

# Validación de Firmas Espectrales Utilizando Percepción Remota en Relación a los Pigmentos Asociados a las Cianobacterias en las Salinas de Cabo Rojo, Puerto Rico

H. A. Weidisch-Quñones

Departamento de Biología, Universidad de Puerto Rico Recinto de Mayagüez  
P.O. Box 9012 Mayagüez, Puerto Rico 00681-9012  
[hweidisch@excite.com](mailto:hweidisch@excite.com)

**Resumen.-** Haciendo uso de la herramienta de percepción remota, se intenta identificar los pigmentos asociados a las cianobacterias en los tapetes microbianos en las áreas salinas de Cabo Rojo. Se utilizaron los sensores Landsat ETM<sup>+</sup> e Ikonos, para las fechas de 11 de marzo de 2003 y el año 2001, respectivamente. Además se utilizó un radioespectrómetro para poder medir la radianza e irradianza de dichos tapetes. Estos últimos datos se utilizaron como datos de campo para poder validar las reflectancias asociadas a los tapetes. No se pudo obtener información sobre las reflectancias partiendo de las imágenes, pero al comparar las reflectancias obtenidas con los datos de campo podemos hacer una comparación con los encontrados en la literatura.

## INTRODUCCIÓN

Los tapetes microbianos son comunidades de microorganismos procariotas que podrían representar el primer ecosistema creado en el planeta Tierra hace 3500 millones de años (Urmeneta *et al.*, 2002). En aquellos tiempos, la superficie de la Tierra estaba dominada por las cianobacterias. Éstas, mediante el proceso de fotosíntesis, liberaban oxígeno, creando así la atmósfera aeróbica. La capa superior de los tapetes microbianos está compuesta por cianobacterias, mientras que en la capa media pueden habitar bacterias anaeróbicas que también son fototróficas (verdes y púrpuras sulfurosas). En la capa inferior del tapete se encuentran las bacterias anaeróbicas, reductoras de sulfato. Tanto las cianobacterias como las bacterias sulfurosas utilizan los productos de las bacterias reductoras de sulfato como donantes de electrones. Es de gran interés para la comunidad científica estudiar la relación que existe entre estos organismos y la formación de las capas en el tapete microbiano.

Dicho proyecto pretende poder validar firmas espectrales de los organismos fotosintéticos en el tapete microbiano de

las Salinas de Cabo Rojo utilizando sólo la capa superior. El uso de percepción remota nos ayudaría a poder identificar concentraciones o por lo menos obtener alguna idea sobre cuanta concentración de pigmentos se encuentran en el lugar. Esto además se validaría con los datos de campo para cada superficie de tapete microbiano estudiado. Este proyecto tiene como objetivo principal poder validar las firmas espectrales en relación a los pigmentos asociados como lo son la clorofila  $\alpha$  y ficobiliproteínas, en el tapete microbiano. Además intenta poder describir si el uso de apreciación remota es útil para investigaciones en el área de microecosistemas.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### *Área de estudio*

Este proyecto se llevó a cabo en el área oeste de Puerto Rico en las Salinas de Cabo Rojo, Lat. 17°57'20.0"N; Lon. 67°12'06.7"W (Figura 1). El área total de las Salinas es de aproximadamente 16.64 hectáreas. Se escogieron aleatoriamente 5 puntos en la zona de borde de las Salinas (Figura 2). Para poder identificar la zona

se utilizaron imágenes de ETM<sup>+</sup> para el 2003 e Ikonos para el 2001.

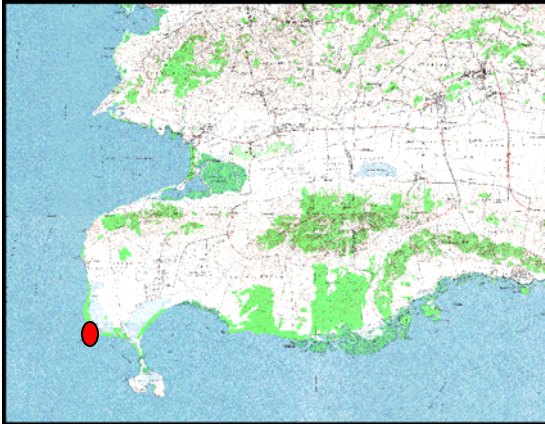


Figura 1. Zona Oeste de Puerto Rico, área de estudio.



Figura 2. Puntos de muestreo.

