



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA**  
**INGENIERIA AMBIENTAL – AGUA**

**APLICACIÓN DE PERCEPCIÓN REMOTA PARA LA DETECCIÓN DE  
FLORECIMIENTOS DE ALGAS EN VALLE DE BRAVO**

**TESIS**  
**QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:**  
**MAESTRO EN INGENIERÍA**

**PRESENTA:**  
**ING. OLIVEROS OLIVER JUDITH**

**TUTORES PRINCIPALES**  
**DR. ENRIQUE CÉSAR VÁLDEZ, FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**DR. JORGE LUIS DE VICTORICA ALMEIDA, INSTITUTO DE INGENIERIA**  
**DRA. GABRIELA MANTILLA MORALES, FACULTAD INGENIERIA, CAMPUS**  
**MORELOS**

**MÉXICO, D. F. AGOSTO 2014**

## **JURADO ASIGNADO**

Presidente: DRA. GABRIELA MANTILLA MORALES

Secretario: DR. JORGE L. DE VICTORICA ALMEIDA

Vocal: DRA. ANNE M.HANSEN HANSEN

1er suplente: DR. ENRIQUE CÉSAR VÁLDEZ

2do suplente: M.I. RODRIGO T. SEPULVEDA HIROSE

Lugar donde se realizó la tesis:

Facultad de Ingeniería UNAM

TUTOR DE TESIS:

DR. ENRIQUE CÉSAR VÁLDEZ

---

FIRMA

## **AGRADECIMIENTOS**

A mis padres, que con su ejemplo me ayudan a seguir adelante y a mis hermanas que son mis amores y mi todo.

A la Universidad Nacional Autónoma de México, por brindarme la oportunidad de formar parte de su grandiosa comunidad, ahora en la Facultad de Ingeniería.

Al Dr. Enrique César Valdez, por dirigir esta tesis junto con mis sinodales, Dra. Gabriela Mantilla Morales y Dr. Jorge Luis De Victorica Almeida, por su apoyo, dedicación y paciencia con este trabajo y especialmente por brindarme su amistad y conocimiento.

A la Dra. Anne M. Hansen Hansen y M.I. Henri Márquez-Pacheco por todas las aportaciones hechas que enriquecieron mi trabajo.

Al M.I. Rodrigo Takashi Sepulveda Hirose, por todas sus enseñanzas y amistad.

Y a todos los que directa o indirectamente contribuyeron a la realización de este logro, muchas gracias.

## CONTENIDO

<b>ÍNDICE DE TABLAS</b>	<b>7</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b>	<b>7</b>
<b>RESUMEN</b>	<b>9</b>
<b>Capítulo 1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>11</b>
<b>1.1 Justificación</b>	<b>12</b>
<b>1.2 Hipótesis</b>	<b>13</b>
<b>1.3 Objetivo General</b>	<b>13</b>
<b>1.4 Objetivos particulares</b>	<b>13</b>
<b>1.5 Alcances</b>	<b>13</b>
<b>Capítulo 2. ANTECEDENTES</b>	<b>14</b>
<b>Capítulo 3. MARCO TEÓRICO</b>	<b>17</b>
<b>3.1 Fitoplancton</b>	<b>18</b>
3.1.1 Algas	18
Clorofila	19
3.1.2 Importancia ecológica del fitoplancton	20

<b>3.2 Eutrofización</b>	<b>20</b>
3.2.1 Nivel trófico	23
3.2.2 Estado trófico según Carlson TSI	23
<b>3.3 Percepción Remota</b>	<b>26</b>
3.3.1 Fundamentos de la percepción remota	26
3.3.2 El espectro electromagnético	27
3.3.3 Firma espectral	29
3.3.4 Características del agua en el espectro óptico	29
<b>3.4 Zona de estudio</b>	<b>31</b>
3.4.1 Descripción de la cuenca	31
3.4.2 Dimensiones y capacidad de almacenamiento	32
3.4.3 Servicios de Ingeniería Sanitaria	33
a) Cobertura de agua potable	33
b) Cobertura de drenaje	34
<b>Capítulo 4. METODOLOGÍA</b>	<b>35</b>
<b>4.1 Análisis digital</b>	<b>36</b>
4.1.1 Plataforma satelital	36
4.1.2 Procesamiento y análisis de imágenes	37
4.1.3 Determinación de puntos de muestreo	41

<b>4.2 Muestreo</b>	<b>43</b>
4.2.1 Toma de muestras	43
4.2.2 Medición de parámetros en sitio	44
4.2.3 Determinación de Fósforo total	44
4.2.4 Determinación de Clorofila A	45
<b>Capítulo 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>	<b>48</b>
<b>5.1 Ubicación de los puntos del muestreo</b>	<b>49</b>
5.1.1 Parámetros medidos en sitio	50
<b>5.2 Fósforo total</b>	<b>52</b>
<b>5.3 Clorofila A</b>	<b>52</b>
<b>5.4 Aplicación del criterio de eutrofización</b>	<b>54</b>
<b>5.5 Comparación de resultados</b>	<b>55</b>
<b>Capítulo 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	<b>57</b>
<b>REFERENCIAS</b>	<b>58</b>
ANEXO I. Análisis multitemporal	65
ANEXO II. Resultados de laboratorio	77

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación de algas	19
Tabla 2. Índice del estado trófico de Carlson	24
Tabla 3. Servicios de Ingeniería Sanitaria de la Cuenca	34
Tabla 4. Características principales Landsat7	37
Tabla 5. Coordenadas puntos de muestreo	49
Tabla 6. Aplicación del TSI	54
Tabla 7. Punto de muestreo-Cluster-Clorofila A	55

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Elementos de un sistema de Percepción Remota	26
Figura 2. Formas de percepción	27
Figura 3. Espectro electromagnético	28
Figura 4. Curva espectral del agua y vegetación	29
Figura 5. Comportamiento espectral del agua	30
Figura 6. Afluentes de la presa Valle de Bravo	31

Figura7. Recorte de imagen	38
Figura 8. Composición de imagen	39
Figura 9. Imagen vectorial y raster	40
Figura 10. Enmascaramiento de imagen	40
Figura 11. Cluster de imagen	41
Figura 12. Análisis digital multitemporal año 2012	42
Figura 13. Análisis digital multitemporal año 2013	41
Figura 14. Toma de muestras	42
Figura 15. Medición de parámetros en sitio	42
Figura 16. Medición espectrofotométrica de Fósforo	43
Figura 17. Filtración de muestras	44
Figura 18. Muestras después de 48 horas	44
Figura 19. Muestras antes de centrifugar	45
Figura 20. Determinación de absorbancias	45
Figura 21. Puntos de muestreo	47
Figura 22. Parámetros en sitio	47
Figura 23. Concentraciones de fósforo total	50
Figura 24. Concentraciones de clorofila A	50
Figura 25. Puntos del muestreo Septiembre 2013	53



## RESUMEN

La adecuada gestión de los recursos hídricos, es un factor primordial para el uso eficiente del agua y por tanto para alcanzar un desarrollo sostenible que proporcione un equilibrio entre el hombre y el ambiente. La calidad del agua depende de diversos factores siendo uno de los más importantes, la actividad humana. El objetivo de este trabajo es aplicar en la Presa de Valle de Bravo, una metodología de Percepción Remota en conjunto con la determinación de biomasa algal, como sistema de monitoreo para la detección de proliferaciones algales.

A partir de los estudios realizados sobre la calidad del agua en la presa de Valle de Bravo y los efectuados sobre Percepción Remota en la calidad del agua en nuestro país y en el mundo, se propuso como parte de la metodología a seguir, iniciar con el procesamiento y análisis digital de imágenes del embalse, obtenidas del Satélite LandSat 7, manipuladas con el software IDRISI Selva para agrupar los diferentes datos de éstas, en clases espectrales y definir puntos de muestreo, apoyado del análisis digital multitemporal del embalse (análisis digital de cada mes, dos años antes al día a realizarse el muestreo) que indica como las agrupaciones de píxeles, no responde a determinada zona, sino que se localizan según la época del año en distinto lugar del embalse (comportamiento de temporalidad)

Con la información digital y considerando el paso del satélite por el embalse se llevó a cabo el muestreo. Se ubicaron los puntos a través de su coordenada geográfica y en campo con ayuda del GPS. En cada lugar se midieron parámetros como pH, oxígeno disuelto (OD), conductividad eléctrica y potencial de óxido reducción entre otros; se recolectaron muestras de 250 ml para determinar el Fósforo total por tratarse del nutriente limitante y del mismo volumen pero por duplicado para la cuantificación de la Clorofila A presente.

El análisis de los parámetros medidos en campo, presenta en el caso del pH valores entre 8.31 y 8.69, es decir, el pH es básico factor que propicia la proliferaciones de algas. El valor de OD máximo fue el correspondiente al medio día aproximadamente, 10.47 mg/L y el valor mínimo y máximo se tuvieron al inicio y termino de la toma de muestras, resultados esperados, tomando en cuenta la actividad fotosintética de las algas.

Del trabajo en laboratorio, se obtuvieron concentraciones de fósforo desde 370 mg/m<sup>3</sup> hasta 590 mg/m<sup>3</sup>, valores muy altos pero según lo establecido en los estudios realizados en el embalse, junto con el nitrógeno son estas concentraciones las causantes del deterioro del mismo. La clorofila A con valores desde 80 mg/m<sup>3</sup> hasta 172 mg/m<sup>3</sup> respaldan lo observado con respecto a la actividad fotosintética e indican alta actividad primaria.

Se realizó la clasificación del embalse, empleando el criterio de Eutrofización de Carlson. Este índice establece como base para clasificar a los sistemas acuáticos el contenido de biomasa algal por medio de las concentraciones de la clorofila A, fósforo total y profundidad del disco de Secchi. Considerando que para una profundidad del disco de Secchi igual a cero, la concentración de clorofila A es 0.75 mg/m<sup>3</sup> y el fósforo total en superficie es 0.04 mg/m<sup>3</sup>, los resultados obtenidos para Valle de Bravo indican estado de hipertrofia con respecto al fósforo presente y estado de Eutrofia con respecto a las concentraciones de Clorofila A.

Finalmente se correlaciono la información de los parámetros medidos en campo para cada punto con las concentraciones de Clorofila A obtenidas, que a su vez fueron confrontadas con la información del análisis digital, concluyéndose que la imagen obtenida aporta información de la superficie del embalse sólo para el día en que se realizó el muestreo, los clúster de la clasificación digital son agrupaciones de pixeles que se establecen según la frecuencia y de modo aleatorio, no obstante en combinación con el trabajo en campo, como se muestra en esta metodología de percepción remota puede considerarse como un sistema de monitoreo de floraciones de algas.

## Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

Muchos problemas de calidad del agua en ríos y embalses, incluida la sedimentación, la eutrofización y la contaminación por bacterias y sustancias tóxicas, han persistido durante décadas. Los productos residuales de las actividades humanas, aguas residuales, escorrentías, emisiones industriales urbanas y contaminación atmosférica afectan la calidad del agua. Las descargas de contaminantes de fuentes difusas como los escurrimientos agrícolas, agua de lluvia y la deposición atmosférica contribuyen relativamente en mayor medida al deterioro de la calidad del agua .

Los estudios realizados en el vaso de la presa Valle de Bravo (CNA, 1998, 1999 y 2000; CNA/Acuagranjas, 2002, 2003, 2004, 2005 y 2006; Conagua-IMTA, 2009 y 2010; IDECA, 1999; IMTA, 2005; Merino et al. 2008; Olvera, 1990 y 1993 y Olvera et al. 1998; Ramírez-Zierold et al. 2010), coinciden en el deterioro que ha sufrido el embalse, clasificándolo en estado eutrófico, debido principalmente a las concentraciones de nitrógeno y fósforo. Los sedimentos contienen un promedio importante de materia orgánica (Olvera, 1990). Distintos parámetros sobrepasan los criterios de calidad: color, turbiedad, nitritos, ortofosfatos y sulfatos entre otros. Enfatizando el incremento de la DQO superficial, atribuida a la presencia de microalgas (IMTA, 2005)

Además se sugiere el uso necesario de un monitoreo en forma detallada de la presa Valle de Bravo para identificar lo que se arroja en ella, ya que continua la eutrofización provocada por el enriquecimiento de nutrientes y materia orgánica. La eutrofización que presenta la presa Valle de Bravo se convierten en un riesgo para la gente que utiliza el lago, así como fuente de abastecimiento del sistema Cutzamala que proporciona agua de consumo a la Zona Metropolitana (Merino, 2008)

## 1.1 Justificación

En nuestro país, los estudios realizados de percepción remota no han establecido formalmente la relación con parámetros de calidad del agua, tienen que ver con la identificación y cuantificación de la vegetación y usos del suelo (Guerra-Martínez y Ochoa, 2005), caracterización óptica del agua de lagos o lagunas (Aguirre, 2001), clasificación de humedales (De la Fuente y Carrera, 2005; Salinas et al. 2002) y manejo de recursos y degradación de tierras (Mendoza et al. 2002)

En la búsqueda de métodos más económicos y rápidos para determinar parámetros de calidad del agua, el presente trabajo propone a través de la técnica de Percepción remota, obtener información sobre la superficie del agua, mediante el análisis e interpretación de imágenes satelitales y en combinación con el muestreo de la biomasa en la presa Valle de Bravo establecer el monitoreo de posibles floraciones algales en el embalse.

Lo anterior, con ayuda del satélite Landsat que ha probado ser adecuado para las evaluaciones de agua superficiales en otras investigaciones. Las imágenes que proporciona debido a una falla en el bandeo, se obtienen totalmente gratis y a pesar de perder aproximadamente el 23% de la información captada, no se afecta la investigación ya que los sitios de muestreo se ubican donde no hay bandeo.

En diferencia con la fotografía aérea que proporciona la exactitud geométrica de un mapa topográfico con el detalle de una fotografía solo puede mostrar las características que son verdaderamente visibles. La imagen satelital registra digitalmente en una imagen la radiación reflejada desde la superficie del agua cuya respuesta óptica depende de la concentración de sólidos suspendidos, fitoplancton y materia orgánica disuelta, parámetros altamente relacionados con la calidad del agua; además genera información del lugar a través del tiempo como se muestra en el análisis digital multitemporal realizado para este trabajo.

## 1.2 Hipótesis

- Mediante aplicación de imágenes de satélite se puede describir el comportamiento temporal del embalse
- Mediante la manipulación de información digital satelital y la determinación de Clorofila A como medida de la biomasa algal, es posible establecer un sistema de monitoreo para Valle de Bravo.

## 1.3 Objetivo General

Aplicar una metodología de Percepción Remota en conjunto con la determinación de biomasa algal, como un sistema de monitoreo de floraciones de algas definidas como el incremento significativamente mayor al promedio, de algún tipo de alga respecto al de la biomasa total de fitoplancton en ambientes lénticos.

## 1.4 Objetivos Particulares

- Describir las aplicaciones de la Percepción Remota en la evaluación de la calidad del agua
- Proponer la metodología para el empleo de la Percepción Remota en la detección de fitoplancton

## 1.5 Alcances

- Diseñar y realizar el muestreo en la presa Valle de Bravo.
- Determinar las concentraciones de clorofila A, como medida de la biomasa algal y Fósforo como nutriente limitante
- Confrontar los resultados del trabajo de campo con los resultados del análisis digital de imágenes de satélite.

## Capítulo 2. Antecedentes

La mayoría de los ecosistemas terrestres presentan cierto grado de degradación atribuible a las actividades humanas. Entre los ecosistemas más afectados se encuentran las aguas continentales superficiales, que a pesar de ser una fracción mínima del agua del planeta, constituyen las fuentes de agua más importante para los seres humanos. El ecosistema conformado por la presa Valle de Bravo, es la fuente de agua superficial más importante para el Valle de México que puede representar un problema para los habitantes que dependen de ellas. Se necesita un adecuado manejo del embalse para hacer de esta presa una fuente sustentable de agua.

En la década de los 80 la presa Valle de Bravo se consideraba un embalse oligotrófico, sin embargo al aumentar la actividad humana alrededor de la cuenca, principalmente en las zonas urbanas de Valle de Bravo y Amanalco ha generado incremento en las concentraciones de N, P y materia orgánica transportada por los afluentes y las aguas residuales (IDECA, 1999). Como resultado el embalse pasó a ser considerado eutrófico (Olvera, 1990)

Por la importancia de la presa de Valle Bravo para el Valle de México, se elaboró un estudio limnológico del embalse y su cuenca a cargo del Instituto Mexicano de la Tecnología del Agua (IMTA) (Olvera, 1993), concluyéndose que el embalse permanece estratificado de marzo a noviembre, presentando anoxia en el fondo y que la columna de agua se homogeniza en invierno. Además establece que el embalse cumplía con los límites permitidos para fuentes de abastecimiento de agua potable, excepto en el ámbito bacteriológico y se recomendó la gestión de un programa integral de manejo de sub cuencas para controlar el transporte de azolves, monitoreo de la calidad del agua y el estudio de la reducción del aporte de nutrientes.

El aumento en las concentraciones de Fósforo y Nitrógeno en el embalse ha provocado florecimientos masivos de fitoplancton de forma regular, disminuyendo la calidad del agua, produciendo olor y sabor desagradables (Olvera et al. 1998)

Estudios posteriores (Monroy et al. 2004) señalan que el embalse se comporta de modo monomítico (característica de los sistemas acuáticos que presenta un solo periodo de mezcla y otro de estratificación a lo largo del año) como otros cuerpos de agua del altiplano mexicano. El incremento progresivo de la temperatura hipolimnética durante la etapa de estratificación puede atribuirse a eventos de mezcla, debido a fuertes brisas con una velocidad media 7.4 m/s que soplan diariamente a través de los dos brazo principales del embalse (Merino, 2008)

La eutrofización de la presa responde a descargas directas de drenajes en la presa, y que el río Amanalco arrastra hasta ella los desechos de la agricultura y de las plantas de piscicultura de truchas de la cuenca, siendo este la mayor contribución de nutrientes al embalse (Ramírez-Zierold et al. 2010). Así mismo se propuso que manteniendo bajo el nivel del embalse durante el periodo de estratificación, principalmente de mayo a septiembre, se favorecerían condiciones para que el régimen diario de viento mezclara toda la columna de agua, introduciendo aire de forma natural y económica, lo que facilitaría el reciclado de los nutrientes acumulados en el embalse más eficientemente y al mismo tiempo se disminuirían las condiciones requeridas por especies potencialmente tóxicas de fitoplancton (Ramírez-Zierold et al. 2010)

Comparando el estudio hecho en 2002 a 2005 (Ramírez-Zierold et al. 2010) y el de 1992-1993 (Olvera et al. 1998) se observó un incremento de más del 200% de aporte de estos nutriente por los afluentes en una década. Los drenajes del pueblo de valle de Bravo incrementaron su aporte de fósforo en 250% desde 1987.

La presa Valle de Bravo, representa una fuente de agua superficial muy importante para el Valle de México y requiere un adecuado manejo, por ello se presenta la técnica de Percepción remota que en relación a la calidad del agua, puede aportar información que permita mayor eficiencia en el manejo de la presa.

Las investigaciones realizadas en el mundo sobre la relación entre las propiedades de agua, desde el punto de vista de su calidad analizan parámetros como profundidad de disco de Secchi, clorofila, temperatura, turbiedad, sólidos suspendidos totales y sólidos disueltos totales principalmente con datos obtenidos mediante percepción remota (Braga, 1993; Brivio, 2001; Giardino, 2001; Zeichen, 2004; Zhang, 2005; Wang y Han, 2006; Oyama, et al. 2007; Dogliotti, et al., 2008)

Se han desarrollado también programas dedicados a la evaluación de la calidad del agua (Avalos, 2012):

- Monitoreo de la Calidad del Agua del Lago de Garda en Italia. Las imágenes fueron adquiridas por el satélite ENVISAT Meris, procesadas y comparadas con los datos obtenidos en campo casi simultáneamente. Se optó por el uso de satélites para monitorear la calidad del agua
- Iniciativa TIGER para la gestión de recursos hídricos en África. Diseña, desarrolla e implementa el monitoreo de la calidad del agua por medio de técnicas de observación de la Tierra desde el espacio (EO-Earth Observation) La siguiente etapa de este programa, utiliza la tecnología espacial para la gestión de recursos hídricos en África y dar soluciones concretas a los problemas de abastecimiento del agua en el continente.
- Desarrollo de indicadores de Calidad del Agua por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA U.S). Desarrollar y probar modelos que ayuden a evaluar, supervisar y cuantificar la distribución espacial y temporal de los parámetros de calidad del agua utilizando datos obtenidos mediante percepción remota. Actualmente se verifica la utilidad de los algoritmos de medición
- Monitoreo de la Calidad del Agua en las grandes regiones de Lagos del Estado de Minnesota. Universidad de Minnesota U.S. Desarrollar un monitoreo constante a los lagos, a través de imágenes del satélite Landsat, buscando estimar la claridad del agua a nivel ciudad, regional y estatal. Se busca usar la percepción remota para la evaluación de ríos



### **Capítulo 3. MARCO TEÓRICO**

En este capítulo se describe al fitoplancton así como su importancia ecológica. El concepto de eutrofización y el criterio de Estado trófico de Carlson que clasifica a los sistemas acuáticos de acuerdo a los contenidos de biomasa algal por medio de las concentraciones de la clorofila A (Carlson, 1977)

Se mencionan además los fundamentos de la Percepción Remota así como una descripción de la Presa Valle de Bravo.

