



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**DIAGNÓSTICO AMBIENTAL DE
PRESAS MEDIANTE EL USO DE LA
PERCEPCIÓN REMOTA**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE

INGENIERO CIVIL

PRESENTA:

SIMÓN LEDESMA HERNÁNDEZ



TUTOR:

M.I. RODRIGO TAKASHI SEPÚLVEDA HIROSE

2013



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

DIVISIÓN DE INGENIERÍAS CIVIL Y GEOMÁTICA
COMITÉ DE TITULACIÓN
FING/DICyG/SEAC/UTIT/051/13

Señor
SIMÓN LEDESMA HERNÁNDEZ
Presente

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor M.I. RODRIGO TAKASHI SEPÚLVEDA HIROSE, que aprobó este Comité, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de INGENIERO CIVIL.

"DIAGNÓSTICO AMBIENTAL DE PRESAS MEDIANTE EL USO DE LA PERCEPCIÓN REMOTA"

- INTRODUCCIÓN
- I. ANTECEDENTES HISTÓRICOS
- II. PERCEPCIÓN REMOTA
- III. MARCO TEÓRICO
- IV. METODOLOGÍA
- V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES
- BIBLIOGRAFÍA
- ANEXO

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el Título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
Cd. Universitaria a 24 de abril del 2013.
EL PRESIDENTE


M.I. JOSÉ LUIS TRIGOS SUÁREZ

JLTS/MTH*gar.

Agradecimientos:

A mi maestro Rodrigo Sepúlveda, por su paciencia y dedicación. Por su pasión e interés de transmitir sus conocimientos y por convertirse en un gran amigo.

A Mamá y Goyo, por ser la guía de mi vida y por acompañarme desde pequeño en esta gran aventura.

A mis hermanos Brenda, Paty, Marcos, Mary, Baldo y Bere, por su cariño incondicional y sus palabras de aliento.

A Mitzy, por el amor que me has brindado. Por regalarme siempre una sonrisa y por tomar mi mano para nunca soltarla.

Introducción	1
Objetivo	3
Objetivos Específicos.....	3
Capítulo 1. Antecedentes Históricos	4
Capítulo 2. Percepción Remota	8
2.1 Elementos del Proceso de Percepción Remota.....	8
2.2 Sensores y Plataformas.....	10
2.3 Procesamiento de Datos.....	13
2.4 Realce y Filtrado de la Imagen.....	16
Ajuste de Contraste.....	16
Filtrado de Imágenes Mediante Convolución.....	18
Filtros de Paso Bajo.....	19
Filtros de Paso Alto.....	20
2.5 Ventajas y Limitaciones de la PR.....	23
Capítulo 3. Marco Teórico	24
3.1 Espectro Electromagnético.....	26
3.2 Interacción de la Radiación con la Atmósfera.....	28
3.3 Interacción Radiación-Objeto.....	29
3.4 Firma Espectral.....	29
Capítulo 4. Metodología	31
4.1 Sitios de Estudio.....	31
Presa Peñitas.....	31
Presa Huites.....	32
4.2 Plataforma Seleccionada.....	34
4.3 Adquisición de las Imágenes.....	35
4.4 Pre-procesamiento y Procesamiento de las Imágenes Mediante Software Especializado.....	35
4.5 Determinación de Sitios de Muestreo.....	45
4.6 Análisis Visual.....	56
4.7 Análisis Digital.....	62
Interpretación de Resultados	76

Conclusiones y Recomendaciones.....	77
Bibliografía Citada.....	79
Anexo 1.....	81

Introducción

Los ecosistemas de agua dulce, incluidos los ríos, los lagos y las zonas húmedas, tienen una riqueza en especies extraordinaria, lamentablemente, también se encuentran entre los ecosistemas más alterados y amenazados del mundo. El régimen del caudal natural y la conectividad longitudinal y lateral de los ríos quedan alterados cuando los ríos se fragmentan con presas y sus embalses.

La fragmentación de los ríos altera los procesos biofísicos y ecológicos naturales para la preservación de la vida en aguas dulces. Las presas desconectan a los ríos de las planicies aluviales del entorno, obstaculizan los pasos para la migración de peces y retienen sedimentos y nutrientes que los ecosistemas requieren río abajo. Los embalses convierten los hábitats de agua corriente en sistemas parecidos a los lagos, provocando la desaparición de especies de peces adaptadas a los hábitats ribereños y la proliferación de otras, a menudo especies exóticas adaptadas a aguas tranquilas. En los ríos muy fragmentados es probable que se haya reducido la diversidad de vida y haya tenido un impacto en la capacidad adaptativa de las especies nativas. Por lo tanto, un aumento de la fragmentación de ríos indica una mayor probabilidad de pérdida de biodiversidad así como una alteración en el aporte de servicio ecosistémico. Los sedimentos que se retienen tras las presas, por ejemplo, alteran el aporte de nutrientes esenciales y de sedimentos a los ecosistemas costeros, lo que afecta el servicio que proporcionan, como las pesquerías y el reaprovisionamiento de las playas (Universidad de Umeå 2010).

Especialmente en los últimos años, los Estados americanos han promovido el desarrollo de grandes represas como una solución al aumento en la demanda de energía y agua, y como una forma de promover el desarrollo económico y disminuir las condiciones de pobreza. Sin embargo, la falta de planeación adecuada, de rigurosos estudios de impacto ambiental y social, de procesos de participación y consulta efectivos, de políticas de energía y agua integrales, y de aplicación de las normas y estándares nacionales e internacionales, han generado impactos severos tanto al ambiente, como a los derechos humanos de las personas y de las comunidades afectadas. Esta situación es crítica y, de no tomarse las acciones correctivas necesarias, los impactos serían irreversibles.

Los daños ambientales que causan las grandes presas en los ríos, las cuencas hidrográficas y los ecosistemas aledaños, han sido ampliamente documentados. De acuerdo con la Comisión Mundial de Represas (CMR), *“las grandes represas en general producen una serie de impactos violentos... que son más negativos que positivos y, en muchos casos, han conducido a la pérdida irreversible de especies y ecosistemas”* (AIDA 2009).

El impacto ambiental ocasionado por las grandes presas no solamente es inmediato, por ello es necesario realizar inspecciones ambientales periódicas como se propone en el Artículo 55 del Reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente en materia de Evaluación del Impacto Ambiental para monitorear las afectaciones producidas por estas obras y

tener una visión más amplia de las mismas e imponer las medidas de seguridad y acciones correctivas de ser necesario.

En el Capítulo 1 de este trabajo se hace un recuento histórico desde los primeros estudios sobre el comportamiento de la luz y la aparición de la cámara fotográfica hasta las últimas plataformas satelitales que orbitan nuestro planeta. En el Capítulo 2, se desarrollan los fundamentos de la percepción remota, abarcando los distintos elementos que intervienen en el proceso desde la captura hasta el procesamiento de la información. En el 3º, se desarrollan las bases teóricas que sustentan el trabajo. En el Capítulo 4 se realiza una breve descripción del sitio de estudio, para finalmente desarrollar la metodología para esta investigación y presentar sus resultados.

Objetivo

Evaluar algunos de los impactos ocasionados al ambiente por los embalses mediante el uso de técnicas de Percepción Remota aplicadas a casos particulares.

Objetivos específicos

- ◆ Explicar los fundamentos de la PR.
- ◆ Analizar los métodos utilizados en el pre-procesamiento, procesamiento, análisis visual y análisis digital de imágenes.
- ◆ Probar a través de los estudios de caso de las presas Peñitas y Huites la utilidad de la PR para evaluar algunos de los impactos ocasionados al ambiente.

Capítulo 1 Antecedentes históricos

El ser humano se ha valido de la adquisición de información a distancia desde su origen: el más perfecto sensor remoto con el que cuenta es el ojo humano. Nos permite identificar el tamaño, volumen, posición, luminosidad, distancia, trayectoria, color y forma de los objetos en nuestro entorno, entre otras cosas.

No fue hasta que nuestros antecesores comenzaran a explorar objetos terrestres y celestes que los científicos comenzaron a entender las propiedades de la luz. Newton planteó (basándose en su famoso experimento en el que descompuso un haz de luz al hacerlo incidir en un prisma de cristal) antecedentes importantes para comprender algunos fenómenos del espectro electromagnético. Michael Faraday fue el primero en probar de forma experimental la relación de la luz con fenómenos electromagnéticos en el año de 1845 (Cetto 1996). Por su parte, James Maxwell desarrolló la teoría electromagnética de la luz de manera formal.

La cámara fotográfica, imitadora mecánica del ojo humano, apareció a finales del siglo XIX (Olguín 2008) y permitió registrar imágenes de objetos distantes.

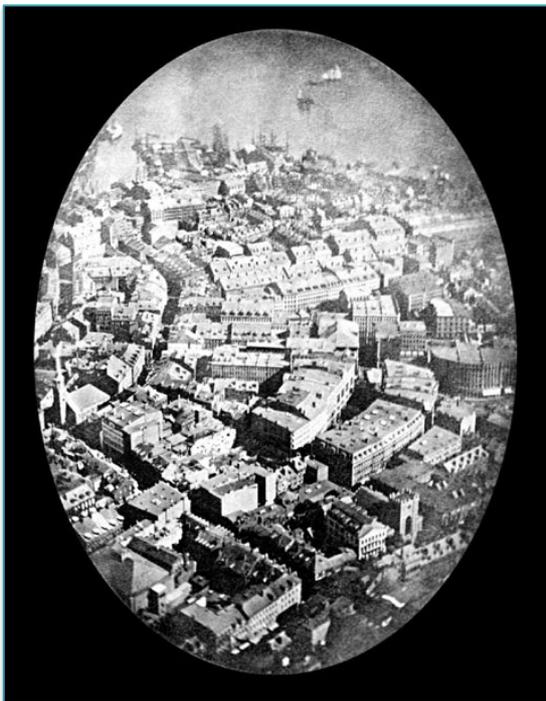


Figura 1. Fotografía aérea de la ciudad de Boston, de 1860, tomada desde un globo aerostático. Fuente: Galería de la Biblioteca Pública de Boston.

Las primeras imágenes aéreas se obtuvieron colocando cámaras en globos aerostáticos, en palomas o en papalotes (Elachi and van Zyl 2006) (Figura 1, Figura 2 y Figura 3).



Figura 2. Palomas con cámaras fotográficas montadas por Julius Neubronner.

Para 1890 aparece la primera publicación de fotografía aérea, escrita por Batut (Rees 2001). En 1891, se otorgaron las primeras patentes alemanas de diseños de cohetes con sistemas de adquisición de imágenes bajo el título de “Dispositivos nuevos o mejorados para obtener fotografías aéreas de la Tierra”. El sistema consistía en una cámara propulsada por un cohete con un paracaídas para su recuperación (De Jong 2005).

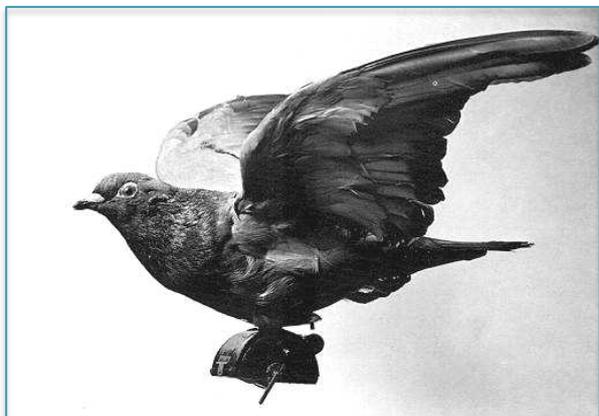


Figura 3. Palomas con cámaras fotográficas montadas por Julius Neubronner.

A mediados de la década de los años 30 apareció la fotografía a color. Simultáneamente, se desarrollaron películas sensibles a la radiación del infrarrojo cercano. La aplicación principal en esa época era poder tomar fotografías que penetraran la neblina. Para el principio de la década de los 50 los sistemas de percepción remota se desarrollaron y perfeccionaron con bastante velocidad. La fotografía infrarroja se utilizó en estudios de cubierta vegetal, principalmente para reconocimiento de especies, identificación de individuos enfermos, dañados o

sujetos a estrés (Elachi and van Zyl 2006, De Jong 2005). Así mismo, se lograron avances importantes en la tecnología de los radares.

Con el lanzamiento del primer satélite meteorológico con una cámara de televisión de baja resolución espacial en el año de 1960 se comienza la observación sistemática de la Tierra desde el espacio. Este satélite recibió el nombre de TIROS-I (Televisión Infra Red Observation Satellite), y permitía a los meteorólogos discriminar entre nubes, agua, hielo y nieve. A pesar de que su lapso de operación fue muy corto (78 días), probó que los satélites son herramientas útiles en el estudio de los fenómenos ambientales terrestres. Éste fue el primero de una serie de satélites que cambiaron de denominación en 1970 a NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) y que continúan vigentes hasta nuestros días, siendo el NOAA-19 el último en ponerse en órbita en febrero de 2009.

El primer experimento controlado de fotografía multispectral para estudiar los recursos de la Tierra se llevó a cabo en el Apolo 9 cuando estaba en órbita, en marzo de 1969 (www.nasa.gov). Las fotografías fueron tomadas utilizando una película pancromática con filtros rojos y verdes, otra película en blanco y negro del infrarrojo próximo y una última en color.

El gobierno estadounidense desarrolló el Programa de Observación ERTS (Earth Resources Technology Satellites), debido al éxito obtenido con las imágenes de los primeros satélites meteorológicos y misiones espaciales tripuladas. El programa fue renombrado como Landsat (Land Satellite) a partir de 1975. El primer satélite de esta serie fue lanzado anteriormente, el 23 de julio de 1972, operando hasta el 6 de enero de 1978. Tenía instalados dos sensores: el RBV (Return Beam Vidicon) y el sensor MSS (Multi Spectral Scanner) que medía reflectancia de la superficie terrestre en cuatro intervalos espectrales, situados entre 0.5 y 1.1 μm . Las primeras

tres plataformas de la serie incluyeron ambos sensores, pero el MSS entregó información mucho más valiosa.

Este sensor se continuó instalando hasta la quinta plataforma lanzada en marzo de 1984. En Landsat 4 y 5 se incorporó otro sensor, el TM (Thematic Mapper) en el que se mejoró la resolución espacial y espectral. De hecho, este par de plataformas se construyeron al mismo tiempo y se lanzaron con dos años de diferencia. El sensor TM tiene 7 bandas espectrales, las tres primeras destinadas para el visible (específicamente para el azul, verde y rojo respectivamente), y el resto para distintos ámbitos dentro del infrarrojo próximo, lejano y térmico.

En 1993 se planeaba poner en funcionamiento la sexta plataforma del programa, sin embargo, nunca se logró poner en órbita, ya que el cohete propulsor no alcanzó la velocidad necesaria debido a una ruptura de un colector de hidracina. En este satélite se incorporó por primera vez el sensor ETM (Enhanced Thematic Mapper) que ofrecería una banda pancromática con 15 metros de resolución espacial, además de todas las bandas del sensor TM.

El proyecto Landsat ha resultado hasta el momento ser el más fructífero para aplicaciones no militares. El último satélite Landsat puesto en órbita en 1999 es el Landsat-7, el cual tiene un sensor ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus) de 7 canales que abarcan desde el visible hasta el infrarrojo térmico y uno más que tiene 15 metros de resolución espacial (canal pancromático).

Se han colocado en órbita cientos de satélites desde entonces, los más sobresalientes son el SPOT francés, el ERS de la Agencia Europea del Espacio, el MOS japonés, el RADARSAT canadiense y el IRS indio.

El programa SPOT (Satellite Pour l' Observation de la Terre) fue aprobado en 1978 por el gobierno francés, con la idea de desarrollar su propio programa de observación de la Tierra. Su misión principal es obtener imágenes terrestres para uso en agricultura, geología, cartografía, planeación territorial, recursos hídricos, estudios ambientales y otras aplicaciones de SIG. Existe una red internacional de estaciones receptoras y de procesamiento de datos, así como distribuidores de datos.

El primer satélite de este programa fue lanzado en febrero de 1986 (Pacholczyk 1993). El último satélite puesto en órbita fue el SPOT-5 en mayo de 2002. Cuenta con un sensor HRG (Haute Résolution Géométrique) a bordo, que tiene una resolución espacial máxima de 2.5 m (esto lo logra a partir de 2 imágenes de 5 metros simultáneas desfasadas medio pixel) en el pancromático. Cuenta con 4 canales multiespectrales, 2 en el visible y 2 en el infrarrojo.

Cuenta también con el sensor HRS (Haute Résolution Stéréoscopique) con el que se pueden obtener imágenes tridimensionales, ya que la plataforma tiene la capacidad para desalinearse el sensor hasta aproximadamente 30°, por lo que puede obtener una imagen del mismo lugar con diferente ángulo al pasar. Así mismo, tiene un sensor llamado VEGETATION-2 de baja resolución espacial para monitoreo ambiental.

La serie de satélites IRS (Indian Remote Sensing Satellite) empezaron a operar en 1996. Tienen 3 sensores: una cámara pancromática de alta resolución espacial (5.8 m), un sensor LISS (Linear Imaging Self-Scanning Sensor) de cuatro canales y resolución media (23.5-70.5 m), y un sensor WiFS (Wide Field Sensor) con 2 canales y baja resolución (188.3 m). La última plataforma del programa puesta en órbita fue el Resourcesat-2 el 20 de abril del 2011 (Indian Space Research 2011).

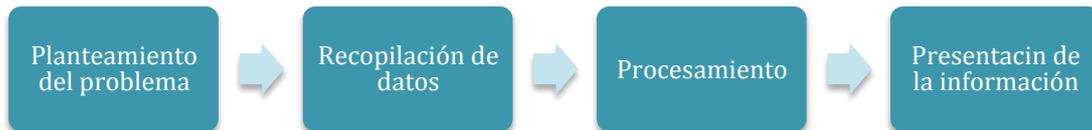
A pesar de que la mayoría de los primeros satélites se desarrollaron por agencias gubernamentales de un puñado de países, en la actualidad existen cerca de 20 naciones operando y/o desarrollando satélites de percepción remota, y muchos de éstos son desarrollados, lanzados y operados por firmas comerciales. Incluso, en algunos casos estas firmas han reemplazado por completo a desarrolladores gubernamentales, convirtiéndose incluso el gobierno en cliente de las mismas.

Las capacidades de los sensores también se han incrementado notablemente en los últimos años. El número de canales espectrales ha crecido de unos pocos hasta más de 200 para el caso del sensor Hyperion a bordo del satélite EO-1. La resolución espacial también se ha afinado hasta llegar a resoluciones del orden de fracciones de metro, como las registradas por IKONOS o Quickbird. Así como los datos obtenidos a través de la PR se han vuelto muy accesibles, el número de aplicaciones se ha incrementado.

Capítulo 2 Percepción Remota

La Percepción Remota es la ciencia de obtener información sobre un objeto, área o fenómeno a través del análisis de datos adquiridos por medio de un dispositivo que no está en contacto físico con el objeto, área o fenómeno bajo investigación (Lillesand 1979).

El proceso queda descrito a grandes rasgos por la recopilación de datos, procesamiento y presentación de la información:



2.1 Elementos del proceso de percepción remota

El proceso involucra una interacción entre la radiación incidente y los objetos de interés (Arbelo 2004), como se muestra en la Figura 4.

Fuente de radiación electromagnética (A): El primer requerimiento para la percepción remota es tener una fuente de energía que ilumine o provea energía electromagnética al objeto de interés. Todos los materiales con una temperatura por encima de los 0° K tiene la capacidad de emitir energía electromagnética. Objetos en o cerca de la superficie terrestre son capaces de reflejar o dispersar la radiación electromagnética incidente emitida por una fuente, que puede ser artificial o natural.

Radiación y la atmósfera (B): Mientras la energía viaja de la fuente al objetivo, ésta entrará en contacto e interactuará con la atmósfera mientras pasa a través de ella. Esta interacción puede tener lugar por segunda vez mientras la energía viaja desde el objetivo hasta el sensor.

Interacción con el objeto (C): Ésta depende tanto de las propiedades del objeto como de la radiación incidente. Cuando esta última alcanza el objeto, puede ser transmitida, absorbida, dispersada o reflejada. La magnitud de cada uno de estos procesos depende de las propiedades del objeto en cuestión.

Registro de la energía en el sensor (D): Después que la energía ha sido dispersada o emitida por el objetivo, se requiere de un sensor para coleccionar y registrar la radiación electromagnética.

Transmisión, recepción y procesamiento (E): La energía registrada por el sensor tiene que ser transmitida, frecuentemente de manera electrónica, a una estación de recepción y procesamiento donde los datos son procesados en una imagen (impresa o digital).

Interpretación y Análisis (F): La imagen procesada es interpretada, visual, digital y/o electrónicamente para extraer información sobre el objeto de interés.

Aplicación (G): El elemento final del proceso de la percepción remota se logra cuando se aplica la información extraída de las imágenes sobre el objeto con el fin de comprenderlo mejor, revelar alguna información nueva o ayudar en la solución de un problema en particular.

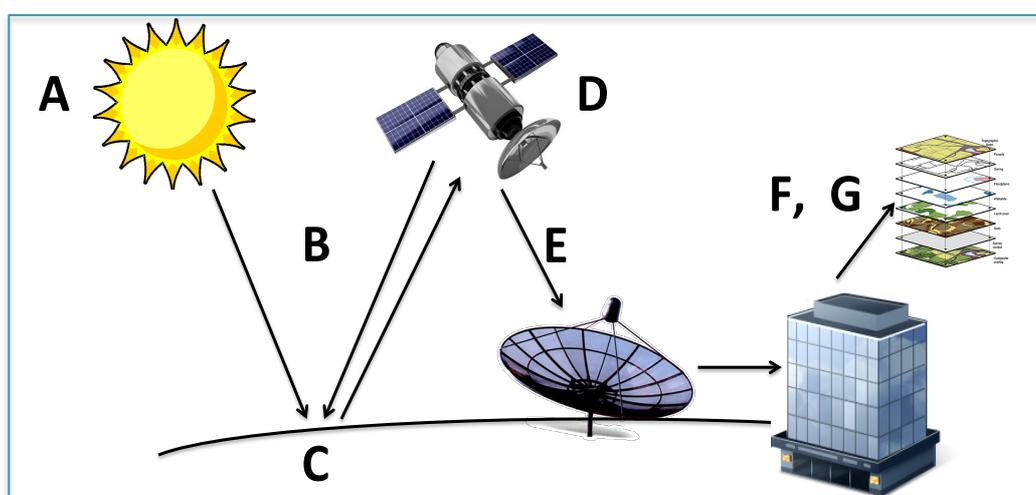


Figura 4. Elementos del proceso de Percepción Remota. Basado en (Arbelo 2004)

2.2 Sensores y plataformas

Resulta de suma importancia diferenciar entre la plataforma y el sensor en la PR: la primera, es el dispositivo en donde se sustentan físicamente los sistemas necesarios para el correcto funcionamiento del sensor, que es el encargado de captar la información transmitida en forma de energía electromagnética del objeto o área en estudio.

En función de la posición espectral de las bandas, los sensores colectan la energía que es reflejada (visible e infrarroja), emitida (térmica infrarroja), o dispersada (principalmente visible y microondas) por la atmósfera o la superficie terrestre.

Así, la plataforma LANDSAT 7 cuenta con el sensor ETM+; la SPOT, con los sensores HRG y HRS; por mencionar un par.

Las plataformas pueden clasificarse con base en los siguientes criterios:

- ◆ Por el tipo o altura respecto a la superficie terrestre en donde operan (avión, satélite, etc.)(Véase la Figura 5).
- ◆ Por la trayectoria (sincronizada con el Sol u órbita geoestacionaria)

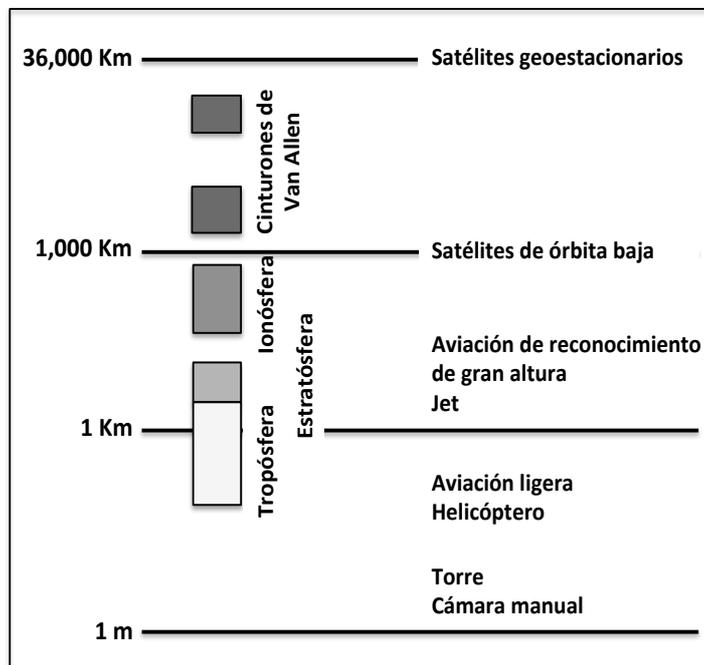


Figura 5. Plataformas clasificadas en función de su altura

La decisión de escoger la altura de la plataforma para un estudio obviamente impactará en la escala, resolución espacial y cobertura espacial de los datos recolectados.

Haciendo un análisis comparativo entre plataformas aéreas y satelitales es posible encontrar ventajas y desventajas entre las mismas.

Entre las desventajas que presentan los vuelos frente a los satélites son la duración de las misiones, que en un avión pueden ser de horas contra la duración de años de un satélite; la cobertura espacial de los datos es también mucho menor por la diferencia enorme de alturas; existe incertidumbre en las variaciones de velocidad en el movimiento de los aviones. Por el contrario, presentan ventajas sobre todo en estudios que requieran de mucho detalle y en áreas pequeñas. Así mismo, el vuelo se puede programar para el día requerido y la adquisición de imágenes a la hora deseada (mientras el clima lo permita), algo que no sucede con una plataforma satelital.

Así mismo, los sensores pueden clasificarse con base en los siguientes criterios:

- ◆ Por el número de bandas espectrales (pancromáticos, multiespectrales o hiperespectrales)
- ◆ Por su resolución espacial (alta, mediana o baja)
- ◆ Por su resolución temporal (horaria, diaria, semanal, o frecuencia periódica de visita)
- ◆ Por su resolución radiométrica (por ejemplo 8, 12 o 16 bits)
- ◆ Por su aplicación (meteorológicos, recursos de la tierra, etc.)

Los sistemas de percepción Remota que dependen de la luz solar reflejada en la superficie terrestre (o de la energía emitida por algún objeto) para la adquisición de imágenes son llamados **sensores pasivos**. Éstos no cuentan con una fuente propia de radiación.

Los **sensores activos**, por otro lado, cuentan con su propia fuente de iluminación. El sensor emite radiación que es dirigida hacia el objeto de interés y la radiación reflejada por éste es detectada y medida por el sensor. Las ventajas de los sensores activos incluyen la capacidad para obtener las mediciones en cualquier momento, independientemente de la hora del día o temporada. Como los datos adquiridos se encuentran aproximadamente en las frecuencias del espectro visible los sensores activos pueden ser utilizados para examinar longitudes de onda que no están lo suficientemente provistos por el sol o para controlar mejor la forma en que se ilumina un objetivo. Sin embargo, los sistemas activos requieren la generación de una gran cantidad de energía para iluminar adecuadamente los objetos.

Resolución de un sensor

La resolución de un sensor puede definirse como su habilidad para discriminar la información de detalle (Ruiz 2002). Existen al menos cuatro tipos de resolución que deben tomarse en cuenta en la adquisición de datos mediante la percepción remota:

Resolución espectral: Abarca los intervalos de longitud de onda que un sensor puede registrar y está determinado por el número de bandas adquiridas y su ancho de banda medido en micrómetros (μm) o nanómetros (nm). En ese sentido, un sensor será tanto más idóneo cuanto mayor número de bandas proporcione, ya que facilitará la caracterización espectral de las distintas superficies o materiales (Ruiz 2002). Un intervalo de ancho de banda de $0.2 \mu\text{m}$ en el visible o cercano al infrarrojo se considera de resolución espectral baja y uno de $0.01 \mu\text{m}$ de resolución alta. Los sensores como el HRG (SPOT-5) o el ETM (Landsat-7) tienen 4 y 7 canales respectivamente para coleccionar información en el ámbito de 0.4 a $2.5 \mu\text{m}$.

Resolución espacial: Define el nivel de detalle espacial representado en la imagen y está directamente relacionado con el objeto en tierra más pequeño que sea distinguible como entidad aislada del resto de la imagen. El área superficial cubierta por un pixel (unidad mínima de información espacial) es función de la plataforma y el sensor utilizados, sin embargo, el contraste espectral (respuesta espectral distintiva de un objeto con respecto a sus alrededores) también desempeña un papel muy importante en la detección de un objeto como entidad. Se mide en unidades de longitud, generalmente en metros.

Resolución temporal: Considera el lapso en el cual un sensor adquiere imágenes de la misma porción de la superficie terrestre o el que exista entre adquisiciones sucesivas. El ciclo depende de las características de la órbita del satélite.

Resolución radiométrica: Es la cantidad de energía medida en términos de variaciones de la radiancia espectral. La mayor parte de los sistemas ofrecen 256 niveles por pixel (0 a 255), equivalente a 8 bits. La interpretación de la imagen será mejor mientras mayor sea la resolución radiométrica.

2.3 Procesamiento de datos

El sensor detecta la radiancia media procedente de una parcela del terreno equivalente al tamaño del pixel y se traduce a un valor numérico en cada banda del espectro llamado **Nivel Digital (ND)**. Éste es un número entero que varía en función de la resolución radiométrica con la que trabaje el sensor. Por ejemplo, para 8 bits, el ND en cada pixel puede variar de 0 a 255, completando los 256 posibles valores (2^8) (véase Figura 6). Es por eso que puede traducirse a una intensidad visual, a través de su nivel de gris.

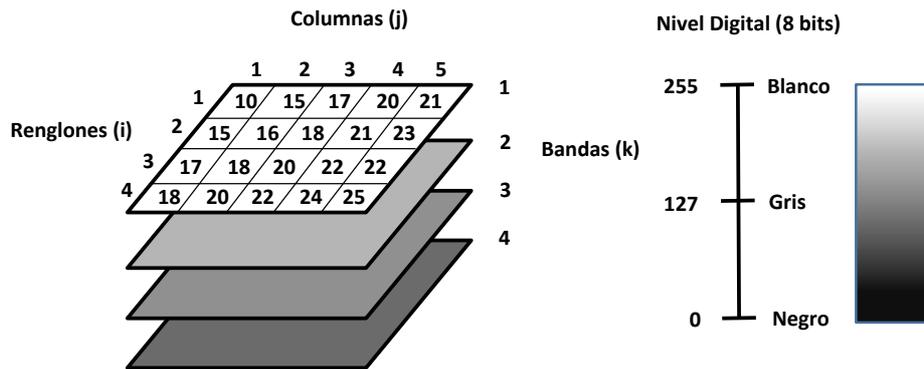


Figura 6. Organización de una imagen satelital. Basado en (Sepúlveda 2011)

Es necesario procesar los datos capturados por los sensores remotos para incorporarlos a un SIG o software de PR para su análisis y modelación. Este proceso requiere principalmente de 4 etapas:

- 1) Preprocesamiento de Imagen:** Las funciones del preprocesamiento involucran aquellas operaciones que se requieren antes del análisis de datos principal y la extracción de información, y generalmente se clasifican en **correcciones radiométricas** o **correcciones geométricas**. Básicamente, las operaciones sirven para uno de dos propósitos: (1) para minimizar distorsiones y/o errores en una imagen que podría dificultar la clasificación con éxito; o (2) para extraer o mejorar la información más crítica de una imagen, haciendo así la clasificación más sencilla.

Correcciones radiométricas: Incluyen la corrección de los datos de las irregularidades del sensor y la conversión de los datos de modo que representen con precisión la radiación reflejada o emitida medida por el sensor.

Correcciones geométricas: incluyen la corrección de las distorsiones geométricas debido a las variaciones en la geometría sensor-Tierra, y la conversión de los datos a las coordenadas del mundo real (por ejemplo, la latitud y longitud) en la superficie de la Tierra.

-
- 2) **Mejoramiento de imagen:** Las mejoras se aplican con el fin de optimizar el análisis digital, además de proporcionar herramientas visuales para resaltar aspectos importantes observables a simple vista. Se pueden aplicar realces y filtros en la imagen.
 - 3) **Transformación de la imagen:** Las transformaciones de la imagen son operaciones similares en concepto a las de mejoramiento de imagen. Sin embargo, a diferencia de las operaciones de mejoramiento de imagen que normalmente son aplicadas solo para un solo canal de datos a la vez, las transformaciones de imagen generalmente involucran el procesamiento combinado de datos de múltiples bandas espectrales. Las operaciones aritméticas (es decir, la resta, suma, multiplicación y división) se llevan a cabo para combinar y transformar las bandas originales en nuevas imágenes que muestran mejor o resaltan ciertas características en la escena.

Clasificación de imagen y análisis: La clasificación de las imágenes implica el uso de un conjunto de reglas para decidir si los diferentes píxeles de una imagen tienen características similares. Estas reglas dividen el espacio total de los datos en subconjuntos separados llamados fronteras de decisión. Todos los píxeles que se encuentran dentro de un volumen rodeado por fronteras de decisión son entonces etiquetados como pertenecientes a una sola clase (Elachi and Van Zyl 2006). Cuando se habla de clases, tenemos que distinguir entre las clases de información y las clases espectrales. Las clases de información son las categorías de interés que el analista está en realidad tratando de identificar en las imágenes, tales como diferentes tipos de cultivos, los diferentes tipos de bosques o las especies de árboles, diferentes unidades geológicas o tipos de roca, etc. Las clases espectrales son los grupos de píxeles que son uniformes (o muy similares) con respecto a sus valores de brillo en los diferentes canales espectrales de los datos. Los dos enfoques principales que se utilizan en la clasificación de las imágenes son: **clasificación supervisada** y **no supervisada**.

En la **clasificación supervisada** el analista identifica en las imágenes muestras representativas homogéneas de los diferentes tipos de cubierta/superficie (clases de información) de interés. Estas muestras se denominan zonas de entrenamiento. Las zonas de entrenamiento sirven para establecer las relaciones entre las clases de interés y los datos espectrales de la imagen. Para identificar y delinear lugares candidatos, el analista comúnmente tendrá que depender de fuentes de datos auxiliares, tales como fotografía aérea, datos SIG existentes, o visitas de campo. Primero, el número de zonas de entrenamiento debe ser al menos tres veces el número de clases de interés. La zona de entrenamiento debe ser seleccionada para representar la distribución espectral de cada clase de interés tan detalladamente como sea posible, y debe ser distribuida aleatoria o sistemáticamente en toda el área de la imagen. Finalmente, cada zona de entrenamiento debe ser tan homogénea como sea posible, lo que significa que el grupo de píxeles en una zona de entrenamiento debe tener valores espectrales similares (Khorram, Koch, Van Der Wiele and Nelson 2012). En resumen, en una clasificación supervisada primero se identifica las clases de información que luego son utilizadas para

determinar las clases espectrales que las representan.

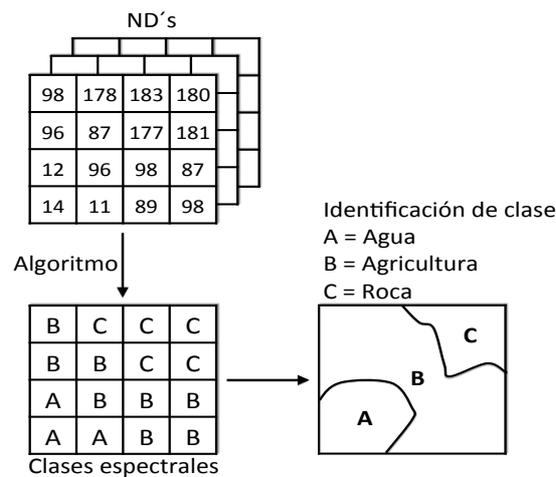


Figura 7. Proceso de clasificación supervisada . Basado en (Khorram, Koch, Van Der Wiele and Nelson 2012)

La **clasificación no supervisada** es un método en el que el software de interpretación de imagen separa los píxeles de una imagen con base a sus valores de reflectancia en clases o grupos. Una vez completado este proceso, el analista de imagen determina el tipo de cubierta para cada clase basada en la interpretación de imágenes, mapas, informes de campo, etc. y asigna a cada clase una categoría específica. En esencia, se invierte el proceso de la clasificación supervisada. Las clases espectrales son agrupadas primero, basadas únicamente en la información numérica de los datos, y son luego igualadas por el analista a clases de información (si es posible). Para determinar las agrupaciones o estructuras naturales de los datos se utilizan algoritmos de agrupamiento. Generalmente, el analista especifica cuántos grupos o familias son buscados en los datos. El resultado final de este proceso iterativo de agrupación puede resultar en algunas familias que el analista desee combinar posteriormente, o por el contrario, separar. Ambas situaciones requerirán aplicar el algoritmo con mayor profundidad. Así, la clasificación no supervisada no se lleva a cabo completamente sin intervención humana. Sin embargo, no se inicia con un conjunto predeterminado de clases como en una clasificación supervisada.

2.4 Realce y filtrado de la imagen

Para facilitar y mejorar el análisis visual de una imagen existen distintas técnicas que aprovechan la flexibilidad de la fotografía digital para realzar y retocar imágenes, así como la gran capacidad de procesamiento y velocidad de los equipos de cómputo utilizados en la actualidad. De esta forma, se busca que sean más evidentes los rasgos de interés que pueda presentar una imagen satelital.

Existen técnicas no destructivas de la imagen (como las composiciones que se tratan más adelante y el ajuste de contraste) cuyo propósito es mejorar la apariencia global de la imagen; y técnicas destructivas, como los distintos tipos de filtrado, la cuales pretenden mejorar aspectos localizados mediante realces espaciales. Se les llama así porque las no destructivas no alteran la imagen original, los nuevos valores de los píxeles sólo se utilizan para el despliegue; las destructivas por el contrario generan un nuevo conjunto de datos con los valores resultantes de la operación.

Ajuste de contraste

La calibración de los sensores utilizados en PR permite que puedan recibir un ámbito de valores de radiación bastante amplio sin llegar a saturarse, por lo que es normal que los ND presentes en una imagen satelital sean relativamente bajos dentro de la escala de grises que despliega la computadora a través del monitor. Es por lo anterior que generalmente las imágenes desplegadas se ven oscuras y es necesario ajustar el contraste alterando el Nivel de Gris (NG) para facilitar la visualización, debido a que el ojo humano no es capaz de distinguir con facilidad cambios sutiles en la escala de grises.

Existen varias formas de ajustar el contraste de una imagen. De manera general, el software de PR cuenta con tres tipos principales (el nombre puede variar ligeramente, pero el concepto es el mismo):

- a) **Expansión lineal automática o simple:** Es un ajuste que está en función de los niveles digitales máximo y mínimo que presente la imagen. Se pretende desplegar todos los valores de la imagen a lo largo de toda la paleta de grises. El nivel de gris en 8 bits que desplegará el software estará en función de la expresión:

$$NG = 255 \frac{ND_i - ND_{mín}}{ND_{máx} - ND_{mín}} \quad (2.1)$$

Nótese que para el ND más bajo original se le asignará el nuevo valor de negro (0), y para el ND más alto se le asignará el blanco (255), los demás ND tomarán valores intermedios dentro de la escala de grises, ya que a partir de la expresión se obtienen fracciones de la unidad para ser

multiplicadas por 255.

Muchas ocasiones esta técnica no aclara la imagen suficientemente, ya que la mayoría de los píxeles generalmente se encuentran dentro del grupo de los grises con una distribución aproximadamente normal, tendiendo hacia los valores bajos sobre todo en las primeras bandas.

b) Expansión lineal manual o con porcentaje de saturación: Tiene el mismo principio que la expansión lineal automática, sólo que los valores máximo y mínimo los decide el usuario, por lo que el programa tendrá tres criterios:

$$\text{Si } ND_{m\acute{a}x} < ND < ND_{m\acute{i}n} \quad NG = 255 \frac{ND_i - ND_{m\acute{i}n}}{ND_{m\acute{a}x} - ND_{m\acute{i}n}}$$

$$\text{Si } ND_{m\acute{a}x} < ND \quad NG = 255$$

$$\text{Si } ND_{m\acute{i}n} > ND \quad NG = 0$$

c) Ecuación del histograma: Esta técnica considera la frecuencia de los ND que se presentan en la imagen, pretendiendo desplegar la imagen con el mismo número de píxeles asignados a cada nivel digital presente en la misma, generalmente con la restricción que los píxeles que se encuentren en la misma categoría no serán divididos en más de una categoría en la imagen resultante. Es por lo anterior que la expansión del histograma no es lineal, los ND con mayor número de píxeles serán los que proporcionalmente ocupen mayor área en la imagen desplegada. El histograma resultante se “suaviza”, presentando picos menos pronunciados y el contraste aumenta en la imagen.

