

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA  
LA MOLINA**

**ESCUELA DE POSGRADO  
MAESTRÍA EN ECOLOGÍA APLICADA**



**"USO DE IMÁGENES SATELITALES PARA DETERMINAR LOS  
PARÁMETROS DE CALIDAD DEL AGUA EN LOS RÍOS  
AMAZÓNICOS NESHUYA Y AGUAYTÍA - PERÚ"**

**Presentada por:  
MARÍA GIULIANA QUEZADA GARCÍA**

**TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE  
MAGISTER SCIENTIAE EN ECOLOGÍA APLICADA**

**Lima – Perú  
2020**

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA  
LA MOLINA**

**ESCUELA DE POSGRADO  
MAESTRÍA EN ECOLOGÍA APLICADA**

**USO DE IMÁGENES SATELITALES PARA DETERMINAR LOS  
PARÁMETROS DE CALIDAD DEL AGUA EN LOS RÍOS  
AMAZÓNICOS NESHUYA Y AGUAYTÍA - PERÚ**

**TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE  
MAGISTER SCIENTIAE EN ECOLOGÍA APLICADA**

**Presentada por:**

**MARÍA GIULIANA QUEZADA GARCÍA**

Sustentada y aprobada por el siguiente jurado:

.....  
Mg.Sc. Zulema Quinteros Carlos  
PRESIDENTE

.....  
Dra. Marta Williams León de Castro  
ASESOR

.....  
Dr. Roger Loyola  
MIEMBRO

.....  
M.Sc. Juan Torres G.  
MIEMBRO

*Dedico este trabajo a mi familia  
por su apoyo incondicional y  
en permitirme alcanzar  
este maravilloso sueño*

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a Dios por la vida, la oportunidad de vivir este momento, iluminar mi camino de vida y que siempre estés a mi lado.

A la Doctora Marta Williams de Castro, por el tiempo brindado en la asesoría académica de la tesis.

Al Doctor Joel Rojas y a los miembros del LABTEL por su apoyo brindado en la presente tesis.

## ÍNDICE GENERAL

|       |   |    |
|-------|---|----|
| I.    | INTRODUCCIÓN.....   | 1  |
| II.   | REVISIÓN DE LITERATURA .....  | 3  |
| III.  | MATERIALES Y MÉTODOS.....   | 19 |
|       | 3.1 SELECCIÓN DE LAS IMÁGENES SATELITALES. ....   | 20 |
|       | 3.2 PROCEDIMIENTO PARA HALLAR LOS VALORES DE LAS BANDAS 1, 2, 3 Y 4.....  | 23 |
|       | 3.3 CÁLCULO DE LOS VALORES DE LOS PARÁMETROS DE CALIDAD DE AGUA. ....   | 24 |
|       | 3.4 CÁLCULO PARA HALLAR LA CORRELACIÓN Y REGRESIÓN DE LOS DATOS DE LAS BANDAS Y LOS PARÁMETROS DE CALIDAD DE AGUA.....                              | 25 |
|       | 3.5 ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES.....  | 25 |
| IV.   | RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....  | 26 |
|       | 4.1 RESULTADOS .....  | 26 |
|       | 4.1.1 Caracterización de los ambientes acuáticos .....  | 26 |
|       | 4.1.2 Valores de las bandas 1, 2, 3 y 4.....  | 26 |
|       | 4.1.3 Valores de Demanda Bioquímica de Oxígeno (BOD), Carbono Orgánico Total (TOC), Demanda Química de Oxígeno (COD), COD mn, NH <sub>3</sub> -N    | 31 |
|       | 4.1.4 Análisis Estadístico (correlación, regresión y significancia de los datos de la banda 1, 2, 3 y 4) de los parámetros de calidad de agua. .... | 32 |
|       | 4.1.5 Análisis de Componentes Principales.....  | 41 |
|       | 4.2 DISCUSIÓN .....   | 41 |
| V.    | CONCLUSIONES.....   | 48 |
| VI.   | RECOMENDACIONES .....   | 49 |
| VII.  | REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....  | 50 |
| VIII. | ANEXO.....  | 57 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|            |  |    |
|------------|--|----|
| Figura 1.  | Efecto de la dispersión y absorción atmosférica (Adaptado de Jensen, 2004)   | 9  |
| Figura 2.  | Papel de la atmósfera en teledetección (Adaptado de Slater, 1980)            | 10 |
| Figura 3.  | Oxígeno consumido por la bacterias aerobias.                                 | 12 |
| Figura 4.  | Mapa de ubicación de las estaciones evaluadas.                               | 19 |
| Figura 5.  | Cobertura de nubes de las imágenes TM LANDSAT – 5.                           | 20 |
| Figura 6.  | Imagen satelital TM Landsat – 5 correspondiente al día 14 de julio de 1994.  | 21 |
| Figura 7.  | Imagen satelital TM Landsat – 5 correspondiente al día 9 de julio de 1998    | 22 |
| Figura 8.  | Imagen satelital TM Landsat – 5 correspondiente al 12 de julio de 2005.      | 22 |
| Figura 9.  | Imagen satelital TM Landsat – 5 correspondiente al 11 de setiembre del 2011. | 23 |
| Figura 10. | Reflectancia de la imagen correspondiente al año 1994.                       | 29 |
| Figura 11. | Reflectancia de la imagen correspondiente al año 1998.                       | 29 |
| Figura 12. | Reflectancia de la imagen correspondiente al año 2005.                       | 30 |
| Figura 13. | Reflectancia de la imagen correspondiente al año 2011.                       | 30 |
| Figura 14. | Modelo y $R^2$ de la banda 2 para BOD.                                       | 33 |
| Figura 15. | Modelo y $R^2$ de la banda 2 para COD.                                       | 34 |
| Figura 16. | Modelo y $R^2$ de la banda 1 para COD de 4 bandas.                           | 35 |
| Figura 17. | Modelo y $R^2$ de la banda 2 para TOC.                                       | 36 |
| Figura 18. | Modelo y $R^2$ de la banda 2 para CODmn.                                     | 37 |
| Figura 19. | Modelo y $R^2$ de la banda 4 para $\text{NH}_3\text{-N}$ .                   | 38 |
| Figura 20. | Gráfico biplot de los scores de los componentes principales.                 | 41 |

## ÍNDICE DE CUADROS

|            |  |    |
|------------|--|----|
| Cuadro 1.  | Características de las bandas del satélite LANDSAT -5 .....  | 7  |
| Cuadro 2.  | Aplicaciones de la combinación de bandas de LANDSAT-5.....   | 8  |
| Cuadro 3.  | Ubicación de las estaciones de muestreo.....   | 20 |
| Cuadro 4.  | Listado y descripción del nombre de las imágenes.....  | 21 |
| Cuadro 5.  | Resumen de la caracterización de los ríos de la cuenca del río Aguaytía. ....  | 26 |
| Cuadro 6.  | Valores de las bandas 1, 2, 3 y 4 de cada estación de la imagen TM Landsat -5<br>.....                               | 28 |
| Cuadro 7.  | Valores de la BOD, COD, TOC, COD mn y NH <sub>3</sub> -N.....  | 31 |
| Cuadro 8.  | Correlación de las bandas 1, 2 y 3 con la Demanda Bioquímica de Oxígeno.<br>.....                                    | 32 |
| Cuadro 9.  | Análisis de correlación de los datos de Demanda Química de Oxígeno (COD)<br>de 3 bandas .....                        | 33 |
| Cuadro 10. | Análisis de correlación de las cuatro bandas y el valor de COD. ....   | 34 |
| Cuadro 11. | Análisis de correlación de los datos de Carbono Orgánico Total de 3 bandas<br>.....                                  | 35 |
| Cuadro 12. | Análisis de correlación de los datos de CODmn de 4 bandas.....   | 36 |
| Cuadro 13. | Análisis de correlación de los valores de la bandas 1, 2, 3,4 y NH <sub>3</sub> -N.....                              | 37 |
| Cuadro 14. | Nuevos valores de Demanda Bioquímica de Oxígeno y Demanda Química de<br>Oxígeno según los modelos de regresión ..... | 39 |
| Cuadro 15. | Excedente, factor y valores del ICA para la Categoría 1-A3 .....   | 40 |
| Cuadro 16. | Excedente, factor y valores de ICA para la categoría 4-E2.....   | 40 |

## ÍNDICE DE ANEXOS

|  |     |
|--|-----|
| Anexo 1. Nombre y fecha de las imágenes disponibles en la web de USGS .....  | 57  |
| Anexo 2. Fecha y Cobertura de nubes de la imágenes disponibles en la web de USGS.....  | 63  |
| Anexo 3. Manual de uso del software ENVI para hallar la reflectancia de los valores de la banda 1, 2, 3 y 4 del satélite Landsat 5 sensor TM ..... | 68  |
| Anexo 4. Análisis estadísticos de BOD, COD, TOC, CODmn y NH3-N .....   | 107 |
| Anexo 5. Índice de Calidad de Agua (ICA) .....   | 115 |
| Anexo 6. Analisis de Componentes Principales .....   | 117 |

## RESUMEN

Los ecosistemas acuáticos son ambientes naturales que están en constante cambio y esto es debido a las variaciones físico-químicas que pueda ocurrir en el agua, estas variaciones físico-químicas son conocidas como parámetros de calidad de agua. Existen métodos tradicionales para su medición, pero con el transcurrir del tiempo han surgido otros métodos como es el caso de las imágenes satelitales. Los parámetros de calidad de agua que han sido evaluados con imágenes satelitales son la profundidad del disco Secchi, las concentraciones de clorofila, la carga de pigmento, los sedimentos totales suspendidos, la temperatura, Demanda Bioquímica de Oxígeno (BOD), Demanda Química de Oxígeno (COD), Carbono Orgánico Total (TOC), Índice de Permanganato (COD<sub>mn</sub>) y Nitrógeno Amoniacal. Las imágenes satelitales pueden proporcionar información muy valiosa ya que puede obtener información de lugares remotos y datos en un tiempo pasado que no han sido colectados *in situ*. El propósito de la presente tesis fue demostrar que el uso de imágenes satelitales puede determinar los valores de calidad de agua de los ríos Neshuya y Aguaytía. Diferentes autores han propuesto métodos haciendo uso de imágenes satelitales, en esta investigación estamos usando el método de correlación y regresión múltiple. Los parámetros evaluados fueron Demanda Bioquímica de Oxígeno (BOD), Demanda Química de Oxígeno (COD), Carbono Orgánico Total (TOC), Índice de Permanganato (COD<sub>mn</sub>) y Nitrógeno Amoniacal. El análisis de los datos mostró que BOD, COD y TOC tiene un coeficiente de correlación igual a uno es decir tienen una correlación perfecta con la reflectancia de la imagen. Esto quiere decir que se puede determinar los parámetros de calidad de agua haciendo uso de las imágenes satelitales. Finalmente, aunque los datos satelitales pueden usarse para reflejar los parámetros de calidad del agua, esta técnica es valioso e importante para áreas remotas donde el acceso directo no es fácil y donde el costo de la muestra y el análisis de laboratorio es alto, se debe enfatizar que esta técnica no puede sustituir los métodos tradicionales porque algunos parámetros de la calidad del agua, como metales pesados, nitrato, el fosfato y los contaminantes orgánicos no se pueden determinar por teledetección.

Palabras claves: Landsat 5, ríos Neshuya, río Aguaytía, calidad de agua.

## ABSTRACT

Aquatic ecosystems are natural environments that are constantly changing and this is due to the physicochemical variations that may occur in the water, these physicochemical variations are known as water quality parameters. There are traditional methods for its measurement, but with the passage of time other methods have emerged such as satellite images. Water quality parameters that have been evaluated with satellite images are Secchi disk depth, chlorophyll concentrations, pigment loading, total suspended sediments, temperature, Biochemical Oxygen Demand (BOD), Chemical Oxygen Demand (COD), Total Organic Carbon (TOC), Permanganate Index (COD<sub>mn</sub>) and Ammoniacal Nitrogen. Satellite images can provide very valuable information since you can obtain information from remote locations and data in a past time that have not been collected *in situ*. The purpose of this thesis was to demonstrate that the use of satellite images can determine the water quality values of the Neshuya and Aguaytía rivers. Different authors have proposed methods using satellite images, in this investigation we are using the method of correlation and multiple regression. The parameters evaluated were Biochemical Oxygen Demand (BOD), Chemical Oxygen Demand (COD), Total Organic Carbon (TOC), Permanganate Index (COD<sub>mn</sub>) and Ammoniacal Nitrogen. The analysis of the data showed that BOD, COD and TOC have a correlation coefficient equal to one, that is, they have a perfect correlation with the reflectance of the image. This means that the water quality parameters can be determined using satellite images. Finally, although satellite data can be used to reflect water quality parameters, this technique is valuable and important for remote areas where direct access is not easy and where the cost of the sample and laboratory analysis is high, it should be emphasized that this technique cannot replace traditional methods because some water quality parameters, such as heavy metals, nitrate, phosphate and organic pollutants cannot be determined by remote sensing.

Keywords: Landsat 5, Neshuya rivers, Aguaytía river, water quality.

## I. INTRODUCCIÓN

En la última década se han ido desarrollando a nivel mundial programas, planes de manejo e investigación sobre la conservación y cuidado del agua. El agua es un recurso vital para el ambiente y la vida ya que gracias a ella muchos de los recursos naturales que existen ahora se deben a su presencia. Pero para que estos recursos naturales puedan existir, el agua debe estar en sus óptimas condiciones, es decir con buena calidad de agua. Si se hace una revisión sobre los proyectos científicos, programas y planes sobre el cuidado del agua a nivel mundial se podrá observar que países como Estados Unidos, China, Inglaterra, Holanda, Francia, México y Chile poseen datos de calidad de agua de hace más de 10 años atrás, es decir los miembros de estos países han trabajado arduamente en monitorear la calidad de agua de sus ríos, mares, lagos, lagunas y quebradas (Rudorff *et al.*, 1996; Wang *et al.*, 2011; Wang *et al.*, 2012). Los métodos que han empleado: son colecta de datos *in situ* y datos de imágenes satelitales. En el Perú el método comúnmente utilizado es la colecta de datos *in situ*, pero esta colecta de datos se ha ido realizando esporádicamente, no de manera permanente, es decir no se han realizado monitoreos continuos de calidad de agua de los cuerpos de agua del Perú. Generalmente, los datos han sido obtenidos de los monitoreos de proyectos ejecutados por las empresas mineras, petroleras e industriales, los cuales, una vez culminados no continúan con el monitoreo de calidad de agua. Estos vacíos de datos provocan que no se tenga conocimiento de cómo ha sido y es la calidad de agua de los ríos, lagos, lagunas y quebradas en el transcurrir del tiempo. Además, se hubiera podido realizar correlaciones con las imágenes satelitales, pero esto no se ha efectuado debido a los vacíos de información de los datos *in situ*. Para llenar estos vacíos de información se propuso en la presente de tesis el objetivo “Demostrar que el uso de imágenes satelitales permite estimar los valores de calidad de agua de los ríos Amazónicos: Caso de los ríos Aguaytía y Neshuya” como un método alternativo que demuestre que el uso de imágenes satelitales permita estimar los valores de calidad de agua de los ríos Amazónicos: Caso de los ríos Aguaytía y Neshuya. Para obtener los datos de parámetros de calidad de agua se utilizó las imágenes del satélite LANDSAT del sensor TM (Thematic Mapper). Se

trabajó con la reflectancia de las imágenes en las bandas 1, 2, 3 y 4 y se realizó la correlación de datos, la regresión de los valores de los parámetros de Carbono Orgánico Total (TOC), Oxígeno Químico Demandado (COD) y Oxígeno Bioquímico Demandado (BOD), Índice de Permanganato (COD<sub>mn</sub>) y Nitrógeno amoniacal (NH<sub>3</sub>-N). Luego se procedió a realizar un análisis de varianza (ANOVA) que determinó la significancia de los datos. Este análisis de datos permitió conocer si los datos de las bandas y los parámetros de calidad de agua son significativos y el resultado fue significativo, es decir se pudo concluir que el uso de imágenes satelitales es un método alternativo para calcular datos de calidad de agua para ríos amazónicos.

## II. REVISIÓN DE LITERATURA

El presente estudio fue desarrollado en la cuenca del río Aguaytía. Una cuenca hidrográfica es un territorio drenado por un único sistema de drenaje natural, es decir, que conduce sus aguas al mar a través de un único río, o que vierte sus aguas a un único lago endorreico. Una cuenca hidrográfica es delimitada por la línea de las cumbres, también llamada divisoria de aguas. La cuenca puede subdividirse de varias formas. Una forma de dividirla es de clara aplicación en las cuencas andinas y está basada en la elevación relativa de sus partes, lo que da lugar a las cuencas altas, medias y bajas. La primera; conocida como cabecera de la cuenca, cuenca de recepción, cuenca húmeda o imbrífera, es la parte de la cuenca que capta y almacena agua en los nevados y glaciares de sus cumbres y en las lagunas y represamientos de sus altiplanicies. Es la mayor parte de los aportes de la precipitación y tiene una cobertura vegetal típica de pastos o bosques y menos presión demográfica. La parte media de la cuenca, de mayor pendiente relativa, tiene un caudal caracterizado por torrentes turbulentos y se le denomina también zona de transporte de sedimento o de escurrimiento. La parte baja de la cuenca, es de menor pendiente relativa, tiene un caudal de flujo continuo, un cauce definido y una amplia planicie de inundación. Suele llamarse zona de deyección o zona de depósito, en esta parte el uso de la tierra es predominantemente agrícola, con gran presión poblacional, extensas áreas urbanas e importante demanda de agua (IPROGA 1996). La cuenca del río Aguaytía se encuentra ubicada en la Amazonía peruana y está dividida en dos partes: selva alta y selva baja, y tiene como límites la elevación de 600 msnm (ONERN 1986).

La cuenca del río Aguaytía cubre una superficie aproximada de 1'762,086 ha., equivalente al 17.21% de la Región Ucayali, siendo ocupada por cerca de 360,000 habitantes. Según el estudio de Zonificación Ecológica y Económica de la Cuenca del río Aguaytía (Rodríguez 1998) su territorio comprende mayormente selva baja, y se halla recorrida por una extensa red hidrográfica conformada por los ríos Ucayali, Aguaytía y sus respectivos tributarios. El eje central de la cuenca constituye el río Aguaytía y un sector del río Ucayali y la carretera Federico Basadre, entre Pucallpa y el Boquerón del Padre Abad. En gran parte del área el relieve es plano, constituido por terrazas, mientras que en algunos sectores predomina el

relieve ondulado. La zona de la cuenca adyacente a la vertiente oriental de la cordillera de los Andes presenta un paisaje montañoso.

La hidrografía del sector oriental de faja subandina (o selva alta) presenta ríos torrentosos de curso corto. Este sería el caso de los que se extienden al sur de la provincia de Padre Abad: Yurac o Yuracyacu, Agua, Nova y Chanantía. De estos ríos, el Yurac o Yuracyacu es el más conocido, pues al atravesar el sector oriental de faja subandina que se encuentra al este de la Cordillera Azul, forma una de las manifestaciones geográficas más impresionantes: el Boquerón del Padre Abad. El Boquerón del Padre Abad constituye el límite entre Huánuco (provincia de Leoncio Prado) y Ucayali (provincia de Padre Abad). El río Yuracyacu, aprovechando una falla geológica, erosiona y profundiza su cauce, para proseguir su curso hacia el oriente y terminar por encontrarse con el río Aguas, formando el río Aguaytía, cerca de la localidad del mismo nombre (Garayar et al. 2003). Sobre el río Aguaytía se ha construido el puente más largo del Perú. Este puente mide 800 metros de longitud, por donde pasa la carretera Federico Basadre que conecta las ciudades de Pucallpa con Lima.

La cuenca del río Aguaytía, en la selva baja peruana, geológicamente, forma parte de la región del antearco amazónico, la cual se caracteriza por acciones de levantamiento o de hundimiento y acumulación de los depósitos fluviales a largo plazo. El paisaje de la cuenca del antearco en el Perú está constituido por áreas de tierra firme no inundable, que están sujetas a la denudación y a la incisión de los ríos, así como de amplias áreas de inundación. Las planicies de inundación y acumulación de los sedimentos más grandes están situadas en las depresiones dentro de la cuenca de antearco, también denominadas como subcuencas de antearco de Pastaza- Marañón, Ucayali, Acre y Madre de Dios-Beni (Decelles y Hertel 1989). Las subcuencas de antearco son las unidades más prominentes del paisaje en la Amazonia peruana. En estas depresiones el hundimiento se caracteriza por ríos de canales móviles que influyen la tasa de sedimentación y la amplitud del área que se inunda durante las épocas de crecientes. En la estación de lluvias especialmente en las subcuencas de Pastaza-Marañón y Ucayali, se forman enormes regiones inundadas (ONERN 1986). La inclinación tectónica puede provocar la migración de los ríos en una determinada dirección. Inclusive, secciones completas de llanuras meándricas han sido cubiertas por vegetación pantanosa.

El río Aguaytía posee afluentes como el río San Alejandro, tributario por su margen derecha. Los ríos Juantia, Gradayacu y Santa Ana, son afluentes por la margen izquierda. De ahí la

divisoria prosigue con dirección SO-NE, formando parte de las estribaciones que sirven de cabecera a los ríos Aguaytía, San Alejandro y Oruya. Más hacia el NE, la demarcatoria vuelve a disminuir en altitud al acercarse al llano amazónico y, esto sucede aproximadamente a 17 km de la ciudad de Pucallpa (PEISA 2003).

El río Aguaytía y sus tributarios, presentan características típicas de hábitats de selva baja y selva alta, con aguas de tipo clara, negra y clara/blanca. Las aguas blancas acarrear mayor cantidad de sales y son usualmente muy productivas. Presentan un color semejante al café con leche, debido a la gran cantidad de sólidos suspendidos. La reacción de las aguas es neutra. Los ríos de agua negra son pobres en sólidos suspendidos, pero muy ricos en sustancias húmicas. Por ello el color es similar al café negro; con pH ácido y contienen poca cantidad de elementos nutritivos. Los ríos de agua clara son pobres, tanto en sólidos en suspensión como en sustancias húmicas, sus aguas son transparentes, normalmente de un color verdoso y de pH variable. Las aguas negras y claras son poco productivas (Sioli 1984; Lowe-McConnell 1999; Kalliola y Puhakka 1993).

### **Satellite Lansat 5 y sensor TM**

Los programas espaciales dedicados a la observación de la tierra tienen su inicio en el año de 1972 con el lanzamiento del satélite ERTS 1, Earth Resources Tecnology Satellite (Satélites de Tecnología de Recursos terrestres), y posteriormente los restantes recibieron el nombre de LANDSAT (LAND = tierra y SAT = satélite). Se entiende por plataforma, los satélites (LANDSAT, METEOSAT, NOAA, SPOT) o aviones que transportan los aparatos necesarios (sensores) para captar, almacenar y transmitir imágenes a distancia. Un sensor es el aparato que reúne la tecnología necesaria para captar imágenes a distancia y que es transportado en una plataforma. Puede captar información en diferentes regiones del espectro y cada una de estas regiones se denomina banda.

La constelación LANDSAT está formada por 7 satélites que provenían, tanto conceptual como estructuralmente, de los satélites para fines meteorológicos, Nimbus que llevaron a bordo diferentes instrumentos, siempre con la filosofía de captar mayor información de la superficie terrestre, con mayor precisión y a mayor detalle. De ahí sus mejoras radiométricas, geométricas y espaciales.

Actualmente sólo se encuentran activos el LANDSAT 5 y 7, que son administrados por la NASA (National Space and Space Administration), en tanto que la producción y comercialización de las imágenes dependen del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS). La fecha de lanzamiento del LANDSAT – 5 fue el 1 de marzo de 1984 y actualmente se encuentra en operación. El satélite LANDSAT 5 posee el sensor TM, es un avanzado sensor de barrido multiespectral, concebido para proporcionar una mayor resolución espacial, mejor discriminación espectral entre los objetos de la superficie terrestre, mayor fidelidad geométrica y mayor precisión radiométrica en relación con el sensor MSS. Opera simultáneamente con siete bandas espectrales, siendo tres en el visible, uno en el infrarrojo cercano, dos en el infrarrojo medio y una en el infrarrojo termal. Tiene una resolución espacial de 30 metros en las bandas del visible e infrarrojo medio y 120 metros en la banda del infrarrojo termal. La escena terrestre registrada por este sensor es también de 185 km.

Las imágenes LANDSAT están compuestas por 7 u 8 bandas espectrales, que fueron elegidas especialmente para el monitoreo de la vegetación, para aplicaciones geológicas y para el estudio de los recursos naturales. Estas bandas pueden combinarse produciendo una gama de imágenes de color que incrementan notablemente sus aplicaciones. Las características y combinación de bandas se muestran en el Cuadro 1 y 2.

**Cuadro 1. Características de las bandas del satélite LANDSAT -5**

| <b>MODO ESPECTRAL</b> | <b>ESPACIAL (metros)</b> | <b>ESPECTRAL (micras)</b>     |             | <b>RADIOMETRICA</b> | <b>TEMPORAL</b> |
|-----------------------|--------------------------|-------------------------------|-------------|---------------------|-----------------|
| Multiespectral        | 30                       | Banda 1 azul                  | 0.45-0.52   | 8 BITS              | 16 días         |
|                       |                          | Banda 2 verde                 | 0.52 – 0.60 |                     |                 |
|                       |                          | Banda 3 rojo                  | 0.63 – 0.69 |                     |                 |
|                       |                          | Banda 4 Infrarrojo cercano 1: | 0.76 – 0.90 |                     |                 |
|                       |                          | Banda 5 Infrarrojo cercano 2: | 1.55 – 1.75 |                     |                 |
|                       |                          | Banda 7 Infrarrojo medio      | 2.08 – 2.35 |                     |                 |
| Termal                | 120                      | Banda 6 Infrarrojo térmico    | 10.4 – 12.5 |                     |                 |

**Cuadro 2. Aplicaciones de la combinación de bandas de LANDSAT-5.**

| COMBINACIÓN DE BANDAS | APLICACIONES   | EJEMPLO   |
|-----------------------|--|---|
| 1, 2 Y 3              | <p>Esta combinación que utiliza solo las bandas de la porción visible del espectro electromagnético, es la que más se aproxima a los colores reales. Es ideal para realzar información del agua: turbidez, corrientes y sedimentos en suspensión. En esta imagen las tonalidades de color azul claro representan aguas costeras y con sedimentos en suspensión, mientras que los tonos azul oscuro representan aguas más profundas y con pocos sedimentos en suspensión. Las áreas urbanas aparecen en tonalidades marrón claro y la vegetación en tonos verdes.</p> |    |
| 2, 3, 4               | <p>La banda 4 (infrarrojo cercano) es útil para identificar los límites entre el suelo y el agua. Los cuerpos de agua con sedimentos en suspensión aparecen en tonos azul claro y los que poseen pocos sedimentos en suspensión en azul oscuro. Las áreas urbanas y el suelo expuesto aparecen en tonos azules. También la banda 4 es sensible a la clorofila, permitiendo que se observen variaciones de la vegetación, que aparecen en tonos rojos.</p>  |   |
| 3, 4, 5               | <p>Esta combinación con dos bandas en la región del infrarrojo muestra una mayor diferenciación entre el suelo y el agua. La vegetación se muestra en diversas tonalidades de verde y rosa, que varían en función del tipo y de las condiciones de ubicación. Las áreas urbanas y el suelo expuesto se presentan en tonos rosados. El agua, independiente de la cantidad de sedimentos en suspensión, aparece en negro.</p>  |  |
| 3, 5, 4               | <p>Esta combinación, con una banda en la región visible y dos en la del infrarrojo, utiliza las mismas bandas de la combinación 3, 4 y 5; sin embargo, asociadas a colores diferentes, permitiendo una diferenciación de la vegetación en tonos marrones, verdes y amarillos. Las áreas urbanas y los suelos expuestos aparecen en tonos de azul claro, mientras que las áreas inundadas y el agua aparecen en tonos azul oscuros.</p>   |  |

## Influencia de la atmósfera en la teledetección

La radiación electromagnética se ve notablemente afectada por distintos componentes presentes en la atmósfera. Como estos componentes dispersan o absorben en diferentes longitudes de onda (Figura 2) se hace difícil la observación remota de la superficie terrestre.

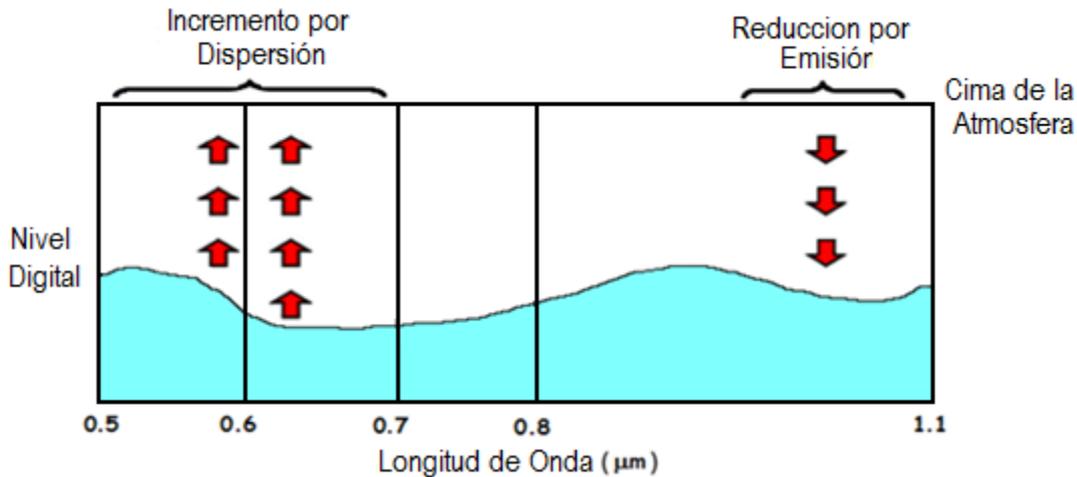


Figura 1. Efecto de la dispersión y absorción atmosférica, adaptado de Jensen (2004)

Es conveniente considerar que la radiancia detectada por los sensores está en función de los ángulos polar, azimutal y de elevación solar, para un intervalo en longitud de onda y un IFOV. La medida que hace el sensor involucra una radiación propia de la superficie terrestre, la emitancia espectral de la cubierta y una contribución por la absorción o dispersión de flujo radiante desde el Sol. Como se muestra en la Figura 2, el flujo de radiación electromagnética sufre una serie de procesos los cuales son: (A) Pérdida o escalaje de la cantidad e intensidad del flujo incidente. (B) Dispersión del flujo incidente en dirección de la superficie. (C) Dispersión del flujo incidente en dirección del campo de visión. (D) Dispersión del flujo reflejado en dirección del campo de visión. (E) Radiación emitida por otras cubiertas en dirección del campo de visión.

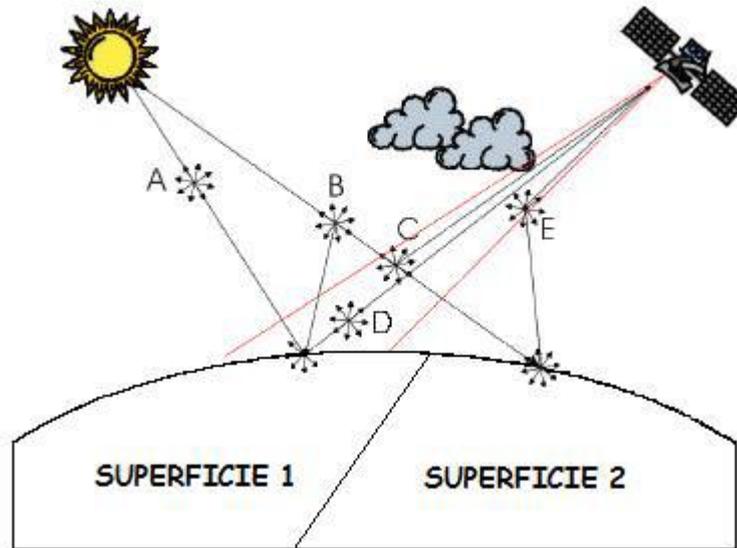


Figura 2. Papel de la atmósfera en teledetección, adaptado de Slater (1980)

Los procesos especificados en la Figura 2 están relacionados mediante la siguiente expresión:

$$L_{\text{sensor}} = L_{\text{superficie}} \epsilon + L_{\text{atmósfera}} \quad (2.1)$$

Donde  $L_{\text{sensor}}$  es la radiancia recibida por el sensor,  $L_{\text{superficie}}$  es la radiancia emitida por la superficie,  $\epsilon$  es la emisividad del suelo, y  $L_{\text{atmósfera}}$  es la radiancia intrínseca de la atmósfera.

Esta expresión es la correcta si se asumen superficies Lambertianas (Lira y Oliver 1983). La interacción de la atmósfera considerada en la ecuación 7.1 incluye la dispersión, absorción de la radiación por gases, aerosoles y partículas en el medio atmosférico, es decir la ecuación muestra una simplificación en la cual se puede observar que la radiancia verdadera de la superficie observada está afectada por el error provocado por la presencia de la atmósfera. La reflectancia se expresa en porcentaje y mide la cantidad de luz reflejada por una superficie.

Se aplica una corrección atmosférica debido a que las imágenes de la superficie terrestre, adquiridas en el espectro solar y que son tomadas por el satélite de observación, se encuentran contaminadas por la luz solar dispersada hacia el sensor por las moléculas atmosféricas, los aerosoles y las nubes en suspensión. Además, la energía solar que es reflejada desde la Tierra se encuentra atenuada por los efectos atmosféricos. Estos efectos atmosféricos son dependientes de la longitud de onda (siendo variables en tiempo y espacio), así como de la reflectividad de la superficie y su variación espacial. La corrección de estos

efectos atmosféricos puede producir señales de teledetección que se encuentran mejor correlacionadas con las características de la superficie (Borengasser et al. 2008).

El algoritmo de corrección atmosférica FLAASH (Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes) fue desarrollado por Spectral Sciences Inc. (SSI) y el laboratorio de investigación de la fuerza aérea norteamericana, AFRL/VS, Hanscom AFB. Combina el código de transferencia radiactiva de MODTRAN4 (Moderate resolution atmospheric Transmittance and radiance code) y ha sido modificado en esta base. FLAASH es una herramienta para la corrección atmosférica de primer principio, que es capaz de corregir en el espectro visible, infrarrojo cercano e infrarrojo de onda corta y también puede eliminar la mayor parte de la influencia que tiene el aire y la luz y otros factores de la reflectancia; para obtener parámetros más precisos de la reflectividad, emisividad, temperatura de la superficie y otros modelos físicos reales, características de la superficie (Gao y Goetz 1990; Adler et al. 1999).

