalente en la Bahía de Cartagena ($r = 0.90, p < 0.01$) y Bocas de Ceniza ($r = 0.71, p < 0.05$).

Se notó una cierta tendencia a que aquellos primeros trimestres de cada año con menor RSA en las desembocaduras fueran también aquellos con condiciones de El Niño mientras que aquellos con mayor RSA tuvieran más comúnmente condiciones de La Niña (Ilustración 3, Moreno-Madriñán et al, 2015). Esto entendiendo El Niño/La Niña de acuerdo a la clasificación del índice oceánico ONI (Oceanic Niño Index, por sus siglas en inglés). La coincidencia anterior no fue aparente en el caso de las Islas del Rosario.

De un análisis visual de RSA usando las imágenes de MOD09GQ, el estudio de Moreno-Madriñán et al (2015) respalda la descripción encontrada en la literatura (Restrepo and Lopez, 2007) acerca de la descarga y transporte de sedimentos suspendidos en el área de estudio (Ilustraciones 1, 4a-b, 5a-b). Una pluma con alta RSA avanza desde Bocas de Ceniza hacia el sur-oeste a lo largo de la costa con la deriva litoral (Restrepo and Lopez, 2007) para encontrarse con la Contra Corriente de Panamá (CCP) que viene desde el sur-oeste hacia el nor-este (Pujos et al., 1986). El enfrentamiento de las corrientes ocurre en las proximidades de Cartagena y Salmedina desde donde entonces la pluma se dispersa hacia el Mar Caribe. Dicha dispersión o dilución de sedimentos ocurre al nor-oeste de las Islas del Rosario después de que las aguas del CCP han ya transitado por las islas (Ilustraciones 1, 4a-b).

Las imágenes MOD09GQ en la ilustración 5a-b muestran un acercamiento en las bahías de Cartagena y Barbacoas. En dichas imágenes la pluma proveniente de la Bahía de Cartagena a lo sumo intersecta levemente el área más norte del complejo de las Islas del Rosario. Caso distinto ocurre con la pluma proveniente de la Bahía de Barbacoas. Esta pluma, después de bordear el extremo sur de la Isla de Barú, es impulsada hacia el nor-oeste por la CCP a través de las Islas del Rosario, siendo esta la pluma con mayor intersección con dicho complejo coralino.