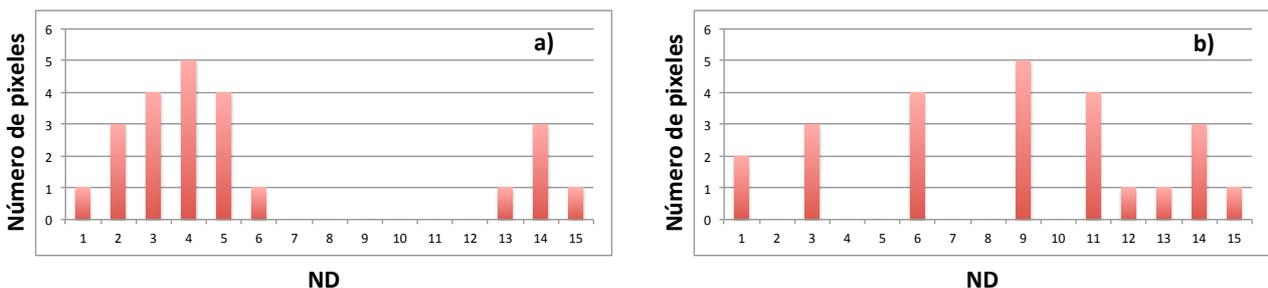


Figura 8. Ejemplo de histograma: a) original ; b) equalizado. Basado en (Richards and Jia 2006)

Filtrado de imágenes mediante convolución

Son técnicas que pretenden resaltar o suprimir cierta información espacial, se les conoce también como técnicas de realce espacial. Éstas modifican el valor original de un pixel basándose en la información que proporcionen los pixeles vecinos o circundantes. Existen dos razones principales por las que se aplica un filtro: corregir algún error durante la adquisición de la imagen o falla del sistema; y realzar características importantes de la imagen para extraer información a partir de ellas.

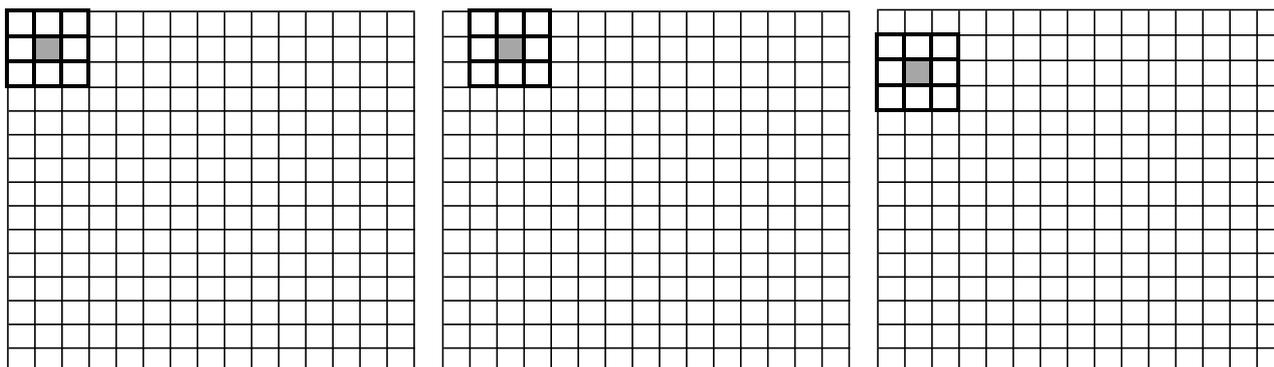


Figura 9. Matriz de filtrado móvil. El primer pixel resultante se calcula (izquierda), el siguiente pixel resultante se calcula para la misma fila (centro), y cuando la fila se completa el proceso se repite para la siguiente fila (derecha). EL pixel resultante se localiza en la coordenada del pixel sombreado en la figura. Basado en (Schowengerdt 2007).

Consiste en la aplicación a cada pixel de la imagen de una matriz de filtrado de $N \times N$ números enteros (usualmente es de 3×3 , aunque también se utilizan de 5×5 , 7×7 u otros tamaños) por lo que se genera un nuevo valor del pixel con información de los pixeles vecinos (Véase la Figura 9). Esta matriz es móvil y se aplica secuencialmente a toda la imagen, y se le conoce como Kernel. Es una operación de convolución. El resultado final se divide entre un escalar, usualmente la suma de los Coeficientes de Filtraje (CF). La ecuación que se aplica se puede expresar de forma general para un Kernel de 3×3 de la siguiente manera:

$$ND'_{i,j} = \frac{\sum_{m=-1}^1 \sum_{n=-1}^1 ND_{i+m,j+n} CF_{r+m,c+n}}{\sum_{m=-1}^1 \sum_{n=-1}^1 CF_{r+m,c+n}} \quad (2.2)$$

En donde:

$ND_{i,j}$ es el ND original del pixel i,j ;

$ND'_{i,j}$ es el ND nuevo del pixel i,j ;

CF es el Coeficiente de Filtraje;

r, c es el renglón y columna centrales de la matriz de filtrado.

Se tiene que tomar en cuenta que los bordes de la imagen no pueden procesarse, ya que la matriz de filtrado saldría fuera de la imagen. De este modo se pierden 2 filas y 2 columnas por imagen procesada.

Una imagen está formada por componentes de frecuencia que varían de bajas frecuencias a altas frecuencias. Donde prevalecen transiciones rápidas de brillo, hay altas frecuencias espaciales, mientras que transiciones de brillo que cambian lentamente representan bajas frecuencias. Las altas frecuencias en una imagen aparecen toda vez que están presentes bordes abruptos o puntos, como una transición del blanco al negro dentro de uno o dos píxeles de distancia (Aldalur and Santamaría 2002).

Filtros de paso bajo

Las imágenes pueden contener ruido aleatorio que afecta los niveles de brillantez de los píxeles, originado por la digitalización de la imagen en el sensor y la transmisión de los datos a tierra principalmente. Se observa en la imagen como una especie de punteado. Para eliminarlo, se suaviza la imagen homogeneizándola, es decir, se elimina la variabilidad asociada a los distintos tipos de cubiertas en la imagen uniformizando su respuesta.

Se utiliza principalmente para suavizar los errores aleatorios de una imagen o para reducir la variabilidad espacial de algunas categorías como paso previo a la clasificación (Vázquez 2000). Las frecuencias altas en la información (como los bordes) se perderán.

Existen varios tipos de estos filtros, entre los cuales se encuentran:

Filtro de la media: El valor del píxel central estará representado por la media de todos los píxeles de la matriz de filtrado. Ésta está formada por unos y el divisor es el número total de elementos de la misma, como se ve en la Figura 10.

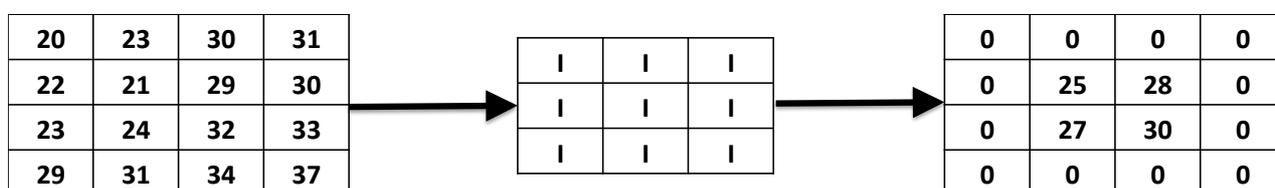


Figura 10. Filtro de media.

Filtro de la media ponderada: El valor del pixel central estará representado por la media de todos los pixeles de la matriz de filtrado, pero dando más peso a un valor, generalmente al pixel central original. Con esto se evita suavizar demasiado la imagen, como se ve en la Figura 11.

	2	

Figura 11. Filtro de media ponderada.

Filtro de la mediana: El valor del pixel central estará representado por la mediana de todos los pixeles de la matriz de filtrado (véase la Figura 12), teniendo como ventaja que los bordes no se suavizarán tanto. Además es menos sensible a valores extremos (Richards and Xiuping 2006), debido a que los picos de ruido son valores atípicos en su vecindario por lo que se excluyen al momento de ordenar los datos y se minimiza su efecto. Consume un poco más de recursos el calcularlo porque el ordenador tiene que acomodar los diferentes valores incluidos en la ventana para determinar el valor central.

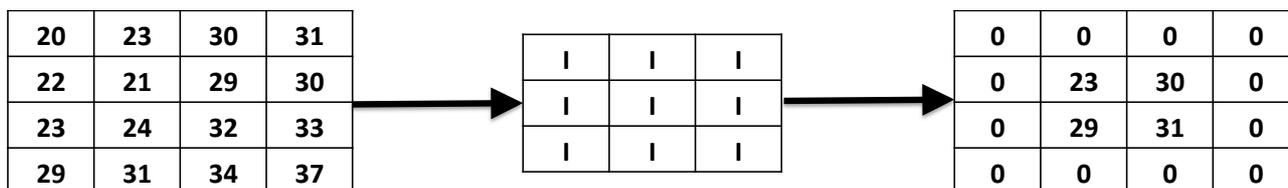


Figura 12. Filtro de mediana.

Filtros de paso alto

El realce de bordes es un medio particularmente simple y efectivo para incrementar los detalles geométricos de una imagen. Los bordes no son más que límites lineales en donde se presentan cambios bruscos en los ND. Los filtros de paso alto precisamente enfatizan los bordes al acentuar frecuencias altas y suprimir frecuencias bajas. Se distinguen principalmente:

Filtros direccionales: También son conocidos como filtros gradiente, se utilizan para detectar estructuras que siguen una determinada dirección en el espacio resaltando el contraste entre los píxeles situados a ambos lados de la estructura. Algunos ejemplos de matrices de filtrado de este tipo se pueden observar en la Figura 13.

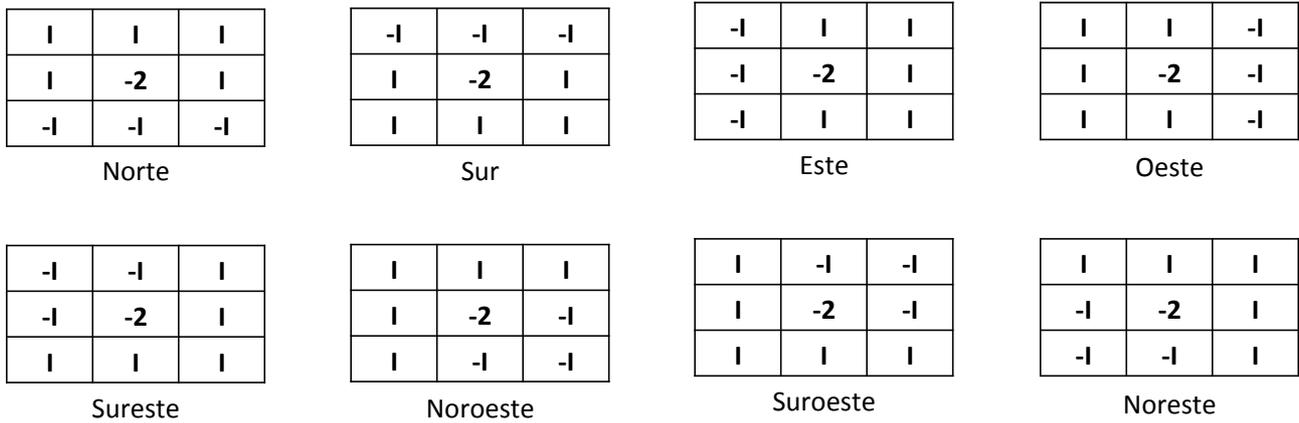


Figura 13. Distintos filtros direccionales.

Filtros laplacianos: Son omnidireccionales porque realzan características sin ninguna dirección en particular de la imagen. Esta operación está basada en la tasa de cambio de la pendiente del brillo en un núcleo de pixeles de dimensión 3 x 3. Un ejemplo de un Kernel laplaciano se puede observar en la Figura 14.

-1	-1	-1
-1	8	-1
-1	-1	-1

Figura 14. Ejemplo de filtro laplaciano

Nótese que de esta manera en las zonas en donde no haya mucha variabilidad en los valores de los ND, el valor de la operación será cercano a cero, y cuando hay frecuencias altas se maximiza la diferencia entre los pixeles vecinos.

Filtros de gradiente: Obtener el gradiente direccional o primera derivada es otra forma bastante común de detectar de forma relativamente eficaz los cambios significativos en los ND asociados a fronteras físicas en la escena como pueden ser una línea de costa o una carretera. Para datos de imágenes satelitales, no es posible obtener la derivada continua. En su lugar, puede calcularse, en el caso unidireccional, el valor de la diferencia entre dos pixeles adyacentes como derivada finita, y los mismos principios pueden extenderse para localizar fronteras con orientaciones arbitrarias en imágenes bidimensionales. En la Tabla 1 se muestran ejemplos de filtros de gradiente.

Tabla 1. Ejemplos de filtros de gradiente. Basado en (Schowengerdt 2007)

Filtro	Componente Horizontal	Componente vertical
Roberts	$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix}$
Sobel	$\begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix}$
Prewitt	$\begin{bmatrix} -1 & 1 & 1 \\ -1 & -2 & 1 \\ -1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -2 & 1 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix}$

El filtro Sobel es uno de los filtros de esta clase más efectivos para realzar bordes. Una vez aplicadas los dos Kernel que se muestran en la Tabla 1, se obtiene la magnitud mediante la expresión:

$$|R| = \sqrt{X^2 + Y^2} \quad (2.3)$$

En donde X y Y son los Kernel direccionales.

2.5 Ventajas y limitaciones de la PR

La PR, como cualquier otra técnica para estudiar los recursos de la Tierra, posee ciertas ventajas y limitaciones frente a las otras que son importantes considerar en función del estudio en el cual se quiera aplicar.

Entre las ventajas de la PR se pueden mencionar:

- 1) Visión sinóptica del medio, lo que facilita su análisis e interpretación.
- 2) Disponibilidad de información histórica y actualizada constantemente.
- 4) Versatilidad en su aplicación en distintos campos del conocimiento.
- 5) Es posible realizar ciertas mediciones sin visitar la zona en estudio.
- 5) La topografía y otros obstáculos geológicos no limitan a las plataformas aéreas o satelitales.

Algunas de las limitaciones que se tienen al utilizar esta técnica:

- 1) Resolución espacial mucho más pobre que técnicas directas.
- 2) Interferencias del medio entre el sensor y el objeto.
- 3) Alta dependencia de las condiciones climatológicas.
- 4) Sólo permite obtener información de la superficie de los cuerpos.
- 5) Requiere de cierta capacitación especializada del personal que opere los programas de PR.

Capítulo 3 Marco teórico

La energía electromagnética es el medio por el cual la información se transmite desde un objeto a un sensor. La información puede ser codificada por el contenido de frecuencia, intensidad o polarización de la onda electromagnética. La información se propaga mediante radiación electromagnética a la velocidad de la luz de la fuente directamente a través del espacio libre, o indirectamente por la reflexión y la dispersión.

La radiación electromagnética consiste en un campo eléctrico (E) que varía en magnitud en una dirección perpendicular a la dirección de propagación (véase figura 15). Además un campo magnético (H) orientado en ángulo recto al campo eléctrico se propaga en fase con el campo eléctrico.

La energía electromagnética puede ser caracterizada mediante las siguientes propiedades:

- 1) Longitud de onda:** Es la duración de un ciclo de onda, que puede ser medida como la distancia entre crestas de ondas sucesivas (Figura 16). La longitud de onda se suele representar por la letra griega lambda (λ) y suele medirse en metros (m) o algún factor de metros. En la tabla 2 se muestran las unidades más comunes para medir la longitud de onda.

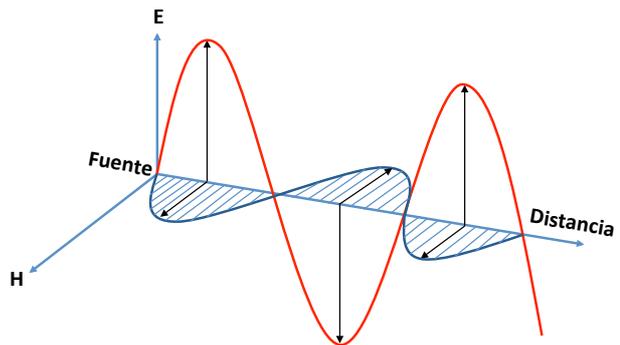


Figura 15. Diagrama radiación electromagnética

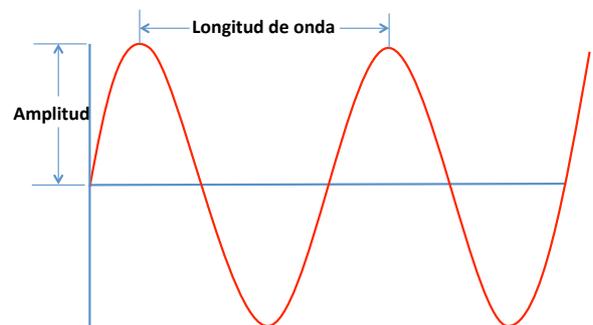


Figura 16. Longitud de onda y amplitud

Tabla 2. Unidades de Longitud de onda

Unidad	Distancia
Kilometro (Km)	1,000m
Metro (m)	1.0 m
Centímetro (cm)	0.01 m
Milímetro (mm)	0.001 m
Micrómetro (μm)	10 ⁻⁶ m
Nanómetro (nm)	10 ⁻⁹ m
Ångstrom	10 ⁻¹⁰ m

3) Frecuencia: Se refiere al número de ciclos de una onda que pasa por un punto fijo por unidad de tiempo. La frecuencia se mide normalmente en hertz (Hz), equivalente a un ciclo por segundo, y varios múltiplos de hertz. En la Tabla 3 se muestran las unidades más comunes para medir la frecuencia.

Tabla 3. Unidades de frecuencia

Unidad	Frecuencia (ciclos por segundo)
Hertz (Hz)	1
Kilohetz (KHz)	10 ³
Megahertz (MHz)	10 ⁶
Gigahertz (GHz)	10 ⁹

2) Amplitud: Es equivalente a la altura de cada pico (véase Figura 16). La amplitud generalmente es medida como niveles de energía (formalmente conocida como irradiancia espectral), expresada como watts por metro cuadrado por micrómetro.

La longitud de onda y frecuencia están relacionadas por la siguiente fórmula:

$$c = \lambda \nu \quad (3.1)$$

Donde c es la magnitud de la velocidad de la luz $c = (3 \times 10^8 \text{ m/s})$; ν es la frecuencia y λ la longitud de onda.

3.1 Espectro electromagnético

La interacción de las ondas electromagnéticas con las superficies y la atmósfera depende de forma muy importante de la frecuencia de estas ondas (Elachi and Van Zyl 2006). Lo más usual es caracterizar a las ondas electromagnéticas por su longitud de onda, por lo que ocupan una posición dentro del espectro electromagnético, como se ve en la Figura 17.

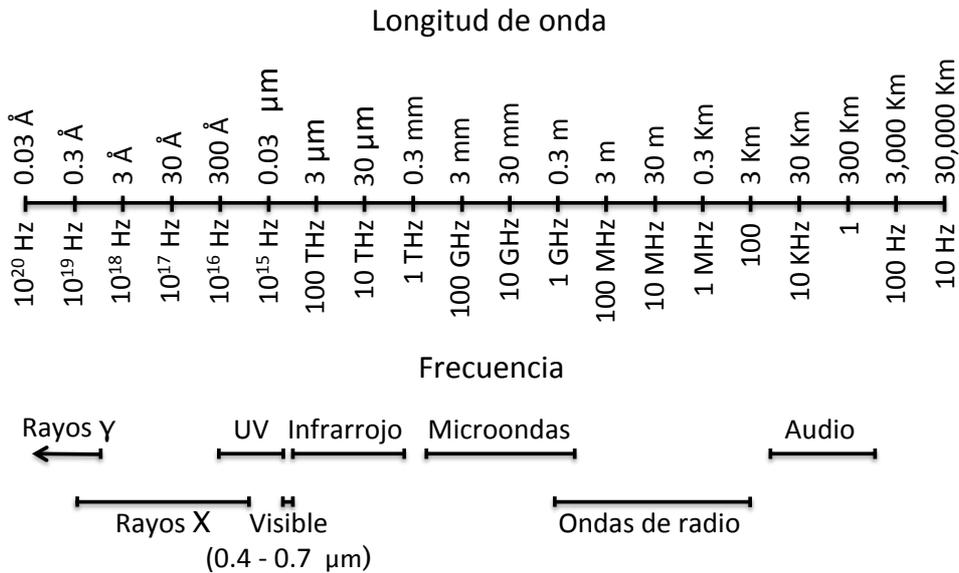


Figura 17. Espectro electromagnético. Basado en (Elachi and Van Zyl 2006)

A pesar de que se acostumbra nombrar a las distintas regiones del espectro, no existen divisiones exactas entre cada una. De hecho, las divisiones han surgido más bien como consecuencia de los diferentes métodos y medios para detectar cada tipo de radiación (Ruiz 2002). Las regiones del espectro electromagnético más comúnmente usadas en PR se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4. Principales bandas del espectro electromagnético usadas en PR. Tomado de (Vázquez 2000)

Nombre de la banda	Características principales
Visible	0.4 μm – 0.7 μm Única radiación electromagnética percibida por nuestros ojos, la radiación solar es máxima en esta banda Azul 0.4 a 0.5 μm Verde 0.5 a 0.6 μm Rojo 0.6 a 0.7 μm
Infrarrojo Próximo	0.7 μm – 1.3 μm Detectado a partir de películas dotadas de emulsiones especiales Permite discriminar masas vegetales y concentraciones de humedad
Infrarrojo Medio	1.3 μm – 8 μm Se entremezclan los procesos de reflexión de la luz solar y de emisión de la superficie terrestre
Infrarrojo Lejano o Térmico	8 μm – 14 μm Incluye porción emisiva del espectro terrestre
Microondas	0.1 cm -20 cm Energía muy transparente a la cubierta de las nubes

Las porciones del espectro electromagnético que se usan en la percepción remota están caracterizadas por valores continuos con magnitudes que difieren en muchas potencias de 10, por lo que es común encontrar representaciones logarítmicas del mismo. La franja o porción visible (VIS) es una pequeña región que abarca desde 0.4 μm hasta 0.7 μm . El color azul se encuentra dentro del ámbito de 0.4 a 0.5 μm , el verde de 0.5 a 0.6 μm y el rojo de 0.6 a 0.7 μm . La porción correspondiente a la energía UV se encuentra inmediatamente por debajo del color azul. Por encima del rojo se encuentra la región infrarroja (IR), dividida en tres categorías: IR próximo o cercano (0.7 a 0.13 μm), IR medio (1.3 a 3 μm) e IR térmico (3 a 100 μm). La porción de microondas se encuentra ubicada en longitudes más grandes que van desde 1 mm hasta 1 m.

3.2 Interacción de la radiación con la atmósfera

Antes de que la radiación utilizada para la percepción remota alcance la superficie de la Tierra, esta ha viajado a través de la atmósfera. Partículas y gases en la atmósfera pueden afectar el ingreso de luz y radiación. Estos efectos son provocados por los mecanismos de **dispersión** y **absorción**.

Dispersión: Ocurre cuando las partículas o la cantidad de moléculas de gas presentes en la atmósfera interactúan con ella y causan que la radiación electromagnética se desvíe de su camino original. La cantidad de dispersión que tiene lugar depende de muchos factores incluyendo la longitud de onda de la radiación, la cantidad de partículas o gases y la distancia que la radiación viaja a través de la atmósfera. Existen tres tipos de dispersión:

- 1) **Dispersión de Rayleigh:** Es común cuando la radiación interactúa con las moléculas atmosféricas y otras pequeñas partículas que son mucho más pequeñas en diámetro que la longitud de onda de la interacción de la radiación. Así que hay una tendencia mucho más fuerte para longitudes de onda corta de ser dispersada por este mecanismo que las longitudes de onda larga.
- 2) **Dispersión de Mie:** Ocurre cuando los diámetros de las partículas atmosféricas básicamente son iguales a la longitud de onda de la energía que puede ser percibida. El vapor de agua y polvo son las principales causas de la dispersión de Mie. Este tipo de dispersión tiende a influir en las longitudes de onda largas comparado con la dispersión de Rayleigh.
- 3) **Dispersión no selectiva:** Sucede cuando los diámetros de las partículas causantes de la dispersión son mucho más grandes que la longitud de onda de la energía que puede ser percibida. Consecuentemente, esta dispersión es “no selectiva” con respecto a la longitud de onda.

Absorción: Es el otro principal mecanismo de trabajo cuando la radiación electromagnética interactúa con la atmósfera. En contraste con la dispersión, este fenómeno provoca que las moléculas en la atmósfera absorban energía en diferentes longitudes de onda. Ozono, dióxido de carbono y vapor de agua son las tres principales componentes atmosféricas que absorben radiación.

3.3 Interacción radiación-objeto

La radiación que no es absorbida o dispersada en la atmósfera puede llegar e interactuar con la superficie terrestre. Existen tres formas de interacción que pueden tener lugar cuando la energía incide sobre la superficie. Estas son: **absorción**, **transmisión** y **reflexión**. La energía total incidente interactuará con la superficie en una o más de estas formas. Las dimensiones de cada una dependerá de la longitud de onda, el material y su condición.

La **absorción** ocurre cuando la radiación (energía) es absorbida por el objeto mientras que la **transmisión** se produce cuando la radiación pasa a través de un objeto. La **reflexión** se produce cuando la radiación "rebota" en el objeto y es redirigida. En percepción remota es muy importante medir la radiación reflejada por los objetos. Los dos tipos de reflexión que representan los extremos finales de la forma en que la energía es reflejada por el objeto son: **reflexión especular** y **reflexión difusa**.

Cuando una superficie es lisa se produce reflexión especular donde toda la energía es dirigida lejos de la superficie en una sola dirección. La reflexión difusa se produce cuando la superficie es rugosa y la energía es reflejada casi uniformemente en todas direcciones.

3.4 Firma espectral

Muchas de las superficies de la Tierra manifiestan características de reflectancia espectral y/o emitancia espectral muy distintivas, estas características resultan en patrones de respuesta espectrales mejor conocidos como **firmas espectrales**.

El término "firma" tiende a emplear un patrón que es absoluto y único. Esto no es el caso con patrones espectrales observados en el mundo natural. Los patrones de respuesta espectral medidos mediante sensores remotos pueden ser cuantitativos pero no son absolutos. Éstos pueden ser distintivos pero no necesariamente únicos. Se debe tener en cuenta la variabilidad de las firmas espectrales. Esta variabilidad puede causar problemas en el análisis de datos de PR si el objetivo es identificar espectralmente varios rasgos en la superficie terrestre. Sin embargo, si el objetivo de un análisis es identificar la condición de varios objetos del mismo tipo, se puede confiar en la variabilidad de patrones de respuesta espectral para procesar esta información. Esto está relacionado a tales aplicaciones como la identificación de vegetación saludable contra vegetación estresada de una cierta especie.

En la Figura 18 se muestran algunas firmas espectrales de las superficies terrestres más comunes. Para la curva del agua se aprecia que en las regiones en donde más refleja es en la del azul y la del verde, aunque el porcentaje de reflectancia es escaso (no más del 10%). Fuera del visible, no refleja, y en el infrarrojo su absorbancia asciende rápidamente, por lo que al observar cuerpos de agua en bandas que correspondan a esta región pueden ser identificados fácilmente ya que se aprecian con niveles digitales muy bajos (siempre y cuando el agua no presente concentraciones significativas de algún contaminante que altere su firma espectral).

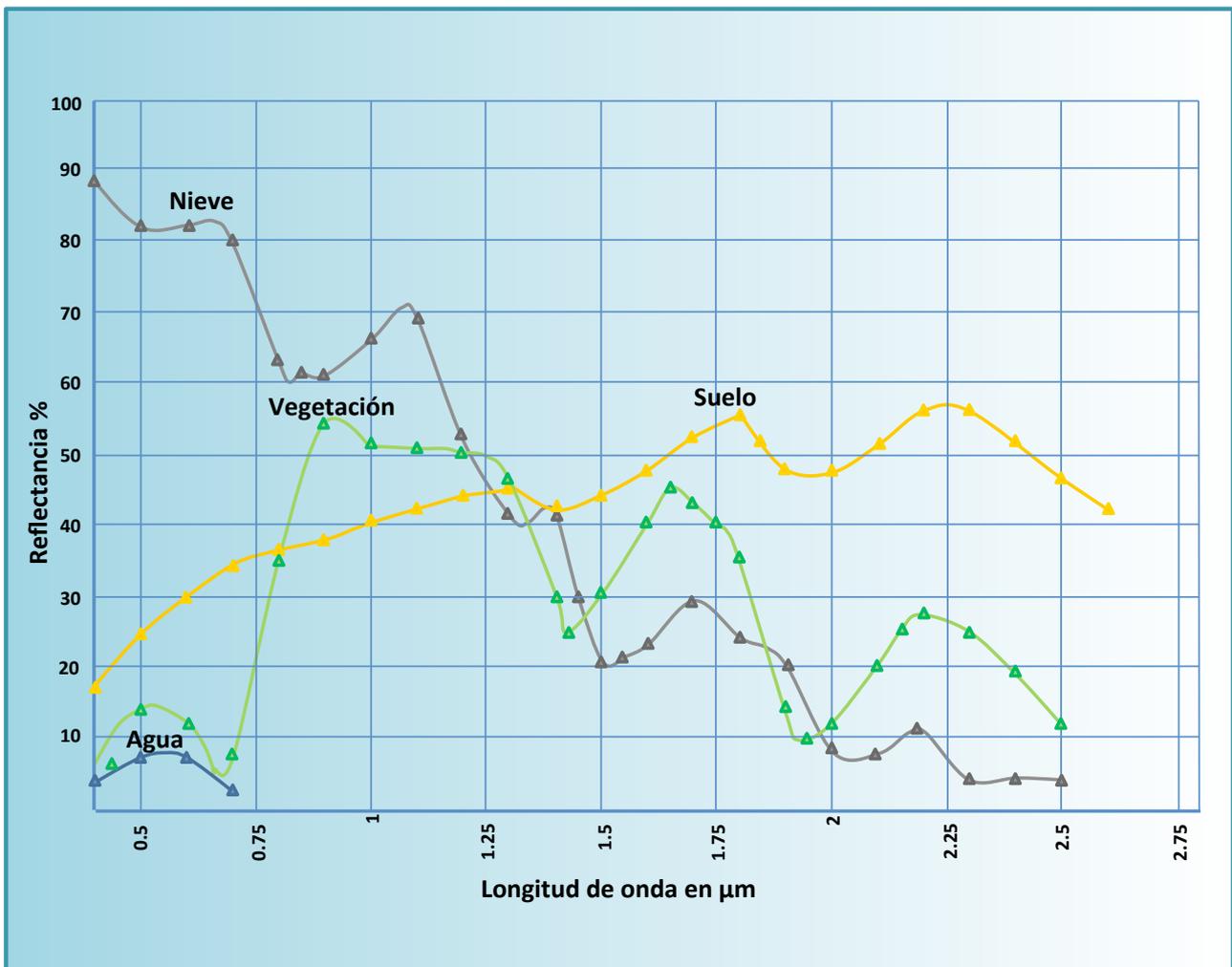


Figura 18. Curvas espectrales de agua, vegetación, suelo y nieve. Basado en (Vázquez 2000)

Por el contrario, en la firma espectral del suelo se observa que incrementa su reflectancia después del visible, presentando a sus máximos en las longitudes de onda aproximadas de 1.8 μm y 2.25 μm.

Para el caso de la curva de la vegetación sana se aprecia su máxima reflectancia en la longitud de onda aproximada de 0.95 μm (en el infrarrojo cercano) en donde alcanza más del 50%. En el visible, especialmente en el rojo y azul, su reflectancia es relativamente baja (un gran porcentaje de la energía es absorbida para realizar el proceso fotosintético). En el verde se incrementa y es por eso que la apreciamos de ese color.

Capítulo 4 Metodología

En este trabajo se empleó la metodología necesaria para la evaluación de algunos impactos causados al ambiente por las presas Peñitas y Huites mediante el uso de la PR. Luego del pre-procesamiento y procesamiento de las imágenes satelitales adquiridas de la plataforma Landsat 5 se extrajo información útil de cada una de ellas para realizar análisis multitemporales. Al aplicar este procedimiento se obtuvo información que de otro modo sería difícil de reunir.

4.1 Sitios de estudio

Para este trabajo se seleccionaron dos sitios de estudio: 1) Presa Peñitas y 2) Presa Huites para su análisis mediante el uso de técnicas de PR.

Presa Peñitas

La presa Peñitas, llamada formalmente Presa Ángel Albino Corzo, está ubicada en el cauce del Río Grijalva en el municipio de Ostucán, Chiapas (véase Figura 19) . Esta obra forma parte de un sistema de cuatro plantas hidroeléctricas cuyo orden cronológico se muestra a continuación:



Peñitas cuenta con una cortina de materiales graduados de 58 metros de altura que inició su construcción en 1980. Paralelamente al avance de la cortina se excavó un canal de desvío, en la parte inferior de la obra de excedencias, de tal forma que el río fue desviado en octubre de 1983 permitiendo concluir la construcción de la cortina en junio de 1986. En julio del mismo año se realizaron las maniobras para la obturación definitiva del canal de desvío iniciándose el llenado de la presa. Peñitas inició formalmente sus operaciones en septiembre de 1987.

El clima de Ostucán está clasificado como Cálido húmedo con lluvias todo el año, o Af(m), lo cual conlleva a que las temperaturas medias anuales que se registran en la mayor parte de su territorio sea de 24 a 26 °C, excepto de un pequeño sector del noreste del territorio en que los registros varían entre 20 y 24 °C; la precipitación promedio anual de la gran mayoría del territorio es de 4,000 a 3,000 mm, uno de los más altos del país, aunque un sector del este del municipio registra aún más, entre 4,500 y 4,000 mm al año.

La flora de Ostucán se divide principalmente entre sectores de pastizal y sectores de selva alta, además de sectores dedicados a la agricultura.

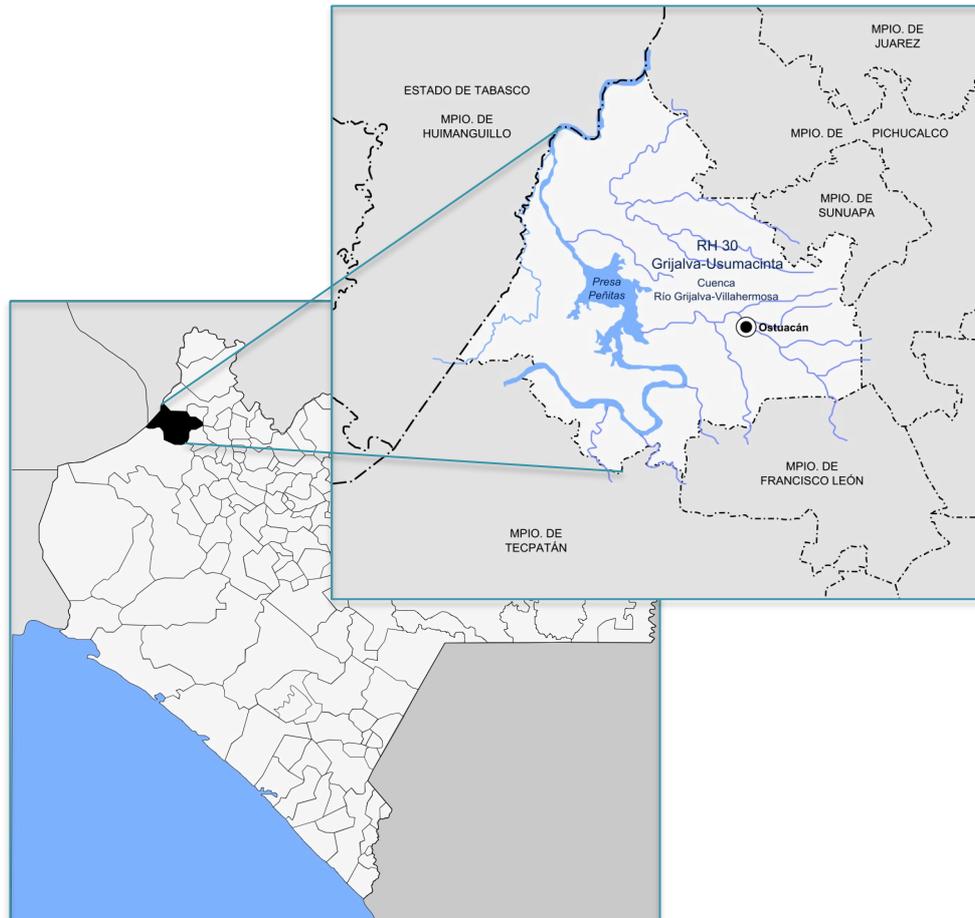


Figura 19. Localización Presa Peñitas

Presa Huites

La presa Huites, oficialmente presa Luis Donald Colosio, es una presa mexicana ubicada en el cauce del río Fuerte en Choix, Sinaloa (véase Figura 20), cuya construcción inició en abril de 1992 y entró en operación el 15 de septiembre de 1996.

La presa consta de una cortina de concreto convencional, de sección gravedad, con 165 m de altura y 444 m de longitud de corona y tiene una capacidad útil de 2400 Hm³.

El municipio de Choix tiene, hacia el noroeste y el este algunas regiones con clima templado cálido; en el norte del municipio el clima es semiseco-cálido, con lluvias en verano y escasamente a lo largo del año; hacia el sur y occidente predomina el clima cálido subhúmedo, con lluvias en verano y algunas regiones con clima semicálido sub-húmedo, con lluvias en verano. La temperatura media anual del municipio es de 25° C, con una máxima de 47° C y una mínima de 1.5° C y una precipitación promedio anual de 784 milímetros; la temporada de lluvias transcurre entre los meses de julio y octubre.

La mayor parte de la superficie municipal está cubierta de selva baja caducifolia. Existen también algunas zonas de pastizal cultivado y pastizal inducido, así como zonas boscosas y

encino en el oriente del territorio.

Entre la fauna que se encuentra en el municipio, destacan las siguientes especies conejo, liebre, coyote, zorra, tejón, armadillo, chachalaca, pato, paloma, guajolote silvestre, gato montés y venado.

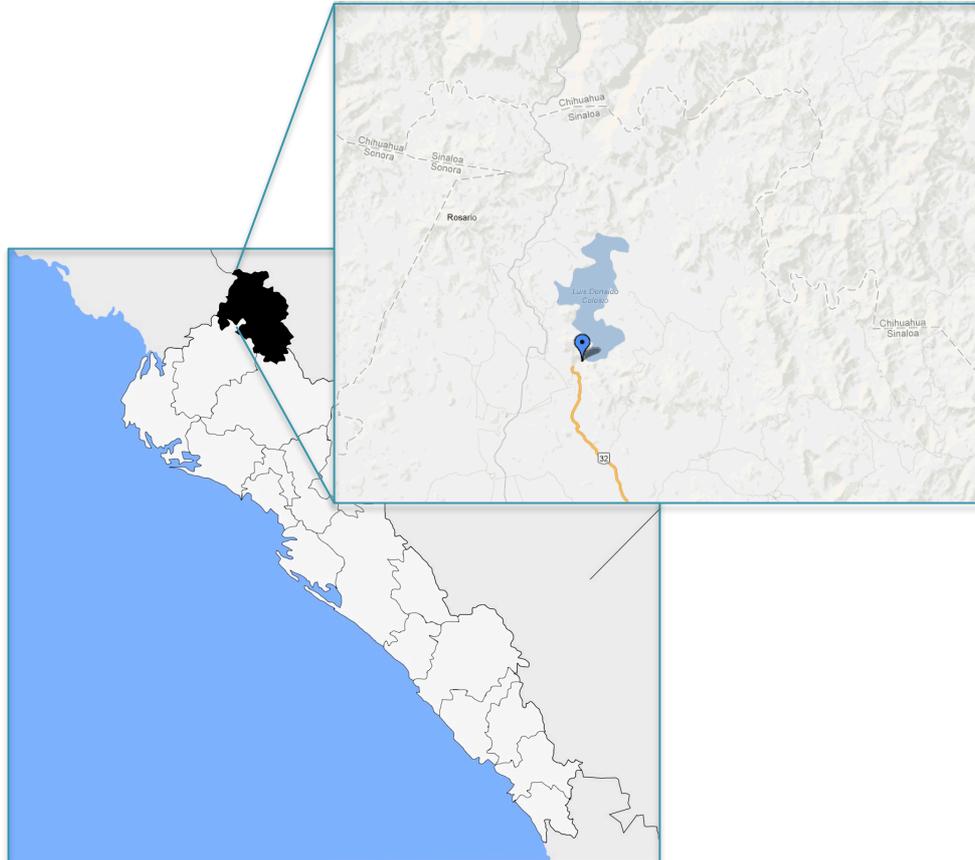


Figura 20. Localización Presa Huites

4.2 Plataforma seleccionada

Para este estudio se seleccionó la plataforma Landsat 5, debido principalmente a su resolución espectral y la accesibilidad para adquirir las imágenes. Las características más importantes se resumen en la Tabla 5.

