

TELEDETECCIÓN DE SÓLIDOS SUSPENDIDOS Y CLOROFILA-A EN AGUAS COSTERAS TURBIAS: AVANCES PARA UNA ESTIMACIÓN CONFIABLE

Fernanda Maciel, Lucía Ponce de León y Francisco Pedocchi

Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, Uruguay
fmaci@fing.edu.uy, lponce@fing.edu.uy, kiko@fing.edu.uy

Introducción

Las imágenes satelitales proveen una visión sinóptica del océano y zonas costeras, y potencialmente son herramientas muy útiles para la estimación de parámetros de calidad de agua, como turbidez y clorofila-a. Sin embargo, la teledetección en aguas costeras presenta un desafío debido a la complejidad óptica de sus aguas en comparación con el océano abierto. Este trabajo se enfoca en el Río de la Plata, que es particularmente desafiante dada su alta turbidez, que dificulta la separación de las señales provenientes de los sedimentos inorgánicos y de los pigmentos del fitoplancton. Para avanzar en la obtención de índices confiables de sólidos suspendidos totales (SST) y clorofila-a (clo-a) se cuentan con datos in situ en la zona de Punta del Tigre (San José, Uruguay); y se utilizan imágenes satelitales de Landsat-8 y Sentinel-2 A/B.

Corrección atmosférica

Las mediciones satelitales están afectadas por gases y aerosoles presentes en la atmósfera en el instante que fue tomada la imagen. Para remover estos efectos y que imágenes de distintas fechas sean comparables entre sí, es necesario aplicar lo que se denomina corrección atmosférica.

Para Landsat-8 y Sentinel 2 A/B se encuentra disponible el software Acolite (<https://odnature.naturalsciences.be/remsem/software-and-data/acolite>), con métodos de corrección atmosférica aplicables a aguas turbias.

Datos y Métodos

Datos in situ disponibles

Por un lado, se cuenta con series continuas de turbidez medida con OBS3+ en el período 2015-2019, y de turbidez, fluorescencia de clo-a y de ficocianina medidas con fluorómetro ECO Triplet a partir de diciembre 2018; por otro lado se realizan campañas de medición donde se obtienen espectros de reflectancia con 3 radiómetros hiperspectrales Ramses Trios, y muestras de agua para medición de clo-a por extracción, SST y SSF (sólidos suspendidos fijos). Las campañas de medición son típicamente cada 45 días desde 2015, pero desde octubre 2018 se intensifican a frecuencia semanal. Complementariamente, se tienen mediciones continuas desde 2015 de salinidad, temperatura, corrientes y oleaje en la zona, realizadas con CTD y ADCP.

Con los radiómetros es posible medir reflectancias del agua ($\rho_w(\lambda)$) a nivel del mar (sin efectos de la atmósfera). Estos datos se utilizan para evaluar distintas correcciones atmosféricas, así como para identificar firmas espectrales bajo distintas condiciones de calidad de agua (ver Figura 1).

Datos satelitales

Se evalúan distintas correcciones atmosféricas (CA) disponibles en Acolite para las imágenes satelitales de Landsat-8 y Sentinel-2 A/B:

- **DSF** (ajuste de espectro oscuro; Vanhellemont 2019).
- **EXP** (método exponencial; Vanhellemont & Ruddick 2015), variando la forma de estimación de los parámetros ρ_{am} (reflectancia de aerosoles) y ϵ (que representa la dependencia espectral de ρ_{am}). Los sets de parámetros elegidos son: ϵ fijo en percentil 5 y ρ_{am}

variable (**EXP ϵ 5**), ϵ fijo en percentil 50 (**EXP ϵ 50**) y ρ_{am} variable, ϵ fijo en percentil 50 y ρ_{am} fija en percentil 5 (**EXP ϵ 50 ρ_{am} 5**).

Índices de parámetros de calidad de agua

Primeramente, se realiza un ajuste de turbidez (τ , en NTU) ρ_w de los satélites en la banda infrarroja cercana (NIR). La banda NIR se seleccionó basada en bibliografía, pero además teniendo en cuenta que el OBS3+ es un instrumento óptico que mide la retro-dispersión en la banda de 850 nm, muy similar a la banda NIR de ambos satélites. Para ello se utilizan datos coincidentes de turbidez y satelitales en el período 2015-2018. El índice ajustado se compara con el sugerido por Dogliotti et al (2015) para aguas turbias.

A partir del cambio en las firmas espectrales medidas in-situ en relación al contenido de clo-a (Figura 1), se seleccionan dos índices de bibliografía, el NDCI (Mishra&Mishra, 2012) y el CIA (Hu et al, 2012). El primero mide la diferencia normalizada entre ρ_w en el rojo ($\lambda=665$ nm) y en el borde rojo ($\lambda=704$ nm), mientras que el segundo se relaciona al pico relativo en verde ($\lambda=560$ nm) a una línea de base entre el azul ($\lambda=490$ nm) y el rojo ($\lambda=665$ nm). Se hace notar que el NDCI no puede calcularse con Landsat-8 ya que no posee banda en el borde rojo.