### 3.1 Fitoplancton

El fitoplancton es el conjunto de microorganismos fotosintéticos que están en todas las aguas del planeta y son el inicio de la cadena alimenticia. Es el conjunto de algas y cianobacterias que habitan los sistemas acuáticos, contribuye a la producción primaria de dichos sistemas a través de la fotosíntesis. Se dividen de acuerdo a su tamaño en (Arrigo, 2005):

- Picofitoplancton (0.2 – 2  $\mu\text{m}$ )
- Nanofitoplancton (2 – 20  $\mu\text{m}$ )
- Microfitoplancton (20 – 200  $\mu\text{m}$ )

#### 3.1.1 Algas

Constituyen un grupo diverso de organismos eucarióticos que llevan a cabo la fotosíntesis oxigénica. Contienen clorofila y por ello la mayoría son de color verde. Las algas muestran una considerable variación en cuanto a la estructura y química de sus paredes celulares (Brock et al. 2005)

Algunas especies sobreviven en medios secos así como en hábitat ácidos. Por debajo de pH 4-5. Las algas abundan en hábitats acuáticos tanto dulces como salados. También se encuentran en hábitats artificiales como peceras o piscinas. Su localización depende de la disponibilidad de nutrientes, de las longitudes de onda de la luz y de las superficies sobre las cuales crecen.

Las algas fotosintéticas se encuentran en toda la profundidad de la zona fótica (luminosa) de las grandes masas de agua, la clorofila A y los pigmentos accesorios que intervienen en la fotosíntesis son los que determinan los colores distintivos de las algas (Tabla 1). Para clasificarlas se utilizan criterios como la naturaleza de las clorofilas, los polímeros carbonado que utilizan como reserva, la estructura de la pared celular y el tipo de movilidad (Brock et al. 2005)

Algunas pueden presentar color marrón o rojo, debido a la presencia de xantofilas que enmascaran el color verde, por ejemplo las algas rojas que tienen en los cloroplastos ficobiliproteínas.

**Tabla 1. Clasificación de algas** (Modificada de Tortora, 2010)

<b>Grupo</b>	<b>Nombre</b>	<b>Morfología</b>	<b>Pigmento</b>	<b>Hábitat</b>
<b>Chlorophyta</b>	Alga verde	Unicelular con ramificación	Clorofila a y b	Agua dulce y suelo
<b>Chrysophyta</b>	Diatomea	Unicelular	Clorofila a y c	Agua dulce, marina y suelo
<b>Dinoflagellata</b>	Dinoflagelado	Unicelular con flagelado	Clorofila a y c	Marinas
<b>Phaeophyta</b>	Alga parda	Filamentosa con ramificación	Clorofila a y c, xantofilas	Marinas
<b>Rhodophyta</b>	Alga roja	Unicelular, filamentosa con ramificación	Clorofila a y d, ficocianina y ficoeritrina	Marinas

### **Clorofila**

Es el pigmento que da color verde a los vegetales y los organismos autótrofos la utilizan para absorber la energía luminosa, siendo la más común la clorofila A. La clorofila absorbe toda la luz roja, violeta y azul y refleja la verde. Debido a que los organismos fotótrofos poseen clorofila A, su concentración proporciona un indicador de la biomasa fitoplanctónica. Medir la concentración de clorofila A resulta mucho más sencillo que medir biomasa directamente, por lo que es un método muy utilizado para estimar la eutrofización de un sistema.

### **3.1.2 Importancia ecológica del fitoplancton**

Las cianobacterias y las algas del fitoplancton son organismos que se reproducen más en ciertas épocas del año y bajo determinadas condiciones ambientales aumentando su biomasa en valores significativos con respecto a la concentración original (Graham et al.2009). Este florecimiento o proliferación es conocido como el incremento, significativamente mayor al promedio, de algún tipo de alga respecto al de la biomasa total de fitoplancton.

Los factores que desencadenan las proliferaciones de algas son diversas y actúan en forma combinada. Cada proliferación está formada por una o pocas especies. Se puede presentar en periodos que van desde pocas horas a varios días y desaparecer en un plazo similar. Algunas floraciones pueden permanecer por períodos más largos como todo el verano, durante todo el año o incluso en forma permanente. Pueden ser evidentes a simple vista por la coloración generalmente verde y la turbidez que le confieren al agua.

El crecimiento de algas en los ambientes naturales, depende de los recursos necesarios para el crecimiento, que son la luz y los nutrientes, mientras que las pérdidas se deben a la depredación, sedimentación hacia zonas afóticas (oscuras) donde no es posible realizar la fotosíntesis y el arrastre de las corrientes de agua (Graham et al. 2009).

### **3.2 Eutrofización**

La OCDE (1982), Organización Internacional para la Cooperación y el Desarrollo Económico, definen la eutrofización como: “El enriquecimiento en nutrientes de las aguas que provoca la estimulación de una serie de cambios sintomáticos entre los que están; el incremento en la producción de algas y macrófitas, el deterioro de la calidad del agua y otros cambios sintomáticos que resultan indeseables e interfieren en la utilización del agua”. En la actualidad, se entiende que toda masa de agua continental presenta un proceso de eutrofización natural que viene

motivado por los aportes procedentes de diversas fuentes, como: materiales superficiales del terreno, materiales arrastrados por la lluvia y el hielo, materiales aportados por el viento y materiales aportados por el flujo subterráneo (Salas y Martino, 2001)

La eutrofización es un proceso natural que puede acelerarse evidentemente a partir del grado de incidencia de factores relacionados con el cuerpo del agua y la acción del hombre (Vadillo, 2010)

Factores relacionados con el cuerpo de agua:

- Se considera que los cuerpos de aguas poco profundas y/o de bajo caudal son proclives al desarrollo del proceso de eutrofización, debido al transporte de nutrientes por erosión del suelo
- Del clima se toma en cuenta los factores que afectan la temperatura del agua, como es la dirección y la velocidad del viento, la cantidad de precipitaciones y los factores que controlan la producción del fitoplancton
- Los sedimentos del fondo, ya que parte de los nutrientes importados son retenidos en los sedimentos que actúan de sumidero, si se enriquecen con fósforo a lo largo del tiempo, la liberación de este elemento en dichos sedimentos puede superar el flujo hacia los mismos, especialmente si el fondo se vuelve anóxico, provocando una proliferación masiva de algas, sin necesidad de un aporte externo de nutrientes.

Factores debido a la acción del hombre:

- Las descargas de origen urbano principalmente. Se caracterizan por el contenido de nitrógeno (nitratos, nitritos y amonio) y fosfatos (principalmente, procedentes de restos de detergentes)
- Las descargas de origen agrícola y ganadero. El uso de la tierra y de fertilizantes de una cuenca de drenaje puede ocasionar diferencias importantes en la composición química de las aguas de la escorrentía de cada área.

Dentro de la dinámica del cuerpo de agua, son importantes los flujos de entrada y salida, la carga de nutrientes que recibe, su capacidad de asimilación y la carga evacuada. Depende también de las características morfométricas de la cuenca.

Cuando avanza el proceso de eutrofización, en la capa de agua más superficial (donde aún puede penetrar la luz) la producción primaria aumenta extraordinariamente, lo que genera un excedente de materia orgánica y oxígeno producido de la fotosíntesis oxigénica. El aumento en el crecimiento de algas impide la llegada de luz al fondo del embalse, con esto, la degradación de la materia orgánica acumulada en el fondo, llevada a cabo por bacterias, agota rápidamente el oxígeno disuelto en el agua. Prácticamente todas las comunidades acuáticas se ven afectadas. Los cambios que ocurren debido al proceso de eutrofización pueden agruparse en tres tipos: Físico, biológico y químico (Rosas, 2004)

#### Cambio de tipo Físico:

Degradación organoléptica del agua (color, olor, transparencia y sabor), acumulación de los restos de plantas y animales muertos en el fondo, incremento de materiales en suspensión y disminución de la capacidad depuradora del embalse

#### Cambio de tipo Biológico:

Deterioro de las comunidades biológicas, mortandad masiva de peces por asfixia o envenenamiento, crecimiento de algas macrófitas en el mismo embalse y aumento de la actividad bacteriana

#### Cambio de tipo Químico:

Desplazamiento de equilibrios químicos, especialmente por la elevación del pH, como ocurre con la forma tóxica del amoníaco, en la zona fótica, disminución del oxígeno disuelto, por debajo de 4mg/L se afecta negativamente y de inmediato a los organismos y el incremento de compuestos nitrogenados, fosfatados.

### **3.2.1 Nivel trófico**

El nivel trófico se refiere a la posición de los organismos en la cadena alimenticia, estando los autótrofos en la base. Un organismo que se alimente de autótrofos es llamado herbívoro o consumidor primario; uno que coma herbívoros es un carnívoro o consumidor secundario. Un carnívoro que coma carnívoros, que se alimentan de herbívoros, es un consumidor terciario, y así sucesivamente. Entre los productores, conocidos como autótrofos, están las plantas; ya que a través de la fotosíntesis, utilizan la energía de la luz solar para convertir el dióxido de carbono en glucosa. Las algas y las cianobacterias también son productores fotosintetizadores, como las plantas (Sánchez, 2001)

Para evaluar el proceso de eutrofización se consideran distintas estrategias que van desde a inspección visual hasta el análisis de macrófitas y del fitoplancton, estimándose la cobertura relativa en superficie de cada área de muestreo, técnicas tales como el método con isotopos radioactivos y de información satelital.

### **3.2.2 Estado trófico según Carlson TSI (1977)**

El índice del estado trófico de Carlson (TSI) es adecuado en la medición del grado de eutrofia en aguas dulces lenticas, en función de la luz, la cantidad de fósforo y la presencia de clorofila en el agua. Propuesto por la EPA (1991) como un análisis de rutina para el monitoreo de la calidad del agua de los sistemas acuáticos.

El índice del estado trófico de Carlson TSI, puede variar entre: 0 (oligotrófico) y 100 (hipereutrófico), se obtiene a partir de una transformación de la transparencia del disco de Secchi (DS), tal que un valor de índice TSI= 0 corresponda a una profundidad del disco de DS= 64 m y de tal manera que un incremento de 10 en el valor de TSI represente una reducción de DS en un 50% (Tabla 2)

**Tabla 2. Índice del Estado Trófico de Carlson** (Tomada de Carlson, 1977)

<b>ESTADO TRÓFICO</b>	<b>TSI</b>	<b>DISCO DE SECCHI (m)</b>	<b>FÓSFORO SUPERFICIE (mg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>CLOROFILA SUPERFICIE (mg/m<sup>3</sup>)</b>
<b>OLIGOTRÓFICO (&lt;30)</b>	<b>0</b>	64	0.75	0.04
	<b>10</b>	32	1.5	0.12
	<b>20</b>	16	3	0.34
	<b>30</b>	8	6	0.94
<b>MESOTRÓFICO (30-70)</b>	<b>40</b>	4	12	2.6
	<b>50</b>	2	24	6.4
	<b>60</b>	1	48	20
<b>EUTRÓFICO (70-90)</b>	<b>70</b>	0.5	96	56
	<b>80</b>	0.25	192	154
	<b>90</b>	0.12	384	427
<b>HIPEREUTRÓFICO (&gt;90)</b>	<b>100</b>	0.062	768	1.183



Sirve para determinar la concentración de clorofila en el agua ya que está relacionado con el proceso de la productividad primaria:

$$TSI(Clorofila) = \frac{[10(2.46 + \ln(CLO))]}{\ln 2.5} \quad \dots 1)$$

*CLO: mg/m<sup>3</sup>*

Clasifica en una escala numérica y no de nomenclatura (oligotrófico, mesotrófico, eutrófico), permitiendo mayor sensibilidad en los cambios tróficos tanto para lagos y aguas superficiales como para ríos y arroyos, usando el índice de fósforo total, el cual predice la biomasa algal potencial (Carlson, 1977):

$$TSI(Fósforo total) = \frac{10[2.46 + 6.68 + 1.15 \ln(PT)]}{\ln 2.5} \quad \dots 2)$$

*PT: mg/L*

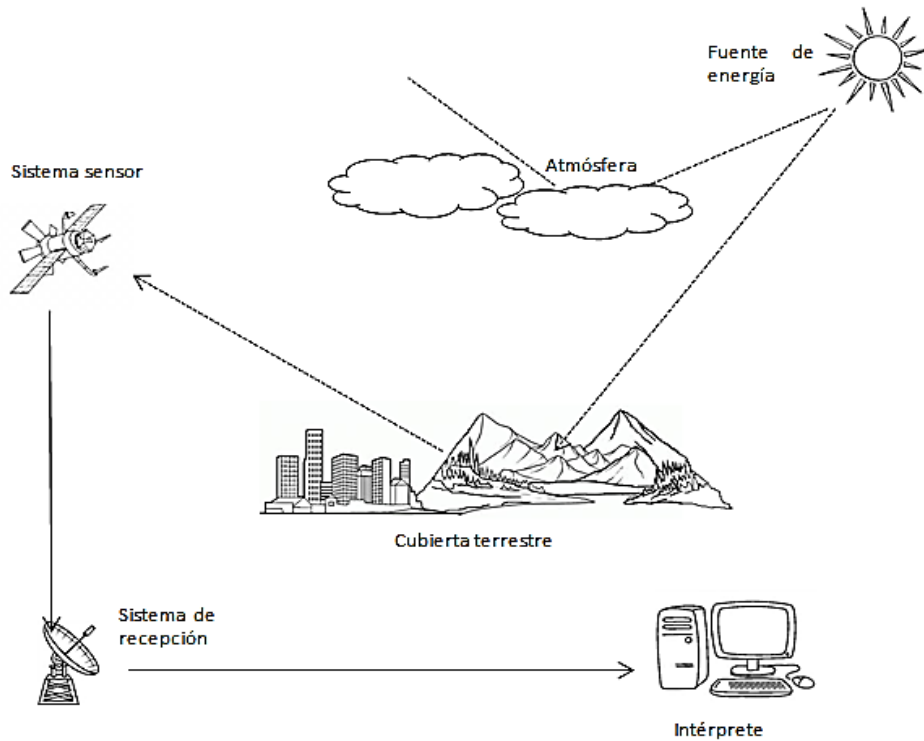
Carlson, utilizó los estados tróficos, basados en la masa algal de un lago. Dividió la biomasa sobre el valor obtenido con la doble profundidad del disco Secchi, esta variable es afectada por la densidad de las algas:

$$TSI(Disco Secchi) = \frac{10[2.46 + 3.76 - 1.57(DS)]}{\ln 2.5} \quad \dots 3)$$

*DS: m*

### 3.3 Percepción Remota

La Percepción remota es una técnica que permite adquirir imágenes de la superficie terrestre desde sensores instalados en plataformas espaciales, existiendo una interacción energética entre la Tierra y el sensor, en forma de reflexión de la energía solar o por emisión propia (Figura 1)



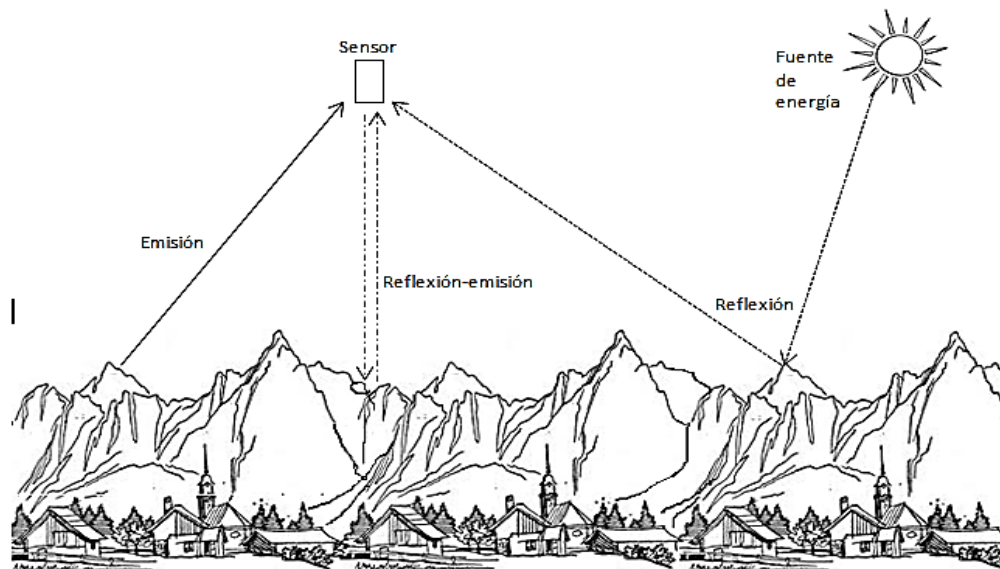
**Figura 1. Sistema de Percepción remota.**  
(Tomada de Chuvieco, 1990)

El haz energético recibido por el sensor se transmite a la superficie terrestre, donde la señal detectada pueda almacenarse y ser interpretada para una determinada aplicación.

#### 3.3.1 Fundamentos de la Percepción remota

Para que la observación remota se lleve a cabo es preciso que entre los objetos y el sensor exista algún tipo de interacción (Figura 2). La energía térmica se

transmite de un lugar a otro por: conducción, convección y radiación. La radiación establece la base de los sistemas de percepción ya que el flujo de energía entre el sensor y la cubierta terrestre es una forma de radiación electromagnética.



**Figura 2. Formas de Percepción** (Tomada de Chuvieco, 1990)

Las tres formas de adquirir información a partir de un sensor remoto son:

- I. Reflexión. El sol ilumina la superficie terrestre que refleja la energía en función del tipo de cubierta presente y esta es captada por el sensor
- II. Emisión. Referida a la energía emitida por la propia cubierta terrestre
- III. Emisión-reflexión. Energía enviada desde un sensor capaz de generar su propio flujo energético y captar su reflexión sobre la superficie terrestre.

### 3.3.2 El espectro electromagnético

Es posible describir cualquier tipo de energía radiante en función de su longitud de onda o frecuencia. Se establecen una serie de bandas en donde la radiación electro-magnética manifiesta un comportamiento similar (Figura 3).

En la Percepción remota las bandas espectrales que son más frecuentemente utilizadas son las siguientes (Lira, 1997):

- Espectro visible (0.4 a 0.7  $\mu\text{m}$ ). Es la única radiación electromagnética que puede percibir el ojo humano, dentro de esta se distinguen tres bandas, azul (0.4 a 0.5  $\mu\text{m}$ ); verde (0.5 a 0.6  $\mu\text{m}$ ) y rojo (0.6 a 0.7  $\mu\text{m}$ )
- Infrarrojo próximo (0.7 a 1.3  $\mu\text{m}$ ). Puede detectarse a partir de films dotados de emulsiones especiales. Resulta de específica importancia por su capacidad para discriminar masas vegetales y concentraciones de humedad
- Infrarrojo medio (1.3 a 8  $\mu\text{m}$ ). Se llevan a cabo los procesos de reflexión de la luz solar y emisión de la superficie terrestre
- Infrarrojo lejano o térmico (8 a 14  $\mu\text{m}$ ). Incluye la porción emisiva del espectro terrestre
- Micro-ondas (a partir de 1mm). Energía muy transparente a la cubierta nubosa.

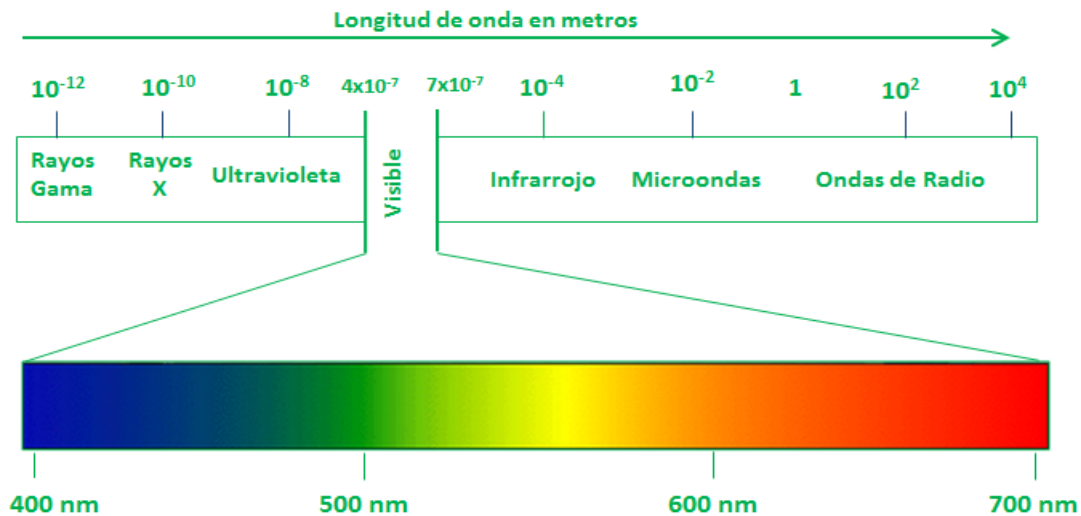


Figura 3. Espectro electromagnético (Elaboración propia)

### 3.3.3 Firma espectral

Es el modo particular con que un cuerpo refleja la energía a distintas longitudes de onda. Existen gráficas de reflectancia espectral contra longitud de onda, llamadas curvas de reflectancia o curvas espectrales (Figura 4)

De esta forma, al conocer la firma espectral de una superficie es posible identificarla, detectar alteraciones en ella o seleccionar las bandas más convenientes para estudiarla (Meliá, 1986)

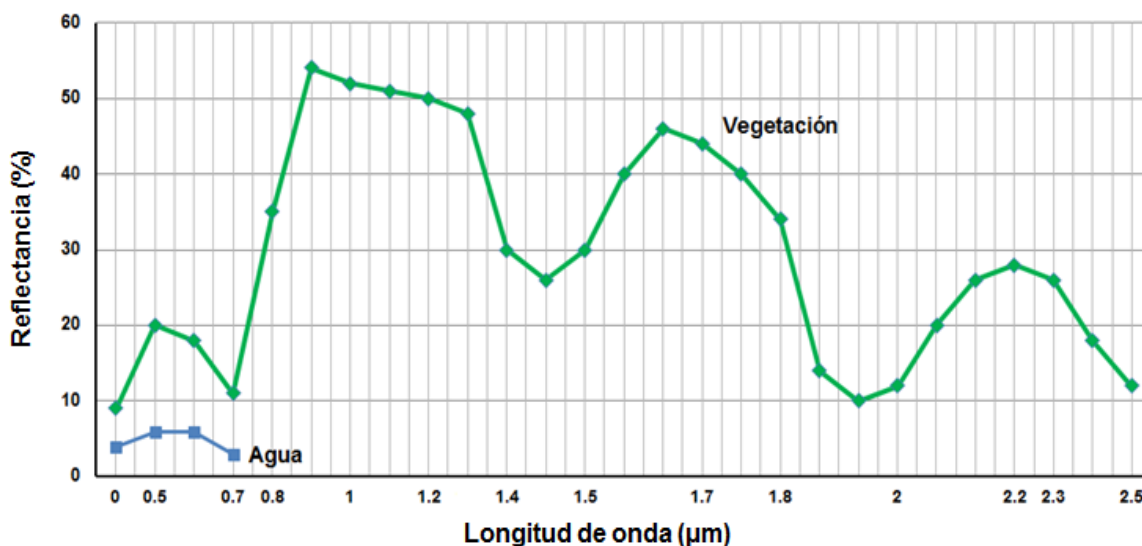
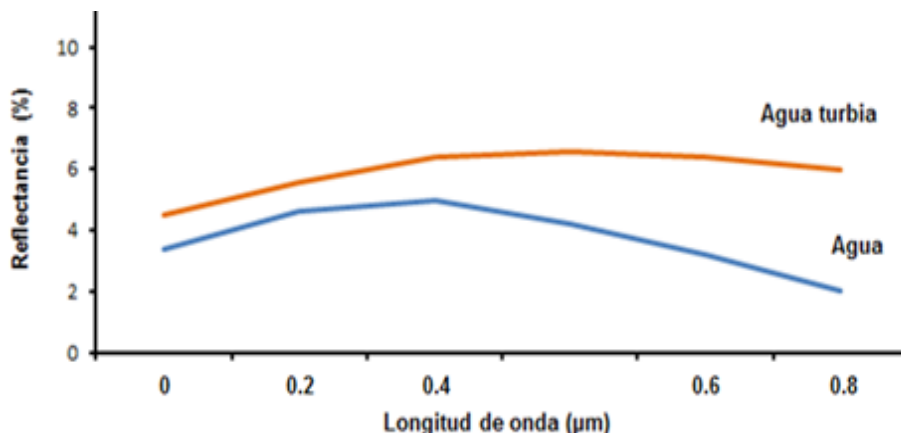


Figura 4. Curva espectral del agua y la vegetación (Basada en Vázquez, 2000)

### 3.3.4 Características del agua en el espectro óptico

Las superficies acuáticas absorben o transmiten la mayor parte de la radiación visible que reciben, siendo su mayor absorptividad cuanto mayor sea su longitud de onda. La mayor reflectividad del agua clara se produce en azul, reduciéndose paulatinamente hacia el infrarrojo cercano, donde es prácticamente nula (Lira, 1997). La región del espectro electromagnético que abarca la luz visible y el infrarrojo se utiliza para detectar los indicadores antes mencionados.