### **Pixel**

Al igual que las imágenes de su televisor, las imágenes de satélite están formadas por pequeños cuadrados, cada uno de diferente color o gris.

Estos cuadrados se denominan píxeles cortos para elementos de imagen y representan la energía de luz reflejada relativa registrada para esa parte de la imagen. Sensores que registran energía electromagnética, registran electrónicamente la energía como una matriz de números en formato digital.

Los sensores satelitales registran la información como un único valor numérico correspondiente a la intensidad de la energía que detectan para un área determinada. En el caso de Landsat, el sensor mide la cantidad de energía reflejada para cada área de 30mX30m. Hace esto para cada uno de los siete segmentos del espectro electromagnético. Almacena los valores para cada segmento del espectro por separado. Estos números se graban y se pueden convertir a una escala de grises para producir una imagen en blanco y negro en forma de píxel.

## Calidad de agua

Es común que la calidad de agua se mida mediante los siguientes parámetros: Demanda Bioquímica de Oxígeno, Demanda Química de Oxígeno, Carbono Orgánico Total, Permanganato COD mn y nitrógeno amoniacal (NH<sub>3</sub>-N).

### Demanda Bioquímica de Oxígeno,

La Demanda Bioquímica de Oxígeno (BOD), es la cantidad de oxígeno necesaria para que los microorganismos aerobios puedan oxidar metabólicamente la materia orgánica presente en la muestra de agua (Jiménez 2000).

La DBO es uno de los indicadores más importantes en la medición de la contaminación en aguas residuales (AR), como también en el control del agua potable. Las bacterias aerobias requieren de oxígeno para consumir la materia orgánica degradable presente en las AR. La cantidad consumida de oxígeno, se mide en la diferencia entre el oxígeno al principio y final de la prueba (Figura 3).

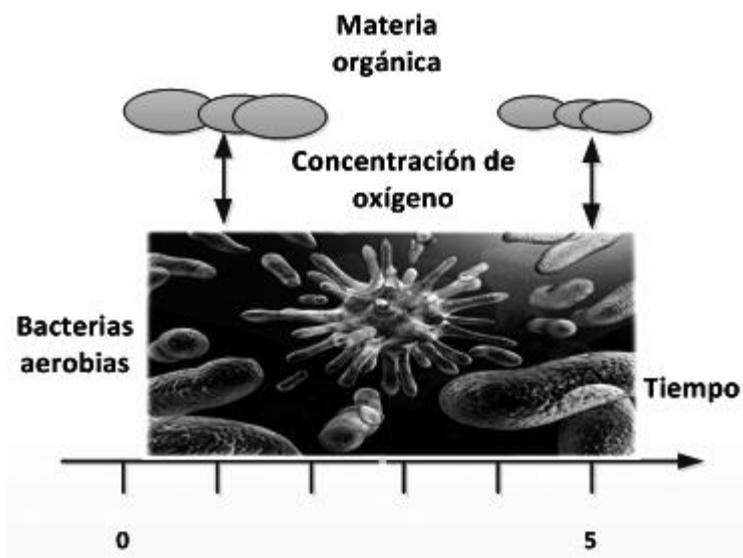


Figura 3. Oxígeno consumido por la bacterias aerobias.

Entre otras aplicaciones para la DBO, se mencionan:

- Medición de la calidad en las aguas superficiales y aguas residuales.
- Establecimiento de Límites Máximos Permisibles (LMP).
- Evaluación de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales o PTAR.
- Diseño de unidades de tratamiento biológicos.

La DBO de cinco días, o  $DBO_5$  es la cantidad total de oxígeno consumida por los microorganismos durante los primeros cinco días de biodegradación. En su forma más simple, la prueba  $DBO_5$ , es poner una muestra de residuo en una botella cerrada y medir la concentración de oxígeno disuelto (OD) en la muestra al principio de la prueba y al cabo de cinco días; la diferencia de OD dividida por el volumen de desperdicio (P) es  $DBO_5$  (Raffo y Ruiz 2014):

$$DBO_{fina} = \frac{OD_{inicio} - OD_{final}}{P}$$

La cantidad de oxígeno que necesitan los microorganismos para oxidar residuos orgánicos de modo aerobio se denomina Demanda Bioquímica de Oxígeno. La Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) se usa como una medida de la cantidad de oxígeno requerido para oxidación de la materia orgánica biodegradable, presente en la muestra de agua, como resultado de la acción de oxidación aerobia (Ramalho 2003).

### **Demanda Química de Oxígeno**

La demanda química de oxígeno consiste en determinar la cantidad total de materia orgánica, en términos de la cantidad de oxígeno que se requiere para oxidar ésta a dióxido de carbono y agua. Para esto se efectúa la oxidación de dicha materia orgánica utilizando agentes fuertemente oxidantes en un medio ácido. Debido a las condiciones tan drásticas empleadas en la oxidación, prácticamente toda la materia orgánica es oxidada a dióxido de carbono y agua. Sustancias que no son fáciles de digerir biológicamente como por ejemplo la lignina, son oxidadas completamente como resultado de los oxidantes empleados y debido a esto los valores de Demanda Química de Oxígeno DQO son siempre mayores a la DBO, en un agua residual específica.

### **Carbono Orgánico Total**

El carbono orgánico total (TOC) es un test no específico, es decir, el TOC no determinará qué compuestos concretos están presentes (la mayoría de las muestras son mezclas complejas que contienen miles de compuestos de carbono orgánico diferentes). En lugar de ello, el TOC informará al usuario de la suma de todo el carbono orgánico presente en estos compuestos. Consiste en lo siguiente, la muestra de agua se agrega ácido clorhídrico para

descomponer a bióxido de carbono los bicarbonatos y carbonatos que contiene el agua y diferenciar del bióxido de carbono que se produce posteriormente por el tratamiento térmico de la muestra. Se evapora el agua y los residuos se someten a altas temperaturas, y el material orgánico que pueda estar presente en la muestra de agua se descompone a  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}$ . Un detector de infrarrojo cuantifica el  $\text{CO}_2$  generado ya que este tiene una banda de absorción en el espectro infrarrojo, y se puede detectar con un espectrómetro IR no dispersivo, o también se puede absorber en agua el  $\text{CO}_2$  generado en la combustión y se Ingeniería de Tratamiento y Acondicionamiento de Aguas.

### **Permanganato COD mn**

El índice de permanganato es un parámetro de acumulación indicador de la carga total de sustancias orgánicas e inorgánicas en el agua potable. Estas sustancias son, por lo general, los ácidos y materias húmicas que se forman sobre todo cuando materia orgánica muerta penetra en el suelo y se transforma. El índice de permanganato se utiliza para evaluar la calidad de diferentes tipos de agua como, por ejemplo, agua potable, agua mineral, agua de manantial, agua de mesa y agua residual, y se determina según la norma DIN EN ISO 8467 (DIN 38409-5).

### **Nitrógeno amoniacal ( $\text{NH}_3\text{-N}$ )**

El nitrógeno amoniacal ( $\text{NH}_3\text{-N}$ ) es un nutriente en el cuerpo de agua, que puede conducir a un fenómeno de eutrofización del agua. Es el principal contaminante del consumo de oxígeno en el cuerpo de agua, y puede producir un efecto venenoso para los peces y algunos organismos acuáticos (Ding et al. 2016).

### **Variaciones de la calidad de agua en los ecosistemas acuáticos**

Groffman et al. (2006) definieron un umbral ecológico como “el punto en el que ocurre un cambio abrupto en la calidad, propiedad o fenómeno, o donde un cambio pequeño en un factor desencadenante produce grandes respuestas en el ecosistema”. Beisner et al. (2003) propusieron dos mecanismos alternativos que explican la ocurrencia de umbrales ecológicos. En el primero, los disturbios fuerzan estados estables a través de umbrales ecológicos modificando la estructura biótica y las interacciones dentro de las comunidades. (Bestelmeyer et al. 2003; Stringham et al. 2003). En el segundo mecanismo, los umbrales entre distintos estados estables pueden ser sobrepasados en respuesta a cambios abióticos de

largo plazo que modifican las características del sitio (Bestelmeyr et al. 2003; Stringham et al. 2003).

Según Briske et al. (2006), los umbrales ecológicos tienen varios componentes críticos incluyendo: 1) Factores desencadenantes, 2) Cambios estructurales, 3) cambios funcionales y 4) Mecanismos de retroalimentación.

**Factores desencadenantes:** Representan cambios en variables bióticas o abióticas específicas que inician el desarrollo del umbral ecológico. Estos factores pueden ser naturales o antrópicos, continuos o discontinuos (pulsátiles), aditivos o interactivos, y crónicos o agudos. Algunos ejemplos incluyen el fuego, la herbivoría y los climas extremos.

**Umbrales estructurales:** Se basan en cambios en la composición de especies invasoras distribución espacial de vegetación y el suelo desnudo, y la presencia de especies invasoras (Scheffer et al. 2001; Stringham et al. 2003). Este componente es el que ha recibido la mayor atención porque es de fácil observación y cuantificación y porque, en general, es el precursor del desarrollo de umbrales funcionales. La conversión de pastizales y sabanas en arbustales y la transformación de estepas en ecosistemas dominados por herbáceas anuales exóticas, constituyen dos ejemplos bien documentados de umbrales estructurales (Bestelmeyer et al. 2004).

**Umbrales funcionales:** Describen modificaciones de varios procesos ecológicos que mantienen la funcionalidad y resiliencia del ecosistema. Holling (1973, 1996) definió a la resiliencia ecológica como la cantidad de disturbio que se necesita para que cambie el estado de un ecosistema. La definición de umbral funcional resalta la importancia de la retención de agua y nutrientes en el mantenimiento de la funcionalidad ecosistémicas. Aquellos ecosistemas que pierden una gran proporción de sus recursos a través de escurrimiento y erosión, evidenciarán un empobrecimiento de sus funciones ecológicas (por ej. Reducción en la productividad y de las tasas de ciclado de nutrientes) (Davenport et al. 1998).

**Mecanismo de retroalimentación:** Representan procesos ecológicos que refuerzan (feedback negativo) o degradan (feedback positivo) la resiliencia del ecosistema. Cuando se pasa de una situación de dominancia de feedback negativo (sistema estable) a una dominancia de feedback positivo (sistema inestable), se reduce la resiliencia del ecosistema. La tasa a la

cual ocurre el cambio de feedback establecerá el grado de no-linealidad o discontinuidad característico de un umbral. Un ejemplo bien documentado en muchas partes del mundo es el efecto del fuego en la conversión de pastizales (Briske et al. 2006).

Según Groffman et al. (2006), los tres conceptos principales en que se ha aplicado la teoría de umbrales en la ecología son: 1) el análisis de cambios dramáticos y sorprendidos en el estado de los ecosistemas, 2) la determinación de niveles de carga críticos, y 3) análisis de los factores de umbral extrínsecos.

Cambios en el estado del ecosistema: ocurre cuando hay una respuesta no-lineal del ecosistema a los cambios ambientales, una vez sobrepasado el umbral se modifica drásticamente los parámetros físicos y biológicos del ecosistema. Estos cambios también incluyen factores naturales y antrópicos, como descarga de efluentes y nutrientes, sequías, etc. Los factores disparadores y las variables de respuesta pueden operar a distintas escalas temporales (Gunderson & Holling 2002). Niveles de carga críticos: Se define al nivel de carga crítico como “una estimación cuantitativa de la exposición a uno o más contaminantes (por ej. azufre y nitrógeno), debajo de la cual no ocurren efectos dañinos en elementos sensibles específicos del ambiente” (Groffman et al. 2006).

Factores de umbral extrínsecos: A medida que tal factor alcanza un valor umbral, se altera la estructura del ecosistema, la tasa de los procesos ecológicos, o el nivel de función/servicio del sistema. Como ejemplo se puede citar el caso de ríos que desbordan e inundan las llanuras laterales. Muchas poblaciones de árboles ribereños (como *Populus spp.*) en EEUU dependen de estas inundaciones periódicas y en su ausencia, senescen o son reemplazados por otras especies (Groffman et al. 2006).

Ciclo adaptativo es un término extraído de la ecología, y utilizado para el análisis de los ecosistemas, cuyo modelo fue inicialmente propuesto por Holling (Abel 1998; Weeks et al. 2004). El ciclo adaptativo plantea la existencia de cuatro fases (Resilience Alliance 2008). Allí se representa lo que normalmente ocurre en un sistema ecológico, desde que se inicia, como consecuencia de algún colapso, para posteriormente reorganizarse, crecer hasta llegar a un clímax para finalmente desorganizarse nuevamente y recomenzar un nuevo ciclo.

### **Estándares de Calidad Ambiental (ECA)**

El Estándar de Calidad Ambiental (ECA) es un instrumento de gestión ambiental que se establece para medir el estado de la calidad del ambiente en el territorio nacional. El ECA establece los niveles de concentración de elementos o sustancias presentes en el ambiente que no representan riesgos para la salud y el ambiente, fue creado por el Ministerio del Ambiente con el Decreto Supremo N° 002 en el año 2008 (MINAM 2008).

### **Índice de Calidad de Agua (ICA)**

Es un índice propuesto con la Autoridad Nacional del Agua (ANA) y tiene como principal finalidad la valoración simplificada del estado de la calidad del agua, y que contribuirá con una mejor presentación y a la gestión de calidad de los recursos hídricos. Fue creado por la Autoridad Nacional del Agua a través de la Resolución Jefatural N° 68 en el año 2018 (ANA 2018).

### **Ciclo de Sedimento**

El ciclo de sedimento está compuesto por los fenómenos de erosión del suelo y de su deposición en los ríos y lagunas (Francés y Bussi 2014). Producción de sedimentos es la cantidad de sedimentos que pasa por la sección transversal de un río en la unidad de tiempo, dividida por el área de drenaje aguas arriba del punto de medida. Se expresa en toneladas por kilómetro cuadrado por año. Armijos (2010) indicó que el estudio de la carga de sedimentos es importante ya que sirve como un indicador del impacto antrópico y natural sobre la tasa de erosión dentro de una cuenca. Debido a su importancia se elaboró un Proyecto Hybam (Hydro-geodinámica actual de la Cuenca Amazónica) que se interesa en el estudio de los flujos líquidos y sólidos que son transportados por los ríos amazónicos. En el Perú, el 76% de la superficie total del País pertenece a la cuenca amazónica, sin embargo son pocos los estudios realizados debido a la escasa información hidrológica y de sedimentos. Gracias a las estaciones limnimétricas del SENAMHI (Secretaría Nacional de Meteorología e Hidrología) y el trabajo realizado en el Proyecto Hybam, se cuenta con 8 estaciones de los principales ríos amazónicos del Perú, de los cuales 2 estaciones, Atalaya y Requena, pertenecen a la cuenca del río Ucayali. Estas dos estaciones contienen información aproximada del ciclo de sedimentos para la cuenca del río Aguaytía ya que éste pertenece a la cuenca del río Ucayali. En la estación de Atalaya sobre el río Ucayali se puede observar que las concentraciones de material en suspensión persiguen el régimen hidrológico. El río Ucayali, en la estación de Requena, ya en la planicie, presenta las mayores concentraciones

2 a 3 meses antes de la crecida de flujo líquido como picos altos. Para realizar el cálculo de flujos sólidos se siguió dos metodologías de interpolación y Relación Caudal Sólido- Caudal líquido. Los resultados de la primera metodología para la Estación Atalaya fue de caudal medio 199 ton/año, caudal mínimo 173 ton/año, caudal máximo 239 e incertidumbre  $\pm 12$  % y en la Estación Requena el caudal medio 385 ton/año, caudal mínimo 317 ton/año, caudal máximo 467 e incertidumbre  $\pm 20$  %. Según la segunda metodología la estación Atalaya obtuvo como resultado un caudal medio de 201 ton/año, un caudal mínimo de 142 ton/año, un caudal máximo de 273 e incertidumbre  $\pm 32$  % y la estación Requena obtuvo un caudal medio 320 ton/año, un caudal mínimo de 247 ton/año, y un caudal máximo de 412 ton/año e incertidumbre  $\pm 26$  %.

### **Balance Hídrico**

El balance hídrico se basa en conocer cuánta agua precipitada desde la atmósfera; llega a la superficie terrestre y genera escurrimiento superficial directo. El Balance Hídrico, relaciona las variables de precipitación, evapotranspiración y escurrimiento superficial en un periodo o tiempo determinado (UNESCO 2006). En lo que respecta al balance hídrico de la cuenca del río Aguaytía y Neshuya existe poca información, pero se ha podido encontrar a la fecha un trabajo realizado como Huella Hídrica de la Central Termoeléctrica Aguaytía ubicada en la parte alta de la cuenca con un balance hídrico anual, en el que las entradas y salidas alcanzaron los 12,408.66 m<sup>3</sup> de agua en el año 2013.

### **Análisis de Componente Principal**

El análisis de componentes principales (PCA) es un método estadístico multivariado de simplificación o reducción de la dimensión de una tabla de casos o variables con datos cuantitativos, para obtener una tabla de menor número de variables, combinación lineal de las iniciales que se denominan componentes (CPs). La PCA reduce el número de variables en un conjunto de datos, conteniendo toda la información original, agrupando aquellas que fornecen informaciones semejantes y que están altamente correlacionadas. Su aplicación es directa sobre cualquier conjunto de variables, permite describir la estructura y las interrelaciones de las variables originales en el fenómeno en estudio a partir de los componentes obtenidos. La reducción de muchas variables a pocos componentes puede simplificar la ampliación sobre otras técnicas multivariadas (Perez 2001).

### III. MATERIALES Y MÉTODOS

Los ríos Aguaytía y Neshuya forman parte de la cuenca del río Aguaytía y se localizan en la provincia Padre Abad, departamento de Ucayali. Para el presente estudio se seleccionaron cinco estaciones pertenecientes a la cuenca baja del río Aguaytía, de los cuales tres estaciones se ubican en el río Aguaytía y dos estaciones en el río Neshuya (Figura 4). Las ubicaciones de las estaciones están descritas en el Cuadro 3. La codificación de las estaciones es de la siguiente manera: la primera letra corresponde al nombre del río seguido de un número que es el número de estación.

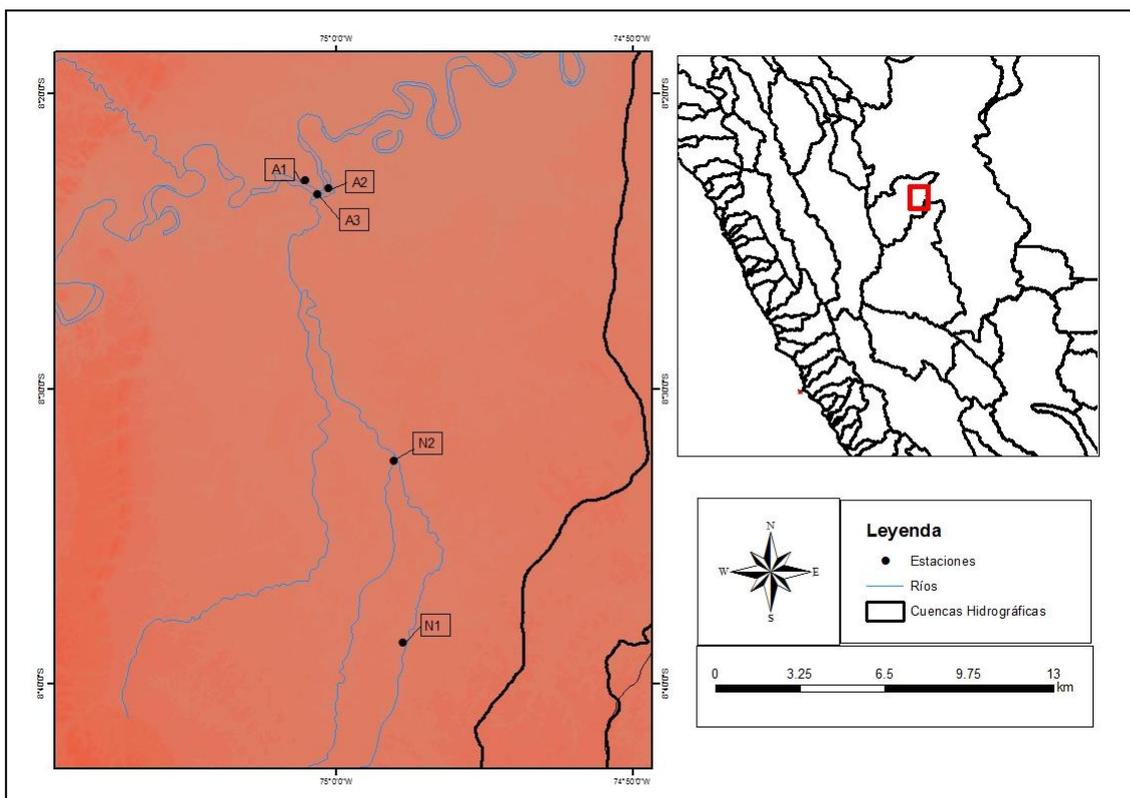


Figura 4. Mapa de ubicación de las estaciones evaluadas.

**Cuadro 3. Ubicación de las estaciones de muestreo**

| N° | ESTACIONES | DESCRIPCIÓN   | COORDENADAS |         |
|----|------------|---|-------------|---------|
|    |            |   | ESTE        | NORTE   |
| 1  | A1         | Aguas arriba del río Aguaytía. Antes a la desembocadura del río Neshuya.      | 498045      | 9073405 |
| 2  | A2         | Aguas abajo del río Aguaytía. Posterior a la desembocadura del río Neshuya.   | 499485      | 9072955 |
| 3  | A3         | Intersección entre el río Aguaytía y Neshuya.                                 | 498795      | 9072535 |
| 4  | N2         | Aguas abajo del Río Neshuya, muy cercano a la desembocadura del Río Aguaytía. | 503565      | 9055915 |
| 5  | N1         | En el Río Neshuya cerca a la empresa de palma aceitera.                       | 504135      | 9044605 |

### 3.1 SELECCIÓN DE LAS IMÁGENES SATELITALES.

Posteriormente se realizó una serie de tiempo utilizando las imágenes satelitales disponibles y se seleccionó las imágenes que obtengan una cobertura de nubes menor a 50% o las imágenes en la cual muestren ausencia de nubes en las estaciones evaluadas, las imágenes están descritas en la Anexo 1 y 2, y Figura 5.

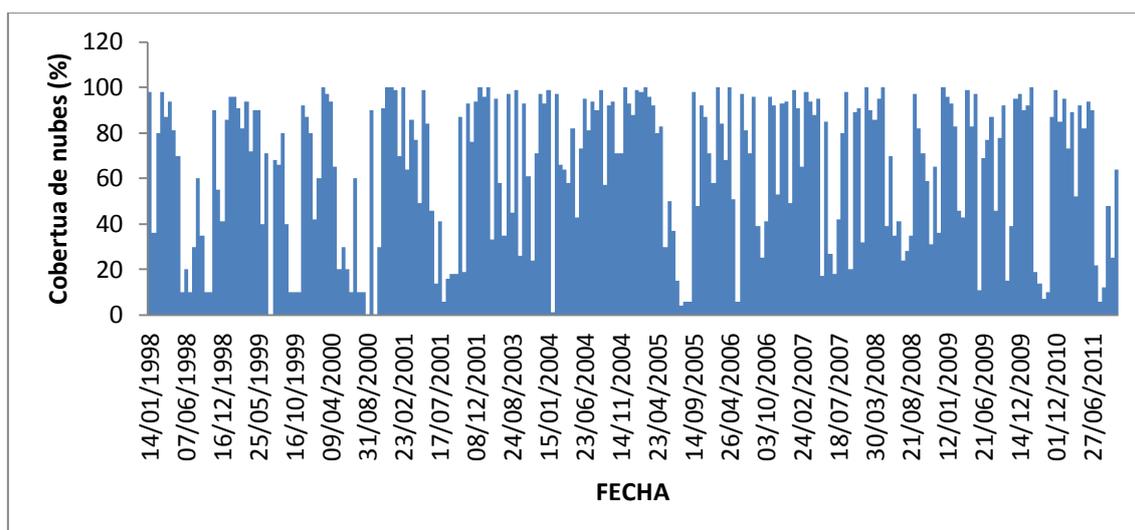


Figura 5. Cobertura de nubes de las imágenes TM LANDSAT – 5.

Las imágenes seleccionadas corresponden a los días 14 de julio de 1994, 9 de julio de 1998, 12 de julio de 2005 y 11 de setiembre del 2011 (Cuadro 4, Figura 6, 7, 8 y 9).

**Cuadro 4. Listado y descripción del nombre de las imágenes**

| Nº | Nombre de la Imagen           | Nombre del satélite | Columna | Fila | Año  | Día del año           |
|----|-------------------------------|---------------------|---------|------|------|-----------------------|
| 1  | LT50070661994195C<br>UB00.tar | LT5                 | 007     | 066  | 1994 | 195 (14 de julio)     |
| 2  | LT50070661998190A<br>AA01.tar | LT5                 | 007     | 066  | 1998 | 190 (9 de julio)      |
| 3  | LT50070662005193C<br>UB00.tar | LT5                 | 007     | 066  | 2005 | 193 (12 de julio)     |
| 4  | LT50070662011258C<br>UB00.tar | LT5                 | 007     | 066  | 2011 | 258 (11 de setiembre) |

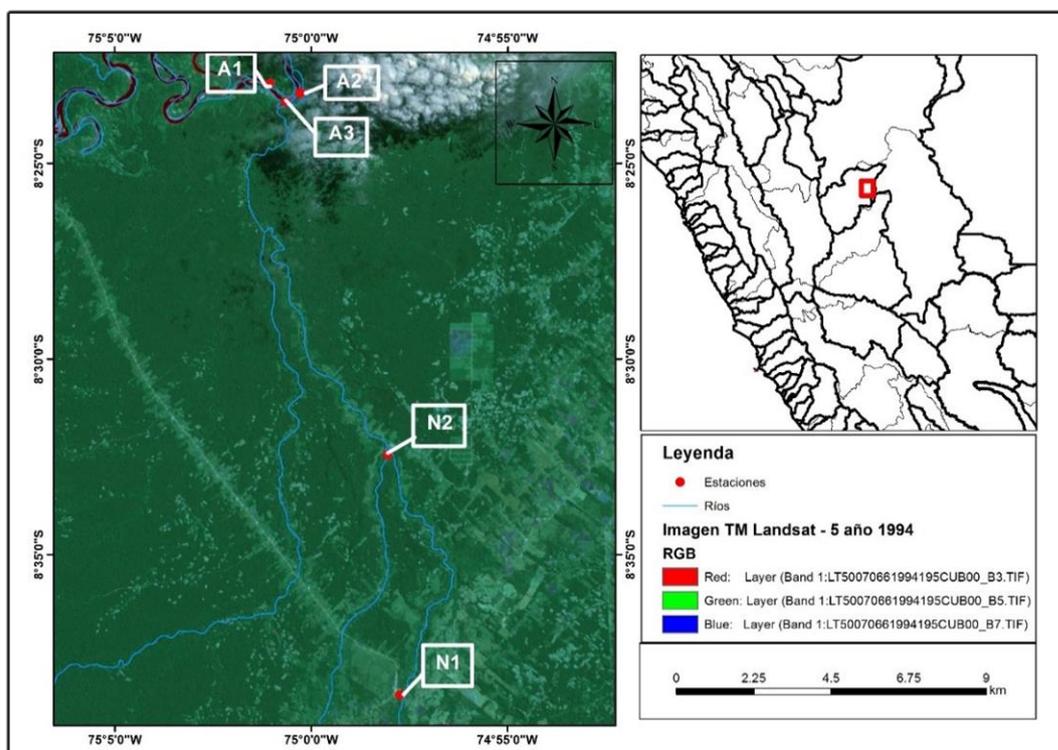


Figura 6. Imagen satelital TM Landsat – 5 correspondiente al día 14 de julio de 1994.

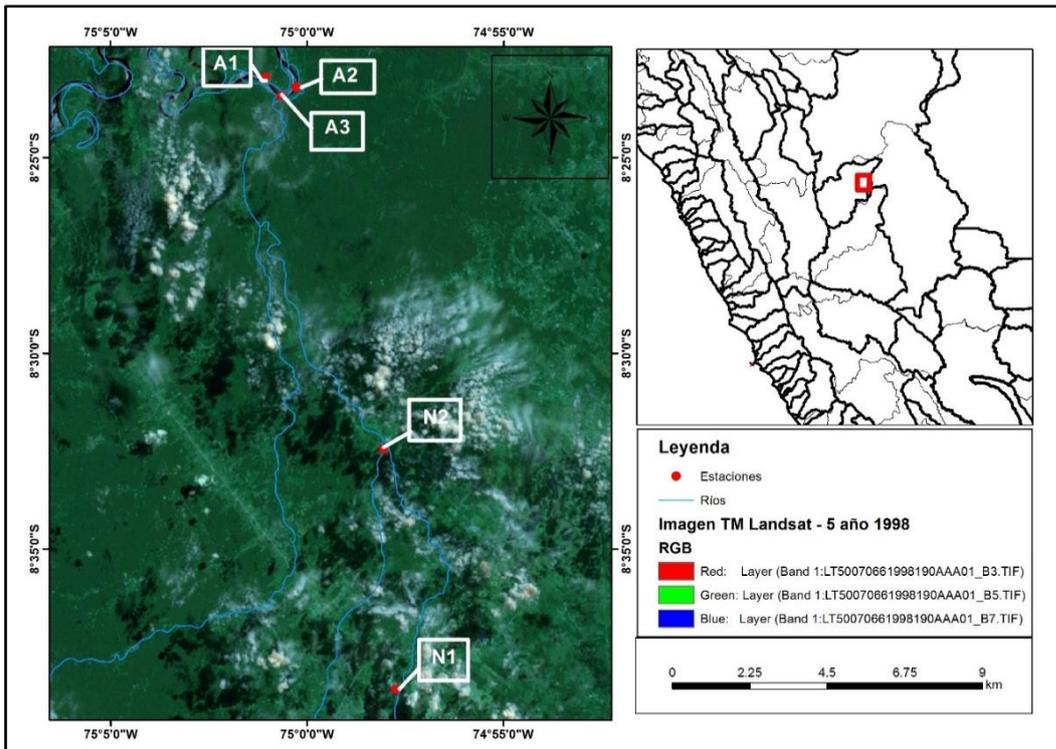


Figura 7. Imagen satelital TM Landsat – 5 correspondiente al día 9 de julio de 1998

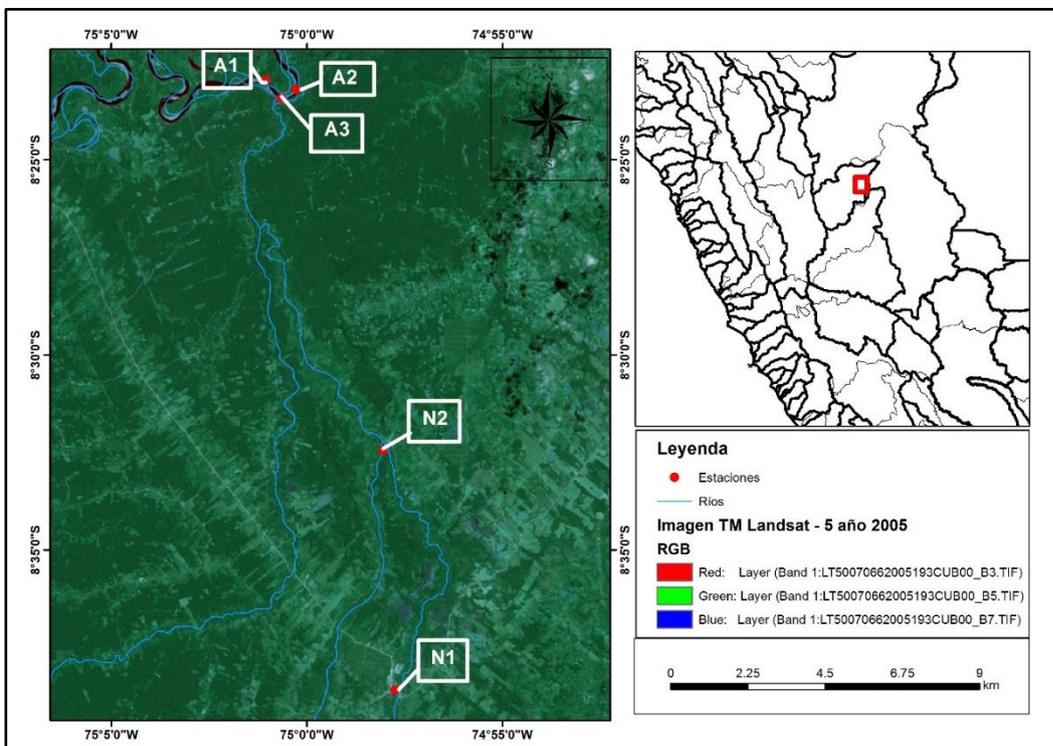


Figura 8. Imagen satelital TM Landsat – 5 correspondiente al 12 de julio de 2005

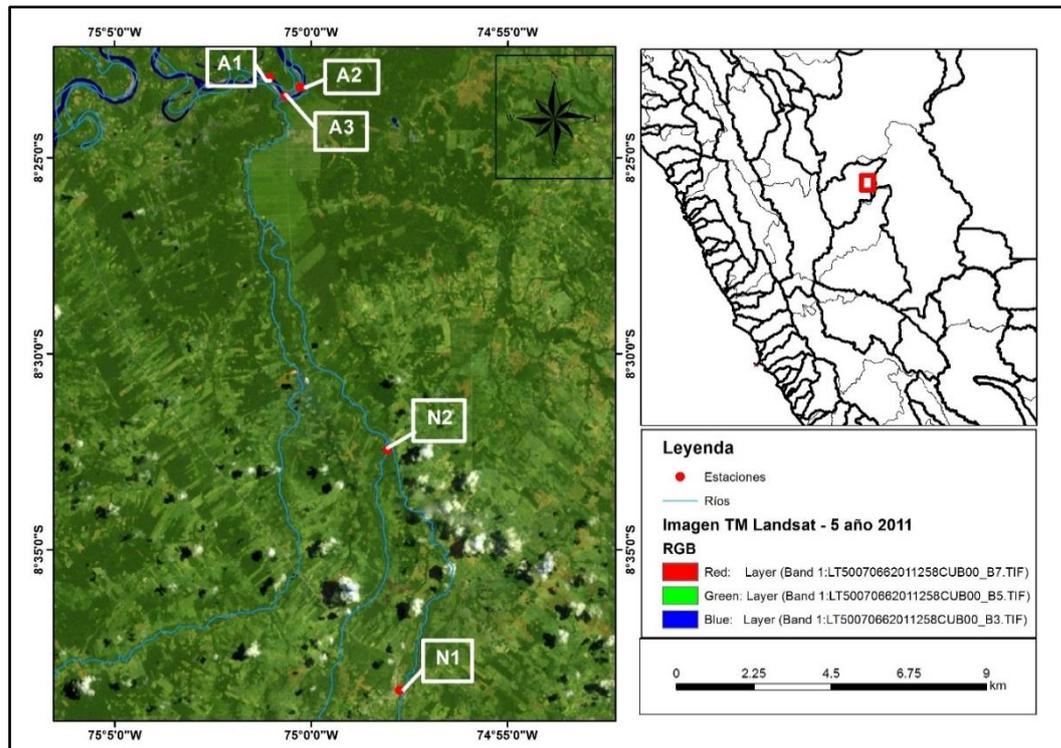


Figura 9. Imagen satelital TM Landsat – 5 correspondiente al 11 de setiembre del 2011

Luego se adquirió los datos de las bandas 1, 2, 3 y 4 de las imágenes satelitales seleccionadas para el proyecto de investigación, usando el software ENVI 4.5.

