

6. DISCUSION DE RESULTADOS

A partir del procesamiento de imágenes satelitales se obtuvieron resultados sobre:

- Identificación de materiales que controlan la respuesta espectral del Lago de Chapala
 - Pigmentos de clorofila
 - Sedimentos suspendidos
 - Agua con baja turbidez
- Delimitación del cuerpo de agua
- Estudio de cambio de los materiales identificados de mayo a noviembre del año analizado
- Mapas temáticos de los materiales que forman parte del ecosistema del lago de Chapala
- Áreas que ocupa cada material identificado sobre la superficie del lago de Chapala en cada fecha de estudio.
- Inferencia de los resultados obtenidos de la aplicación de técnicas de percepción remota con la información in situ proporcionada por la RNM (CONAGUA, 2002).

El éxito de los resultados del procesamiento de imágenes satelitales se basa en una buena corrección atmosférica, también llamada preprocesamiento. Si la corrección atmosférica no es aplicada correctamente se tiene el riesgo de que se enmascaren o se pierdan las respuestas espectrales de los materiales que desean identificarse.

Por lo cual un análisis estadístico y visual permitió aplicar el método de corrección atmosférica que considerara una selección de áreas relativamente limpias que indicaron áreas de agua espectralmente limpia. Al aplicarse el método descrito para extracción de píxel negro se encontraron valores anómalos que enmascararon el valor real del efecto atmosférico. La solución al problema se encontró en un análisis a detalle de dichos valores anómalos que fueron excluidos por ser mínimos y máximos.

El preprocesamiento es inherente a la evaluación de áreas del agua espectralmente más limpia, y se obtuvo que: en mayo, las áreas con este material fueron menores que en noviembre, en cuya fecha se localizaron grandes áreas con una respuesta espectral semejante al agua limpia. La aplicación de este método implica la consideración de una atmósfera homogénea.

El análisis estadístico indica que para los datos de mayo de 2002 se tiene que la banda espectral ETM5 presenta la mayor varianza, lo que indica que en dicha banda espectral se encuentra una gran cantidad de información. Una varianza grande se debe a las diferencias espectrales de los

distintos materiales que conforman la escena. En el caso de la correlación, las bandas espectrales que abarcan el IRC y IRM presentan una alta correlación lo que indica que la información contenida en ETM5 y ETM7 es redundante. Lo mismo sucede con ETM4 y ETM5. Para el caso de la región del espectro EM visible las bandas ETM1 y ETM2, así como ETM2 y ETM3 presentan alta correlación. Ver Tabla 4.6

Respecto al mes de noviembre la banda ETM5 es donde se encuentra una gran cantidad de información debido a que en ella es donde la varianza de los datos tiene el mayor valor de todas las bandas analizadas. Las bandas ETM5 y ETM7 y las bandas de la región del visible están fuertemente correlacionadas.

Una correlación alta indica que se tiene una gran cantidad de datos redundantes, mientras que una baja correlación sugiere que cada banda proporciona información que no se encuentra en la otra banda.

Realizado el preprocesamiento se tiene información en BV (0-255) que permite, durante el procesamiento de las imágenes, visualizar en tonos brillantes u oscuros la presencia o ausencia de materiales de interés. En el lago de Chapala uno de los principales problemas es el crecimiento incontrolable de lirio acuático y vegetación de raíz acuática, así como alta turbidez debida a materiales acarreados por el principal afluente del lago; el río Lerma. El río Lerma atraviesa toda la cuenca, lo que implica el acarreo de fuertes cantidades de material de tamaño limo y arena fina así como de materia orgánica que es vertida de manera natural o por actividades humanas. Con ello el primer problema con el que este estudio se enfrentó fue la presencia de materia orgánica que absorbe la energía electromagnética proveniente del sol en la región del visible, por lo que en algunos casos se prescindió de la banda ETM1 por ser la región donde se encuentra la mayor ventana de absorción y por ser la más influenciada en el efecto atmosférico. El propio cuerpo de agua presentó el mismo problema en la región del infrarrojo medio donde se presenta una fuerte absorbancia y transmitancia, con lo cual se reduce la región del espectro EM que presenta altas reflectancias para los materiales de interés. Se sugirió la suma de los cocientes propuestos para sedimentos en suspensión ($ETM3/ETM1$, $ETM3/ETM7$), ya que en un cuerpo de agua donde las características físicas del lugar promueven una constante resuspensión y acumulación de material suspendido transportado promueven también la mezcla de materiales en el cuerpo de agua.