El Landsat 5 es el satélite operacional puesto en órbita el 1° de marzo de 1984 portando los sensores MSS y TM y cuya operación depende de la NASA. La producción y comercialización de imágenes depende de la USGS (United States Geological Survey). Cada imagen adquirida está compuesta por 7 bandas espectrales en distintos ámbitos del espectro electromagnético y cubre un área igual a 185 x 185 Km por escena.

El Landsat 5 es capaz de adquirir imágenes en un área que se extiende desde los 81° de latitud norte hasta los 81° de latitud sur en todas las longitudes del globo terrestre. Completa cada órbita en aproximadamente 98.9 minutos, permitiendo al satélite dar 14 vueltas a la Tierra diariamente, y cubrir la totalidad del planeta en 16 días. La órbita es descendente, o sea de norte a sur, el satélite cruza la línea del Ecuador a las 9:45 am (hora local) en cada pasaje. Tiene una órbita heliosíncrona, es decir, siempre pasa a la misma hora por un determinado lugar.

Tabla 5. Características principales de la plataforma Landsat 5

LANDSAT 4-5		
Fecha de lanzamiento y término de operación	4: 16/07/1982 - 02/1983 5: 01/03/1984 - ¿?	
Sensor	MSS (Multi Spectral Sensor) TM (Thematic Mapper)	
Orbita	710 km, polar, sincronización solar	
Tamaño de escena	185 x 185 km	
Tiempo de regreso	16 días	
Ámbito Dinámico	8 bits	
Resolución espacial	30 m (canal 6 TM: 120m)	
Resolución espectral MSS	4	0.5-0.6 μm
	5	0.6-0.7 μm
	6	0.7-0.8 μm
	7	0.8-1.10 μm
Resolución espectral TM	1 (Azul)	0.45-0.52 μm
	2 (Verde)	0.52-0.60 μm
	3 (Rojo)	0.63-0.69 μm
	4 (IR próximo)	0.76-0.90 μm
	5 (IR lejano)	1.55-1.75 μm
	6 (Térmico lejano)	10.4-12.5 μm
	7 (Térmico próximo)	2.08-2.35 μm

4.3 Adquisición de las imágenes

La calidad de las imágenes debe de ser alta, lo más libre de nubosidad posible y de preferencia en el verano (Olmanson 2002).

Las imágenes LANDSAT se pueden adquirir directa y gratuitamente del servidor de la USGS (United States Geological Survey), a través de la aplicación Java USGS Global Visualization Viewer (Visualizador Global de la USGS), alojada en la dirección electrónica <http://glovis.usgs.gov/>, que permite seleccionar la región de interés y visualizar las imágenes disponibles para descarga.

4.4 Pre-procesamiento y procesamiento de las imágenes mediante software especializado

Para este trabajo se empleó el software IDRISI Selva, un programa de percepción remota ampliamente utilizado con funciones adecuadas para este trabajo de investigación.

Se adquirieron diversas imágenes de las zonas de estudio y posteriormente se realizaron recortes de las imágenes para procesar menos información y facilitar los cálculos al programa, además de evitar el marco de las imágenes raster completas (Figura 21 y Figura 22).

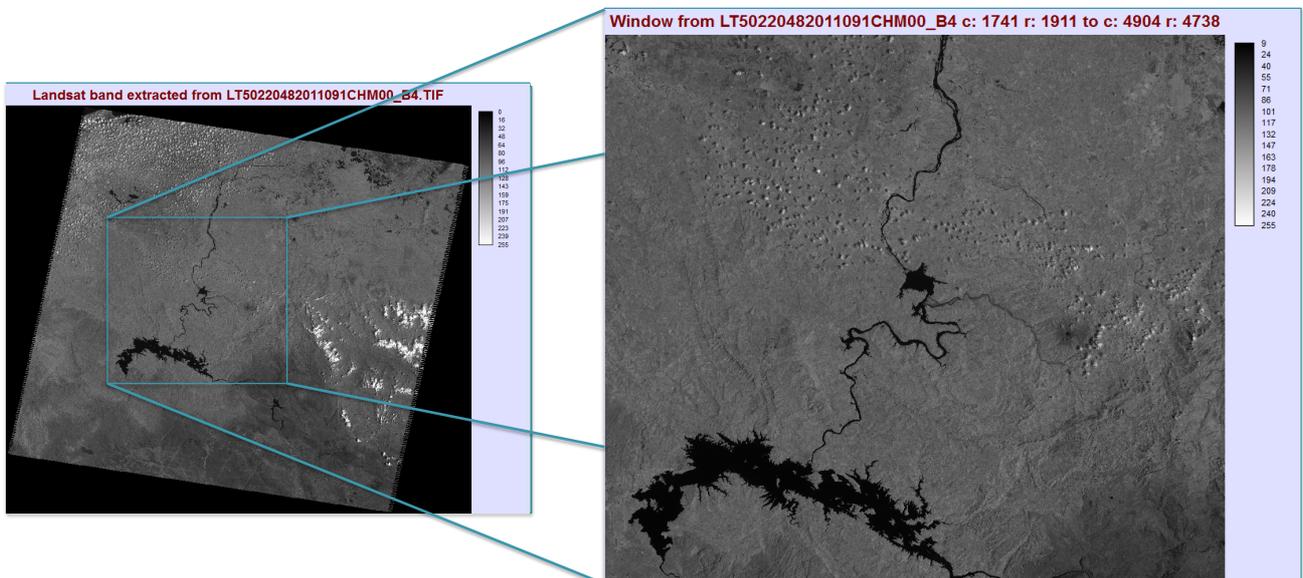


Figura 21. Creación de ventanas para acotar el área de estudio (Presa Peñitas)

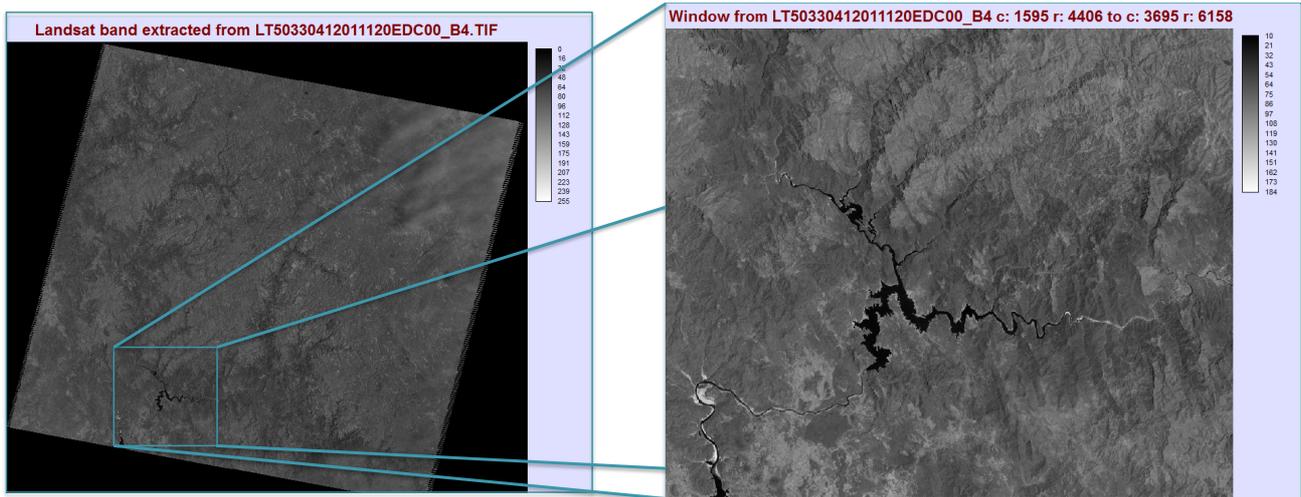


Figura 22. Creación de ventanas para acotar el área de estudio (Presa Huites)

Posteriormente se desplegó el histograma de cada imagen con ayuda del comando HISTO, el cual muestra gráficamente la frecuencia (número de celdas) que contienen los distintos valores que posee la imagen, es decir, en el eje X están los posibles valores mientras que en el eje Y están las cantidades de celdas que poseen cada uno de esos valores. El histograma puede ser desplegado tanto en forma gráfica como en forma numérica. Ambas formas entregan varios datos estadísticos y la última de ellas entrega información adicional de porcentaje de celdas con un determinado valor respecto del total de las que tiene la imagen, además de acumulación de porcentaje y de frecuencia. Una vez desplegados los histogramas se determinaron los Niveles Digitales mínimos en cada banda (Tabla 6 y Tabla 7) para restarlos y así realizar la **corrección atmosférica**. A continuación se muestran de la Figura 23 a la Figura 28 los histogramas referentes a las imágenes de la presa Peñitas de las bandas 1 a la 7 respectivamente y de la Figura 29 a la Figura 34 los histogramas referentes a las imágenes de la presa Huites de las bandas 1 a la 7 respectivamente. Las imágenes se despliegan con una paleta de escala de grises (256).

Tabla 6. Niveles Digitales mínimos
Por banda Peñitas 2011

Valor mínimo banda 1	51
Valor mínimo banda 2	20
Valor mínimo banda 3	15
Valor mínimo banda 4	9
Valor mínimo banda 5	3
Valor mínimo banda 7	1

Tabla 7. Niveles Digitales mínimos
Por banda Huites 2011

Valor mínimo banda 1	51
Valor mínimo banda 2	18
Valor mínimo banda 3	16
Valor mínimo banda 4	11
Valor mínimo banda 5	8
Valor mínimo banda 7	4

Window from LT50220482011091CHM00_B1 c: 1741 r: 1911 to c: 4904 r: 4738

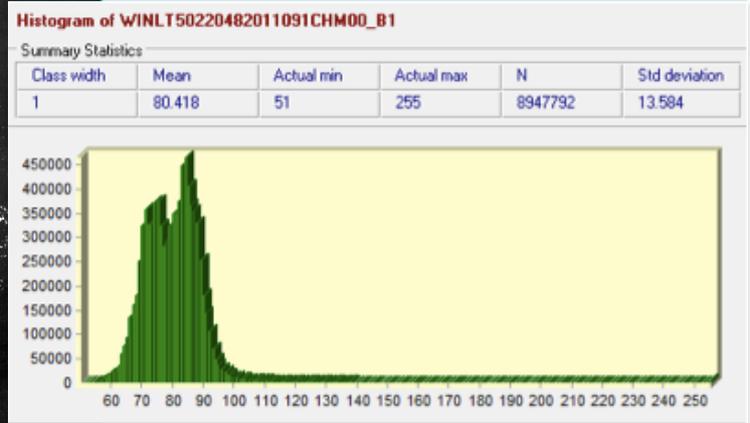
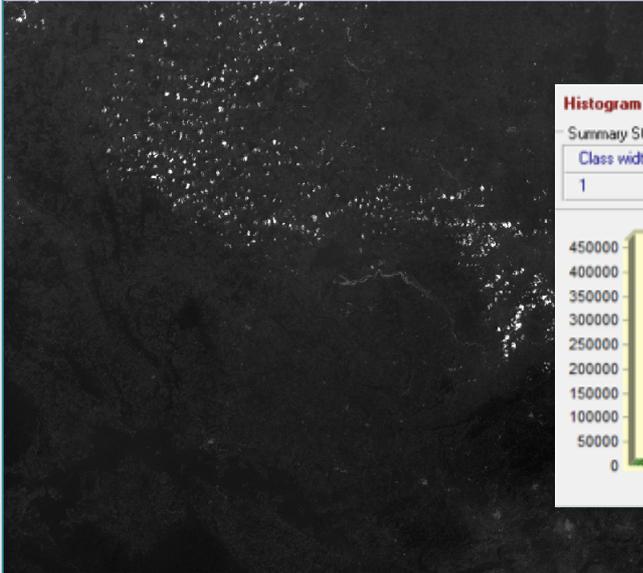


Figura 23. Histograma de la banda 1 Peñitas 2011

Window from LT50220482011091CHM00_B2 c: 1741 r: 1911 to c: 4904 r: 4738

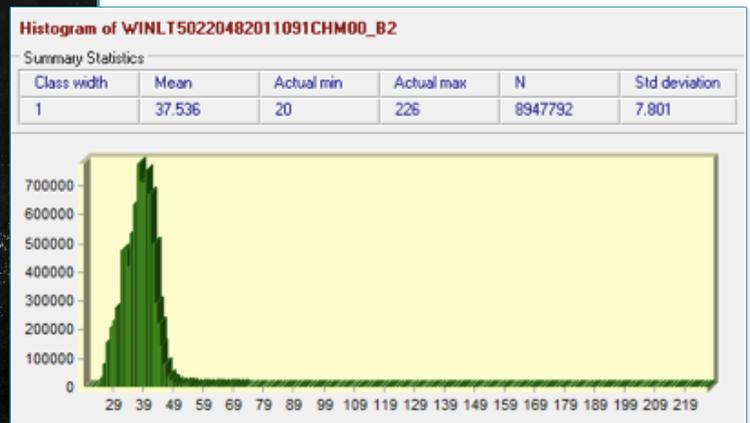
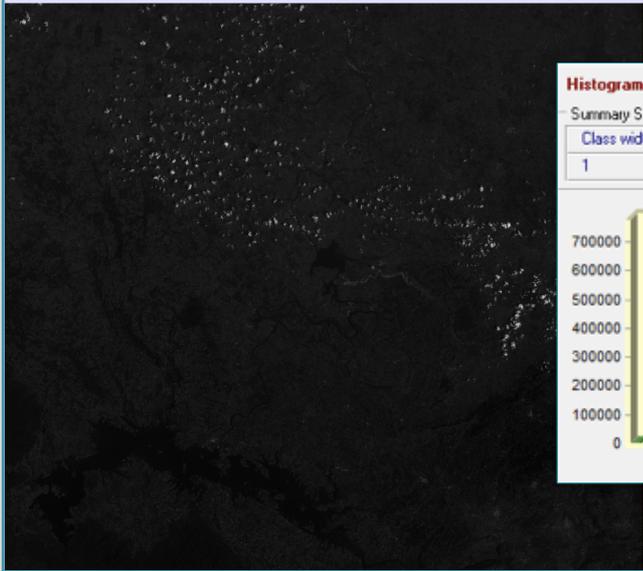


Figura 24. Histograma de la banda 2 Peñitas 2011

Window from LT50220482011091CHM00_B3 c: 1741 r: 1911 to c: 4904 r: 4738

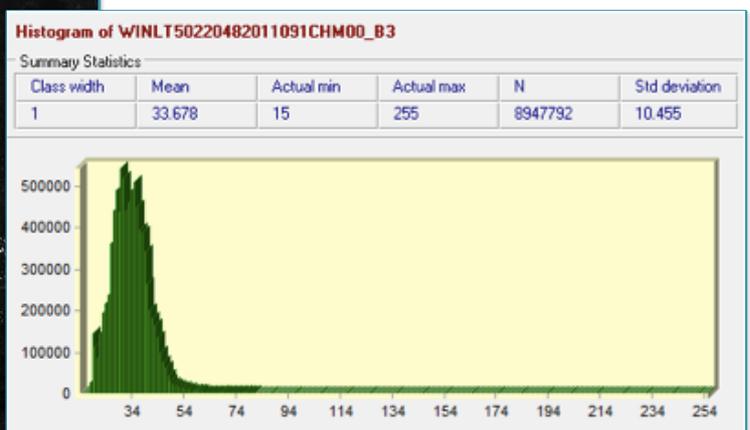
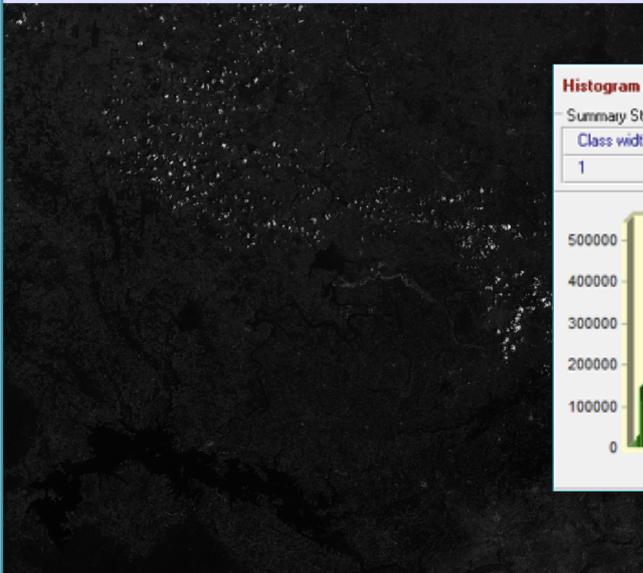


Figura 25. Histograma de la banda 3 Peñitas 2011

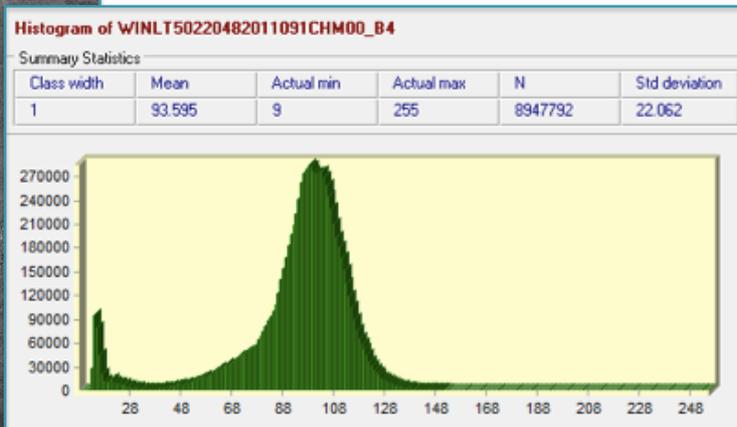
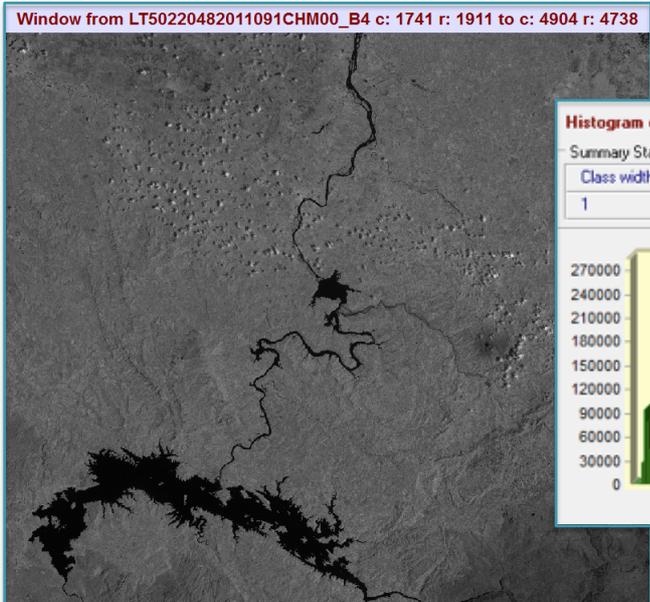


Figura 26. Histograma de la banda 4 Peñitas 2011

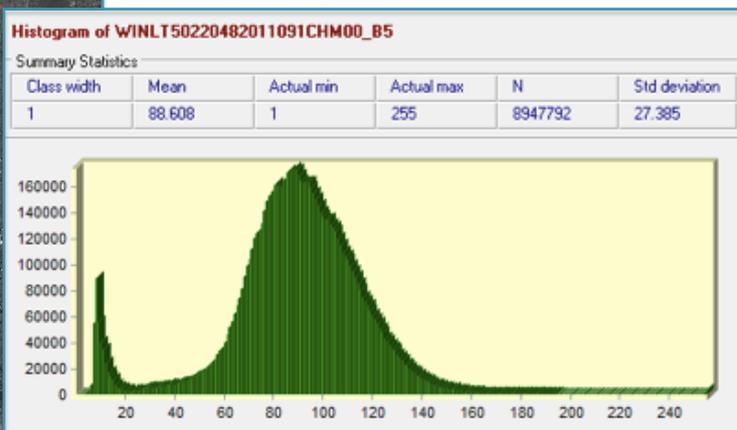
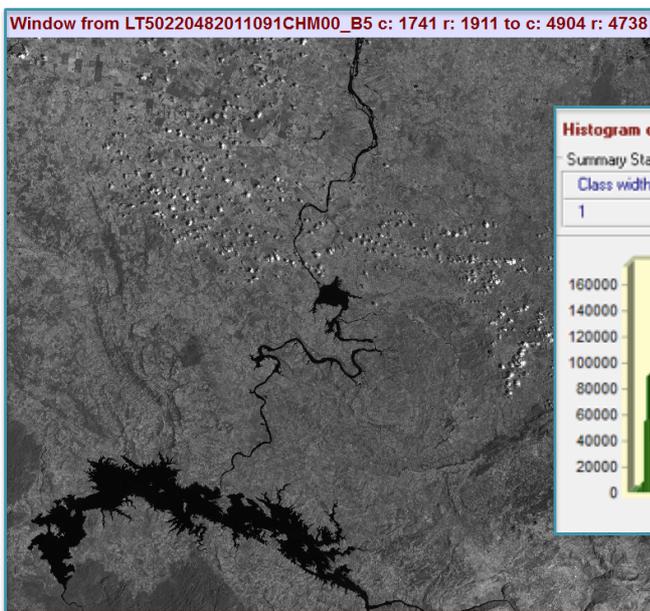


Figura 27. Histograma de la banda 5 Peñitas 2011

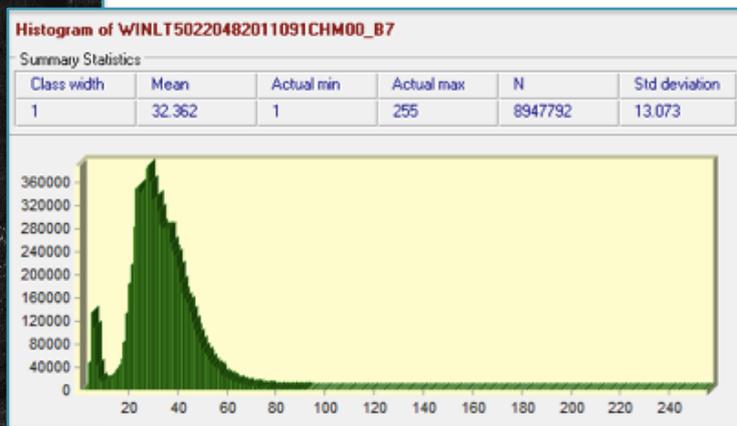
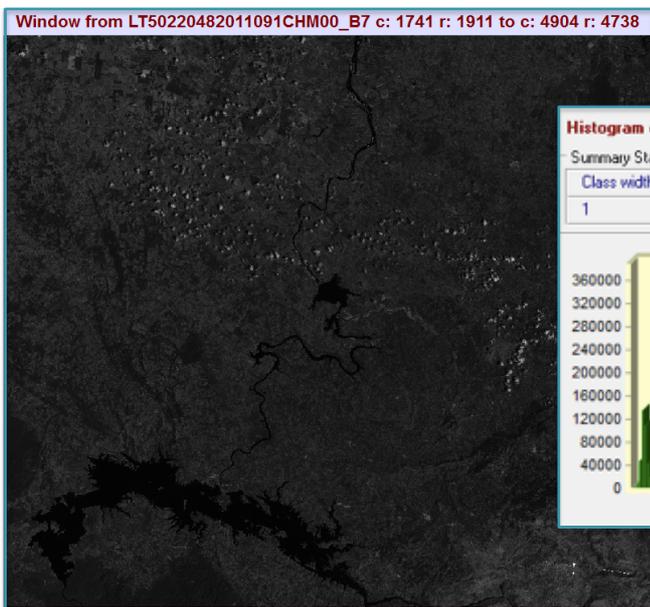


Figura 28. Histograma de la banda 7 Peñitas 2011

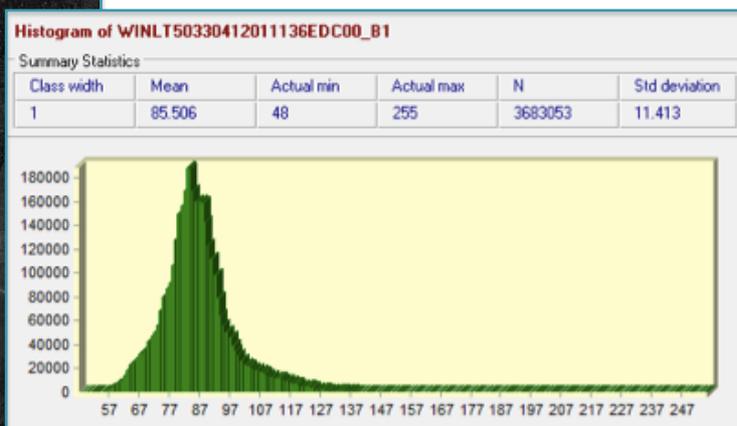
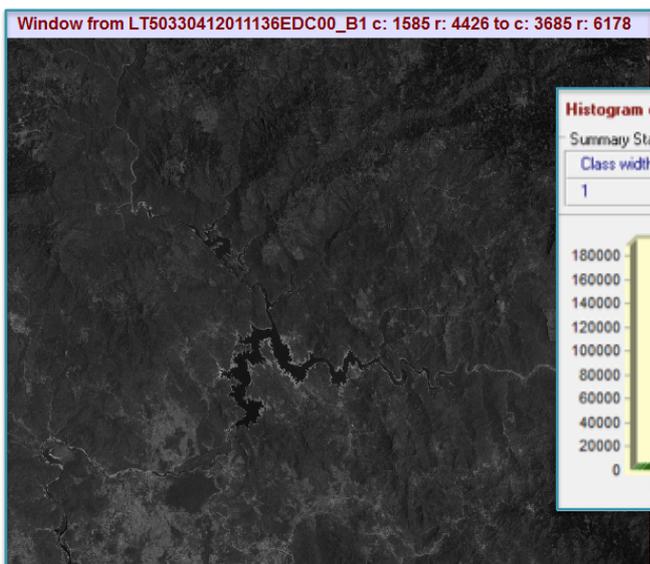


Figura 29. Histograma de la banda 1 Huites 2011

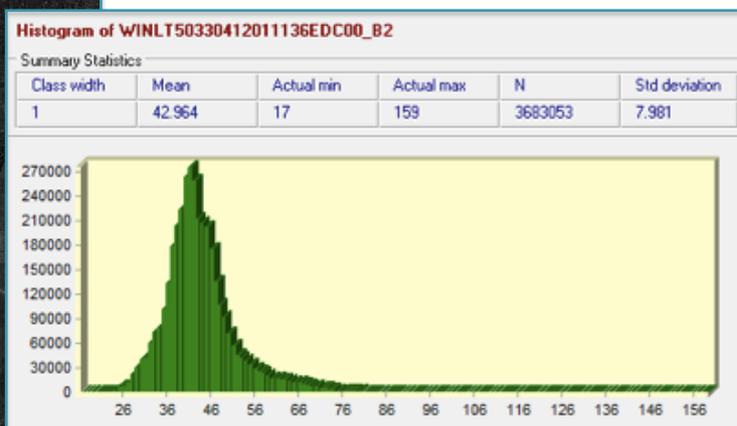
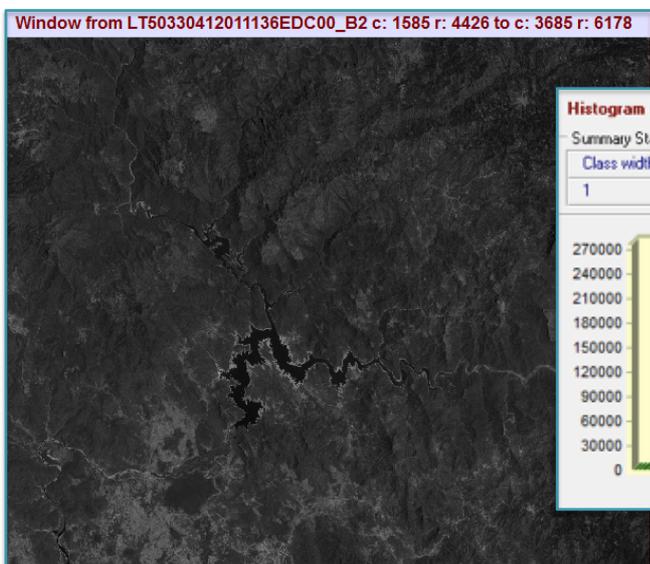


Figura 30. Histograma de la banda 2 Huites 2011

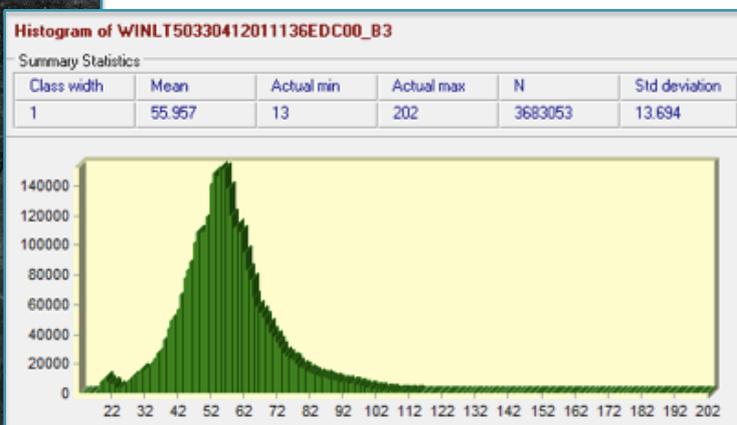
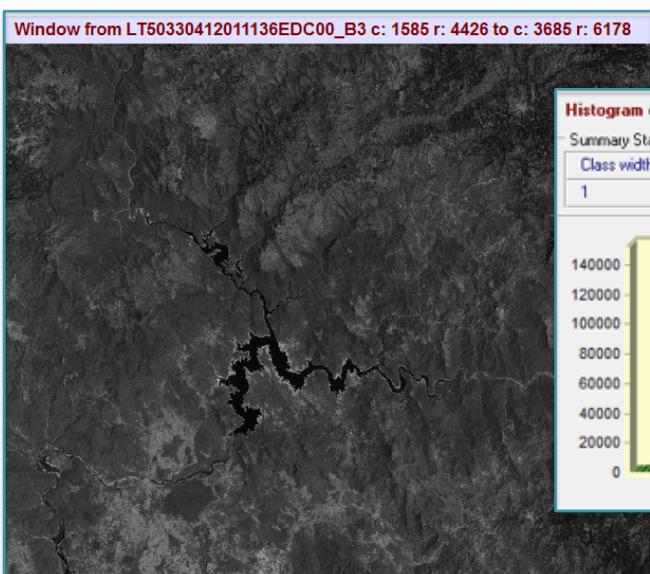


Figura 31. Histograma de la banda 3 Huites 2011

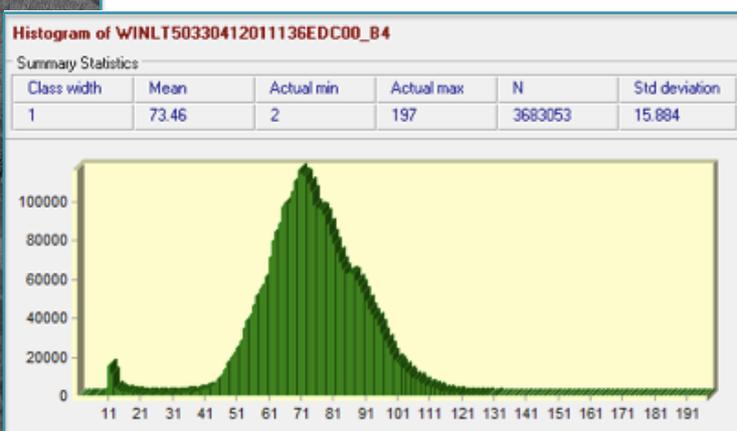
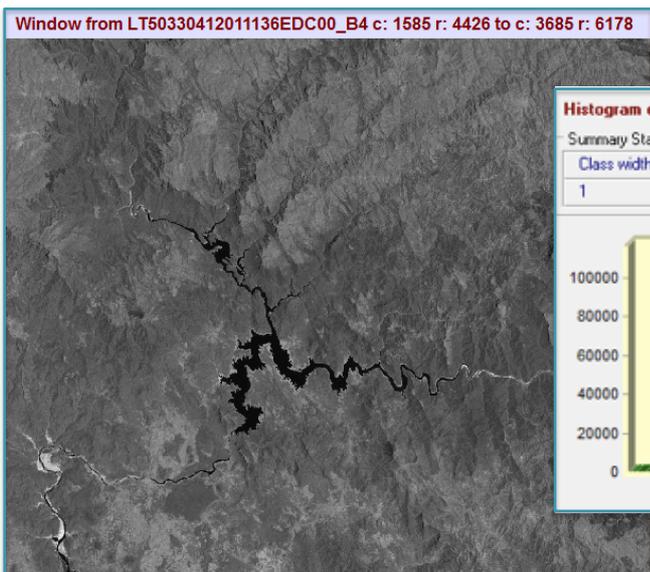


Figura 32. Histograma de la banda 4 Huites 2011

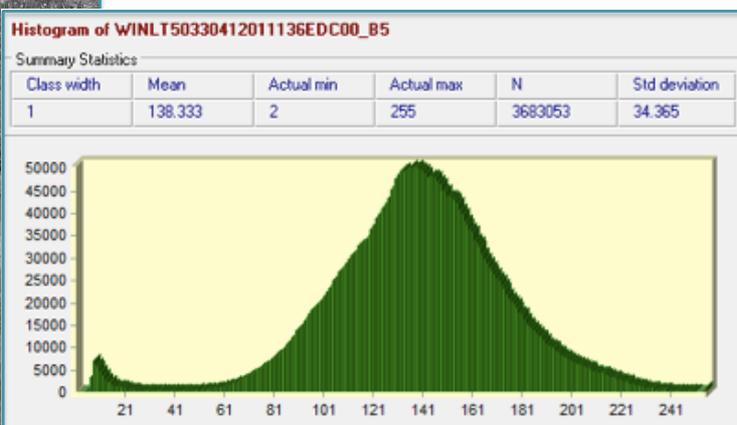
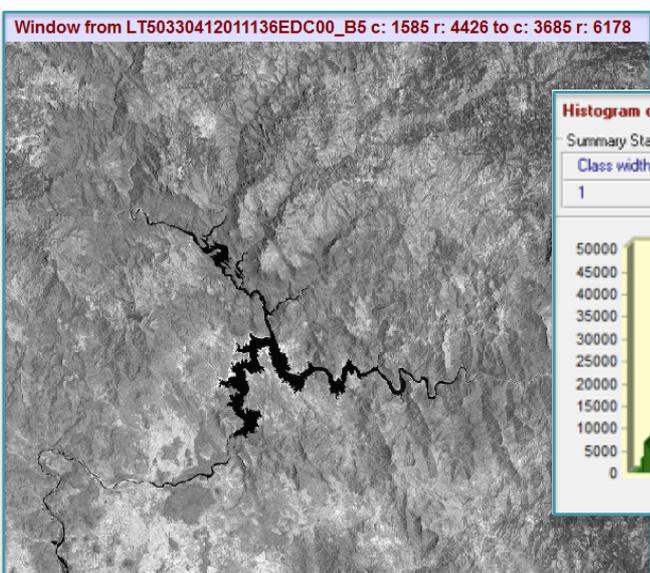


Figura 33. Histograma de la banda 5 Huites 2011

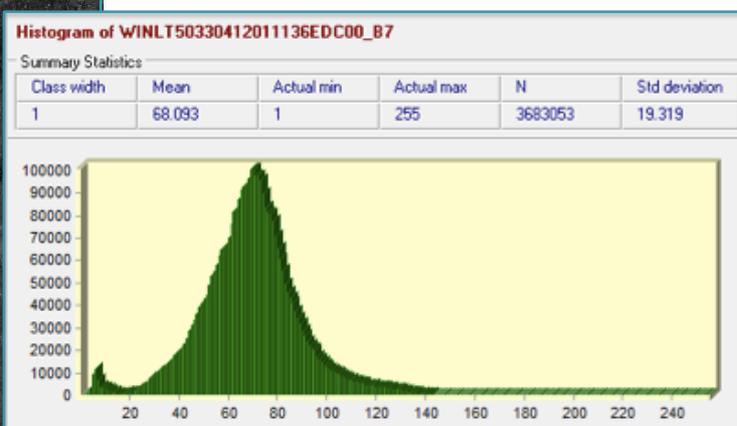
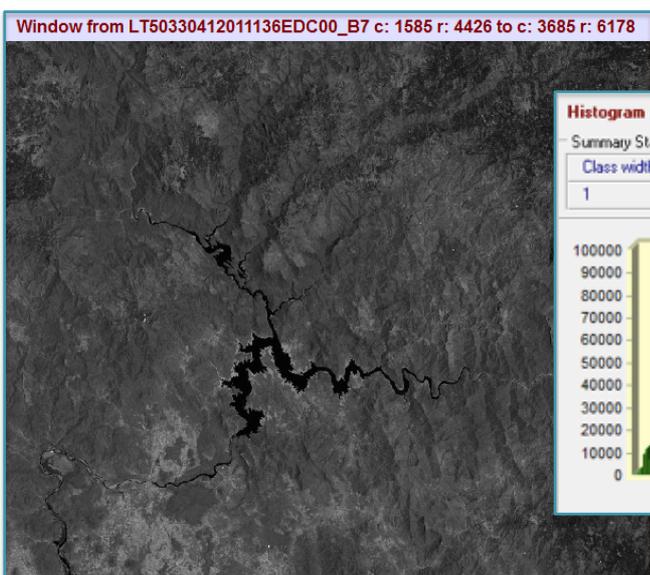


Figura 34. Histograma de la banda 7 Huites 2011

Luego de restar los valores mostrados en las Tablas 6 y 7 a cada imagen correspondiente, es importante hacer notar que algunos de los valores tomarán valores negativos, por lo que es necesario realizar una reclasificación de todos estos valores para llevarlos a 0. Los histogramas corregidos de las imágenes referentes a la presa Peñitas se muestran de la Figura 35 a la Figura 37 y los histogramas corregidos de las imágenes referentes a la presa Huites se muestran de la Figura 38 a la Figura 40.