### *Colección de datos*

Se realizó un viaje al área de estudio para poder obtener datos de radianza ( $L$ ) e irradianza ( $E$ ) con un radiospectrómetro modelo GER1500. Éste tiene un sensor hiperspectral con 512 bandas y una resolución espectral de 1.5nm. El rango espectral es de 350nm (ultravioleta) a 1050nm (infrarrojo cercano).

Se tomaron alrededor de 54 lecturas, 3 de ellas al mismo tipo de tapete ( $L$ ) y 3 medidas a una tarjeta gris calibrada al 0.5 ó 50% ( $L$ ), para luego obtener un promedio de las medidas, y se midieron 9 diferentes tipos de superficies. Los tapetes fueron los siguientes: 1. verde oscuro; 2. verde claro; 3. marrón; 4. gris-marrón; y 5. mostaza. Se obtuvo una medida a la superficie de arena clara, esta medida nos sirvió para saber si las lecturas

obtenidas estaban correctas, ya que la reflectancia de la arena clara era conocida.

### *Manejo de datos*

Los datos obtenidos con el GER1500 se trabajaron en Microsoft Excel. De las tres medidas de radianza ( $L$ ) de los tapetes y radianza de la tarjeta ( $L_T$ ) se calculó un promedio. Para obtener la irradianza corregida ( $E_d$ ) se utilizó la siguiente fórmula:  $E_d = (L_T * 2)\pi$ , donde  $L_T$  es la radianza de la tarjeta al 0.5 de calibración, se multiplica por 2 para poder obtener una calibración de 1 ó 100% y por último se multiplica por pi (3.14159) para poder obtener la transformación de los datos de  $L_T$  a  $E_d$ . Ya teniendo los valores de  $L$  de cada tapete y los de  $E_d$  para la tarjeta se procede a obtener las reflectancias ( $R$ ) para cada tapete microbiano con la fórmula:  $R = L / E_d$ , donde  $L$  es la radianza del tapete y  $E_d$  la irradianza corregida de la tarjeta gris.

### *Imágenes de satélite*

Las imágenes utilizadas para este proyecto fueron: del sensor Landsat ETM<sup>+</sup> y del sensor Ikonos. Ambos son sensores multiespectrales con una resolución espacial de 30m y 4m, respectivamente. ETM<sup>+</sup> tiene una resolución radiométrica de 8 bandas que cubre desde 0.45mm a 2.35mm e Ikonos tiene una resolución radiométrica de 4 bandas que cubre desde 0.45mm a 0.85mm en el espectro electromagnético.

### *Procesamiento de imágenes*

Las imágenes fueron procesadas en "The Environment for Visualizing Images" (ENVI) versión 4.0. De cada imagen se escogió solo una fracción (subset) para poder agilizar el proceso y poder trabajar solo en el área de interés. Luego a cada subset de la imagen se le aplicó una corrección atmosférica con el módulo "dark subtract". Este módulo le resta el valor mínimo de cada banda como

respuesta a la dispersión causada por la atmósfera. Luego de hacerle las correcciones atmosféricas se le aplica una máscara a todo lo que representa tierra dejando solo los valores digitales correspondientes a las zonas de salinas y aguas oceánicas. Las máscaras se le aplicaron a ambas imágenes. Esto a su vez reducía la mezcla de píxeles al realizar las clasificaciones. Se utilizó el módulo "masking" de ENVI encontrado en herramientas básicas, generar una máscara. Se importó los valores digitales de la banda número 4 (infrarrojo), para poder separar las áreas de tierra y vegetación de las áreas de interés para el estudio, los valores digitales para cada imagen son diferentes así que se generaron dos máscaras. Ya generadas las máscaras con los valores digitales correspondientes se le aplica la máscara a cada imagen (Figura 3).