En la sección anexo se describe el tutorial para procesar imágenes satelitales TM LANDSAT -7, TM LANDSAT – 5 con el software ENVI 4.5.

### 3.2 PROCEDIMIENTO PARA HALLAR LOS VALORES DE LAS BANDAS 1, 2, 3 Y 4

ENVI es un programa construido sobre un lenguaje (IDL) especializado en el manejo de datos multidimensionales y su visualización. Se diferencia de otros programas similares (MATLAB, por ejemplo) en que contiene funciones especialmente adaptadas al trabajo con información territorial o geográfica.

ENVI se caracteriza por ser multiplataforma, existiendo versiones que corren en WINDOWS, LINUX y varias versiones de UNIX, lo que lo hace muy versátil y adaptable.

Esto ha provocado que exista una importante cantidad de programas y utilidades desarrolladas en todo el mundo – y que se pueden obtener gratuitamente en la WEB – que permiten incrementar las capacidades del software.

Sus objetivos son tener conocimiento previo de las imágenes satelitales así como de los respectivos sensores de cada satélite; aprender el correcto uso de las bandas espectrales y sus combinaciones; utilización de un software para imágenes satelitales (ENVI). Ha sido usado en varios proyectos de investigación no sólo para calidad de agua continental (Wang et al. 2004; Wang et al. 2012; Giardino et al. 2001; Kloiber et al. 2000,2002) también para obtener temperatura del mar, clorofila a, cobertura de vegetación entre otros temas ambientales (Quezada et al. 2011,2011; Rojas et al. 2007).

Para hallar los valores de las bandas 1, 2, 3 y 4 se siguieron una serie de procedimientos detallados en el manual (Anexo).

### **3.3 CÁLCULO DE LOS VALORES DE LOS PARÁMETROS DE CALIDAD DE AGUA.**

Para realizar el análisis de datos se utilizó el software Excel para calcular el valor de los parámetros de calidad de agua.

Los valores de cada banda serán reemplazados en las siguientes ecuaciones:

Utilizando las ecuaciones propuesta por Wang et al. (2011):

$$\text{COD}_{\text{Mn}} = e^{-2.3359-0.0986 \ln R1-0.7749 \ln R2-0.6402 \ln R3-0.3473 \ln R4}$$

$$\text{NH}_3\text{-N} = e^{-8.8129-1.7044 \ln R1+1.7620 \ln R2-1.8647 \ln R3-1.4377 \ln R4}$$

$$\text{COD} = e^{-1.6184-0.9730 \ln R1+0.1979 \ln R2-1.0016 \ln R3-0.2333 \ln R4}$$

Y las ecuaciones propuesta por Wang et al. (2004):

$$\text{BOD} = 1.79 - 0.789r1 + 52.36r2 - 3.28r3$$

$$\text{COD} = 2.76 - 17.27r1 + 72.15r2 - 12.11r3$$

$$\text{TOC} = 6.41 - 85.29r1 - 2.05r2 - 24.96r3$$

### **3.4 CÁLCULO PARA HALLAR LA CORRELACIÓN Y REGRESIÓN DE LOS DATOS DE LAS BANDAS Y LOS PARÁMETROS DE CALIDAD DE AGUA**

El paquete R Comander del software R (Fox y Bouchet- Valat 2013). Con este software se determinó la correlación que existe entre el valor de las bandas y el parámetro de calidad de agua.

Además, se realizó la regresión y análisis de varianza de la regresión para determinar las significancia de los datos de las bandas con el parámetro de calidad de agua.

### **3.5 ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES**

Para realizar el análisis de componentes principales se utilizó el software Past con un nivel de concentración de elipse del 95%.

## IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1 RESULTADOS

#### 4.1.1 Caracterización de los ambientes acuáticos

Los ambientes acuáticos estudiados, río Aguaytía y Neshuya presentaron ríos con un tipo de agua blanca y clara, respectivamente. El rango de altitud de estos varía desde 132 a 537 m, la pendiente de los ríos varía entre 0° a 11.16°, se aprecia en el Cuadro 5.

#### Río Aguaytía

El río Aguaytía mostró un rango de altitud de 132 a 537 m. La pendiente del río varía entre 0° – 11.16 ° y por lo general el tipo de agua que presentó fue blanca en la época de creciente y entre blanca y clara la época de vaciante.

#### Río Neshuya

La altitud que se registró para el río Neshuya fue de 273 a 353 m. Además la pendiente del río fue de 0° - 4.72 ° y un tipo de agua negra. El color de sus aguas fue originado por la cercanía de los aguajales en sus riberas.

**Cuadro 5. Resumen de la caracterización de los ríos de la cuenca del río Aguaytía.**

| Río          | Longitud | Latitud | Tipo de agua     | Altitud (m) | Pendiente (°) | Sustrato          | Ancho del río (m) |
|--------------|----------|---------|------------------|-------------|---------------|-------------------|-------------------|
| Río Neshuya  | -74.9611 | -8.6415 | Clara            | 160-224     | 0-4.17        | areno/<br>limoso  | 5-7               |
| Río Aguaytía | -75.1138 | -8.41   | clara/<br>blanca | 132-537     | 0-11.16       | canto/<br>arenoso | 138 - 498         |

#### 4.1.2 Valores de las bandas 1, 2, 3 y 4

Luego del procesamiento de las imágenes satelitales se pudo ubicar los pixeles correspondientes a cada estación de muestreo. Cada pixel posee los valores de la reflectancia

de la banda 1, 2, 3 y 4 para cada una de las estaciones de muestreo (Cuadro 6). Estos valores oscilan entre 0 a 1, ya que se refiere al porcentaje de la luz solar reflejada.

El Cuadro 6 muestra los valores de las bandas 1, 2, 3 y 4. La estación A2 con fecha 15/09/2011 mostró los valores más altos para la banda 1 con 0.1070, la banda 2 con 0.1609 y la banda 3 con 0.1964, y para la banda 4 con 0.4139 el 14/07/1994 para la estación A1. La estación N2 presentó los menores valores para la banda 1 con 0.0226 y la banda 2 con 0.0388 el 14/07/1994; la banda 3, 0.0341 el 9/07/1998; y la banda 4 con 0.0348 el 12/07/2005 para la estación A3. Los valores del cuadro 6 fueron reemplazados en las ecuaciones mencionadas en el subcapítulo 6.8 para obtener los valores de Demanda Bioquímica de Oxígeno (BOD), Carbono Orgánico Total (TOC), Demanda Química de Oxígeno (COD), COD mn, NH<sub>3</sub>-N.

**Cuadro 6. Valores de las bandas 1, 2, 3 y 4 de cada estación de la imagen TM Landsat – 5**

| <b>Año</b> | <b>Estación</b> | <b>B1</b> | <b>B2</b> | <b>B3</b> | <b>B4</b> |
|------------|-----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 14/07/1994 | A1              | 0.0317    | 0.0581    | 0.0373    | 0.4139    |
| 14/07/1994 | A2              | 0.0405    | 0.0526    | 0.0488    | 0.1907    |
| 14/07/1994 | A3              | 0.0590    | 0.0924    | 0.0998    | 0.1079    |
| 14/07/1994 | N2              | 0.0226    | 0.0388    | 0.0377    | 0.2045    |
| 14/07/1994 | N1              | 0.0323    | 0.0582    | 0.0452    | 0.3212    |
| 9/07/1998  | A1              | 0.0485    | 0.0609    | 0.0483    | 0.3713    |
| 9/07/1998  | A2              | 0.0397    | 0.0567    | 0.0486    | 0.1451    |
| 9/07/1998  | A3              | 0.0674    | 0.0839    | 0.0739    | 0.1540    |
| 9/07/1998  | N2              | 0.0352    | 0.0432    | 0.0341    | 0.1772    |
| 9/07/1998  | N1              | 0.0443    | 0.0646    | 0.0514    | 0.2632    |
| 12/07/2005 | A1              | 0.0325    | 0.0451    | 0.0358    | 0.3100    |
| 12/07/2005 | A2              | 0.0485    | 0.0850    | 0.0817    | 0.0610    |
| 12/07/2005 | A3              | 0.0417    | 0.0717    | 0.0676    | 0.0348    |
| 12/07/2005 | N2              | 0.0352    | 0.0498    | 0.0360    | 0.2790    |
| 12/07/2005 | N1              | 0.0390    | 0.0580    | 0.0531    | 0.2271    |
| 15/09/2011 | A1              | 0.0661    | 0.1104    | 0.1474    | 0.1345    |
| 15/09/2011 | A2              | 0.1070    | 0.1609    | 0.1964    | 0.2959    |
| 15/09/2011 | A3              | 0.0643    | 0.1068    | 0.1503    | 0.1345    |
| 15/09/2011 | N2              | 0.0451    | 0.0670    | 0.0466    | 0.3351    |
| 15/09/2011 | N1              | 0.0503    | 0.0774    | 0.0664    | 0.2567    |

Las Figuras 10 al 13 muestran la reflectancia de las imágenes correspondiente a los años 1994, 1998, 2005 y 2011.

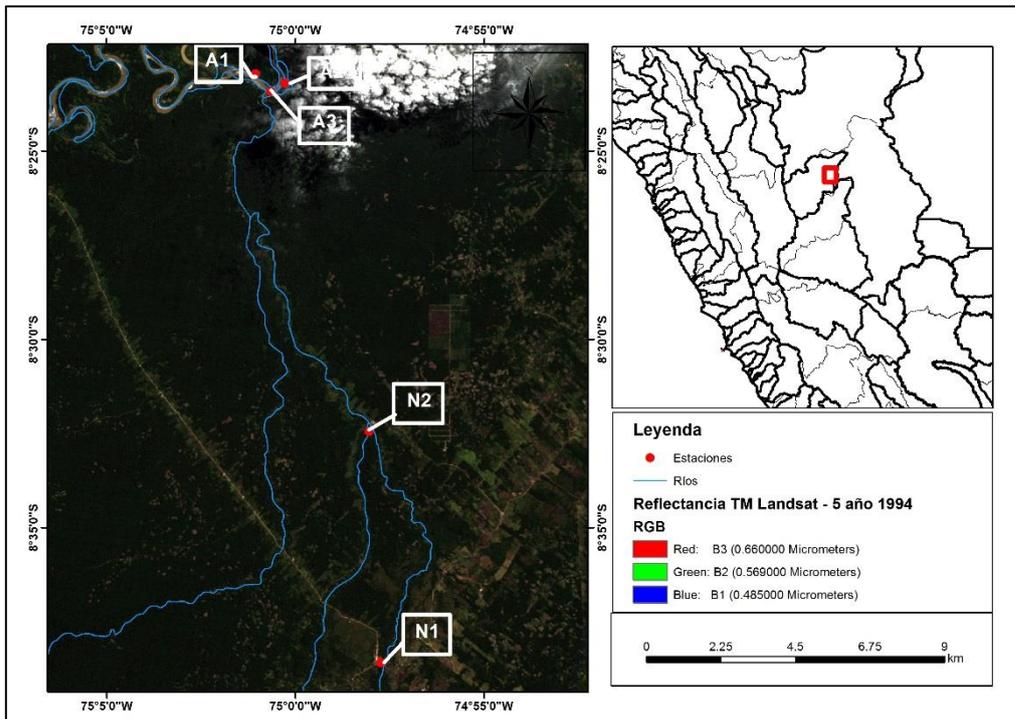


Figura 10. Reflectancia de la imagen correspondiente al año 1994

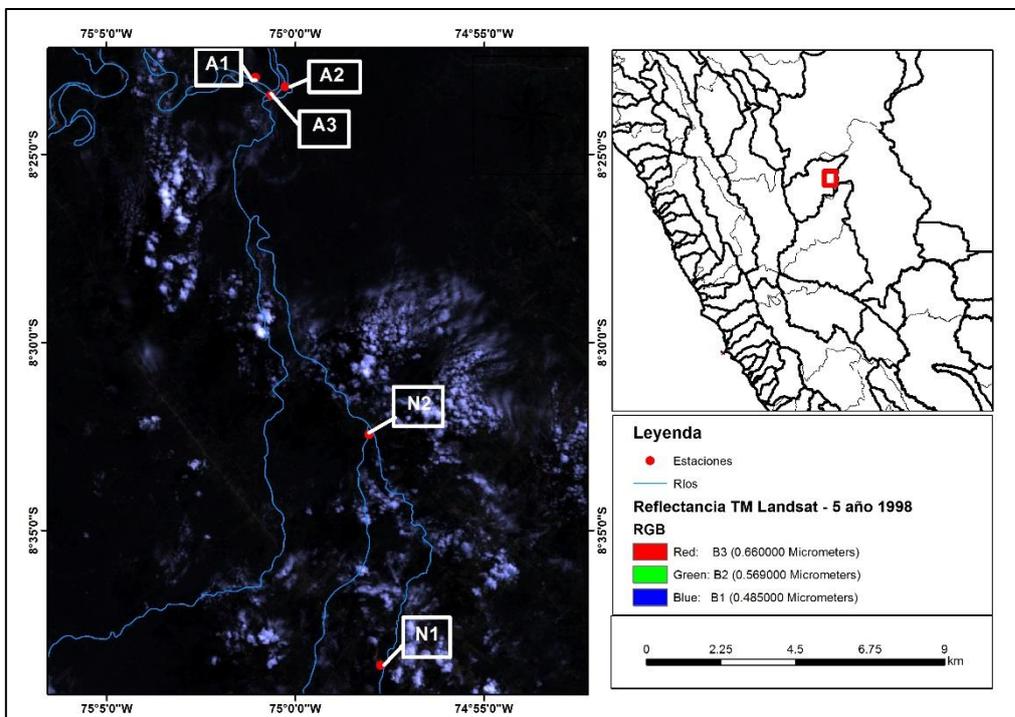


Figura 11. Reflectancia de la imagen correspondiente al año 1998

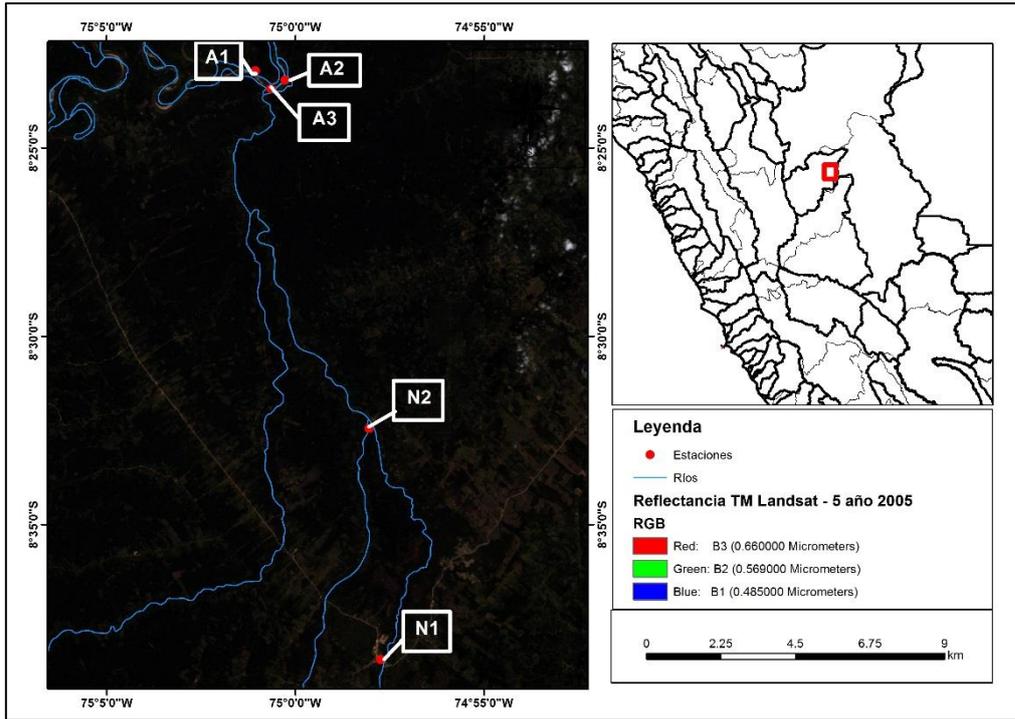


Figura 12. Reflectancia de la imagen correspondiente al año 2005

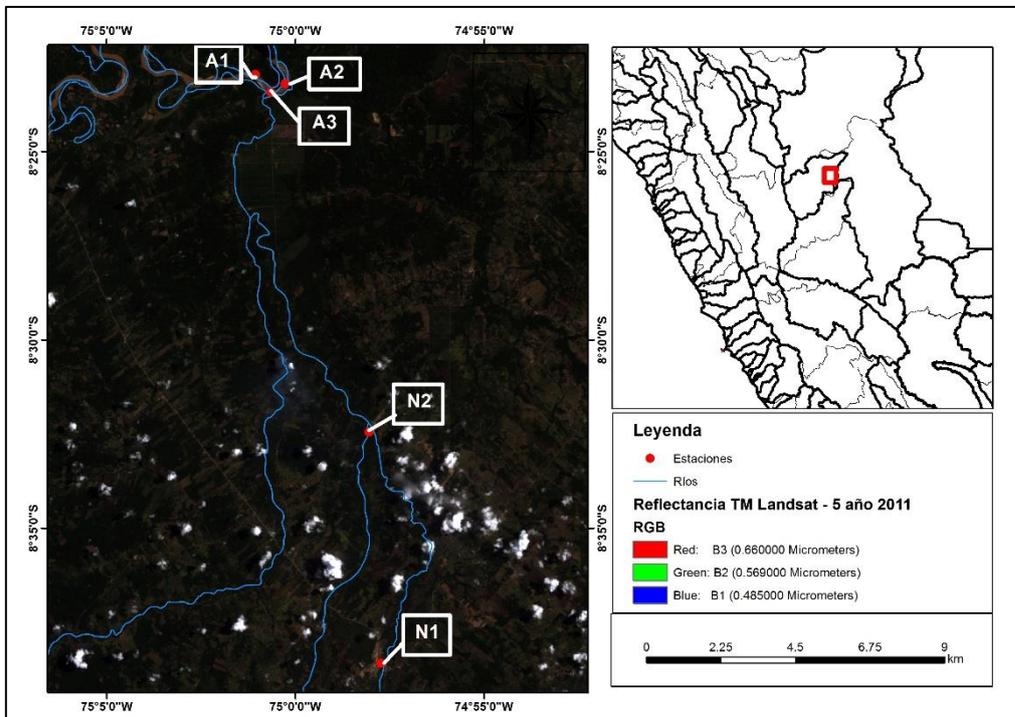


Figura 13. Reflectancia de la imagen correspondiente al año 2011.

### 4.1.3 Valores de Demanda Bioquímica de Oxígeno (BOD), Carbono Orgánico Total (TOC), Demanda Química de Oxígeno (COD), COD mn, NH<sub>3</sub>-N

El cuadro 7 muestra los valores de BOD, TOC, COD, COD mn y NH<sub>3</sub>-N, la estación y la fecha de los datos colectados, el mayor valor para BOD se registró en el 15/09/2011, en la estación A2 con un valor de reflectancia de 9.49.

**Cuadro 7. Valores de la BOD, COD, TOC, COD mn y NH<sub>3</sub>-N**

| Fecha      | Estación | BOD<br>3 bandas | COD<br>3 bandas | TOC<br>3 bandas | COD mn<br>4 bandas | NH <sub>3</sub> -N<br>4 bandas | COD<br>4 bandas |
|------------|----------|-----------------|-----------------|-----------------|--------------------|--------------------------------|-----------------|
| 14/07/1994 | A1       | 4.68            | 5.95            | 2.66            | 13.75              | 0.58                           | 107.40          |
| 14/07/1994 | A2       | 4.35            | 5.26            | 1.63            | 15.98              | 0.59                           | 75.95           |
| 14/07/1994 | A3       | 6.25            | 7.20            | -1.30           | 7.67               | 0.50                           | 32.85           |
| 14/07/1994 | N2       | 3.68            | 4.71            | 3.46            | 24.67              | 1.37                           | 160.72          |
| 14/07/1994 | N1       | 4.66            | 5.85            | 2.41            | 13.24              | 0.57                           | 92.33           |
| 09/07/1998 | A1       | 4.78            | 5.73            | 0.94            | 11.19              | 0.22                           | 56.75           |
| 09/07/1998 | A2       | 4.57            | 5.58            | 1.69            | 16.65              | 1.04                           | 84.12           |
| 09/07/1998 | A3       | 5.89            | 6.75            | -1.36           | 8.74               | 0.36                           | 35.20           |
| 09/07/1998 | N2       | 3.91            | 4.86            | 2.47            | 24.35              | 1.15                           | 121.97          |
| 09/07/1998 | N1       | 4.97            | 6.03            | 1.22            | 11.68              | 0.42                           | 63.84           |
| 12/07/2005 | A1       | 4.01            | 5.02            | 2.65            | 18.95              | 0.58                           | 111.13          |
| 12/07/2005 | A2       | 5.93            | 7.07            | 0.06            | 11.56              | 2.00                           | 54.57           |
| 12/07/2005 | A3       | 5.29            | 6.39            | 1.02            | 18.37              | 6.12                           | 84.22           |
| 12/07/2005 | N2       | 4.25            | 5.31            | 2.41            | 18.00              | 0.70                           | 106.88          |
| 12/07/2005 | N1       | 4.62            | 5.63            | 1.64            | 13.26              | 0.50                           | 70.87           |
| 15/09/2011 | A1       | 7.03            | 7.80            | -3.13           | 4.77               | 0.20                           | 19.58           |
| 15/09/2011 | A2       | 9.49            | 10.14           | -7.95           | 2.15               | 0.03                           | 8.24            |
| 15/09/2011 | A3       | 6.84            | 7.54            | -3.04           | 4.85               | 0.19                           | 19.59           |
| 15/09/2011 | N2       | 5.11            | 6.25            | 1.26            | 11.10              | 0.37                           | 65.89           |
| 15/09/2011 | N1       | 5.59            | 6.67            | 0.30            | 8.59               | 0.30                           | 45.51           |

#### 4.1.4 Análisis Estadístico (correlación, regresión y significancia de los datos de la banda 1, 2, 3 y 4) de los parámetros de calidad de agua.

En el presente estudio se determinó si existe correlación y significancia entre los valores de las bandas de cada estación (pixel) y los valores de calidad de agua en los ríos Amazónicos: Aguaytía y Neshuya. Para este estudio se consideró como variable independiente a los valores de los pixeles (banda 1, 2 y 3) y como variable dependiente a los valores de BOD, COD, TOC, COD mn y NH3-N.

##### 4.1.4.a Análisis estadístico de Demanda Bioquímica de Oxígeno (BOD) de 3 bandas

Según el Cuadro 8 se puede apreciar que la correlación de las bandas 1, 2 y 3 con BOD es directamente proporcional, es decir que a medida que aumente el valor de la banda 1, 2, 3 y BOD el valor va ir aumentando, siendo la relación más fuerte entre las banda 2 y el BOD con un valor de 0.99961862 y menor relación la banda 1 con banda 3 con un valor de 0.90519237.

**Cuadro 8. Correlación de las bandas 1, 2 y 3 con la Demanda Bioquímica de Oxígeno.**

|     | B1         | B2         | B3         | BOD |
|-----|------------|------------|------------|-----|
| B1  | 1          |            |            |     |
| B2  | 0.95708998 | 1          |            |     |
| B3  | 0.90519237 | 0.96556578 | 1          |     |
| BOD | 0.95787368 | 0.99961862 | 0.95805642 | 1   |

El análisis de regresión del BOD de 3 bandas (Cuadro A 3) demuestra la ecuación de la regresión

$$y = -4.6032x^2 + 47.818x + 1.8767$$

El modelo con mayor valor  $R^2$  lo obtuvo la banda 2 con un  $R^2 = 0.9993$

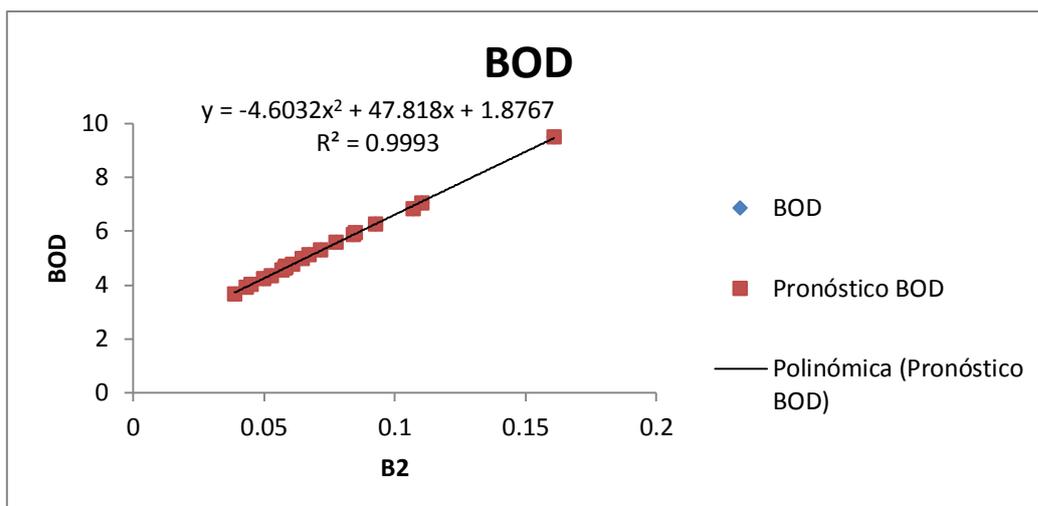


Figura 14. Modelo y  $R^2$  de la banda 2 para BOD.

Se realizó el análisis de varianza de la regresión y ésta fue significativa (Con un alfa de 0.005).

#### 4.1.4.b Análisis estadístico de los valores de Demanda Química de oxígeno (COD) de 3 bandas

El análisis de correlación de los datos muestra que el máximo valor es 0.99304576 entre las bandas 2 y el COD, y el mínimo valor es 0.90519237 para la relación de la banda 1 y banda 3. La relación de los valores de la banda y la demanda química de oxígeno es directamente proporcional, es decir mientras que el valor de una banda aumente las demás variables también aumentarán (Cuadro 9).

**Cuadro 9. Análisis de correlación de los datos de Demanda Química de Oxígeno (COD) de 3 bandas**

|     | B1         | B2         | B3         | COD |
|-----|------------|------------|------------|-----|
| B1  | 1          |            |            |     |
| B2  | 0.95708998 | 1          |            |     |
| B3  | 0.90519237 | 0.96556578 | 1          |     |
| COD | 0.93724041 | 0.99304576 | 0.93448744 | 1   |

El análisis de regresión del COD de 3 bandas (Cuadro A 5) demuestra la ecuación de la regresión:

$$y = 43.35x + 3.1631$$

El modelo con mayor valor  $R^2$  lo obtuvo la banda 2 con un  $R^2 = 0.9861$

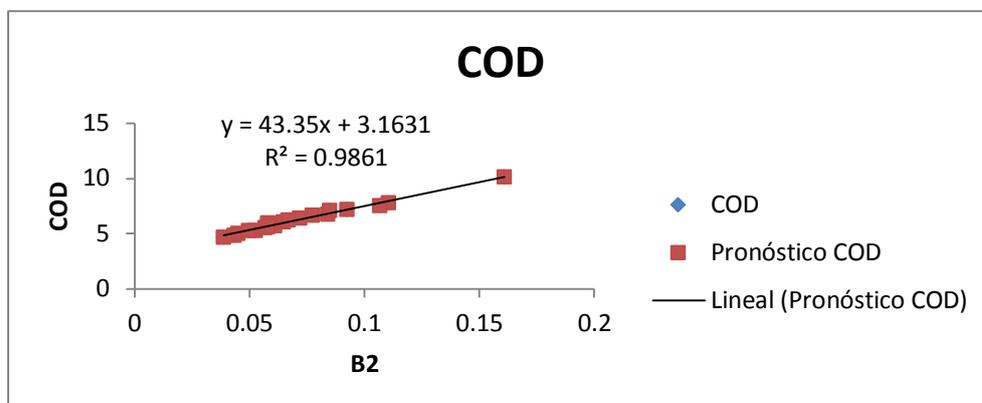


Figura 15. Modelo y  $R^2$  de la banda 2 para COD.

#### 4.1.4.c Análisis estadístico de los valores de Demanda Química de Oxígeno (COD) de 4 bandas

El análisis de correlación de los datos muestra que el máximo valor es 0.96556578 entre las bandas 2 y 3, y el mínimo valor es 0.14733262 para la relación de la banda 1 y banda 4. La relación de los valores de la banda y la demanda química de oxígeno es directamente proporcional para las bandas b1 y b2, b1 y b3, b2 y b3, b4 y COD de 4 bandas, las relaciones restantes son inversamente proporcionales (cuadro 10).

**Cuadro 10. Análisis de correlación de las cuatro bandas y el valor de COD.**

|                 | B1          | B2          | B3          | B4         | COD 4<br>bandas |
|-----------------|-------------|-------------|-------------|------------|-----------------|
| B1              | 1           |             |             |            |                 |
| B2              | 0.95708998  | 1           |             |            |                 |
| B3              | 0.90519237  | 0.96556578  | 1           |            |                 |
| B4              | -0.14733262 | -0.20071836 | -0.28934304 | 1          |                 |
| COD 4<br>bandas | -0.85632948 | -0.84455906 | -0.79060954 | 0.22257836 | 1               |

El análisis de regresión del COD de 4 bandas (Cuadro A 7) demuestra la ecuación de la

regresión

$$y = 3229.1x^2 - 2200x + 167.12$$

El modelo con mayor valor  $R^2$  lo obtuvo la banda 1 con un  $R^2 = 0.9732$

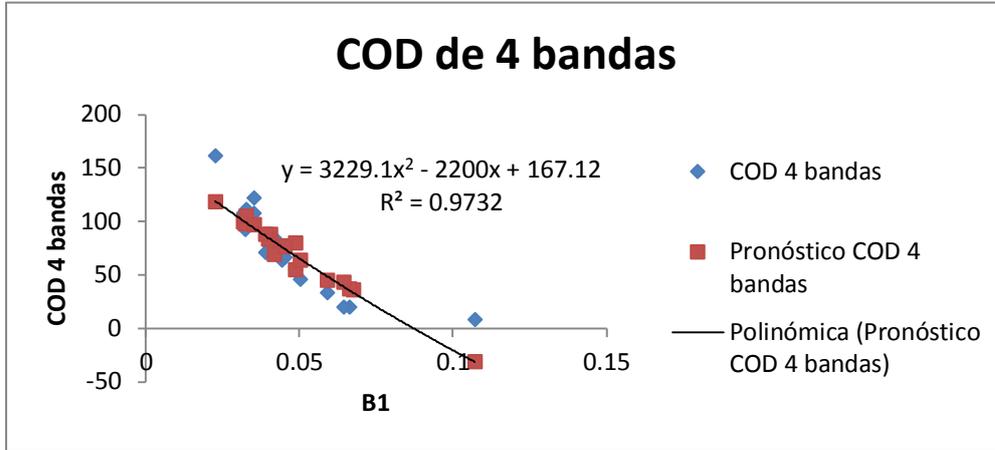


Figura 16. Modelo y  $R^2$  de la banda 1 para COD de 4 bandas.

#### 4.1.4.d Análisis estadístico de valores de Carbono orgánico total (TOC) de 3 bandas

El análisis de correlación de los datos (Cuadro 11) muestra que el máximo valor es 0.984205 entre la banda b2 y TOC, y el mínimo valor es de 0.9051924 para las bandas 1 y 3. La relación de los valores entre las bandas 1 con banda 2 y 3, banda 2 y 3 son directamente proporcional, el resto es inversamente proporcional.

**Cuadro 11. Análisis de correlación de los datos de Carbono Orgánico Total de 3 bandas**

|     | B1        | B2        | B3        | TOC |
|-----|-----------|-----------|-----------|-----|
| B1  | 1         |           |           |     |
| B2  | 0.95709   | 1         |           |     |
| B3  | 0.9051924 | 0.9655658 | 1         |     |
| TOC | -0.983381 | -0.984205 | -0.967293 | 1   |

El análisis de regresión del TOC de 3 bandas (cuadro A 9) demuestra la ecuación de la regresión:

$$y = -118.3x^2 - 69.734x + 6.1865$$

El modelo con mayor valor  $R^2$  lo obtuvo la banda 2 con un  $R^2 = 0.9713$

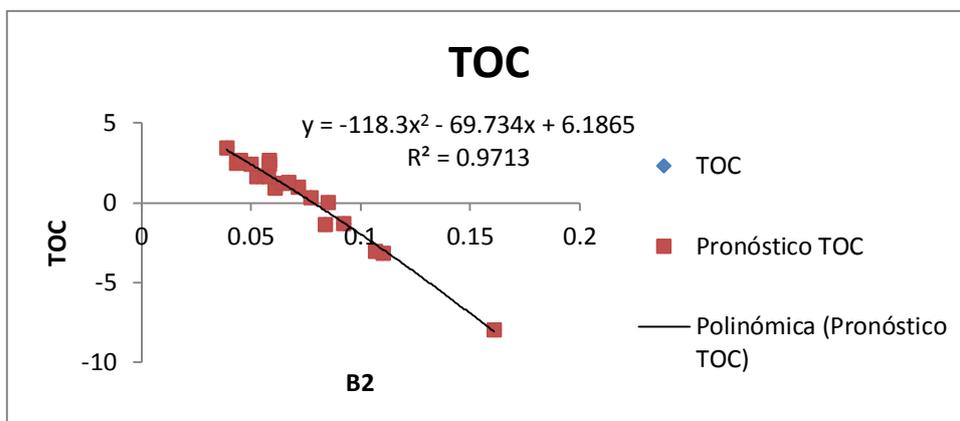


Figura 17. Modelo y  $R^2$  de la banda 2 para TOC.