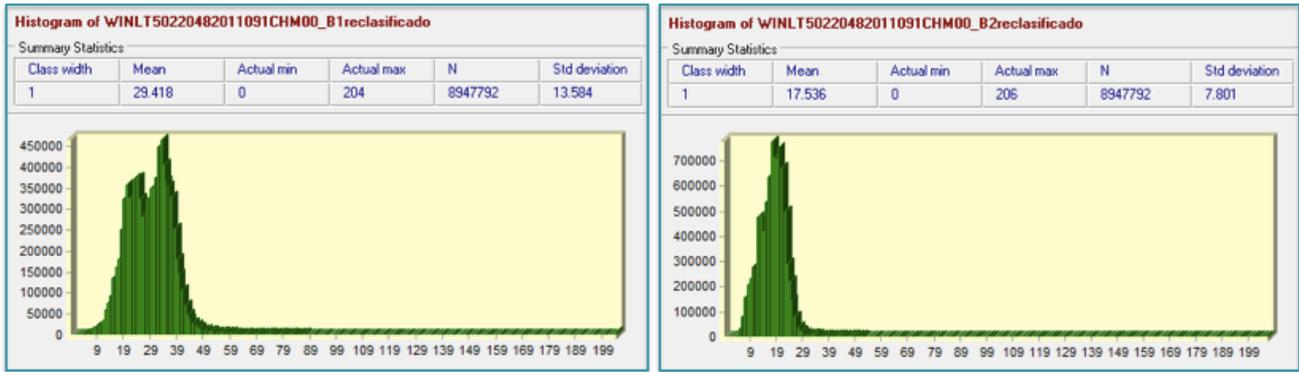


Figura 35. Histogramas corregidos de las bandas 1 y 2 Peñitas 2011

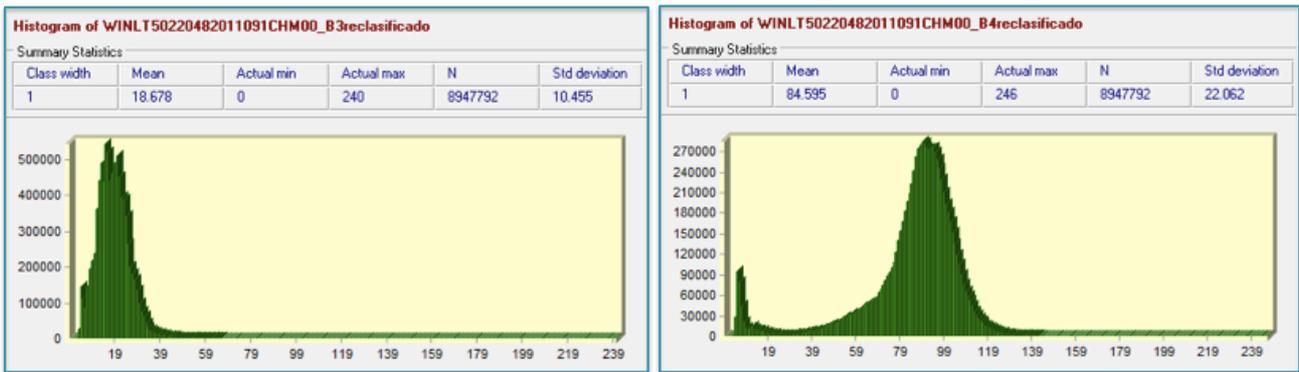


Figura 36. Histogramas corregidos de las bandas 3 y 4 Peñitas 2011

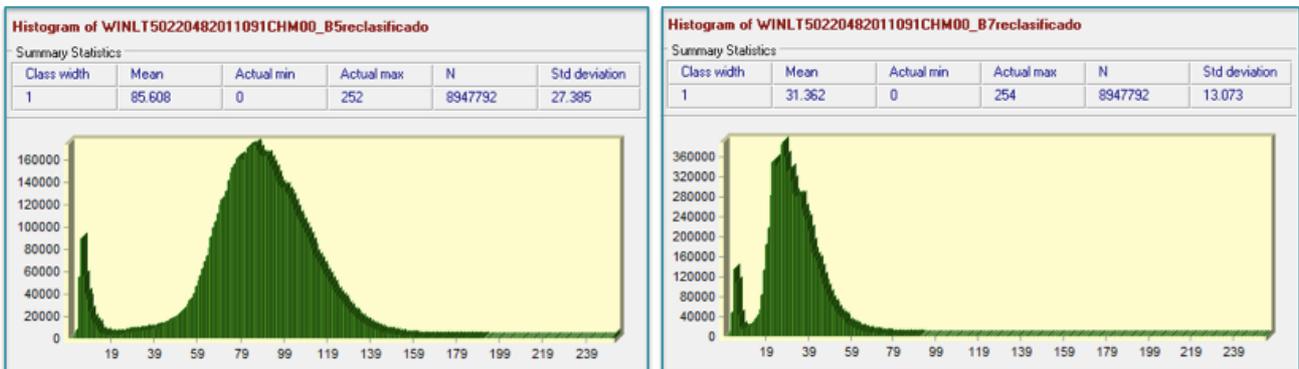


Figura 37. Histogramas corregidos de las bandas 5 y 7 Peñitas 2011

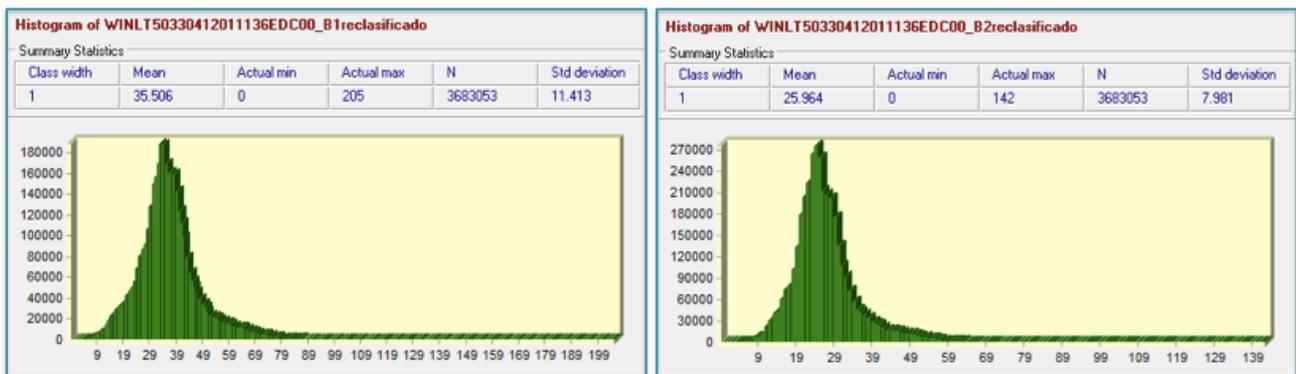


Figura 38. Histogramas corregidos de las bandas 1 y 2 Huites 2011

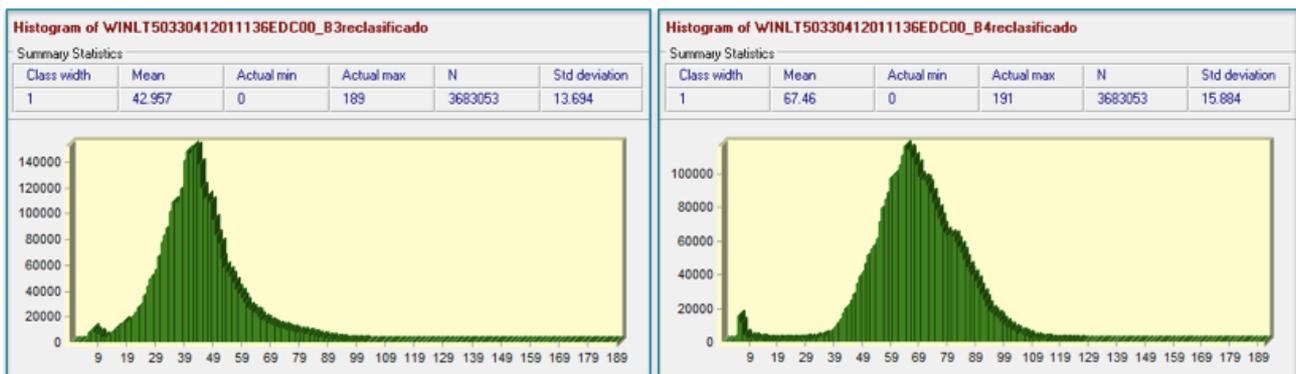


Figura 39. Histogramas corregidos de las bandas 3 y 4 Huites 2011

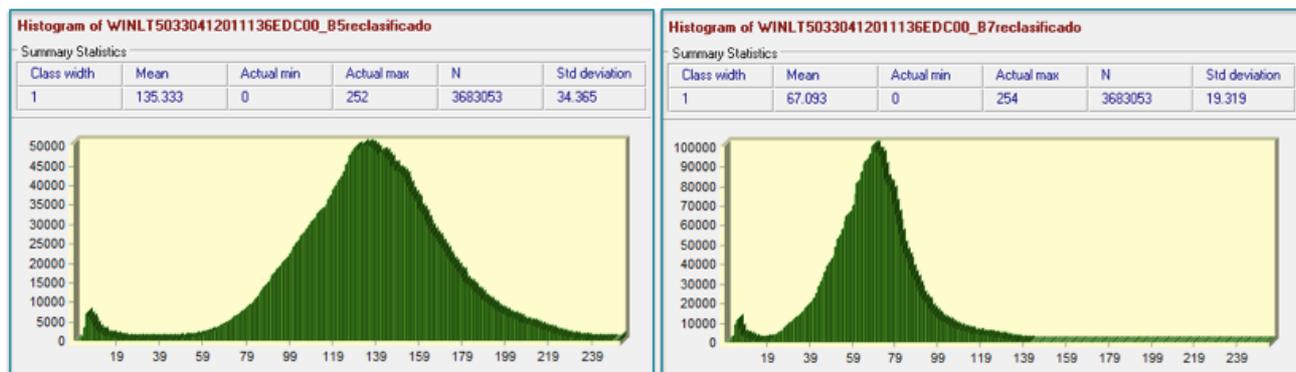


Figura 40. Histogramas corregidos de las bandas 5 y 7 Huites 2011

Para observar las características de la imagen a color, es útil hacer **composiciones de color**. Composiciones es el término que se utiliza en PR para referirse a la asignación de colores para representar brillos en diferentes regiones del espectro.

El sistema de procesamiento de imágenes y pantallas digitales ofrece la flexibilidad de decidir qué banda capturada por el sensor remoto se desplegará en cada uno de los canales del sistema RGB. Es posible asignar a cada uno de estos canales una de las bandas que nos ofrece el sensor que utilizemos para realizar el estudio (para este caso el TM, el sensor montado en Landsat 5), sin sin tener limitaciones en el orden de despliegue. Las opciones más comunes para el problema de selección de banda son establecidas, en parte, por convenciones que han sido

aceptadas por su uso a través de décadas y en parte por la práctica, que ha demostrado que ciertas combinaciones son efectivas para ciertos propósitos. Un punto importante para las combinaciones de bandas es que las que están cerca una de la otra tienden a replicar la información en sus regiones adyacentes del espectro. Por lo tanto, las combinaciones de bandas más eficaces son a menudo (pero no siempre) formadas a partir de regiones espectrales que tienen diferentes ubicaciones en el espectro, ya que tienden a proporcionar representaciones independientes del mismo paisaje. Lo anterior permite resaltar ciertas características de interés, como delimitar claramente el cuerpo de agua, resaltar distintas calidades presentes en el agua del embalse, distinguir las zonas con vegetación de las zonas urbanas o rocosas, etc. A continuación se muestran algunas posibles composiciones:

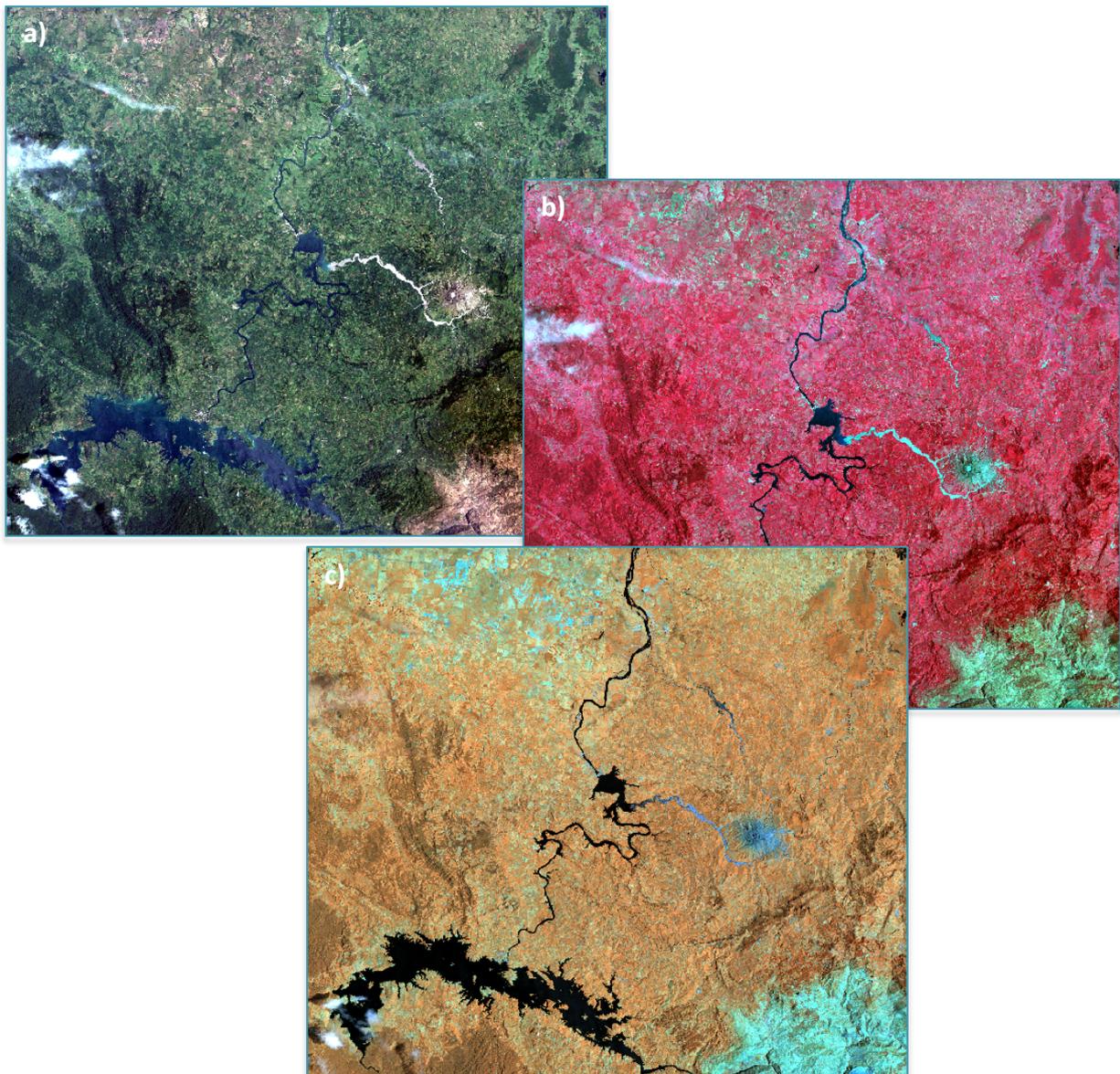


Figura 41. Composiciones en a) color real (RGB=321), b) falso color (RGB=432) y c) falso color (RGB= 457)

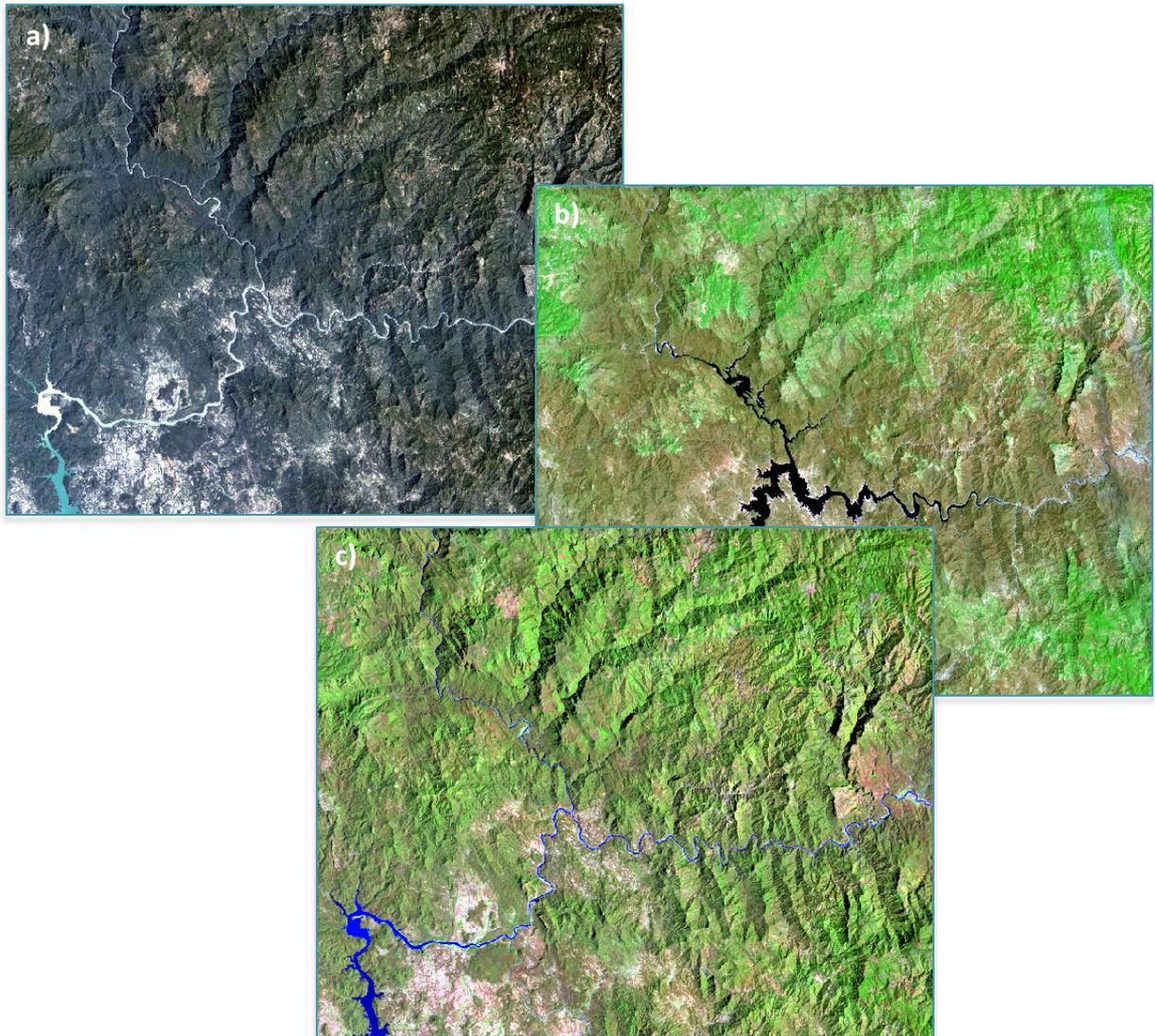


Figura 42. Composiciones en a) color real (RGB=321), b) falso color (RGB=742) y c) falso color (RGB= 542)

Si se analiza la curva espectral de la vegetación llama la atención el gran contraste, que existe en su reflectividad, entre las bandas rojo visible e infrarrojo cercano. La naturaleza de esta diferencia radica en el efecto que produce la estructura celular de las hojas en el segundo rango espectral mencionado, traduciéndose en una alta reflectividad, y en la gran cantidad de energía que absorbe en el rojo para realizar la fotosíntesis. Sacando provecho de esta situación, se ha creado un índice vegetacional que es interpretado de varias formas: grado de cobertura, vigor (salud) o biomasa, que matemáticamente se puede expresar como la diferencia de energía reflejada de ambas bandas espectrales. Para mitigar algunos efectos tales como cantidad de iluminación (invierno-verano), relieve (solana-umbría) o estado de la atmósfera (nubes), el índice de vegetación de ha expresado como una diferencia normalizada $(X1-X2)/(X1+X2)$, siendo X1 y X2 las energías reflejadas en el infrarrojo cercano y en el rojo respectivamente. Este índice es conocido como NDVI (normalized difference vegetation index).

Para obtener imágenes de NDVI (Figura 43 y Figura 44) se utilizó la calculadora de imágenes ingresando la fórmula mencionada anteriormente.

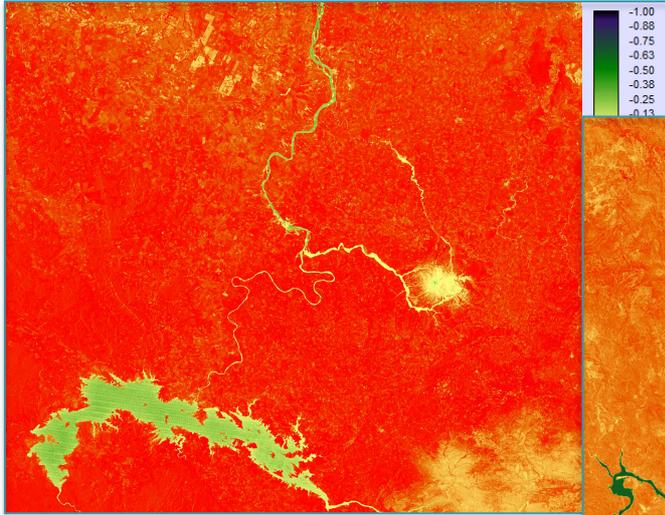


Figura 43. Imagen NDVI Peñitas 2011

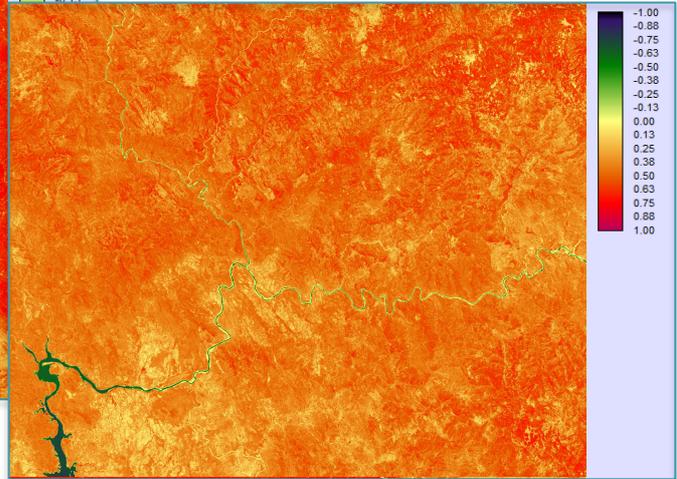


Figura 44. Imagen NDVI Huites 2011

4.5 Determinación de sitios de muestreo

Los píxeles en las imágenes pueden ser agrupados en familias de forma automatizada por un software cuando presentan correlación entre ellos. Se aplicó una agrupación fina y una gruesa con todas las bandas, reteniendo todos los grupos para conocer cómo están distribuidos (Figura 45 a Figura 64) con el fin de establecer sitios de muestreo.

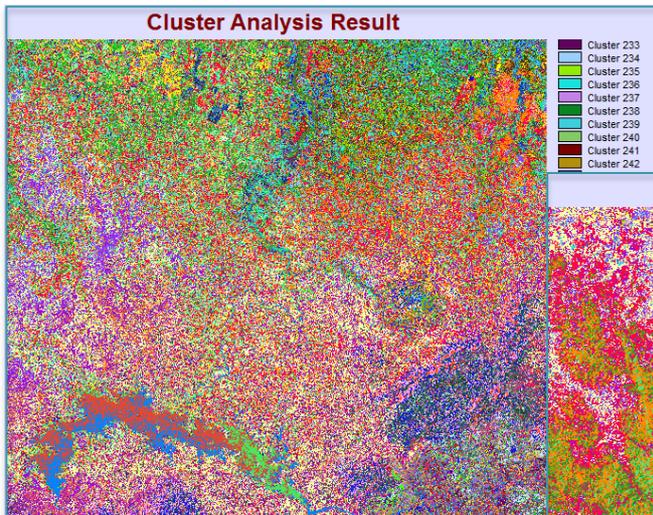


Figura 45. Clasificación fina Peñitas 1986

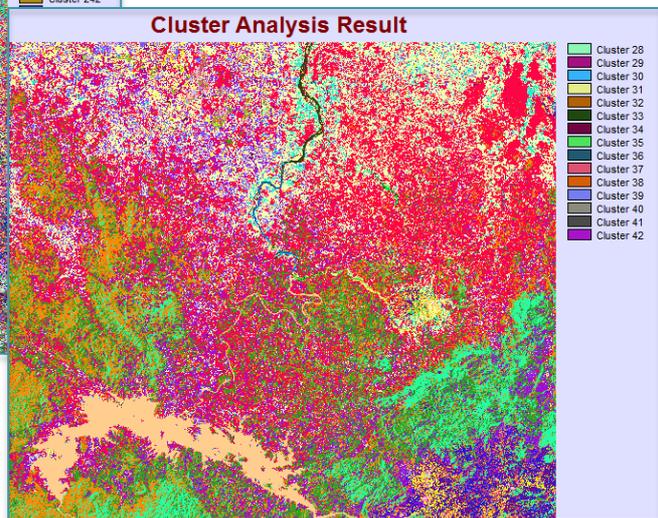


Figura 46. Clasificación gruesa Peñitas 1986

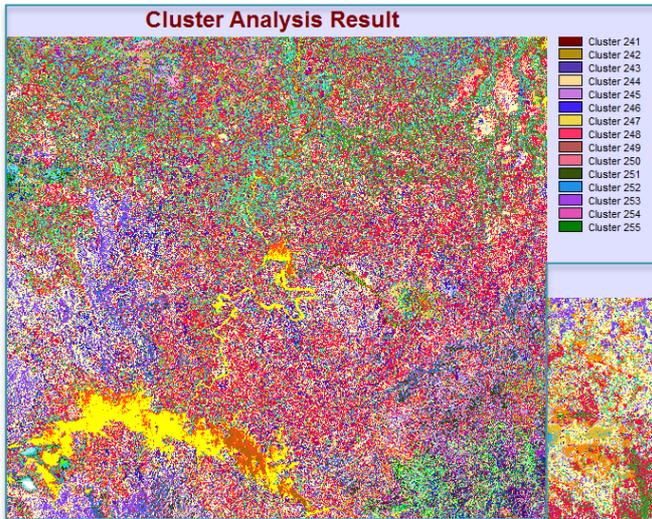


Figura 47. Clasificación fina Peñitas 1990

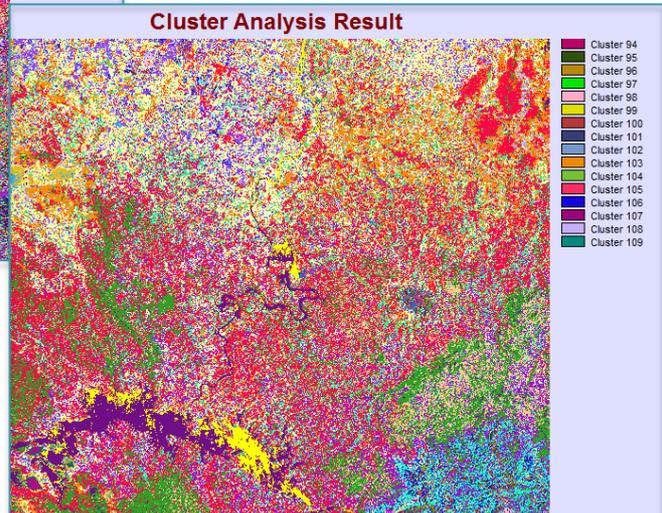


Figura 48. Clasificación gruesa Peñitas 1990

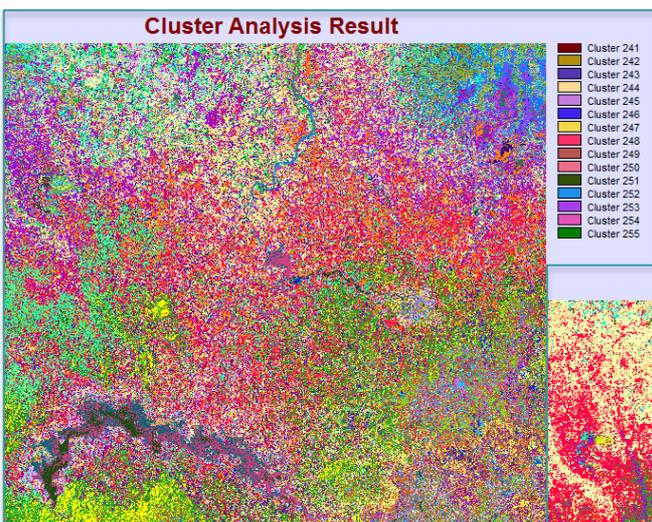


Figura 49. Clasificación fina Peñitas 1995

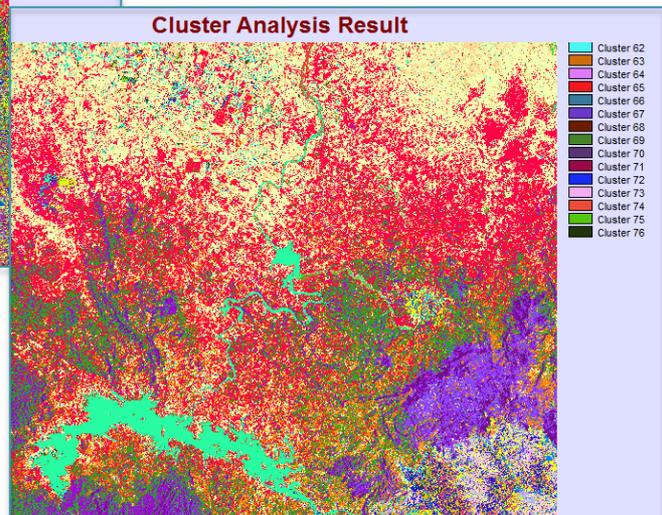


Figura 50. Clasificación gruesa Peñitas 1995

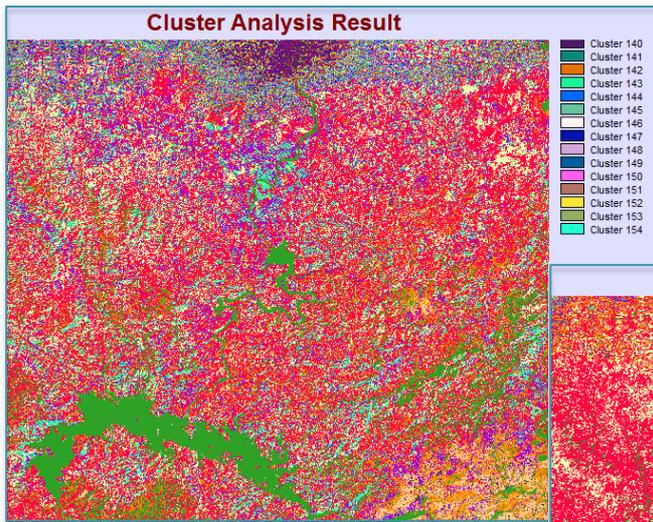


Figura 51. Clasificación fina Peñitas 2001

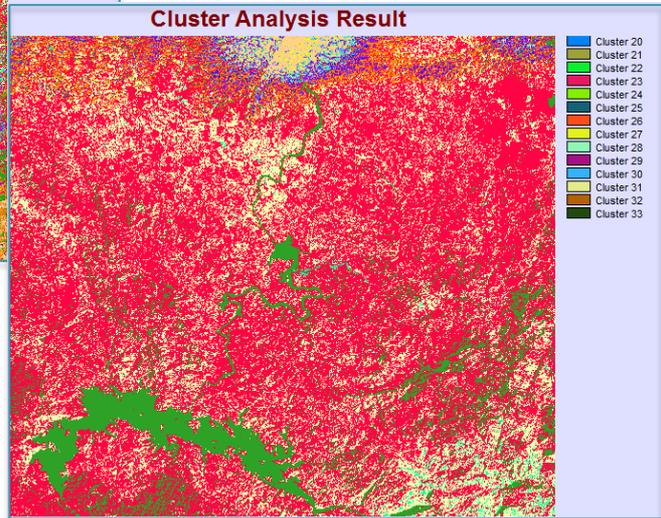


Figura 52. Clasificación gruesa Peñitas 2001

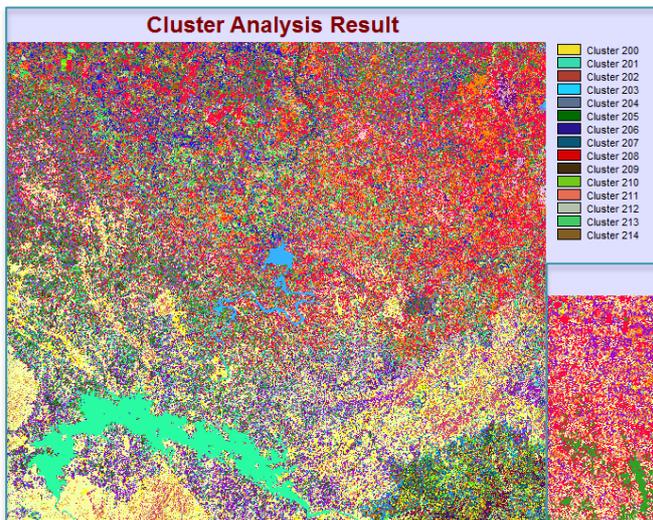


Figura 53. Clasificación fina Peñitas 2011

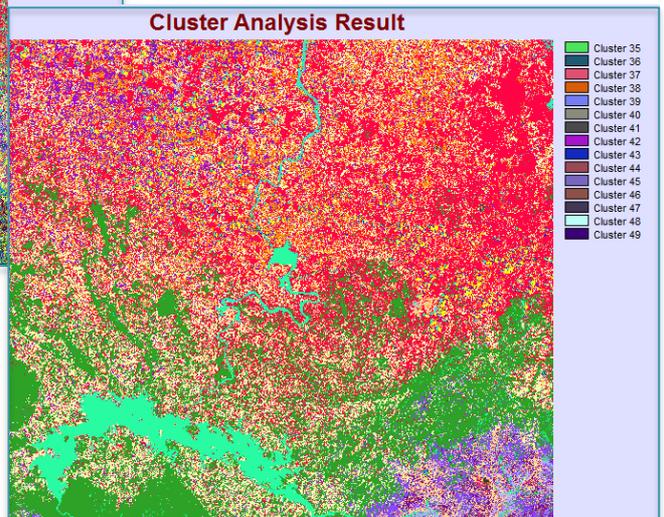


Figura 54. Clasificación gruesa Peñitas 2011

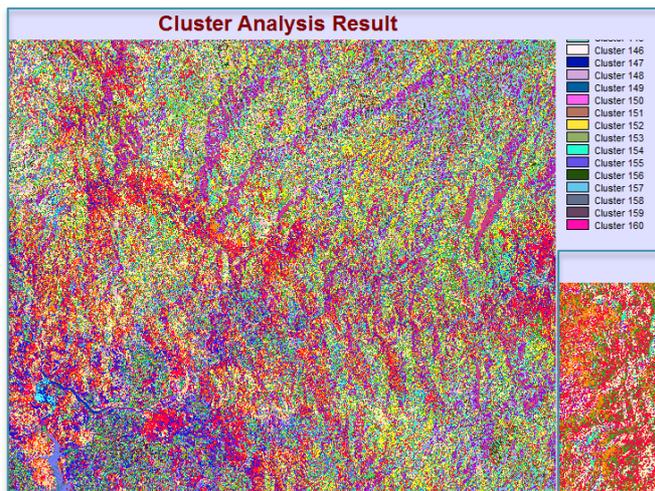


Figura 55. Clasificación fina Huites 1992

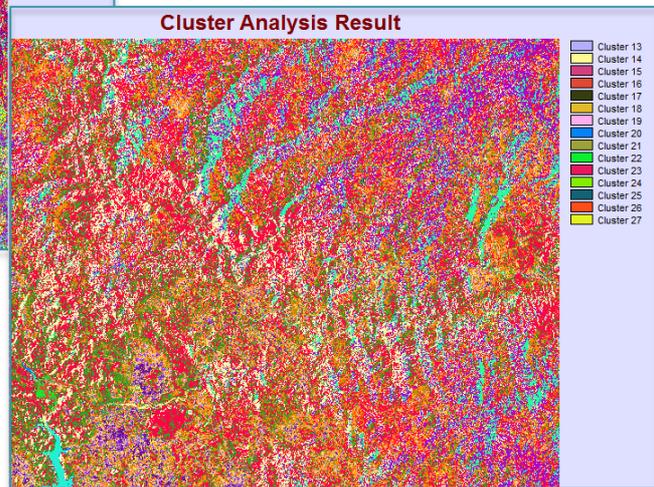


Figura 56. Clasificación gruesa Huites 1992

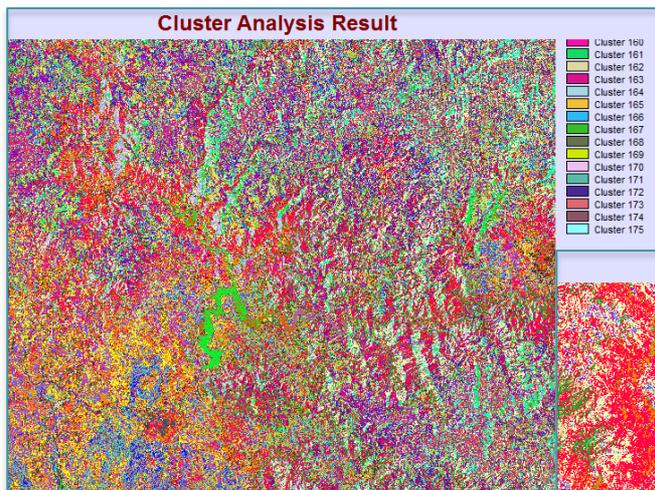


Figura 57. Clasificación fina Huites 1997

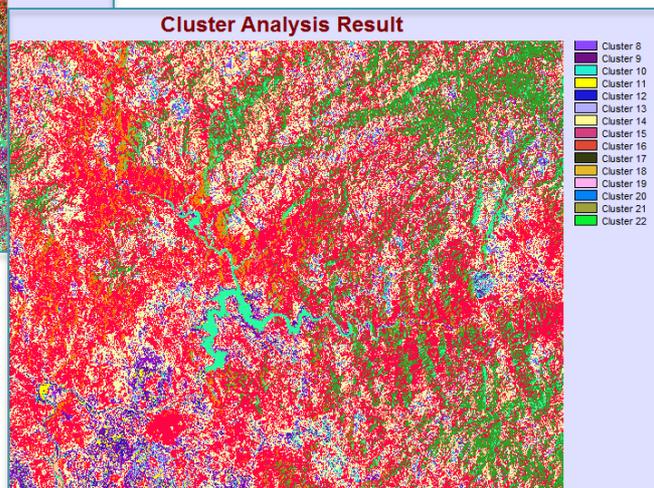


Figura 58. Clasificación gruesa Huites 1997

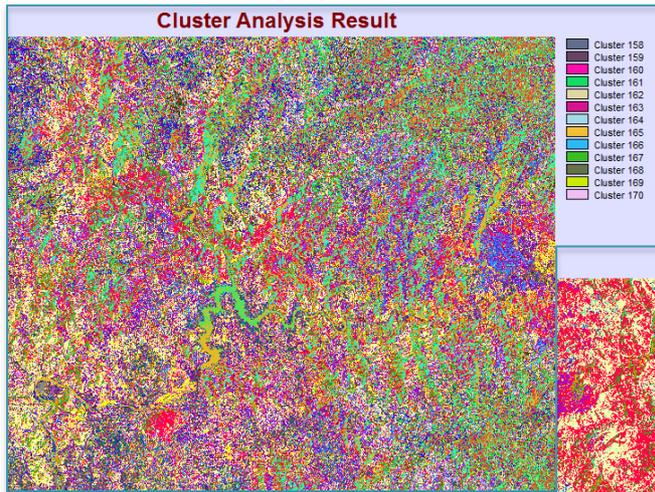


Figura 59. Clasificación fina Huites 2000

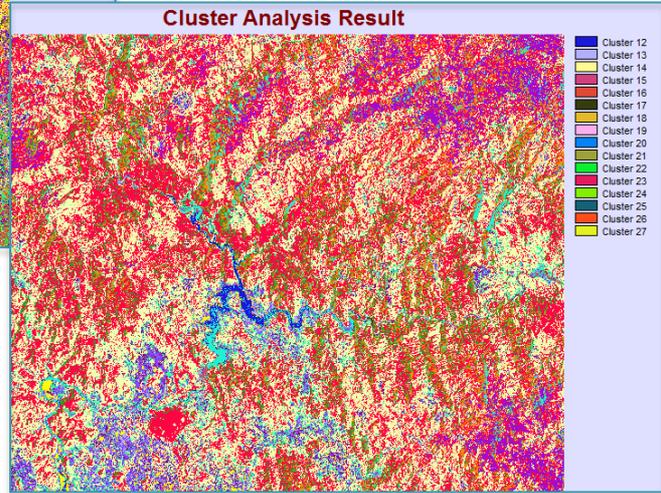


Figura 60. Clasificación gruesa Huites 2000

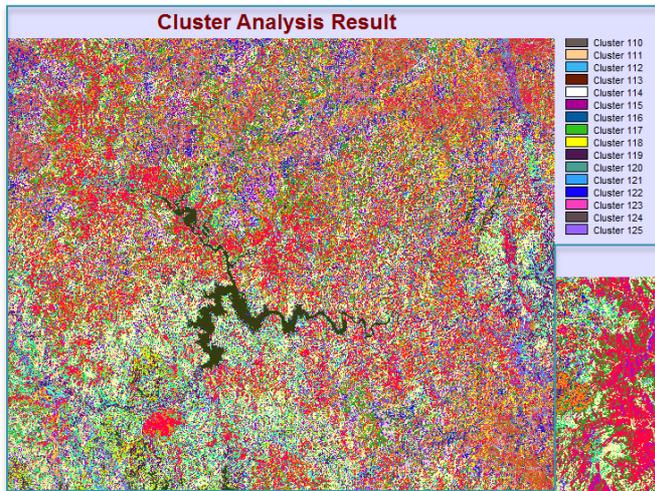


Figura 61. Clasificación fina Huites 2006

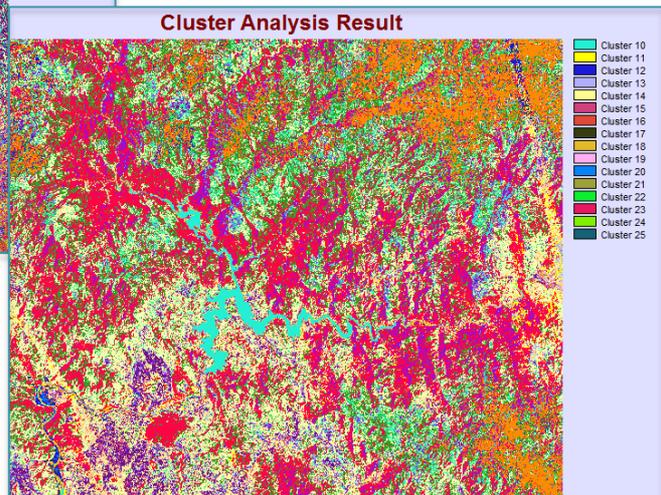


Figura 62. Clasificación gruesa Huites 2006

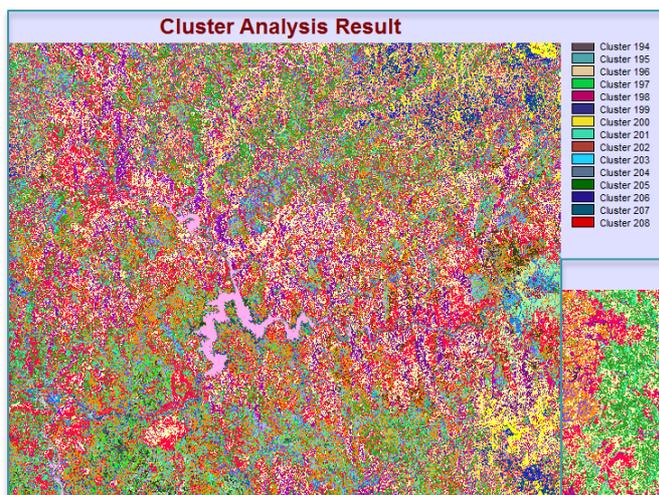


Figura 63. Clasificación fina Huites 2011

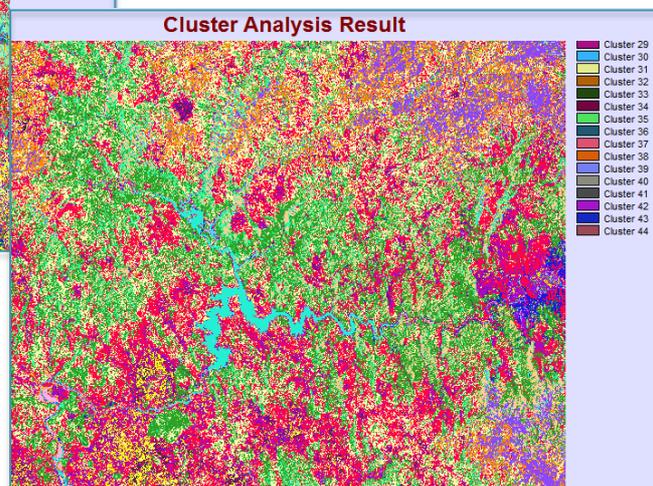


Figura 64. Clasificación gruesa Huites 2011

Se puede observar que el número resultante de grupos en ambos casos, es una cantidad poco adecuada para establecer sitios de muestreo.