La variabilidad del agua se detecta mejor en las longitudes de onda más cortas (azul y verde), que se relacionan con la profundidad, el contenido de materiales suspendidos (clorofila, arcilla y nutrientes) y rugosidad de superficie (Figura 5)



**Figura 5. Comportamiento espectral agua** (Basada en Vázquez, 2000)

Las propiedades ópticas de las aguas naturales dependen de la concentración de sólidos suspendidos, fitoplancton y materia orgánica disuelta, parámetros altamente relacionados con la calidad del agua. La profundidad del agua influye directamente en el aporte de reflectividad derivado de los materiales de los fondos. En aguas poco profundas la reflectividad aumenta. En cuanto a la composición, diversos estudios han demostrado la posibilidad de emplear sensores especiales para cartografiar contenido de clorofila en el agua. Si el agua ofrece importantes concentraciones de clorofila, la reflectividad en el azul tiende a descender, aumentando en el verde (Meliá, 1986). Esto permite establecer una correlación, de signo negativo entre la reflectividad del agua en la banda azul y el contenido de clorofila, lo que facilita encontrar concentraciones de algas o el estudio de eutrofización de embalses.

### 3.4 Zona de estudio

La presa Valle de Bravo es un embalse que se localiza al poniente del Estado de México, colinda al norte con el municipio de Donato Guerra, al oriente con Amanalco de Becerra, al sur con Temascaltepec, al poniente con Ixtapan del Oro, Santo Tomás de los Plátanos y Oztoloapan, sus coordenadas son: 19°21'30" N; 100°11'00" W, con una altitud de 1830 m s. n. m. (CCVB-A, 2008)

#### 3.4.1 Descripción de la cuenca

Es una cuenca que se forma por la captación de agua resultados de la suma estas microcuencas: Río Amanalco, Río Molino-Los Hoyos, Río González, El arroyo El Carrizal (Figura 6).

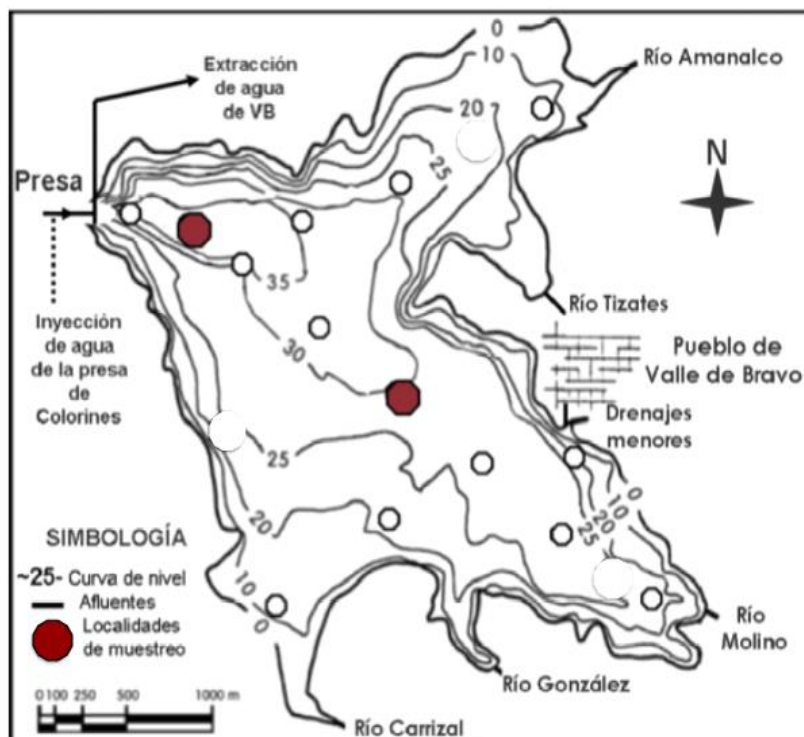


Figura 6. Afluentes de la presa Valle de Bravo (Monroy, 2004)

Adicionalmente recibe las descargas del drenaje del pueblo de Valle de Bravo, incluyendo el drenaje Tizate o Las Flores que originalmente era un río (CCVB-A, 2008)

El 53% de la Cuenca (31,646 ha) lo ocupan los bosques; el 32% (19,824 ha) la agricultura; el 4% los pastizales; el 0.5% de frutales, los cuerpos de agua el 3%, la mancha urbana ocupa el 6% y el 1.5% restante diversos usos. Los suelos son prioritariamente de origen volcánico.

El clima depende de la altitud, semicálido por debajo de los 2200 msnm, templado subhúmedo entre los 2200 y 3000 msnm y semifrío subhúmedo arriba de los 3200 msnm; con temporadas de secas de noviembre a mayo y lluvias de junio a octubre, con una precipitación media de 836 mm al año y una evaporación media de 1620 mm al año (CNA, 2007)

En toda la cuenca abundan los cauces perennes de aguas limpias y cristalinas, alimentados por manantiales, en especial en las áreas boscosas, a diferentes niveles de altura. Tiene una precipitación anual de 973, 966, 610 m<sup>3</sup>, de esta cantidad el 48% se pierde por evapotranspiración, 35% se incorpora a la recarga de mantos acuíferos subterráneos y el 17% escurre superficialmente (CNA, 2007)

### **3.4.2 Dimensiones y capacidad de almacenamiento**

El área superficial de la presa es de 18.55 km<sup>2</sup> y con una longitud de máxima de 6.9 km y una profundidad media de 21.1 m y máxima de 38.6 m. La zona más profunda es cerca de la cortina, 39 metros cuando la presa está a su máximo nivel. Tiene una capacidad de almacenamiento de 457 millones de metros cúbicos Aporta al Sistema Cutzamala 6 m<sup>3</sup>/s. La presa Valle de Bravo se abastece por las corrientes (CNA, 2005):

- I. Amanalco. Tiene su origen al sur del cerro San Antonio. Atraviesa el poblado de San Bartolo y Santa María Pipioltepec. Forma parte de una



- subcuenca con 227.9 km<sup>2</sup>. En su camino se le conoce como río Alto. Aporta la mayor cantidad de agua a la presa Valle de Bravo, 37.75% de la cuenca
- II. La Hierbabuena. Nace en las faldas de los cerros San Agustín y Sacametate. Tiene una microcuenca de 13.22 km<sup>2</sup>
  - III. San Diego. Nace en el cerro La Escalerilla. Tiene una microcuenca de 40.19 km<sup>2</sup>, conforma el 6.09% de la superficie total de la cuenca
  - IV. El Carrizal. Transita por la ladera del norte del cerro de Los Colorines. Tiene una microcuenca de 30.38 km<sup>2</sup>. Representa el 5.44% de la cuenca
  - V. Las Flores. Nace en la ladera del cerro Los Reyes, cruza el poblado de Rincón de Estrada y El Temporal. Tiene una subcuenca de 21.62 km<sup>2</sup>
  - VI. El Molino. Proviene del cerro San Antonio, cruza el poblado de El Naranjo, después confluye en el río El Temporal, después se une al río Alameda para finalmente unirse al río Ojo de Agua y junto con el río Chiquito llegar a la presa. Este afluente representa el 24.61% de la Cuenca de Valle de Bravo, la segunda en importancia por la superficie que ocupa
  - VII. Laderas. Tienen una extensión de 3.4 km<sup>2</sup>.

### **3.4.3 Servicios de ingeniería sanitaria**

Como se observa en la tabla 3, del total de las viviendas de la cuenca el 59.26% tiene sanitario y el 51.01% tiene drenaje. El 73.57% de las viviendas cuentan con agua entubada. En el caso de las viviendas del medio rural el 89.27% cuenta con sanitario y el 44.96% drenaje. (INEGI, 2010)

#### **a) Cobertura de agua potable**

Cerca del 92.46% tiene agua potable en el municipio de Valle de Bravo y sólo el 59.25% en Amanalco. Las localidades con menor número de habitantes no cuentan con el servicio, siendo el caso de Villa Victoria, Villa de Allende y Donato Guerra (INEGI, 2010)

## b) Cobertura de drenaje

Es el servicio menos atendido, el municipio de Valle de Bravo cuenta con el 67.7% de cobertura, Amanalco el 22.2%, Donato Guerra el 14.7% y Villa Victoria 4.38% (INEGI, 2010)

**Tabla 3. Servicios de Ingeniería Sanitaria en la Cuenca (INEGI, 2010)**

Municipio	Sanitario		Agua entubada		Con drenaje	
	Núm.	%	Núm.	%	Núm.	%
Valle de Bravo	6149	78.58	6645	84.92	6281	80.26
Amanalco	1696	42.03	3014	74.69	939	23.27
Villa de Allende	262	26.84	497	50.92	101	10.34
Donato Guerra	696	36.98	844	44.84	300	15.94
Villa Victoria	63	26.14	5	2.07	11	4.56
<b>TOTAL</b>	<b>8866</b>	<b>59.26</b>	<b>11005</b>	<b>73.56</b>	<b>7632</b>	<b>51.01</b>

## **Capítulo 4. METODOLOGÍA**

En este capítulo se presenta la metodología, que comprende:

- 1) Análisis Digital: Procesamiento de las imágenes de satélite de la presa de Valle de bravo
- 2) Programa de muestreo: Toma, tratamiento de muestras y medición de parámetros en sitio
- 3) Análisis de laboratorio: Determinación del Fósforo por tratarse del nutriente limitante y la clorofila A presente.

## 4.1 Análisis Digital

Se tomó el curso de especialización, Sistemas de Información Geográfica para el manejo de la teoría sobre aplicación y en la practica el manejo del software para la manipulación de imágenes.

### 4.1.1 Plataforma satelital

Inicialmente se eligió la plataforma Landsat 7 pero en algunos casos, se recurrió a la plataforma Landsat 8, debido a problemas de nubosidad principalmente. Se utilizaron las imágenes Landsat TM, ETM+ y OLI por su cobertura temporal, resolución espacial y accesibilidad.

La operación del satélite Landsat 7 depende de la NASA, en tanto que la producción y comercialización de las imágenes depende de United States Geological Survey.

El Landsat 7 adquiere imágenes en una superficie que va desde los 81° de latitud norte hasta los 81° de latitud sur en todas las longitudes del globo terrestre, cubriendo un área igual a 185 X185 km por escena.

Las imágenes proporcionadas están compuestas por 8 bandas espectrales -7 en distintos espacios del espectro electromagnético y 1 en pancromático-. Tiene una resolución temporal de 16 días, es decir cubre la totalidad del planeta en ese lapso, completa su órbita descendente -de norte a sur- en aproximadamente 99 minutos, lo que le permite dar 14 vueltas a la Tierra diariamente. Tiene una órbita heliosíncrona, esto es, que siempre pasa a la misma por un determinado lugar (Álvarez et al. 2006). Por lo que atraviesa la línea del Ecuador entre las 10:00 y 10:15 -hora local- en cada pasaje (Tabla 4. Wang y Han, 2006)

La banda Pancromática es la mayor novedad del sensor ETM+, permite que las imágenes generadas a través de este sensor sean trabajadas para obtener ampliaciones hasta una escala de 1:25,000 (Aldalur y Santamaría, 2002)

**Tabla 4. Características principales del satélite Landsat 7**

Sensor	ETM+ (Enhanced Thematic Mapper plus)
Órbita	705 +/- 5 km en el Ecuador.
Tiempo de órbita	98.9 minutos
Altitud	705 kilómetros
Tamaño de escena	185 X 185 km
Resolución espacial	Todas las bandas 30m, excepto la banda 6 que tiene 60m y la pancromática con 15m
Resolución espectral	Banda 1. (Azul) 0.450 - 0.515 $\mu\text{m}$ Banda 2. (Verde) 0.525 - 0.605 $\mu\text{m}$ Banda 3. (Rojo) 0.630 - 0.690 $\mu\text{m}$ Banda 4. (IR próximo) 0.775 - 0.900 $\mu\text{m}$ Banda 5. (IR lejano) 1.550 - 1.750 $\mu\text{m}$ Banda 6. (Térmico lejano) 10.40 - 12.50 $\mu\text{m}$ Banda 7. (Térmico próximo) 2.090 - 2.350 $\mu\text{m}$ Banda 8. (Pancromático) 0.520 - 0.900 $\mu\text{m}$

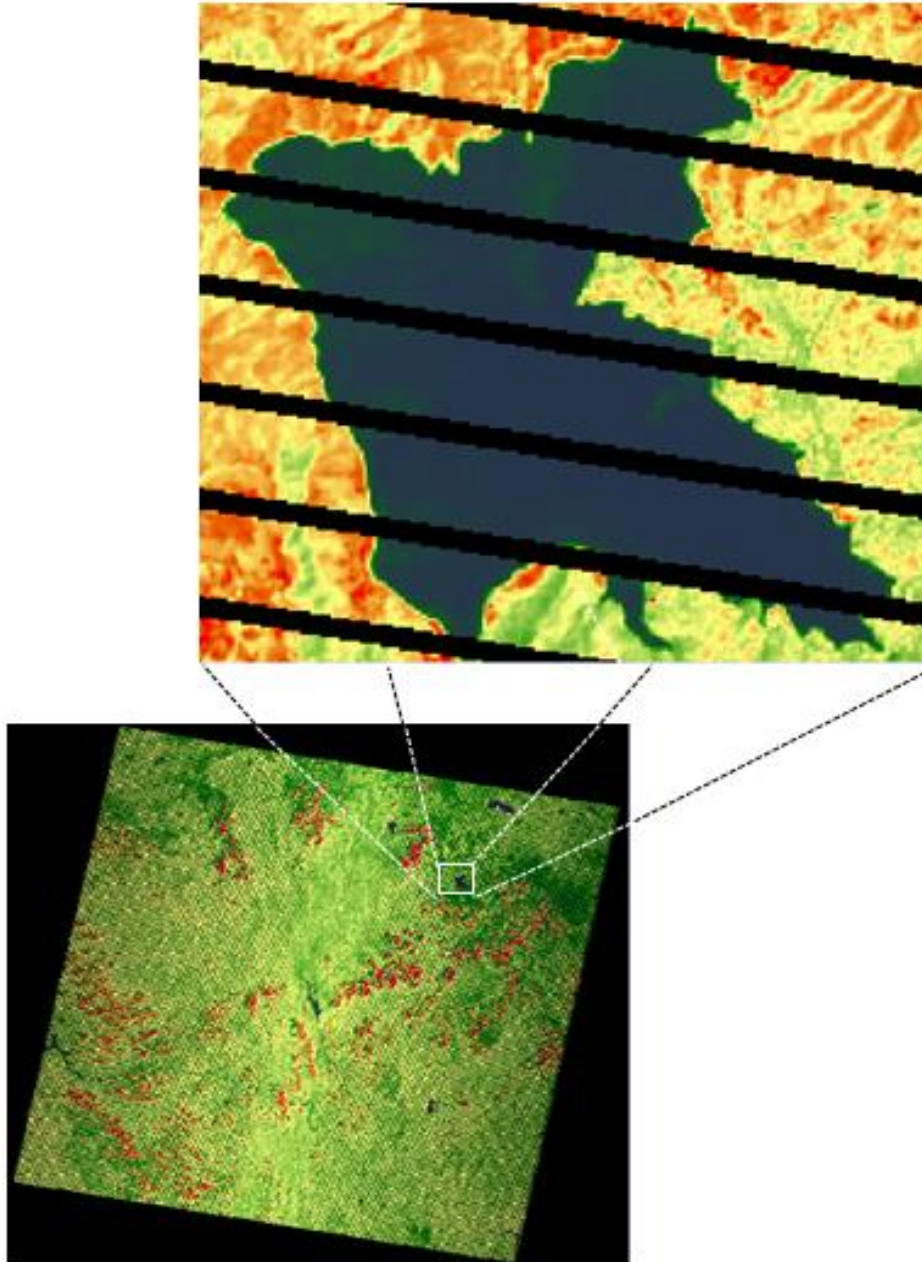
El sensor ETM+ cuenta con el SLC (Scan Line Corrector), cuya función es compensar el escaneado durante el movimiento orbital de la plataforma Landsat pero que debido a una falla mecánica quedó desactivado lo que produjo zonas sin información. Como resultado de lo anterior, las imágenes del Landsat 7 presentan bandeo.

#### **4.1.2 Procesamiento y análisis de imágenes**

Las imágenes de la plataforma Landsat 7 y Landsat 8, procesadas para el presente trabajo se adquirieron de forma directa y gratuita en el servidor de USGS, en la dirección electrónica: <http://glovis.usgs.gov/>. Se seleccionaron siempre que fue posible, las de mejor calidad y sin nubosidad. El programa de percepción remota que se empleó fue el software IDRISI Selva.

A continuación se describe el procesamiento para las imágenes obtenidas de la Presa de Valle Bravo.

Con el propósito de manejar menos información y facilitar los cálculos del programa, inicialmente se recortó la imagen correspondiente a cada banda (Figura 7)



**Figura 7. Recorte de imagen**

Para observar las características de la imagen, se realizó una composición de color (Figura 8), que permite destacar ciertos rasgos de interés, delimitar

claramente el cuerpo de agua, resaltar calidades presentes en ella, así como distinguir entre zonas de vegetación de las zonas urbanas o rocosas.