Se requirió del análisis de todos los cocientes propuestos para la identificación de los materiales de interés (basados en la Tabla 4.9), la sustracción entre bandas donde los cocientes no

proporcionaron información y se apoyó el presente estudio en la obtención de componentes principales a través de la aplicación de la técnica de Crosta para confirmar la identificación de materiales.

Las composiciones a color permitieron una buena identificación de los materiales buscados, estas composiciones en falso color otorgaron una confirmación de la distribución espacial de los materiales estudiados. Este método proporcionó información adicional en el mes de noviembre sobre el cuerpo de agua debido a que con la composición en falso color se visualiza la dinámica eólica que predomina en el lago de Chapala y que promueve la resuspensión de sedimentos. Además explica la concentración de pigmentos de clorofila en las orillas y extremos del lago de Chapala

Respecto al índice de vegetación de diferencia normalizado (NDVI) resultó ser el método que mejor permitiera un análisis detallado del comportamiento de pigmentos de clorofila en superficie, ya que el rango de valores del índice es de -1 a 1 donde -1 indica que no hay presencia de pigmentos de clorofila mientras que 1 indica la presencia de pigmentos de clorofila asociada a vegetación vigorosa. Los valores entre 0 y 1 indican la presencia de clorofila debido a que la diferencia $ETM4-ETM3$ proporciona valores positivos, lo que corresponde a que el contraste entre la meseta del IRC y la región del rojo coinciden con la respuesta de pigmentos de clorofila. Para el caso de valores negativos del NDVI, se tiene que se ha perdido la alta reflectancia de la meseta del infrarrojo y que la absorbancia de la región del visible disminuye por lo que para los valores cercanos a cero, con base en la respuesta espectral de la vegetación, se tiene que la estructura del material que contiene pigmentos de clorofila se ha modificado, pero que todavía existe presencia de clorofila. Sin embargo para valores cercanos a -1 la presencia de pigmentos de clorofila es insignificante.

En este punto del estudio se han identificado, con base en la respuesta espectral teórica de los materiales, las áreas donde se encuentran las más fuertes concentraciones de los materiales analizados: agua limpia, clorofila y sedimentos. Un análisis visual de las composiciones en falso color, el algebra de bandas espectrales y el cálculo del NDVI indican que el área que INEGI determina como cuerpo perenne muestra zonas desecadas que son utilizadas como campos de cultivo. El razonamiento que lleva a la anterior aseveración se basa en el estudio de los bordes presentes en el área del lago de Chapala, para lo cual se aplicaron técnicas de realce espacial que proporcionaron una visualización que si bien no permitió una exactitud en la delimitación del

cuerpo, si definió a groso modo los límites del cuerpo de agua y las formas geométricas características de zonas de cultivo.

Debido a la variedad de materiales suspendidos en el lago de Chapala no fue posible, a través de reclasificación, delimitar el área que ocupa el cuerpo de agua. La delimitación se realizó digitalizando manualmente los bordes obtenidos del realce espacial y aplicando los criterios de formas y la técnica para delimitar cuerpos de agua con zonas inundadas y no inundadas en diferentes fechas.

El proceso de clasificación, basado en los polígonos de entrenamiento, generó mapas con información sobre la distribución de los materiales identificados, lo que llevo a la obtención de las áreas en las que estaban distribuidos dentro del cuerpo de agua. Es aquí donde un error de más de 2 km² indica la falta de exactitud al digitalizar manualmente.