Se desplegaron los histogramas se analizaron y se determinó que las clases de clasificación más importantes eran 10 (Figura 65 y Figura 66). Se puede observar que en ambos casos existe un salto grande entre los valores de los pixeles acumulados entre las clases 10 y 11. Lo anterior indica que las familias posteriores a la clase 11 pueden ser despreciadas ya que el número de pixeles agrupados en ellas no es representativo y haría más difícil la interpretación de los datos.

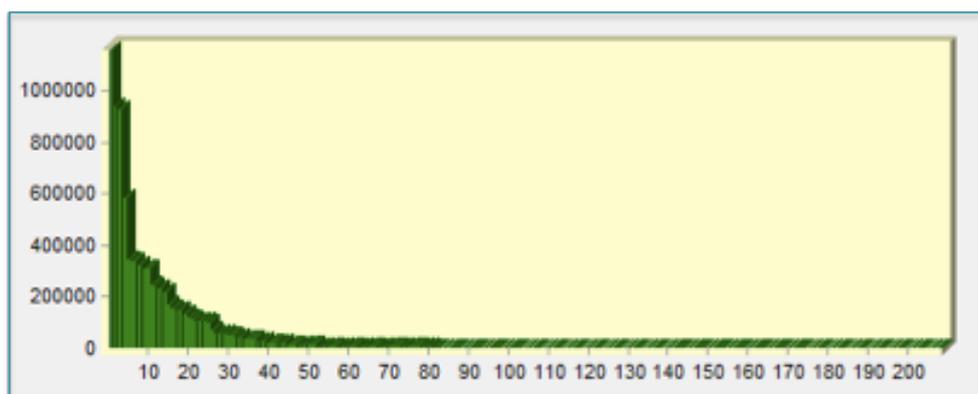


Figura 65. Histograma de Grupos Peñitas

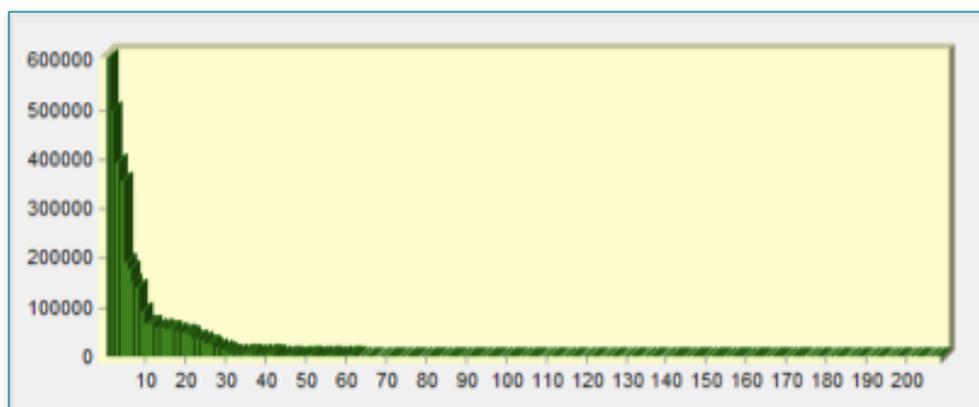


Figura 66. Histograma de Grupos Huites

Se generaron grupos con estos límites, únicamente con clasificación gruesa para ambos casos de estudio (Figura 67 a Figura 75).

Es importante mencionar que la clasificación gruesa y fina es una función del programa IDRISI. La diferencia en este algoritmo radica en que el programa reconocerá para la clasificación gruesa sólo los picos del histograma de cada banda como posibles clases, y en la clasificación fina, además de los picos, el programa reconoce los “hombros” que presente el histograma, es decir, las variaciones que tenga el histograma cuando dos grupos adyacentes se sobreponen de manera que no se pueda identificar un pico.

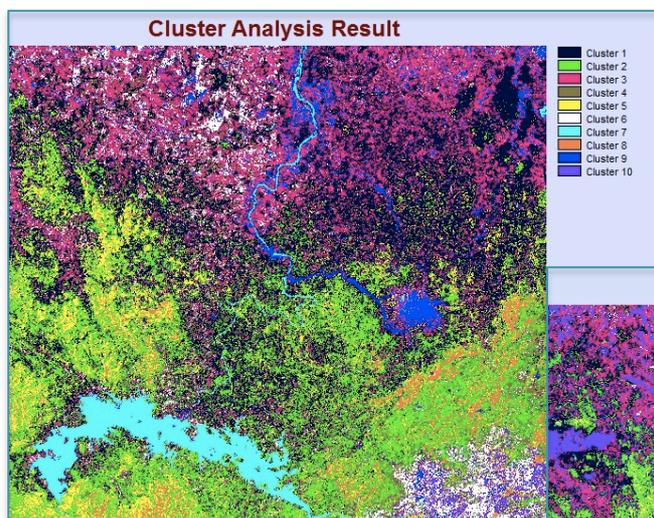


Figura 67. 10 Grupos grueso Peñitas 1986

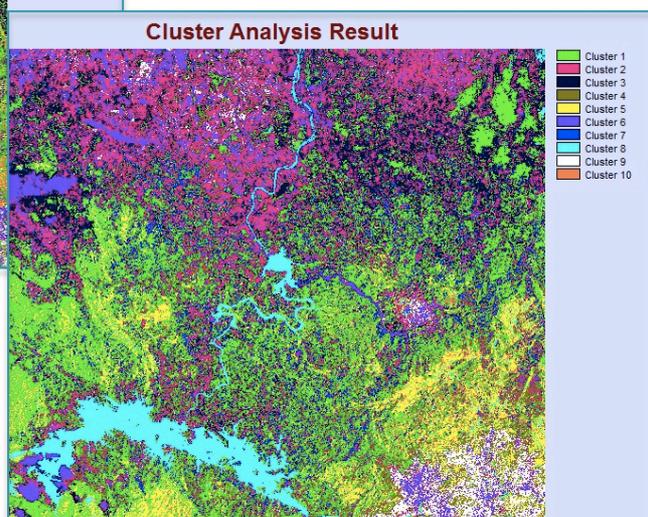


Figura 68. 10 Grupos grueso Peñitas 1990

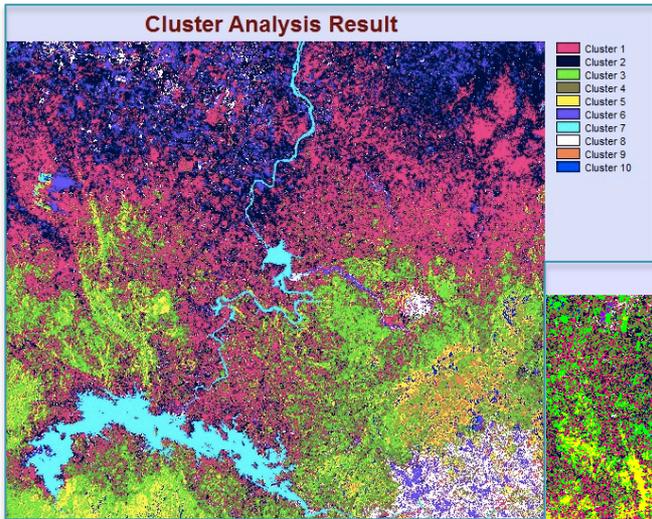


Figura 69. 10 Grupos grueso Peñitas 1995

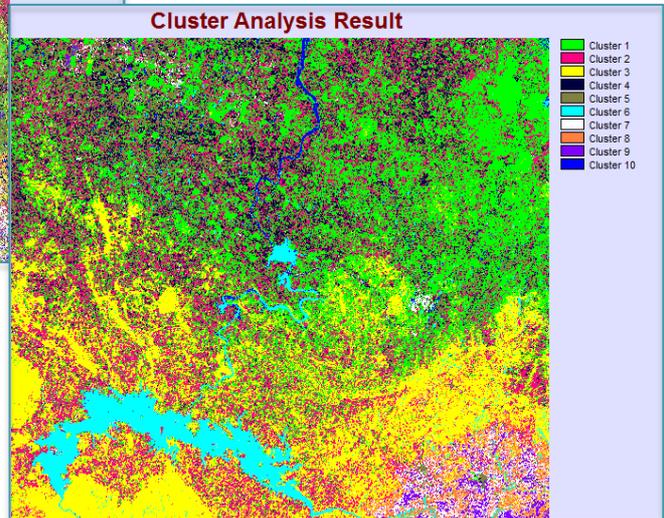


Figura 70. Grupos grueso Peñitas 2011

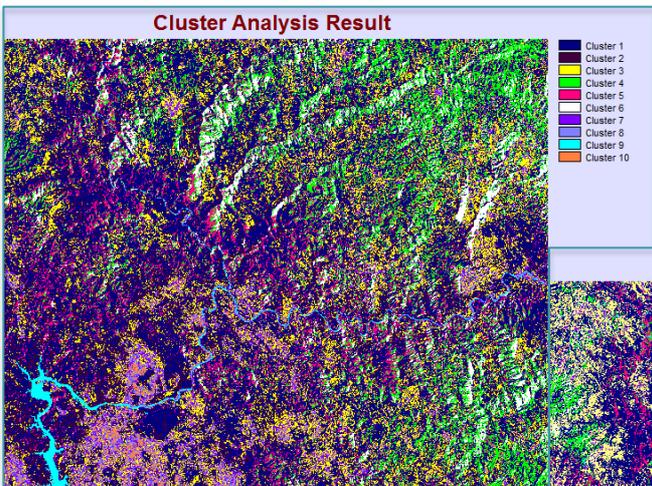


Figura 71. 10 Grupos grueso Huites 1992

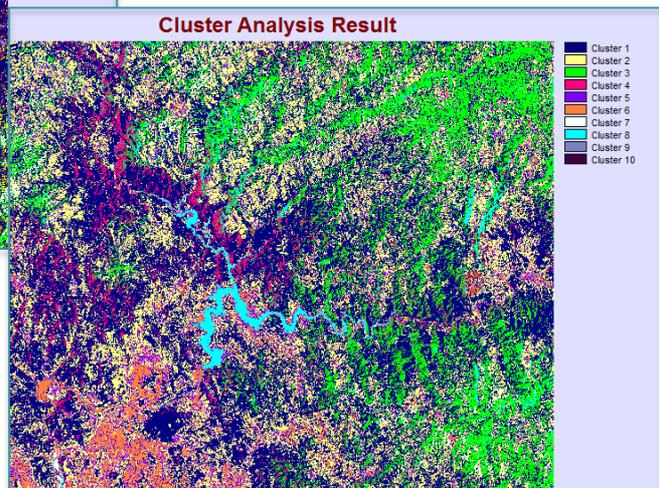


Figura 72. 10 Grupos grueso Huites 1997

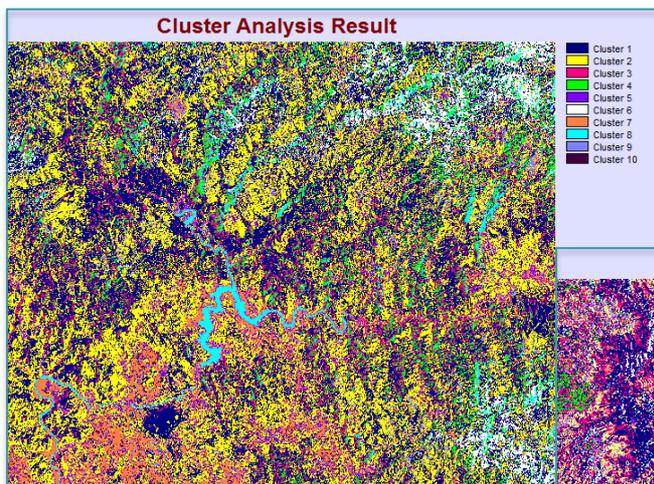


Figura 73. 10 Grupos grueso Huites 2000

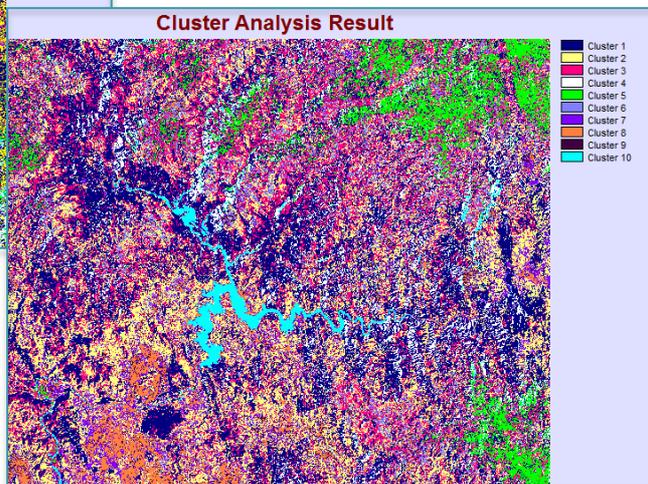


Figura 74. 10 Grupos grueso Huites 2006

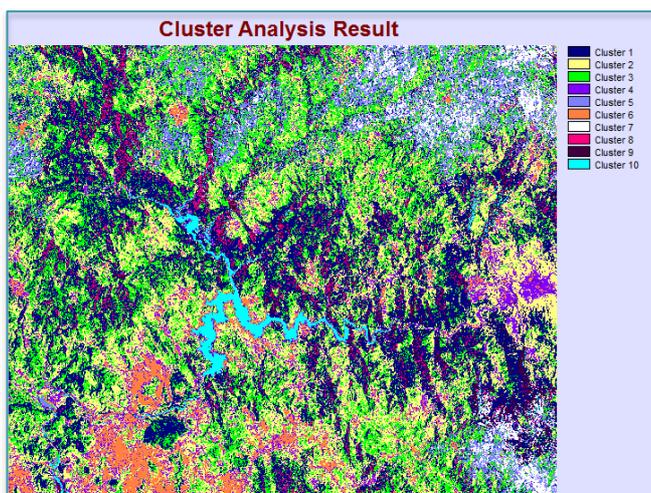


Figura 75. 10 Grupos grueso Huites 2011

Cada grupo indica entonces una zona en la que las reflectividades son similares, por lo que se puede suponer que sería adecuado proponer algunos sitios de muestreo en donde las familias de pixeles hayan cambiado a lo largo del tiempo.

Se propusieron 5 sitios de muestreo para el análisis del NDVI en ambas presas (Figura 76 y Figura 77). Los sitios son puntos ubicados aguas abajo de la cortina y colindantes con el cauce del río.

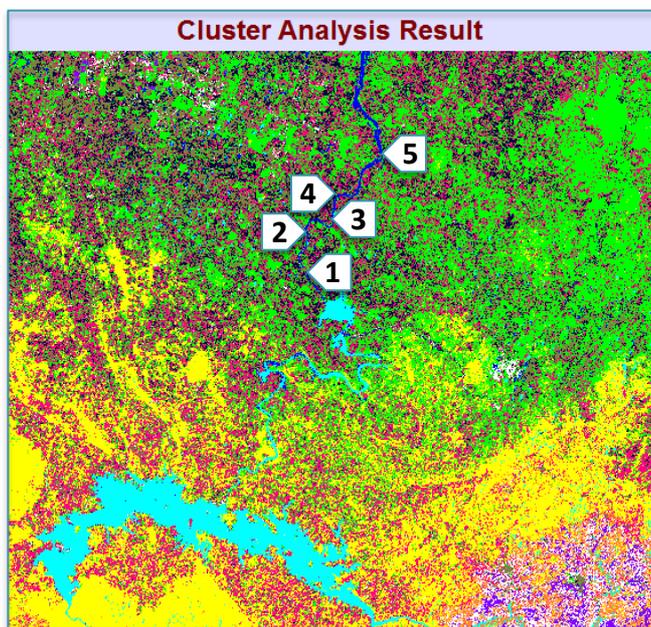


Figura 76. Sitios de muestreo para el análisis de NDVI Peñitas

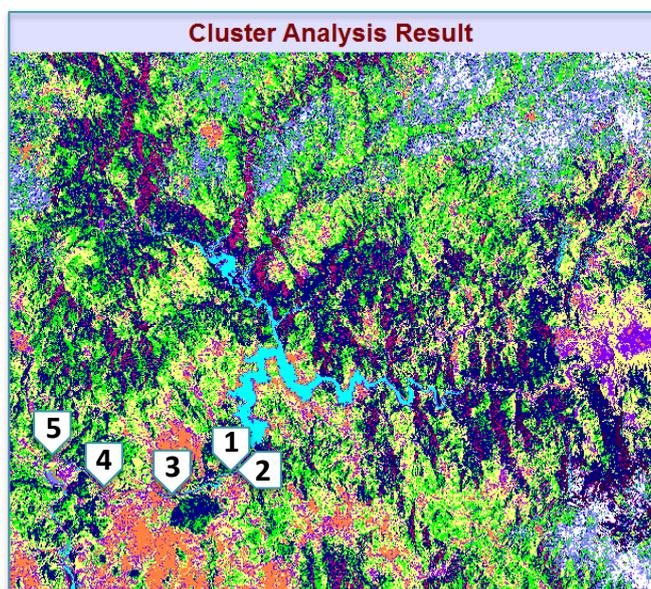


Figura 77. Sitios de muestreo para el análisis de NDVI Huites

Además de los sitios para el análisis de NDVI se propusieron 5 sitios más en cada presa para el análisis de calidad del agua (Figura 78 y Figura 79). Dos de los 5 puntos están ubicados dentro del embalse de cada presa y los tres sitios restantes se encuentran localizados sobre el cauce del río aguas abajo de la cortina.

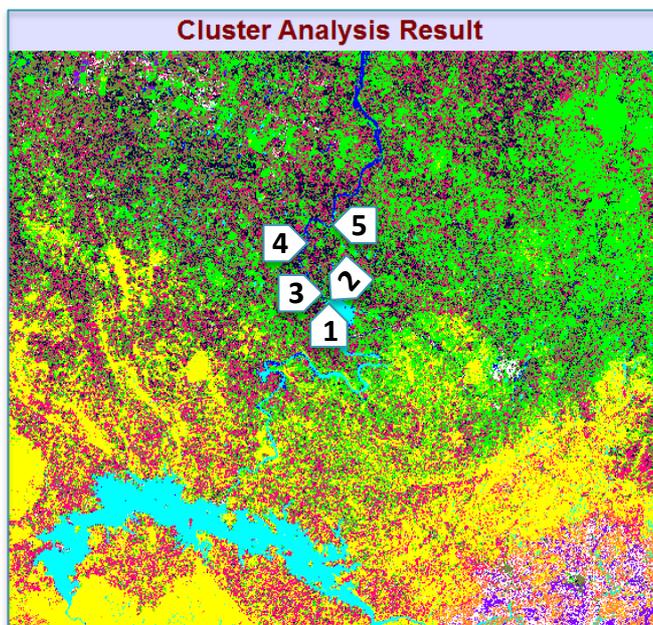


Figura 78. Sitios de muestreo para el análisis de calidad de agua Peñitas

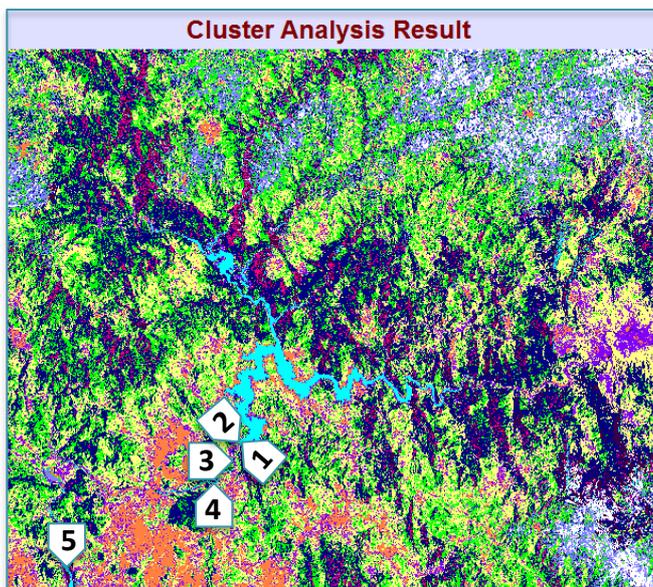


Figura 79. Sitios de muestreo para el análisis de calidad de agua Huites

4.6 Análisis Visual

La composición en falso color RGB = 542 es muy útil para distinguir los límites entre cuerpos de agua y suelo. Las imágenes resultantes de esta combinación fueron utilizadas para tratar de identificar algún cambio en el caudal del río, posterior a la interrupción del flujo natural del mismo. A continuación se muestran las imágenes obtenidas con dicha combinación, en orden cronológico, de un segmento del río aguas abajo de la presa Peñitas.

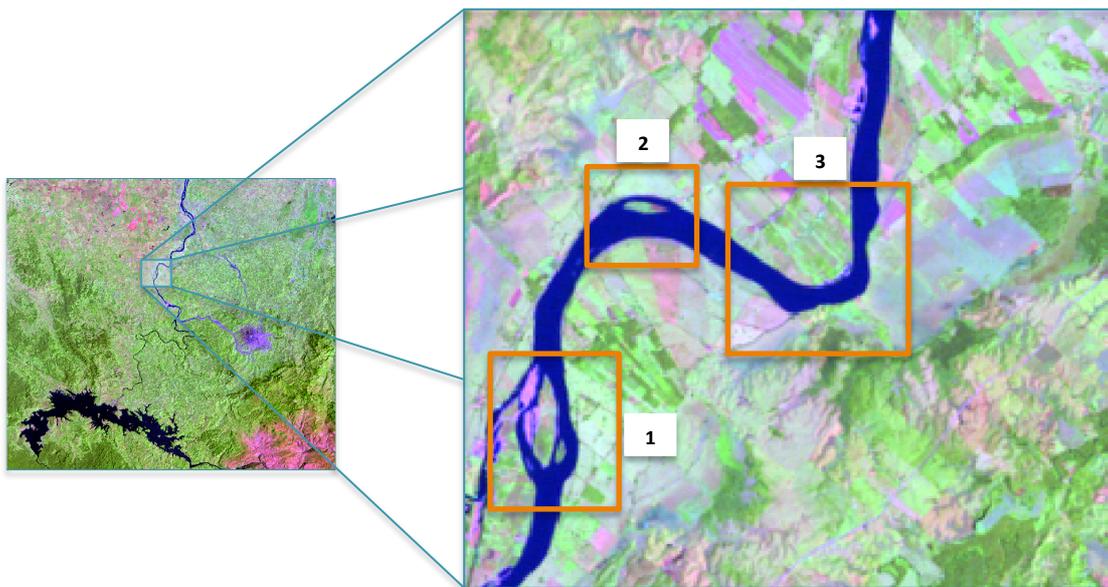


Figura 80. Composición en falso color RGB= 542 Peñitas 1986

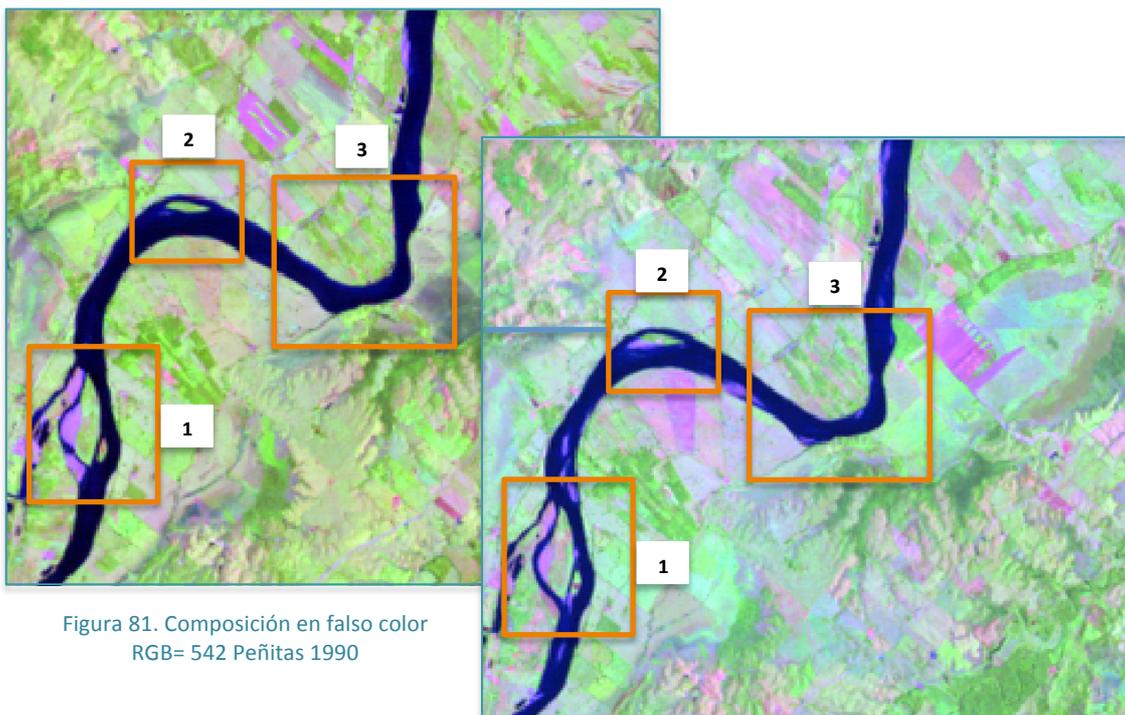


Figura 81. Composición en falso color RGB= 542 Peñitas 1990

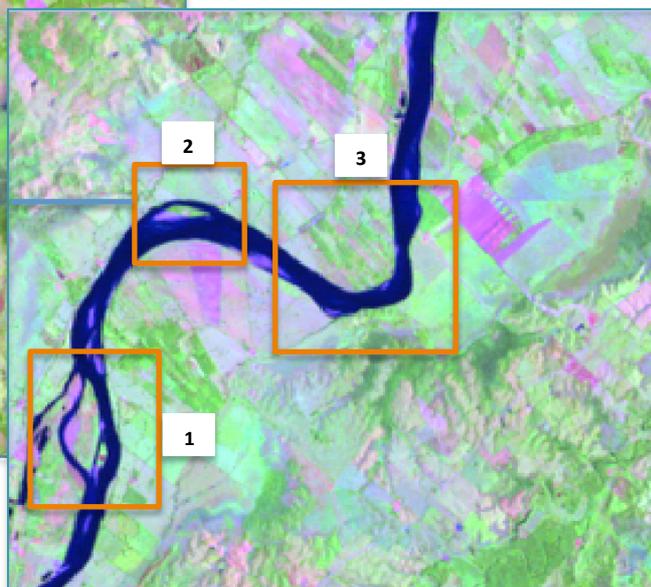


Figura 82. Composición en color falso RGB= 542 Peñitas 1995

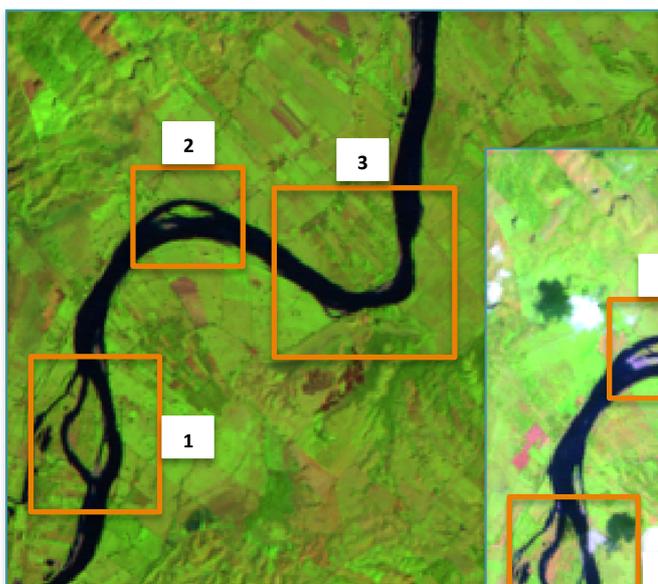


Figura 83. Composición en falso color
RGB= 542 Peñitas 2001

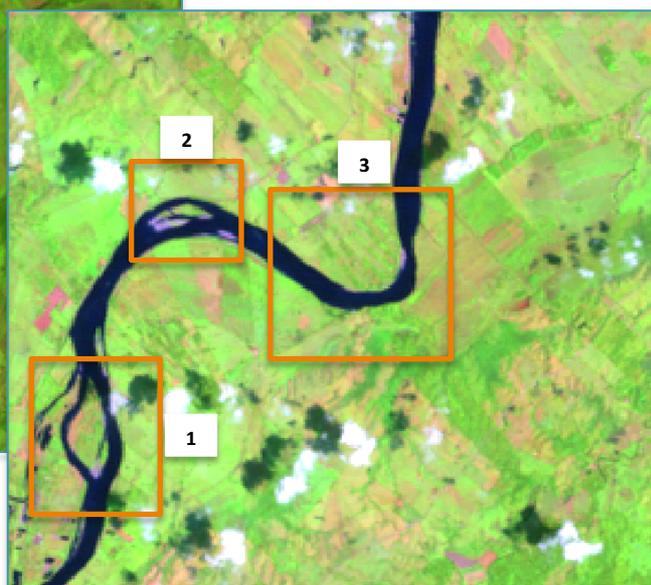


Figura 84. Composición en falso color RGB= 542 Peñitas 2011

El análisis de tipo espacial que se realiza mediante la comparación de dos o más imágenes satelitales de un mismo lugar en épocas distinta permite evaluar los cambios de una manera más amplia que el análisis de una sola imagen.

En las secciones 1, 2 y 3 de las imágenes anteriores (Figura 80 a Figura 84) se pueden apreciar alteraciones en el caudal del río luego del llenado de la presa. Una disminución del caudal puede ocasionar cambios en el hábitat fluvial. Los dos factores que más afectan son la disminución de la velocidad y del nivel del agua. En el primer caso se producen modificaciones en el tipo de sustrato, lo cual afecta a la supervivencia y a la distribución tanto de la vegetación como de la fauna acuáticas. En el segundo caso, la mayor afectación se produce tanto en las zonas sumergidas de orilla, un hábitat muy rico en especies y muy importante para la reproducción de los peces, como en la zona emergida de los márgenes, donde se pueden producir importantes modificaciones de la estructura, la composición y la productividad del bosque de ribera.

Una disminución en el caudal provocado por un trasvase puede originar, también, un impacto en la desembocadura del río. Existe un problema de aumento de la salinidad en la zona de mezcla de las aguas dulces y marinas, además se produce un fenómeno de disminución de la productividad biológica y de cambios en la distribución de las especies, y finalmente se produce una disminución del aporte de sedimentos fluviales al sistema (Dynesius and Nilsson 1994).

El análisis anterior también se realizó para la presa Huites. Las imágenes empleadas para este caso se muestran a continuación.

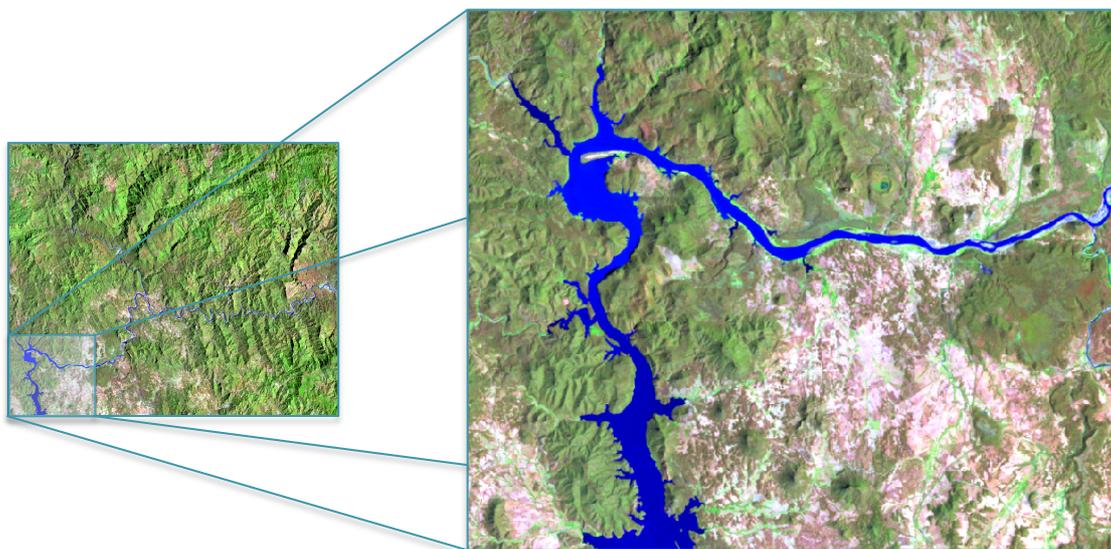


Figura 85. Composición en falso color RGB= 542 Huites 1992

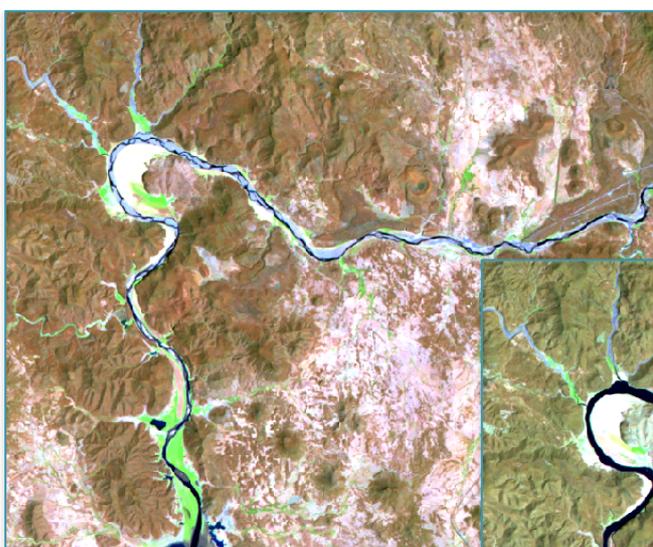


Figura 86. Composición en falso color RGB= 542 Huites 1997

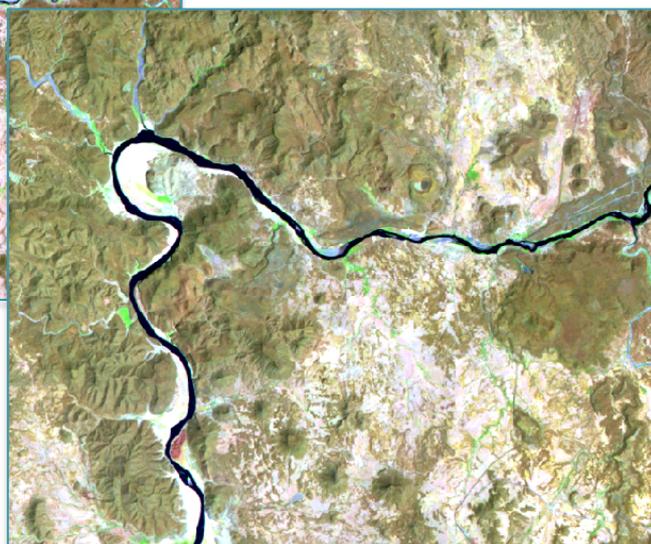


Figura 87. Composición en falso color RGB= 542 Huites 2000

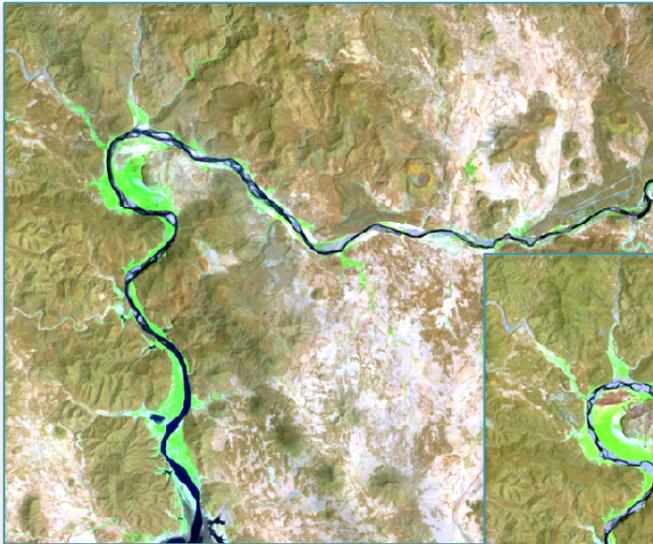


Figura 88. Composición en falso color RGB= 542 Huites 2006



Figura 89. Composición en falso color RGB= 542 Huites 2011

Las alteraciones en el caudal aguas abajo de la cortina de la presa Huites son a simple vista, más drásticas que las observadas en el análisis de la presa Peñitas. En las Figuras anteriores (Figura 85 a Figura 89) se puede apreciar una disminución considerable de la cantidad de agua que pasaba por el río si se compara la imagen de 1992 (año en el que la presa no existía) con las imágenes de los años siguientes. Además de los efectos mencionados anteriormente, la disminución del caudal podría ocasionar un impacto en el ecosistema fluvial de los vertidos aguas abajo del lugar de detracción, ya que el efecto de dilución de los contaminantes es menor (Guillén and Palenques 1992).

Cuando se realiza composición en falso color RGB = 432 se puede apreciar la vegetación en rojo debido a la alta reflectancia que tiene ésta en el infrarrojo; mientras más brillante sea el rojo más sana y densa es la vegetación. Las áreas vegetales menos densas y/o vegetación en temprano estado de crecimiento aparecen en color rosa y las áreas con escasa o nula vegetación en tonalidades de blanco a verdes y cafés, dependiendo de la humedad y el contenido de materia orgánica que tengan.