**Figura 8. Composiciones de imagen**

Mediante la digitalización se seleccionó el área de la imagen con la que se trabajó imagen vectorial, para después convertirla en imagen raster (Figura 9)

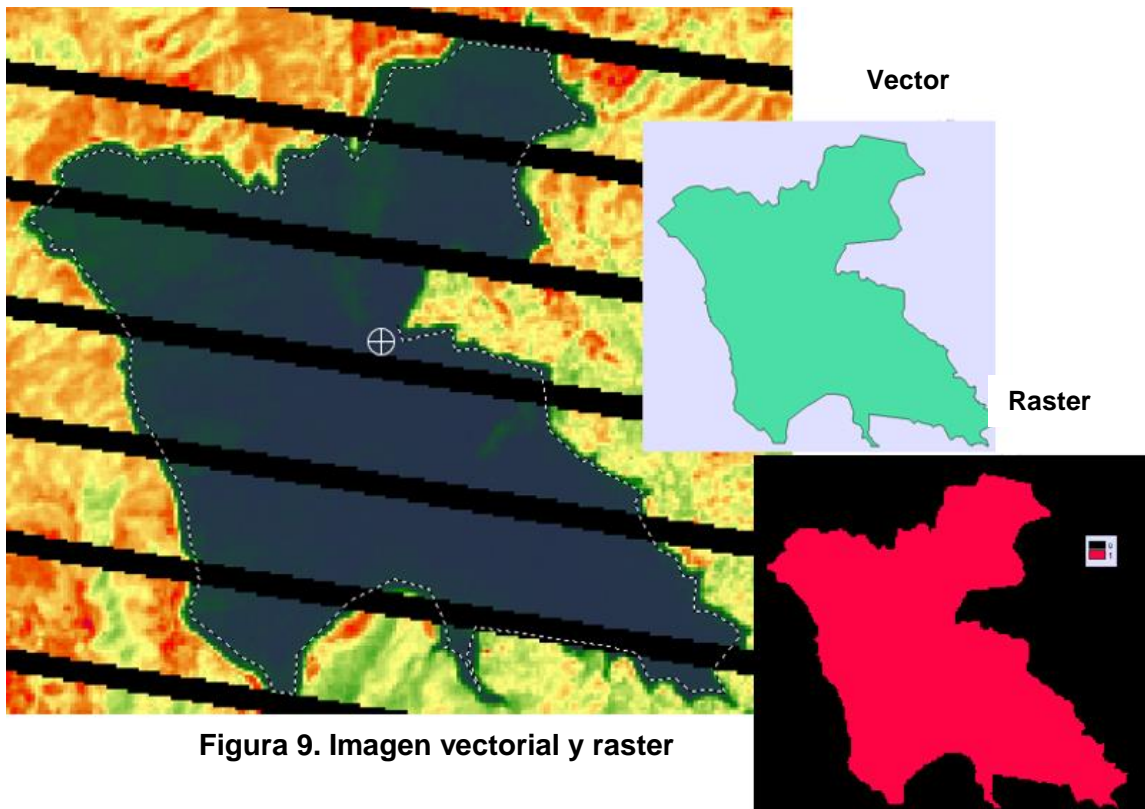


Figura 9. Imagen vectorial y raster

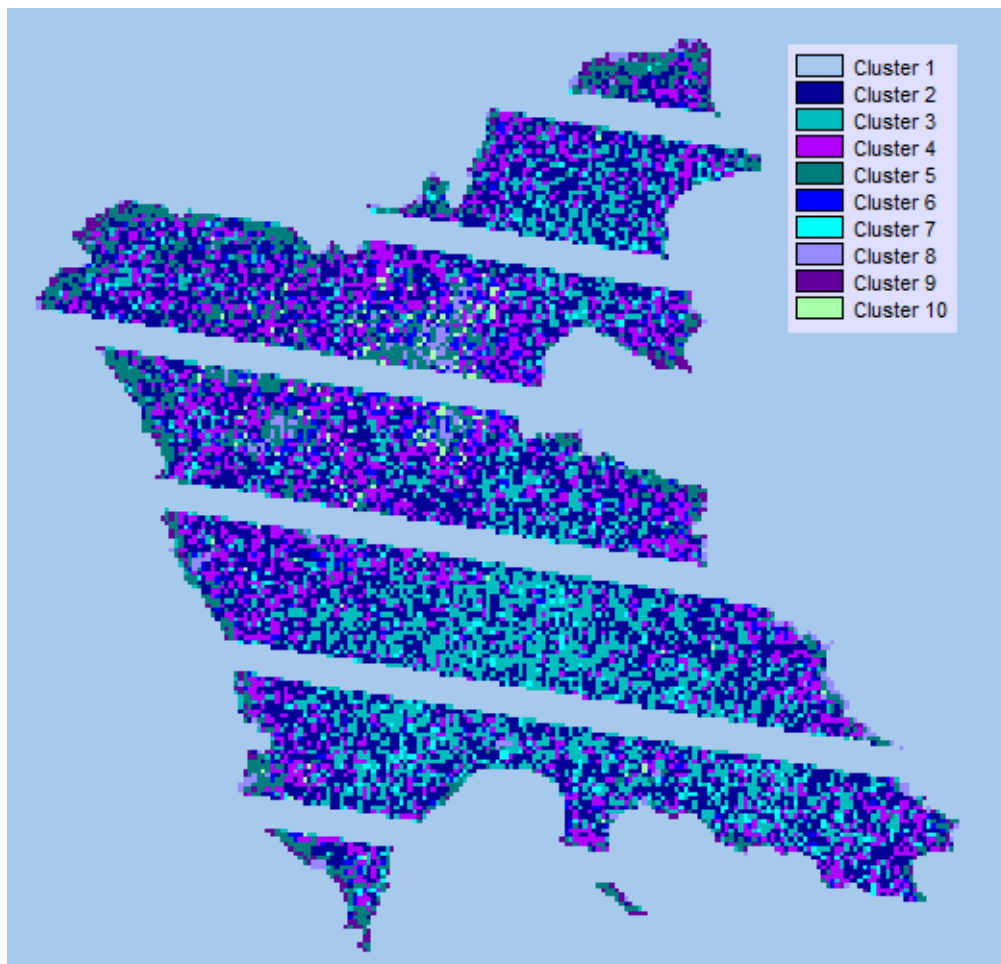
Se llevó a cabo el enmascaramiento de la imagen (Figura 10) original (para cada banda), haciendo uso de la imagen raster obtenida cuya información digital invalida a lo que esta fuera del área seleccionada.



Figura 10. Enmascaramiento de Imagen



Finalmente se realizó una clasificación no supervisada (Figura 11), que en términos prácticos, es la agrupación de los datos de cada imagen, en clases espectrales. Como resultado de la clasificación, los píxeles de la imagen están congregados por la correlación entre ellos y es así que se determinan los puntos de muestreo (clúster). Información sobre esta clasificación se detalla en el Anexo I



**Figura 11. Clúster de Imagen**

#### **4.1.3 Determinación de puntos de muestreo**

En la programación del muestreo y con la finalidad de prever el paso del satélite por la zona, se utilizó el calendario de adquisición de la USGS, que se encuentra en el sitio electrónico: [http://landsat.usgs.gov./tools\\_L7\\_acquisition\\_calendat.php](http://landsat.usgs.gov./tools_L7_acquisition_calendat.php), para obtener la información de las fechas pasadas y futuras de paso del satélite por la misma zona.

Se realizó un análisis multitemporal, con el objetivo de identificar el comportamiento del embalse (Figura 12 y 13 Anexo I)

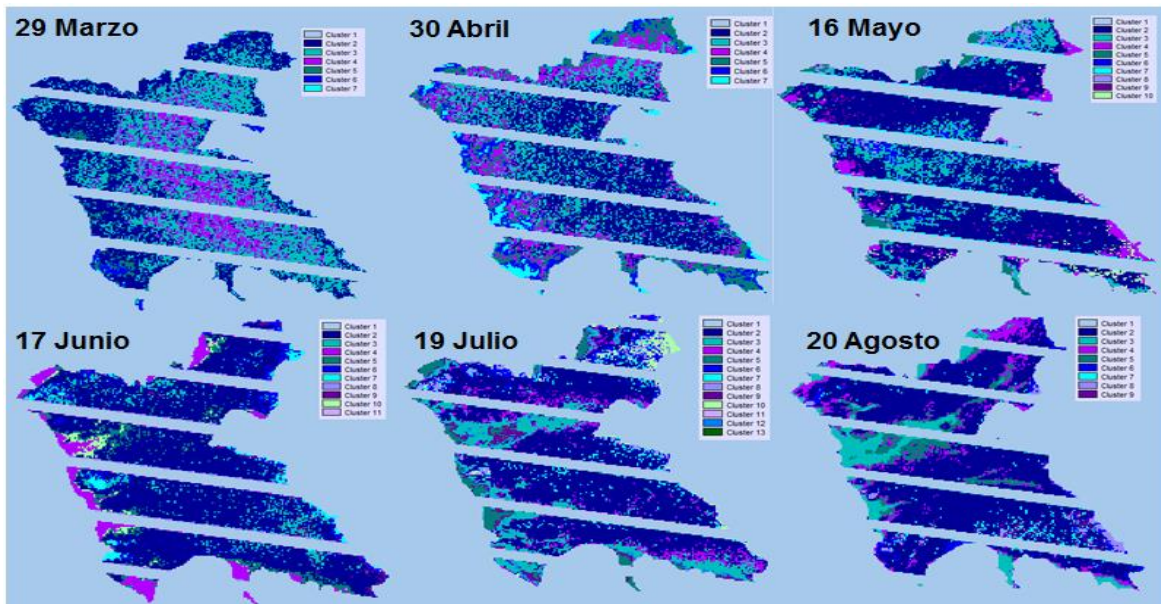


Figura 12. Análisis digital multitemporal. Año 2012

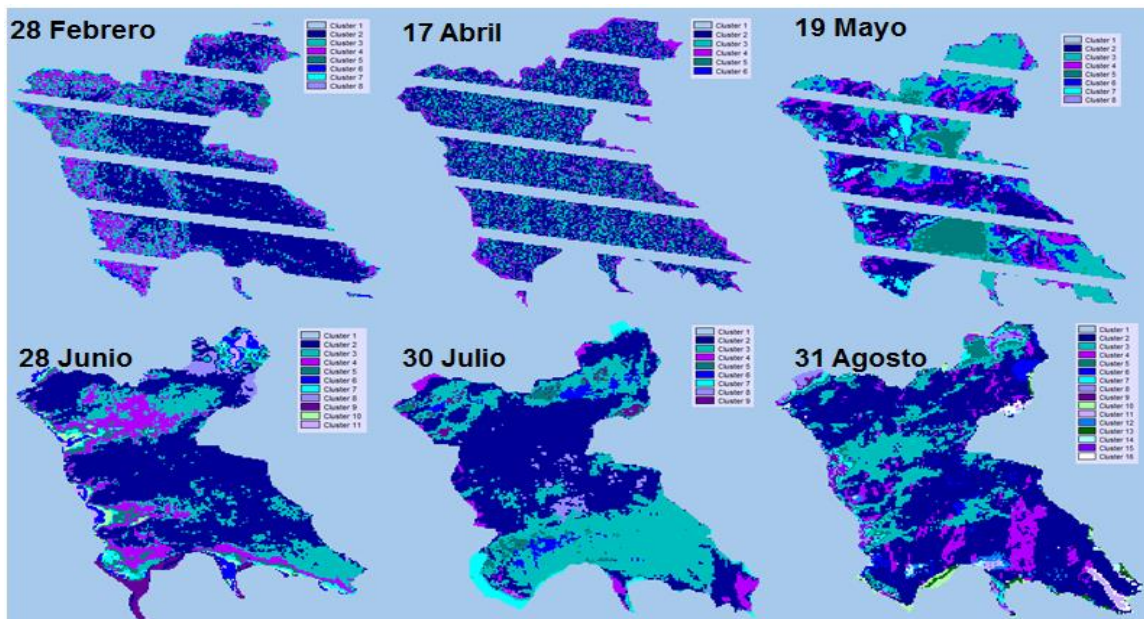


Figura 13. Análisis digital multitemporal. Año 2013

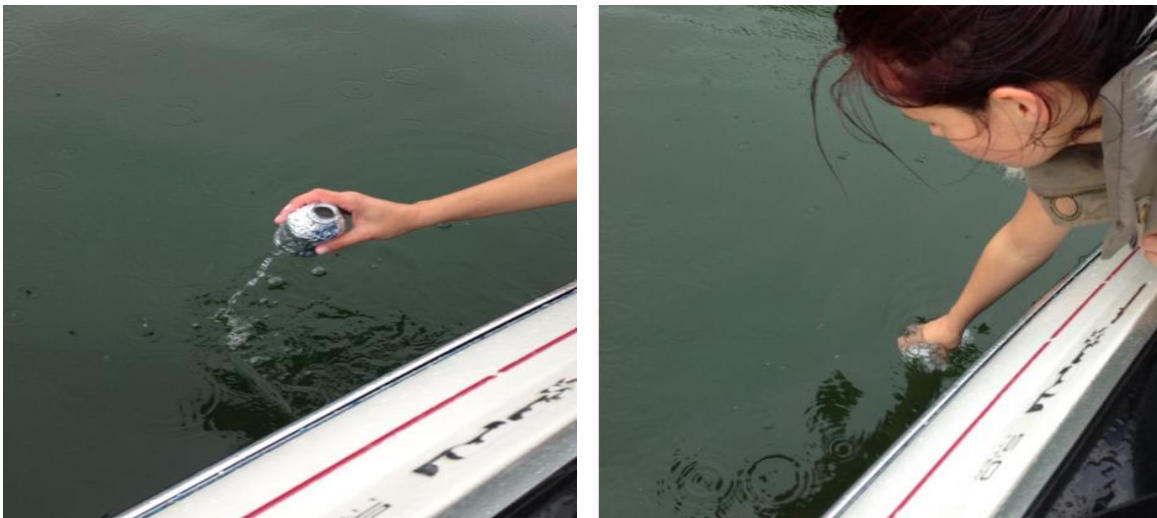
Obteniéndose que cada agrupación de píxeles no se ubica en alguna zona en particular, sino temporal

## 4.2 Muestreo

Seleccionado el día del muestreo, 16 de Septiembre de 2013. Se navegó en el embalse con ayuda de una lancha y se localizaron los sitios de muestreo son GPS.

### 4.2.1 Toma de muestras

En la recolección de muestras, primero se enjuago el recipiente con un poco del agua del embalse, dos o tres veces, procediendo enseguida a tomar la muestra (Figura 14)



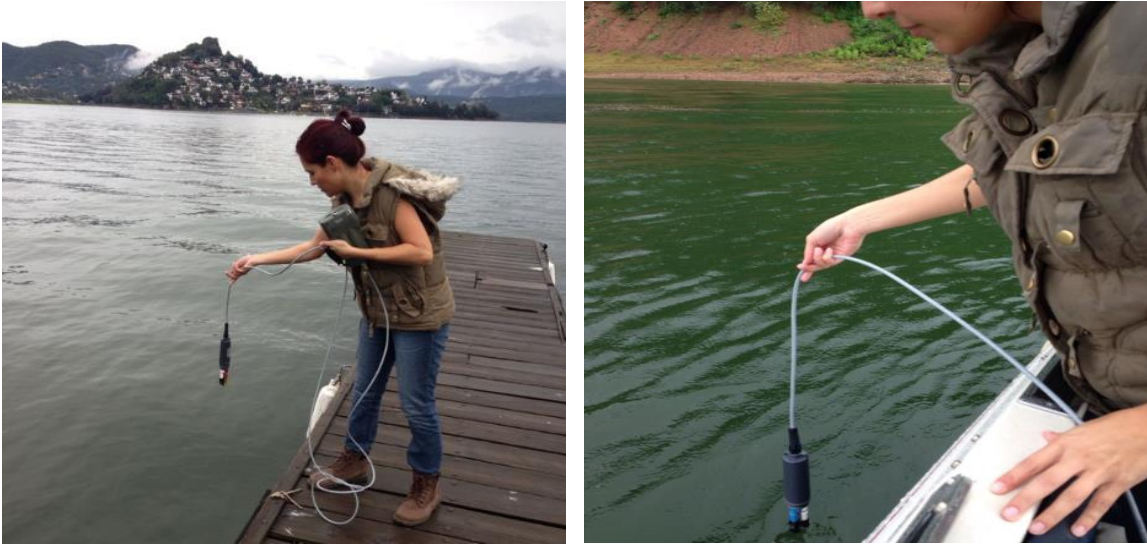
**Figura 14. Toma de muestras**

El volumen de las muestras en cada punto fue 250ml y para el análisis de clorofila, se tomaron muestras por duplicado y se les colocó papel de aluminio para protección de la muestra.

Evitando tomar la muestra, donde había nata o sedimento, se etiqueto cada envase para su identificación y fueron transportaron en hielera, a una temperatura aproximada de 4°C.

#### 4.2.2 Medición de parámetros en sitio

Los parámetros determinados en campo, fueron obtenidos con el medidor multiparamétrico para calidad del agua HANNA HI 9828 (Figura 15)



**Figura 15. Medición de parámetros en sitio**

Los parámetros medidos en sitio: pH, Oxígeno disuelto (OD), Potencial de óxido-reducción (ORP), Solidos disueltos totales (Tds), Conductividad eléctrica ( $\sigma$ ) y Porcentaje de Oxígeno disuelto (OD %)

#### 4.2.3 Determinación de Fósforo total

El fósforo es un nutriente esencial para los organismos, en sistemas acuáticos, es considerado como un parámetro crítico en la calidad del agua debido a su influencia en el proceso de eutrofización.

En el presente trabajo, la determinación de fósforo fue realizada vía espectrofotométrica (Figura 16), con el equipo HACH DR/2010, siguiendo el método 8190 de PhosVer 3; digestión con persulfato ácido (0 a 3.5 g/L de  $\text{PO}_4^{3-}$ )

Con la muestra tomada se preparó una celda, a la que se agrega el reactivo de fosfato PhosVer (N° de catálogo: 21060-46) para iniciar la reacción, se calibra el

equipo con la solución blanco (agua destilada), seleccionando en el equipo el número de programa almacenado para fósforo total.



Figura 16. Medición espectrofotométrica Fósforo total

En seguida se coloca la celda de muestra y el equipo proporciona el resultado.

#### 4.2.4 Determinación de Clorofila A

La determinación de clorofila A, se realizó a través del método espectrofotométrico. Después de su obtención las muestras fueron filtradas (Figura 17)



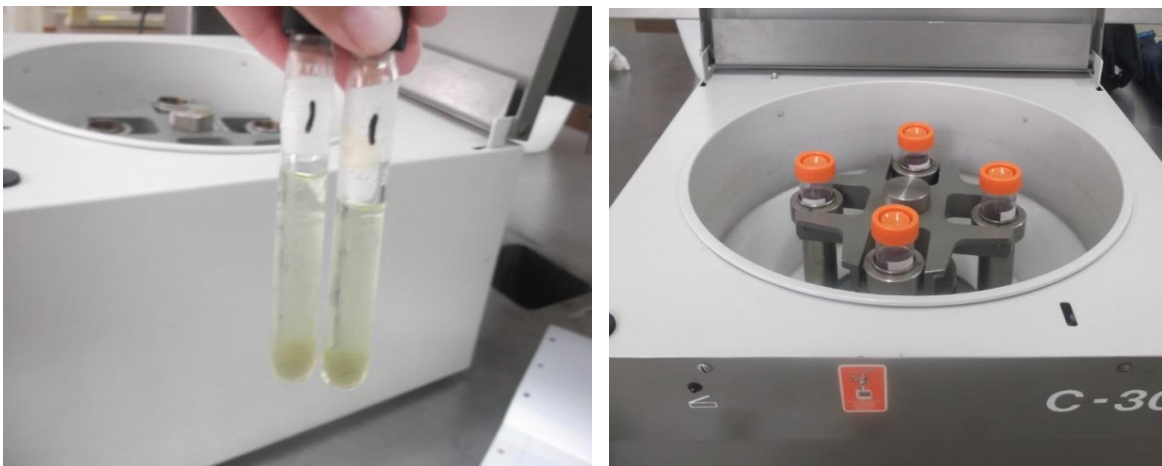
Figura 17. Filtración de muestras

Para la extracción del pigmento, los filtros se colocaron en tubos con 10 ml de acetona al 90%, agitándose durante un minuto y se guardaron en oscuridad, bajo refrigeración (4°C), durante 48 horas (Figura 18)



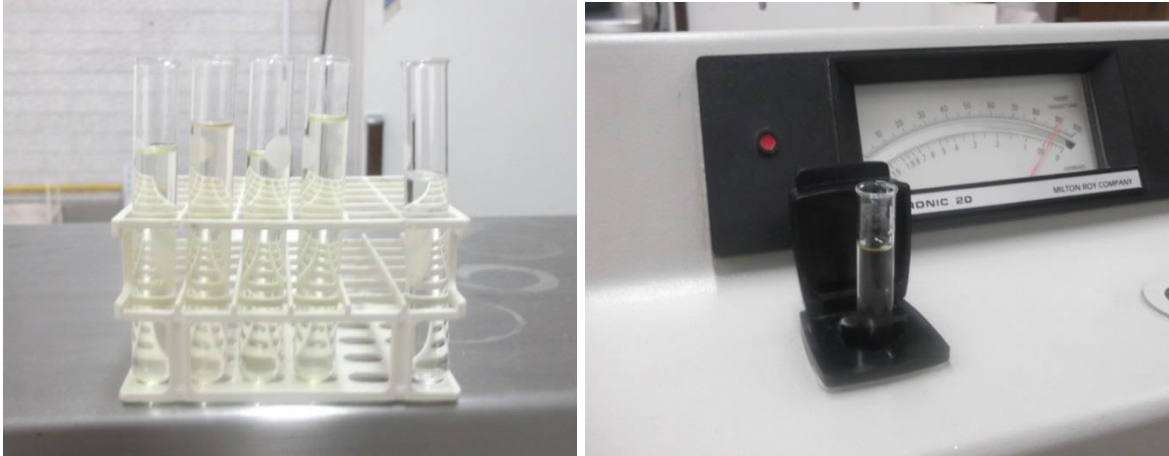
**Figura 18. Muestras después de 48 horas**

Se extrajo la acetona y se prepararon diluciones de 50 ml con cada muestra para someterlas a centrifugación (3500 RPM) durante 15 minutos (Figura 19). Se tomaron 10 ml para medir a través del espectrofotómetro las absorbancias a 664 nm y 647 nm y determinar la cantidad de clorofila A.



**Figura 19. Muestras antes de centrifugar**

Se realiza una lectura a **750nm**, que se utilizará como corrección de la turbidez, y habrá que restar esta lectura de cada uno de los valores de absorbancia de las otras longitudes de onda (Figura 20)



**Figura 20. Determinación de absorbancias**

Las absorbancias corregidas son las que se sustituyen en la fórmula bicromática para calcular clorofila A de Jeffrey & Humphrey (1975):

$$Ca = 11.93A664 - 1.93A647 \quad \dots 4)$$

$$CLO - A = Ca \left[ \frac{\text{Volumen extracto (ml)}}{\text{Volumen Filtrado (L)}} \right] \quad \dots 5)$$

## **Capítulo 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

En este capítulo se presentan los resultados del análisis digital, el muestreo, el análisis de laboratorio, la aplicación del Criterio de Carlson y la confrontación de los mismos.