Finalmente con dos fechas analizadas para un mismo lugar, se propuso el análisis de cambio en el cuerpo de agua para los 3 materiales identificados, obteniéndose en general que para el agua espectralmente más limpia del mes de noviembre este material es el que domina la respuesta espectral del cuerpo de agua mientras que en mayo las zonas de agua con baja turbidez fueron mínimas. Este comportamiento está relacionado con la temporada de lluvias. Las respuestas espectrales para ambas fechas indicaron que respecto a los pigmentos de clorofila (biomasa), el lago de Chapala presento algún contenido de clorofila. Cabe recordar que el análisis de cambio tomó criterios de ausencia, presencia y permanencia del material, es decir es un análisis cualitativo.

La verificación del trabajo de procesamiento de imágenes se realizó con el análisis cualitativo de los pigmentos de clorofila que están contenidos en algas acuáticas, vegetación de raíz acuática y fitoplancton, que aún cuando es de tamaño microscópico se ha probado que son detectables en imágenes Landsat (Allee & Johnson 1999; Giardino et al. 2001; Hunter et al. 2010; Tyler et al. 2006). Los pigmentos de clorofila que se traducen en presencia de biomasa, presentan una relación estrecha con los nutrientes disponibles en el cuerpo de agua.

Para el caso de mayo, el NDVI muestra fuertes concentraciones de biomasa, representadas por contenidos de clorofila, que son fácilmente visualizados en el mapa temático de NDVI. La información vertida de este mapa indica que donde las concentraciones de biomasa son mayores existe disponibilidad del nutriente limitante en el lago de Chapala: fósforo total. En el caso del punto de muestreo L_20 la fuerte concentración de fósforo total puede atribuirse a descargas de agua producto de actividades humanas por la ubicación del punto de muestreo. Con respecto al

mes de noviembre las concentraciones de biomasa (clorofila) se localizan en los bordes del cuerpo de agua y las concentraciones de fósforo total son bajas, lo que coincide en el análisis de disponibilidad nutrientes para el crecimiento de biomasa, es decir que para el mes de noviembre al ser menores las concentraciones de fósforo el crecimiento de biomasa es menor de acuerdo a la información vertida del mapa temático.

Analizando la información que proporcionan ambas fechas en los mapas desplegados se observa que hay un florecimiento de biomasa en el mes de mayo y una decadencia en el mes de noviembre, que coincide con la disponibilidad del nutriente limitante. Adicionalmente este mapa proporciona información sobre la distribución de las áreas con biomasa y que por los patrones claramente visibles que se forman en dicha distribución debido a la dinámica de los vientos, se puede inferir que esta dinámica juega un papel importante en la distribución de concentraciones de biomasa en el lago de Chapala.

Es posible observar que los mapas temáticos y el resultado obtenido a través de la aplicación del NDVI muestran diferentes resultados sobre la distribución espacial de pigmentos de clorofila, esto se debe a la metodología aplicada, ya que el NDVI considera el comportamiento de los principales rasgos de absorción y reflectancia de los pigmentos de clorofila (ETM3 y ETM4 respectivamente) en tanto que la obtención de mapas temáticos considera todas las bandas espectrales, no térmicas, del sensor ETM+, lo que hace difícil la separación de firmas espectrales entre sedimentos suspendidos y pigmentos de clorofila. Sváb *et al.*, (2005) reporta que en estudios de identificación espectral de pigmentos de clorofila en lagos donde hay altas concentraciones de sedimentos suspendidos el principal problema que se enfrenta en la percepción remota es que las características espectrales de los pigmentos de clorofila cuando las cargas son bajas, se esconden en la respuesta espectral de los sedimentos suspendidos. Por esta razón en mayo cuando la principal respuesta espectral es la de sedimentos suspendidos, la firma espectral de pigmentos de clorofila es superada por la del material suspendido y se logran detectar los pigmentos de clorofila al realizar el análisis en todo el rango espectral disponible.