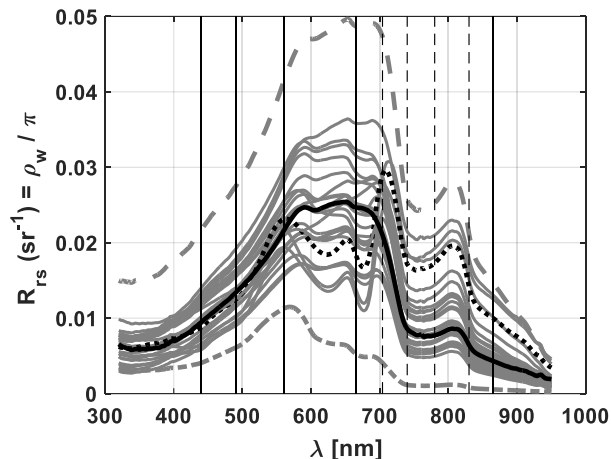


Figura 1.- Superposición de todos los espectros de reflectancia medidos in situ con radiómetros hiperspectrales. Las líneas verticales sólidas indican aproximadamente el centro de bandas presentes en ambos satélites, mientras que las líneas verticales punteadas indican el centro de bandas de Sentinel-2 A/B. Los espectros asociados a las condiciones extremas registradas de turbidez y clo-a se indican con trazo/intensidad distintos: 2 NTU (línea gris punteada inferior), 88 NTU (línea gris punteada superior); 1 μ g/L de clo-a (línea oscura continua) y 80 μ g/L (línea oscura punteada).

Resultados y Discusión

Ajuste de turbidez

Para realizar este ajuste se utiliza la CA EXP ϵ 50, debido a que es la CA con la que se obtuvo los mejores resultados para la banda NIR (error relativo absoluto promedio de 40%, y percentiles 25 y 75 del error relativo igual a -20% y 28% respectivamente). El ajuste fue realizado con datos de Landsat-8 (30 datos) y Sentinel-2 (17 datos), seleccionando un ajuste lineal con restricción de pasar por el origen, obteniéndose el ajuste dado en la ecuación [1].

$$\tau[NTU] = 2400\rho_w(NIR) \quad [1]$$

El valor 2400 es la pendiente de ajuste, que posee dimensiones de NTU ya que la reflectancia es adimensional. El rango de turbidez ajustado se encuentra entre 6 y 140 NTU, y algunos estadísticos del ajuste son: RMSE de 10.2 NTU, error relativo de 23.6% y sesgo positivo de 8%. Estos valores son muy similares a los presentados por Dogliotti et al (2015) para el Río de la Plata, sin embargo, su algoritmo sobreestima los valores de turbidez medidos por el OBS3+ en un 46% en promedio. Esta diferencia puede deberse a la óptica de medición de distintos sensores, como se describe a continuación. El OBS3+ mide retro-dispersión, mientras que otros sensores, como el ECO-Triplet, miden la dispersión a 90°. Las mediciones del ECO-Triplet son mayores a las del OBS3+, obteniéndose una relación lineal entre ambos con una pendiente igual a 0.7 (el ECO-Triplet mide un 40% más que el OBS3+). Los turbidímetros utilizados en el trabajo mencionado (HACH 2100P y 2100QIS) miden la dispersión a 90° en una probeta de 10 mL.

Índices de clorofila-a

Para los índices de clo-a elegidos, se obtiene que todas las CA presentan una buena performance (correlaciones entre 0.94 y 0.97 entre índices calculados con datos in-situ y con datos satelitales).

A partir de fines de enero de 2019 se identifica la presencia de cianobacterias en la zona de estudio, ocurriendo intensas floraciones. Dada esta circunstancia, se selecciona la imagen de Sentinel-2B del 5 de febrero de 2019, donde se constató in-situ la presencia de la floración. Ese día se midieron concentraciones de clo-a de 13.7 µg/L en el punto de fondeo de los equipos de medición continua, y 51.9 µg/L en un sitio cercano con alta concentración de cianobacterias.

En el panel superior de la Figura 2 se muestra la turbidez obtenida a partir del ajuste de [1], y en el panel inferior se presenta el índice NDCI para la misma imagen (el índice CIA no se muestra). El punto P1 se encuentra sobre la floración, el punto P2 en una zona con menor turbidez, y P3 en una zona más alejada de la costa con mayor turbidez. En la floración (P1), NDCI alcanza valores de casi 0.7, mientras que CIA alcanza valores de hasta 0.06. Se observa, asimismo, que la floración presenta muy altos valores de turbidez estimados (más de 700 NTU). Sin embargo, a medida que disminuyen los valores de estos índices (negativos para NDCI y del orden de 0.01 o menores para CIA), no es posible distinguir si se trata de la señal de clorofila o de otros materiales en suspensión (sedimentos). A modo de ejemplo, se comparan los valores en los puntos P2 y P3 (como representativos de zonas alejadas de la floración con distintos valores de turbidez). P2 posee una menor turbidez (26 NTU) que P3 (50 NTU), y asimismo presenta menores valores del índice NDCI (-0.070) y CIA (0.007) que P3 (-0.026 y 0.010). Esta covariación de la turbidez y los índices de clo-a es visualmente observable, detectándose claramente la transición en la zona del frente de turbidez del Río de la Plata (no se muestra).