## 5. 1 Ubicación de puntos del muestreo

El análisis digital de Agosto de 2013, establece (Figura 21 y Tabla 5):

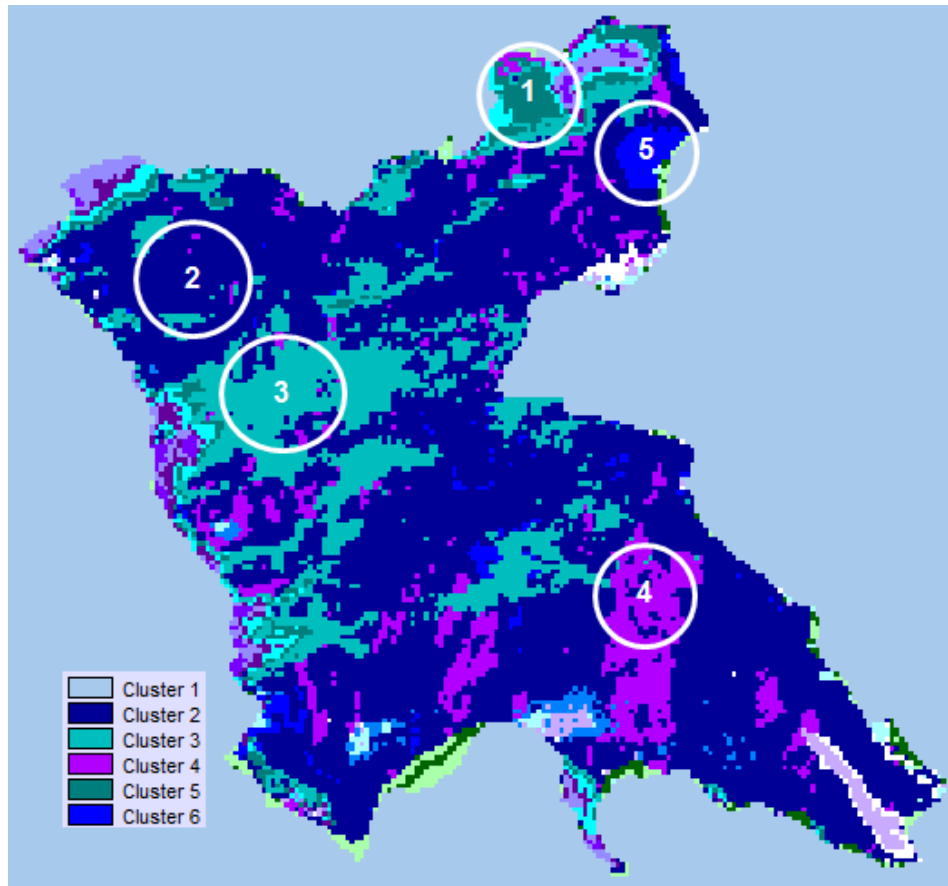


Figura 21. Puntos de muestreo

Tabla 5. Coordenadas de puntos de muestreo

Punto de muestreo	Coordenadas			
	Geográficas		UTM	
	Longitud	Latitud	X	Y
1	100°03'32.94" W	19°12'57.75" N	388664.090909	212507.930233
2	100°10'32.61" W	19°12'23.23" N	388664.090900	212500.930203
3	100°10'13.24" W	19°11'58.91" N	376962.272727	212337.131783
4	100°08'38.15" W	19°11'21.89" N	379732.112012	212218.654909
5	100°08'49.99" W	19°12'53.02" N	379404.656462	212498.379942

### 5.1.1 Parámetros medidos en sitio

La siguiente figura muestra el comportamiento de los parámetros medidos en sitio (Tabla 4 del Anexo II):

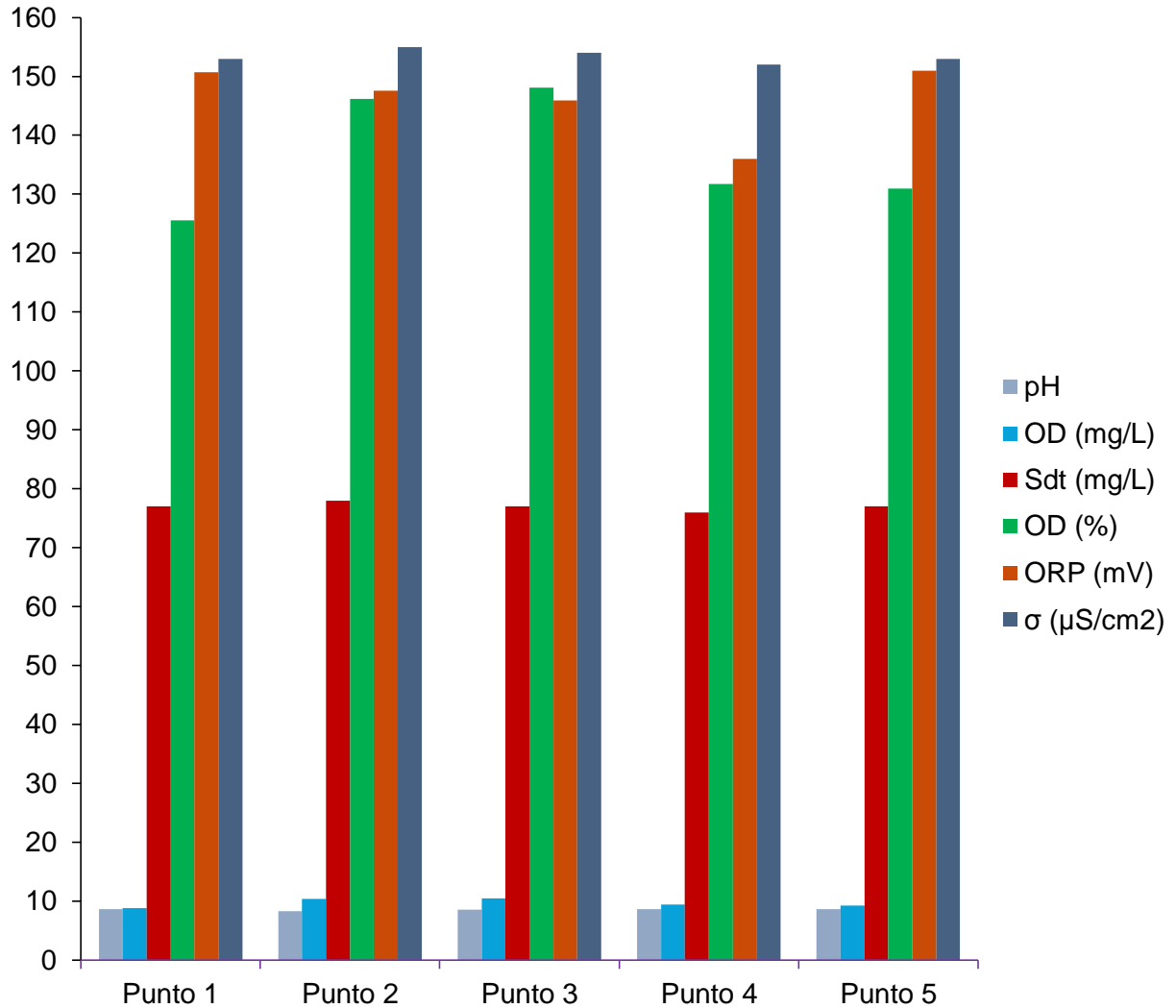


Figura 22. Parámetros en sitio

#### Potencial de hidrógeno (pH)

Durante el muestreo realizado se encontraron valores entre 8.31-8.69 para el pH. El potencial de hidrógeno muestra un medio ligeramente básica condición esperada considerando la producción de oxígeno en la superficie. La norma NOM-127-SSA1-1994 permite un pH mínimo de 6.5 y máximo de 8.5 y sólo el punto 3 se encuentra en este intervalo.

### *Oxígeno disuelto (OD) y OD (%)*

Se encontraron valores de oxígeno disuelto entre 8.85 mg/L y 10.47 mg/L. La toma de muestras inició alrededor de las 11:00 am, el valor de OD correspondiente al medio día es 10.47 mg/L, siendo la concentración máxima y los valores mínimos se presentaron al inicio y al final, es decir en los puntos 1 y 5. Lo anterior se relaciona con la actividad fotosintética de las algas. Estos valores están por encima de la concentración de saturación del oxígeno disuelto que fue de 7.58 mg/L (20.1°C y 0.815 atm) Así los porcentaje de oxígeno disuelto fueron: máximo 148.1% y mínimo 125.6%

### *Sólidos disueltos totales (Tds)*

La NOM-127-SSA1-1994 establece un límite máximo permisible de 1000 mg/L, los valores encontrados en este muestreo fueron como mínimo 76 mg/L y máximo 78 mg/L.

### *Potencial de óxido reducción (ORP)*

En las aguas superficiales, que poseen altas concentraciones de oxígeno, el ORP se encuentra entre 400 y 600 mV. Entre más negativo sea el potencial menor será la capacidad de oxidar (consumir) materia orgánica del sistema. Los valores encontrados mínimo y máximo: 136 y 151 mV respectivamente. En el fondo de lagos eutrofizados, las excesivas cantidades de materia orgánica que ahí se acumulan agotan las reservas de oxígeno, disminuyendo el ORP a veces hasta valores negativos (Merino et al. 2008)

### *Conductividad eléctrica*

La conductividad eléctrica es un parámetro que sirve como indicador del contenido mineral de agua. El valor máximo para el agua potable es 10055  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y los valores obtenidos durante el muestreo mínimo y máximo fueron 152 y 155  $\mu\text{S}/\text{cm}$  respectivamente.

## 5.2 Fósforo total

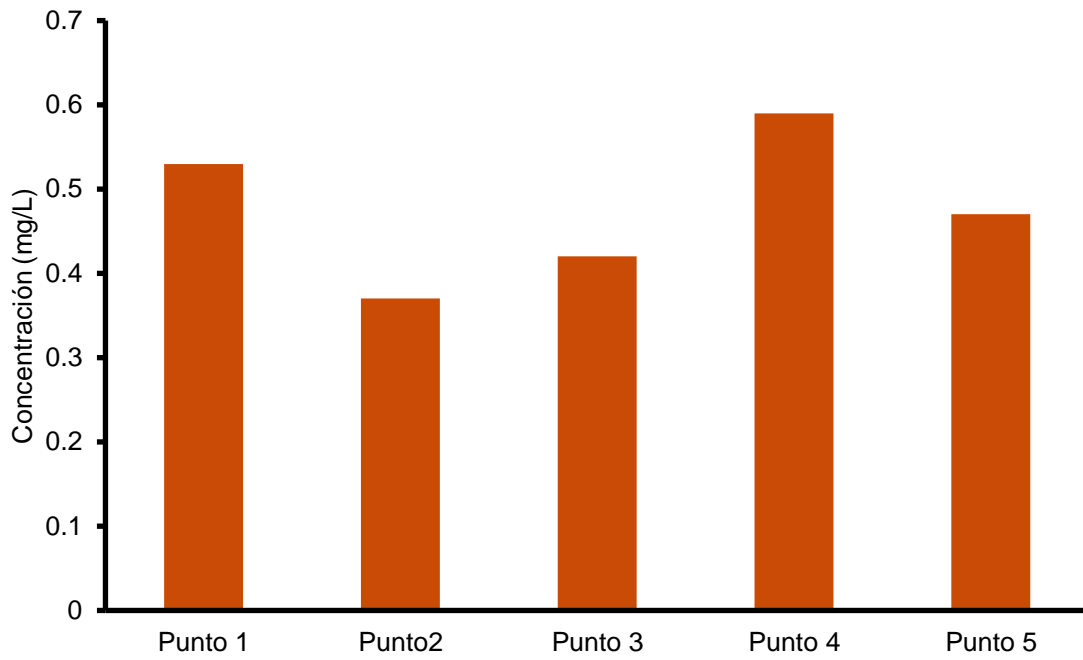


Figura 23. Concentraciones de Fósforo total

## 5.3 Clorofila A

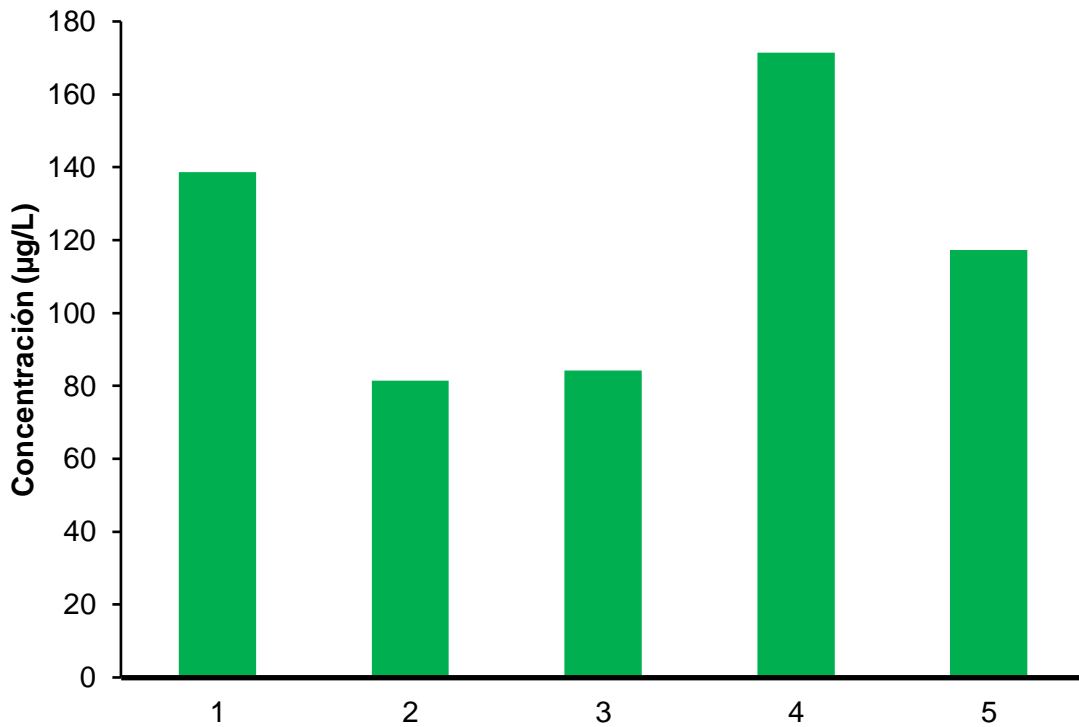


Figura 24. Concentraciones de Clorofila A

En la figura 23, la menor concentración de fósforo fue 0.37 mg/L en el punto 2 y el punto 4 presenta la mayor concentración de fósforo 0.59 mg/L.

En concordancia, la figura 24, muestra que la concentración de clorofila A menor fue 81.48 µg/L en el punto 2 y la mayor fue 171.38 µg/L en el punto 4 (Tabla 1 y 3 del Anexo II).

Comparando los resultados de los parámetros medidos en campo más relevantes y las concentraciones de clorofila A encontradas en el muestreo, se tiene:

Los valores de OD sobrepasan la concentración de saturación de oxígeno calculada a 20.1°C y 0.815 atm lo que indica sobresaturación, atribuible al intercambio que se presenta de forma natural con la atmosfera y el proceso de fotosíntesis llevado a cabo por las algas como lo muestran las concentraciones obtenidas de clorofila A en cada punto. El oxígeno atmosférico ingresa tan sólo por la superficie y la fotosíntesis está limitada a las superficies con luz solar.

Durante la fotosíntesis se consumen iones  $H^+$ , así que en la parte superficial del embalse donde se produce  $O_2$  se espera un pH alto, por lo que el valor máximo correspondió a la concentración más alta de Clorofila A.

Las concentraciones de Fósforo total como nutriente limitante, indican que las algas presentes tienen el sustento necesario para el crecimiento, así el punto con menor concentración de P, presentó la mínima concentración de Clorofila A y viceversa

El valor mínimo para el potencial de óxido reducción corresponde a la concentración de Clorofila A más alta.

Del mismo modo los valores máximos de sólidos disueltos totales y conductividad eléctrica, corresponden a la concentración menor de Clorofila A y viceversa.

#### 5.4 Aplicación del criterio de eutrofización

La información obtenida en el análisis digital, es la proporcionada por la superficie del embalse, razón por la que resulta oportuno utilizar el Criterio de Carlson, que clasifica a un cuerpo de agua tomando en cuenta los valores de Clorofila A y Fósforo total en superficie. Empleando los valores de fósforo y clorofila obtenidos para cada muestra y siguiendo el criterio de Carlson, se elaboró la tabla 6.

**Tabla 6. Aplicación del TSI.**

Punto muestreo	Fósforo total (mg/ m <sup>3</sup> )	TSI	Estado trófico	Clorofila A (mg/ m <sup>3</sup> )	TSI	Estado trófico
Punto 1	530	100	H	138.67	80	E
Punto 2	370	90	E	81.48	70	E
Punto 3	420	100	H	85.17	70	E
Punto 4	590	100	H	171.38	80	E
Punto 5	470	100	H	117.27	80	E

**H: Hipereutrófico      E: Eutrófico**

Tomando en cuenta que para una profundidad del disco de Secchi igual a cero, la concentración de clorofila A es 0.75 mg/m<sup>3</sup> y el fósforo total en superficie es 0.04 mg/m<sup>3</sup>, los resultados obtenidos para Valle de Bravo indican estado de hipereutrofia con respecto al fósforo presente y estado de Eutrofia con respecto a las concentraciones de Clorofila A.

### 5.5 Comparación de resultados

A continuación, el análisis digital del día del muestreo (16 septiembre 2013) y las concentraciones obtenidas de clorofila A junto con los clúster para cada punto:

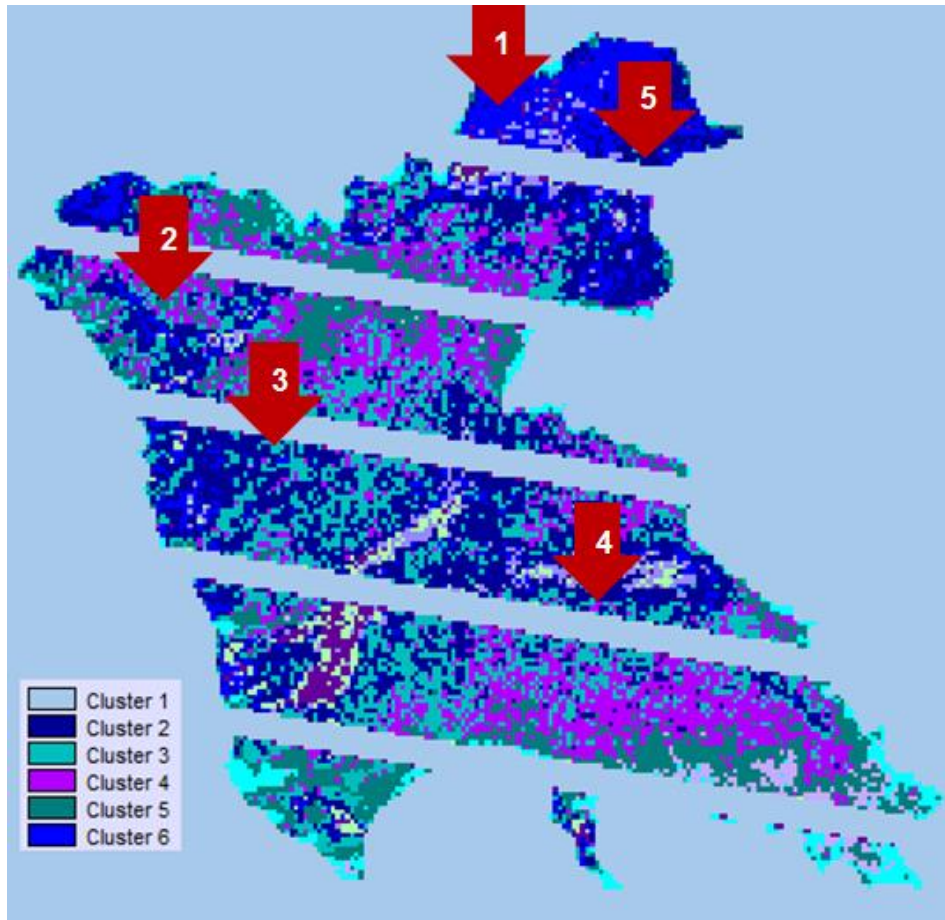


Figura 25. Puntos de muestreo Septiembre 2013

Tabla 7. Punto de muestreo-clúster-clorofila A

Punto muestreo		4	1	5	3	2
Clorofila A (mg/m <sup>3</sup> )		171.38	138.67	117.27	85.17	81.48
Cluster	Número	4	6	2	3	5
	Color	[Color magenta]	[Color azul]	[Color azul oscuro]	[Color cian]	[Color verde oscuro]

De la figura y tabla anterior, se tiene, que en el análisis digital del día del muestreo (16 septiembre 2013) para el punto 4 se presenta la concentración mayor de clorofila A aproximadamente  $171.38 \text{ mg/m}^3$  para los pixeles agrupados en el clúster 4 (■)

Así mismo, para el punto 2 del muestreo se tiene la concentración más baja de clorofila A, que es aproximadamente  $81.48 \text{ mg/m}^3$  para los pixeles agrupados en el clúster 5 (■)

Para el análisis multitemporal efectuado, meses de marzo-mayo y junio-agosto de los años 2012 y 2013, los clúster resultado de la clasificación, se ubican de forma diferente en cada imagen y para asociarlos con una concentración aproximada de clorofila A como se realizó en este trabajo es necesario contar con información de los muestreos correspondientes.

El software establece agrupaciones de acuerdo a la frecuencia con que aparecen pixeles con similares características y asigna los colores de forma aleatoria. Los clúster obtenidos de la clasificación (no supervisada) digital, corresponden únicamente a la imagen para el día de toma de muestras.