#### 4.1.4.e Análisis estadístico de valores del índice de permanganato de 4 bandas

El análisis de correlación de los datos muestra que el máximo valor es 0.96556578 entre las bandas 2 y 3, y el mínimo valor es de 0.14733262 para la relación de la banda 1 y 4. La relación de los valores de la banda b1 y b2, b1 y b3, b2 y b3, y b4 con COD de 4 bandas las relaciones son directamente proporcional mientras que el resto son inversamente proporcionales (Cuadro 12).

**Cuadro 12. Análisis de correlación de los datos de CODmn de 4 bandas**

|        | B1        | B2        | B3        | B4        | COD mn |
|--------|-----------|-----------|-----------|-----------|--------|
| B1     | 1         |           |           |           |        |
| B2     | 0.95709   | 1         |           |           |        |
| B3     | 0.9051924 | 0.9655658 | 1         |           |        |
| B4     | -0.147333 | -0.200718 | -0.289343 | 1         |        |
| COD mn | -0.821094 | -0.849659 | -0.783676 | -0.003749 | 1      |

El análisis de regresión del COD mn de 4 bandas (cuadro A 11) demuestra la ecuación de la regresión:

$$y = -222.02x^2 - 137.33x + 24.203$$

El modelo con mayor valor  $R^2$  lo obtuvo la banda 2 con un  $R^2 = 0.9518$

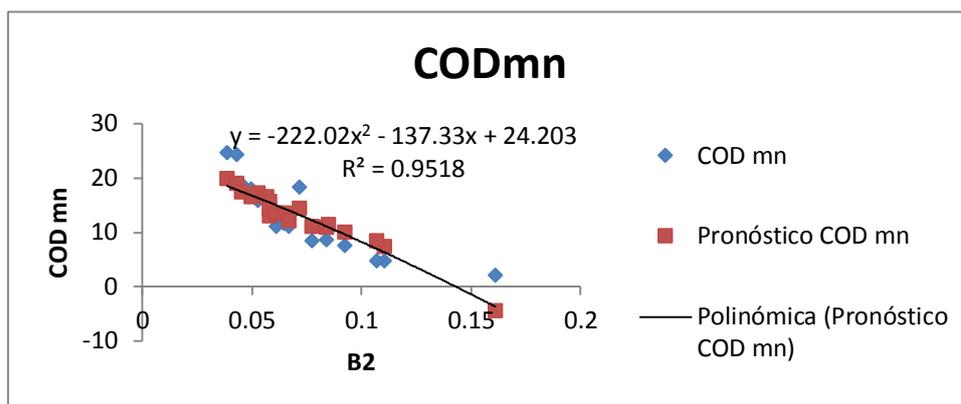


Figura 18. Modelo y R<sup>2</sup> de la banda 2 para CODmn.

#### 4.1.4.f Análisis estadístico de valores del Nitrógeno amoniacal (NH<sub>3</sub>-N) de 4 bandas

El análisis de correlación de los datos muestra que el máximo valor es 0.9655658 entre las bandas 2 y 3, y el mínimo es 0.147333 para la relación de la banda 1 y 4, la relación de los valores de la banda y el nitrógeno amoniacal es directamente proporcional para las bandas b1 y b2, b1 y b3, y b2 y b3 (cuadro 13).

**Cuadro 13. Análisis de correlación de los valores de la bandas 1, 2, 3,4 y NH<sub>3</sub>-N**

|                    | B1        | B2        | B3        | B4        | NH <sub>3</sub> -N |
|--------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|--------------------|
| B1                 | 1         |           |           |           |                    |
| B2                 | 0.95709   | 1         |           |           |                    |
| B3                 | 0.9051924 | 0.9655658 | 1         |           |                    |
| B4                 | -0.147333 | -0.200718 | -0.289343 | 1         |                    |
| NH <sub>3</sub> -N | -0.244835 | -0.154401 | -0.154704 | -0.529341 | 1                  |

El análisis de regresión del nitrógeno amoniacal (Cuadro A 13) demuestra la ecuación de la regresión

$$y = -1.242\ln(x) - 1.1667$$

El modelo con mayor valor R<sup>2</sup> lo obtuvo la banda 4 con un R<sup>2</sup> = 0.6726

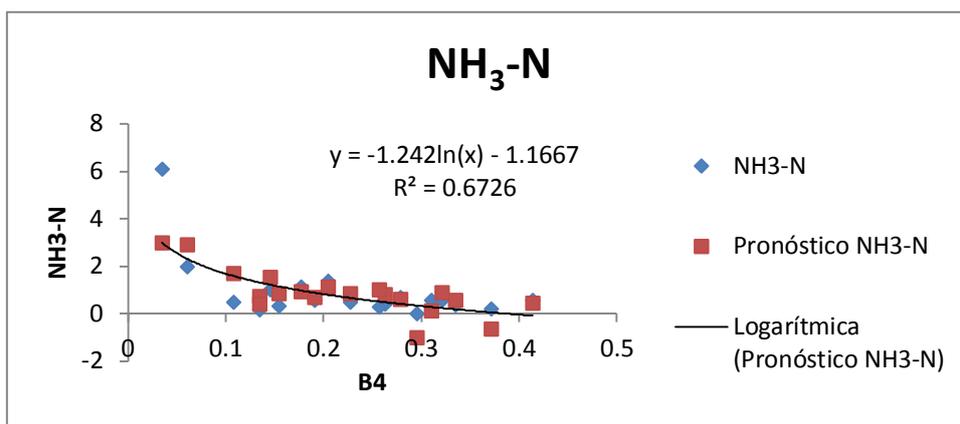


Figura 19. Modelo y  $R^2$  de la banda 4 para NH<sub>3</sub>-N.

Según los modelos de regresión lineal múltiple aplicados en los cinco parámetros resultó que los mejores modelos fueron para BOD, COD y TOC.

BOD:  $y = -4.6032x^2 + 47.818x + 1.8767$ , siendo  $x$  la reflectancia de la banda 2.

COD:  $y = 43.35x + 3.1631$ , siendo  $x$  la reflectancia de la banda 2.

TOC:  $y = -118.3x^2 - 69.734x + 6.1865$ , siendo  $x$  la reflectancia de la banda 2.

Para fines de determinar la calidad de agua se aplicaron estos modelos para cada estación y los parámetros de calidad de agua BOD y COD según los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM y el Índice de Calidad de Agua (ICA) Resolución Jefatural N° 68- 2018- ANA.

**Cuadro 14. Nuevos valores de Demanda Bioquímica de Oxígeno y Demanda Química de Oxígeno según los modelos de regresión**

| <b>Año</b> | <b>Estación</b> | <b>Banda 2</b> | <b>BOD</b> | <b>COD</b> |
|------------|-----------------|----------------|------------|------------|
| 14/07/1994 | A1              | 0.0581         | 4.64       | 5.68       |
| 09/07/1998 | A1              | 0.0609         | 4.77       | 5.80       |
| 12/07/2005 | A1              | 0.0451         | 4.02       | 5.12       |
| 15/09/2011 | A1              | 0.1104         | 7.10       | 7.95       |
| 14/07/1994 | A2              | 0.0526         | 4.38       | 5.44       |
| 09/07/1998 | A2              | 0.0567         | 4.57       | 5.62       |
| 12/07/2005 | A2              | 0.085          | 5.91       | 6.85       |
| 15/09/2011 | A2              | 0.1609         | 9.45       | 10.14      |
| 14/07/1994 | A3              | 0.0924         | 6.26       | 7.17       |
| 09/07/1998 | A3              | 0.0839         | 5.86       | 6.80       |
| 12/07/2005 | A3              | 0.0717         | 5.28       | 6.27       |
| 15/09/2011 | A3              | 0.1068         | 6.93       | 7.79       |
| 14/07/1994 | N1              | 0.0582         | 4.64       | 5.69       |
| 09/07/1998 | N1              | 0.0646         | 4.95       | 5.96       |
| 12/07/2005 | N1              | 0.058          | 4.63       | 5.68       |
| 15/09/2011 | N1              | 0.0774         | 5.55       | 6.52       |
| 14/07/1994 | N2              | 0.0388         | 3.73       | 4.85       |
| 09/07/1998 | N2              | 0.0432         | 3.93       | 5.04       |
| 12/07/2005 | N2              | 0.0498         | 4.25       | 5.32       |
| 15/09/2011 | N2              | 0.067          | 5.06       | 6.07       |

Una vez obtenidos estos valores se procedió a aplicar los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) y el Índice de Calidad del Agua (ICA).

Los Estándares de Calidad Ambiental seleccionados fueron las siguientes:

Categoría 1: Poblacional y Recreacional- A3: Aguas que pueden ser potabilizadas con tratamiento avanzado.

Categoría 4: Conservación del ambiente acuático- E2: Ríos, Selva.

El ICA dió como resultado cero para los factores 1, 2 y 3 con un Índice de Calidad de Agua igual a 100 (Cuadro 15 y 16).

**Cuadro 15. Excedente, factor y valores del ICA para la Categoría 1-A3**

|  |                             |      |   |     |     |     |     |
|--|-----------------------------|------|---|-----|-----|-----|-----|
| Cálculo de los factores del ICA- PE excedentes de cada parámetro en cada monitoreo | F1                          |      | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |
|  | F2                          |      | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |
|  | BOD                         | mg/L |   |     |     |     |     |
|  | COD                         | mg/L |   |     |     |     |     |
|  | Sumatoria de los excedentes |      | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |
|  | F3                          |      | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |
| <b>ICA-CCME</b>  |                             |      | 100   | 100 | 100 | 100 | 100 |
|  |                             |      | <b>Excelente</b>  |     |     |     |     |
|  |                             |      | La calidad del agua está protegida con ausencia de amenazas o daños. Las condiciones son muy cercanas a niveles naturales o deseados. |     |     |     |     |

**Cuadro 16. Excedente, factor y valores de ICA para la categoría 4-E2**

|  |                             |      |   |     |     |     |     |
|--|-----------------------------|------|---|-----|-----|-----|-----|
| Cálculo de los factores del ICA- PE excedentes de cada parámetro en cada monitoreo | F1                          |      | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |
|  | F2                          |      | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |
|  | BOD                         | mg/L |   |     |     |     |     |
|  | Sumatoria de los excedentes |      | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |
|  | F3                          |      | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |
| <b>ICA-CCME</b>  |                             |      | 100   | 100 | 100 | 100 | 100 |
|  |                             |      | <b>Excelente</b>  |     |     |     |     |
|  |                             |      | La calidad del agua está protegida con ausencia de amenazas o daños. Las condiciones son muy cercanas a niveles naturales o deseados. |     |     |     |     |

Los Cuadros 15 y 16 muestran que la calidad de agua de los ríos Aguaytía y Neshuya están protegidos, con ausencia de amenazas o daños. Las condiciones son muy cercanas a niveles naturales o deseados.

### 4.1.5 Análisis de Componentes Principales

Según el Análisis de Componentes Principales, los dos primeros componentes poseen el mayor valor de correlación 77.59% y 16.64% respectivamente. Esto representa el 84.23% del valor total de los componentes (Anexo 6).

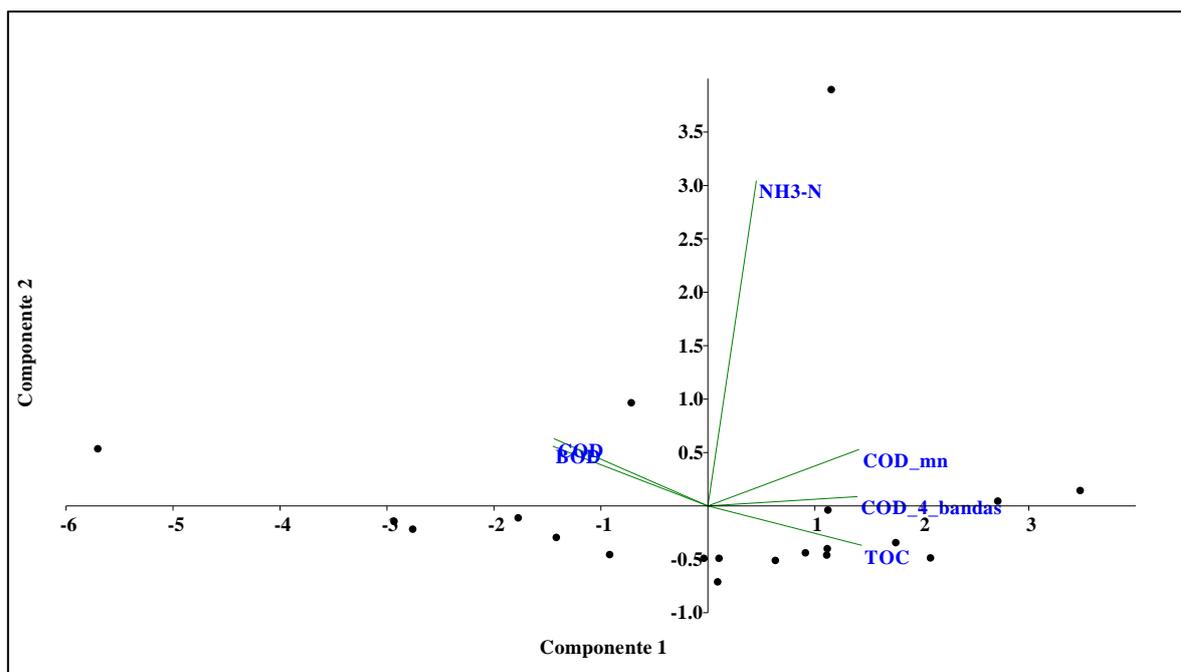


Figura 20. Gráfico biplot de los scores de los componentes principales.

## 4.2 DISCUSIÓN

Las imágenes satelitales pueden proveer medios accesibles para integrar datos limnológicos colectados desde tradicionales mediciones *in situ*. Desde 1980, con el mejoramiento del sensor espacial y resolución espectral, el sensoramiento remoto por imágenes satelitales ha sido usado para monitoreo de aguas continentales por el uso de correlación entre la reflectancia de la banda ancha y otras propiedades de la columna de agua, incluyendo la profundidad del disco Secchi, concentración de clorofila, pigmentos, total de sedimentos suspendidos, temperatura y calidad de agua analizados en laboratorio (Schiebe et al. 1992; Dekker y Peters 1993; Schneider y Mauser 1996; Fraser 1998; Zilioli y Brivio 1997; Giardino et al. 2001; Kloiber et al. 2000,2002; Carpenter y Carpenter 1983; Lathrop y

Lillesand 1986; Ritchie et al.1987). Otros parámetros tales como CDOM (color de la materia orgánica disuelta), COD (Oxígeno Químico Demandado), BOD<sub>5</sub> (Oxígeno Biológico Demandado), TN (Nitrógeno Total) y TP (Fósforo Total) también han sido estudiados (Wang et al. 2004; He et al. 2008; Dogan et al. 2009).

Con relación al uso de imágenes satelitales puede indicarse que son ideales para determinar los parámetros de calidad de agua a una escala global, lo que puede generar monitoreos continuos a bajo costo y tiempo, alerta temprana precisa para desastres de calidad de agua en el futuro (Ding et al. 2016; Haji et al. 2016).

La variación estacional es otro factor importante para el sensor remoto y las condiciones hidráulicas. Los parámetros de calibración deben ajustarse en diferentes temporadas. Este estudio se realiza en la estación seca, los parámetros de calibración y los modelos estadísticos deben modificarse mientras se utilizan en la estación húmeda. El método de regresión múltiple debe probarse y modificarse mediante algunos resultados de análisis de muestras de terreno y aplicarse regionalmente.

Con el transcurrir de los años han surgido varios métodos para relacionar el valor de la bandas con los valores *in situ* y demostrar que el uso de imágenes satelitales permite estimar los valores de calidad de agua. Por ejemplo, se usó la regresión lineal para establecer modelos de parámetros para implementar la recuperación de datos desde la mejor banda o combinaciones de bandas (Carpenter y Carpenter 1983, Lathrop y Lillesand 1986, Ritchie et al. 1987). Wang et al. (2004) utilizaron técnicas estadísticas como regresión múltiple que incluye modelos lineales, exponenciales y logarítmicas. Luego apareció el método por redes neuronales (Artificial Neural Networkd – ANN), que puede implementar algún mapeo no lineal sin especificaciones de la forma de función de regresión en virtud a sus propiedades de cajas negras (Teodoro et al. 2007, Van DerWoerd y Pasterkamp 2008, Dogan et al. 2009). El problema con los modelos ANN es que determinar la estructura de la red es muy difícil y los resultados dependen de la experiencia de los investigadores y tamaño de muestra. En el año 2011, Wang et al. (2011) desarrollaron el método de Regresión de apoyo vectorial (Support Vector Regression- SVR) para variables de calidad de agua recuperados por sensoramiento remoto (Vapnik 1995; Vapnik et al. 1996; Burges 1998) y la estructura del modelo puede ser fácilmente determinado. Wang usó el modelo SVR para establecer los modelos de calidad de agua, y usó un algoritmo genético (GA) para escoger el modelo de

los parámetros automáticamente. Los modelos fueron usados para rescatar variables de calidad de agua tales como el índice de permanganato ( $\text{COD}_{\text{Mn}}$ ), concentración de nitrógeno-amonio ( $\text{NH}_3\text{-N}$ ) y COD, y obtener mapas de calidad de agua desde el satélite SPOT-5 y las mediciones *in situ*. Para el presente estudio se utilizaron las dos técnicas, Wang et al. (2004) y Wang et al. (2011) con la finalidad de establecer cuál es el mejor método que puede aplicarse en los ríos amazónicos. En este caso la regresión múltiple es el que mejor se ajusta a estos ríos.

Para el caso de la presente tesis no fue necesario coleccionar muestras y realizar mediciones *in situ* de la radiación y las condiciones atmosféricas ya que se ha comparado dos métodos (Wang et al. 2004; Wang et al. 2011) y se ha elegido el mejor método para los ríos Neshuya y Aguaytía. Además, el software ENVI 4.5 no necesita de mediciones *in situ* de la radiación y condiciones atmosféricas para realizar la calibración y corrección de los datos de la imagen satelital.

Wang et al (2004) demostraron la posibilidad, la precisión, el potencial y la eficacia para determinar las mediciones de la calidad del agua como TOC, BOD y COD. Por lo tanto, esta técnica tiene muchas ventajas, ya que proporciona la distribución espacial de los parámetros del agua y un consumo de tiempo y dinero relativamente menor en comparación con los métodos tradicionales. Recomienda que algunos factores deben ser considerados mientras se utiliza esta técnica. Estos factores incluyen, por ejemplo, usar una muestra compuesta de áreas relativamente grandes en una ubicación en lugar de una sola muestra para el análisis de laboratorio, debido a la resolución espacial de TM. Las mediciones *in situ* de la radiación y las condiciones atmosféricas son de vital importancia tanto para la calibración como para la corrección de datos detectados a distancia y la construcción del modelo estadístico de la calidad del agua. En una nueva área, es necesario realizar las mediciones *in situ* de espectros y condiciones atmosféricas, incluso si se utiliza la misma técnica y procedimiento. Combinando con la medición real, se deben comparar diferentes métodos de calibración y corrección atmosférica en una nueva área o depósito para determinar la mejor estrategia.

El tamaño de los píxeles de la ubicación debe ser evaluado. Por supuesto, la reflectancia de un solo píxel analizado no pudo compararse con una muestra de suelo debido a la fluidez del agua. Algunos expertos toman la escala de  $3 \times 3$  píxeles (Giardano et al. 2001). Por lo tanto el consideró escalas más grandes, como  $5 \times 5$  píxeles. Según la experiencia de la autora, se ha considerado sólo un píxel para hallar la reflectancia del píxel, habiendo obtenido

resultados significativos. Para el caso de la presente tesis, las imágenes corresponden a la estación seca debido a la poca existencia de nubes en la imagen. Se coincide con Wang et al. (2004) en el método de regresión múltiple, que debe probarse y modificarse aunque no se han realizado mediciones *in situ*, pero sí deben considerarse las características del terreno y aplicarse regionalmente.

Para determinar los valores de los píxeles se han utilizados una gran cantidad de satélites y sensores como Landsat 7, Landsat 8, Chris Proba, entre otros (Gürsoy et al. 2015; Qiu et al. 2006; Wang et al. 2011; Wang et al. 2004; Imen et al. 2014; Wang et al. 2012; Ding et al. 2016; Miao-fen et al. 2007) para obtener estos valores las imágenes debían calibrarse y corregirse debido a los efectos atmosféricos. Este tratamiento ha sido utilizado por diversos autores y diferentes cuerpos de agua y la presente tesis no ha sido la excepción (Qiu et al. 2006; Wang et al. 2011; Wang et al. 2004; Imen et al. 2014).

En la población de la que se extrajo la muestra, la variable dependiente está relacionada en forma lineal con las variables independientes como un solo grupo. El modelo lineal proporciona un buen ajuste para los datos y los valores son significativos. Como consecuencia la ecuación propuesta por Wang et al. (2004) puede ser aplicado en ríos amazónicos, el método de imágenes satelitales puede usarse para hallar valores de Demanda Bioquímica de Oxígeno del agua, Demanda Química de Oxígeno del agua y Carbono Orgánico Total.

Los resultados que se han obtenido demuestran que el coeficiente de determinación es igual a 1 quiere decir que la ecuación puede ser utilizada para hallar los valores de Demanda Bioquímica de Oxígeno, Demanda Química de Oxígeno y Carbono Orgánico Total. El coeficiente de correlación múltiple muestra el valor de 1, es decir existe una correspondencia perfecta entre los valores de la banda y la BOD, COD y TOC (Cuadro 9). Los valores de las bandas, BOD, COD y TOC, usando tres bandas, obtienen el máximo valor de coeficiente de determinación y coeficiente de correlación múltiple con valores significativos. Es decir, las ecuaciones propuestas por Wang et al. (2004) son aplicables para ríos amazónicos en el Perú, mientras que las ecuaciones propuestas por Wang et al. (2011) para los resultados de  $COD_{Mn}$ ,  $NH_3-N$  y COD de cuatro bandas presentaron valores de coeficiente de determinación y coeficiente de correlación múltiple altos y valores significativos pero no son los suficientemente fiables ya que sería necesario comparar estos resultados con otras

ecuaciones que pudiesen obtener valores de coeficiente de determinación y coeficiente de correlación múltiple máximo, tal como ocurrió en el caso de COD de 3 bandas y COD de cuatro bandas. Para el caso de COD se obtuvo  $R^2 = 0.9861$  para 3 bandas y  $R^2 = 0.9732$  de 4 bandas, con modelos lineal y polinómica respectivamente. Según estos resultados el mejor modelo es con el mayor  $R^2$  con 3 bandas. Se concluye que la ecuación propuesta por Wang et al. (2004), que usa 3 bandas, es la que mejor se adecua para ríos amazónicos. Ding et al. (2016) realizaron una investigación en el río Hun muy similar al presente estudio, en la cual también aplicó análisis de correlación entre las bandas y los parámetros de calidad de agua COD y Nitrógeno amoniacal, y se procedió a realizar análisis de correlación y de regresión. En su caso los modelos de función con el mayor valor R cuadrado (coeficiente de correlación) fueron obtenidos agregando la línea de tendencia, pero no se obtuvo el rango ideal de toma de valores (0.8 – 0.95). Si bien Ding et al. (2016) mencionaron un rango ideal, según los estadísticos cuanto más se acerque  $R^2$  a 1 el valor es mejor. Lo importante es que los resultados obtenidos en el presente estudio, son congruentes con aquellos obtenidos en otras latitudes.

Respecto al nitrógeno amoniacal puede mencionarse que no estuvo en el rango ideal. Esto puede deberse a que es un parámetro que no ha sido investigado con la suficiente precisión hasta la fecha debido a sus débiles características ópticas y baja relación de señal de ruido. Estos datos son congruentes con lo hallado por Haji et al. (2016), sin embargo puede señalarse que a pesar de las limitaciones mencionadas, la teledetección sigue siendo una herramienta útil para el control de la calidad del agua (Haji et al. 2016).

Imen et al. (2014) realizaron un estudio con el parámetro TOC en la cual fusionó imágenes Modis de 250 ó 500 m de resolución con imágenes Landsat 5 TM / 7 ETM + de 30 m de resolución y la frecuencia de las imágenes, Modis tiene imágenes diarias y Landsat cada 16 días. La ventaja de fusionar estas imágenes fue obtener imágenes de alta resolución espacio-temporal. En este caso se aplicó el método Red Neuronal Artificial para identificar la relación entre los valores de TOC y la reflectancia de la superficie obteniendo como coeficiente de correlación cuadrado entre el TOC observado y el previsto igual a 0.5014, siendo este valor bajo comparado con el método aplicado en el presente estudio.

Haji et al. (2016) desarrollaron una revisión de la literatura en la cual confirmó que existen algunas técnicas estadísticas para determinar la relación entre la reflectancia estimada de los

satélites y los parámetros fisicoquímicos del agua, en la que se desarrollaron varios modelos de calidad de agua, estableciendo regresiones lineales, exponenciales y logarítmicas, tal como se ha desarrollado en la presente tesis. Además, se han estudiado varias relaciones de bandas para obtener los mapas de distribución de oxígeno disuelto, demanda química de oxígeno y demanda bioquímica de oxígeno con el fin de analizar los cambios espaciotemporales de estos parámetros de calidad de agua.

Una vez que se obtuvo los valores de calidad de agua para BOD y COD se pudo aplicar los Estándares de Calidad Ambiental según la legislación del Ministerio del Ambiente, y el Índice de Calidad de Agua (ICA). Para todas las estaciones se demostró que la calidad de está en excelentes condiciones, debido al balance hídrico y a que el flujo de sedimentos en la cuenca es constante y permite que el agua del río se renueve rápidamente.

Se debe enfatizar que este método no puede sustituir los métodos tradicionales porque algunos parámetros de la calidad del agua, como metales pesados, nitrato, el fosfato y los contaminantes orgánicos no se pueden determinar por teledetección.

Los ecosistemas acuáticos, tales como ríos, lagunas y el mar, presentan características fisicoquímicas como la temperatura, oxígeno disuelto, Demanda Química de Oxígeno (COD) Químico, Demanda Bioquímica de Oxígeno (BOD), nitrógeno amoniacal, índice de permanganato, etc. Estas características son conocidas como parámetros de calidad de agua. Una variación en el valor de estos parámetros provoca cambios en el ecosistema, por ello estos ecosistemas están expuestos a presentar umbrales ecológicos. En este caso, el río Aguaytía y Neshuya no son ajenos a estos cambios, porque un cambio en los valores de los parámetros de calidad de agua podría alterar toda la composición biótica.

Con los parámetros de BOD, COD y  $N-NH_3$  se puede determinar la degradación/biodegradación de un ecosistema (Grisa et al. 2010). Según el análisis de componentes principales se observa un alto predominio de las variables BOD y COD a lo largo del primer componente principal, mientras que la variable  $N-NH_3$  presenta un alto predominio en el componente 2 (Figura 20). El primer componente principal explica lo relacionado con la degradación anaeróbica de los microorganismos sobre la materia orgánica contenida en el río. Mientras que el segundo componente principal, da explicación a la actividad biológica (relacionada con el control de acidez del medio). Así se concluye que el

segundo componente principal está más relacionado con la actividad biológica. Esta semejanza también ha sido observada en el trabajo de Grisa et al. (2010).

## V. CONCLUSIONES

Bajo las condiciones imperantes en el presente estudio puede concluirse lo siguiente:

- El uso de imágenes satelitales permite estimar los valores de calidad de agua de los ríos amazónicos para el caso de los ríos Aguaytía y Neshuya.
- Para la banda 1, los valores de los pixeles se encuentran en el siguiente rango: 0.0226 a 0.1070; banda 2, 0.0388 a 0.1609; banda 3, 0.0341 a 0.1964; y banda 4, 0.0348 a 0.4139.
- Los valores de calidad de agua para Demanda Bioquímica de Oxígeno (BOD) se encuentran en el siguiente rango 3.68 a 9.49; Demanda Química de Oxígeno (COD), 471 a 10.14; Carbono Orgánico Total (TOC), 0.06 a 3.46; índice de permanganato (COD<sub>mn</sub>), 2.15 a 24.67; nitrógeno amoniacal (NH<sub>3</sub>-N), 0.03 a 6.12; Demanda Química de Oxígeno de 4 bandas, 8.24 a 160.72.
- Existe correlación perfecta (R<sup>2</sup> 100%) entre los valores de calidad de agua (BOD, COD y TOC) y las bandas 1, 2 y 3.
- Los valores de las bandas 1, 2, 3, 4 y los valores de calidad de agua, BOD, COD, TOC, COD mn y NH<sub>3</sub>-N, son significativos, ya que los valores de calidad de agua están relacionados en forma lineal con las bandas 1, 2, 3 y 4.
- Los modelos matemáticos para hallar los valores de calidad de agua para BOD, COD y TOC son los siguientes:  
BOD:  $y = -4.6032x^2 + 47.818x + 1.8767$ , x es reflectancia de la banda 2.  
COD:  $y = 43.35x + 3.1631$ , x es la reflectancia de la banda 2.  
TOC:  $y = -118.3x^2 - 69.734x + 6.1865$ , x es la reflectancia de la banda 2.
- El segundo componente principal está relacionado con la actividad biológica.

## VI. RECOMENDACIONES

- Los ríos Aguaytía y Neshuya son de aguas claras, por lo que es recomendable usar esta metodología para río de aguas negras, para saber si el modelo se ajusta para este tipo de ríos.
- Este modelo ha sido aplicado para ríos amazónicos, sería conveniente aplicarlo en ríos de la región andina y costa y determinar la significancia de los datos.
- El método que se propone en esta tesis puede ser utilizado por el Ministerio del Ambiente utilizando los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) y por la Autoridad Nacional del Agua (ANA) a través del índice de Calidad de Agua (ICA) en el cual se determinaría el grado de contaminación del río. Además, el método es muy valioso por ser de bajo costo, dado que al menos las imágenes son gratuitas, se optimiza el tiempo de trabajo, se tiene acceso de áreas remotas a las que el ser humano no podría o no ha ingresado, se puede tener un serie de datos de más de 10 años ya que existen imágenes desde el año 1984 y se puede obtener datos de calidad de agua a lo largo del río en una sola imagen en donde se puede observar si existe contaminación de agua en una determinada área.
- Este método se puede aplicar en proyectos mineros, petroleros, y otros, dado que se podría tener acceso a datos antes del inicio, durante y culminación del proyecto. Es un método que puede ser explotado ya que ofrece datos significativos que ayudan a tomar decisiones y acciones en la conservación y gestión del agua a nivel nacional.
- El método propuesto debe realizarse cada vez que se desea determinar la significancia de los valores encontrados.

## VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abel, T. 1998. Complex Adaptive Systems, Evolutionism, and Ecology within Anthropology: Interdisciplinary Research for Understanding Cultural and Ecological Dynamics. *Journal of Ecological Anthropology* 2: 6-29.
- Adler G., M, Bernstein L., Levine R., Berk A., Richtsmeier C., Acharya P., Anderson G., Felde G., Gardner J., Hoke M., Jeong L, Pukall P., Ratkowski A., and Burke H., (1999). Atmospheric Correction for Short-wave Spectral Imagery Based on MODTRAN4. *SPIE Proceedings on Imaging Spectrometry*, Vol.3753, pp. 61-69.
- ANA. 2018. Metodología para la determinación del índice de calidad de agua ica-pe, aplicado a los cuerpos de agua continentales superficiales. Resolución Jefatural N° 68-2018-ANA.
- Armijos, E. 2010. Cuantificación de flujos sedimentarios de las cuencas amazónicas de Perú. Tesis para optar al título de Ingeniero de Recursos Hídricos. Lima - Perú. Universidad Agraria La Molina. 81 pág.
- Beisner, B. E., Haydon, D. T., Cuddington, K. 2003. Alternative stable states in ecology. *Frontiers in Ecology and the Environment* 1:376-382.
- Bestelmeyer, B. T., Brown, J. R., Havstad, K. M., Alexander, R., Chavez, G., Herrick, J. E. 2003. Development and use of state-and-transition models for rangelands. *Journal of Range Management* 56:114-126.
- Bestelmeyer, B. T., Herrick, J. E., Brown J. R., Trujillo D. A., Havstad, K. M. 2004. Land management in the American southwest: a state-and-transition approach to ecosystem complexity. *Environmental Management* 34:38-51.
- Borengasser, M., Hungate W. S., and Watkins. 2008. *Hyperspectral Remote Sensing Principles and Applications*, CRC Press Taylor & Francis Group – Boca Raton London New York, pp. 119.
- Briske, D. D., Fubendorf, S. D., Smeins, F. E. 2006. A unified framework for assessment and application of ecological thresholds. *Rangeland Ecology*

Management 59: 225-236.

- Burges, C. 1998, A Tutorial on Support Vector Machine For Pattern Recognition. *Data Mining and Knowledge Discovery* 2: 121–167.
- Carpenter, D; Carpenter, S. 1983. Modeling Inland Water Quality Using Landsat Data. *Remote Sensing of Environment* 13: 345–352.
- Davenport, D. W., Breshears, D. D., Wilcox, B. P., Allen, C. D. 1998. Viewpoint: Sustainability of piñon-juniper ecosystems-a unifying perspective of soil erosion thresholds. *Journal of Range Management* 51:231-240.
- Decelles, P. & Hertel, F. 1989. Petrology of fluvial sands from the Amazonian foreland basin, Peru and Bolivia. *Geological Society of America Bulletin* 101:1552-1562.
- Dekker, A; Peters, S. 1993. The Use of the Thematic Mapper for the Analysis of Eutrophic Lakes: A Case Study in the Netherlands. *Int J Remote Sens* 14:788 –821.
- Ding, H; Ren, R; Lin Hao; Wang, X. 2016. Monitoring and Evaluation on Water Quality of Hun River Based on Landsat Satellite Data. *Progress In Electromagnetic Research Symposium (PIERS), Shanghai, China, 8-11 August.*
- Dogan, E; Sengorur, B; Koklu, R. 2009. Modeling Biological Oxygen Demand of the Melen River in Turkey Using an Artificial Neural Network Technique. *Journal of Environmental Management*, 90, pp. 1229–1235.
- DUKE ENERGY PERÚ. 2015. Análisis de huella hídrica en la central termoeléctrica “Aguaytía” acorde a la norma ISO 14046.
- Francés, F.; Bussi, G. 2014. Análisis del impacto del cambio climático en el ciclo de sedimentos de la cuenca del río Ésera (España) mediante un modelo hidrológico distribuido. *Revista Iberoamericana del Agua* 14- 25
- Fraser, R. 1998. Multispectral Remote Sensing of Turbidity Among Nebraska Sand Hills Lakes. *Int J Remote Sens* 19:3011 –3016.
- Fox, J; Bouchet-Valat. 2013. *Getting Started With the R Commander.*
- Gao B. y Goetz, A. 1990. Column atmospheric water vapor and vegetation liquid water retrievals from airborne imaging spectrometer data: *Journal of Geophysical Research*, v. 95, no. D4, p. 3549-3564.
- Garayar C, W. Wust, G. Coronado; M. de Coronado. 2003. *Atlas Departamental del Perú. Madre de Dios / Ucayali. Ediciones Peisa. S.A.C. 168 pp.*
- Giardino, C; Pepe, M; Brivio, P; Ghezzi, P; Zilioli, E.2001. Detecting Chlorophyll,

Secchi Disk Depth and Surface Temperature in a Sub-Alpine Lake Using Landsat Imagery. *Sci Total Environ* 268:19–29.