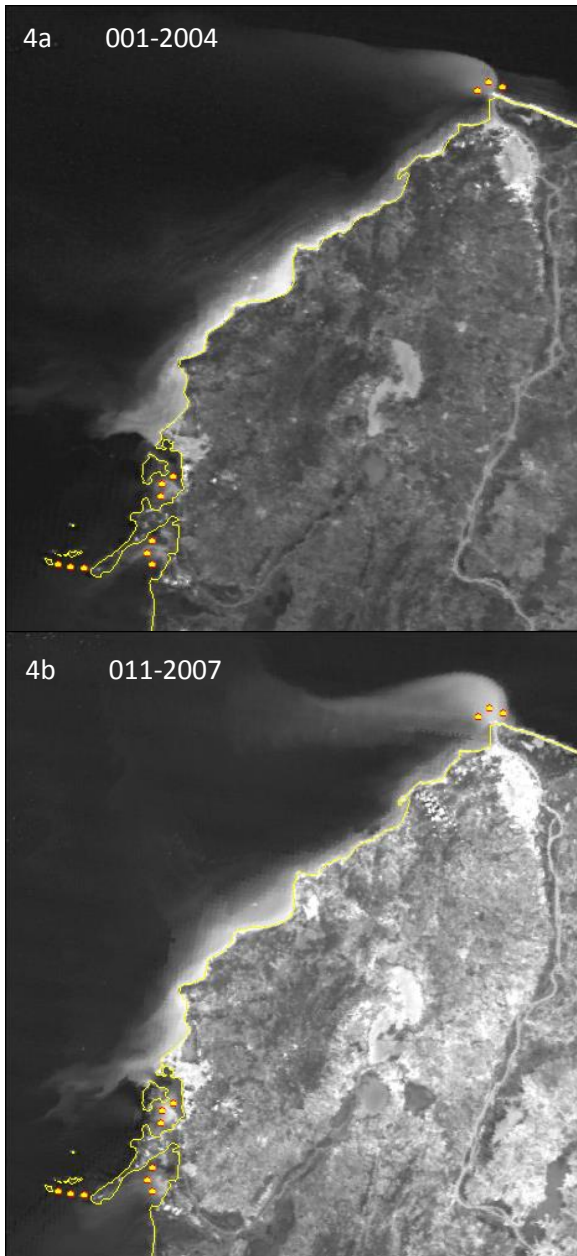


Ilustración 4. Imágenes de MOD09GQ (banda 1) mostrando el avance de sedimentos del Río Magdalena con la Deriva Litoral. a) en enero 1 de 2004 y b) en enero 11 de 2007.

Discusión

Ya que el citado estudio solo analizó el primer trimestre de cada año (el cual coincide con el trimestre más seco del año), las fluctuaciones interanuales reportadas para las tendencias de RSA no reflejan los pulsos totales anuales que las descargas del Río Magdalena y en especial el Canal del Dique ejercen en las Islas del Rosario y las Bahías de Cartagena y Barbacoas. Es meritorio sin embargo destacar que aun cuando la nubosidad impidió el análisis durante los meses lluviosos cuando se espera

mayor descarga de sedimentos (y por ende mayor RSA), todavía se pudo detectar la intersección de las plumas de sedimentos con las Islas del Rosario (Ilustraciones 4b y 5a-b). De esta manera, dicho estudio no solo confirmó que las plumas de sedimentos de Barbacoas si llegan a la zona coralina de las Islas del Rosario sino que además sugiere fuertemente que si estas llegan incluso en la época seca entonces han de intensificarse durante la época de lluvias desde que esta arrastra mayor cantidad de sedimentos y mayor flujo de agua.

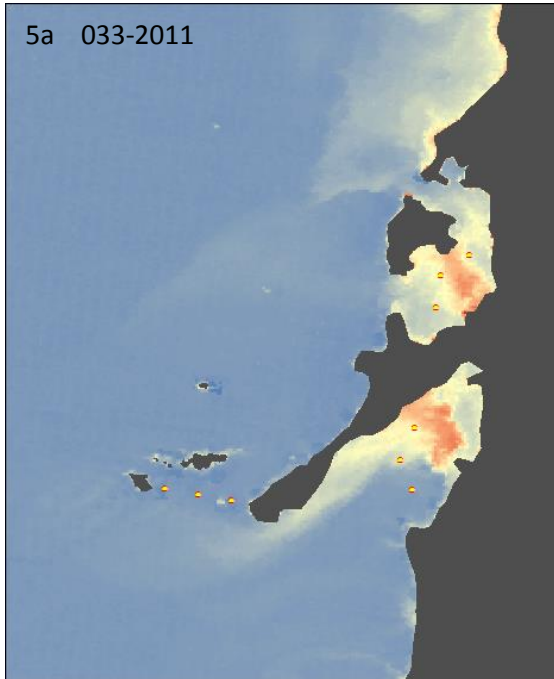
La superposición entre la pluma proveniente de la Bahía de Barbacoas y el complejo de Islas del Rosario revela que el flujo de sedimentos provenientes del Canal del Dique a través de las desembocaduras de Matunilla y Lequerica en La Bahía de Barbacoas si avanza por las aguas de las Islas del Rosario. Esto ocurre debido a la acción de la CCP empujando la pluma de sedimentos hacia el norte al encuentro con las islas. Por el contrario, las plumas provenientes de la desembocadura de Pasacaballos en la Bahía de Cartagena llegan al Mar Caribe al norte de las Islas de Rosario donde el empuje norte de la CCP da poca oportunidad a que estas plumas avancen sur hacia las islas. En el caso de las plumas de sedimentos provenientes directamente del Río Magdalena a través de la desembocadura en Bocas de Ceniza, estas son empujadas por la deriva litoral hacia el sur-oeste pero se enfrentan con la CCP a las alturas de Cartagena y Salmedina. Como consecuencia de este enfrentamiento de corrientes, los sedimentos del Río Magdalena por Bocas de Ceniza son dispersados y diluidos hacia el oeste con poca posibilidad de alcanzar las Islas del Rosario.