A continuación se muestran las imágenes de la presa Peñitas obtenidas con la composición de bandas mencionada.

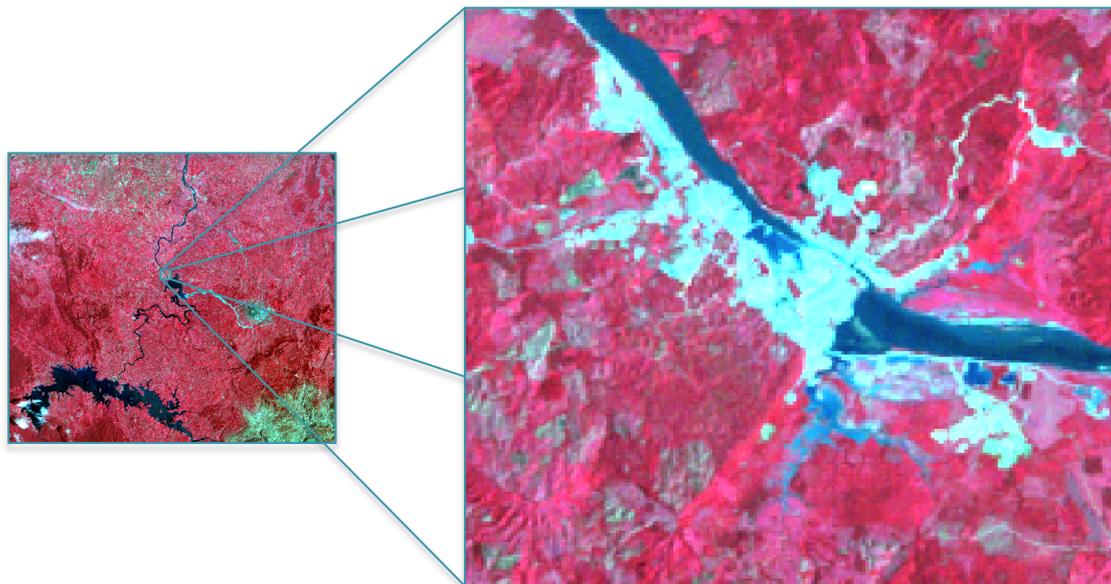


Figura 90. Composición en falso color RGB= 432 Peñitas 1986



Figura 91. Composición en falso color
RGB= 432 Peñitas 1990



Figura 92. Composición en falso color RGB= 432 Peñitas 1997

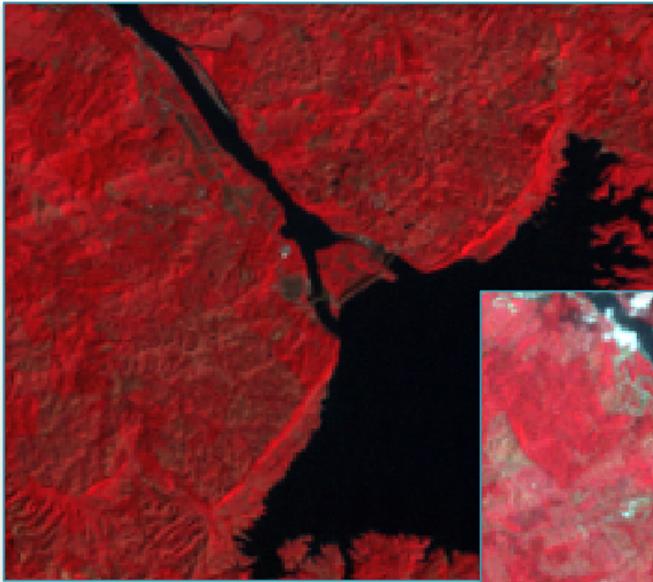


Figura 93. Composición en falso color RGB= 432 Peñitas 2001



Figura 94. Composición en falso color RGB= 432 Peñitas 2011

Como se observa, la primera de las imágenes anteriores (Figura 90) pertenece a una etapa previa al inicio de operaciones de la presa Peñitas. En esta imagen se puede apreciar en color blanco la zona que se utilizó para las labores de construcción de la obra, es decir, suelo sin vegetación. Si se analizan las imágenes siguientes (Figura 91 a Figura 94) es posible observar una recuperación paulatina del ambiente respecto a la cobertura vegetal en el terreno, que como se mencionó antes se puede apreciar en color rojo. Es importante mencionar que esta recuperación le tomó a la naturaleza un periodo de más de 20 años.

4.7 Análisis Digital

Una vez determinados los sitios de muestreo para el análisis de NDVI (Figura 95 y Figura 96) mediante el uso de una técnica de clasificación no supervisada, es posible extraer más información a partir de las imágenes resultantes. Es importante mencionar que todos los sitios de muestreo para este análisis son áreas que delimitan el suelo y el cuerpo de agua.

Luego de obtener las imágenes de NDVI, se graficaron los niveles digitales de cada banda espectral para cada sitio de interés, ya que de esta manera se facilita la interpretación de los datos.

Posteriormente se calcularon los valores del NDVI con la fórmula mencionada anteriormente :

$$NDVI = \frac{X1 - X2}{X1 + X2} \quad (4.1)$$

En donde X1 y X2 son las energías reflejadas en el infrarrojo próximo y rojo respectivamente.

El intervalo de valores obtenidos varía entre -1 y $+1$, siendo el 0 el umbral que define la existencia de vegetación (valores positivos) y la ausencia de ella (valores negativos). Los valores negativos, pertenecen a nubes, nieve, agua, zonas de suelo desnudo y rocas, debido a que sus patrones espectrales tienen mayor reflectancia en el visible que en el infrarrojo. Mientras más alto sea el valor positivo, la interpretación es mayor cobertura, mayor vigor o mayor biomasa.

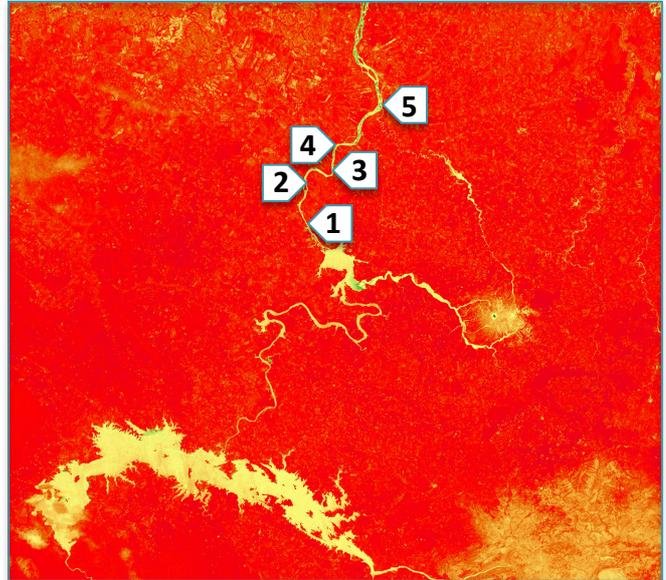


Figura 95. Sitios de muestreo para el análisis de NDVI Peñitas

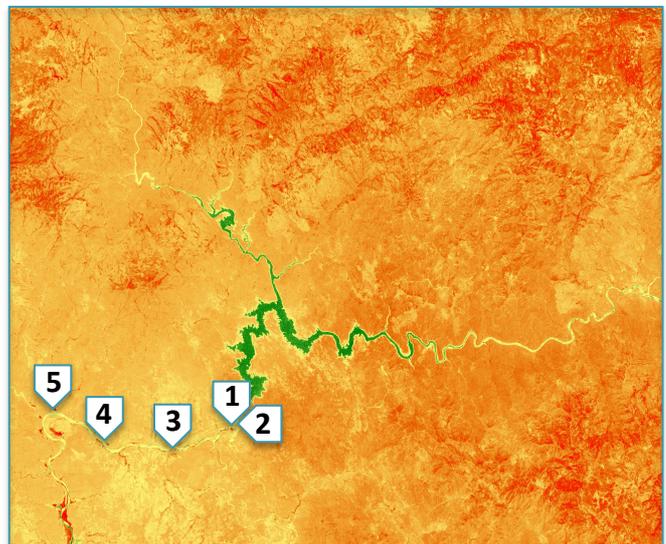


Figura 96. Sitios de muestreo para el análisis de NDVI Huites

Las siguientes Tablas y Figuras muestran los datos obtenidos en los sitios de muestreo para el análisis multitemporal de NDVI de las presas Peñitas y Huites respectivamente.

Tabla 8. ND y valores NDVI de los sitios de muestreo Peñitas

Sitio de muestreo	Año	B1	B2	B3	B4	B5	B7	NDVI
1	1986	34	21	16	82	60	16	0.673469388
	1990	29	19	18	70	60	29	0.590909091
	1995	29	17	15	72	58	15	0.655172414
	2001	25	16	14	58	33	10	0.611111111
	2011	38	22	21	88	83	31	0.614678899
2	1986	32	18	15	90	74	24	0.714285714
	1990	29	19	16	95	85	27	0.711711712
	1995	30	18	18	85	72	23	0.650485437
	2001	26	17	16	86	72	26	0.68627451
	2011	33	20	17	89	73	29	0.679245283
3	1986	33	21	17	76	53	15	0.634408602
	1990	28	18	16	66	57	20	0.609756098
	1995	28	18	17	55	45	17	0.527777778
	2001	27	14	12	45	35	12	0.578947368
	2011	35	19	18	70	65	23	0.590909091
4	1986	34	21	17	88	68	23	0.676190476
	1990	32	23	22	68	66	28	0.511111111
	1995	30	19	18	48	48	16	0.454545455
	2001	28	16	13	39	36	14	0.5
	2011	33	17	15	18	14	5	0.090909091
5	1986	34	20	14	88	59	17	0.725490196
	1990	29	18	15	88	66	22	0.708737864
	1995	29	15	14	57	45	13	0.605633803
	2001	29	15	13	57	31	10	0.628571429
	2011	31	16	13	46	36	12	0.559322034

Como se muestra en la tabla anterior, los valores calculados de NDVI en todos los sitios de muestreo presentan una tendencia descendente. Esto puede traducirse como una pérdida en el vigor de la vegetación después de la interrupción del flujo natural del río.

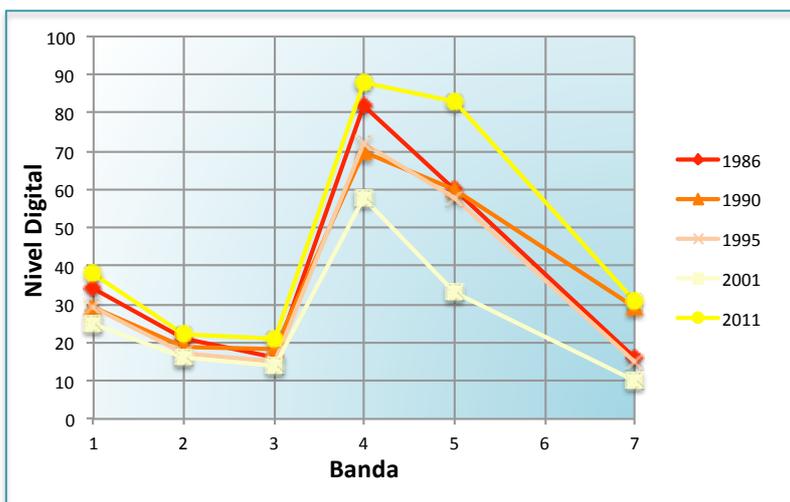


Figura 97. Gráfica ND sitio de muestreo 1 Peñitas

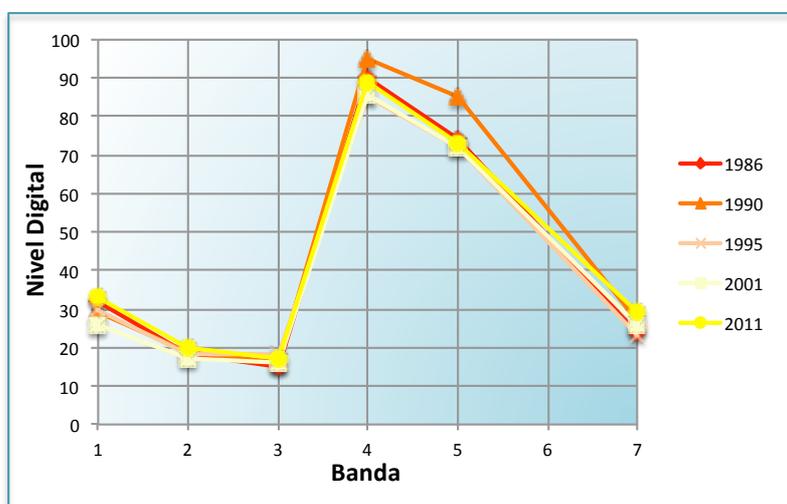


Figura 98. Gráfica ND sitio de muestreo 2 Peñitas

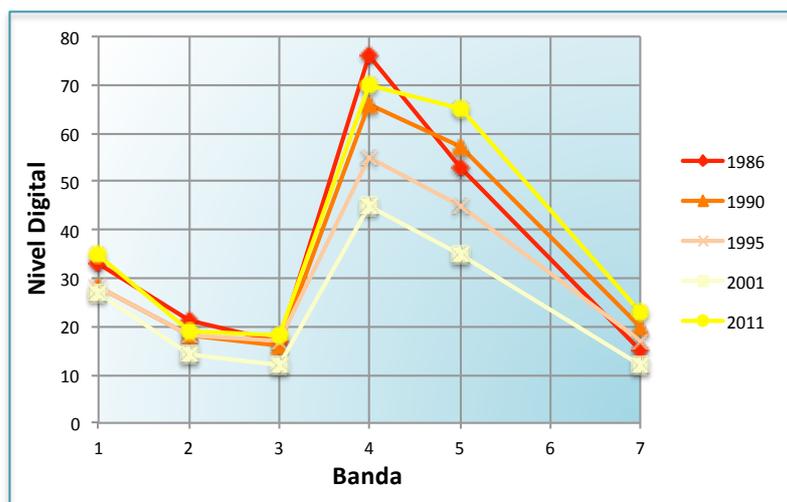


Figura 99. Gráfica ND sitio de muestreo 3 Peñitas

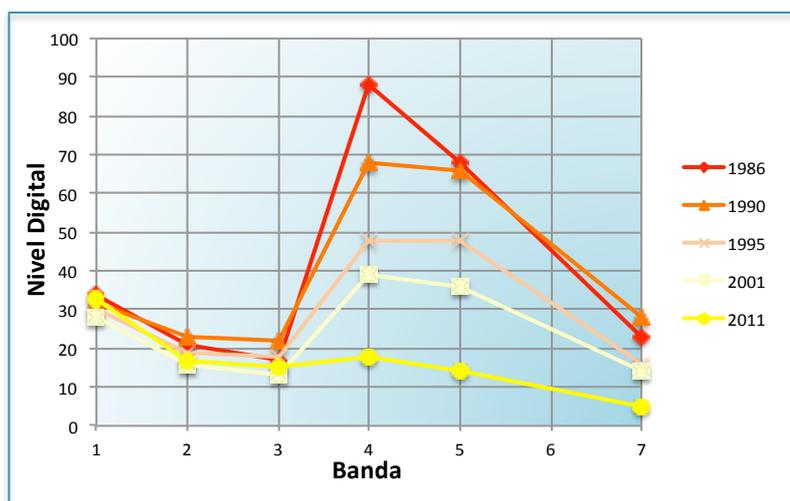


Figura 100. Gráfica ND sitio de muestreo 4 Peñitas

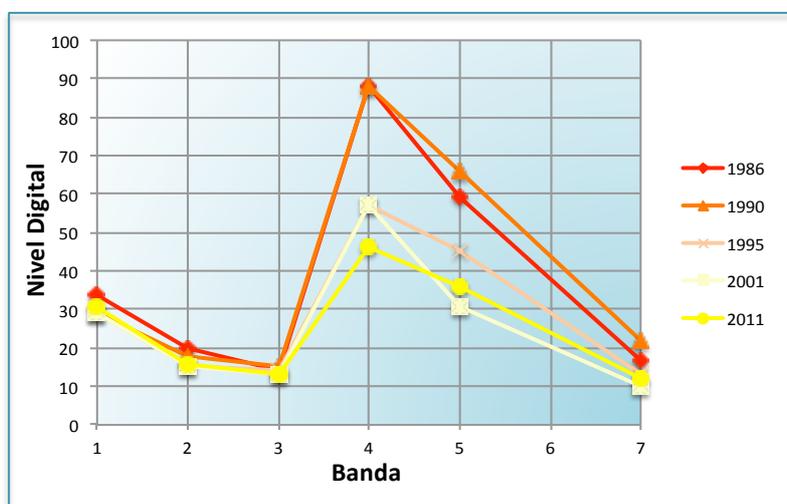


Figura 101. Gráfica ND sitio de muestreo 5 Peñitas

Las Figuras anteriores (Figura 97 a Figura 101) muestran las curvas de vegetación obtenidas en los sitios de muestreo de la presa Peñitas. Todos los puntos presentan curvas representativas de vegetación, es decir, una baja reflectancia en la región visible del espectro debido a que los pigmentos foliares, tales como la clorofila, contenidos en las hojas absorben energía fuertemente en las bandas centradas entre 0.45 y $0.67 \mu\text{m}$ y una máxima reflectancia en el IR próximo, producto de la estructura interna de las hojas.

Si la pendiente entre las bandas 3 y 4 es muy pronunciada, la vegetación estará sana y por el contrario si esta diferencia se acorta significa que la vegetación se encuentra estresada. Esta diferencia de reflectividades (como se observa) es mayor en 1986, lo cual implica que la vegetación presenta mayor vigor en este año que para los años posteriores en los que se obtuvieron datos.

Tabla 9. ND y valores NDVI de los sitios de muestreo Huites

Sitio de muestreo	Año	B1	B2	B3	B4	B5	B7	NDVI
1	1992	27	16	19	75	49	34	0.595744681
	1997	34	21	29	56	99	51	0.317647059
	2000	43	29	42	70	123	61	0.25
	2006	41	26	41	66	118	60	0.23364486
	2011	38	28	43	69	124	61	0.232142857
2	1992	23	13	15	66	56	28	0.62962963
	1997	38	25	36	81	93	47	0.384615385
	2000	54	37	52	83	128	64	0.22962963
	2006	45	31	44	79	114	55	0.284552846
	2011	47	36	56	89	138	67	0.227586207
3	1992	28	17	18	82	69	27	0.64
	1997	42	28	39	70	120	62	0.28440367
	2000	63	42	65	88	161	93	0.150326797
	2006	37	26	35	90	111	49	0.44
	2011	69	50	81	104	193	110	0.124324324
4	1992	28	19	20	69	63	27	0.550561798
	1997	52	32	49	66	157	80	0.147826087
	2000	54	37	59	78	169	90	0.138686131
	2006	57	39	63	82	172	87	0.131034483
	2011	66	47	75	107	188	99	0.175824176
5	1992	25	15	15	62	59	23	0.61038961
	1997	54	35	53	76	146	76	0.178294574
	2000	60	42	65	89	158	82	0.155844156
	2006	54	35	56	90	144	80	0.232876712
	2011	47	33	46	96	149	71	0.352112676

Los valores calculados de NDVI para los sitios de muestreo de la presa Huites (Tabla 9) muestran, también, que la vegetación en estas zonas se encuentra fuertemente estresada, ya que la mayoría de los valores luego de la interrupción del caudal son considerablemente pequeños (muy cercanos a cero) en comparación a los calculados para 1992.

Es importante mencionar que todas las imágenes utilizadas para el cálculo del NDVI en este caso pertenecen a la época de estiaje (entre los meses de abril y mayo), es decir, que las condiciones climatológicas son similares para todos los años en los que se obtuvieron resultados.

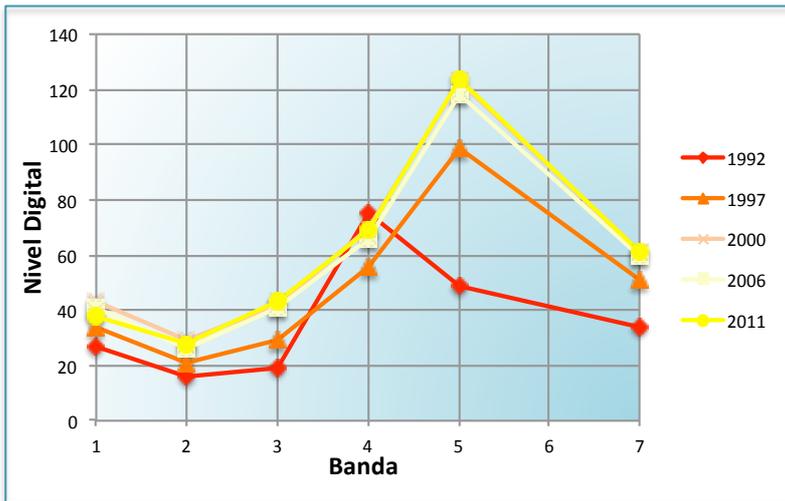


Figura 102. Gráfica ND sitio de muestreo 1 Huites

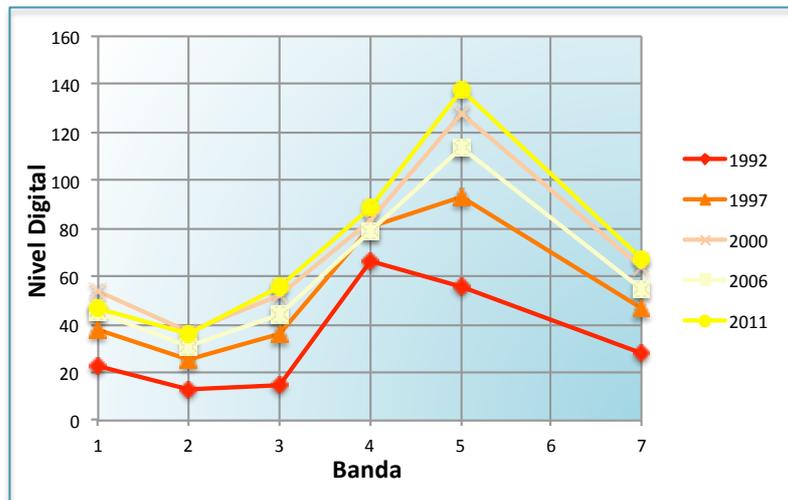


Figura 103. Gráfica ND sitio de muestreo 2 Huites

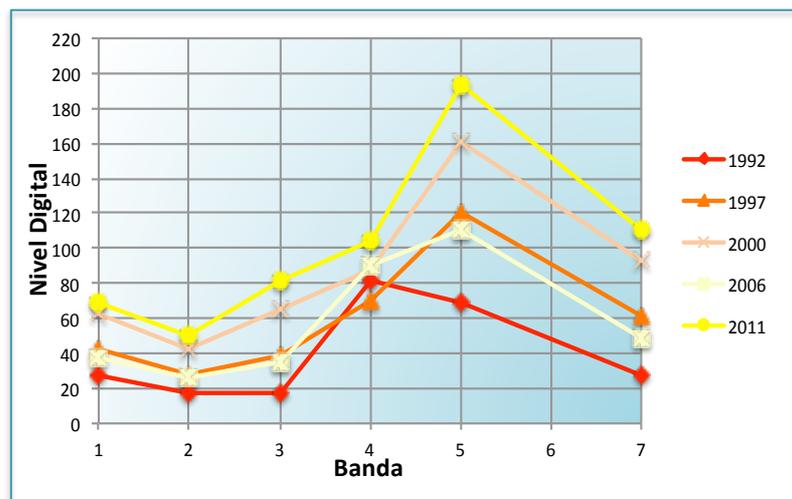


Figura 104. Gráfica ND sitio de muestreo 3 Huites

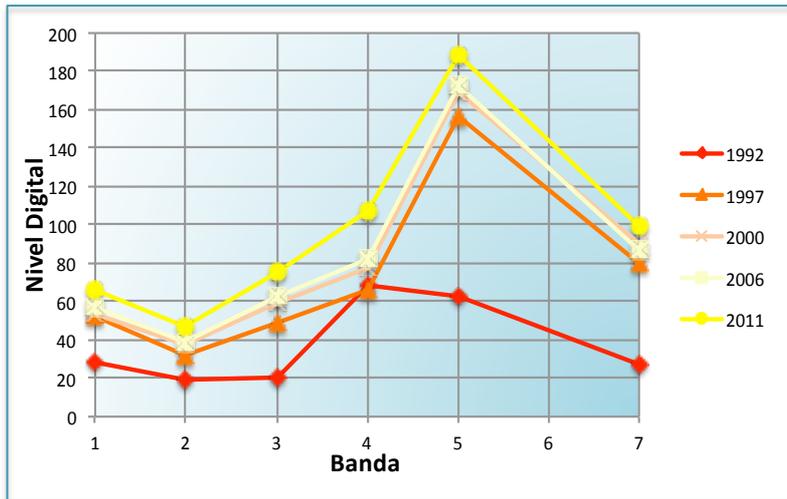


Figura 105. Gráfica ND sitio de muestreo 4 Huites

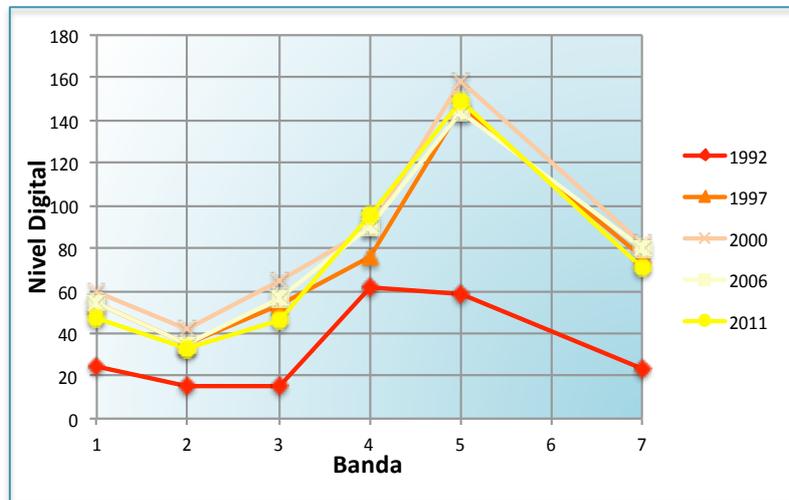


Figura 106. Gráfica ND sitio de muestreo 5 Huites

Las curvas de vegetación obtenidas para los sitios de muestreo de la presa Huites (Figura 102 a Figura 106) muestran un comportamiento característico de la vegetación únicamente para el año de 1992, es decir, que la reflectancia máxima se presenta en el IR próximo. En los años posteriores se puede apreciar una mayor reflectancia en la Banda 5 (IR lejano) que en la Banda 4 (IR próximo). Esta conducta podría ser un indicador de que la energía reflejada por el suelo es mayor que la reflejada por la vegetación ya que esta se encuentra muy estresada o ha perdido cobertura.

La alteración de la calidad del agua es otro fenómeno a tomar en cuenta para este trabajo. Para el siguiente análisis se obtuvieron los ND de cada banda espectral para cada sitio de muestreo (Figura 107 y Figura 108) y fueron graficados para facilitar su interpretación. Las tablas y figuras de los datos obtenidos para dichos puntos se muestran más adelante.

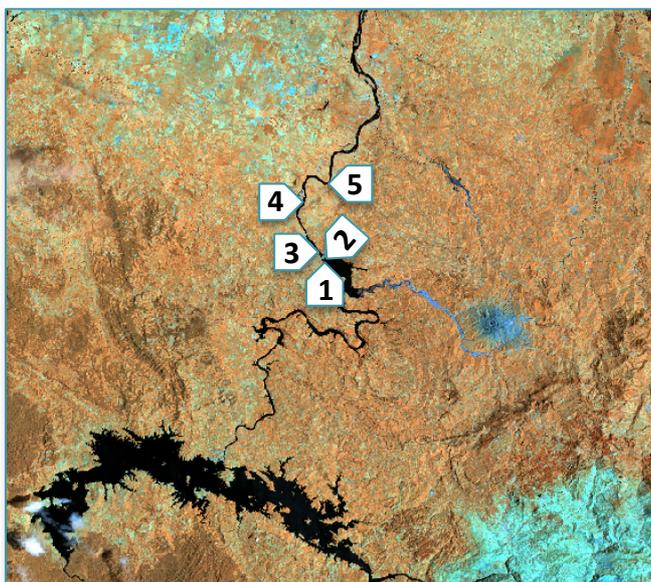


Figura 107. Sitios de muestreo para el análisis de calidad del agua Peñitas

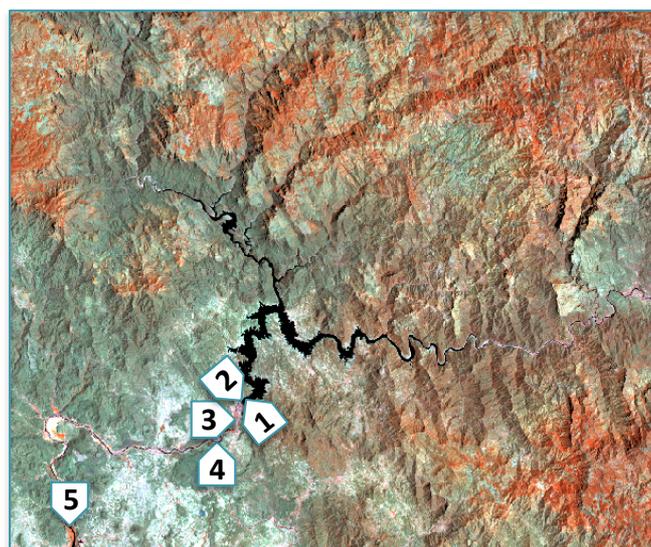


Figura 108. Sitios de muestreo para el análisis de calidad del agua Huites

Tabla 10. ND de los sitios de muestreo para el análisis de calidad del agua (Presa Peñitas)

Sitio de muestreo	Año	B1	B2	B3	B4	B5	B7
1	1986	36	20	18	11	6	4
	1990	29	15	10	10	9	6
	1995	28	13	11	7	7	4
	2001	23	10	6	8	6	4
	2011	27	12	11	13	8	5
2	1986	35	21	18	10	12	6
	1990	28	15	10	10	8	5
	1995	28	14	11	7	8	5
	2001	22	10	7	7	6	4
	2011	28	12	10	13	13	4
3	1986	37	21	17	11	9	5
	1990	24	12	8	9	8	5
	1995	27	14	10	9	11	5
	2001	25	12	8	10	9	4
	2011	32	16	13	20	14	8
4	1986	39	21	18	12	6	3
	1990	27	15	9	8	8	5
	1995	30	15	12	10	10	5
	2001	25	11	7	9	7	3
	2011	32	14	12	18	12	6
5	1986	37	21	19	13	10	6
	1990	27	14	10	10	10	5
	1995	28	14	12	11	9	4
	2001	28	13	10	11	10	6
	2011	32	15	12	18	12	9

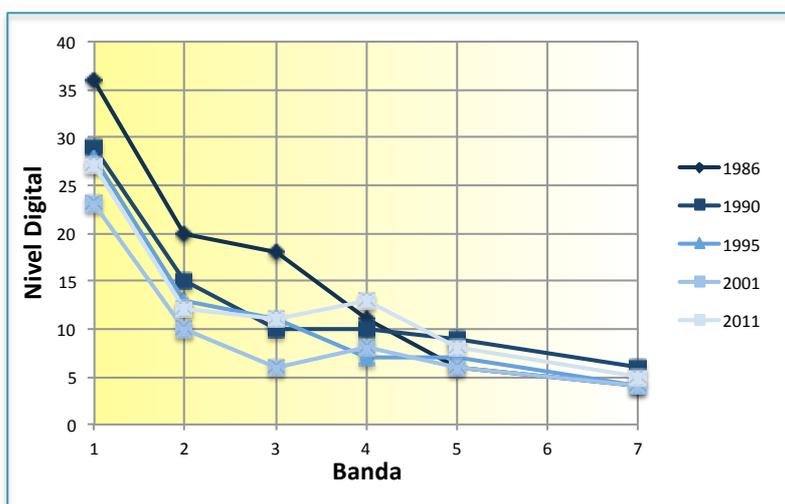


Figura 109. Gráfica ND sitio de muestreo 1 Peñitas

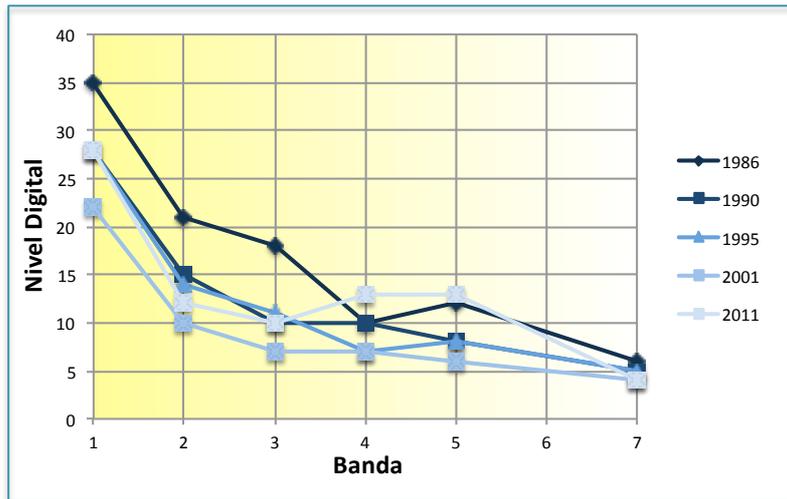


Figura 110. Gráfica ND sitio de muestreo 2 Peñitas

Los sitios de muestreo 1 y 2 son puntos que se encuentran dentro del embalse de la presa Peñitas. La curva obtenida para 1986 en estos puntos (Figura 109 y Figura 110) es característica de un cuerpo de agua léntico; la reflectividad en el rango visible del espectro es mayor en este año debido, posiblemente, a una mayor carga de velocidad. En los años posteriores la reflectividad en esta región es menor debido a la sedimentación causada por la disminución de la carga de velocidad y el incremento del tirante. Si se observa la diferencia de reflectividades entre las bandas espectrales 3 y 4, se aprecia un cambio de pendiente de 1986 a 2011. Esto podría indicar que en el embalse se está originando el proceso de eutroficación producto del aumento de nutrientes en el agua.

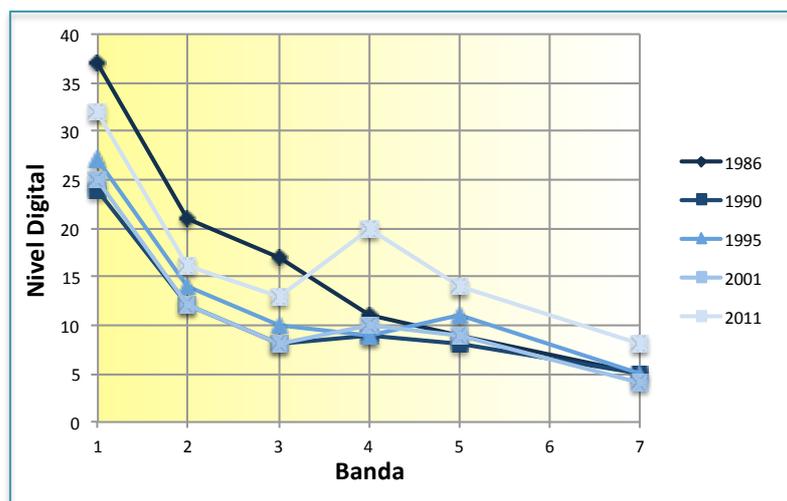


Figura 111. Gráfica ND sitio de muestreo 3 Peñitas

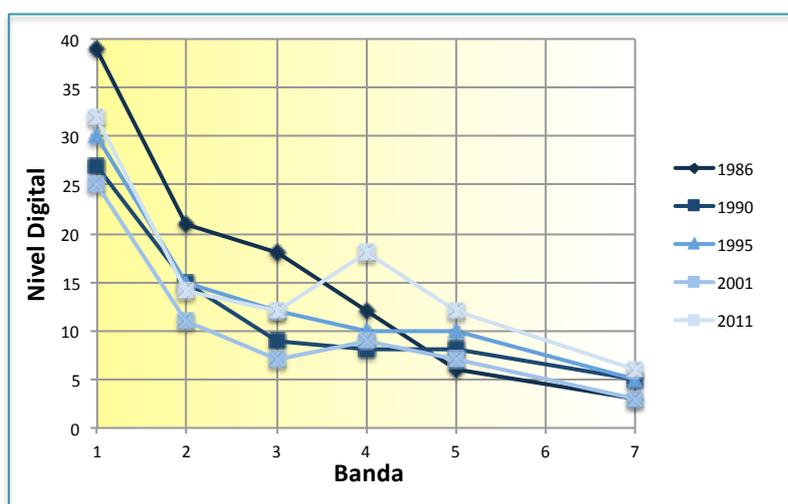


Figura 112. Gráfica ND sitio de muestreo 4 Peñitas

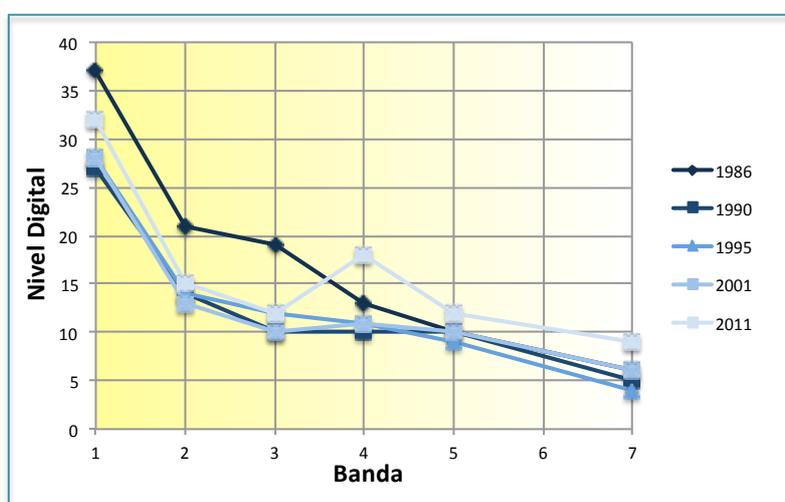


Figura 113. Gráfica ND sitio de muestreo 5 Peñitas

Los sitios de muestreo 3, 4 y 5 se encuentran aguas abajo de la cortina de la presa Peñitas. La alta reflectancia que presentan estos puntos (Figura 111 a Figura 113) en el rango visible del espectro se debe, muy probablemente, a los sólidos en suspensión ocasionados por el arrastre de suelos. Al reducirse el caudal del río la velocidad del flujo también lo hace y consecuentemente el arrastre de suelos será menor. De acuerdo con lo anterior es posible asumir que el decremento de la reflectancia en las bandas 1, 2 y 3 en comparación a la registrada para 1986, se debe a una menor carga de velocidad en el flujo del río.

La disminución de la velocidad también involucra una mayor temperatura del agua, lo cual implica una mayor actividad de descomposición de la materia orgánica, que puede causar una disminución del contenido de oxígeno disuelto (Guillén and Palanques 1992). Entonces, se puede concluir que el cambio de pendiente entre las bandas 3 y 4 (una mayor absorbancia en la banda 3 y una mayor reflectancia en la banda 4 para 2011 y no así para 1986) podría indicar que en el río se encuentra presente una mayor cantidad de algas u organismos vegetales en suspensión.