- Gürsoy, Ö.; Birdala, A.; Özyonar, F.; Kasaka, E. 2015. Determining And Monitoring The Water Quality Of Kizilirmak River Of Turkey: First Results
- Grisa, A., Zeni, M., Muñoz, A. 2010. Análisis Multivariado de Parámetros Fisicoquímicos del Relleno Sanitario de São Giacomo de Caxias do Sul, RS en la de Degradación de Polipropilene. *Polímeros*, vol. 20, nº 2, p. 159-164.
- Groffman, P. M., Baron, J. S., Blett, T., Gold, A. J., Goodman, I., Gunderson, L. H., Levinson, B. M., Palmer, M. A., Paerl, H. W., Peterson, G. D., LeRoy Poff, N., Rejeski, D. W., Reynolds, J. F., Turner, M. G., Weathers, K. C., Wiens, J. 2006. Ecological thresholds: the key to successful environmental management or an important concept with no practical application?. *Ecosystems* 9:1-13.
- Gunderson, L., Holling, C. 2002. *Panarchy: understanding transformations in human and natural systems*. Washington (DC): Island Press.
- Haji, M; Gholizadeh, A. ; Reddi, L. 2016. A comprehensive review on water quality parameters estimation using remote sensing techniques. *Sensors*. 2016, 16, 1298.
- He, W; Chen, S; Liu, X; Chen, J. 2008. Water Quality Monitoring in a Slightly polluted Inland Water Body Through Remote Sensing: Case Study of the Guanting Reservoir in Beijing, China. *Frontiers of Environmental Science and Engineering in China* 2: 163–171.
- Holling, C. S. 1973. Surprise for science, resilience for ecosystems, and incentives for people. *Ecological Applications* 6:733-735.
- Holling, C. S. 1996. Resilience and stability of ecological systems. *Annual Review of Ecology Systems* 4:1-23.
- Imen. S; Chang, N; Yang, Y. 2014. Monitoring Spatiotemporal Total Organic Carbon Concentrations In Lake Mead With Integrated Data Fusion And Mining (IDFM) Technique.
- IPROGA. 1996. Metodología para la elaboración de planes maestros de cuencas. Marco Conceptual. IPROGA. Lima. 78 p.
- Jensen, J. 2004. *Introductory Digital Image Processing, A Remote sensing Perspective*. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall, pp.25.
- Jimenez, A. 2000. Determinación de los parámetros fisico-químicos de calidad de las aguas. *Gestión Ambiental* 2000, vol. 2(23) pag. 12-19.

- Kalliola, R. and M. Puhakka. 1993. Geografía de la Selva Baja Peruana. En: KALLIOLA, Risto., PUHAKKA, Maarit and DANJOY, Walter (edit). Amazonía Peruana. Finlandia: Gummerus Printing, 1993, p. 9-21.
- Kloiber, S.; Anderle, T.; Brezonik, P.; Olmanson, L; Bauer, M; Brown, D. 2000. Trophic State Assessment of Lakes in the Twin Cities (Minnesota, USA) Region by Satellite Imagery. Arch Hydrobiol Adv Limnol 55:137 –151.
- Kloiber, S; Brezonik, P; Olmanson, L. 2002. A Procedure for Regional Lake Water Clarity Assessment Using Landsat Multispectral Data. Remote Sens Environ 82:38 –47.
- Lathrop, R; Lillesand, T. 1986. Use of Thematic Mapper Data to Assess Water Quality in Green Bay and Central Lake Michigan. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 52: 671–680.
- Lira, J. y Oliver, A. 1983. A diffusion model to correct multi-spectral images for the path—radiance atmospheric effect. Mexico D.F.pp.55-57.
- Lowe-McConnell, R. 1999. Estudos ecológicos em comunidades de peixes tropicais. São Paulo: EDUSP, 1999. 536 p. ISBN. 85-314-0493-1.
- Miao-fen, H.; Xu-Feng, X.; Xian-ping, Q.; Wu-yi, Y.; Yi-min, Z. 2007. Identification Mode of Chemical Oxygen Demand in Water Based on Remotely Sensing Technique and Its Application. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Barcelona, 2007, pp. 1738-1741.
- MINAM. 2008 Aprueban los Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para agua. Decreto Supremo N° 002-2018- MINAM.
- ONERN. 1986. Perfil ambiental del Perú. Oficina Nacional de Evaluación de Recursos Naturales, Lima. 242 pp.
- PEISA. 2003. Atlas Departamental del Perú. Madre de Dios / Ucayali. Ediciones Peisa. S.A.C. 168 pp.
- Pérez, C. 2001. Técnicas Estadísticas con SPSS. Prentice Hall, Madrid.
- Quezada, M; Paredes, R; Carrillo, F; Rojas, J. 2011. A Physical Model of the Estimation of the Chlorophyll a in the Peruvian Sea Using MODIS Images. Revista de Investigación de Física 14: 111402403 (2011).
- Quezada, M.; Paredes, R; Carrillo, F; Rojas, J. 2011. Spatial and temporal variability of chlorophyll a in the Peruvian sea using MODIS-AQUA Images. Revista de Investigación de Física 14: 111402404 (2011).

- Qiu, Y.; Zhang, H.; Tong, X.; Zhang, Y.; Zhao, J. 2006. Monitoring the Water Quality of Water Resources Reservation Area in Upper Region of Huangpu River using Remote Sensing, *2006 IEEE International Symposium on Geoscience and Remote Sensing*, Denver, CO, 2006, pp. 1082-1085.
- Raffo, E.; Ruiz, E. 2014. Caracterización de las aguas residuales y la demanda bioquímica de oxígeno. *Revista de la Facultad de Ingeniería Industrial*. 17(1): 71-80 (2014) UNMSM.
- Ramalho, R. 2003. Tratamiento de Aguas Residuales. Barcelona: España, Editorial Reverté, S.A.
- Resilience Alliance. 2008. <http://www.resalliance.org/570.php> - Acceso en noviembre 2008.
- Ritchie, J; Cooper, C; Jiang, Y. 1987. Using Landsat Multispectral Scanner Data to Estimate Suspended Sediments in Moon Lake, Mississippi. *Remote Sensing of Environment*, 23: 65–81.
- Rodriguez, F. 1998. Zonificación Ecológica y Económica de la Cuenca del río Aguaytía. Instituto de Investigación de la Amazonía Peruana.
- Rojas, J.; Guillén, A; Aguirre, C; Tarazona, J; Córdova, C; Santisteban, C; Quezada, M; Eche. J. 2007. Estudio de la Variabilidad espacial y Estacional de la Concentracion de la Clorofila-a en el Mar Peruano usando imágenes del sensor MODIS del satélite AQUA y su relación con el fenomeno El Niño en el Perú. Informe Técnico 2007, Instituto de Investigacion de Física.
- Rudorff, B; Epiphonio, J; Shimabukuro, Y; Krug, T; Carvalho, H. 1996. Applications of the Brazilian remote sensing satellite (SSR) to monitor the Amazon region. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*. Vol XXXI, Part B7. Vienna.
- Scheffer, M., Carpenter, S., Foley, J. A., Folke, C., Walker, B. 2001. Catastrophic shifts in ecosystems. *Nature* 413:591-596.
- Schiebe, F; Harrington, J; Ritchie, J. 1992. Remote Sensing of Suspended Sediments: the Lake Chicot, Arkansas Project. *Int J Remote Sens* 1992; 13:1487 –1509.
- Schneider, K; Mauser, W. 1996. Processing and accuracy of Landsat thematic mapper for lake surface temperature measurement. *Int J Remote Sens* 11:2027 – 2041.

- Sioli, H. 1984. The Amazon, Limnology and landscape ecology of a mighty river and its basin. DR. W. JUNK PUBLISHERS. Dordrecht.
- Slater, P. 1980. Remote Sensing: Optics and Optical Systems. Addison Wesley Publishing Company, Reading, Massachusetts, pp.575.
- Stringham, T. K., Krueger, W. C., Shaver, P. L. 2003. State and transition modelling: an ecological process approach. *Journal of Range Management* 56:106-113.
- Teodoro, A; Veloso-Gomes, F; Gonçalves, H. 2007. Retrieving TSM Concentration from Multispectral Satellite Data by Multiple Regression and Artificial Neural Networks. *IEEE Trans on Geoscience and Remote Sensing*, 45: 1342–1350.
- UNESCO. 2006. Balance hídrico superficial del Perú a nivel multianual. Documentos Técnicos del PHI-LAC, N°1.
- Van Der Woerd, H; Pasterkamp, R. 2008. HYDROPT: A Fast and Flexible Method to Retrieve Chlorophyll-a from Multispectral Satellite Observations of Optically Complex Coastal Waters. *Remote Sensing of Environment* 112: 1795–1807.
- Vapnik, V. 1995. *The Nature of Statistical Learning*, pp. 181–224 (New York: Springer).
- Vapnik, V; Golowich, S; Smola, A. 1996. Support Vector Method for Function Approximation, Regression Estimation, and Signal Processing. In *Advances in Neural Information Processing Systems 9*, M. Mozer, M. Jordan and T. Petsche (Eds.), pp. 281–287 (Cambridge, MA: MIT Press).
- Wang, X; Wang, Q; Wu, C; Liang, T; Zheng, D; Wei, X. 2012. A Method Coupled with Remote Sensing Data to Evaluate Non – Point Source Pollution in the Xin’anjiang Catchment of China. *Science of the Total Environment* 430: 132-143.
- Wang, Y; Xia, H; Fu, J; Sheng, G. 2004. Water Quality Change in Reservoirs of Shenzhen, China: Detection Using Landsat/TM Data. *Science of the Total Environment*. 328 (2004) 195–206.
- Wang, X; Fu, L; He, C. 2011. Applying Support Vector Regression to Water Quality Modelling by Remote Sensing Data, *International Journal of Remote Sensing*, 32:23, 8615-8627.
- Weeks B., Rodriguez M.A. & Blakeslee J.H. 2004. *Panarchy: Complexity and Regime Change in Human Societies*. Santa Fe Institute Complex Systems Summer

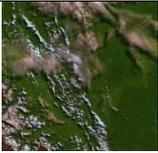
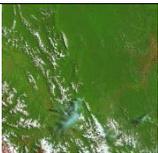
School Proceedings.

- Zilioli, E; Brivio, P. 1997.The Satellite Derived Optical Information for the Comparative Assessment of Lacustrine Water Quality. *Sci Total Environ* 1997; 196:229 –245.

## VIII. ANEXOS

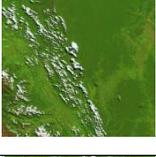
### ANEXO 1. NOMBRE Y FECHA DE LAS IMÁGENES DISPONIBLES EN LA WEB DE USGS

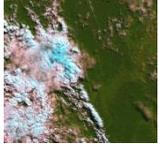
**Cuadro A 1: Nombre, fecha e imágenes satelitales de la web de USGS.**

| ID                    | Fecha      | Imagen  |
|-----------------------|------------|---|
| LT50070661998142AAA01 | 1998/5/22  |    |
| LT50070661998158XXX01 | 1998/6/7   |   |
| LT50070661998174AAA01 | 1998/6/23  |  |
| LT50070661998254CUB02 | 1998/9/11  |  |
| LT50070661998270XXX02 | 1998/9/27  |  |
| LT50070661998286XXX02 | 1998/10/13 |  |
| LT50070661999161CPE01 | 1999/6/10  |  |

| ID                    | Fecha      | Imagen  |
|-----------------------|------------|---|
| LT50070661999193AAA03 | 1999/7/12  |    |
| LT50070661999257AAA03 | 1999/9/14  |    |
| LT50070661999289XXX02 | 1999/10/16 |    |
| LT50070661999305CUB01 | 1999/11/1  |    |
| LT50070662000004CUB00 | 2000/1/4   |   |
| LT50070662000132XXX02 | 2000/5/11  |  |
| LT50070662000148XXX02 | 2000/5/27  |  |
| LT50070662000212XXX02 | 2000/7/30  |  |
| LT50070662000228XXX02 | 2000/8/15  |  |
| LT50070662000244XXX02 | 2000/8/31  |  |

| ID                    | Fecha      | Imagen  |
|-----------------------|------------|---|
| LT50070662000276XXX01 | 2000/10/2  |    |
| LT50070662000292XXX02 | 2000/10/18 |    |
| LT50070662001182CUB01 | 2001/7/1   |    |
| LT50070662001214CUB01 | 2001/8/2   |    |
| LT50070662001230CUB01 | 2001/8/18  |   |
| LT50070662001262CUB00 | 2001/9/19  |  |
| LT50070662001294CUB00 | 2001/10/21 |  |
| LT50070662003236CUB01 | 2003/8/24  |  |
| LT50070662003268CUB00 | 2003/9/25  |  |
| LT50070662003316CUB00 | 2003/11/12 |  |

| ID                    | Fecha     | Imagen  |
|-----------------------|-----------|---|
| LT50070662004031CUB00 | 2004/1/31 |    |
| LT50070662005145CUB00 | 2005/5/25 |    |
| LT50070662005193CUB00 | 2005/7/12 |    |
| LT50070662005209CUB00 | 2005/7/28 |    |
| LT50070662005225CUB00 | 2005/8/13 |   |
| LT50070662005241CUB00 | 2005/8/29 |  |
| LT50070662006132CUB00 | 2006/5/12 |  |
| LT50070662006148CUB00 | 2006/5/28 |  |
| LT50070662006260CUB00 | 2006/9/17 |  |
| LT50070662007135CUB00 | 2007/5/15 |  |

| ID                    | Fecha      | Imagen  |
|-----------------------|------------|---|
| LT50070662007167CUB00 | 2007/6/16  |    |
| LT50070662007183CUB00 | 2007/7/2   |    |
| LT50070662008186CUB00 | 2008/7/4   |    |
| LT50070662008202CUB00 | 2008/7/20  |    |
| LT50070662008218CUB00 | 2008/8/5   |   |
| LT50070662008234CUB00 | 2008/8/21  |  |
| LT50070662009156CUB00 | 2009/6/5   |  |
| LT50070662009284CUB00 | 2009/10/11 |  |
| LT50070662009300CUB00 | 2009/10/27 |  |
| LT50070662010111CUB00 | 2010/4/21  |  |

| ID                    | Fecha      | Imagen  |
|-----------------------|------------|---|
| LT50070662010223CUB00 | 2010/8/11  |    |
| LT50070662010271CUB00 | 2010/9/28  |    |
| LT50070662010287CUB00 | 2010/10/14 |    |
| LT50070662011194CUB00 | 2011/7/13  |    |
| LT50070662011210CPE00 | 2011/7/29  |   |
| LT50070662011226CUB00 | 2011/8/14  |  |
| LT50070662011258CUB00 | 2011/9/15  |  |

**ANEXO 2. FECHA Y COBERTURA DE NUBES DE LA IMÁGENES  
DISPONIBLES EN LA WEB DE USGS**

**Cuadro A 2: Fecha y cobertura de nubes de las imágenes satelitales.**

| <b>Nº</b> | <b>Fecha</b> | <b>CC (%)</b> | <b>Nº</b> | <b>Fecha</b> | <b>CC (%)</b> |
|-----------|--------------|---------------|-----------|--------------|---------------|
| 1         | 14/01/1998   | 98            | 121       | 17/01/2005   | 88            |
| 2         | 30/01/1998   | 36            | 122       | 02/02/2005   | 99            |
| 3         | 15/02/1998   | 80            | 123       | 18/02/2005   | 98            |
| 4         | 03/03/1998   | 98            | 124       | 06/03/2005   | 100           |
| 5         | 19/03/1998   | 87            | 125       | 22/03/2005   | 96            |
| 6         | 04/04/1998   | 94            | 126       | 07/04/2005   | 92            |
| 7         | 20/04/1998   | 81            | 127       | 23/04/2005   | 80            |
| 8         | 06/05/1998   | 70            | 128       | 09/05/2005   | 83            |
| 9         | 22/05/1998   | 10            | 129       | 25/05/2005   | 30            |
| 10        | 07/06/1998   | 20            | 130       | 10/06/2005   | 50            |
| 11        | 23/06/1998   | 10            | 131       | 26/06/2005   | 37            |
| 12        | 09/07/1998   | 30            | 132       | 12/07/2005   | 15            |
| 13        | 10/08/1998   | 60            | 133       | 28/07/2005   | 4             |
| 14        | 11/09/1998   | 35            | 134       | 13/08/2005   | 6             |
| 15        | 27/09/1998   | 10            | 135       | 29/08/2005   | 6             |
| 16        | 13/10/1998   | 10            | 136       | 14/09/2005   | 98            |
| 17        | 29/10/1998   | 90            | 137       | 30/09/2005   | 48            |
| 18        | 30/11/1998   | 55            | 138       | 16/10/2005   | 92            |
| 19        | 16/12/1998   | 41            | 139       | 01/11/2005   | 87            |
| 20        | 01/01/1999   | 86            | 140       | 17/11/2005   | 71            |
| 21        | 17/01/1999   | 96            | 141       | 05/02/2006   | 58            |
| 22        | 18/02/1999   | 96            | 142       | 21/02/2006   | 100           |
| 23        | 06/03/1999   | 91            | 143       | 09/03/2006   | 84            |
| 24        | 22/03/1999   | 82            | 144       | 10/04/2006   | 68            |
| 25        | 07/04/1999   | 94            | 145       | 26/04/2006   | 100           |

| Nº | Fecha      | CC (%) | Nº  | Fecha      | CC (%) |
|----|------------|--------|-----|------------|--------|
| 26 | 23/04/1999 | 72     | 146 | 12/05/2006 | 51     |
| 27 | 09/05/1999 | 90     | 147 | 28/05/2006 | 6      |
| 28 | 25/05/1999 | 90     | 148 | 13/06/2006 | 97     |
| 29 | 10/06/1999 | 40     | 149 | 29/06/2006 | 81     |
| 30 | 26/06/1999 | 71     | 150 | 15/07/2006 | 71     |
| 31 | 12/07/1999 | 0      | 151 | 31/07/2006 | 96     |
| 32 | 28/07/1999 | 68     | 152 | 01/09/2006 | 39     |
| 33 | 13/08/1999 | 66     | 153 | 17/09/2006 | 25     |
| 34 | 29/08/1999 | 80     | 154 | 03/10/2006 | 41     |
| 35 | 14/09/1999 | 40     | 155 | 19/10/2006 | 96     |
| 36 | 30/09/1999 | 10     | 156 | 04/11/2006 | 92     |
| 37 | 16/10/1999 | 10     | 157 | 20/11/2006 | 53     |
| 38 | 01/11/1999 | 10     | 158 | 06/12/2006 | 93     |
| 39 | 17/11/1999 | 92     | 159 | 22/12/2006 | 94     |
| 40 | 03/12/1999 | 87     | 160 | 07/01/2007 | 49     |
| 41 | 19/12/1999 | 80     | 161 | 23/01/2007 | 99     |
| 42 | 04/01/2000 | 42     | 162 | 08/02/2007 | 91     |
| 43 | 05/02/2000 | 60     | 163 | 24/02/2007 | 65     |
| 44 | 21/02/2000 | 100    | 164 | 12/03/2007 | 98     |
| 45 | 08/03/2000 | 97     | 165 | 28/03/2007 | 94     |
| 46 | 09/04/2000 | 94     | 166 | 13/04/2007 | 88     |
| 47 | 25/04/2000 | 65     | 167 | 29/04/2007 | 95     |
| 48 | 11/05/2000 | 20     | 168 | 15/05/2007 | 17     |
| 49 | 27/05/2000 | 30     | 169 | 31/05/2007 | 85     |
| 50 | 12/06/2000 | 20     | 170 | 16/06/2007 | 27     |
| 51 | 28/06/2000 | 10     | 171 | 02/07/2007 | 18     |
| 52 | 14/07/2000 | 60     | 172 | 18/07/2007 | 42     |
| 53 | 30/07/2000 | 10     | 173 | 03/08/2007 | 80     |
| 54 | 15/08/2000 | 10     | 174 | 19/08/2007 | 98     |

| Nº | Fecha      | CC (%) | Nº  | Fecha      | CC (%) |
|----|------------|--------|-----|------------|--------|
| 55 | 31/08/2000 | 0      | 175 | 04/09/2007 | 20     |
| 56 | 16/09/2000 | 90     | 176 | 20/09/2007 | 89     |
| 57 | 02/10/2000 | 0      | 177 | 26/01/2008 | 91     |
| 58 | 18/10/2000 | 30     | 178 | 11/02/2008 | 32     |
| 59 | 03/11/2000 | 91     | 179 | 27/02/2008 | 100    |
| 60 | 05/12/2000 | 100    | 180 | 14/03/2008 | 90     |
| 61 | 06/01/2001 | 100    | 181 | 30/03/2008 | 86     |
| 62 | 22/01/2001 | 99     | 182 | 15/04/2008 | 95     |
| 63 | 07/02/2001 | 70     | 183 | 01/05/2008 | 100    |
| 64 | 23/02/2001 | 100    | 184 | 17/05/2008 | 39     |
| 65 | 11/03/2001 | 64     | 185 | 02/06/2008 | 70     |
| 66 | 27/03/2001 | 86     | 186 | 18/06/2008 | 35     |
| 67 | 12/04/2001 | 77     | 187 | 04/07/2008 | 41     |
| 68 | 28/04/2001 | 49     | 188 | 20/07/2008 | 24     |
| 69 | 14/05/2001 | 99     | 189 | 05/08/2008 | 28     |
| 70 | 30/05/2001 | 84     | 190 | 21/08/2008 | 35     |
| 71 | 15/06/2001 | 46     | 191 | 06/09/2008 | 97     |
| 72 | 01/07/2001 | 14     | 192 | 22/09/2008 | 82     |
| 73 | 17/07/2001 | 41     | 193 | 08/10/2008 | 71     |
| 74 | 02/08/2001 | 6      | 194 | 24/10/2008 | 59     |
| 75 | 18/08/2001 | 16     | 195 | 09/11/2008 | 31     |
| 76 | 03/09/2001 | 18     | 196 | 25/11/2008 | 65     |
| 77 | 19/09/2001 | 18     | 197 | 11/12/2008 | 36     |
| 78 | 05/10/2001 | 87     | 198 | 27/12/2008 | 100    |
| 79 | 21/10/2001 | 19     | 199 | 12/01/2009 | 96     |
| 80 | 06/11/2001 | 93     | 200 | 13/02/2009 | 93     |
| 81 | 22/11/2001 | 76     | 201 | 01/03/2009 | 83     |

| Nº  | Fecha      | CC (%) | Nº  | Fecha      | CC (%) |
|-----|------------|--------|-----|------------|--------|
| 82  | 08/12/2001 | 94     | 202 | 17/03/2009 | 46     |
| 83  | 24/12/2001 | 100    | 203 | 02/04/2009 | 43     |
| 84  | 09/01/2002 | 96     | 204 | 18/04/2009 | 99     |
| 85  | 10/02/2002 | 100    | 205 | 04/05/2009 | 83     |
| 86  | 26/02/2002 | 33     | 206 | 20/05/2009 | 97     |
| 87  | 15/04/2002 | 95     | 207 | 05/06/2009 | 11     |
| 88  | 07/07/2003 | 58     | 208 | 21/06/2009 | 69     |
| 89  | 23/07/2003 | 35     | 209 | 07/07/2009 | 77     |
| 90  | 08/08/2003 | 97     | 210 | 23/07/2009 | 87     |
| 91  | 24/08/2003 | 45     | 211 | 08/08/2009 | 46     |
| 92  | 09/09/2003 | 99     | 212 | 24/08/2009 | 78     |
| 93  | 25/09/2003 | 26     | 213 | 25/09/2009 | 92     |
| 94  | 11/10/2003 | 93     | 214 | 11/10/2009 | 15     |
| 95  | 27/10/2003 | 61     | 215 | 27/10/2009 | 39     |
| 96  | 12/11/2003 | 24     | 216 | 12/11/2009 | 95     |
| 97  | 28/11/2003 | 71     | 217 | 14/12/2009 | 97     |
| 98  | 14/12/2003 | 97     | 218 | 15/01/2010 | 90     |
| 99  | 30/12/2003 | 93     | 219 | 31/01/2010 | 92     |
| 100 | 15/01/2004 | 99     | 220 | 2010/2/16  | 100    |
| 101 | 31/01/2004 | 1      | 221 | 21/04/2010 | 19     |
| 102 | 16/02/2004 | 97     | 222 | 11/08/2010 | 14     |
| 103 | 03/03/2004 | 66     | 223 | 28/09/2010 | 7      |
| 104 | 19/03/2004 | 64     | 224 | 14/10/2010 | 10     |
| 105 | 04/04/2004 | 58     | 225 | 2010/10/30 | 87     |
| 106 | 06/05/2004 | 82     | 226 | 01/12/2010 | 99     |
| 107 | 22/05/2004 | 43     | 227 | 02/01/2011 | 85     |
| 108 | 07/06/2004 | 73     | 228 | 07/03/2011 | 95     |
| 109 | 23/06/2004 | 95     | 229 | 23/03/2011 | 73     |

| Nº  | Fecha      | CC (%) | Nº  | Fecha      | CC (%) |
|-----|------------|--------|-----|------------|--------|
| 110 | 09/07/2004 | 81     | 230 | 08/04/2011 | 89     |
| 111 | 25/07/2004 | 94     | 231 | 24/04/2011 | 52     |
| 112 | 10/08/2004 | 90     | 232 | 10/05/2011 | 92     |
| 113 | 26/08/2004 | 99     | 233 | 26/05/2011 | 82     |
| 114 | 11/09/2004 | 57     | 234 | 11/06/2011 | 94     |
| 115 | 27/09/2004 | 92     | 235 | 27/06/2011 | 90     |
| 116 | 13/10/2004 | 94     | 236 | 13/07/2011 | 22     |
| 117 | 29/10/2004 | 71     | 237 | 29/07/2011 | 6      |
| 118 | 14/11/2004 | 71     | 238 | 14/08/2011 | 12     |
| 119 | 30/11/2004 | 100    | 239 | 30/08/2011 | 48     |
| 120 | 16/12/2004 | 93     | 240 | 15/09/2011 | 25     |
|     |            |        | 241 | 02/11/2011 | 64     |

## ANEXO 3. MANUAL DE USO DEL SOFTWARE ENVI PARA HALLAR LA REFLECTANCIA DE LOS VALORES DE LA BANDA 1, 2, 3 Y 4 DEL SATÉLITE LANDSAT 5 SENSOR TM

### 1.1. ¿Cómo Abrir el Software ENVI?

Cuando cargue el programa ENVI se mostrara en la pantalla, la siguiente barra de menú (Fig.1)



Figura 1: Barra de Menú del software ENVI 4.5

### 1.2. ¿Cómo Cargamos una Imagen LANDSAT en el Software ENVI?

Para cargar una imagen *LANDSAT7 ETM+* en el software *ENVI* se seguira el siguiente procedimiento:

- Desde la barra del menú principal de *ENVI*, seleccionar **File** → **Open Imagen File**
- Se cargara la ventana "**Enter Data Filenames**" donde se busca el archivo que contiene la imagen a trabajar, y finalmente seleccionamos las bandas **10, 20, 30, 40, 50 y 70** y hacer clic en "**Abrir**" (Fig.2).
- La ventana "**Available Bands List**" aparecerá en la pantalla en la cual se observara las 6 Bandas que seleccionamos a la hora de cargar la imagen. Esta lista te permite seleccionar las bandas espectrales de la imagen (Fig.3).

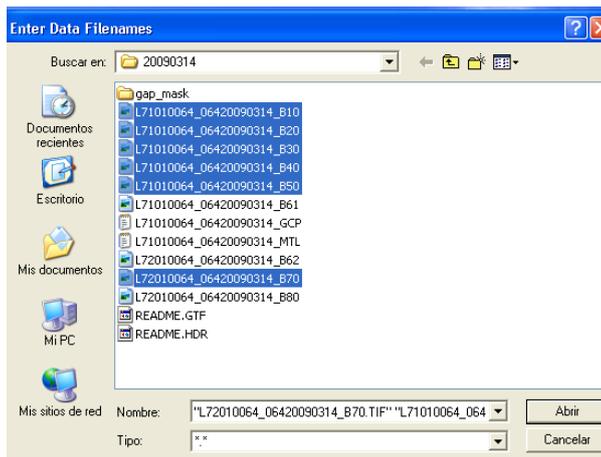


Figura 2: Lista de imágenes

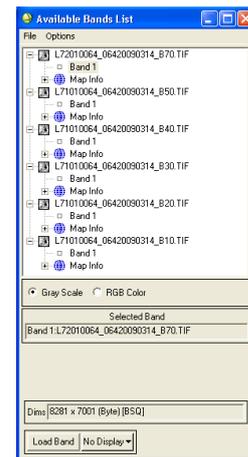


Figura 3: Lista de las bandas espectrales

### 1.3. Visualización de la Imagen.

Para visualizar la imagen existen dos opciones, una es en escala de grises y la otra es en falso color.

- Para visualizar la imagen en escala de grises, en la ventana “*Available Bands List*” seleccionamos una banda, elegimos *Gray Escala*, clic en *Load Band* y la imagen se cargara (Fig.4).
- Para visualizar la imagen en falso color, en la ventana “*Available Bands List*” elegimos tres bandas (las que mejor combinación presenten), elegimos *RGB color*, clic en *Load Band* y la imagen se cargara (Fig.5).

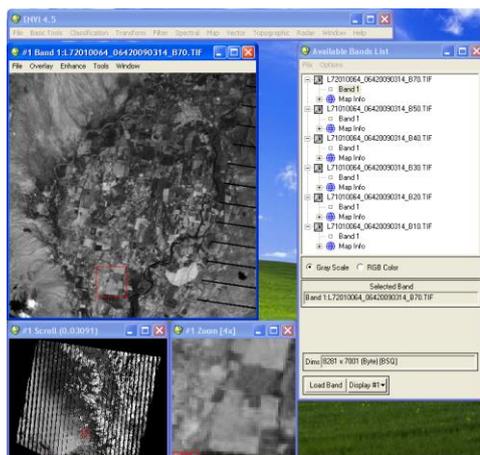


Figura 4: Visualización de la imagen en escala de grises

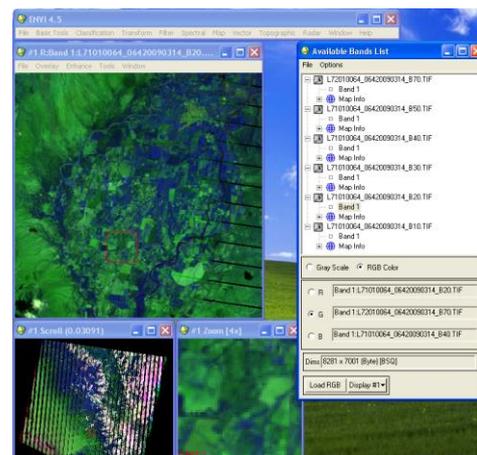


Figura 5: Visualización de la imagen en falso color: RGB.

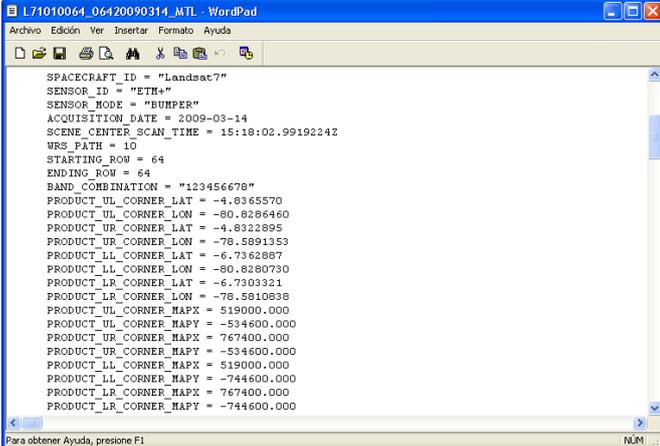
## II. CALIBRACION DE LA IMAGEN LANDSAT 7 ETM+.

Para obtener cualquier parámetro biofísico de una imagen *Landsat7 ETM+*, se debe seguir un procedimiento de pre procesamiento del dato imagen, el mismo que consiste en calibrar la imagen antes de obtener la reflectancia.

### 2.1. Calibración de las Bandas.

Para calibrar la imagen seguimos el siguiente procedimiento:

- Buscamos en la carpeta que contiene la imagen el archivo (MTL) cabecera de la imagen (*L71010064\_06420090314\_MTL*), lo abrimos con la opción *Aplicación MFC WORDPAD* (Fig.6)



```
SPACECRAFT_ID = "Landsat7"  
SENSOR_ID = "ETM+"  
SENSOR_MODE = "BUMPER"  
ACQUISITION_DATE = 2009-03-14  
SCENE_CENTER_SCAN_TIME = 15:18:02.99192242  
WRS_PATH = 10  
STARTING_ROW = 64  
ENDING_ROW = 64  
BAND_COMBINATION = "12345678"  
PRODUCT_UL_CORNER_LAT = -4.8365570  
PRODUCT_UL_CORNER_LON = -80.8286460  
PRODUCT_UR_CORNER_LAT = -4.8322895  
PRODUCT_UR_CORNER_LON = -78.5891353  
PRODUCT_LL_CORNER_LAT = -6.7362887  
PRODUCT_LL_CORNER_LON = -80.8280730  
PRODUCT_LR_CORNER_LAT = -6.730321  
PRODUCT_LR_CORNER_LON = -78.5810838  
PRODUCT_UL_CORNER_MAPX = 519000.000  
PRODUCT_UL_CORNER_MAPY = -534600.000  
PRODUCT_UR_CORNER_MAPX = 767400.000  
PRODUCT_UR_CORNER_MAPY = -534600.000  
PRODUCT_LL_CORNER_MAPX = 519000.000  
PRODUCT_LL_CORNER_MAPY = -744600.000  
PRODUCT_LR_CORNER_MAPX = 767400.000  
PRODUCT_LR_CORNER_MAPY = -744600.000
```

Figura 6: Información de la imagen “L71010064\_06420090314\_MTL”

En donde encontraremos datos necesarios para la calibración de la imagen.