El que no se hubiera detectado una correlación significativa entre la tendencia interanual de RSA en las aguas de las Islas del Rosario y las de las tres desembocaduras o la de lluvias en la cuenca no demuestra una falta de causación. Dicha falta de asociación puede ser debida a que la sensibilidad a fluctuación de RSA por el sensor MODIS es insuficiente para detectar las concentraciones tan bajas de sedimentos que se encuentran en las aguas normalmente transparentes de las Islas del Rosario. De hecho, es precisamente la transparencia de sus aguas lo que permitió la formación de este sistema coralino, ya que la descarga directa de sedimentos del Canal del Dique en las Bahías de Barbacoas y Cartagena no ocurrió antes de 1952 (Mogollón-Veléz, 2013).

Las plumas de sedimentos que el estudio de Moreno-Madriñán et al (2015) detectó en contacto con las islas son imágenes esporádicas captadas durante la época de sequía (Ilustración 5a-b). Imágenes aisladas podrían no influenciar los promedios usados para calcular las tendencias interanuales en este estudio. Sin embargo, esas

1er CONGRESO IBEROAMERICANO SOBRE SEDIMENTOS Y ECOLOGÍA
QUERÉTARO, QUERÉTARO MÉXICO, 21-24 JULIO 2015

imágenes aisladas muestran que en ocasiones estas plumas llegan a las Islas del Rosario, y dichas ocasiones incluso si fueran pocas podrían ejercer efectos severos en los corales. Es sensato asumir que la frecuencia de estas plumas intersectando las islas aumenta durante la época de lluvias. Dichos eventos, sin embargo, serían difícilmente captados por el producto MOD09GQ, banda 1, desde que este opera en la sección de rojo (620-670 nm) en el espectro electromagnético y a esta longitud de onda la reflectancia no atraviesa las nubes. Y la nubosidad es más común durante la época de lluvias.



La correlación reportada por Moreno-Madriñán et al (2015) entre las tendencias interanuales de RSA de las tres desembocaduras del Río Magdalena y entre estas y la tendencia en la magnitud de lluvias en la cuenca hidrográfica confirma, como es de esperarse, la influencia que las lluvias en la cuenca ejercen en la RSA de los estuarios. Dicha influencia puede explicarse por el mayor arrastre de sedimentos que ocurre con una mayor intensidad en las lluvias. A su vez, la mayor concentración de sedimentos en las aguas costeras resulta en una mayor RSA. Esto puede explicar porque aquellos años cuyos primeros trimestres presentaron baja RSA tendieron a coincidir con años donde el primer trimestre tuvo condiciones de El Niño. Contrariamente, aquellos años cuyos primeros trimestres fueron de La Niña presentaron en general mayor RSA.

Presumiblemente, condiciones de El Niño están asociadas a intensidades de lluvia por debajo del promedio y por consiguiente a menor arrastre de sedimentos y menor

RSA en las desembocaduras. Por el contrario, condiciones de La Niña estarían asociadas a más lluvias, lo que causaría mayor arrastre de sedimentos y consecuentemente mayor RSA en las desembocaduras. Esta propensión detectada de que aquellos primeros trimestres de cada año con menor o mayor intensidad de lluvias tendieron a coincidir con correspondientes trimestres de El Niño o La Niña, respectivamente, alinea bien con lo reportado en la literatura. Numerosos estudios reportan una relación similar entre precipitación y la fluctuación de El Niño/La Niña (Ropelewski and Halpert, 1987; Mason and Goddard, 2001; Restrepo and Kjerfve, 2000). En atención a esta relación y en miras a un manejo ambiental apropiado para el complejo coralino de Islas del Rosario, es importante considerar que se ha reportado un incremento en la frecuencia de la fluctuación entre años de El Niño y La Niña (Cai et al., 2014).