## Capítulo 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

De acuerdo con los objetivos planteados para este trabajo, se establece que la cantidad de clorofila A, produce un cambio en el comportamiento óptico del agua, esta respuesta puede asociarse a un clúster formado por pixeles que comparten características similares pero la frecuencia y color de cada clase responde de manera única y exclusiva a la clasificación de la imagen para el día del muestreo.

Así mismo el análisis digital multitemporal realizado para la presa, muestra el comportamiento temporal del embalse sin embargo es necesaria la información del trabajo en campo de cada imagen.

En este trabajo la clasificación digital obtenida del embalse, se relaciona con la concentración de clorofila A, que a su vez es posible asociar con parámetros como el oxígeno disuelto como medida de la actividad fotosintética de las algas, pH alto por la producción de  $O_2$  en la superficie, cuando la cantidad de clorofila A es alta y elevada conductividad eléctrica y sólidos disueltos totales cuando es baja la cantidad de clorofila A, lo que permite tener un panorama de las condiciones presentes.

El análisis digital, sumado a la determinación de Clorofila A como medida de la biomasa algal, proporciona información sobre la condición que tiene la superficie del embalse para el día del muestreo, que puede proponérsele como un sistema de monitoreo para la presa Valle de Bravo, considerando la siguiente recomendación:

Organizar un sistema de monitoreo continuo, que compare lo obtenido durante el muestreo periódico con el correspondiente análisis digital de la presa para distintas épocas, buscando establecer las relaciones con parámetros como la turbiedad o los sólidos suspendidos totales y tener un proceso más cuantitativo y repetible que permita la realización de un mapa eficiente del comportamiento de la presa Valle de Bravo.

## REFERENCIAS

**Aguirre-Gómez R. 2001.** Caracterización óptica de la laguna costera de Coyuca de Benítez Investigaciones Geográficas. Boletín del Instituto de Geografía, UNAM. Núm. 46.

**Aldalur, B., y Santamaría M. 2002.** Realce de imágenes: filtrado espacial. Revista de Teledetección. No. 17: 31-42

**Álvarez J. A., Zarazaga F., Latre M., Bejar R. y Muro P. 2006.** Water quality monitoring based on sediment distribution using satellite imagery. 9th AGILE Conference on Geographic Information Science. Visegád, 2006. 144-150

**Arrigo, K. R. 2005.** Marine microorganisms and global nutrient cycles. Nature. 437: 349-355

**Avalos Piña K. 2012.** Percepción remota y sus aplicaciones a la evaluación de la calidad del agua. Tesis de Licenciatura en Ingeniería Civil. México. Facultad de Ingeniería UNAM

**Braga Claudia Z. F. 1993.** Water Quality Assessment with Simultaneous Landsat-5 TM Data at Guanabara Bay, Rio de Janeiro, Brazil. Remote Sensing of Environment. Núm. 45

**Brivio P. A. 2001.** Determination of Chlorophyll concentration changes in Lake Garda using an image-based radiative transfer code for Landsat TM images. International Journal of Remote Sensing. Núm.2

**Brock. Madigan, M. T., Martinko, J. M., Parker J. 2005.** Biología de los microorganismos. 10ª edición. Pearson. Prentice Hall

**Carlson R. 1977.** A trophic state index for lakes. Limnology and Oceanography 22. Núm.2. 361-369

**CCVB-A (Comisión de Cuenca Valle de Bravo-Amanalco). 2008.** Presa Valle de Bravo. Estado de México. <http://www.cuencaamanalcovalle.org/index.php>

**CEPIS (Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente). 2001.** Metodologías Simplificadas para la evaluación de eutrofización en lagos cálidos tropicales. Editado por la CEPIS, Lima Perú. Enero 2001

**Chuvienco, E. 1990.** Fundamentos de Teledetección Espacial. Ediciones Ralp, S.A., Madrid 42-67, 89-126

**CNA (Comisión Nacional del Agua). 1998.** Estudio de calidad de las fuentes de aprovechamiento del Sistema Cutzamala en coordinación con los gobiernos del Distrito Federal y Estado de México

**CNA (Comisión Nacional del Agua). 1999.** Estudio de calidad de las fuentes de aprovechamiento del Sistema Cutzamala en coordinación con los gobiernos del Distrito Federal y Estado de México

**CNA (Comisión Nacional del Agua). 2000.** Estudio de calidad de las fuentes de aprovechamiento del Sistema Cutzamala en coordinación con los gobiernos del Distrito Federal y Estado de México

**CNA (Comisión Nacional del Agua). 2005.** Plan para la gestión integral del agua y recursos asociados de la cuenca Valle de Bravo, Estado de México.

**CNA (Comisión Nacional del agua). 2007.** Estadísticas de Almacenamiento

**CNA/Acuagranjas (Comisión Nacional del Agua/ Acuagranjas Consultores en Acuacultura, S.A. de C.V.). 2002.** Muestreo Biológico en las presas Valle de Bravo, Villa Victoria y El Bosque del sistema Cutzamala. Informe final 151 pp.

**CNA/Acuagranjas (Comisión Nacional del Agua/ Acuagranjas Consultores en Acuacultura, S.A. de C.V.). 2003.** Monitoreo Biológico en las presas Valle de Bravo, Villa Victoria y El Bosque del sistema Cutzamala. Informe final 226 pp.

**CNA/Acuagranjas (Comisión Nacional del Agua/ Acuagranjas Consultores en Acuacultura, S.A. de C.V.). 2004.** Modelación Matemática de la Calidad del Agua y Monitoreo Biológico en las presas Valle de Bravo, Villa Victoria y El Bosque del sistema Cutzamala. Informe final 229 pp

**CNA/Acuagranjas (Comisión Nacional del Agua/ Acuagranjas Consultores en Acuacultura, S.A. de C.V.). 2005.** Monitoreo Biológico en las presas Valle de Bravo, Villa Victoria y El Bosque del sistema Cutzamala y adecuación del modelo matemático para la presa Villa Victoria. Informe final 205 pp.

**CNA/Acuagranjas (Comisión Nacional del Agua/ Acuagranjas Consultores en Acuacultura, S.A. de C.V.). 2006.** Actualización del Monitoreo Biológico de las presas Valle de Bravo, Villa Victoria y El Bosque del sistema Cutzamala para el informe 2006 y actualización del modelo matemático para la presa El Bosque, Informe final. 213 pp.

**Conagua-IMTA (Comisión Nacional del Agua- Instituto Mexicano de Tecnología del Agua). 2009.** Caracterización de sedimentos en la presa Valle de Bravo. Estado de México y evaluación de diferentes técnicas d control de nutrientes. Primera etapa. Informe Final.

**Conagua-IMTA (Comisión Nacional del Agua- Instituto Mexicano de Tecnología del Agua). 2010.** Caracterización de sedimentos en la presa Valle de Bravo. Estado de México y evaluación de diferentes técnicas d control de nutrientes. Segunda etapa. Informe Final.

**De la Fuente G. y Carrera E. 2005.** Cambio de Uso del Suelo en la Zona Costera del Estado de Sinaloa. DUMAC. Reporte final a United States Forest Service

**Giardino C. 2001.** Detecting chlorophyll, Secchi disk depth and surface temperature in a sub-alpine lake using Landsat imagery. The Science of the Total Environment. Núm. 268

**Graham, L. E., J. M. Graham & L. W. Wilcox 2009.** Algae. San Francisco, Benjamin Cumming

**Guerra Martínez V. y Ochoa Gaona S. 2005.** Evaluación espacio-temporal de la vegetación y uso del suelo en Reserva de la Biosfera Pantanos de Centla, Tabasco (1990-2000). Investigaciones Geográficas. Boletín del Instituto de Geografía UNAM. ISSN 0188. Núm. 59

**IDECA (Investigación y Desarrollo de Estudios de Calidad del Agua). 1999.** Estudio limnológico de la presa Valle de Bravo, México. Informe final.

**IMTA (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua). 2005.** Plan para la gestión integral del agua y recursos asociados de la cuenca Valle de Bravo, Estado de México. Informe final. 228pp.

**INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). 2010.** Anuario Estadístico Estado de México Edición 2010. Disponible en [www.inegi.gob.mx/est/cotenido/espanol/sistemas/Aee10/estatal/mex/index.htm](http://www.inegi.gob.mx/est/cotenido/espanol/sistemas/Aee10/estatal/mex/index.htm)

**Lira, J. 1997.** La Percepción Remota. Colección la ciencia para todos. Fondo de Cultura Económica, México.

**Mather, P. M. 1987.** Computer Processing of Remotely Sensed Images. Chichester

**Meliá, J. 1986.** Signaturas Espectrales e Índices de Vegetación. Burjassot. Facultad de Ciencias Físicas Universidad de Valencia

**Mendoza M., Bocco G., Bravo M., Siebe C. y Ortiz M. A. 2002.** Modelamiento hidrológico espacialmente distribuido: Una revisión de sus componentes, niveles de integración e implicaciones en la estimación de procesos hidrológicos en cuencas no instrumentadas. Investigaciones Geográficas. Boletín del Instituto de Geografía UNAM: Núm. 47

**Merino Ibarra M., Nandini S., and SS Sarma. 2008.** Seasonal changes in the zooplankton abundance of the reservoir Valle de Bravo (State of Mexico, Mexico. Lake & Reservoir management, 24. (in press)

**Monroy Ríos, E. 2004.** Hidrología del embalse Valle de Bravo, México. Tesis de Maestría. Química acuática. Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM

**Mota Sanchez K. B. 2011.** Estudio de la Calidad del Agua del vaso de la Presa de Valle de Bravo. Tesis de Licenciatura en Ingeniería Civil. México. Facultad de Ingeniería UNAM

**NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-127-SSA1-1994.** Salud ambiental, agua para uso y consumo humano- límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización.

**Olvera V. V. 1990.** Estudio de la eutroficación del embalse Valle de Bravo, México en: Olvera, V., Bravo L. y Sánchez J. Aquatic ecology and management assessment in Valle de Bravo reservoir and its watershed. Aquatic Ecosystem Health & Management, Volume 1, Issue 3& 4, 1998. 222-290

**Olvera V. V. 1993.** Limnología y manejo de la Cuenca de la presa Valle de Bravo, México en: Anis, G. Singhal. 2006. Mixing in the Surface boundary layer of a tropical freshwater reservoir. Journal of Marine Systems. Volume 63, Issues 3-4, December 2006. 220-250

**Olvera V. V., Bravo L. y Sánchez J. 1998.** Aquatic ecology and management assessment in Valle de Bravo reservoir and its watershed. *Aquat. Ecosys. HealthManag.* vol.1, núm. 2-3, 270-290

**Oyama Y., Matsuchita B., Fukushima T., Nagai T. y Imai A. 2007.** A new algorithm for estimating chlorophyll-a concentration from multi-spectral satellite data in case II waters: a simulation based on a controlled laboratory experiment. *International Journal of Remote Sensing.*

**Ramírez-Zierold J.A., Merino-Ibarra M., Monroy-Ríos E., Olson M., Castillo F. S., Gallegos M. E. y Vilaclara G. 2010.** Changing water, phosphorus and nitrogen budgets for Valle de Bravo reservoir, water supply for Mexico City Metropolitan Area: *Lake & Reservoir Management.* Vol. 26

**Rosas I., Cravioto A., Ezcurra E. 2004.** *Microbiología Ambiental.* Instituto Nacional de Ecología. México. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT-INE-PUMA), Instituto Nacional de Ecología Programa Universitario del Medio Ambiente-UNAM

**Ruiz M. R. 2002.** Análisis multitemporal de atributos y zonificación de áreas de inundación utilizando técnicas de Percepción Remota. Tesis doctoral. UNAM

**Salas H. y Martino P. 2001.** Metodologías Simplificadas para la Evaluación de Eutrofización en Lagos Cálidos Tropicales. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS)

**Salinas Castillo W. E., Treviño Garza E. J., Jaramillo Tovías J. G. y Campos Flores J. A. 2002.** Identificación y Clasificación de humedales interiores del estado de Tamaulipas por Percepción Remota y Sistemas de Información Geográfica. *Investigaciones Geográficas. Boletín del Instituto de Geografía UNAM.* Núm. 49

**Sanchez de Fuentes J. 2001.** El Fosforo, parámetro crítico de la calidad del agua. Técnicas analíticas y de muestreo Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de Carabobo, Venezuela.

**Sepulveda Hirose R. T. 2011.** Diseño de Modelos de Calidad del Agua mediante el uso de Percepción Remota Tesis de Maestría en Ingeniería Ambiental. Mexico. Facultad de Ingeniería UNAM

**Tortora G. J. 2010.** Microbiology. An introduction Tenth Edition. Pearson Education

**Vadillo Gálvez M. C. 2010.** Evaluación de la vulnerabilidad a la Eutroficación del embalse de Poechos. Tesis de Licenciatura en Ingeniería civil. Perú. Facultad de Ingeniería. Universidad de Piura.

**Vázquez González. A.B. 2000.** Evaluación de la Calidad del Agua mediante Percepción Remota”. Tesis de maestría en Ingeniería Ambiental. México Facultad de Ingeniería UNAM

**Wang F. y Han L. 2006.** Applications of Landsat-5 TM imagery in assessing and mapping water quality in Reelfoot Lake, Tennessee. International Journal of Remote Sensing. Núm. 23

**Zhang Y. 2005.** Surface Water Quality Estimation Using Remote Sensing in the Gulf of Finland and the Finnish Archipelago Sea. Thesis for the degree of Doctor of Science in Technology Laboratory of Space Technology, Espoo. Finland

**Zeichen M. y Robinson I. 2004.** Detection and monitoring of algal blooms using SeaWiFS imagery. International Journal of Remote Sensing



## ANEXO I.

### Análisis multitemporal. Presa Valle de Bravo

#### Clasificación de imágenes.

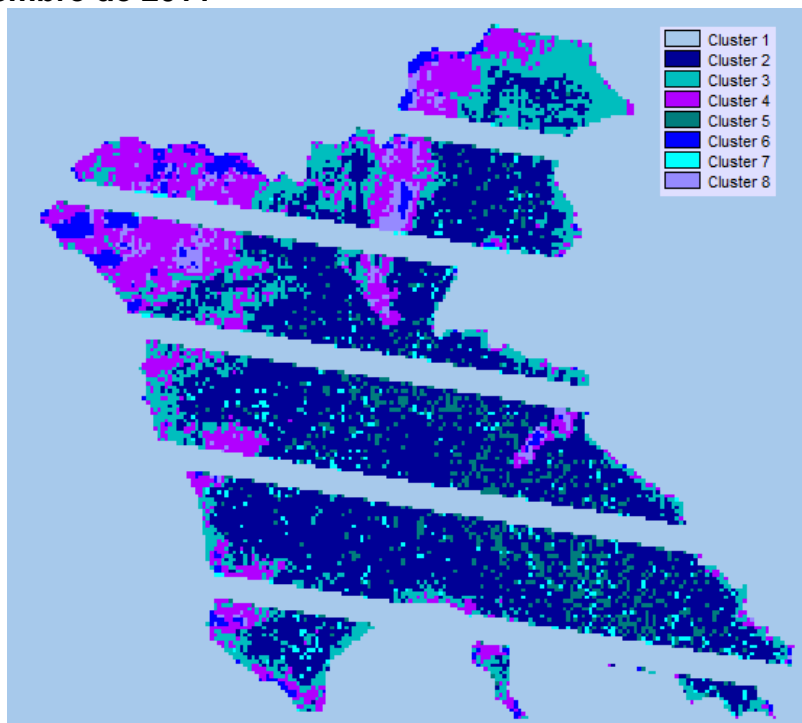
Al clasificar una imagen se asigna cada pixel a una categoría, que representa una gama de variedad dentro de la imagen. El producto final de cualquier tipo de clasificación es un mapa con la cantidad de clases que se quiera, siendo importante verificar la información en campo.

#### Clasificación no supervisada

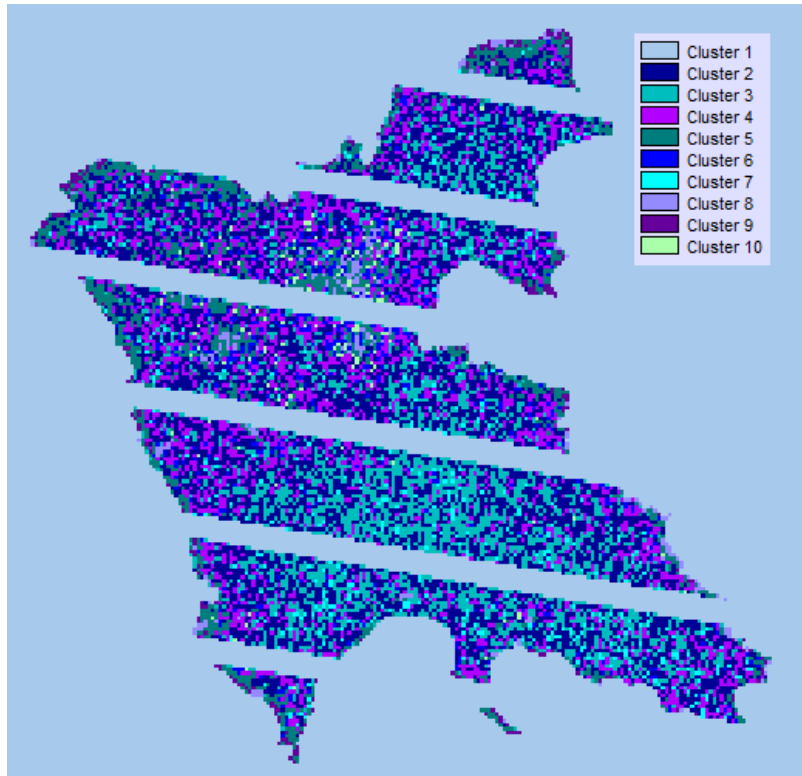
En una clasificación no supervisada se determina la cantidad de clases y en forma automática cada pixel es asignado a una de ellas. El método utiliza para el análisis de cada clase, los valores de los histogramas, es decir, toma el valor con una alta frecuencia en comparación a los pixeles vecinos.