- Siguiendo con el procedimiento de calibración de la imagen nos vamos a la barra del menú principal de ENVI, seleccione *Basic Tools* → *Preprocessing* → *Calibration Utilities* → *Lansat TM*. Se cargara la ventana *TM Calibrtrion Input File*, en donde se selecciona banda por banda para calibrarla una por una, se recomienda empezar por la banda 1 seguida de la banda 2 y así sucesivamente hasta la última banda, con el propósito de no introducir erróneamente los datos, luego de seleccionada la banda le

damos *ok* (Fig. 7).

- En la pantalla se mostrara la ventana *TM Calibration Parameters* (Fig.8)

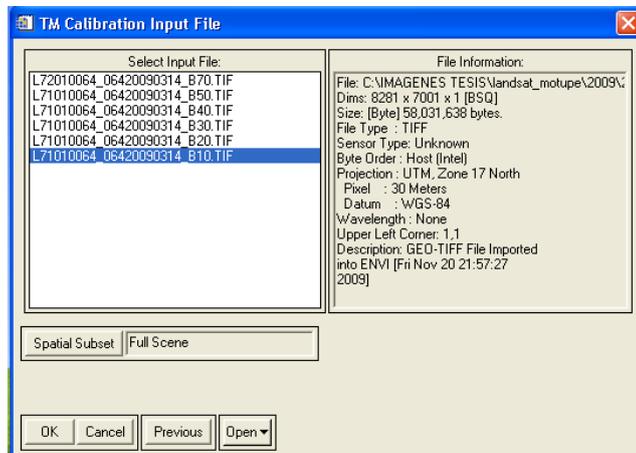


Figura 7: Calibración de las bandas

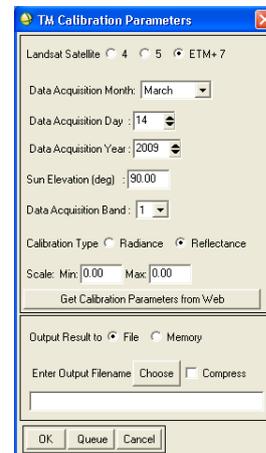


Figura 8: Datos de la calibración

En esta ventana se introducirá todos los datos que te exige, estos datos se encuentran en el archivo cabecera de imagen que anteriormente mencionamos.

- En *Landsat Satellite*, seleccionamos *ETM+ 7*.
- En la opción *Data Acquisition Month*, se introduce el mes en que fue adquirida la imagen, dato que se encuentra en el archivo cabecera de imagen.
- En la opción *Data Acquisition Day*, se introduce el día en que fue adquirida la imagen, dato que se encuentra en el archivo cabecera de imagen.
- En la opción *Data Acquisition Year*, se introduce el año en que fue adquirida la imagen, dato que se encuentra en el archivo cabecera de imagen (Fig.9).
- En la opción *Sun Elevation (deg)*, se introduce el ángulo con que el satélite tomo la imagen (Fig.10).

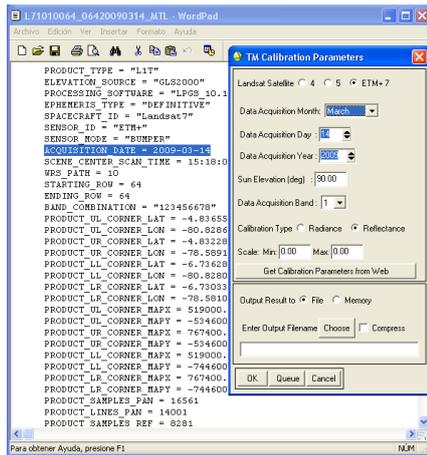


Figura 9: Introducción de datos de la imagen

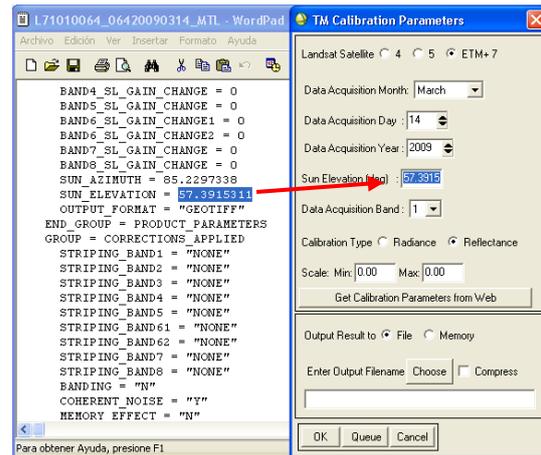


Figura 10: Introducción del ángulo del satélite

- En la opción **Data Acquisition Band**, se introduce el número de banda que se está calibrando.
- En la opción **Calibration Type**, seleccionamos radiance.
- En la opción **Scale Min**, se introduce la longitud de onda mínima de la banda que se está calibrando (1), dato que se encuentra en el archivo cabecera de imagen.
- En la opción **Scale Max**, se introduce la longitud de onda máxima de la banda que se está calibrando (1), dato que se encuentra en el archivo cabecera de imagen (Fig. 11)

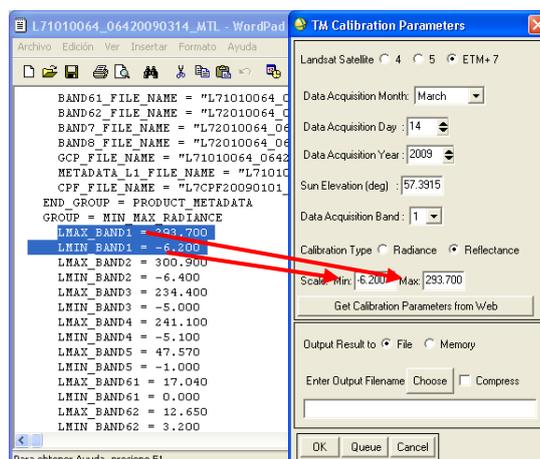


Figura 11: Dato de la longitud de onda máxima de la banda

- Luego de haber introducido todos los datos, debemos guardarlo en una carpeta de trabajo, con un nombre adecuado, para ello se hace clic en **Choose**, y **ok** (Fig. 12)
- Entonces la banda (1) con los nuevos datos, se mostrara en la ventana **Available Bands List** (Fig.13)

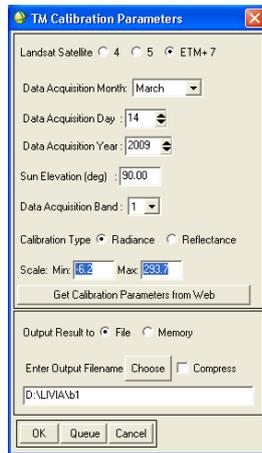


Figura 12: Guardar la imagen en una carpeta

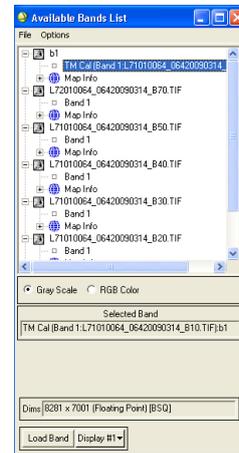


Figura 13: Visualización de la banda con los nuevos datos

Este procedimiento se deberá repetir para introducir los datos a las bandas restantes (2, 3, 4, 5 y 7).

## 2.2. Unión de las Bandas.

- Para realizar el proceso de unión de las bandas se sigue el siguiente procedimiento: nos direccionamos a la barra del menú principal de **ENVI**, se seleccione **Basic Tools** → **Layer Stacking** (Fig.14).
- Observaremos que se cargará la ventana **Layer Stacking Parameters**, en ella hacer clic en la opción **Import File** (Fig.15)

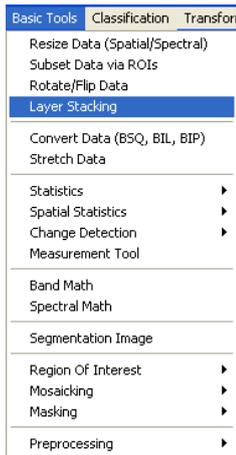


Figura 14: Búsqueda de la imagen

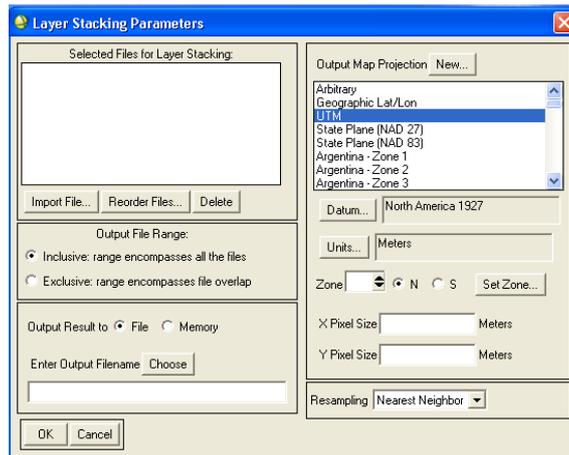


Figura 15: Selección de la imagen

- Y se cargara la ventana **Layer Stacking Input File**, en ella debemos seleccionar las bandas de la imagen que fueron calibradas y clic en **ok** (Fig. 16).
- En la ventana **Layer Stacking Parameters**, hacer clic en la opción **Reorder Files** y se cargara la ventana **Reorder Files** (Fig.17)

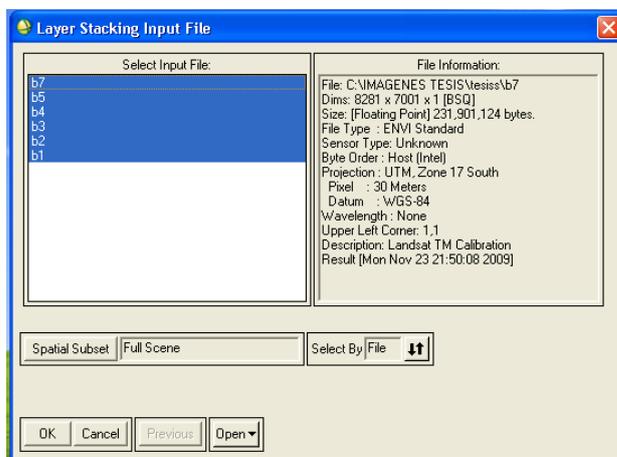


Figura 16: Selección de bandas calibradas



Figura 17: Visualización de las bandas

- En ella se ordena las bandas en orden ascendente (b1, b2, b3, b4, b5 y b7) y clic en **ok** (Fig. 18)



Figura 18: Orden de las bandas de manera ascendente

- En la ventana **Layer Stacking parameters**, verificamos los datos de: **Output Map Projection** (UTM), **Datum** (WGS-84), **Zona** (17S) y **Pixel** (30x30), luego lo guardamos en la carpeta de trabajo con un nombre adecuado (por ejemplo: motupe), para lo cual seleccionamos **Choose** y **ok** (Fig.19)

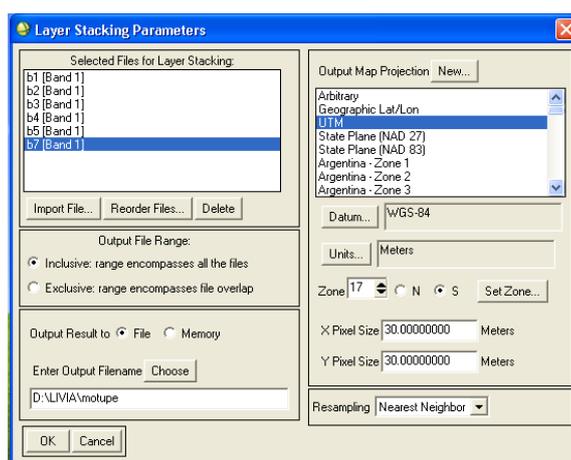


Figura 19: Información de datos de la imagen

### 2.3. Edición de las Longitudes de Onda Media de cada Banda.

Para editar las longitudes de onda media de cada banda se sigue el siguiente procedimiento:

- En la ventana **Aviable Bnads List**, clic derecho sobre el nombre del archivo de la imagen (motupe), luego clic en **Edit Header** (Fig.20).
- Aparecerá la ventana **Header Info**, luego clic en **Edit Attributes** y seleccionamos **Wavelengths** (Fig.21)

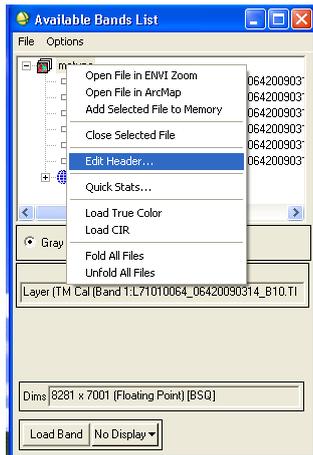


Figura 20: Visualización de la imagen

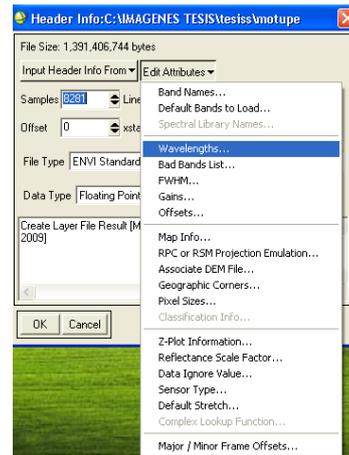


Figura 21: Selección de Wavelengths

- Vera que se carga la ventana **Edit Wavelength values**. En ella debemos editar las longitud de onda media de cada banda para ello debemos hacer clic en la banda a editar (b1), es recomendable empezar a editar desde la primera banda y luego seguir en orden hasta la última banda. Las longitudes de onda media se encuentran en la literatura sobre imágenes Landsat (G. Chander et al, 2009) (Fig.22).

| Band                   | Spectral range | Center wavelength |
|------------------------|----------------|-------------------|
| Units                  | $\mu\text{m}$  |                   |
| <i>Low gain (LPGS)</i> |                |                   |
| 1                      | 0.452-0.514    | 0.483             |
| 2                      | 0.519-0.601    | 0.560             |
| 3                      | 0.631-0.692    | 0.662             |
| 4                      | 0.772-0.898    | 0.835             |
| 5                      | 1.547-1.748    | 1.648             |
| 6                      | 10.31-12.36    | 11.335            |
| 7                      | 2.065-2.346    | 2.206             |
| PAN                    | 0.515-0.896    | 0.706             |

Figura 22: Edición de la longitud de onda media

Luego hacemos clic en la siguiente banda y vera que la longitud de onda media aparece editada. Este procedimiento se debe hacer para editar las longitudes de onda media de las

demás bandas hasta completar de editarlas. Al final debe quedar como se muestra en la siguiente imagen.

- En la opción **Wavelength/FWHM Units** cambiamos las unidades de **Nanometers a Micrometers** (Fig. 23)

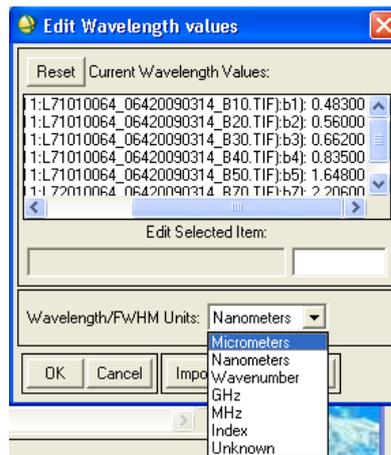


Figura 23: Cambio de unidades métricas

- Luego clic en **ok** en la ventana **Edit Wavelength values** y clic en **ok** en la ventana **Header Info**
- Una vez introducidas las longitudes de onda media a cada banda estas se podrán visualizar en la ventana **Available Bands List**.

### III. CORRECCION ATMOSFÉRICA.

Para estimar la salinidad del suelo usando imágenes de satélite es imprescindible hacer la corrección atmosférica de la imagen calibrada (la imagen editada y unida). Para lo cual utilizaremos el modulo **FLAASH** que se encuentra en el paquete del **SOFTWARE ENVI**. Como el modulo **FLAASH** del **SOFTWARE ENVI** requiere los datos en intervalos de **BIL** o **BIP**, pasaremos nuestra imagen de **BSQ** a **BIL**.

### 3.1. Conversión de la Imagen de los Intervalos BSQ a BIL.

Para convertir los intervalos de BSQ a BIL se sigue el siguiente procedimiento:

- En la barra de menú principal del ENVI, seleccionamos **Basic Tools**, luego seleccionamos **Convert Data (BSQ, BIL, BIP)**. Se mostrara la ventana **Convert File Input File**, donde seleccionaremos la imagen calibrada (**motupe**) y seguidamente hacer clic en **OK** (Fig. 24).

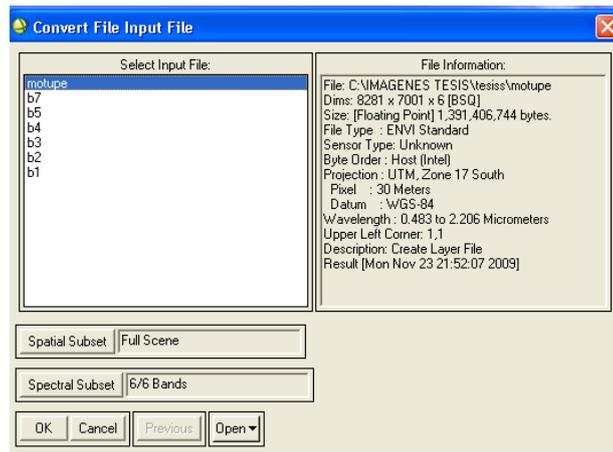


Figura 24: Selección de la imagen calibrada

Se mostrara la ventana **Convert File Parameters** seleccionar **BIL** y en **choose** hacer clic para guardar la imagen convertida a **BIL**, con un nombre adecuado (por ejemplo: motupe\_bil) y finalmente hacer clic en **OK** (Fig.25).

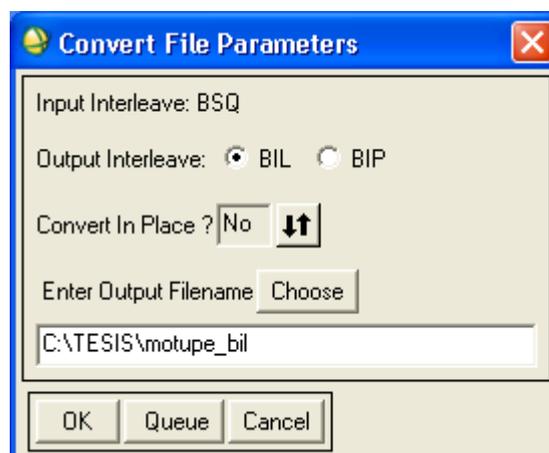


Figura 25: Selección de intervalo BIL y guardar imagen

Esperamos que cargue y luego se visualizara en la *ventana Available Bands List*.

### 3.2. Aplicación de Modulo FLAASH.

Para aplicar el modulo flash se sigue el siguiente procedimiento.

- Ir a la barra de menú principal del ENVI, seleccionar *Spectral → FLAASH*.
- Se cargara la ventana *FLAASH Atmospheric Correction Model Input Parameters* (Fig.26).

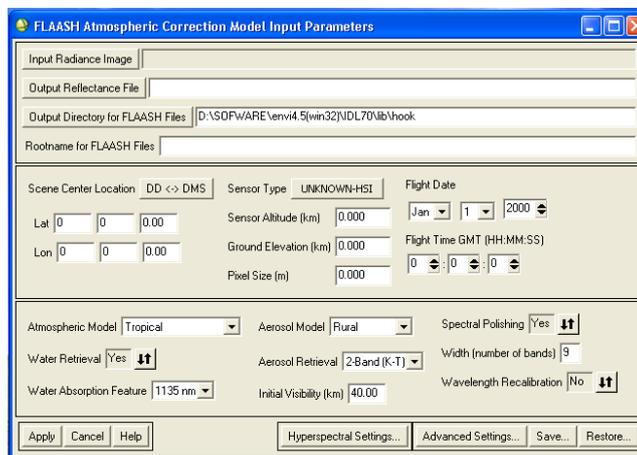


Figura 26: Visualización de la ventana FLAASH

- En la ventana *FLAASH Atmospheric Correction Model Input Parameters*, hacer clic en el botón *Input Radiante Image* y se mostrara la ventana *FLAASH Input File*. En la ventana *FLAASH Input File*, seleccionamos el archivo de la imagen que fue convertida de BSQ a BIL (motupe\_bil), luego clic en **ok** (Fig. 27).

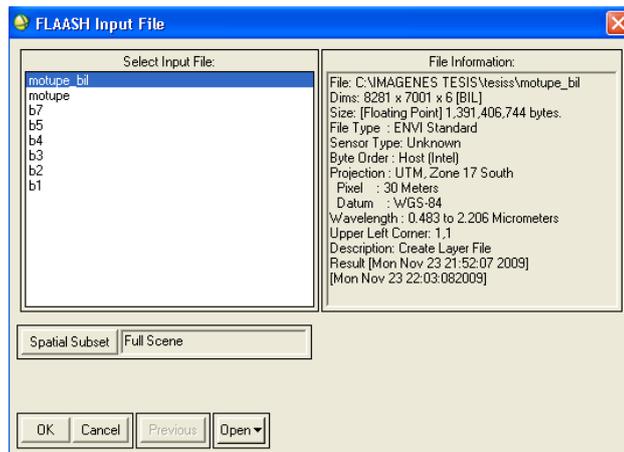


Figura 27: Selección de la imagen convertida a BIL

- Se mostrara la ventana **Radiance Scale Factors**, en donde seleccionamos la opción **Use single scale factor for all bands**, donde nos mostrara la opción **Single Scale Factor** ingresamos el valor de 10.000, para convertir las unidades de radiancia de la imagen Landsat de  $W / (m^2 \mu m sr)$  a  $\mu W / (cm^2 sr nm)$  que son las unidades que requiere el modulo FLAASH. Se observara que la imagen se agregara a la opción **Input Radiante Image** del modulo **FLAASH** (Fig. 28).

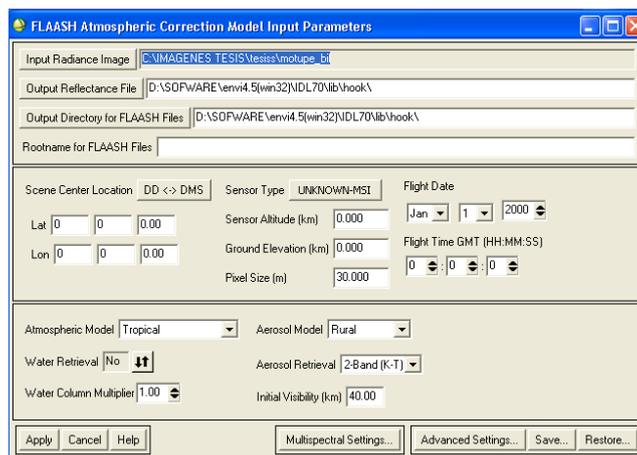


Figura 29: Conversión de las unidades de radiancia de la imagen Landsat

- Continuando con el ingreso de datos en el modulo FLAASH en la ventana **FLAASH Atmospheric Correction Model Input Parameters**, hacer clic en el botón **Output**

**Reflectance File**, y se mostrara la ventana **Select Output File**, en donde le damos nombre a la imagen de salida (por ejemplo: ref\_motupe) y lo guardamos en la carpeta de trabajo (Fig. 30).

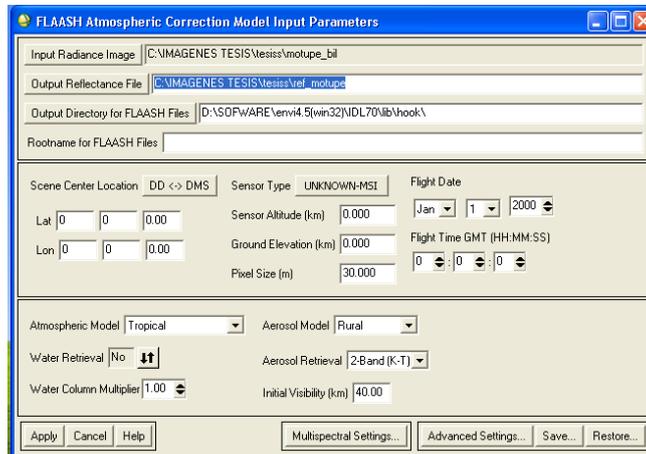


Figura 30: Nombreamiento y guardar imagen.

- Continuando con el ingreso de datos en el modulo FLAASH en la ventana **FLAASH Atmospheric Correction Model Input Parameters**, hacer clic en el botón **Output Directory for FLAASH Files**, y se mostrara la ventana **Buscar carpeta**, en donde buscamos la carpeta donde deseamos que se guarden nuestros datos y clic en aceptar. Se observará que la ruta de la carpeta donde guardamos nuestros datos (carpeta que seleccionamos) se agregara a la opción **Output Directory for FLAASH Files** del modulo FLAASH.
- En la ventana **FLAASH Atmospheric Correction Model Input Paramet**, opción **Scene Center Location**, clic en **DD<->DMS**, y las opciones de **Lat**, y **Lon** cambiaran de formato. Para obtener los valores de **Lat** y **Lon** se abre ya sea la imagen cruda o la imagen calibrada en escena completa. Luego nos dirigimos al menú de la imagen nos vamos a **Tools** → **Pixel Locator**. Y se mostrara la ventana **#1 Pixel Locator** (Fig.31).
- Hacemos clic en **↑↓** y el formato de ingreso de datos de la opción **E** y **N**, cambia a **Lat** y **Lon** con tres recuadros cada uno (Fig.32).

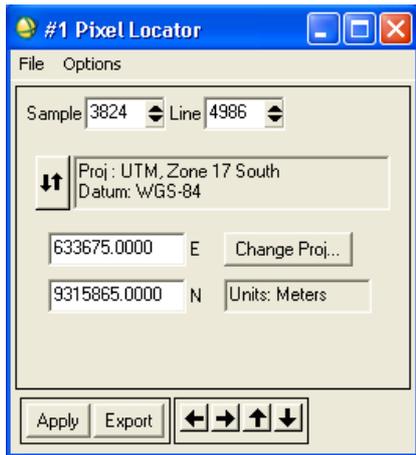


Figura 31: Información de coordenadas Este y Norte

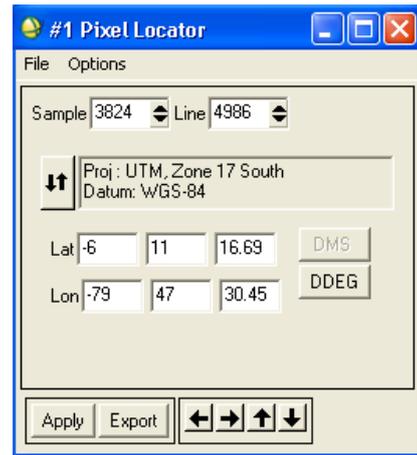


Figura 32: Información de coordenadas de Latitud y Longitud

Luego clic en **DDEG** y el formato de ingreso de datos de las opciones **Lat** y **Lon** cambiara de los tres recuadros a un solo recuadro cada uno (Fig. 33).

Luego introducimos los datos de **Sample** y **Line**, los mismos que se obtienen de los valores que se muestran en la ventana **Available Bands List**, opción **Dims** (Fig.34).

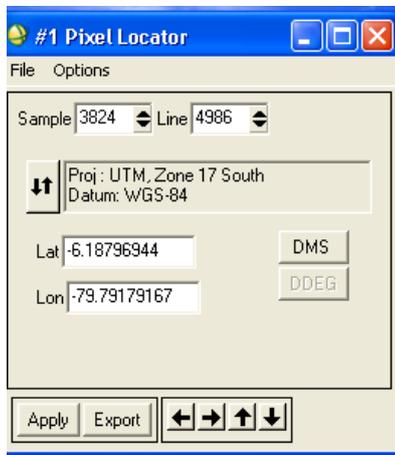


Figura 33: Ingreso de datos de coordenadas de Latitud y Longitud

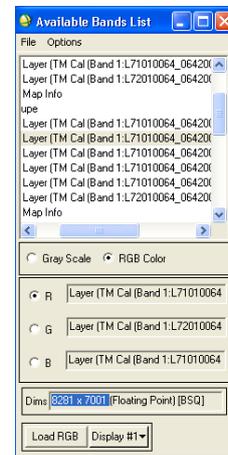


Figura 34: Ingreso de datos de Sample y Line

Los valores que se obtienen de la ventana **Available Bands List**, opción **Dims**, los divididos entre dos a cada uno de ellos y luego los introducimos en las opciones de **Lat** y **Lon** respectivamente y **Apply** tal como se muestra en la imagen siguiente (Fig.35).

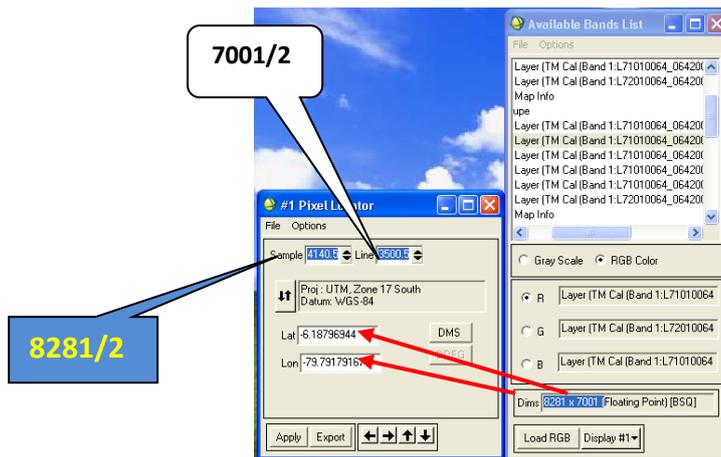


Figura 35: Ingreso de nuevos datos de Latitud y Longitud

Se observara que los valores de **Lat** y **Lon** se modifican automáticamente. Los valores de **Lat** y **Lon** se introducen en la ventana **FLAASH Atmospheric Correction Model Input**, opción **Scene Center Location** → **Lat** y **Lon** (Fig.36).

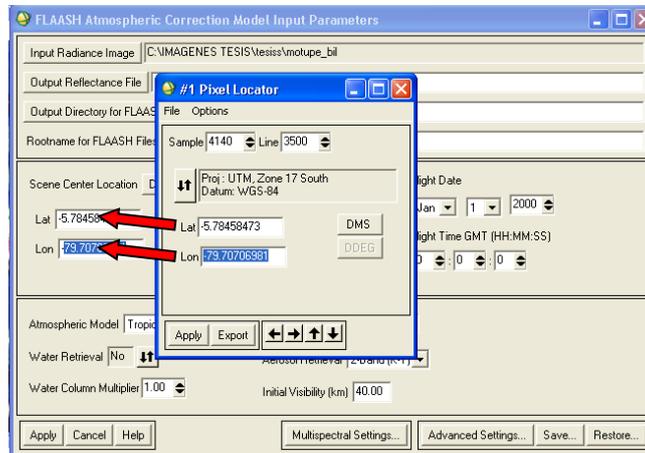


Figura 36: Introducción de los nuevos valores de Latitud y Longitud en la ventana  
FLAASH

- Continuando con la introducción de los datos en el módulo FLAASH, en la ventana **FLAASH Atmospheric Correction Model Input Paramet**, opción **Sensor Type**, clic en **UNKNOWN-MSI**, seleccionar **Multispectral** → **Landsat TM7**.

En la ventana *FLAASH Atmospheric Correction Model Input Paramet*, se observará que la opción *Sensor Type* cambia de *UNKNOWN-MSI* a *Landsat TM7*, en la opción *sensor altitude (Km)* aparece automáticamente el valor de *705.00* y en la opción *Pixel Size (m)* *30.0*, valores que no deben ser modificados (fig.37).

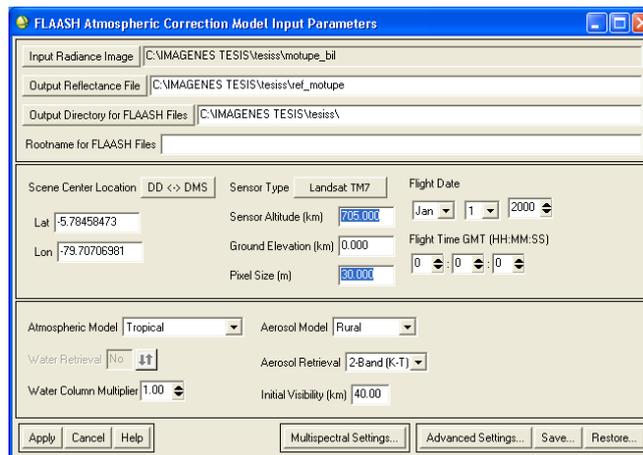


Figura 37: Visualización de información en la ventana FLAASH

En la opción *Ground Elevation (Km)*, introducimos la altura promedio del área de la escena de la imagen, esta altura se obtiene promediando la altura del vértice superior izquierdo con la altura del vértice inferior derecho de la escena completa de la imagen cruda o calibrada, la altura se introduce en Km, para el caso de la imagen de nuestra área de estudio (Motupe) la altura promedio de la escena de la imagen es de 400.00m, para introducir este dato lo convertimos a km (0.400).

Continuando con la introducción de datos en el modulo *FLAASH*, en la opción *Flihg Date*, introducimos la fecha (mes, día, año) en que fue tomada la imagen por el satélite, este dato lo encontramos en el archivo cabecera de imagen (*L71010064\_06420090314\_MTL*) (Fig. 38).

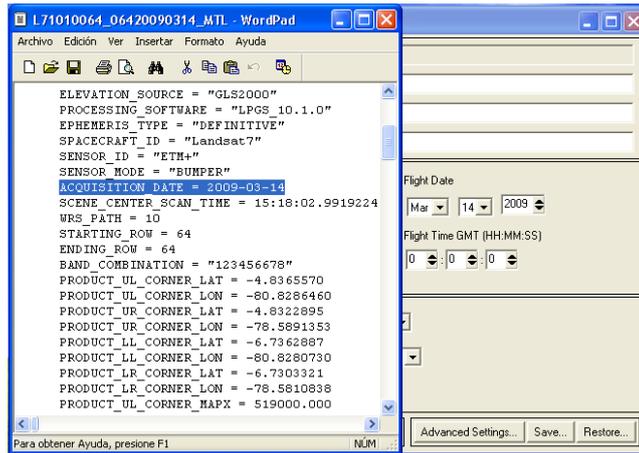


Figura 38: Introducción de la fecha en que fue tomada la imagen

En la opción *Flight Time GMT (HH, MM, SS)*, introducimos la hora (hora, minutos y segundos) en que fue tomada la imagen, datos que también lo encontramos en el archivo cabecera de imagen (*L71010064\_06420090314\_MTL*) (Fig.39).