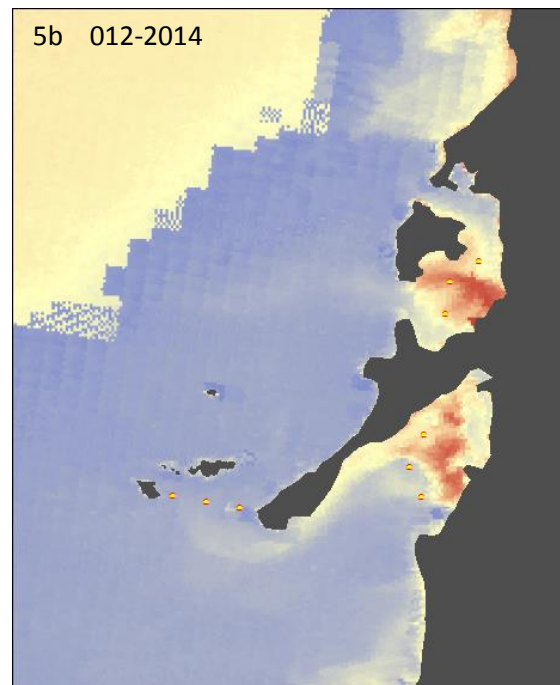


Ilustración 5. Imágenes de MOD09GQ (banda 1) mostrando el avance de sedimentos del Canal del Dique desde la Bahía de Barbacoas hacia las Islas del Rosario.

Durante la segunda mitad del año 2010 y todo el año 2011 tuvo lugar uno de los periodos de La Niña más intensos en los últimos cinco décadas (Hoyos et al., 2013). En noviembre 30 de 2010 debido a la fuerte presión de las aguas, ocurrió una ruptura en el Canal del Dique que descargó 10×10^6 m³ de agua e inundando 500 km² de tierras con poblaciones, cultivos y tierras de ganadería (Correa, 2010) por más de dos meses. La ilustración 6a-c muestra una serie de imágenes del producto MOD09GQ cubriendo el periodo de tiempo desde antes de la ruptura en octubre 13 en 2010 hasta 64

1er CONGRESO IBEROAMERICANO SOBRE SEDIMENTOS Y ECOLOGÍA
QUERÉTARO, QUERÉTARO MÉXICO, 21-24 JULIO 2015

días después en febrero 2 de 2011 cuando aún se aprecia una pequeña pluma de sedimentos entrando por el sitio de la ruptura. Este periodo de tiempo coincidió con el primer trimestre del año 2011, el cual estuvo dentro del periodo de estudio. Es posible que el flujo de agua y consiguiente carga de sedimentos que fueron desviados desde el Canal del Dique por medio de esta ruptura haya disminuido durante ese periodo la pluma de sedimentos del Canal del Dique por las desembocaduras en las Bahías de Cartagena y Barbacoas. Esto podría explicar por qué este estudio encontrara menor RSA en las Bahías de Cartagena y Barbacoas durante el primer trimestre de 2011 en comparación a la RSA en el primer semestre del 2012 cuando en efecto la acumulación de lluvia fue menor en este segundo año.

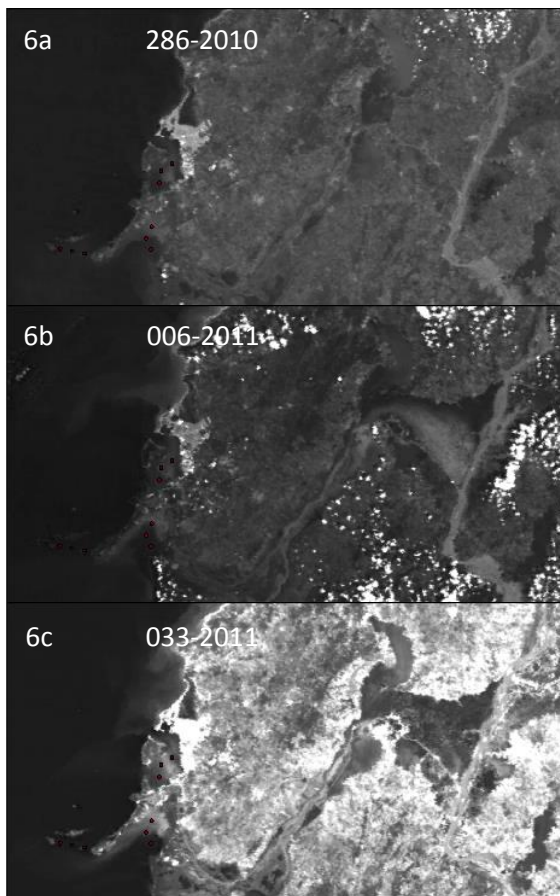


Ilustración 6. Secuencia de imágenes de MOD09GQ (banda 1) mostrando el proceso inundación desde a) octubre 13 de 2010 (antes de la ruptura de noviembre 30), b) enero 6 de 2011, cuando aun se observa un fuerte pluma de agua con sedimentos entrando al área de inundación 37 días después de la ruptura y c) en febrero 2 de 2011 cuando aún se puede observar una tenue pluma de agua con sedimentos entrando al área de desastre 64 días después de la ruptura.