#### Análisis digital

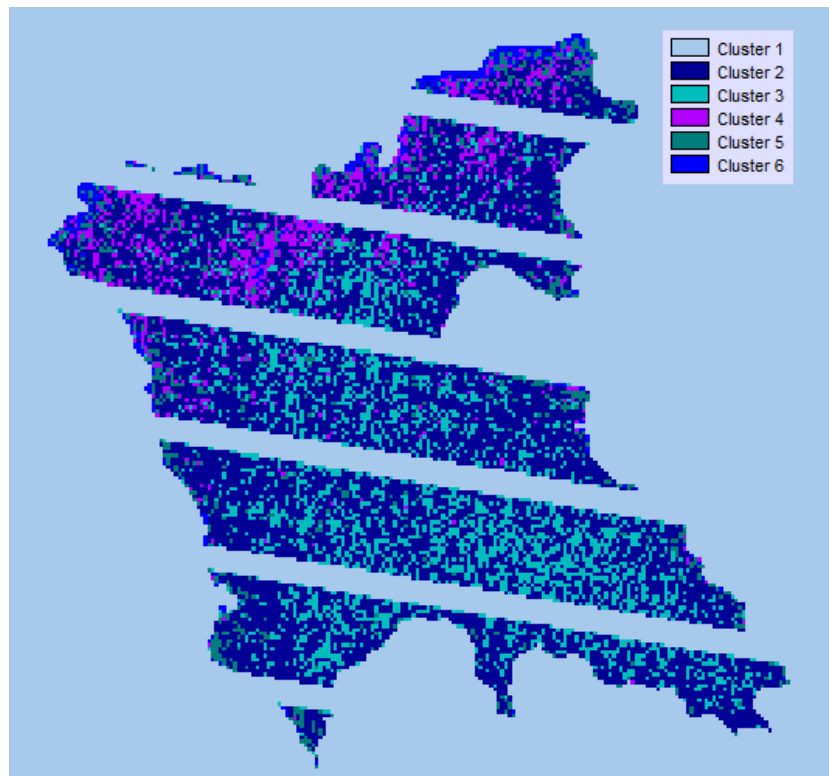
13 de Septiembre de 2011



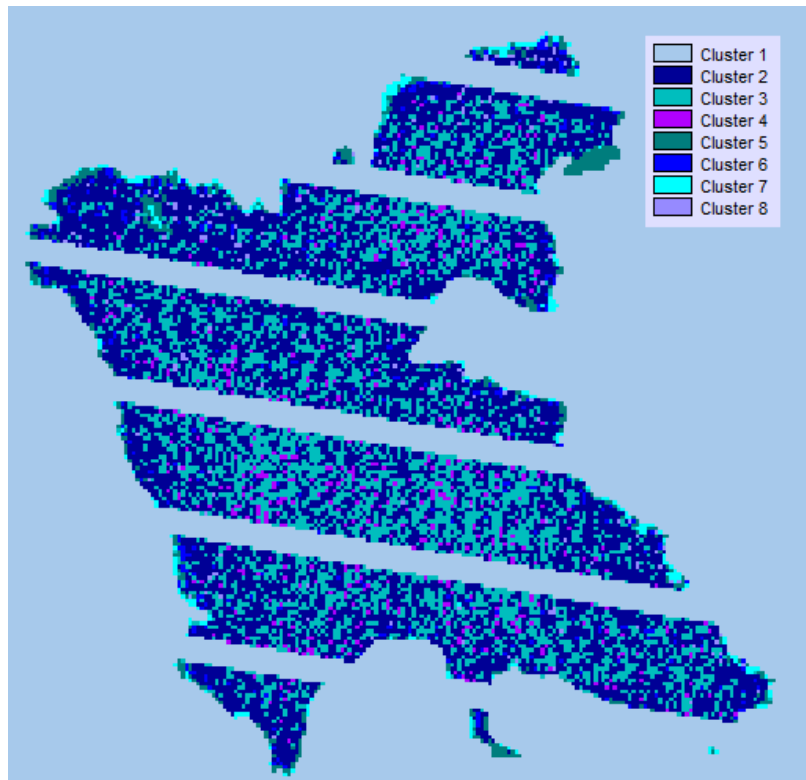
**21 de Octubre de 2011**



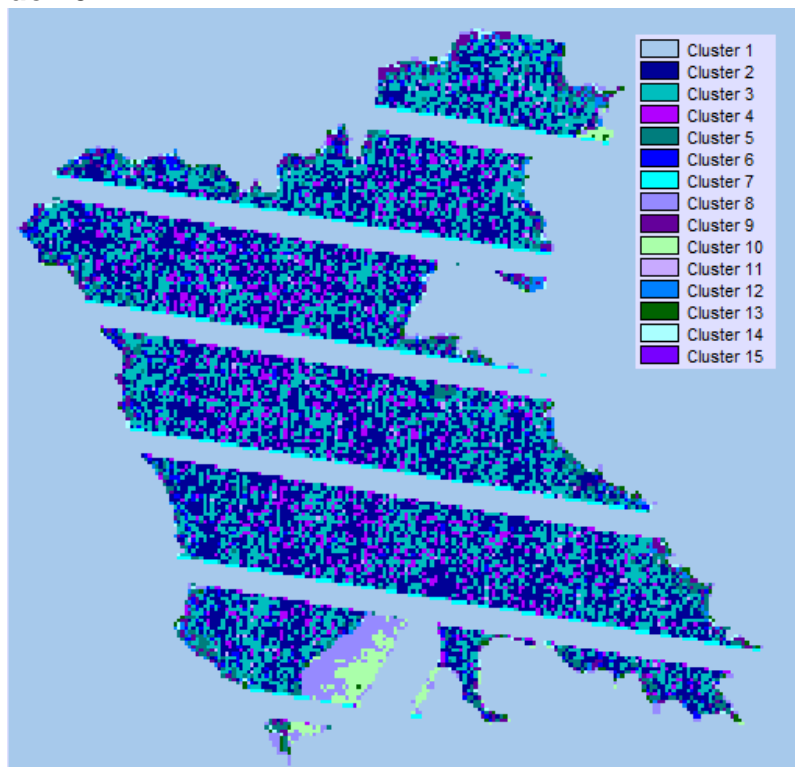
**22 de Noviembre de 2011**



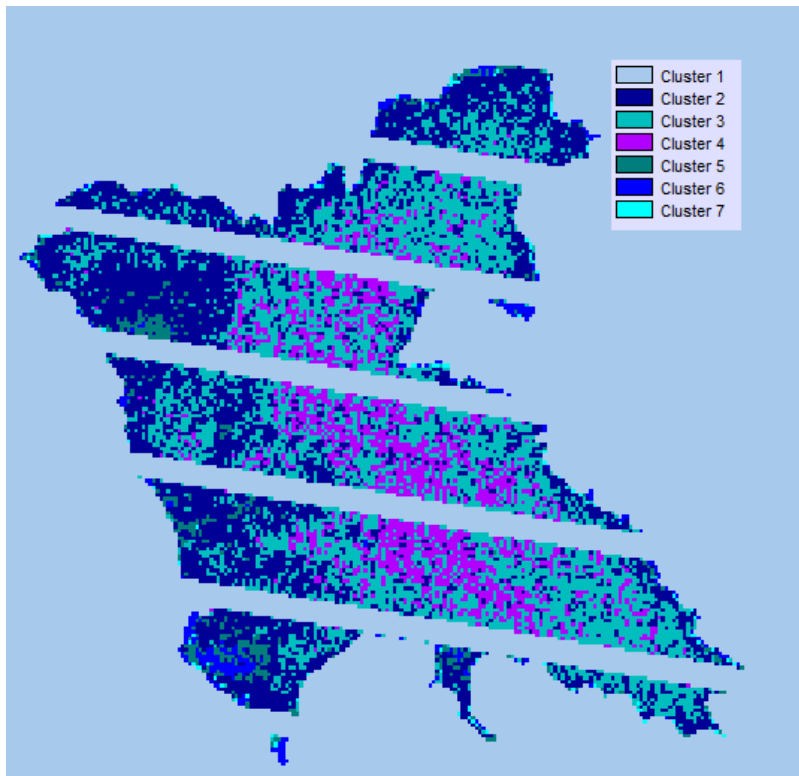
24 de Diciembre de 2011



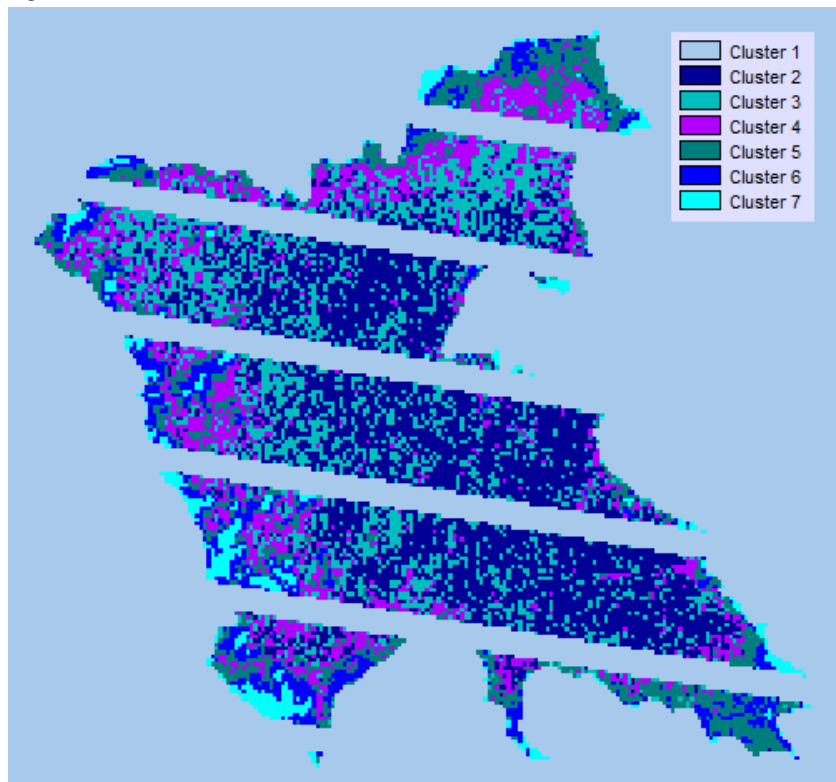
25 de Enero de 2012



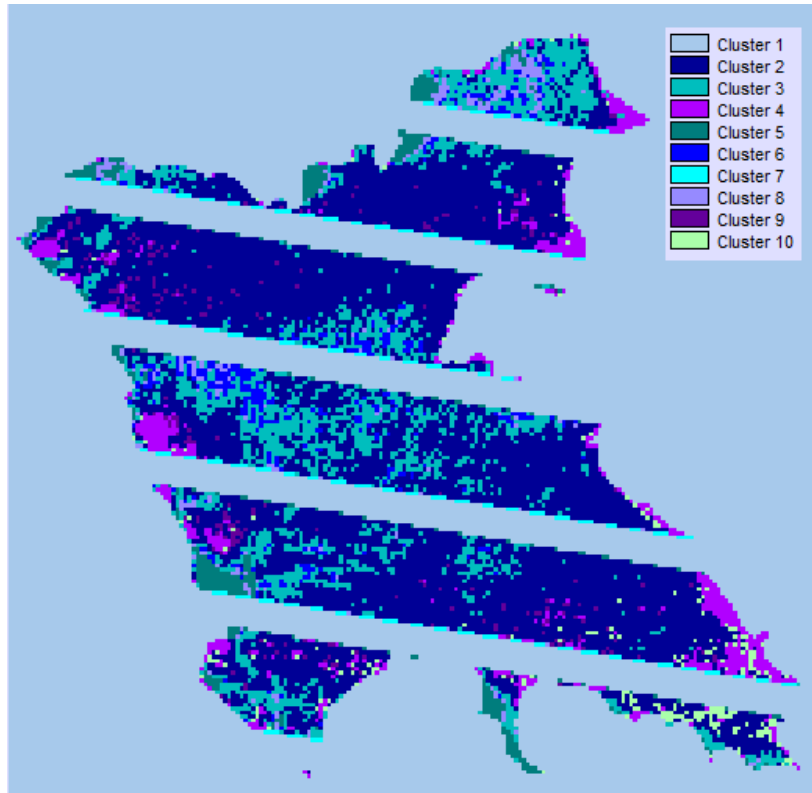
29 de Marzo de 2012



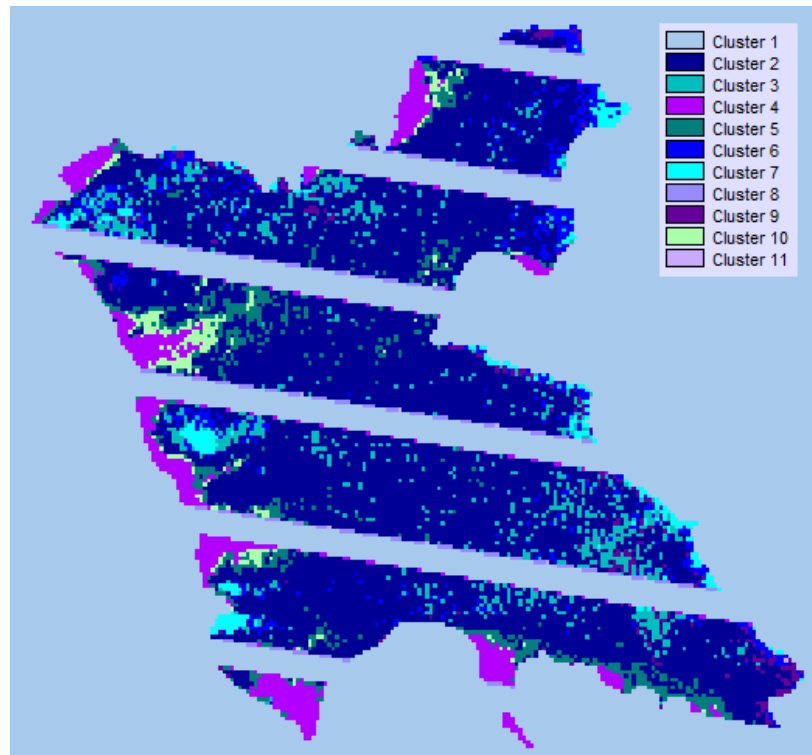
30 abril de 2012



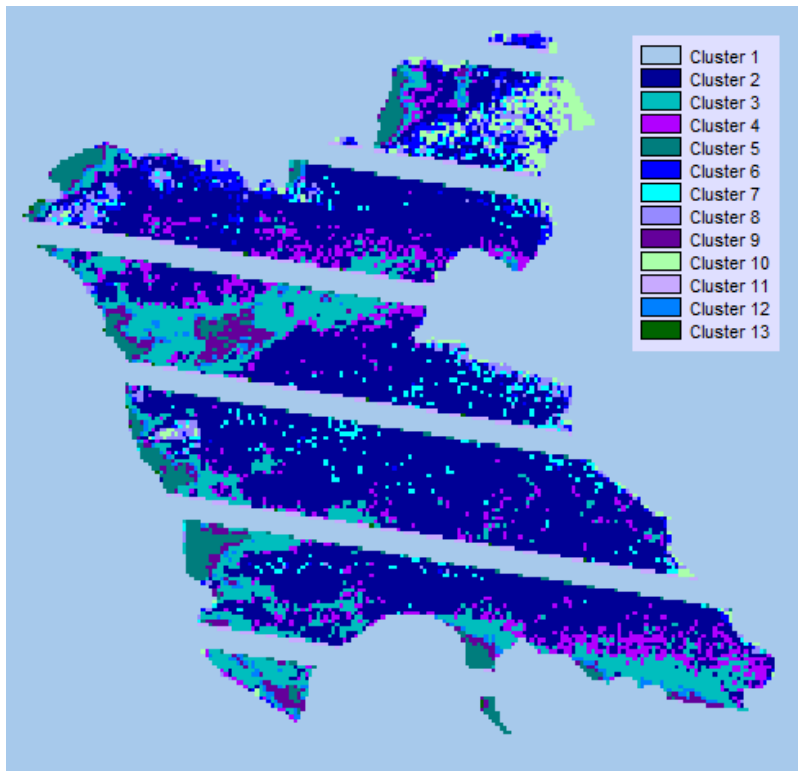
**16 de Mayo de 2012**



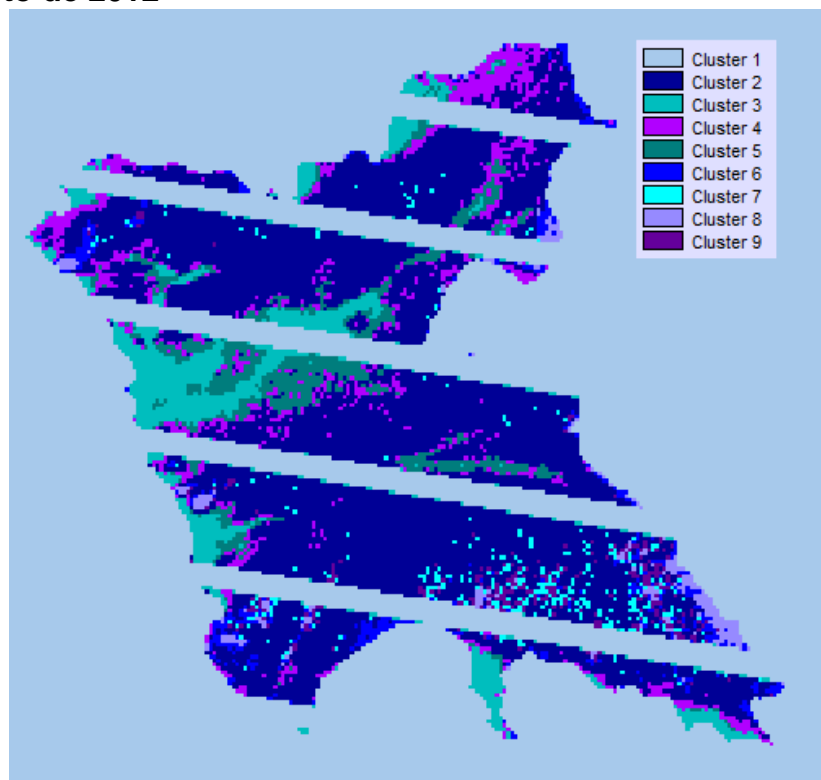
**17 de Junio de 2012**



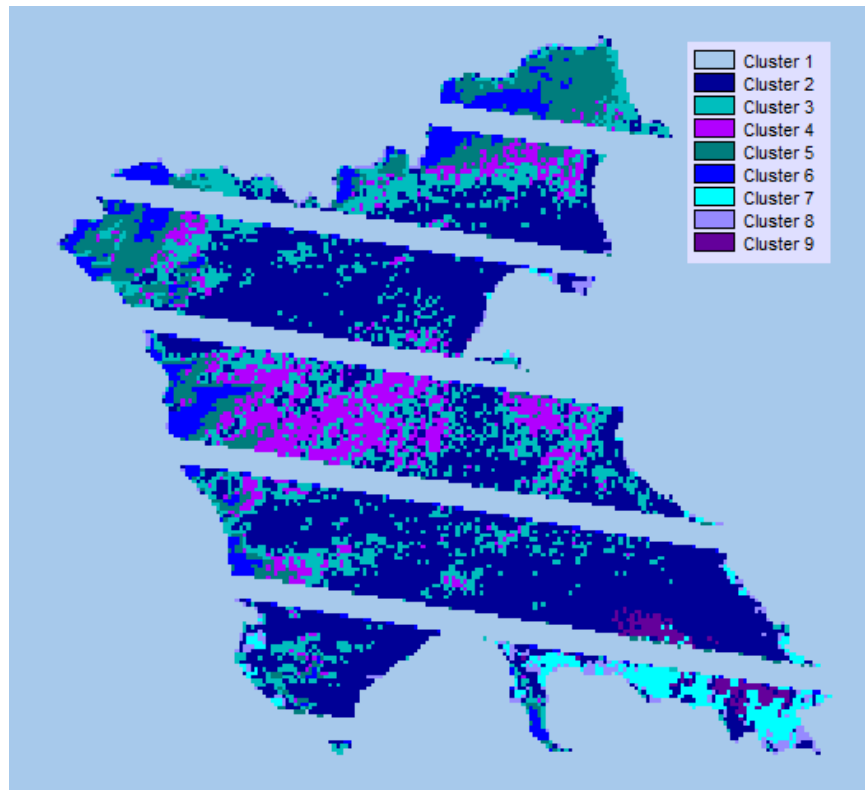
**19 de Julio de 2012**



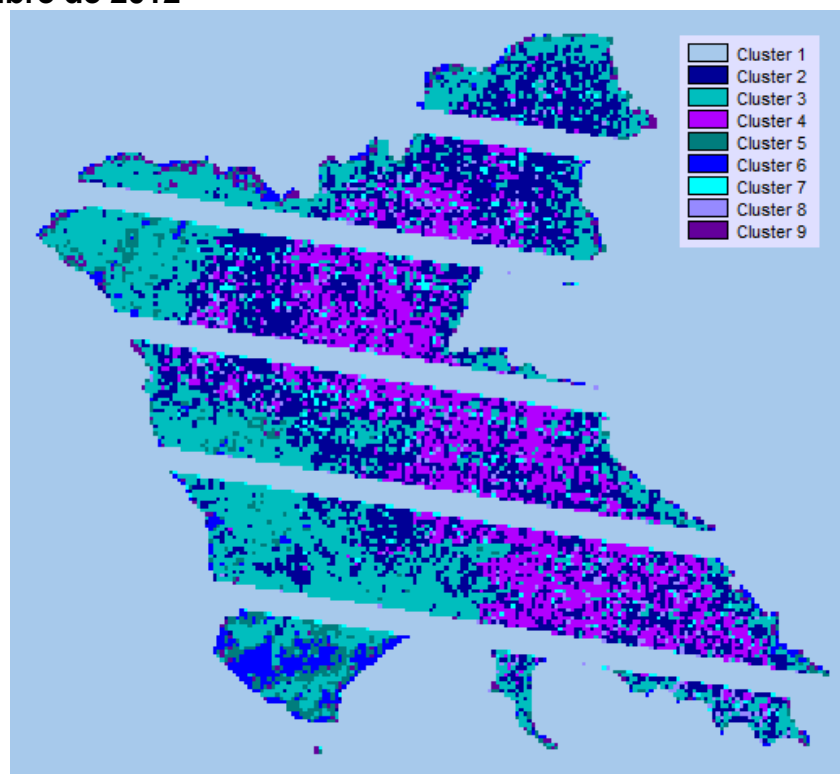
**20 de Agosto de 2012**



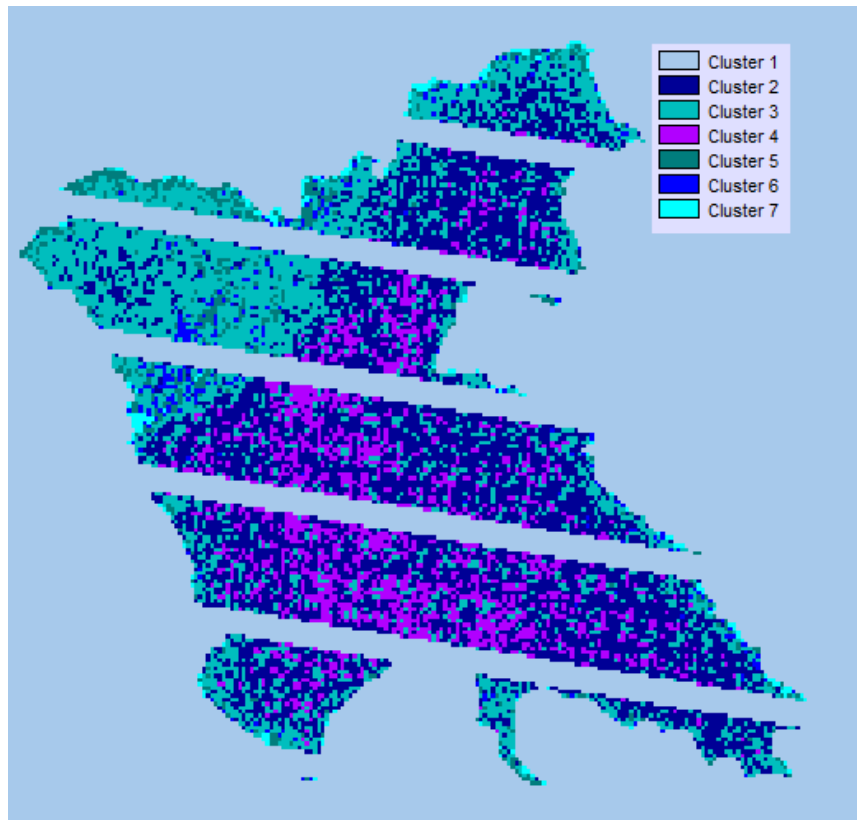
**21 de Septiembre de 2012**



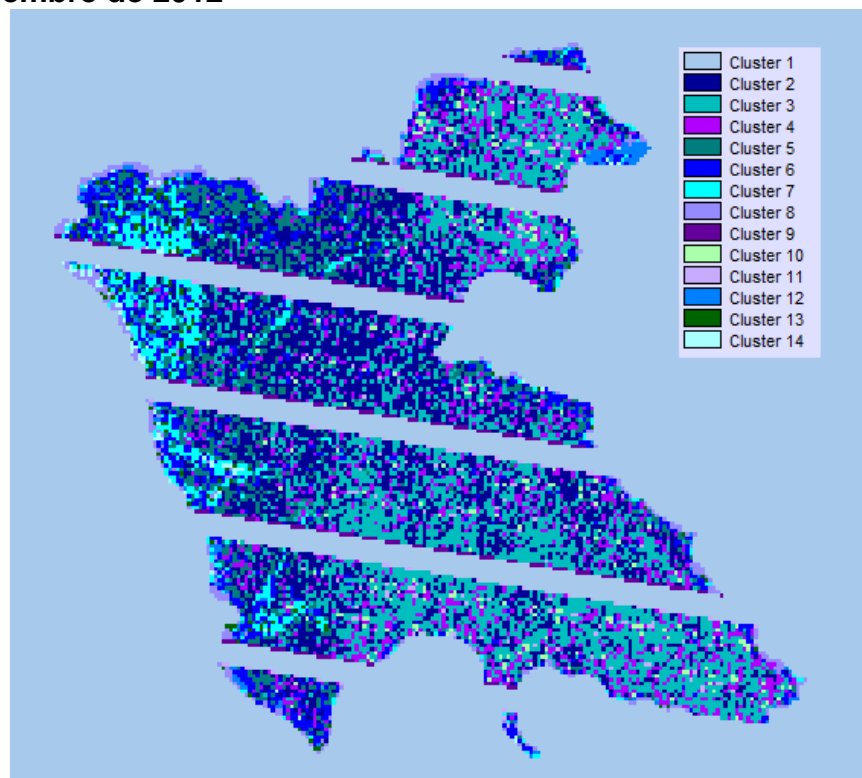
**23 de Octubre de 2012**



**24 de Noviembre de 2012**

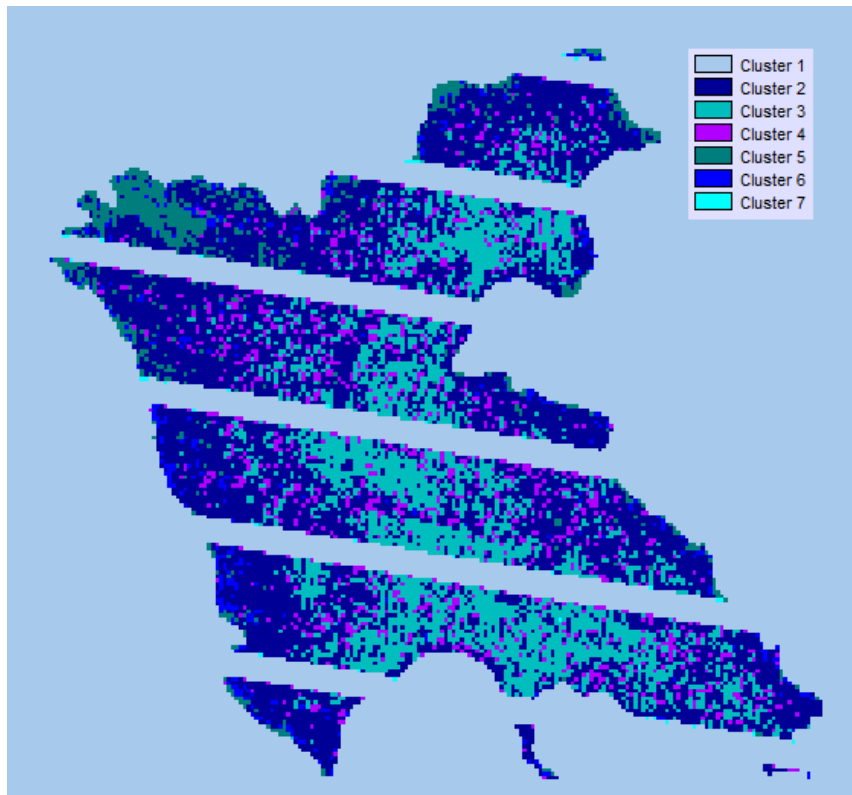


**26 de Diciembre de 2012**

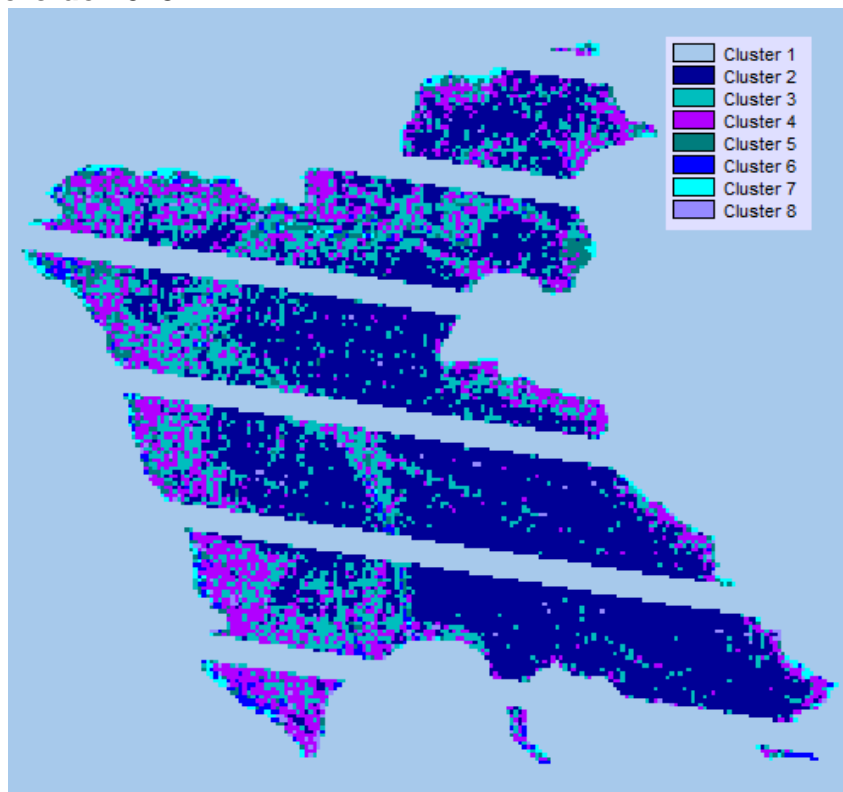




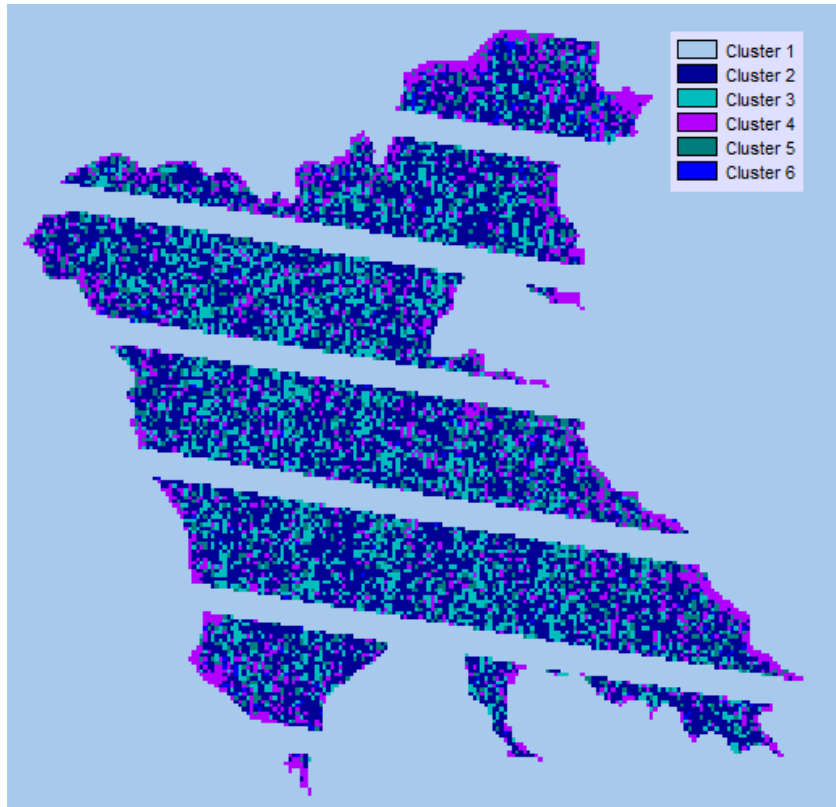
**27 de Enero de 2013**



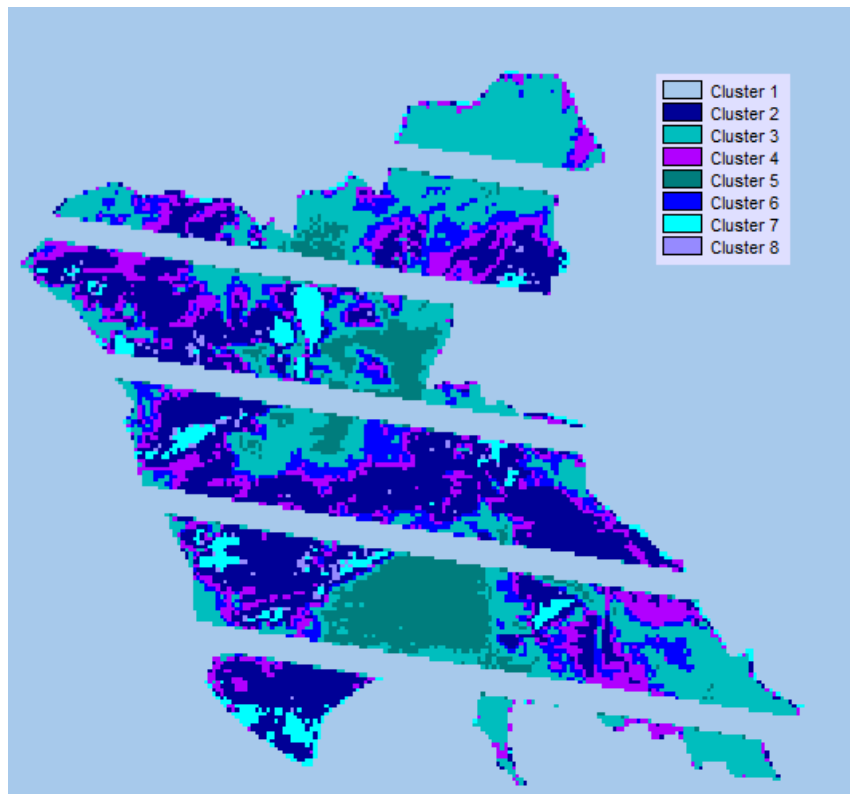
**28 de Febrero de 2013**



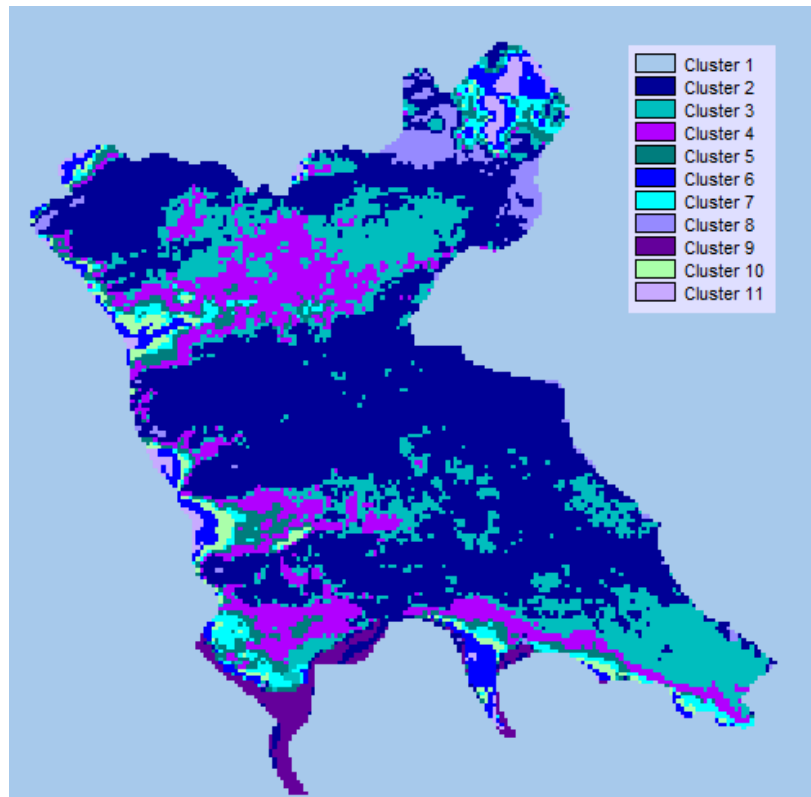
**17 de Abril de 2013**



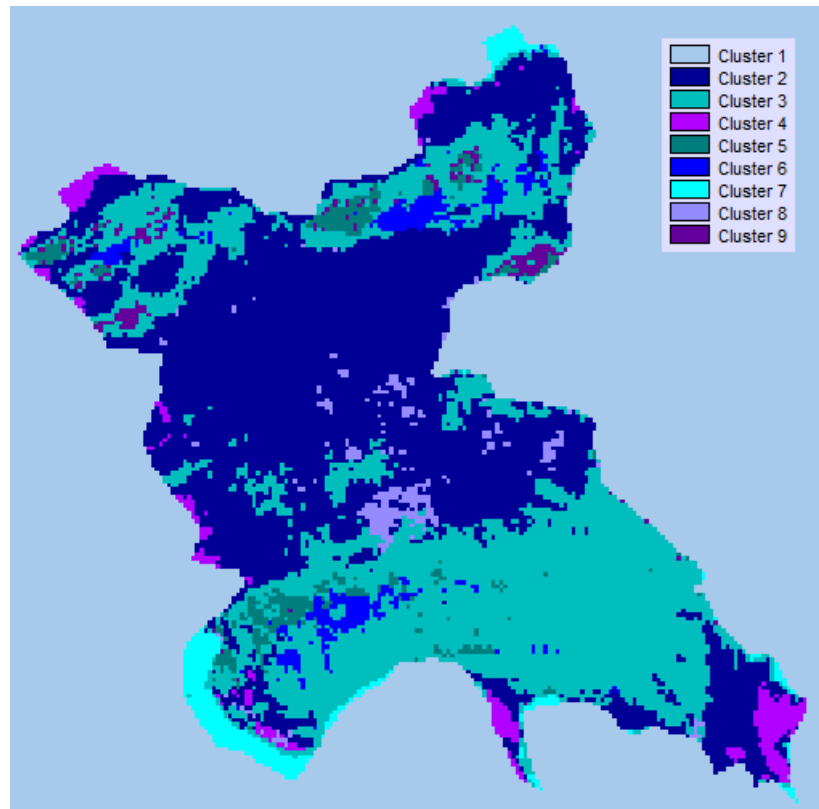
**19 de Mayo de 2013**



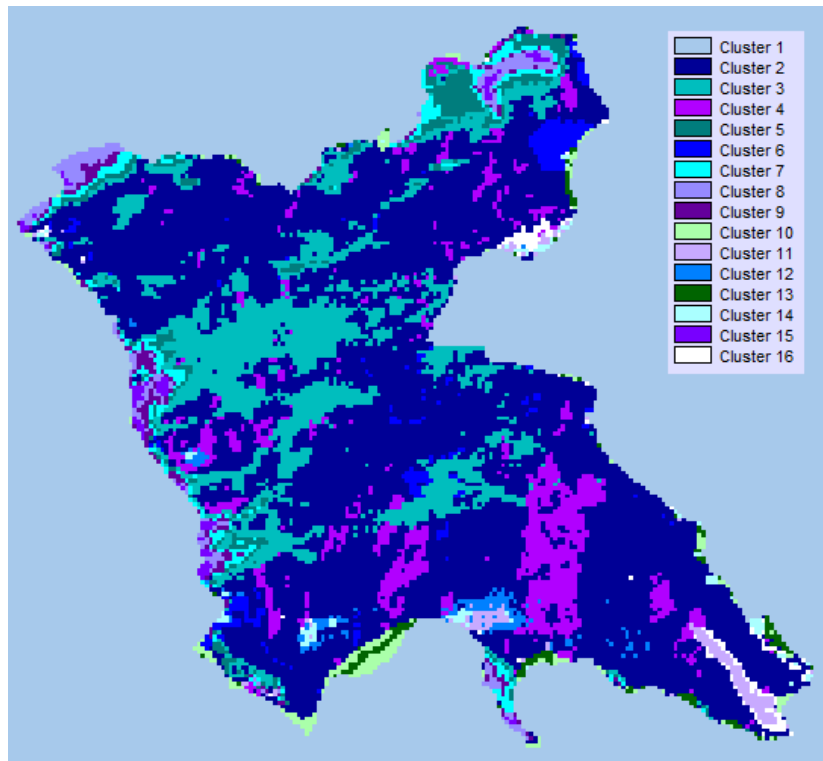
**28 de Junio de 2013**



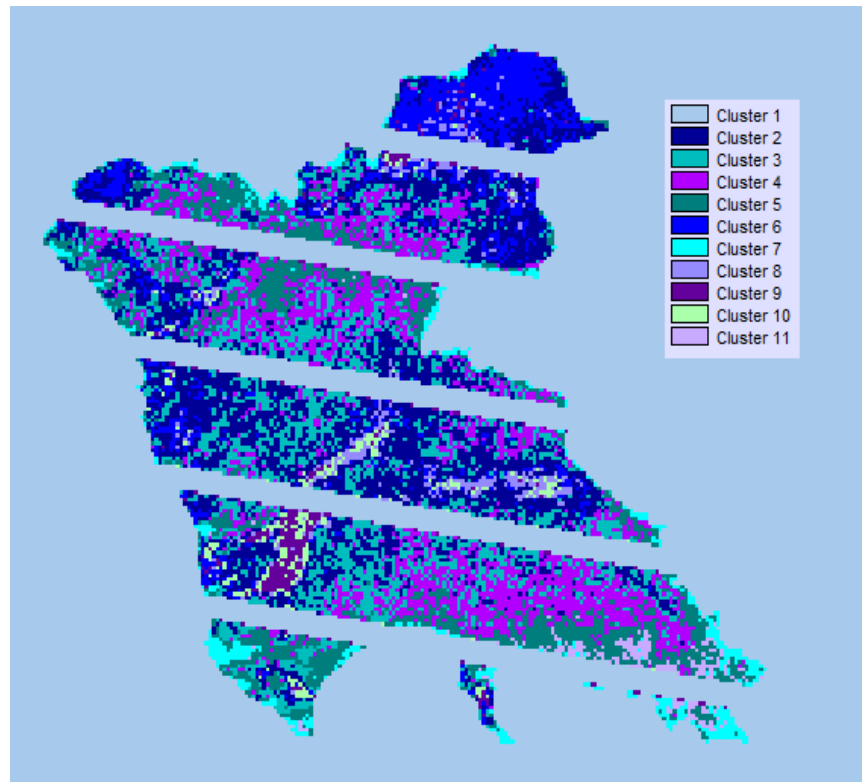
**30 de Julio de 2013**



**31 de Agosto de 2013**



**16 de Septiembre de 2013**



**ANEXO II.**  
**Resultados de laboratorio**

**Tabla 1. Concentraciones de Fósforo total.**

<b>Sitio de muestreo</b>	<b>Fósforo total (mg/L)</b>
Punto 1	0.53