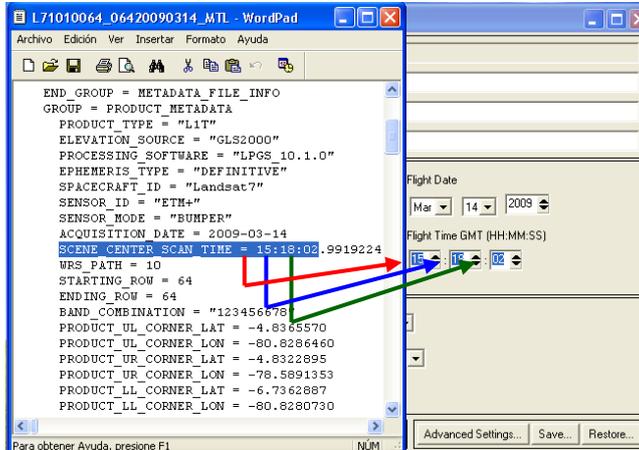


Figura 39: Introducción de la hora, minutos y segundos en que fue tomada la imagen.

En la opción *Atmospheric Model* seleccionamos *Tropical* que es el modelo estándar utilizando el modelo atmosférico *MODTRAN* (Fig.40).

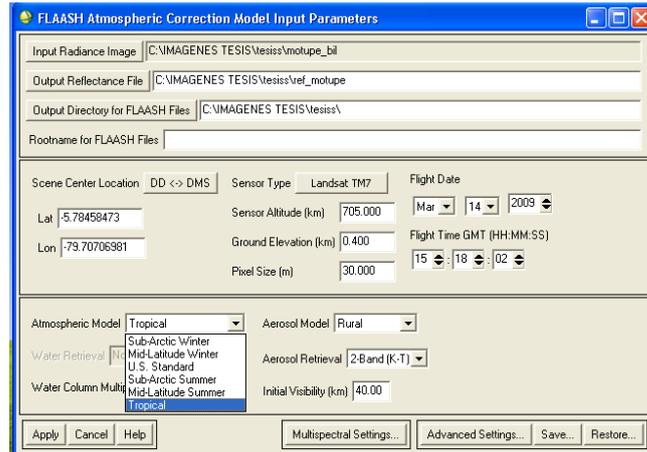


Figura 40: Selección del modelo atmosférico

En la opción *Aerosol Model*, seleccionamos *Rural*, que se carga por defecto. En la opción *Aerosol Retrieval*, seleccionar “None”. En las opciones *Inicial Visibility (km)* y *Water Column Multiplier*, dejar los valores que se muestra por defecto. Después de llenar todos los datos que necesita el módulo FLAASH, la ventana *FLAASH Atmospheric Correction Model Input Paramet*, quedará de la siguiente manera, donde ya podremos aplicar el modelo FLAASH para realizar la corrección atmosférica de la imagen LANDSAT TM7 calibrada haciendo clic en *Apply* (Fig.41).

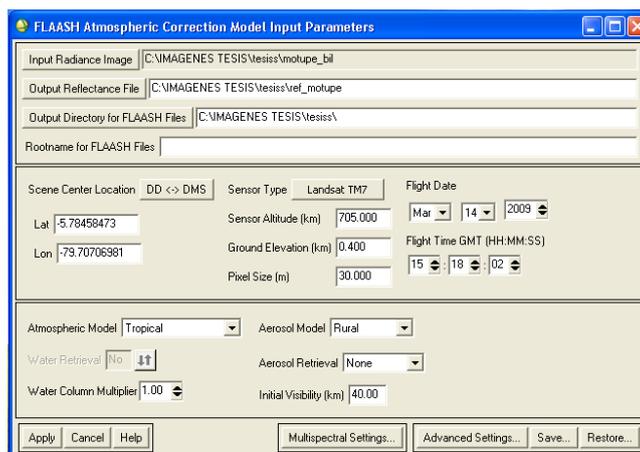


Figura 41: Visualización de todos los datos que necesita el módulo FLAASH

La barra de progreso indicara la realización del procesamiento y verificara que al término se mostrara la ventana **FLAASH Atmospheric Correction Results**, en la que podemos obtener valores como la altura de la visibilidad (**Visibility = 40.0000 Km**), altura del vapor de agua (**Average Water Amount = 3.897 cm**) (Fig.42).

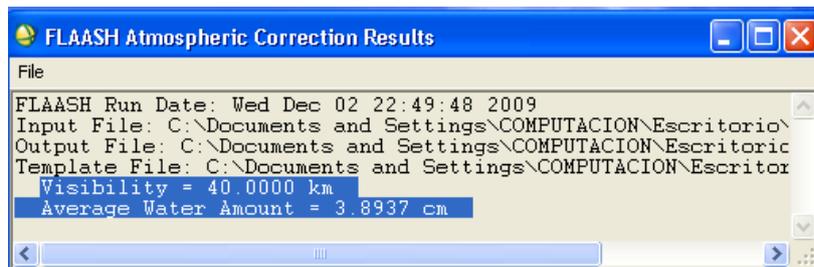


Figura 42: Resultados de la corrección atmosférica FLAASH

Después de realizar todos los pasos anteriormente mencionados (Calibración - corrección Atmosférica), se tomaran los valores de la reflectancia de los diferentes puntos elegidos en la escena para luego realizar diferentes análisis como la salinidad de los suelos o NDVI.

#### **IV. OBTENCIÓN DE LOS VALORES DE REFLECTANCIA, NDVI Y EINDSAL.**

Para obtener los valores de reflectancia de las diferentes bandas, NDVI e IndSal de las imágenes Landsat 7 ETM+, existen dos opciones:

- La primera es que sigamos trabajando con la imagen completa.
- Y la segunda es que solo trabajemos con el área de interés.

##### **4.1. Obtención de los Valores de Reflectancia Trabajando Toda la Imagen.**

Para obtener estos valores se sigue el siguiente procedimiento:

###### **4.1.1. Visualización de la imagen.**

Para obtener la reflectancia se visualiza la imagen corregida atmosféricamente (FLAASH) en escala de grises, para lo cual seleccionamos la banda de la cual deseamos obtener los

valores de reflectancia, luego seleccionamos *Gray Scale* y clic en *Load Band* y la imagen se cargara.

#### 4.1.2. Cálculo de la Reflectancia.

Para lo cual nos dirigimos a la barra principal del ENVI, seleccionamos *basic tools* y luego *band math*. Se cargara la siguiente ventana llamada *Band Math*. En la opción *Enter an expression*, introducimos la banda de la cual deseamos calcular la reflectancia y lo dividimos entre 10000.0 ( $b1/10000.0$ ). Le damos clic en *Add to List*, y se observara que la expresión se carga en la opción *Previous Band Math Expressions* (Fig.43). Luego clic sobre la expresión para seleccionarla y **ok**.

Vera que se carga la ventana *Variables to Bands Pairings*. En la ventana *Variables to Bands Pairings*, seleccionamos la banda que estamos trabajando (b1) de la imagen que ha sido calibrada y corregida atmosféricamente con el modulo FLAASH (Fig.44).

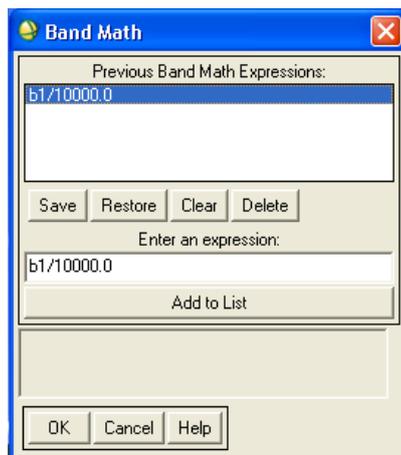


Figura 43: Cálculo de la reflectancia de la banda

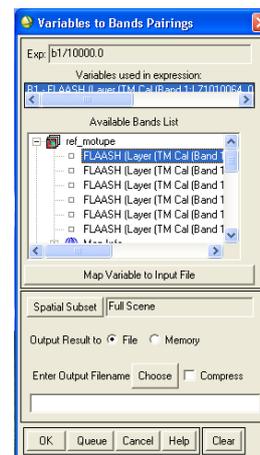


Figura 44: Selección de la banda calibrada y corregida atmosféricamente

Para guardar los cambios realizados hacemos clic en *Choose*, le damos un nombre adecuado (reflectancia\_b1) y lo guardamos en la carpeta de trabajo, luego clic en **ok**.

Después de que carga, veremos que la banda de la imagen que la dividimos entre 10000.0 ( $b1/10000.0$ ) se muestra en la ventana *Available Bands List*. Luego visualizamos la imagen,

para lo cual seleccionamos la banda que la dividimos entre 10000.0, seleccionamos *Gray Scale* y clic en *Load Band*.

Para corroborar que la reflectancia de la banda trabajada (b1) haya sido bien calculada, hacemos doble clic en la imagen y obtendremos al valor de reflectancia, la cual debe oscilara entre 0 y 1. Este procedimiento se deberá repetir para todas las bandas restantes (2, 3, 4, 5 y 7).

#### 4.1.3. Obtención DEL NDVI (Índice Diferencial de Vegetación Normalizado) e IndSal (Índice de Salinidad).

Una vez que se ha obtenido el cálculo de la reflectancia de cada una de las bandas (1, 2, 3, 4, 5 y 7), se puede obtener valores de NDVI e INDSAL, para lo cual se sigue el siguiente procedimiento.

##### a. NDVI

Para calcular en NDVI nos dirigimos a la barra de menú principal del ENVI, seleccionamos **basic tools** → **band math**. Donde en la opción **Enter an expression**, introducimos la fórmula para calcular el NDVI  $((B4-B3) / (B4+B3))$  (Fig. 45).

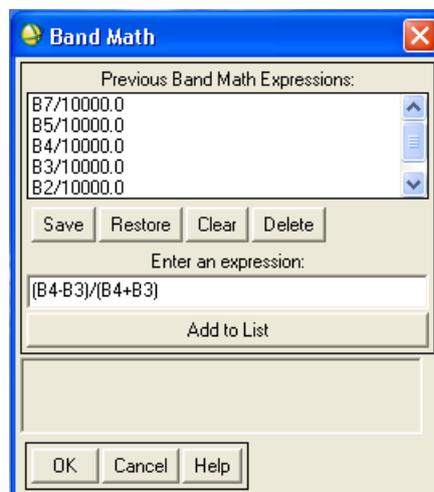


Figura 45: Cálculo del NDVI

Le damos clic en **Add to List**, y se observara que la expresión se carga en la opción **Previous Band Math Expressions**. Luego clic sobre la expresión para seleccionarla y **ok**. Se carga la ventana **Variables to Bands Pairings**.

En la ventana **Variables to Bands Pairings**, seleccionamos una banda en la opción **Variables used in expression** (b3), buscamos la misma banda pero dividida entre 10000.0 en la opción **Available Bands List** la seleccionamos y veremos que esta se carga en la opción **Variables used in expression** frente a la banda antes seleccionada.

Hacemos el mismo procedimiento para la otra banda .Luego obtendremos en la ventana **Variables to Bands Pairings** en la opción **Variables used in expression**, se muestran las dos bandas con su respectivo par. Le damos un nombre adecuado, lo guardamos en la carpeta de trabajo y **ok**.

Después de que carga, veremos que el cálculo de NDVI se muestra en la ventana **Available Bands List**. Luego visualizamos la imagen, para lo cual seleccionamos el archivo que muestra el cálculo del NDVI, seleccionamos **Gray Scale** y clic en **Load Band**.

Como se observa no se visualiza, para corregir esto y para visualizarlo con claridad nos direccionamos hacia el menú de la imagen seleccionamos **Enhance/[Image] Gaussian**.

Para corroborar que el NDVI, haya sido calculado correctamente, hacemos doble clic en la imagen y aparecerá la ventana de dialogo **Cursor location/value** y obtendremos al valor de NDVI, valor que debe oscilara entre -1 y 1 (Fig. 46).

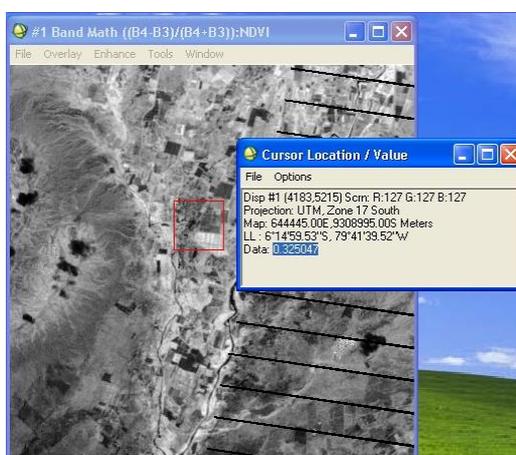


Figura 46: Visualización del valor del NDVI en la imagen

## b. IndSal.

Para el cálculo del Indsal se sigue el mismo procedimiento que el que se sigue para el cálculo de NDVI, con la única diferencia de que a la hora de introducir la fórmula ya no se debe introducir la fórmula de calcular el NDVI  $((B4-B3)/(B4+B3))$ , en reemplazo de esta fórmula debe de introducirse la fórmula de cálculo del Indsal  $(B5-B7)/(B5+B7)$ . Los valores de Indsal varían entre 0 y 1.

### 4.1.4. Obtención de datos de reflectancia, NDVI e IndSal.

Para obtener cualquiera de estos datos se sigue el siguiente procedimiento.

- Elegimos lo que queremos obtener ya sea reflectancia de las TM1, TM2, TM3, TM4, TM5 o TM7, NDVI O INDSAL, para este caso elegiremos reflectancia de la B1. Entonces lo buscamos en la ventana Available Bands List, lo seleccionamos y lo visualizamos (Fig. 47).

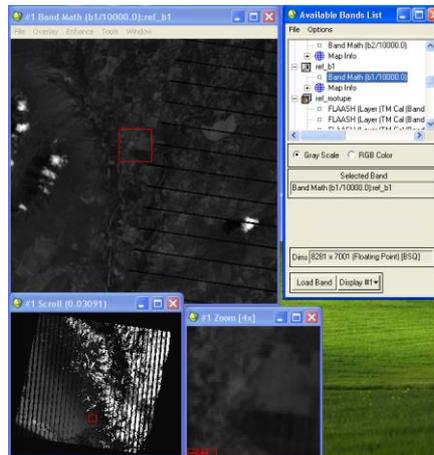


Figura 47: Visualización de datos de reflectancia, NDVI e IndSal

Luego nos dirigimos al menú de la imagen seleccionamos **Tools** → **Spatial Pixel Editor**. Entonces se mostrara la ventana **#1 Spatial Pixel Editor**, que nos muestra la reflectancia de cada punto que se encuentran en la imagen (Fig. 48).

|      | 3972      | 3973      | 3974      | 3975      |           |
|------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 5141 | 0.0883000 | 0.0736000 | 0.0809000 | 0.1030000 | 0.1030000 |
| 5142 | 0.0846000 | 0.0588000 | 0.0846000 | 0.0993000 | 0.0993000 |
| 5143 | 0.0662000 | 0.0625000 | 0.0772000 | 0.0883000 | 0.0920000 |
| 5144 | 0.0588000 | 0.0736000 | 0.0883000 | 0.0956000 | 0.0956000 |
| 5145 | 0.0588000 | 0.0736000 | 0.0883000 | 0.0956000 | 0.0956000 |
| 5146 | 0.0552000 | 0.0699000 | 0.0846000 | 0.0772000 | 0.0620000 |
| 5147 | 0.0559000 | 0.0632000 | 0.0780000 | 0.0669000 | 0.0559000 |
| 5148 | 0.0522000 | 0.0411000 | 0.0448000 | 0.0522000 | 0.0669000 |
| 5149 | 0.0301000 | 0.0264000 | 0.0264000 | 0.0264000 | 0.0301000 |
| 5150 | 0.0264000 | 0.0227000 | 0.0227000 | 0.0191000 | 0.0191000 |
| 5151 | 0.0264000 | 0.0154000 | 0.0154000 | 0.0264000 | 0.0227000 |
| 5152 | 0.0264000 | 0.0264000 | 0.0264000 | 0.0264000 | 0.0264000 |
| 5153 | 0.0301000 | 0.0264000 | 0.0227000 | 0.0191000 | 0.0227000 |
| 5154 | 0.0301000 | 0.0227000 | 0.0227000 | 0.0227000 | 0.0227000 |

Figura 48: Visualización de la reflectancia de cada punto de la imagen

Para obtener los datos solo de los puntos de interés, nos dirigimos al menú de la imagen seleccionamos **Tools** —> **Pixel Locator**. Se mostrara la ventana **#1 Pixel Locator** (Fig. 49).

Donde en las opciones de **E** y **N** debemos de borrar los valores que se muestran por defecto e introducir las coordenadas de los puntos de muestreo que fueron tomados con GPS (Sistema de Posicionamiento Global) en el campo, luego clic en **Apply** (Fig.50).

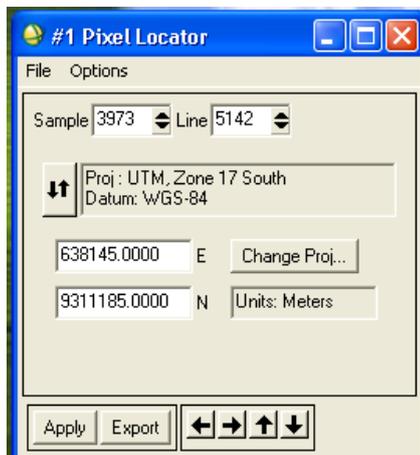


Figura 49: Obtención de datos de punto de interés



Figura 50: Introducción de coordenadas de los puntos de muestreo

Los valores de **Sample**, **Line**, **E** y **N** se modificaran automáticamente (Fig. 51).

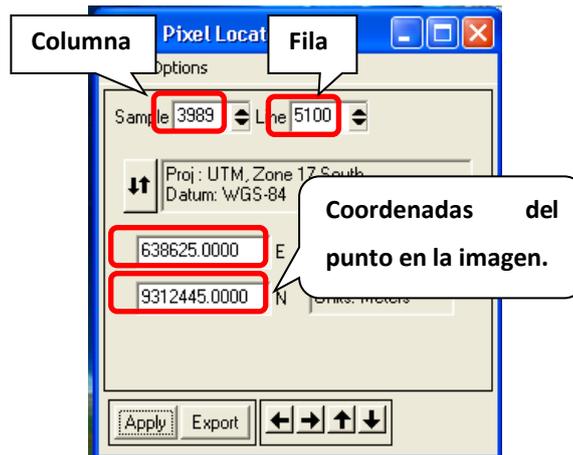


Figura 51: Modificación de la columna, fila y coordenadas

Y en la ventana **#1 Spatial Pixel Editor** nos mostrara el valor de reflectancia del punto que ingresamos sus coordenadas tomadas con GPS en el campo (Fig. 52).

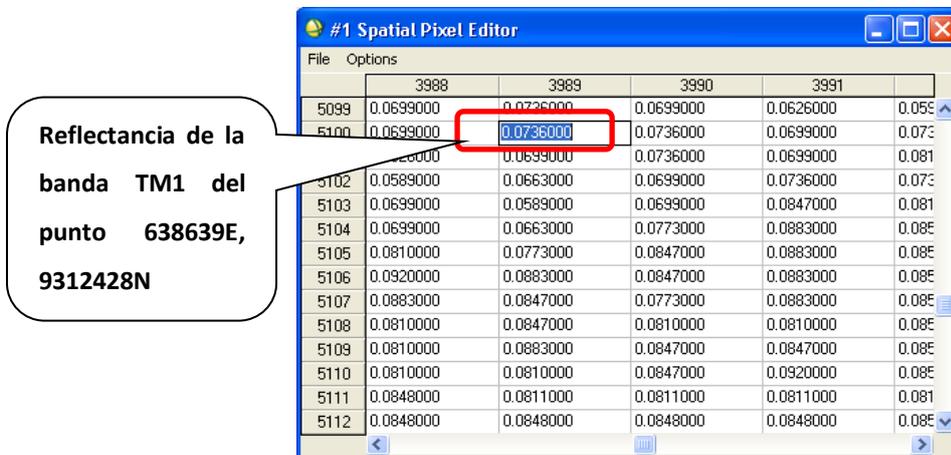


Figura 52: Visualización de la reflectancia del punto seleccionado

Los valores de **Sample**, **Line** (columna y fila de cada pixel), **E** y **N** (coordenadas de los puntos de muestreo en la imagen) que se muestran en la ventana **#1 Pixel Locator** y el valor de reflectancia que se muestra en la ventana **#1 Spatial Pixel Editor**, al introducir las

coordenadas tomadas con GPS del campo, deben ser tabulados en una hoja de cálculo de Excel generando una base de datos.

El procedimiento realizado para obtener las coordenadas en la imagen del punto número 1 (638639E, 9312428N), los datos de fila y columna de cada pixel y el valor de reflectancia del punto número 1 (638639E, 9312428N) de la banda TM1 se debe de repetir para obtener los datos de los demás puntos.

Para obtener los datos de reflectancia de las demás bandas (TM2, TM3, TM4, TM5 y TM7), de NDVI e IndSal de cada punto, se sigue el mismo procedimiento que se siguió para obtener los valores de de reflectancia de cada punto de la banda TM1.

Cuando tengamos la base de datos completa, con los datos de coordenadas de cada punto de muestreo tomadas con el GPS en campo, coordenadas en la imagen de cada punto, datos de fila y columna de cada punto, valores de reflectancia de cada uno de los puntos y de cada una de las bandas, valores de NDVI de cada punto y los valores de IndSal de cada punto, se debe de introducir los valores de conductividad eléctrica obtenida en laboratorio de cada punto en la base de datos.

Con estos datos ya se puede hacer el análisis estadístico (regresiones), para determinar con que valores de reflectancia, NDVI o INDSAL se correlaciona mejor la CEe y con ello generar modelos que nos permita estimar la salinidad del suelo usando imágenes de satélite.

#### **4.1.5. Generación de mapas de salinidad.**

Una vez que se realizó la correlación entre los valores de reflectancia de las bandas (TM1, TM2, TM3, TM4, TM5 y TM7), IndSal y NDVI, con la CEe y de haber encontrado el mejor modelo de regresión lineal para estimar la salinidad del suelo se procede a generar los mapas de salinidad del área de estudio. Para el caso de nuestro trabajo el mejor modelo para estimar la salinidad del suelo es el que se generó al correlacionar los valores de reflectancia de la banda TM7 con los valores de CEe ( $Y = CEe = -43.251(TM7)+13.965$ ) con un coeficiente de correlación  $R = 0.431$ .

Para generar los el mapa de salinidad se sigue el siguiente procedimiento.

### a. Visualización de la imagen.

Para visualizar la imagen se debe tener en cuenta que debemos visualizar la imagen que ya ha sido calibrada, procesada con el modulo FLAASH y hasta ya se debe haber calculado la reflectancia, luego procedemos a visualizar la imagen de la banda que mejor resultado tuvo en la correlación con la CEE (para nuestro caso es la banda TM7) en escala de grises. Para lo cual en la ventana *Available Bands List* seleccionamos la banda a trabajar (TM7), luego seleccionamos **Gray Scale** y clic en **Load Band** y la imagen se cargara.

Comprobamos los valores de reflectancia de la banda (TM7), para lo cual hacemos doble clic en la imagen y nos mostrara el valor de reflectancia el mismo que debe oscilar entre 0 y 1. (Fig. 53).



Figura 53: Visualización de los valores de la reflectancia

### b. Recorte del área de interés.

Para realizar el recorte del área o región de interés se sigue el siguiente procedimiento.

#### ➤ Importar el Vector.

Para importar un vector en primer lugar debemos tener en nuestra carpeta de trabajo el vector de nuestra área de estudio en formato evf.

Luego en la barra de menú de la imagen seleccionamos *overlay* → *vectors* y se mostrará la siguiente ventana # *Vector Parameters*. En ella nos direccionamos a *File* clic y seleccionamos *Open Vector File* (Fig.54).

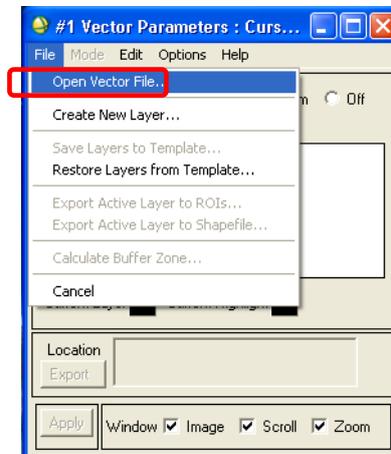


Figura 54: Selección del vector

Y se mostrará la siguiente ventana *Select Vector Filenames*. En ella buscamos el vector de nuestra área de estudio. Lo seleccionamos y le damos Abrir y veremos que el vector se carga en la ventana # *Vector Parameters* así como en las tres ventanas de visualización de la imagen.

➤ **Hacer la Máscara.**

Una vez importado el vector se procede a hacer la máscara para lo cual en la barra de menú principal del ENVI nos direccionamos a *Basic Tools* → *Masking* → *Buil Mask*. (Fig. 55).

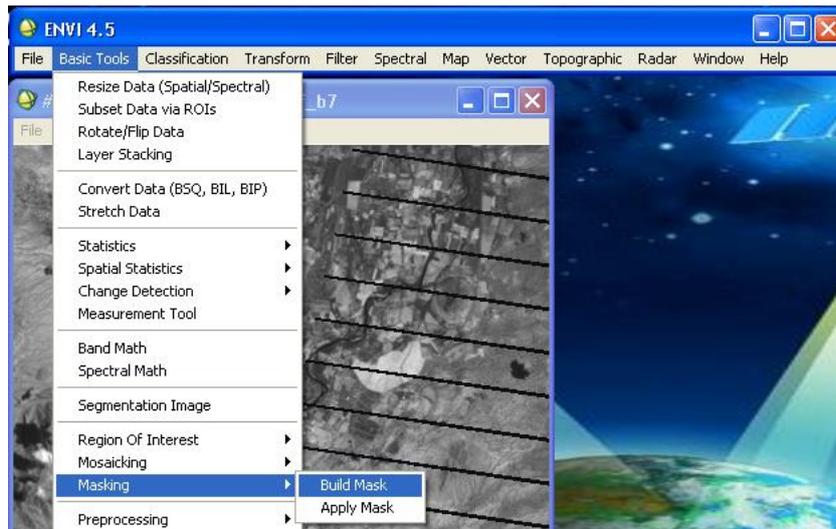


Figura 55: Elaboración de la máscara

Y se mostrara la ventana *Mask Definitions* en donde seleccionamos *Display #1* y clic en *ok*. Luego se mostrara la ventana *#1 Mask Definition*. En ella nos direccionamos a *Options* clic y seleccionamos *Import Evfs* (Fig. 56).

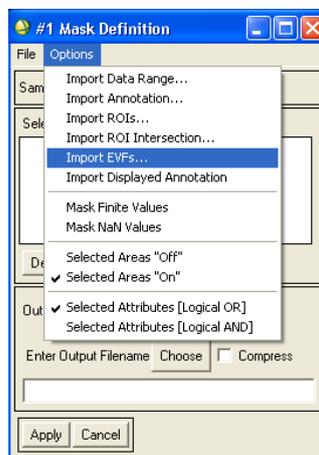


Figura 56: Selección de Import Evfs

Se mostrara la ventana *Mask Definition Input EVFs*, seleccionamos el numero o nombre de denominación de nuestro vector que se nos muestra en la opción *Select EVFs for Mask Definition* (que para nuestro caso el numero de denominación de nuestro vector es 6) y clic

en **Ok**. Observara que en la ventana **#1 Mask Definition** se carga el vector. Luego clic en **Choose** para guardar los cambios realizados en la imagen, para lo cual le damos un nombre adecuado. Le damos clic en **Apply** y veremos que la máscara se carga en la ventana **Available Bands List**.

Cerramos la ventana **#1 Mask Definition**. Luego en la barra de menú principal del **ENVI** seleccionamos **Basic Tools** → **Masking** → **Apply Mask**. (Fig. 57).

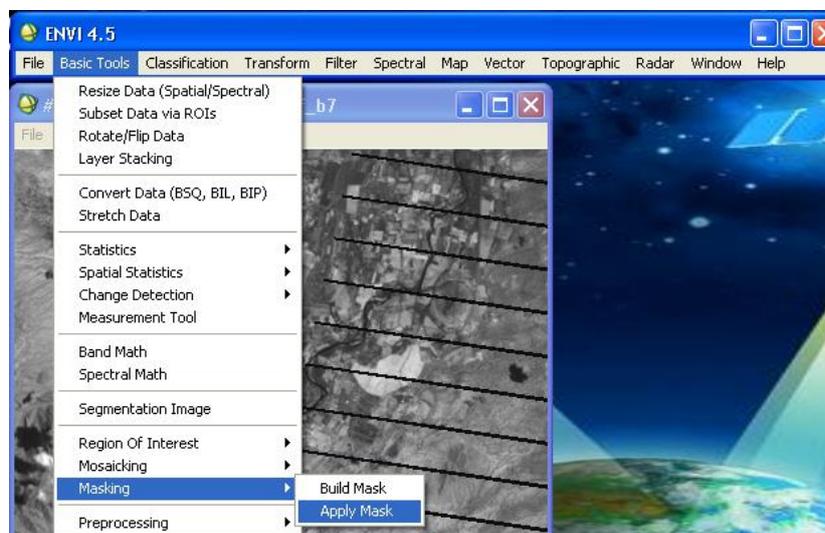


Figura 57: Aplicación de la máscara

Y se mostrara la ventana **Apply Mask Input File**. El ella seleccionamos la banda a la que le deseamos aplicar la máscara que para nuestro caso es la banda TM7 (ref\_b7) y vera que se muestran las opciones **Espatial Subset** y **Select Mask Band**.

En la ventana **Apply Mask Input File** clic en **Select Mask Band** y se mostrara la ventana **Select Mask Input Band** (Fig.58).

En ella seleccionamos la máscara (mascara\_motupe). Luego clic en ok en la ventana **Select Mask Input Band** y clic en ok en la ventana **Apply Mask Input File** y se mostrara la ventana **Select Mask Parameters** (Fig.59).

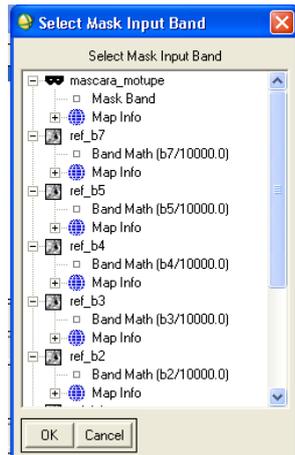


Figura 58: Selección de la banda a la que se aplica la máscara

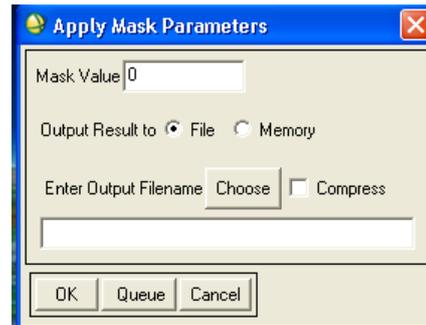


Figura 59: Nombramiento y guardar la imagen.

En ella hacemos clic en **Choose** para guardar la aplicación de la máscara, para lo cual le damos un nombre adecuado y lo guardamos en la carpeta de trabajo. Luego clic en **ok** esperamos que cargue y vera que el archivo que guardamos en el paso anterior se muestra en la ventana **Availble Bands List**.

➤ **Visualización de la Imagen con la Máscara.**

En la ventana **Availble Bands List** seleccionamos el archivo que guardamos cuando aplicamos la máscara (**Apply\_mascara**). Seleccionamos **Gray Scale** y clic en **Load Band** y la imagen con la aplicación de la máscara se cargara.

Como se observa nos muestra todo negro para lo cual insertamos el vector para localizar el área de interés para lo cual en la barra de menú de la imagen nos direccionamos a **Overlay** → **Vectors**. Se abrirá la ventana **#1 Vector Parameters** (Fig. 60).

En ella nos direccionamos a **Options** → **Import Layers**. Click y nos mostrará la ventana **Import Vector Layers**. En donde seleccionamos la denominación del vector (Fig.61).



Figura 60: Inserción del vector para el localizar área de interés

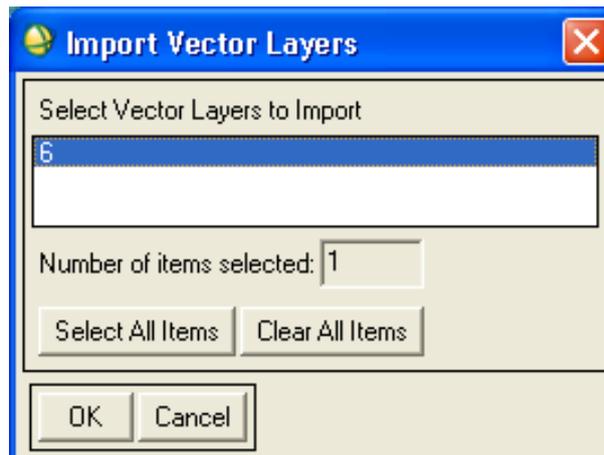


Figura 61: Selección del vector

Luego click en ok y el vector se muestra en la venta de visualización de la imagen **#1 Scroll**. Con el cursor lo localizamos en la ventana **#1 Scroll** y luego vera que el vector se muestra en las tres ventanas de visualización de la imagen (Fig. 62).

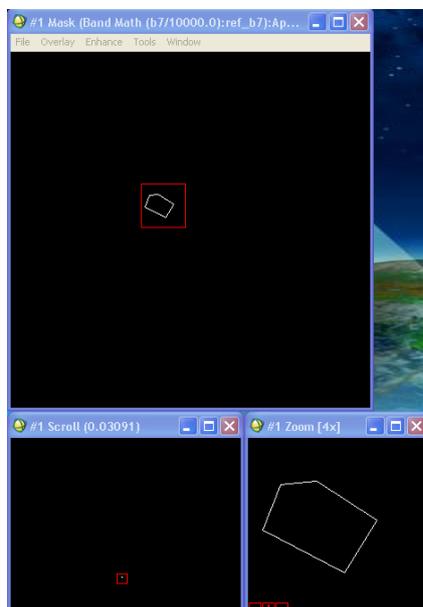


Figura 62: Visualización del vector

Luego cerramos la ventana **#1 Vector Parameters**. Luego nos direccionamos a la barra de menú de la imagen clic en **Enhance** , luego seleccionamos **[Image] Linear**. Observará que

en las ventanas de visualización de la imagen se muestra solo el área de interés (área de estudio) en escala de grises (Fig.63).