Conclusiones

Tomando la reflectancia de la superficie del agua (RSA) como indicador de turbidez y carga de solidos suspendidos en el agua, el producto MOD09GQ, banda 1, del sensor MODIS a bordo del satélite Terra fue útil para detectar la intrusión de plumas de sedimentos en el área del complejo coralino de las Islas del Rosario. Dicho producto también probó ser útil para el estudio de la distribución de plumas de sedimentos en las Bahías de Barbacoas y Cartagena así como en Bocas de Ceniza. Más aun, este producto y en general la tecnología de teledetección pueden ser utilizados para monitorear flujos de agua en desastres como el causado por la ruptura en el Canal del Dique ocurrida el 30 de noviembre de 2010.

La tecnología de teledetección fue también exitosamente empleada en este estudio para detectar correlaciones entre tendencias temporales de sedimentos en aguas costeras e intensidad de lluvias en la cuenca hidrográfica. El producto MOD09GQ en específico, sirvió para detectar correlaciones directas entre las tendencias interanuales de RSA en las desembocaduras del Río Magdalena y entre estas y la tendencia interanual de lluvias durante el periodo de 2001 a 2014. Sin embargo, el análisis llevado a cabo con este producto, durante la época de sequía, no pudo detectar asociaciones entre las tendencias interanuales de RSA en las aguas de las Islas del Rosario y alguna otra tendencia interanual estudiada. La incapacidad para detectar esta asociación no se debe interpretar como falta de asociación. Se sugiere que la asociación no fue detectada ya que la baja turbidez normalmente encontrada en dichas aguas en la época de sequía no es suficiente para ser detectada por el producto MOD09GQ. Trimestres con baja RSA (carga de sedimentos) en las desembocaduras tendieron a coincidir con condiciones de El Niño mientras que condiciones de La Niña fueron más comunes en trimestres con alta RSA.

Agradecimientos

Se expresa agradecimiento a NASA/SERVIR, al programa de postdoctorado de NASA, a África Flores Córdova de UAH y al Dr. Ashutosh Limaye de NASA/SERVIR.

Referencias

Cai, W., Borlace, S. Lengaigne, M., Van Rensch, P., Collins, M., Vecchi, G. Timmermann, A. Santoso, A., McPhaden, M.J., Wu, L., England, M.H., Wang, G., Guilyardi, E., Jin, F.F., (2014). Increasing frequency of extreme El Niño events due to greenhouse warming. *Nat. Clim. Chan.* 4, 111-116