Tabla 11. ND de los sitios de muestreo para el análisis de calidad del agua Huites

Sitio de muestreo	Año	B1	B2	B3	B4	B5	B7
1	1992	44	28	34	8	11	8
	1997	19	11	8	4	7	4
	2000	19	15	9	4	6	5
	2006	15	6	5	5	6	5
	2011	12	7	5	6	7	5
2	1992	44	30	36	10	13	10
	1997	20	11	10	5	9	6
	2000	22	16	11	5	8	7
	2006	14	7	6	6	8	6
	2011	16	9	6	6	10	6
3	1992	46	29	34	10	10	9
	1997	18	9	10	4	11	7
	2000	20	12	11	5	11	8
	2006	17	11	13	9	15	9
	2011	35	24	20	7	12	6
4	1992	43	28	34	8	11	7
	1997	19	13	14	2	14	10
	2000	20	10	8	3	7	6
	2006	16	9	8	6	14	11
	2011	31	24	19	7	11	8
5	1992	38	28	35	4	4	5
	1997	23	15	17	6	8	6
	2000	28	17	21	9	13	11
	2006	29	22	24	9	8	6
	2011	17	11	10	9	11	7

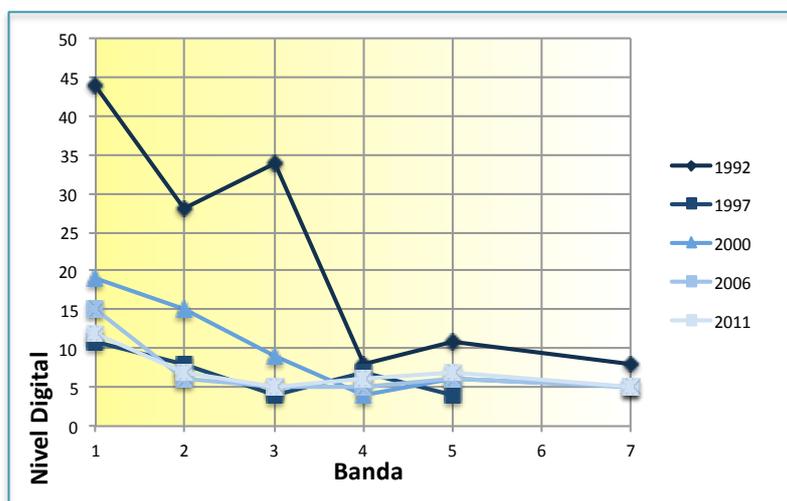


Figura 114. Gráfica ND sitio de muestreo 1 Huites

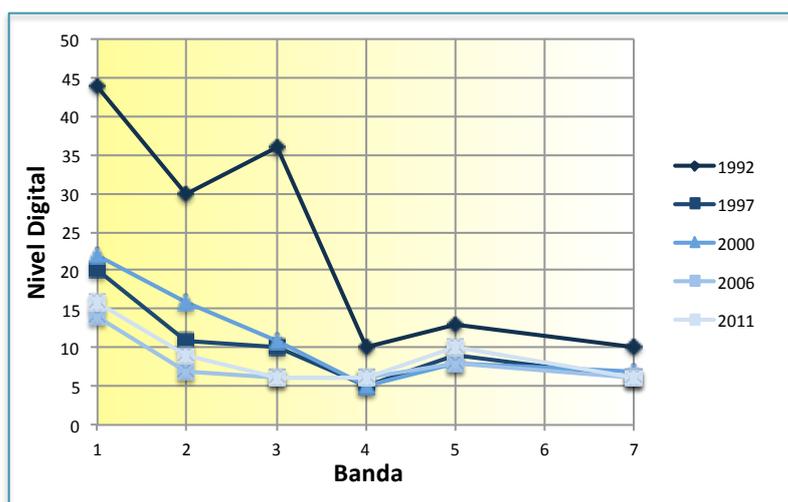


Figura 115. Gráfica ND sitio de muestreo 2 Huites

Las gráficas anteriores (Figura 114 y Figura 115) muestran las curvas obtenidas en los sitios de muestreo 1 y 2, respectivamente, para el análisis de calidad del agua de la presa Huites. Estos puntos están ubicados en el interior de dicho embalse. La alta reflectancia para 1992 en la región visible del espectro puede deberse al arrastre de sedimentos inorgánicos. La reflectancia en esta región es menor en los años siguientes a consecuencia del aumento del tirante y probablemente por la sedimentación de sólidos en suspensión. Si se observa la diferencia de reflectividades entre las bandas 3 y 4 se logra distinguir un cambio de pendiente entre 1992 y 2011. Lo anterior podría indicar que el proceso de eutroficación comienza a abrirse camino en el embalse de la presa Huites.

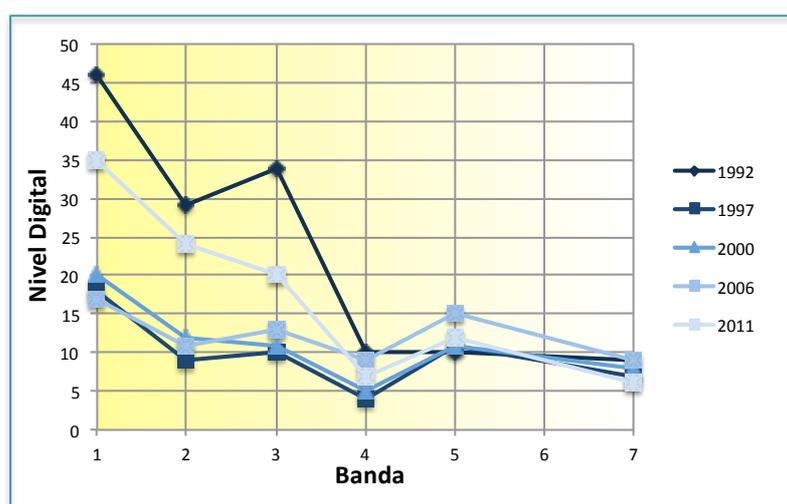


Figura 116. Gráfica ND sitio de muestreo 3 Huites

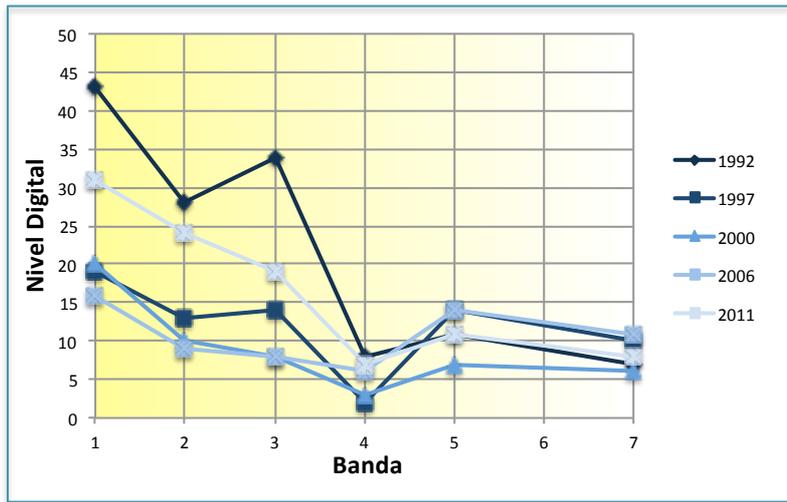


Figura 117. Gráfica ND sitio de muestreo 4 Huites

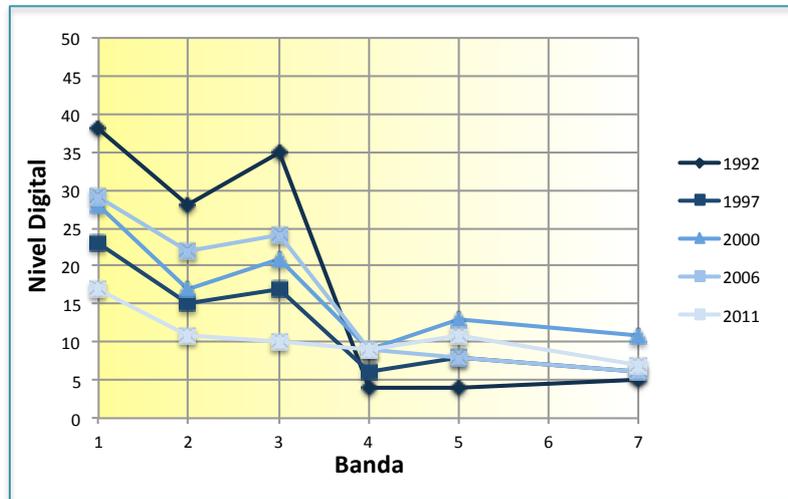


Figura 118. Gráfica ND sitio de muestreo 4 Huites

Las Figuras anteriores (Figura 116 a Figura 118) muestran las curvas obtenidas en los sitios de muestreo aguas abajo de la presa Huites. La alta reflectancia en el rango visible del espectro se debe posiblemente a los sólidos en suspensión que se encuentran presentes en el agua. La reflectancia en esta región es mayor en comparación a la registrada para los años siguientes del estudio debido a una mayor velocidad en el flujo y por tanto, un mayor arrastre de suelos.

Interpretación de resultados

Mediante el análisis visual fue posible observar algunas características físicas en imágenes de diferentes fechas; con la ayuda de la composición en falso color RGB = 742 se pudo apreciar una disminución del caudal en los dos casos de estudio y con la composición en falso color RGB = 432 se pudo comparar la cobertura vegetal al pie de la cortina de la presa Peñitas. Asimismo, mediante el análisis digital se compararon los parámetros de NDVI y calidad del agua. Para el primer parámetro se observó un decremento en los valores del índice en todos los sitios de muestreo después de la construcción de los embalses, esta disminución en los valores de NDVI se interpretó como una pérdida de vigor en la vegetación. Con respecto al segundo parámetro, se observó un cambio en la calidad del agua después de la construcción de cada presa.

Para el caso de estudio presa Peñitas fue imposible adquirir imágenes que pertenecieran al periodo entre 2002 y 2010 ya que en la base de datos de la plataforma Landsat 5 no existen imágenes disponibles para su descarga. Esto impidió observar con mayor claridad el comportamiento de los parámetros analizados en este documento. A pesar de ello, lo descrito anteriormente indica que se cumplió satisfactoriamente con el objetivo propuesto en el presente trabajo.

Conclusiones y recomendaciones

La percepción remota ha demostrado ser una potente herramienta de análisis espacial y temporal con diversas aplicaciones en el campo de la ingeniería ambiental ya que permite cubrir grandes extensiones de terreno y al mismo tiempo particularizar en alguna zona u objeto de interés.

A través de esta técnica se lograron evaluar cuantitativa y cualitativamente algunos de los impactos ocasionados en el ambiente por la construcción y operación de las presas analizadas en este documento, permitiendo tener una mayor visión sobre los efectos a corto, mediano y largo plazo que pueden provocar estas obras. Es importante mencionar que la metodología aplicada en este estudio es posible replicarla para otros casos afines.

De acuerdo a la información presentada en el análisis visual de imágenes para este trabajo se puede decir que la construcción de grandes presas tiene un impacto negativo inmediato en el ambiente generado por las actividades de desmonte y despalme. Lo anterior puede traducirse como la pérdida de cobertura vegetal en el terreno natural durante el periodo constructivo del proyecto. Esta pérdida de cobertura vegetal, como se observó en el caso de estudio “Presa Peñitas”, toma varios años para su recuperación.

También pudo probarse mediante el análisis digital que la reducción del caudal asociado a la realización de una presa afecta las características físicas e hidrológicas del tramo del río aguas abajo de la cortina. Estos cambios implican una modificación de parámetros como el nivel del agua y la velocidad, así como alteraciones en el sustrato, la temperatura y el contenido de nutrientes en el agua, que son determinantes para las comunidades biológicas, que en última instancia se ven alteradas de distintas formas.

La metodología descrita en este trabajo no forma parte del Reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección Ambiental como recomendación para realizar las inspecciones ambientales, sin embargo este procedimiento resulta una opción con muchas ventajas para el monitoreo ambiental, debido a su bajo costo y la gran cobertura de terreno si necesidad de realizar una visita de campo.

Bajo el panorama actual, existen algunas medidas que se podrían implementar para impulsar una mayor protección del ambiente y de los derechos humanos, así como para evitar el empeoramiento de la situación presente. A continuación se presentan algunas sugerencias de acción:

-
- Promover políticas públicas que motiven el uso eficiente de la energía y del agua, y que fomenten el desarrollo de energías alternativas verdaderamente limpias, que sean menos dañinas que las grandes presas;
 - Evaluar de manera integral los proyectos actuales y futuros que impliquen la construcción de grandes represas, para diagnosticar las alternativas posibles a la producción de energía y el manejo de los recursos hídricos;
 - Crear e implementar adecuadamente procedimientos que garanticen una participación pública oportuna, integral y efectiva a las comunidades y personas interesadas en todas las etapas de la planificación e implementación de los proyectos de grandes represas, particularmente en relación con poblaciones que serán desplazadas y comunidades indígenas y de campesinos;
 - Requerir en la legislación nacional que los estudios de impacto ambiental y social se adecuen a los estándares y normas internacionales sobre el tema, y que se realicen de una manera rigurosa por entidades independientes, que evalúen la totalidad de los impactos acumulativos y de largo plazo de los proyectos, incluyendo impactos al cambio climático, los ecosistemas, afectaciones sísmicas y alternativas posibles;
 - Realizar inspecciones en las presas que se encuentran en operación para verificar que se esté dejando correr el gasto ecológico, y de no cumplir con lo anterior las autoridades deberán aplicar las sanciones apropiadas a los involucrados.
 - Desarrollar proyectos energéticos que sean verdaderamente necesarios, con un enfoque de derechos humanos y de protección ambiental, y que consideren los beneficios y alternativas a corto, mediano y largo plazo.

Bibliografía citada

- AIDA. *Grandes Represas en América ¿Peor el Remedio que la Enfermedad?*. AIDA, 2009.
- Aldalur, B., and M. Santamaría. «Realce de imágenes: filtrado espacial.» *Revista de Teledetección*, no. 17 (2002): 31-42.
- Arbelo, Manuel. "Tutorial de Teledetección." *Página personal del Doctor Arbelo*. 2004. <http://webpages.ull.es/users/marbelo/rs1.pdf>
- Cetto, Ana María. *La Luz en la Naturaleza y el Laboratorio*. México, D.F.: Fondo de Cultura Económica, 1996.
- De Jong, Steven. *Remote Sensing Image Analysis, Including the Spatial Domain*. New York: Springer Science, 2005.
- Dynesius, M. and Nilsson, C. *Fragmentation and flow regulation of river systems in the northern third of the world*. *Science* 266, 1994: 753-762.
- Elachi, Charles, and Jakob van Zyl. *Introduction to the Physics and Techniques of Remote Sensing*. 2a Edición. New Jersey: John Wiley & Sons, 2006.
- Guillén, J. and Palanques, A. *Sediment dynamics and hydrodynamics in the lower course of a river highly regulated by dams: the Ebro river*. *Sedimentology* 39, 1992: 567-579.
- Indian Space Research . *ISRO*. 2011. <http://www.isro.org/>
- Khorram, Siamak, Koch ,Frank H., van der Wiele, Cynthia F. And Nelson Stacy A. *Remote Sensing*. Springer,2012.
- Lillesand, and Kiefer. *Remote Sensing and Image Interpretation*. USA: John Wiley and Sons, 1979.
- Olgún Ortiz, Miriam. *Fotografía del siglo XIX, principios del XX, Mujeres Productoras*. D.F.: UNAM, ENAP, 2008.
- Olmanson, Leif. "Use of Landsat Imagery to develop a Water Quality Atlas of Minnesota's 10,000 Lakes." *Pecora 15/Land Satellite Information IV/ISPRS Commission I/FIEOS*. Minnesota: University of Minnesota, 2002.
- Rees, Gareth. *Physical Principles of Remote Sensing*. Cambridge: Cambridge University Press, 2001.
- Richards, John A., and Xiuping Jia. *Remote Sensing Digital Image Analysis*. Cuarta edición. Springer, 2006.

Ruiz, Ma. del Rosío. *Análisis multitemporal de atributos y zonificación de áreas de inundación utilizando técnicas de percepción remota (Tesis doctoral)*. México, D.F.: UNAM, 2002.

Schowengerdt, Robert. *Remote Sensing: Models and Methods for Image Processing*. San Diego, California: Elsevier, 2007.

Sepúlveda, Rodrigo T. *Diseño de Modelos de Calidad del Agua Mediante el Uso de la Percepción Remota*. Tesis para obtener el grado de Maestro en Ingeniería. México, D.F.: UNAM, 2011.

Universidad de Umeå. *Fragmentación de Ríos y Regulación del Caudal*. Umeå, Suecia: Universidad de Umeå, 2010.

Vázquez, Alba. *Evaluación de la Calidad del Agua Mediante Percepción Remota*. Tesis para obtener el grado de Maestra en Ingeniería. México, D.F.: UNAM, 2000.

Anexo 1

Datos de los principales sensores y plataformas

LANDSAT 1-3		
Fecha de lanzamiento y término de operación	1: 23/07/1972 - 06/01/1978 2: 22/01/1975 - 25/02/1982 3: 05/03/1978 - 30/11/1982	
Sensor	MSS (MultiSpectral Sensor)	
Órbita	918 km, polar, sincronización solar	
Tamaño de escena	185 x 185 km	
Tiempo de regreso	18 días	
Ámbito Dinámico	8 bits	
Resolución espacial	79 m	
Resolución espectral	4	0.5-0.6 μm
	5	0.6-0.7 μm
	6	0.7-0.8 μm
	7	0.8-1.10 μm

LANDSAT 4-5		
Fecha de lanzamiento y término de operación	4: 16/07/1982 - 02/1983 5: 01/03/1984 - ¿?	
Sensor	MSS (Multi Spectral Sensor) TM (Thematic Mapper)	
Orbita	710 km, polar, sincronización solar	
Tamaño de escena	185 x 185 km	
Tiempo de regreso	16 días	
Ámbito Dinámico	8 bits	
Resolución espacial	30 m (canal 6 TM: 120m)	
Resolución espectral MSS	4	0.5-0.6 μm
	5	0.6-0.7 μm
	6	0.7-0.8 μm
	7	0.8-1.10 μm
Resolución espectral TM	1 (Azul)	0.45-0.52 μm
	2 (Verde)	0.52-0.60 μm
	3 (Rojo)	0.63-0.69 μm
	4 (IR próximo)	0.76-0.90 μm
	5 (IR lejano)	1.55-1.75 μm
	6 (Térmico lejano)	10.4-12.5 μm
	7 (Térmico próximo)	2.08-2.35 μm

LANDSAT 7																	
Fecha de lanzamiento	15 Abril 1999																
Sensor	ETM + (enhanced thematic mapper plus)																
Órbita	705 +/- 5 km (en el ecuador) sincronización solar																
Inclinación de órbita	98.2° +/- 0.15																
Tiempo de órbita alrededor de la tierra	98.9 minutos																
Capacidad de almacenamiento a bordo	375 GB																
Altitud	705 kilómetros																
Tamaño de escena	185 x 185 km																
Tiempo de cruce por el Ecuador	Descendente; 10:00am +/- 15 min																
Tiempo de regreso	16 días (233 órbitas)																
Ámbito dinámico	8 bits																
Resolución espacial	30 m; banda 6: 60m (térmico); pan 15m																
Resolución espectral	<table border="0"> <tr><td>1 (Azul)</td><td>0.450-0.515 μm</td></tr> <tr><td>2 (Verde)</td><td>0.525-0.605 μm</td></tr> <tr><td>3 (Rojo)</td><td>0.630-0.690 μm</td></tr> <tr><td>4 (IR próximo)</td><td>0.775-0.900 μm</td></tr> <tr><td>5 (IR lejano)</td><td>1.550-1.750 μm</td></tr> <tr><td>6 (Térmico lejano)</td><td>10.40-12.5 μm</td></tr> <tr><td>7 (Térmico próximo)</td><td>2.090-2.350 μm</td></tr> <tr><td>8 (pan)</td><td>0.520-0.900 μm</td></tr> </table>	1 (Azul)	0.450-0.515 μm	2 (Verde)	0.525-0.605 μm	3 (Rojo)	0.630-0.690 μm	4 (IR próximo)	0.775-0.900 μm	5 (IR lejano)	1.550-1.750 μm	6 (Térmico lejano)	10.40-12.5 μm	7 (Térmico próximo)	2.090-2.350 μm	8 (pan)	0.520-0.900 μm
1 (Azul)	0.450-0.515 μm																
2 (Verde)	0.525-0.605 μm																
3 (Rojo)	0.630-0.690 μm																
4 (IR próximo)	0.775-0.900 μm																
5 (IR lejano)	1.550-1.750 μm																
6 (Térmico lejano)	10.40-12.5 μm																
7 (Térmico próximo)	2.090-2.350 μm																
8 (pan)	0.520-0.900 μm																

NOAA 11											
Fecha de lanzamiento	Diciembre de 1989										
Sensor	AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer)										
Órbita	850 km, polar, sincronización solar										
Periodo de órbita	102 minutos										
Tamaño de escena	2800*2800 km										
Tiempo de regreso	4 días										
Resolución espacial	1100 m										
Resolución espectral	<table border="0"> <tr><td>1</td><td>0.58-0.68 μm</td></tr> <tr><td>2</td><td>0.72-1.10 μm</td></tr> <tr><td>3</td><td>3.55-3.93 μm</td></tr> <tr><td>4</td><td>10.3-11.3 μm</td></tr> <tr><td>5</td><td>11.5-12.5 μm</td></tr> </table>	1	0.58-0.68 μm	2	0.72-1.10 μm	3	3.55-3.93 μm	4	10.3-11.3 μm	5	11.5-12.5 μm
1	0.58-0.68 μm										
2	0.72-1.10 μm										
3	3.55-3.93 μm										
4	10.3-11.3 μm										
5	11.5-12.5 μm										

IKONOS											
Fecha de lanzamiento	24 de sept. de 1999										
Ubicación del lanzamiento	Vandenberg Air Force Base, California, E.E.U.U										
Vida útil esperada	Más de 7 años										
Órbita	98.1 grados, sincronización solar										
Velocidad en órbita	7.5 kilómetros por segundo										
Velocidad sobre el terreno	6.8 kilómetros por segundo										
Revoluciones alrededor de la Tierra	14.7 cada 24 horas										
Tiempo de órbita alrededor de la Tierra	98 minutos										
Altitud	681 kilómetros										
Tamaño de escena	11.3 kilómetros en nadir; 13.8 kilómetros a 26° off-nadir										
Tiempo de cruce por el Ecuador	Nominalmente 10:30 a.m. tiempo solar										
Tiempo de regreso	Aproximadamente 3 días a 40° de latitud										
Dinámica de alcance	11-bits por pixel										
Bandas	Pancromática, azul, verde, rojo, IR cercano										
Resolución espacial Nadir	0.82 metros pancromáticos; 3.2 metros multiespectrales										
Resolución espacial 26° Off-Nadir	1.0 metros pancromáticos; 4.0 metros multiespectrales										
Resolución espectral	<table border="0"> <tr> <td>Pan</td> <td>0.45-0.90 μm</td> </tr> <tr> <td>1 (Azul)</td> <td>0.445-0.516 μm</td> </tr> <tr> <td>2 (Verde)</td> <td>0.506-0.595 μm</td> </tr> <tr> <td>3 (Rojo)</td> <td>0.632-0.698 μm</td> </tr> <tr> <td>4 (IR próximo)</td> <td>0.757-0.853 μm</td> </tr> </table>	Pan	0.45-0.90 μm	1 (Azul)	0.445-0.516 μm	2 (Verde)	0.506-0.595 μm	3 (Rojo)	0.632-0.698 μm	4 (IR próximo)	0.757-0.853 μm
Pan	0.45-0.90 μm										
1 (Azul)	0.445-0.516 μm										
2 (Verde)	0.506-0.595 μm										
3 (Rojo)	0.632-0.698 μm										
4 (IR próximo)	0.757-0.853 μm										

QUICKBIRD	
Fecha de lanzamiento	18 de Octubre del 2001
Ubicación del lanzamiento	Vandenberg Air Force Base, California, E.E.U.U
Vida útil esperada	Más de 5 años
Inclinación de órbita	97.2°, sincronización solar
Velocidad en órbita	7.1 Km/segundos - 25,560 Km/hora
Tiempo de órbita alrededor de la tierra	93.5 minutos
Altitud	450 kilómetros
Exactitud métrica	23-metros horizontal (CE90%)
Tamaño de escena	16.5 Km x 16.5 Km a nadir
Tiempo de cruce por el Ecuador	10:30 a.m. (nódulo en descenso)
Tiempo de regreso	1-3.5 días dependiendo en latitud (30° off-nadir)
Ámbito Dinámico	11-bits por pixel
Resolución espacial	Pan: 61 cm (nadir) a 72 cm (25° off-nadir) MS: 2.44 m (nadir) a 2.88 m (25° off-nadir)
Resolución espectral	Pan: 450 - 900 nm Azul: 450 - 520 nm Verde: 520 - 600 nm Roja: 630 - 690 nm IR Próx 760 - 900 nm

METEOSAT MSG-1	
Fecha de lanzamiento	28/08/2002
Sensor	SEVIRI (Spinning Enhanced Visible & Infrared Imager) GERB (Geostationary Earth Radiation Budget)
Periodo de órbita	Geosíncrono
Tiempo de toma	15 min
Resolución espacial	1000 m
Resolución espectral	SEVIRI VIS 0,6 0,56 - 0,71 μ m VIS 0,8 0,74 - 0,88 μ m IR 1,6 1,50 - 1,78 μ m IR 3,9 3,48 - 4,36 μ m IR 8,7 8,30 - 9,10 μ m IR 10,8 9,80 - 11,80 μ m IR 12,0 11,00 - 13,00 μ m WV 6,2 5,35 - 7,15 μ m WV 7,3 6,85 - 7,85 μ m IR 9,7 9,38 - 9,94 μ m IR 13,4 12,40 - 14,40 μ m High Res VIS,1 km : HRV 0,5 - 0,9 μ m

SPOT 5	
Fecha de lanzamiento	3 de mayo del 2002
Vehículo utilizado	Ariane 4
Ubicación del lanzamiento	Guiana Space Centre, Kourou, French Guyana
Sensor	HRV (Haute Resolution Visible) (x2)
Altitud de órbita	822 Km
Inclinación de órbita	98.7º, sincronización solar
Velocidad	7.4 Km/segundos - 26,640 Km/hora
Horario de cruce por el Ecuador	10:30 a.m. (nódulo en descenso)
Periodo Orbital	101.4 minutos
Tiempo de regreso	2-3 días dependiendo en latitud
Tamaño de escena	60 Km x 60 Km to 80 Km a nadir
Exactitud métrica	<50-m de exactitud en posición horizontal (CE90%)
Digitalización	8 Bits
Resolución espacial	Pan: 2.5m de 2 x 5m escenas Pan: 5m (nadir) MS: 10m (nadir) SWI: 20m (nadir)
Bandas de imagen	Pan: 480 - 710 nm Verde: 500 - 590 nm Roja: 610 - 680 nm Cerca IR: 780 - 890 nm Onda corta IR: 1,580 - 1,750 nm

ERS 1		
Fecha de lanzamiento y término de operación	17/07/1991 - 10/03/2000	
Sensor	SAR (Synthetic Aperture Radar) ATSR	
Órbita	780 km, polar, sincronización solar	
Tamaño de escena	100 x 100 km	
Tiempo de regreso	35 días	
Resolución espacial	SAR: 25 m ATSR: 1000m (15m en pancromático)	
Resolución espectral	SAR	5,6 cm (banda C)
	ATSR	1 1.58-1.64 μm 2 3.55-3.93 μm 3 10.4-11.3 μm 4 11.5-12.5 μm Pancromático 0.5-0.9 μm

ERS 2		
Fecha de lanzamiento	20/04/1995	
Sensor	SAR (Synthetic Aperture Radar) ATSR-2 GOME	
Órbita	780 km, polar, sincronización solar	
Tamaño de escena	100 x 100 km, 960 km GOME	
Tiempo de regreso	35 días resp.4 días; 6 días ATSR-2; 3 días GOME	
Resolución espacial	SAR: 25 m ATSR: 1000m GOME: 320 x 40m	
Resolución espectral	SAR	5,6 cm (banda C)
	ATSR	1 1.58-1.64 μm 2 3.55-3.93 μm 3 10.4-11.3 μm 4 11.5-12.5 μm 5 0.556 μm 6 0.659 μm 7 0.865 μm
	GOME	0.25-0.79 μm

ORBVIEW 3		
Fecha de lanzamiento	26 de Junio de 2003	
Sensor	Multiespectral Pancromático	
Órbita	470 km, sincronización solar	
Tamaño de escena	8 km	
Ámbito dinámico	11 bits por pixel	
Tiempo de regreso	< 3 días	
Resolución espacial	PAN: 1m Multiespectral: 4m	
Resolución espectral	Multiespectral	Banda 1 (Blue): 0.45 - 0.52 μm Banda 2 (Green): 0.52 - 0.60 μm Banda 3 (Red): 0.625 - 0.695 μm Banda 4 (IR Próximo): 0.76 -0.90 μm
	Pancromática	0.45-0.90 μm

ENVISAT			
Fecha de lanzamiento	01/03/2002		
Sensor	ASAR MERIS AATSR GOMOS SCIAMACHY MIPAS		
Órbita	800 km, polar, sincronización solar		
Periodo orbital	100 min		
Tamaño de escena	ASAR : 100 x 100 km/variable MERIS : 1250 x 1250 km AATSR : 500 x 500 km		
Tiempo de regreso	35 días resp.4 días ASAR; 3 días MERIS; 6 días AATSR; 1 día GOMOS		
Resolución espacial	ASAR: 30 m; 50m; 1000m MERIS: 300/1200m AATSR: 1000m		
Resolución espectral	ASAR	5,6 cm (banda C)	
	MERIS	15 canales: 0.39-1.04 μm	
	AATSR	1	1.58-1.64 μm
		2	3.55-3.93 μm
		3	10.4-11.3 μm
4		11.5-12.5 μm	
5		0.556 μm	
	6	0.659 μm	
	7	0.865 μm	
	GOME	Mediciones atmosféricas	

Datos para la corrección atmosférica de las imágenes adquiridas

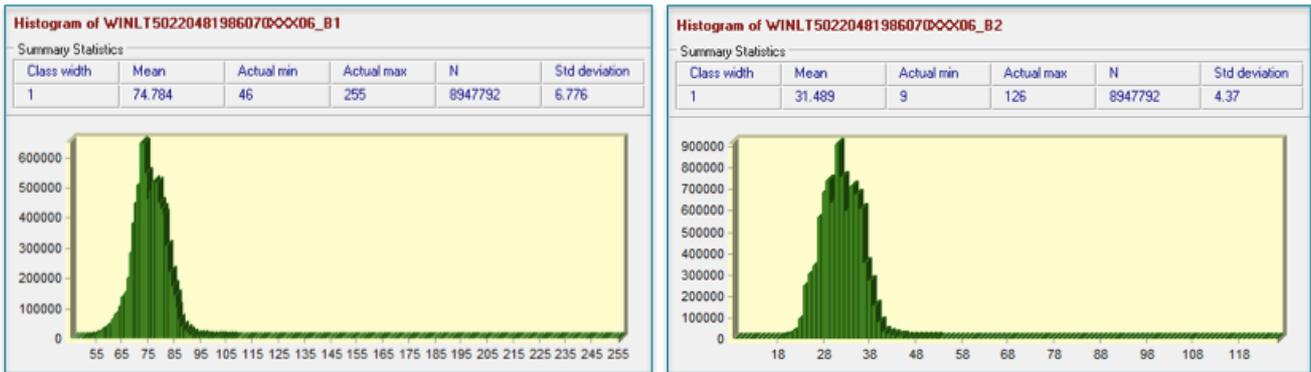


Figura A.1. Histogramas de las bandas 1 y 2 Peñitas 1986

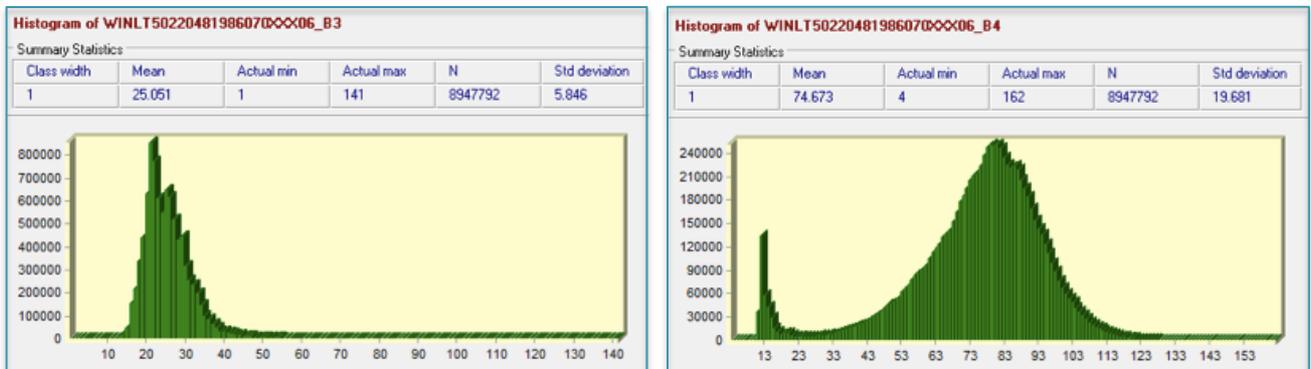


Figura A.2. Histogramas de las bandas 3 y 4 Peñitas 1986

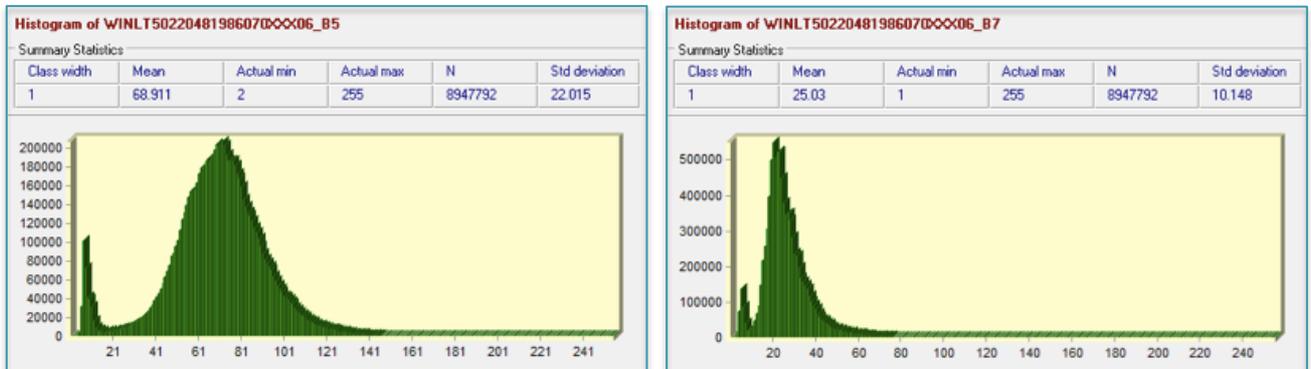


Figura A.3. Histogramas de las bandas 5 y 7 Peñitas 1986

Tabla A1. Niveles Digitales mínimos
Por banda Peñitas 1986

Valor mínimo banda 1	46
Valor mínimo banda 2	14
Valor mínimo banda 3	9
Valor mínimo banda 4	7
Valor mínimo banda 5	2
Valor mínimo banda 7	1

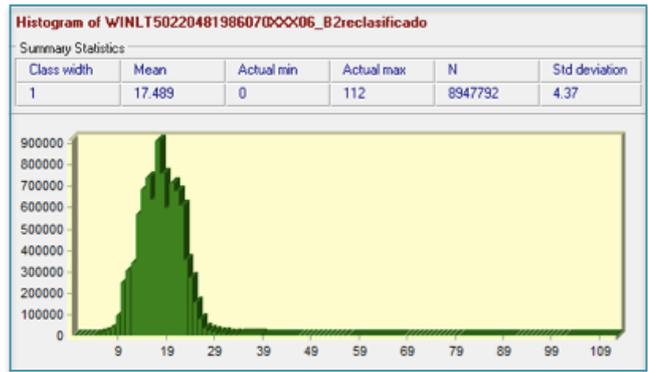
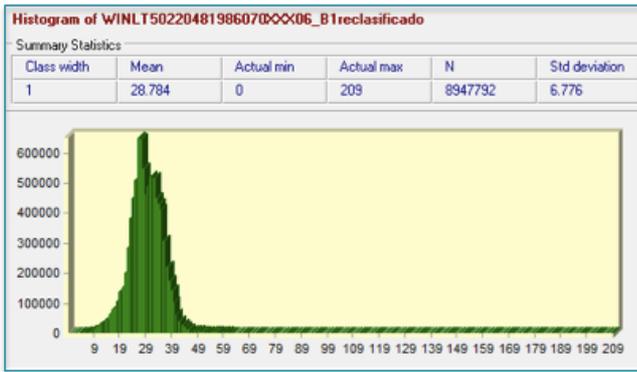


Figura A.4. Histogramas corregidos de las bandas 1 y 2 Peñitas 1986

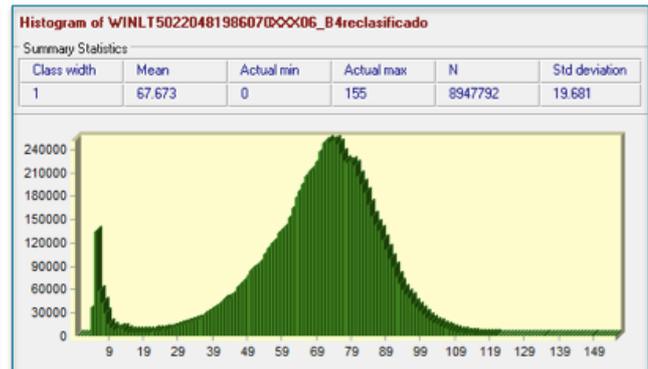
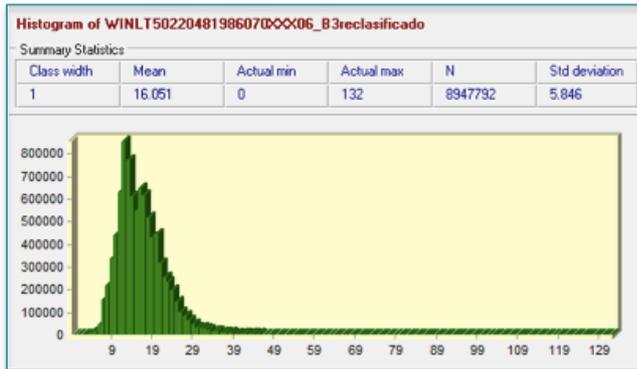


Figura A.5. Histogramas corregidos de las bandas 3 y 4 Peñitas 1986

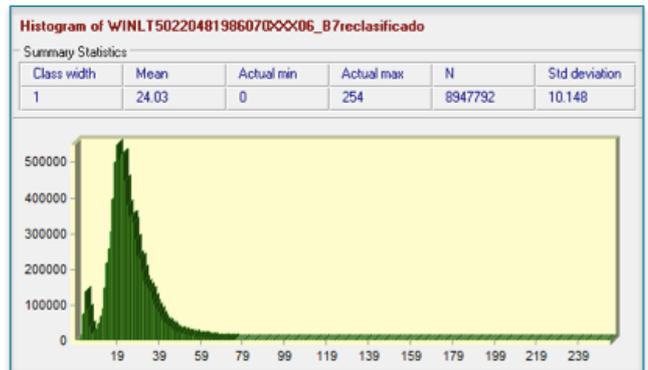
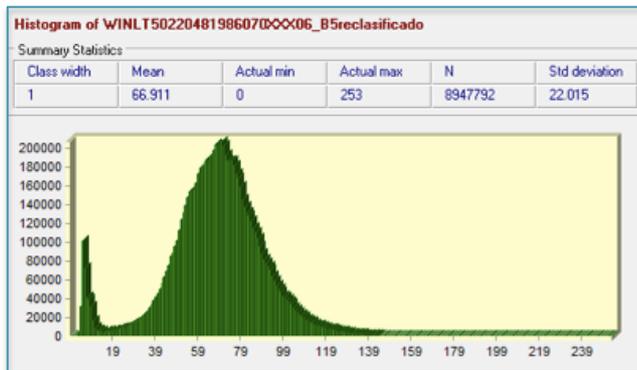


Figura A.6. Histogramas corregidos de las bandas 5 y 7 Peñitas 1986

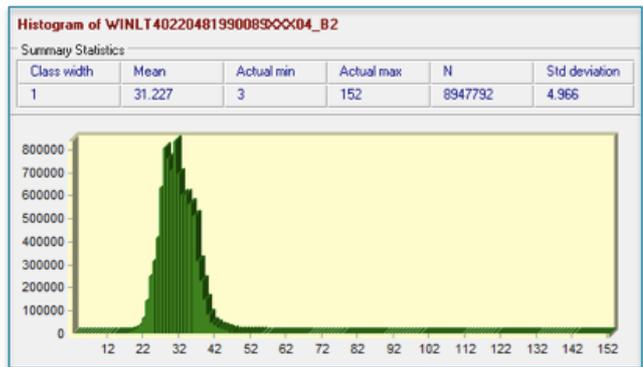
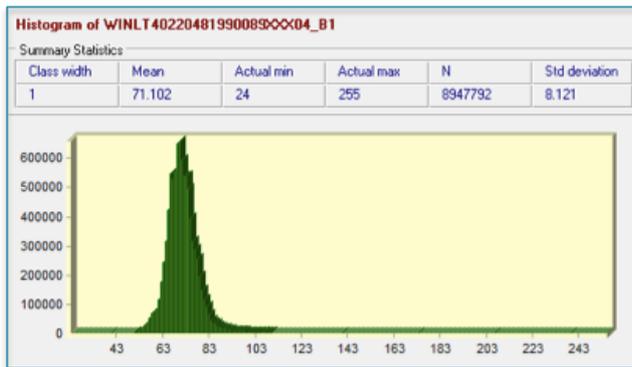