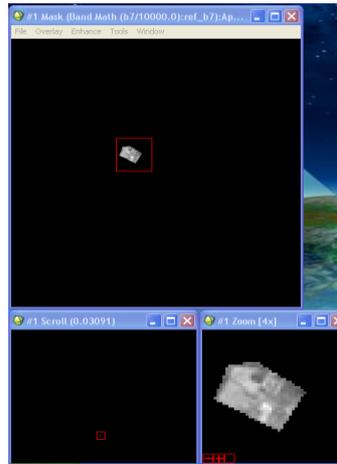


Figura 63: Visualización del área de interés

➤ **Recortando el Área de Estudio.**

Par hacer el recorte el área de estudio en la barra de menú principal del ENVI seleccionamos en **Basic Tools** → **Resize Data (Spectral/Spectral)**.

Seleccionamos el archivo en que aplicamos la máscara (Apply\_mascara) y vera que se muestra le opción **Spatial Subset** (Fig. 64).

En la ventana **Resize Data Input File** clic en **Spatial Subset** y observará que se muestra la ventana (Fig.65).

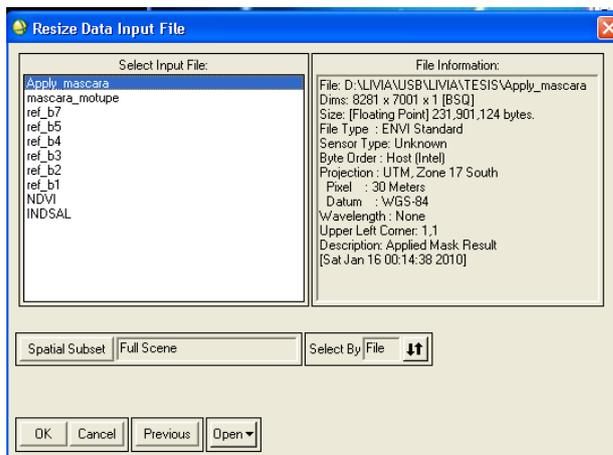


Figura 64: Selección del archivo a la que se aplicó la máscara

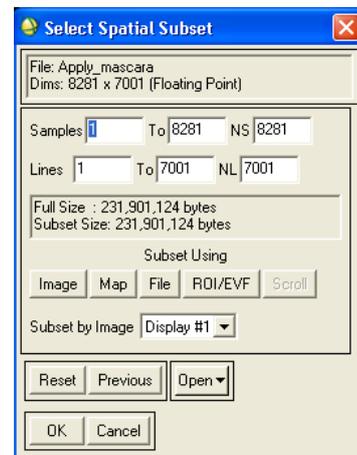


Figura 65: Visualización de la ventana Select Spatial Subset

En ella hacer clic en **Image** verá que se muestra la ventana **Subset by Image** (Fig.66).

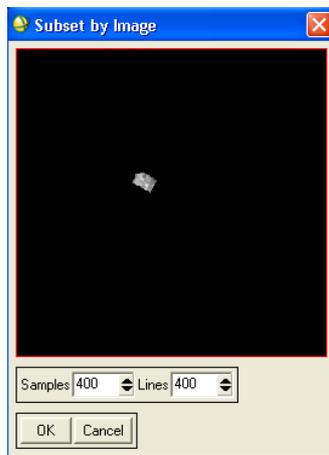


Figura 66: Visualización de la imagen

Con el cursor seleccionamos el área que nos interesa (Fig. 67).

Luego clic en ok en la ventana **Subset by Image**, clic en ok en la ventana **Select Spatial Subset**, clic en ok en la ventana **Resize Data Input File**, luego se mostrara la ventana **Resize Data Parameters** (Fig.68).

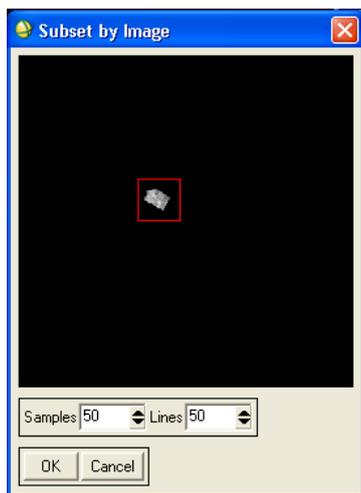


Figura 67: Selección del área de interés

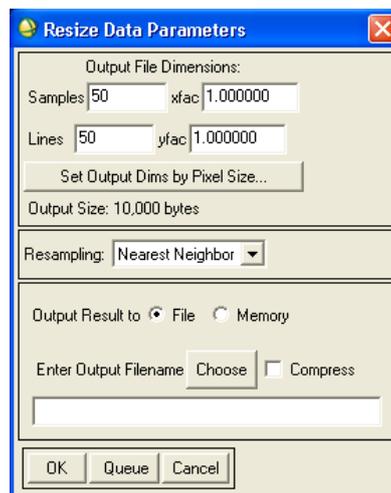


Figura 68: Visualización de la ventana  
Resize Data Parameters

En la ventana *Resize Data Parameters* clic en *Choose* para guardar el recorte, para lo cual le damos un nombre adecuado y lo guardamos en la carpeta de trabajo. Luego clic en ok, esperamos que cargue y veremos que el archivo que acabamos de guardar se muestra en la ventana *Availble Bands List*. Luego visualizamos la imagen del recorte del área de estudio, el cual se mostrara la imagen en las ventanas *#1 Resize* y en *Zoom* (Fig. 69).



Figura 69: Visualización de la imagen del recorte del área de estudio

**c. Edición del mapa de salinidad.**

➤ **Introducción y edición de las grid lines.**

Para editar un mapa de salinidad hay que primero visualizar la imagen, esta imagen es la que se obtiene como resultado del recorte del área de estudio (recorte\_área de interés), la misma que se mostrara en las ventanas *#1 Resize* y en *Zoom*.

Luego introducimos las grid lines en nuestra imagen nos direccionamos a la barra de menú de la imagen en donde seleccionamos *Overlay* → *Grid Lines* (Fig.70).

Se observara que se carga la ventana *#1 Grid Lines Parameters* (Fig. 71).

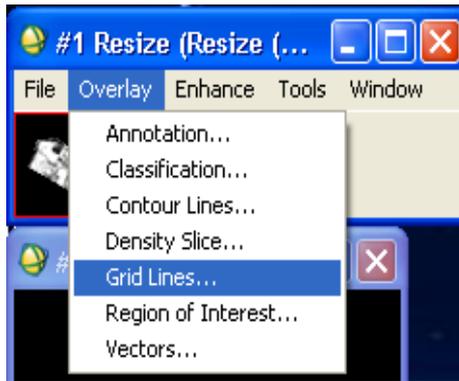


Figura 70: Selección de la opción Grid Lines

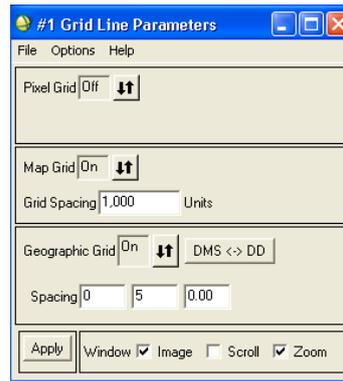


Figura 71: Visualización de la ventana #1 Grid Line Parameters

También se muestra la ventana **Scroll** de visualización de la imagen, con la imagen con sus **Grid Lines** y sus respectivos datos (Fig. 72).



Figura 72: Visualización de la imagen con sus datos y grid lines

En la ventana **#1 Grid Lines Parameters** editamos los datos de **Grid Lines**, la opción pixel debemos dejarlo como viene por defecto, en la opción **Grid Spacing** (separación de las líneas) debemos ingresar la distancia que deseamos que haya entre línea y línea, para nuestro caso le daremos una distancia entre líneas de 1250 unidades (Fig. 73).

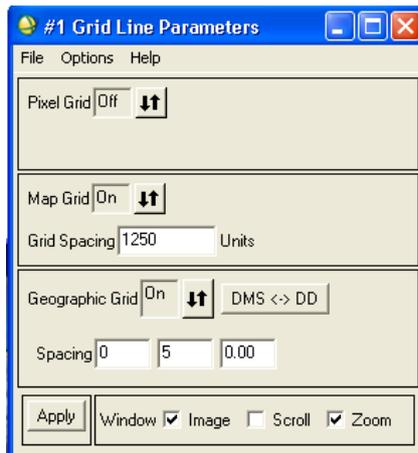


Figura 73: Edición de datos del Grid Line

En la opción **Geographic Grid** se edita los valores de distanciamiento entre líneas geográficas, para nuestro caso no lo vamos a tomar en cuenta y lo desactivamos haciendo clic en **Off**.

Para editar el tamaño y color de los números de las **Grid Lines** seleccionamos **Options** → **Edit Map Grid Attributes** (Fig.74). Aperture la ventana **Edit Map Attributes** (Fig.75).

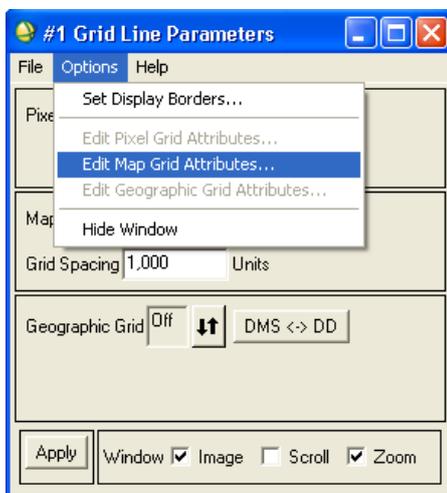


Figura 74: Selección de *Edit Map Grid Attributes*

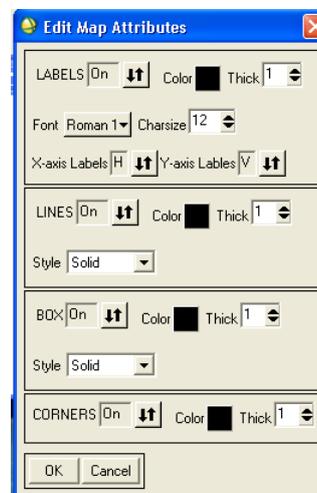


Figura 75: Visualización de la ventana *Edit Map Attributes*

En la opción **Font** debemos editar el tipo de letra, en la opción **Charsize** editamos el tamaño de letra y las demás opciones de dejan así como están (Fig.76).

Luego clic en **ok**, luego clic en Apply en la ventana **#1 Grid Lines Parameters** y verá que en la ventana **Scroll** de visualización de la imagen el tipo y tamaño de letra cambia (Fig.77).

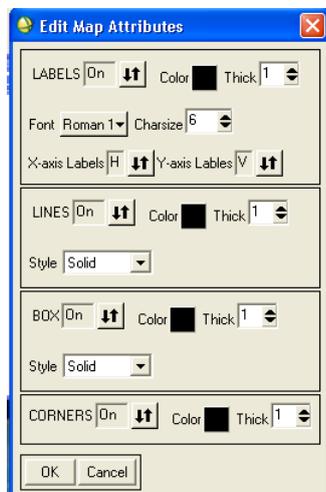


Figura 76: Edición del tamaño y color de los números de las Grid Lines

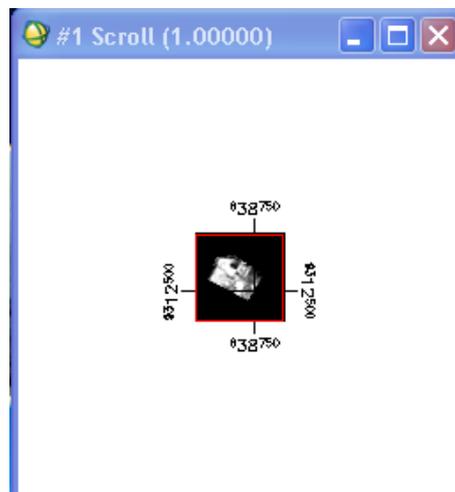


Figura 77: Visualización de la imagen con el tamaño y tipo de letra modificada.

## ANEXO 4. ANÁLISIS ESTADÍSTICOS DE BOD, COD, TOC, CODMN Y NH3-N

### 8.4.1) Demanda Bioquímica de Oxígeno (BOD)

**Cuadro A 3: Estadística de la regresión con la Demanda Bioquímica de Oxígeno.**

| Estadísticas de la regresión                 |            |
|--|------------|
| Coefficiente de correlación múltiple         | 1          |
| Coefficiente de determinación R <sup>2</sup> | 1          |
| R <sup>2</sup> ajustado                      | 1          |
| Error típico                                 | 3.4137E-16 |
| Observaciones                                | 20         |

|              | Coefficientes | Error típico | Estadístico t | Probabilidad | Inferior 95% | Superior 95% | Inferior 95.0% | Superior 95.0% |
|--------------|---------------|--------------|---------------|--------------|--------------|--------------|----------------|----------------|
| Intercepción | 1.79          | 3.2939E-16   | 5.4342E+15    | 1.458E-243   | 1.79         | 1.79         | 1.79           | 1.79           |
| B1           | -0.789        | 1.5019E-14   | 5.2535E+13    | 2.506E-211   | -0.789       | -0.789       | -0.789         | -0.789         |
| B2           | 52.36         | 1.5774E-14   | 3.3194E+15    | 3.883E-240   | 52.36        | 52.36        | 52.36          | 52.36          |
| B3           | -3.28         | 6.9205E-15   | 4.7395E+14    | 1.301E-226   | -3.28        | -3.28        | -3.28          | -3.28          |

**Cuadro A 4: Análisis de Varianza de la Regresión de BOD**

|           | Grados de libertad | Suma de cuadrados | Promedio de los cuadrados | F          | Valor crítico de F |
|-----------|--------------------|-------------------|---------------------------|------------|--------------------|
| Regresión | 3                  | 35.0475552        | 11.6825184                | 1.0025E+32 | 2.142E-250         |
| Residuos  | 16                 | 1.8645E-30        | 1.1653E-31                |            |                    |
| Total     | 19                 | 35.0475552        |                           |            |                    |

Se rechaza la hipótesis nula, porque el valor de F calculado es de 1.0025E+32 (cuadro 10), es mayor al valor crítico de F es de 3.20 para 3 y 17 grados de libertad.

### 8.4.2) Demanda Química de Oxígeno (COD)

El coeficiente de determinación muestra el valor de 1 esto quiere decir que la ecuación puede ser utilizada para hallar los valores de Demanda Química de Oxígeno., el coeficiente de correlación múltiple muestra el valor de 1, es decir existe una correspondencia perfecta entre los valores de la banda y la demanda química de oxígeno.

**Cuadro A 5: Estadística de la regresión de COD de 3 bandas**

| Estadísticas de la regresión                |            |
|---|------------|
| Coeficiente de correlación múltiple         | 1          |
| Coeficiente de determinación R <sup>2</sup> | 1          |
| R <sup>2</sup> ajustado                     | 1          |
| Error típico                                | 8.0984E-16 |
| Observaciones                               | 20         |

|              | Coeficientes | Error típico | Estadístico t | Probabilidad | Inferior 95% | Superior 95% | Inferior 95.0% | Superior 95.0% |
|--------------|--------------|--------------|---------------|--------------|--------------|--------------|----------------|----------------|
| Intercepción | 2.76         | 7.8143E-16   | 3.532E+15     | 1.438E-240   | 2.76         | 2.76         | 2.76           | 2.76           |
| B1           | -17.27       | 3.5629E-14   | 4.8472E+14    | 9.083E-227   | -17.27       | -17.27       | -17.27         | -17.27         |
| B2           | 72.15        | 3.7421E-14   | 1.9281E+15    | 2.313E-236   | 72.15        | 72.15        | 72.15          | 72.15          |
| B3           | -12.11       | 1.6418E-14   | 7.3762E+14    | 1.098E-229   | -12.11       | -12.11       | -12.11         | -12.11         |

**Cuadro A 6: Análisis de varianza de la regresión de COD**

|           | Grados de libertad | Suma de cuadrados | Promedio de los cuadrados | F          | Valor crítico de F |
|-----------|--------------------|-------------------|---------------------------|------------|--------------------|
| Regresión | 3                  | 30.2728459        | 10.09094864               | 1.5386E+31 | 6.9576E-244        |
| Residuos  | 16                 | 1.0493E-29        | 6.55839E-31               |            |                    |
| Total     | 19                 | 30.2728459        |                           |            |                    |

El valor de F calculado es de 1.5386E+31 (cuadro 13), es mayor al valor crítico de F es 3.20 para 3 y 17 grados de libertad, es decir se rechaza la hipótesis nula.

### 8.4.3) Demanda Química de Oxígeno de 4 bandas

El coeficiente de determinación muestra el valor de 0.75543581 y el coeficiente de correlación múltiple muestra el valor de 0.86915811, es decir existe una correspondencia entre los valores de la banda y la demanda química de oxígeno.

**Cuadro A 7: Análisis de regresión de los valores de COD de 4 bandas**

| <i>Estadísticas de la regresión</i>         |            |
|---|------------|
| Coeficiente de correlación múltiple         | 0.86915811 |
| Coeficiente de determinación R <sup>2</sup> | 0.75543581 |
| R <sup>2</sup> ajustado                     | 0.6902187  |
| Error típico                                | 21.6916189 |
| Observaciones                               | 20         |

|              | Coeficientes | Error típico | Estadístico t | Probabilidad | Inferior 95% | Superior 95% | Inferior 95.0% | Superior 95.0% |
|--------------|--------------|--------------|---------------|--------------|--------------|--------------|----------------|----------------|
| Intercepción | 156.934064   | 22.4083342   | 7.00337931    | 4.256E-06    | 109.17183    | 204.696298   | 109.17183      | 204.696298     |
| B1           | 1150.95727   | 956.728821   | 1.20301306    | 0.24761617   | 3190.17647   | 888.261945   | 3190.17647     | 888.261945     |
| B2           | 894.534439   | 1016.20211   | 0.88027217    | 0.39259732   | 3060.51797   | 1271.44909   | 3060.51797     | 1271.44909     |
| B3           | 330.922361   | 469.575319   | 0.70472691    | 0.49177833   | 669.953738   | 1331.79846   | 669.953738     | 1331.79846     |
| B4           | 44.6899526   | 52.9823948   | 0.84348684    | 0.41220582   | 68.2393486   | 157.619254   | 68.2393486     | 157.619254     |

**Cuadro A 8: Análisis de varianza de la regresión de COD de 4bandas**

|           | <i>Grados de libertad</i> | <i>Suma de cuadrados</i> | <i>Promedio de los cuadrados</i> | <i>F</i>  | <i>Valor crítico de F</i> |
|-----------|---------------------------|--------------------------|----------------------------------|-----------|---------------------------|
| Regresión | 4                         | 21801.17504              | 5450.29376                       | 11.583398 | 0.00017250<br>3           |
| Residuos  | 15                        | 7057.894961              | 470.526331                       |           |                           |
| Total     | 19                        | 28859.07                 |                                  |           |                           |

El F calculado es de 11.583398 (cuadro 16), es mayor al valor de la distribución F es 2.96 para 4 grados de libertad en el numerador y 17 grados de libertad en el denominador, es decir se rechaza la hipótesis nula.

#### **8.4.4) Carbono Orgánico Total (TOC)**

El coeficiente de determinación muestra el valor de 1 esto quiere decir que la ecuación puede ser utilizada para hallar los valores de Demanda Química de Oxígeno., el coeficiente de correlación múltiple muestra el valor de 1, es decir existe una correspondencia perfecta entre los valores de la banda y la demanda química de oxígeno.

**Cuadro A 9: Análisis de regresión de los datos de Carbono orgánico total de 3 bandas:**

| Estadísticas de la regresión                |           |
|---|-----------|
| Coeficiente de correlación múltiple         | 1         |
| Coeficiente de determinación R <sup>2</sup> | 1         |
| R <sup>2</sup> ajustado                     | 1         |
| Error típico                                | 6.345E-16 |
| Observaciones                               | 20        |

|              | Coefficientes | Error típico | Estadístico t | Probabilidad | Inferior 95% | Superior 95% | Inferior 95.0% | Superior 95.0% |
|--------------|---------------|--------------|---------------|--------------|--------------|--------------|----------------|----------------|
| Intercepción | 6.41          | 6.122E-16    | 1.04705E+16   | 4.0417E-248  | 6.41         | 6.41         | 6.41           | 6.41           |
| B1           | -85.29        | 2.791E-14    | 3.05558E+15   | 1.4607E-239  | -85.29       | -85.29       | -85.29         | -85.29         |
| B2           | -2.05         | 2.932E-14    | 6.99256E+13   | 2.5815E-213  | -2.05        | -2.05        | -2.05          | -2.05          |
| B3           | -24.96        | 1.286E-14    | 1.9406E+15    | 2.085E-236   | -24.96       | -24.96       | -24.96         | -24.96         |

**Cuadro A 10: Análisis de Varianza de la regresión de TOC**

|           | Grados de libertad | Suma de cuadrados | Promedio de los cuadrados | F           | Valor crítico de F |
|-----------|--------------------|-------------------|---------------------------|-------------|--------------------|
| Regresión | 3                  | 138.77495         | 46.2583175                | 1.14919E+32 | 7.18E-251          |
| Residuos  | 16                 | 6.44E-30          | 4.02529E-31               |             |                    |
| Total     | 19                 | 138.77495         |                           |             |                    |

El valor de F calculado es de 1.14919E+32 (cuadro 19), es mayor al valor crítico de F es 3.20 para 3 y 17 grados de libertad, es decir se rechaza la hipótesis nula.

#### **8.4.5) Índice de Permanganato (CODmn)**

El coeficiente de determinación muestra el valor de 0.75543581 y el coeficiente de correlación múltiple muestra el valor de 0.86915811, es decir existe una correspondencia entre los valores de las bandas y Índice de Permanganato (CODmn).

**Cuadro A 11: Análisis de la regresión de COD mn**

| <i>Estadísticas de la regresión</i>          |             |
|--|-------------|
| Coefficiente de correlación múltiple         | 0.87198197  |
| Coefficiente de determinación R <sup>2</sup> | 0.760352555 |
| R <sup>2</sup> ajustado                      | 0.69644657  |
| Error típico                                 | 3.358059908 |
| Observaciones                                | 20          |

|              | <i>Coefficientes</i> | <i>Error típico</i> | <i>Estadístico t</i> | <i>Probabilidad</i> | <i>Inferior 95%</i> | <i>Superior 95%</i> | <i>Inferior 95.0%</i> | <i>Superior 95.0%</i> |
|--------------|----------------------|---------------------|----------------------|---------------------|---------------------|---------------------|-----------------------|-----------------------|
| Intercepción | 30.01095259          | 3.46901395          | 8.65114785           | 3.2427E-07          | 22.61692437         | 37.4049808          | 22.61692444           | 37.4049808            |
| B1           | 21.19525373          | 148.110324          | 0.1431045            | 0.88811232          | -294.4944281        | 336.884936          | -294.494428           | 336.884936            |
| B2           | 269.5425264          | 157.31733           | 1.7133683            | 0.10722982          | 604.8564782         | 65.7714254          | 604.856478            | 65.7714254            |
| B3           | 47.35478209          | 72.6945304          | 0.65142153           | 0.52462989          | 107.5899418         | 202.299506          | 107.589942            | 202.299506            |
| B4           | 8.810273394          | 8.20215662          | 1.07414108           | 0.29973546          | 26.2927564          | 8.67220961          | 26.2927564            | 8.67220961            |

**Cuadro A 12: Análisis de Varianza de la regresión de COD mn**

|           | <i>Grados de libertad</i> | <i>Suma de cuadrados</i> | <i>Promedio de los cuadrados</i> | <i>F</i>   | <i>Valor crítico de F</i> |
|-----------|---------------------------|--------------------------|----------------------------------|------------|---------------------------|
| Regresión | 4                         | 536.67374                | 134.168435                       | 11.8979866 | 0.000148951               |
| Residuos  | 15                        | 169.148495               | 11.2765663                       |            |                           |
| Total     | 19                        | 705.822235               |                                  |            |                           |

El F calculado es de 11.8979866 (cuadro 22), es mayor el valor de la distribución F es 2.96 para 4 y 17 grados de libertad, se rechaza la hipótesis nula.

#### 8.4.6) Nitrógeno Amonical (NH<sub>3</sub>-N)

El coeficiente de determinación muestra el valor de 0.5107283 y el coeficiente de correlación múltiple muestra el valor de 0.7146526, es decir existe una correspondencia entre los valores de la banda y la demanda química de oxígeno.

**Cuadro A 13: Análisis de regresión de los valores de las bandas 1, 2, 3,4 y NH<sub>3</sub>-N**

| Estadísticas de la regresión                |           |
|---|-----------|
| Coeficiente de correlación múltiple         | 0.7146526 |
| Coeficiente de determinación R <sup>2</sup> | 0.5107283 |
| R <sup>2</sup> ajustado                     | 0.3802558 |
| Error típico                                | 1.0354649 |
| Observaciones                               | 20        |

|              | Coeficientes | Error típico | Estadístico t | Probabilidad | Inferior 95% | Superior 95% | Inferior 95.0% | Superior 95.0% |
|--------------|--------------|--------------|---------------|--------------|--------------|--------------|----------------|----------------|
| Intercepción | 2.4723593    | 1.0696778    | 2.311312      | 0.0354404    | 0.1923949    | 4.7523236    | 0.1923949      | 4.7523236      |
| B1           | -77.91234    | 45.670134    | -1.70598      | 0.1086252    | 175.2559     | 19.431249    | -175.2559      | 19.431249      |
| B2           | 93.249862    | 48.509134    | 1.9223155     | 0.0737679    | 10.14491     | 196.64463    | -10.14491      | 196.64463      |
| B3           | -38.91683    | 22.415513    | -1.736156     | 0.1030241    | 86.69437     | 8.8607063    | -86.69437      | 8.8607063      |
| B4           | -8.434586    | 2.5291525    | -3.334946     | 0.0045229    | 13.82535     | -3.043825    | -13.82535      | -3.043825      |

**Cuadro A 14: Análisis de varianza de los valores de las bandas 1, 2, 3,4 y NH3-N**

|           | Grados de libertad | Suma de cuadrados | Promedio de los cuadrados | F         | Valor crítico de F |
|-----------|--------------------|-------------------|---------------------------|-----------|--------------------|
| Regresión | 4                  | 16.788112         | 4.1970279                 | 3.9144529 | 0.0226785          |
| Residuos  | 15                 | 16.082814         | 1.0721876                 |           |                    |
| Total     | 19                 | 32.870926         |                           |           |                    |

El F calculado es de 3.9144529 (cuadro 25), es mayor al valor de distribución F es 2.96, en consecuencia se rechaza la hipótesis nula.

## ANEXO 5. ÍNDICE DE CALIDAD DE AGUA (ICA)

### ECA Categoría 1-A3

| Puntos de muestreo   |   |          |               | A1         |            |            |            | A2         |            |            |            | A3         |            |            |            | N1         |            |            |            | N2         |            |            |            |
|----------------------|---|----------|---------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Parámetros a evaluar |   |          | ECA Cat. 1-A3 | 14/07/1994 | 09/07/1998 | 12/07/2005 | 15/09/2011 | 14/07/1994 | 09/07/1998 | 12/07/2005 | 15/09/2011 | 14/07/1994 | 09/07/1998 | 12/07/2005 | 15/09/2011 | 14/07/1994 | 09/07/1998 | 12/07/2005 | 15/09/2011 | 14/07/1994 | 09/07/1998 | 12/07/2005 | 15/09/2011 |
| Parámetro            | BO<br>D                                   | mg/<br>L | 10            | 4.64       | 4.77       | 4.02       | 7.10       | 4.38       | 4.57       | 5.91       | 9.45       | 6.26       | 5.86       | 5.28       | 6.93       | 4.64       | 4.95       | 4.63       | 5.55       | 3.73       | 3.93       | 4.25       | 5.06       |
| físicoquímico        | CO<br>D                                   | mg/<br>L | 30            | 5.68       | 5.80       | 5.12       | 7.95       | 5.44       | 5.62       | 6.85       | 10.14      | 7.17       | 6.80       | 6.27       | 7.79       | 5.69       | 5.96       | 5.68       | 6.52       | 4.85       | 5.04       | 5.32       | 6.07       |
| DATOS                | Número de parámetros que no cumplen       |          |               | 0          |            |            |            | 0          |            |            |            | 0          |            |            |            | 0          |            |            |            |            |            |            |            |
|                      | Número total de parámetros a evaluar      |          |               | 2          |            |            |            | 2          |            |            |            | 2          |            |            |            | 2          |            |            |            |            |            |            |            |
|                      | Número de datos que no cumplen con el ECA |          |               | 0          |            |            |            | 0          |            |            |            | 0          |            |            |            | 0          |            |            |            |            |            |            |            |
|                      | Número total de datos                     |          |               | 40         |            |            |            | 40         |            |            |            | 40         |            |            |            | 40         |            |            |            |            |            |            |            |

### ECA Cat. 4-E2 Selva

| Puntos de muestreo      |   |                     | A1         |            |            |            | A2         |            |            |            | A3         |            |            |            | N1         |            |            |            | N2         |            |            |            |      |
|-------------------------|---|---------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------|
| Parámetros a evaluar    |   | ECA Cat. 4-E2 Selva | 14/07/1994 | 09/07/1998 | 12/07/2005 | 15/09/2011 | 14/07/1994 | 09/07/1998 | 12/07/2005 | 15/09/2011 | 14/07/1994 | 09/07/1998 | 12/07/2005 | 15/09/2011 | 14/07/1994 | 09/07/1998 | 12/07/2005 | 15/09/2011 | 14/07/1994 | 09/07/1998 | 12/07/2005 | 15/09/2011 |      |
| Parámetro físicoquímico | BO  | mg/L                | 10         | 4.64       | 4.77       | 4.02       | 7.10       | 4.38       | 4.57       | 5.91       | 9.45       | 6.26       | 5.86       | 5.28       | 6.93       | 4.64       | 4.95       | 4.63       | 5.55       | 3.73       | 3.93       | 4.25       | 5.06 |
|                         | CO  | mg/L                |            | 5.68       | 5.80       | 5.12       | 7.95       | 5.44       | 5.62       | 6.85       | 10.14      | 7.17       | 6.80       | 6.27       | 7.79       | 5.69       | 5.96       | 5.68       | 6.52       | 4.85       | 5.04       | 5.32       | 6.07 |
| DATOS                   | Número de parámetros que no cumplen       |                     |            | 0          |            |            |            | 0          |            |            |            | 0          |            |            |            | 0          |            |            |            |            |            |            |      |
|                         | Número total de parámetros a evaluar      |                     |            | 1          |            |            |            | 1          |            |            |            | 1          |            |            |            | 1          |            |            |            |            |            |            |      |
|                         | Número de datos que no cumplen con el ECA |                     |            | 0          |            |            |            | 0          |            |            |            | 0          |            |            |            | 0          |            |            |            |            |            |            |      |
|                         | Número total de datos                     |                     |            | 20         |            |            |            | 20         |            |            |            | 20         |            |            |            | 20         |            |            |            |            |            |            |      |

## ANEXO 6. ANALISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES

**Cuadro A 15: Correlación de Componentes Principales**

| Correlacion |            |            |
|-------------|------------|------------|
| PC          | Eigenvalue | % variance |
| 1           | 4.6556     | 77.593     |
| 2           | 0.998559   | 16.643     |
| 3           | 0.267505   | 4.4584     |
| 4           | 0.0696055  | 1.1601     |
| 5           | 0.00860731 | 0.14346    |
| 6           | 0.00012369 | 0.0020615  |

**Cuadro A 16: Varianza de Componentes Principales**

| Varianza |            |            |
|----------|------------|------------|
| PC       | Eigenvalue | % variance |
| 1        | 1560.11    | 99.463     |
| 2        | 4.52251    | 0.28833    |
| 3        | 2.81144    | 0.17924    |
| 4        | 1.05441    | 0.067222   |
| 5        | 0.0395656  | 0.0025224  |
| 6        | 0.00023382 | 1.49E-05   |

**Cuadro A 17: Valores de las Componentes Principales**

|                       | Component<br>e 1 | Component<br>e 2 | Component<br>e 3 | Component<br>e 4 | Component<br>e 5 | Component<br>e 6 |
|-----------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| A1_julio_1994         | 1.1158           | -0.39977         | 0.17439          | 0.67557          | -0.035975        | -0.0064992       |
| A2_julio_1994         | 1.1107           | -0.45977         | -0.24434         | -0.37723         | -0.009677        | 0.0035011        |
| A3_julio_1994         | -1.7741          | -0.11139         | -0.26447         | -0.0183          | 0.07035          | 0.0045172        |
| N2_julio_1994         | 3.4799           | 0.14448          | 1.0858           | 0.11728          | -0.13172         | 0.0069844        |
| N1_julio_1994         | 0.91121          | -0.43858         | -0.095348        | 0.44151          | -0.011757        | 0.0040994        |
| A1_julio_1998         | 0.090916         | -0.71063         | -0.5419          | -0.17071         | -0.10372         | -0.017038        |
| A2_julio_1998         | 1.1217           | -0.038232        | -0.038504        | -0.18417         | 0.070756         | 0.0031039        |
| A3_julio_1998         | -1.4175          | -0.29442         | -0.29158         | -0.27069         | -0.062144        | -0.025871        |
| N2_julio_1998         | 2.7099           | 0.045535         | 0.71001          | -0.4913          | 0.15448          | 0.0026609        |
| N1_julio_1998         | 0.10355          | -0.49024         | -0.36039         | 0.05154          | 0.030838         | -0.0013517       |
| A1_julio_2005         | 2.0802           | -0.48623         | 0.2711           | -0.083456        | -0.039788        | 0.00067807       |
| A2_julio_2005         | -0.71658         | 0.96589          | -0.21411         | 0.17015          | 0.20996          | 0.0089632        |
| A3_julio_2005         | 1.1531           | 3.8976           | -0.47067         | 0.0011834        | -0.075919        | -0.0043971       |
| N2_julio_2005         | 1.7559           | -0.34303         | 0.26055          | 0.012788         | -0.0046314       | -0.0048          |
| N1_julio_2005         | 0.63048          | -0.50976         | -0.37231         | -0.066276        | -0.016783        | 0.0033579        |
| A1_setiembre_<br>2011 | -2.9344          | -0.14411         | -0.064035        | -0.053726        | -0.068102        | 0.01844          |
| A2_setiembre_<br>2011 | -5.7039          | 0.53526          | 1.3622           | 0.017611         | 0.027109         | -0.012732        |
| A3_setiembre_<br>2011 | -2.76            | -0.21739         | -0.16981         | -0.14204         | -0.16026         | 0.022815         |
| N2_setiembre_<br>2011 | -0.038232        | -0.49007         | -0.28658         | 0.21704          | 0.069412         | -0.0084002       |
| N1_setiembre_<br>2011 | -0.91865         | -0.45516         | -0.44995         | 0.15321          | 0.087573         | 0.0019676        |