1er CONGRESO IBEROAMERICANO SOBRE SEDIMENTOS Y ECOLOGÍA
QUERÉTARO, QUERÉTARO MÉXICO, 21-24 JULIO 2015

- Chen, Z., Hu, C., Muller-Karger, F. (2007) Monitoring turbidity in Tampa Bay using MODIS/Aqua 250-m imagery. *Remote Sens. Environ.*, 109, 207-220.
- Díaz, J.M., Barrios, L.M., Cendales, J., Garzón-Ferreira, J., Geister, J., López-Victoria, M., Ospina, G.H., Parra, F., Pinzón, J., Vargas, B., Zapata, F.A., Zea, S., 2000. *Áreas Coralinas de Colombia. Serie de Publicaciones especiales*, vol. 5. INVEMAR, Santa Marta.
- Doxaran, D., Froidefond, J.M., Castaing, P. Babin, M., 2009. Dynamics of the turbidity maximum zone in a macrotidal estuary (the Gironde, France): Observations from field and MODIS satellite data. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 81, 321-332
- EOS Clearing House (ECHO), 2014. NASA's Earth Observing System Data and Information System (EOSDIS). Version 10.81.8 March 2014. The Internet: <http://reverb.echo.nasa.gov> (accessed 05.30.14).
- Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC), 2014. TRMM Online Visualization and Analysis System (TOVAS). Febrero, 27, 2014, The Internet: <http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/precipitation/tovas> (accessed 06.27.14)
- Hoyos, N., Escobar, J., Restrepo, J.C., Arango, A.M., Ortiz, J.C. (2013) Impact of the 2010-2011 La Niña phenomenon in Colombia, South America: The human toll of an extreme weather event. *Applied Geography*, 39, 16-25.
- Hu, C., Chen, Z., Clayton, T.D., Swarzenski, P., Brock, J.C., Muller-Karger, F.E. (2004) Assessment of estuarine water-quality indicators using MODIS medium-resolution bands: Initial results from Tampa Bay, FL. *Remote Sensing of Environment* 93:3, 423-441
- Land Processes Distributed Active Archive Center (LP DAAC), 2014. U.S. Geological Survey (USGS)/Land Processes Distributed Active Archive Center (LP DAAC) webpage, April 14, 2014. The Internet: <https://lpdaac.usgs.gov/products/> (accessed 06.27.14).
- Mason, S.J., Goddard, L., 2001. Probabilistic precipitation anomalies associated with ENSO. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 82, 619-638
- Mogollón-Vélez, J.V., M., 2013. *El Canal Del Dique*. El Áncora Editores. Bogotá, Colombia.
- Moreno-Madriñán, M. J., Al-Hamdan, M. Z., Rickman, D. L., Muller-Karger, F.E., 2010. Using the surface reflectance MODIS Terra product to estimate turbidity in Tampa Bay, Florida. *Remote Sensing*, 2, 2713-2728
- Moreno-Madriñán, Max J., Douglas L. Rickman, Dan E. Irwin and Jun Ye. (2015) Using Remote Sensing to Monitor the Influence of River Discharge on Watershed Outlets and Adjacent Coral Reefs: Magdalena River and Rosario Islands, Colombia. *Int. J. Appl. Earth Observation & Geoinformation*, 38, 204-215
- Petus, C., Chust, G., Gohin, F., Doxoran, D., Froidefond, J., Sagarminaga, Y., 2010. Estimating turbidity and total suspended matter in the Adour River plume (South Bay of Biscay) using MODIS 250-m imagery. *Cont. Shelf Res.* 30 (5), 379-392,
- Pujos, M., Pagliardini, J.-L., Steer, R., Vernet, G., Weber, O., 1986. Influence of the north Colombian Counter-current on the circulation of the continental platform: Its action on the dispersion of effluents in suspension from the Magdalena River, *Bull. Sci. Cent. Invest. Oceanogr. Hydrogr.*, 6 (3 -15)
- Restrepo, J.D. Lopez, S.A., 2007. The environmental database of Colombian deltas with emphasis on the Magdalena River. Dynamics and Vulnerability of River Delta Systems, A Scoping Workshop CDMS INSTAAR, Boulder, Colorado, USA, September 2007. The internet: http://csdms.colorado.edu/w/images/Juan_wednesday_aft_ernoonMagdalena.ppt.pdf (accessed 01.07.2015)
- Restrepo, J.D., Kjerfve, B., 2000. Magdalena River: interannual variability (1975-1995) and revised water and sediment load estimates. *Journal of Hydrology*. 235 (1-2), 137-149
- Restrepo, J.D., Kjerfve, B., Hermelin, M., Restrepo, J.C., 2006a. Factors controlling sediment yield in a major South American drainage basin: the Magdalena River, Colombia. *J. Hydrol.* 316, 213-232,
- Restrepo, J.D., Zapata, P., Díaz, J.M., Garzón-Ferreira, J., García, C.B., 2006b. Fluvial fluxes into the Caribbean Sea and their impact on coastal ecosystems: The Magdalena River, Colombia. *Glob. Planet. Chang.* 50, 33-49
- Rodríguez-Guzmán, V., Gilbes-Santaella, F. 2009. Using MODIS 250 m imagery to estimate total suspended sediment in a tropical open bay. *Int. J. Syst. Appl. Eng. Dev.* 1 (3), 36-44.
- Ropelewski, C.F., Halpert, M.S., 1987. Global and regional scales precipitation associated with El Niño-southern oscillation. *Mon. Weather Rev.* 115, 1606-1626