Conclusiones

Primero, se destaca la importancia de contar con mediciones de reflectancia in situ para evaluar distintas CAs y cuantificar las incertidumbres asociadas. Por un lado, se obtiene una muy buena estimación de la turbidez para la zona de estudio a partir de la reflectancia en la banda NIR. Se hace hincapié en las diferencias que pueden surgir debido a la utilización de varios tipos de sensores de turbidez en campo. Por otro lado, se ha avanzado en la comprensión de las limitaciones de la teledetección de clo-a en el Río de la Plata a partir de índices de bibliografía. Se muestra para un día particular que la señal de turbidez está afectada por floraciones de cianobacterias (en este caso no se puede asociar turbidez a sólidos en suspensión), y que los índices de clorofila

están afectados por otros materiales en suspensión en zonas alejadas de la floración. Con las mediciones continuas y datos obtenidos en las campañas se cuenta con un importante set de datos para mejorar los índices de clo-a como trabajo a futuro, y calibrarlos con concentraciones medidas in situ.

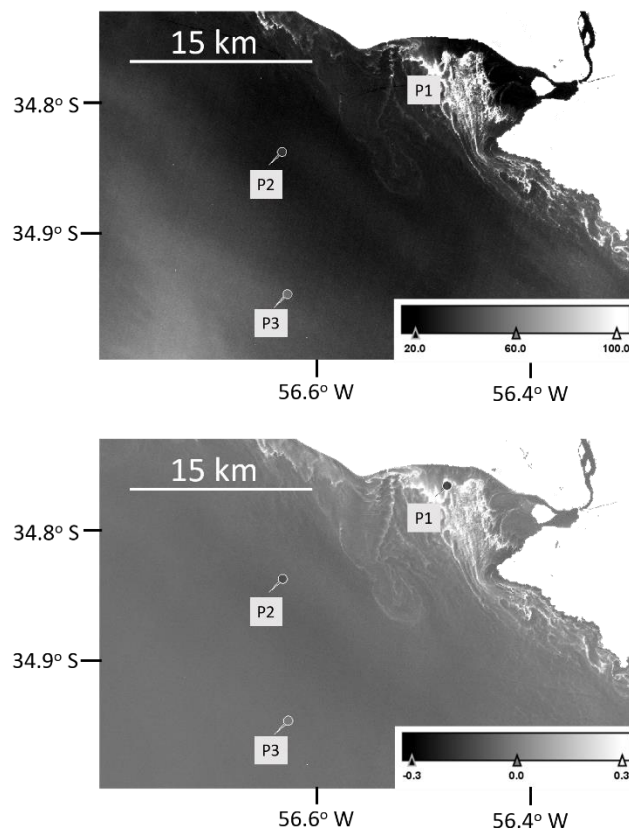


Figura 2.- Panel superior: mapa de turbidez obtenido utilizando la expresión en [1] para el día 05-feb-19. Panel inferior: índice NDCI para el mismo día. Ver texto para explicación de los puntos P1, P2 y P3.

Agradecimientos

Parte de las mediciones utilizadas se realizaron durante los trabajos de campo que el IMFIA realiza para la Administración Nacional de Usinas y Transmisiones Eléctricas de Uruguay (UTE).

La Dra. Sylvia Bonilla y la Lic. Signe Haakonsson, de la Sección Limnología de Facultad de Ciencias, son las responsables de las mediciones de clorofila-a en laboratorio.

Referencias

- Dogliotti, A. I., K. G. Ruddick, B. Nechad, D. Doxaran, and E. Knaeps (2015). A single algorithm to retrieve turbidity from remotely-sensed data in all coastal and estuarine waters. *Remote Sensing of Environment*, 156, 157-168
- Hu, C., Z. Lee, and B. Franz (2012). Chlorophyll a algorithms for oligotrophic oceans: A novel approach based on three-band reflectance difference. *Journal of Geophysical Research*, 117, C01011
- Mishra, S., Mishra, D. R. (2012). Normalized difference chlorophyll index: A novel model for remote estimation of chlorophyll-a concentration in turbid productive waters. *Remote Sensing of Environment*, 117, 394-406.
- Vanhellemont, Q. (2019). Adaptation of the dark spectrum fitting atmospheric correction for aquatic applications of the Landsat and Sentinel-2 archives. *Remote Sensing of Environment*, 225, 175-192
- Vanhellemont, Q., Ruddick, K. (2015). Advantages of high quality SWIR bands for ocean colour processing: Examples from Landsat-8. *Remote Sensing of Environment*, 161, 89-106.