Punto 2	0.37
Punto 3	0.42
Punto 4	0.59
Punto 5	0.47

**Tabla 2. Absorbancias registradas y corregidas para cada muestra.**

<b>Punto muestreo</b>	<b>Absorbancias registradas</b>			<b>Absorbancias corregidas</b>	
	<b>Lectura 750 nm</b>	<b>Lectura 664 nm</b>	<b>Lectura 647 nm</b>	<b>Lectura 664 nm</b>	<b>Lectura 647 nm</b>
<b>Punto 1.</b>	0.010	0.070	0.050	0.060	0.040
	0.005	0.070	0.050	0.065	0.045
<b>Punto 2.</b>	0.010	0.050	0.045	0.040	0.035
	0.010	0.045	0.040	0.035	0.030
<b>Punto 3.</b>	0.020	0.060	0.040	0.040	0.020
	0.020	0.055	0.035	0.035	0.015
<b>Punto 4.</b>	0.010	0.090	0.070	0.080	0.060
	0.015	0.080	0.065	0.075	0.050
<b>Punto 5.</b>	0.020	0.070	0.050	0.050	0.030
	0.010	0.065	0.045	0.055	0.035

**Tabla 3. Concentraciones obtenidas para Clorofila A.**

<b>Muestreo</b>	<b>Ca</b>	<b>CLO-A (µg/L)</b>	<b>CLO-A (µg/L)</b>
<b>Punto 1</b>	0.6666	133.32	138.67
	0.7201	144.02	
<b>Punto 2</b>	0.4342	86.83	81.48
	0.3807	76.13	
<b>Punto 3</b>	0.4526	90.52	85.17
	0.3991	79.82	
<b>Punto 4</b>	0.8806	176.12	171.38
	0.8333	166.65	
<b>Punto 5</b>	0.5596	111.92	117.27
	0.6131	122.62	

**Tabla 4. Resultados obtenidos con el equipo Multiparamétrico.**

<b>Parámetro</b>	<b>Punto 1</b>	<b>Punto 2</b>	<b>Punto 3</b>	<b>Punto 4</b>	<b>Punto 5</b>
<b>OD (mg/L)</b>	8.85	10.36	10.47	9.40	9.28
<b>pH</b>	8.69	8.31	8.55	8.69	8.69
<b>Presión (mbar)</b>	825.4	825.4	825.5	825.4	825.4
<b>Resistividad (MΩ-cm)</b>	0.0065	0.0064	0.0065	0.0066	0.0065
<b>Conductividad (μS/cm)</b>	153	155	154	152	153
<b>Tds (ppm)</b>	77	78	77	76	77
<b>Salinidad (PSU)</b>	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07
<b>ORP (mV)</b>	150.7	147.6	145.9	136.0	151.0
<b>OD (%)</b>	125.6	146.2	148.1	133.1	131.7