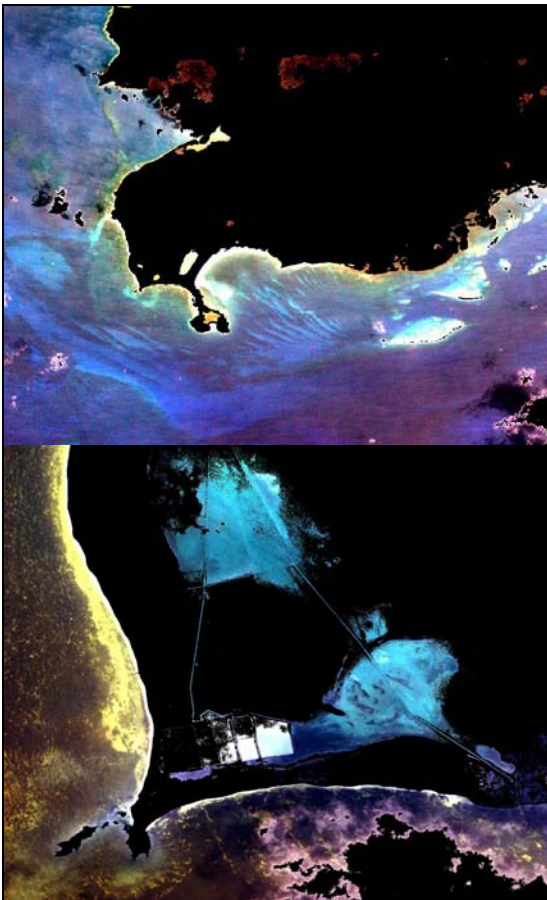


Figura 3. Máscara a la vegetación y tierra, de ETM<sup>+</sup> e Ikonos.

A cada imagen se le intenta aplicar una corrección radiométrica (Figura 4) y se intenta hacer una remoción de columna de agua. Estas últimas dos correcciones no se llevan a cabo en su totalidad ya que no tenemos todos los datos necesarios para poder aplicarle dichas correcciones. Se intentó utilizar unos parámetros ya establecidos encontrados en la red, pero no sabemos si en realidad los datos obtenidos eran totalmente confiables, se discutirá más adelante.

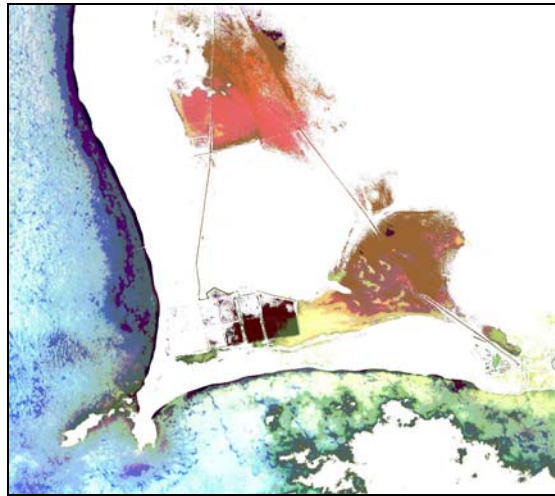


Figura 4. Corrección radiométrica, Ikonos.

Al no poder realizar las correcciones antes mencionadas no podemos obtener los valores de reflectancia para cada zona de interés.

Se generaron una serie de clasificaciones no supervisadas con el módulo Isodata encontrado en clasificaciones de ENVI, para cada una de las imágenes (Figura 5). Al igual que se generó solo una clasificación supervisada con el módulo distancias mínimas a la imagen de Ikonos (Figura 6). Se generó una imagen con el módulo de índice de vegetación (NDVI) a la imagen de Ikonos (Figura 7). El NDVI mayormente se utiliza para saber cuán saludable se encuentra la vegetación, pero el estimado lo obtiene tomando en cuenta la clorofila a que se encuentra en el mesófilo de la hoja. Es por esta razón que decidí hacer una

imagen con el NDVI para saber si en realidad había presencia de clorofila en el tapete microbiano utilizando la imagen de Ikonos.



Figura 5. Clasificación no supervisada con modulo “Isodata”, para ETM<sup>+</sup> e Ikonos.

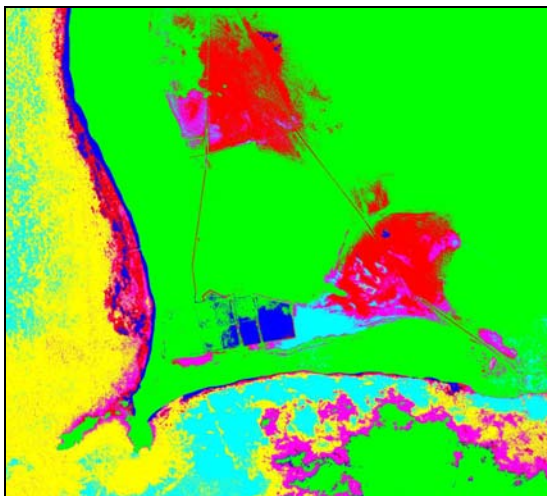


Figura 6. Clasificación supervisada “Minimum Distance” imagen Ikonos.

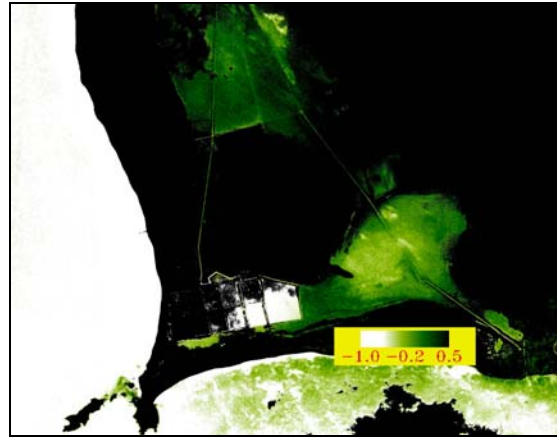


Figura 7. NDVI imagen Ikonos.

## RESULTADOS

Los resultados obtenidos en este proyecto no son necesariamente los esperados. Como mencione anteriormente encontré una serie de dificultades al momento de procesar las imágenes. Como por ejemplo para poder procesar las correcciones radiométricas hacia falta información sobre la imagen de Ikonos, faltaba la hora exacta, fecha en el cual la imagen fue tomada. No obstante tuve resultados en cuanto a los datos de campo (Figura 8). Con estos datos pude comparar las reflectancias obtenidas asociadas a cada tapete microbiano con los encontrados en la literatura (Figura 9 y 10).

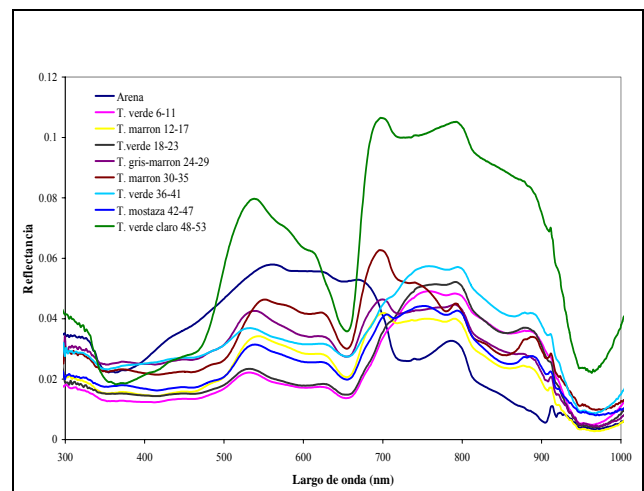


Figura 8. Espectro de reflectancia para los diferentes tapetes microbianos (calculados).

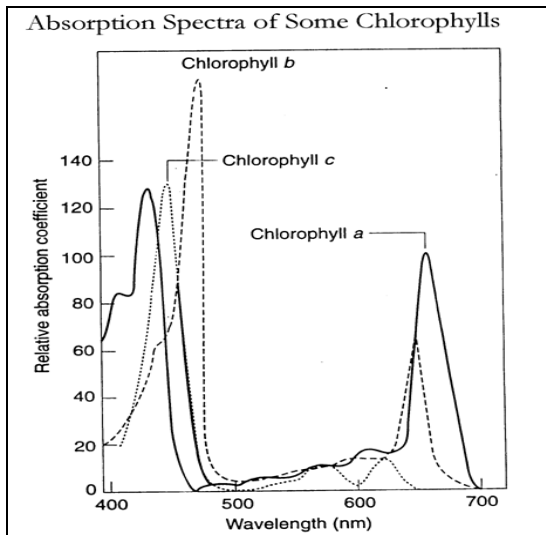


Figura 9. Espectro de absorbancia para las clorofilas a, b y c, (Kirk, 1994).

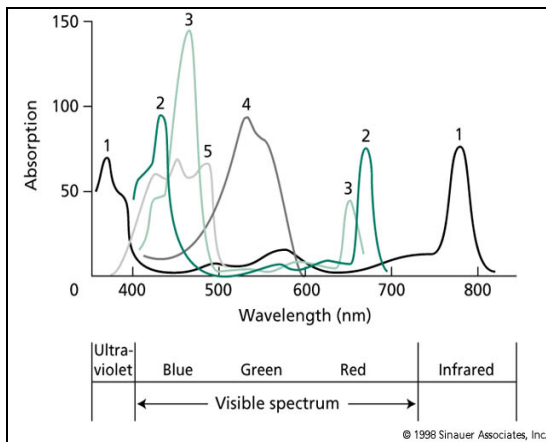


Figura 10. Espectro de absorbancia para diferentes tipos de pigmentos asociados, 1. Bacterioclorigila; 2. Chl a; 3. Chl b; 4. Ficoeritobilina; 5. B-caroteno, (Sinauer, 1998).

## DISCUSIÓN

De los resultados podemos observar que no podemos obtener mucha información espectral con respecto a los pigmentos asociados a las cianobacterias encontrados en los tapetes microbianos. Esto se debe a muchos factores en el procesamiento de las imágenes. Si observamos la figura 5, notamos que en la clasificación no supervisada para la imagen de ETM<sup>+</sup> clasifica todo lo que es agua como una sola clase, esto se debe a la resolución espacial de la imagen, aunque la resolución radiométrica es muy buena (7 bandas), crea mucha

contaminación por el ancho de las bandas, esto parece ser que la resolución espacial en ETM<sup>+</sup> juega un papel decisivo para poder obtener información de la imagen. De otro lado en la imagen de Ikonos la resolución espacial es de 4 metros, pero la resolución radiométrica no es muy buena, creando también contaminación por el ancho de las bandas. En la figura 5 la imagen de Ikonos puede separar más o menos las clases de aguas oceánicas y lo que son las clases de las salinas, nuestro lugar de interés. Es por esta razón que se decide obtener una clasificación supervisada de distancias mínimas figura 6. Las regiones de interés se obtienen directamente de los puntos de muestreo y como se puede observar que hay una alta separabilidad de las clases que son aguas oceánicas a lo que son las clases de las salinas. El color rojo en esta imagen representa las áreas de las salinas, color verde representa la mascara que se le aplico para no confundir las áreas de vegetación y tierra con las áreas de interés. Al hacerle la corrección atmosférica a la imagen de Ikonos notamos que también hay una alta separabilidad en las clases, pero no se puede tener una alta confiabilidad a los datos obtenidos de la imagen ya que no tenemos todos los datos necesarios para poder hacerle las correcciones pertinentes. No se intento remover la columna de agua ya que no tenemos valores digitales para aguas profundas. A pesar que el NDVI figura 7, solo nos muestra cuan saludable se encuentra la vegetación, en esta imagen observamos que hay una relación con el índice de vegetación y los tapetes microbianos. Sabemos que el agua absorbe la mayor parte del espectro en el infrarrojo, podemos ver que las zonas que son aguas oceánicas las vemos totalmente de color blanco y dentro de las salinas podemos observar un área del mismo color lo que nos indica que esa zona posiblemente es mucho mas profunda que el resto del área. Lo que observamos de color negro es la mascara aplicada. El NDVI nos demuestra que existe clorofila

en la zona de muestreo a partir de la imagen de Ikonos y que el agua en la zona no esta afectando del todo la señal. Otro de los factores que afectaron a la obtención de información es el no saber la fecha en la cual fue tomada la imagen. Al no tener esta información no podemos normalizar los datos por la irradianza descendente para poder obtener datos de reflectancia.

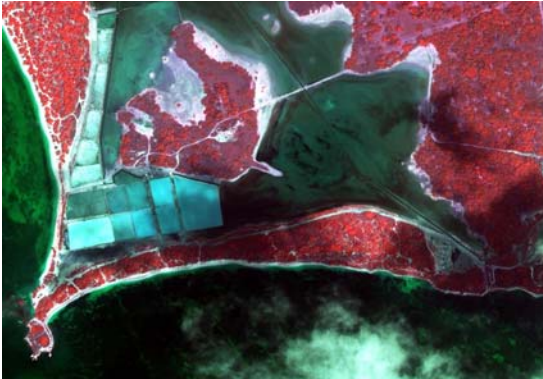


Figura 11. Imagen falso color, Ikonos.

La figura 11 nos muestra que si se puede obtener alguna información de estas imágenes. Los colores en esta imagen varían de acuerdo a las condiciones físicas de lugar. Observamos que colores oscuros representan aguas claras, charcas y aguas de borde (costa) que reflejan sombras de luz azul contienen altos niveles de sedimentos como lo son las charcas donde se obtiene la sal. Color rojo intenso representa la vegetación saludable que contiene altos niveles de clorofila y se resaltan con la banda infrarroja del sensor. Lugares con concentraciones altas de salinidad aparecen color verde (Palmer, 2002), sabemos que el área de las salinas son lugares extremos tanto en las concentraciones de sal como en temperaturas. Lo mas que me llamo la atención es que existe una relación con el NDVI y la imagen falso color. La zona de borde donde el índice de vegetación es muy bajo en la imagen falso color representa que si se puede observar que existen concentraciones de clorofilas y que se pueden medir con imágenes de satélite en este caso con Ikonos si

llegáramos a realizar las correcciones correspondientes a la imagen.

De los datos de campo observamos que los tapetes microbianos tienen un parecido en reflectancia, lo único que cambia es la amplitud, aunque la mayor diferencia se puede observar a partir de los 700nm a los 900nm aproximadamente (figura 8). El tapete con mayor diferencia en casi todo el espectro los es el color verde claro con unos picos de reflectancia característicos en 539nm y 701nm, absorbiendo más en 366nm y 654nm. Esto se debe a que este tapete contiene mayor concentración de clorofila a y menos concentración de ficobiliproteínas. Si lo comparamos con la figura 9 y 10, el espectro de absorbancia, notamos que chl a absorbe mucho en el azul 400nm y refleja en el verde alrededor de los 550nm y absorbe en el rojo a los 670nm aproximadamente. El otro tapete con un espectro de reflectancia característico lo es el tapete color marrón con unos picos de reflectancia en 552nm y 701, absorbiendo en 659nm. Este tapete marrón sobresale las fucoxantinas pigmento característico de diatomeas o dinoflagelados. En el tapete verde oscuro tenemos unos picos de reflectancia en 533nm y 757nm, absorbiendo en 354nm y 659, esto característico de presencia de clorofila a, ficocianina y aloficocianina.

En conclusión la herramienta de percepción remota tiene aún muchas limitaciones. Podemos realizar muchos estudios con esta herramienta pero hay que saber bien que a donde uno quiere llegar y que resultados uno debe esperar. Los factores que afectaron en este proyecto son los siguientes: 1. resolución espacial para imagen de ETM<sup>+</sup>; 2. resolución radiométrica para imagen de Ikonos; 3. falta de información para imagen de Ikonos; 4. ancho de banda de ambas imágenes, creando contaminación en la señal; 5. imágenes de fechas diferentes, esto es un factor muy importante al momento de realizar un tipo de trabajo como este; y 6. no sabemos que otro tipo de factores pueden estar afectando al momento de obtener la

imágenes, como por ejemplo, no sabemos las condiciones en la que se encontraban las salinas al momento de tomar las imágenes, no se sabe si había oleaje en la zona lo cual dispersa la señal, si sabemos las condiciones en el momento en el que se tomaron los datos de campo pero no necesariamente las condiciones son las mismas. Recomendaciones para trabajos futuros, se puede trabajar con sensores hiperspectrales ya que el ancho de las bandas es mucho menor, si sabemos que la clorofila tiene un pico de reflectancia en 701nm podemos obtener de un sensor hiperspectral mucha mas información solo de ese largo de onda. También podemos trabajar con las proporciones de bandas, eliminando de esta manera las unidades de reflectancia en caso de que no tengamos la información necesaria de las imágenes.

#### AGRADECIMIENTOS

Agradezco a todas las persona que de una forma u otra me ayudaron a realizar este proyecto. En especial al Dr. Gilbes por acompañarme a las Salinas a tomar datos de campo, a Lourdes Colón por la caracterización del tapete microbiano, a Iván en SIL por brindarme la imagen de Landsat ETM+, a Marcos Rosado por sus conocimientos en el area de percepción remota, a David Hernández y Maria Fernanda por su compañía y ayuda incondicional.

#### LITERATURA CITADA

Andréfouet, S., C. Payri, E. J. Hochberg, L. Mao Che and M. Atkinson. 2003. Airbone hyperspectral detection of microbial mat pigmentation in Rangiora atoll (Fench Polynesia). *Limnol. Oceanogr.* 48(1, part 2):426-430.

Kirk, T. O. 1994. Light and photosynthesis in aquatic ecosystems. Second edition.

Palmer, J. L. 2002. Remote Sensing and Ecosystem Restoration of South San Francisco Bay. <http://geo.arc.nasa.gov>

Urmeneta, J., A. Navarrete, J. Huete and R. Guerrero. 2002. Isolation and Characterization of Cyanobacteria from Microbial Mats of the Ebro Delta, Spain. *Current Microb.* 46:199-204.