Figura A.7. Histogramas de las bandas 1 y 2 Peñitas 1990

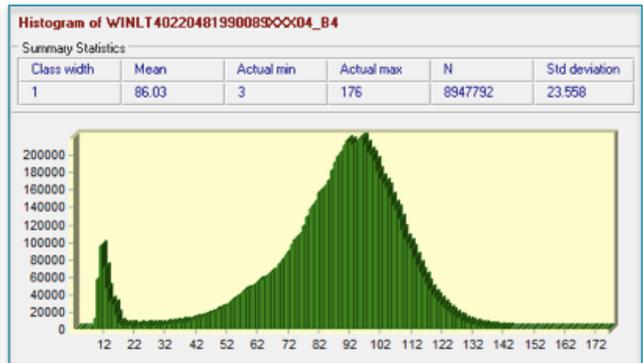
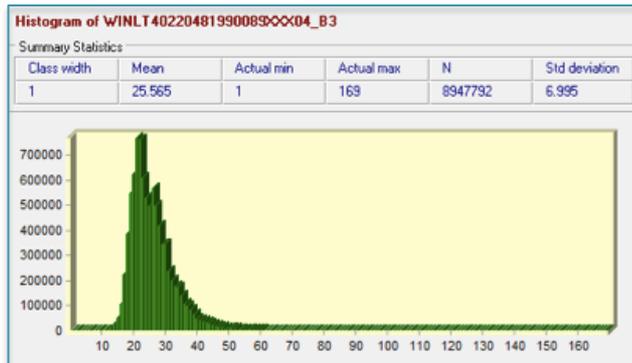


Figura A.8. Histogramas de las bandas 3 y 4 Peñitas 1990

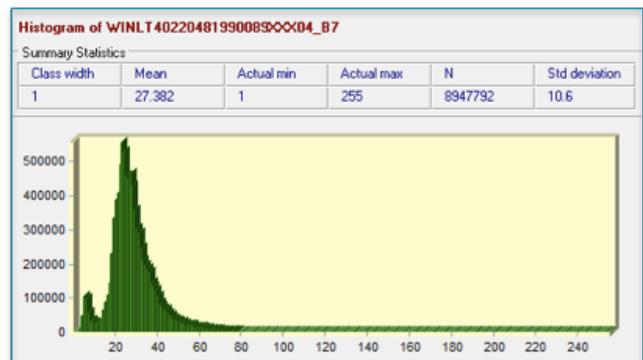
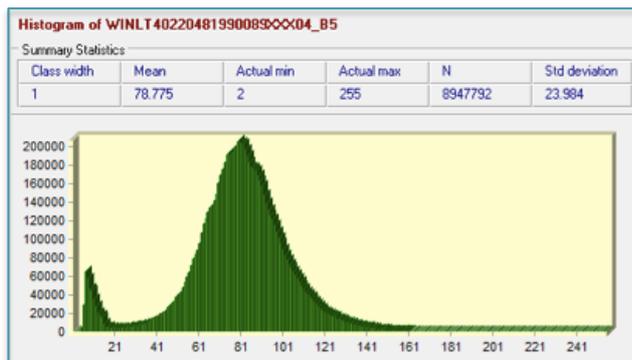


Figura A.9. Histogramas de las bandas 5 y 7 Peñitas 1990

Tabla A2. Niveles Digitales mínimos
Por banda Peñitas 1990

Valor mínimo banda 1	46
Valor mínimo banda 2	14
Valor mínimo banda 3	10
Valor mínimo banda 4	3
Valor mínimo banda 5	2
Valor mínimo banda 7	1

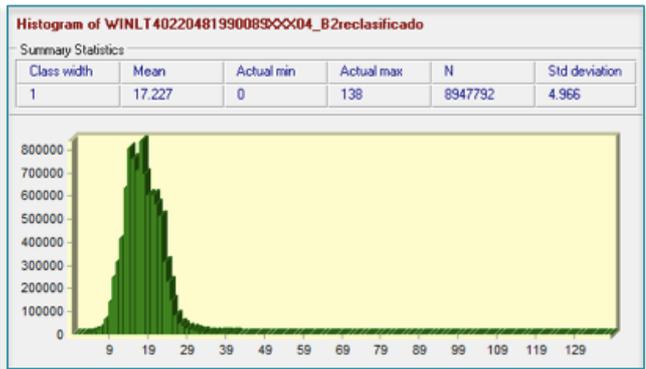
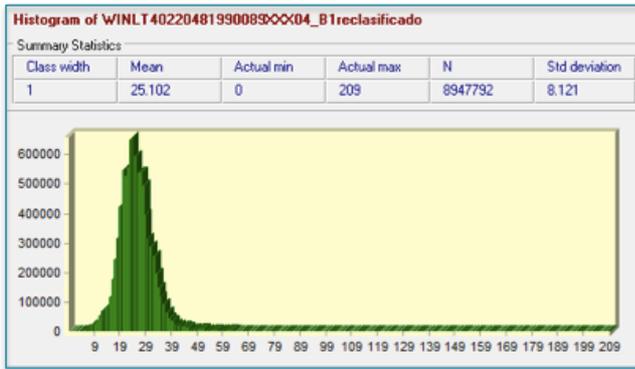


Figura A.10. Histogramas corregidos de las bandas 1 y 2 Peñitas 1990

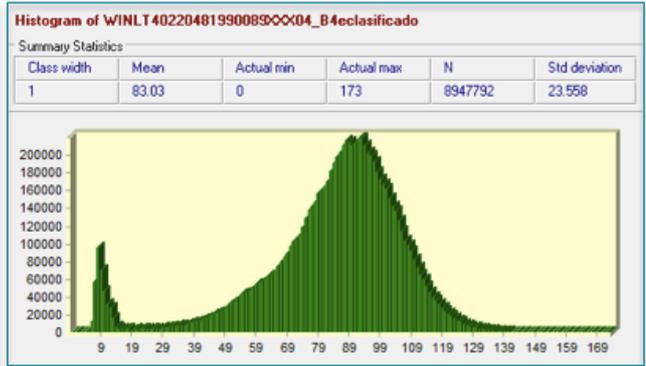
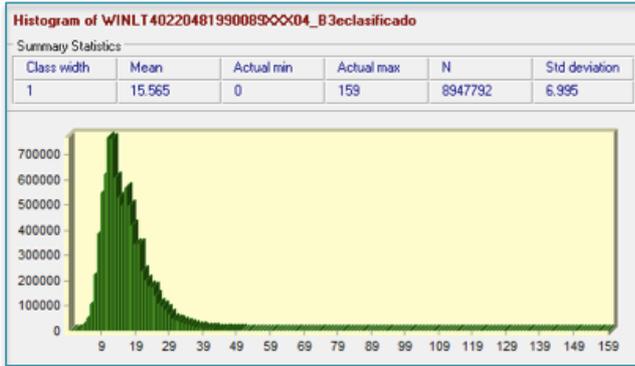


Figura A.11. Histogramas corregidos de las bandas 3 y 4 Peñitas 1990

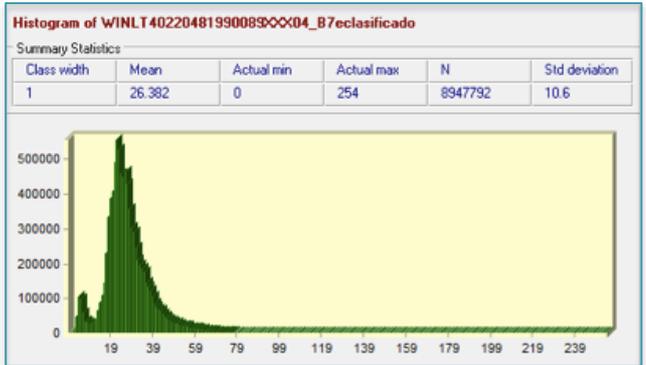
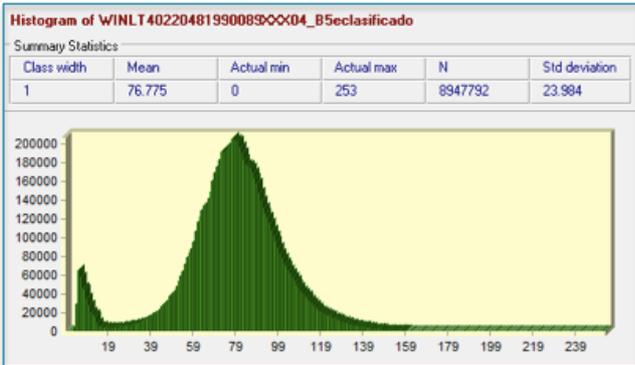


Figura A.12. Histogramas corregidos de las bandas 5 y 7 Peñitas 1990

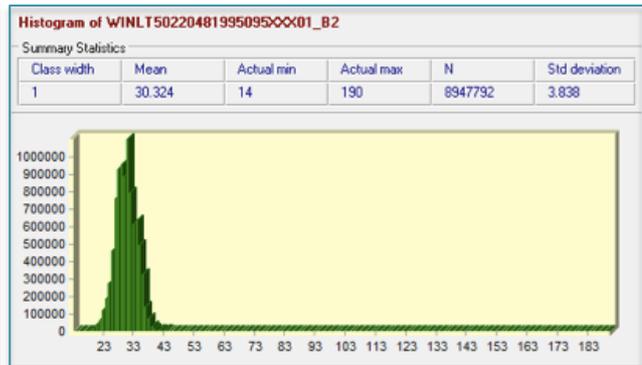
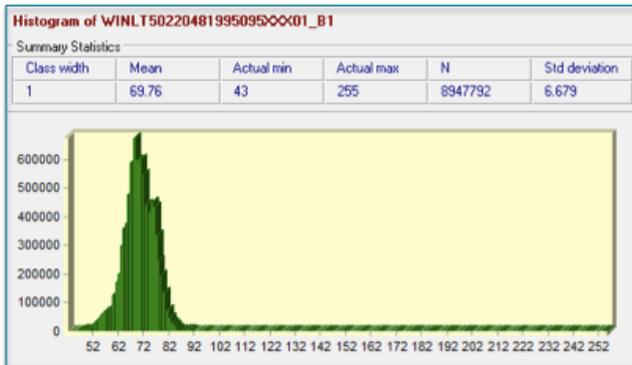


Figura A.13. Histogramas de las bandas 1 y 2 Peñitas 1995

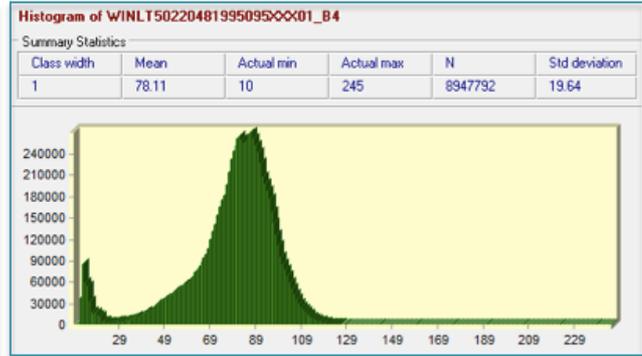
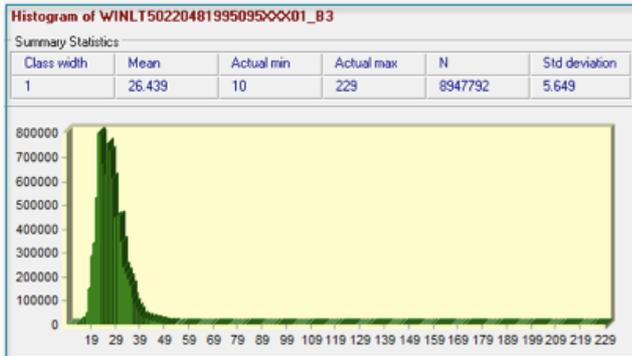


Figura A.14. Histogramas de las bandas 3 y 4 Peñitas 1995

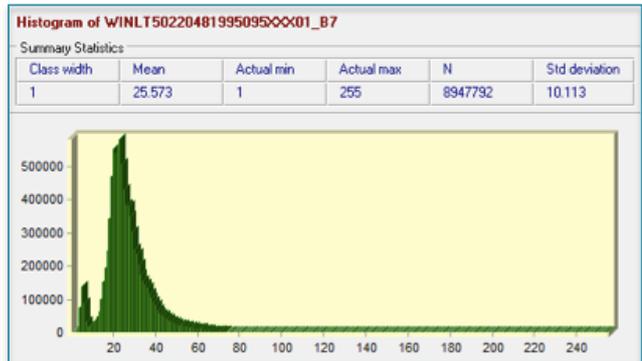
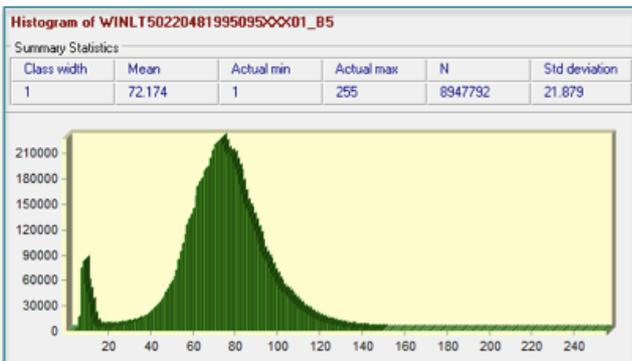


Figura A.15. Histogramas de las bandas 5 y 7 Peñitas 1995

Tabla A3. Niveles Digitales mínimos
Por banda Peñitas 1995

Valor mínimo banda 1	43
Valor mínimo banda 2	14
Valor mínimo banda 3	10
Valor mínimo banda 4	10
Valor mínimo banda 5	1
Valor mínimo banda 7	1

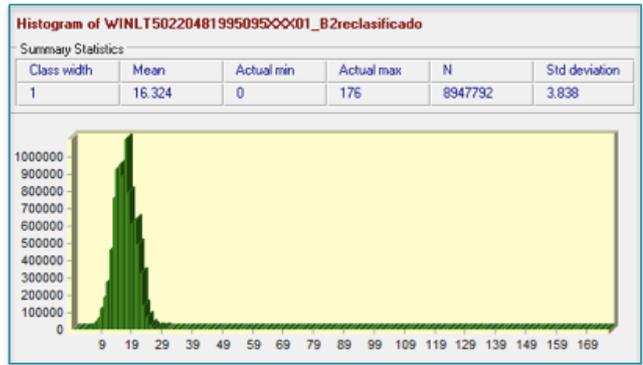
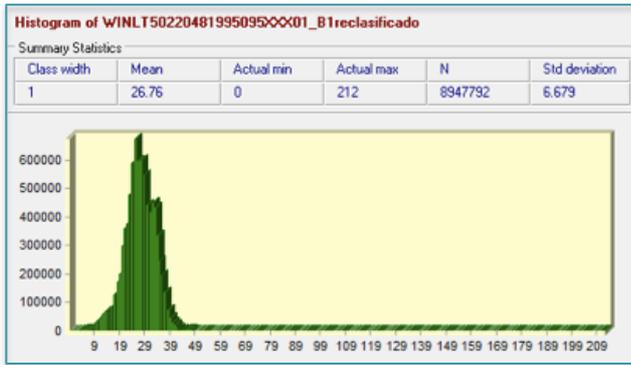


Figura A.16. Histogramas corregidos de las bandas 1 y 2 Peñitas 1995

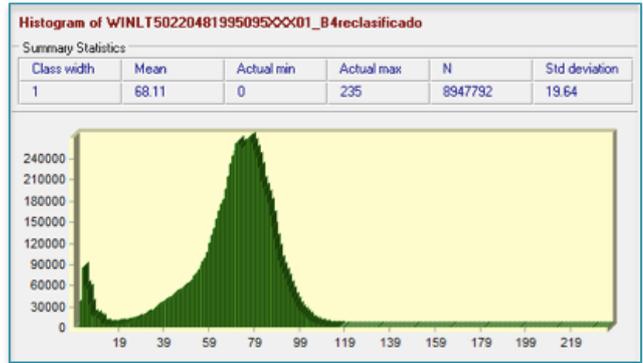
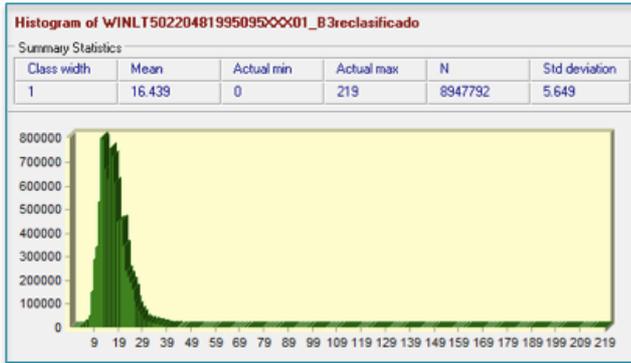


Figura A.17. Histogramas corregidos de las bandas 3 y 4 Peñitas 1995

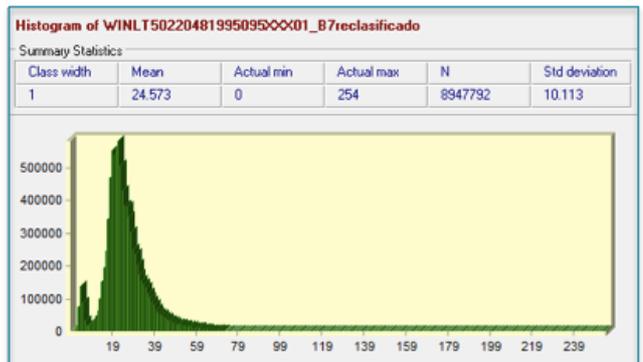
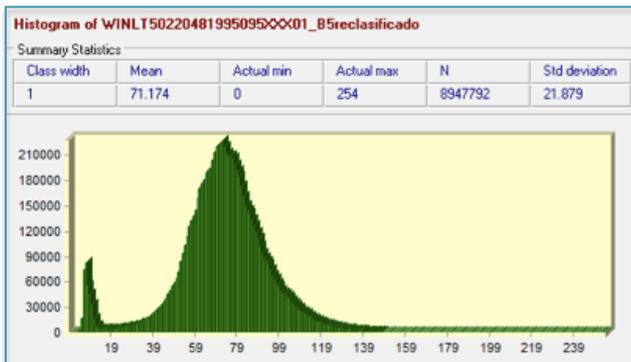


Figura A.18. Histogramas corregidos de las bandas 5 y 7 Peñitas 1995

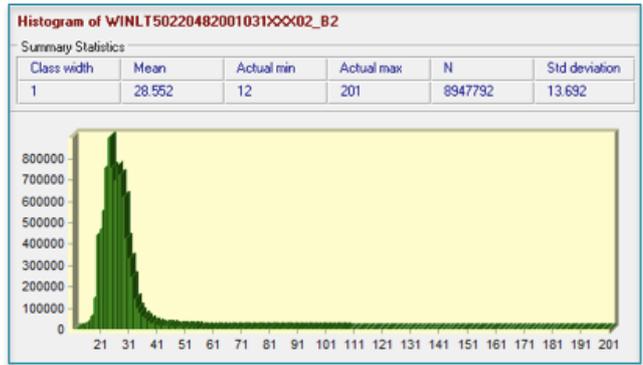
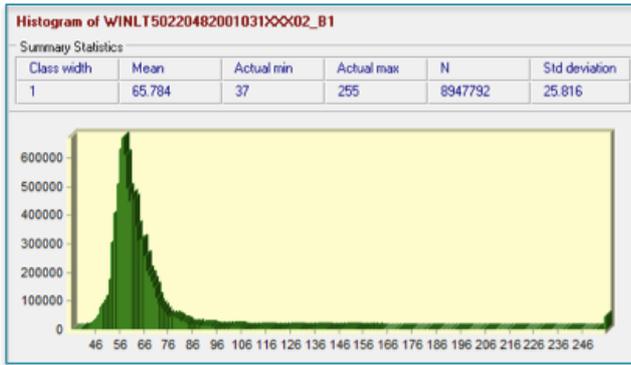


Figura A.19. Histogramas de las bandas 1 y 2 Peñitas 2001

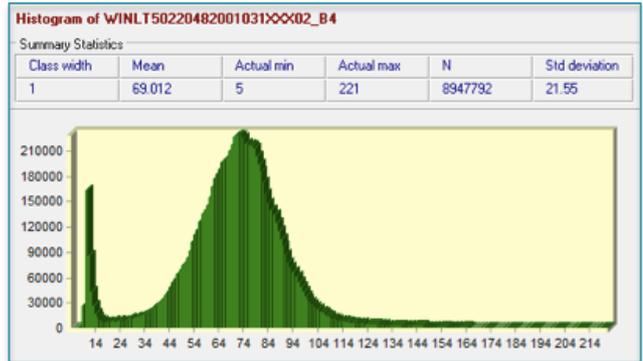
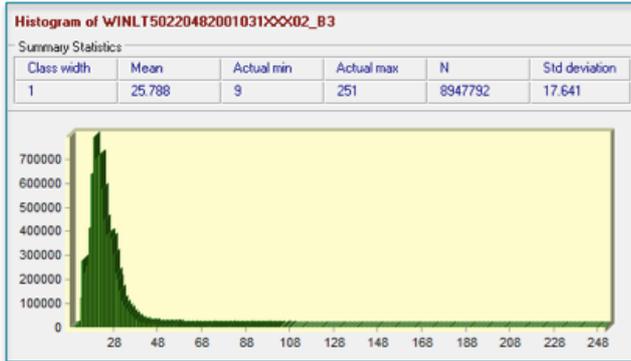


Figura A.20. Histogramas de las bandas 3 y 4 Peñitas 2001

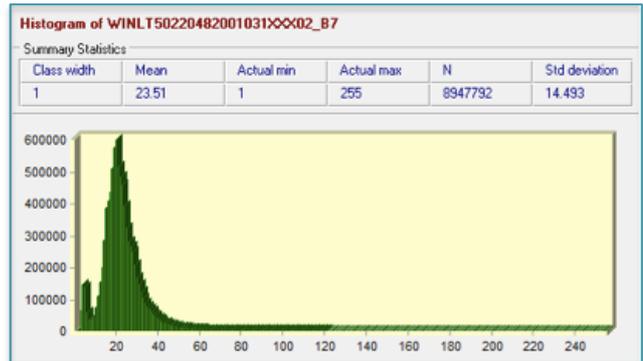
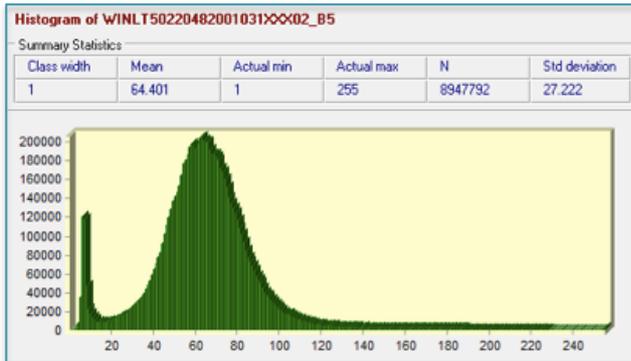


Figura A.21. Histogramas de las bandas 5 y 7 Peñitas 2001

Tabla A4. Niveles Digitales mínimos
Por banda Peñitas 2001

Valor mínimo banda 1	37
Valor mínimo banda 2	12
Valor mínimo banda 3	9
Valor mínimo banda 4	5
Valor mínimo banda 5	1
Valor mínimo banda 7	1

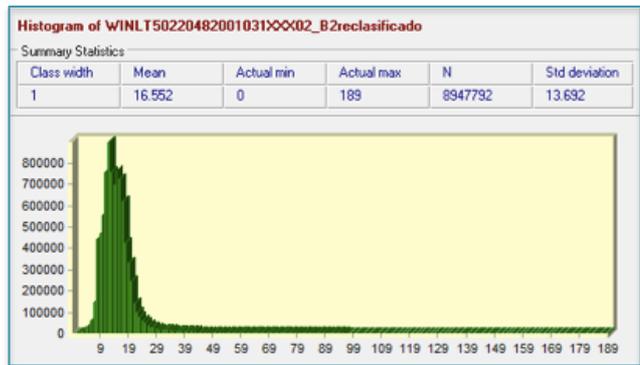
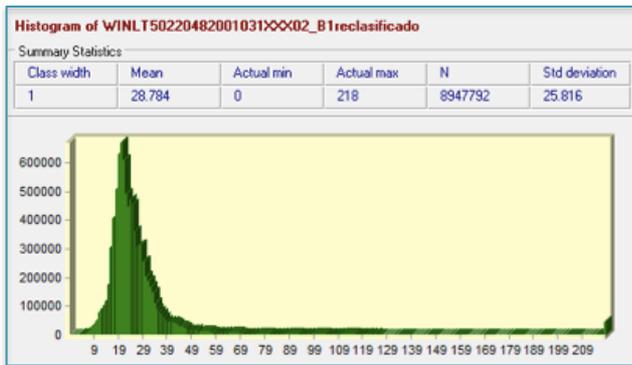


Figura A.22. Histogramas corregidos de las bandas 1 y 2 Peñitas 2001

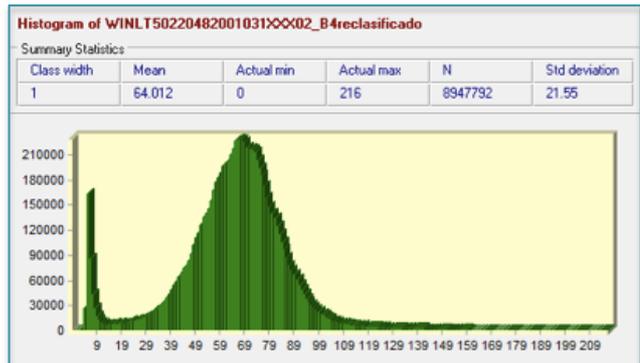
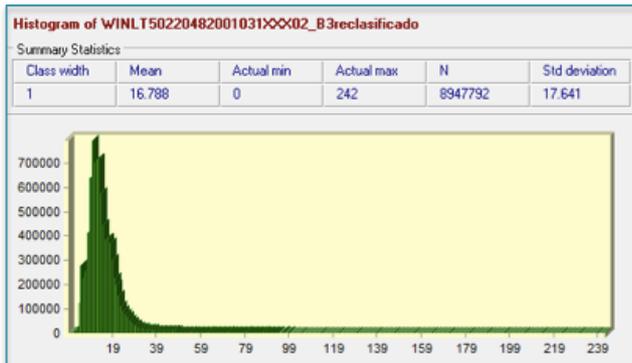


Figura A.23. Histogramas corregidos de las bandas 3 y 4 Peñitas 2001

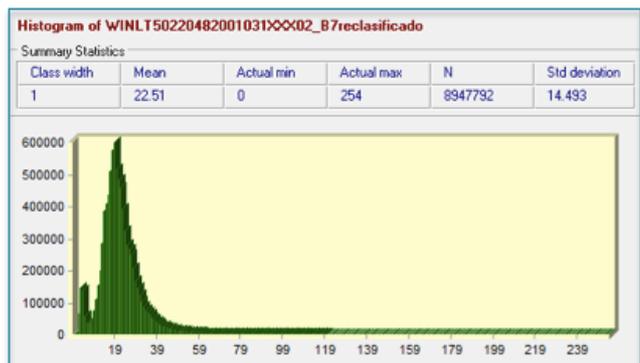
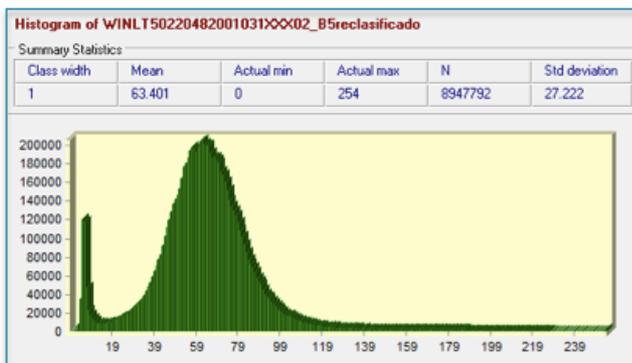


Figura A.24. Histogramas corregidos de las bandas 5 y 7 Peñitas 2001

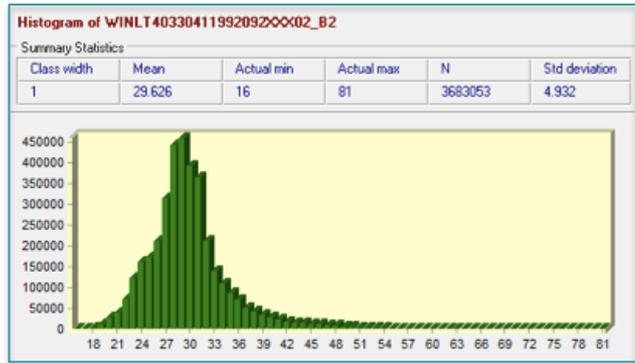
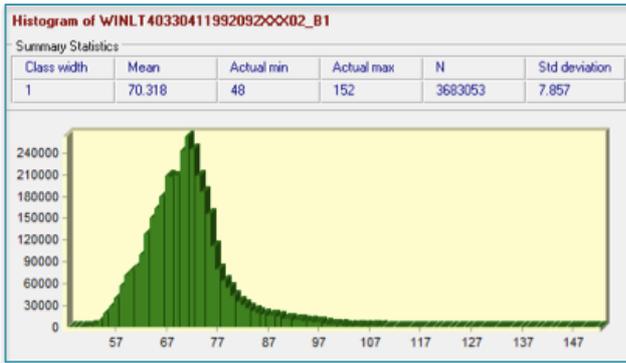


Figura A.25. Histogramas de las bandas 1 y 2 Huites 1992

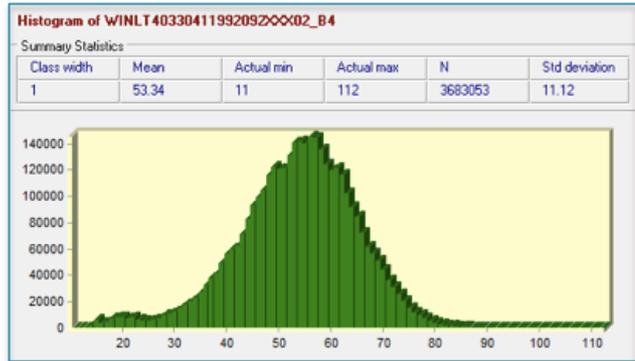
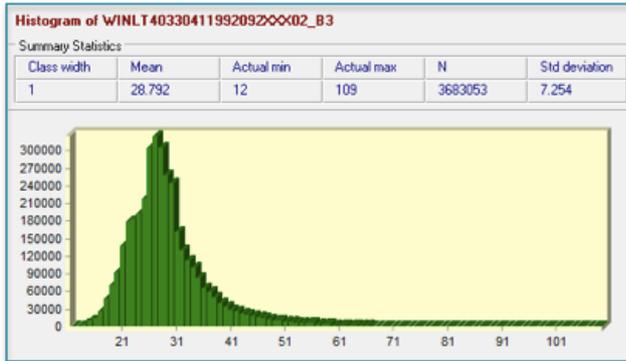


Figura A.26. Histogramas de las bandas 3 y 4 Huites 1992

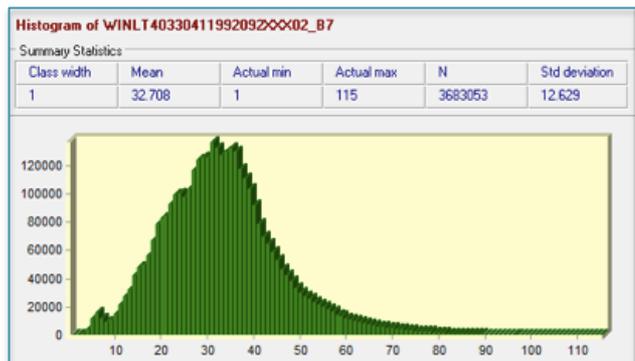
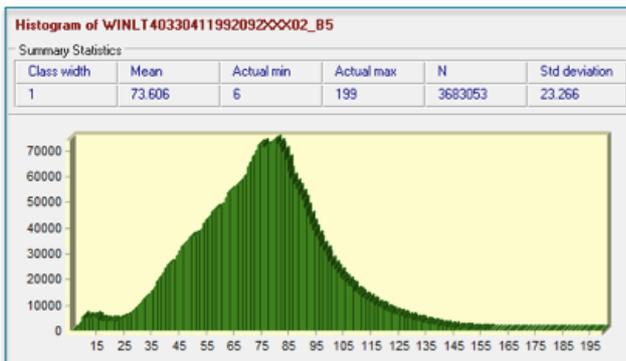


Figura A.27. Histogramas de las bandas 5 y 7 Huites 1992

Tabla A5. Niveles Digitales mínimos
Por banda Huites 1992

Valor mínimo banda 1	48
Valor mínimo banda 2	16
Valor mínimo banda 3	12
Valor mínimo banda 4	12
Valor mínimo banda 5	6
Valor mínimo banda 7	1

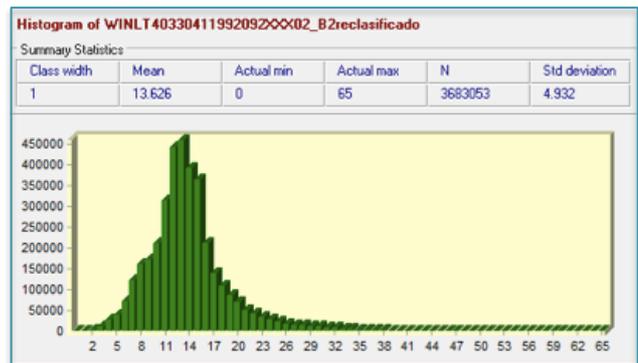
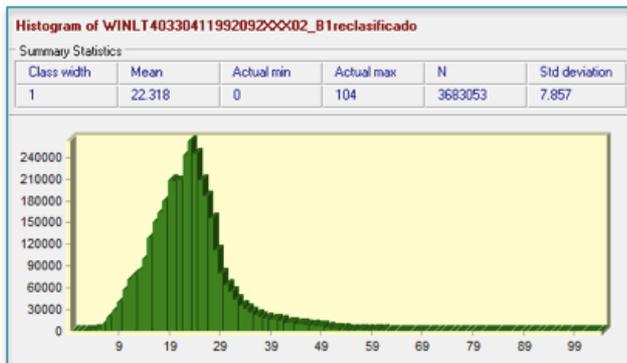


Figura A.28. Histogramas corregidos de las bandas 1 y 2 Huites 1992

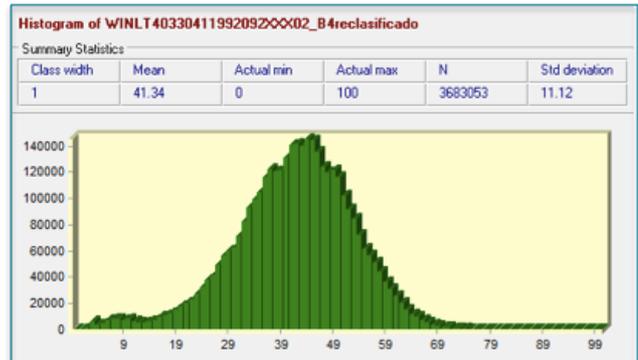
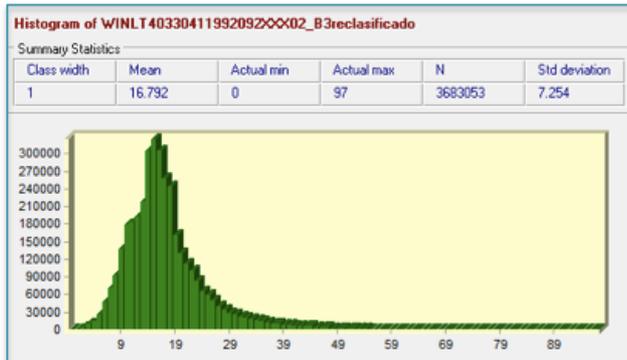


Figura A.29. Histogramas corregidos de las bandas 3 y 4 Huites 1992

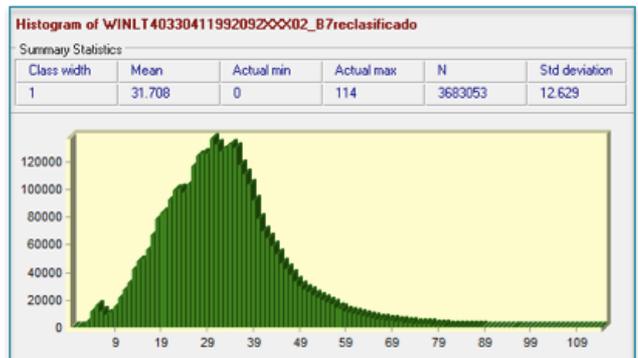
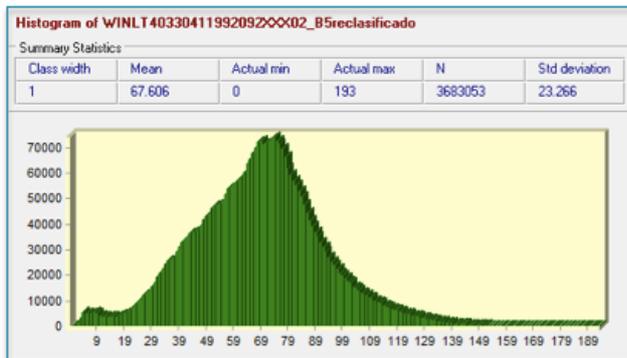


Figura A.30. Histogramas corregidos de las bandas 5 y 7 Huites 1992

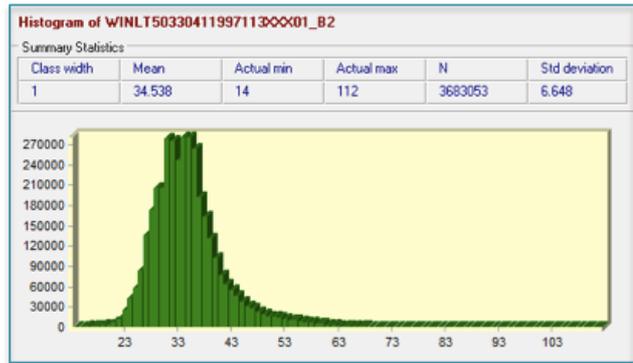
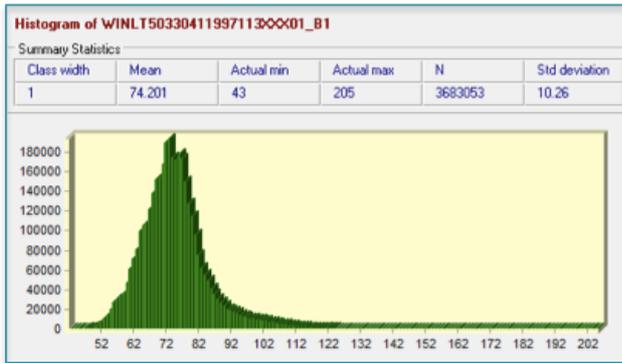


Figura A.31. Histogramas de las bandas 1 y 2 Huites 1997

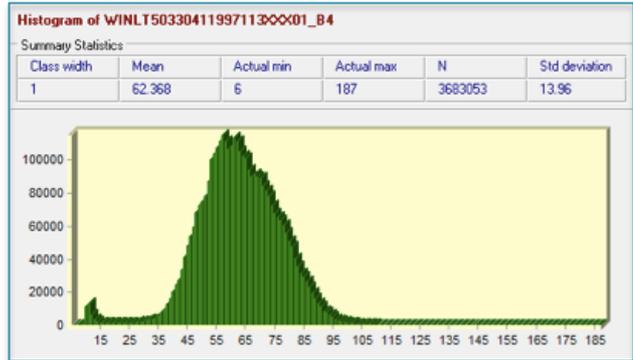
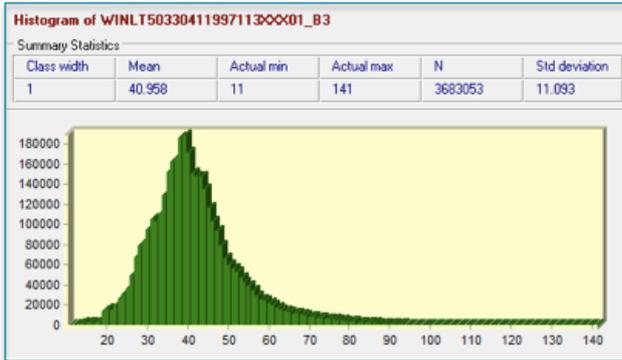


Figura A.32. Histogramas de las bandas 3 y 4 Huites 1997

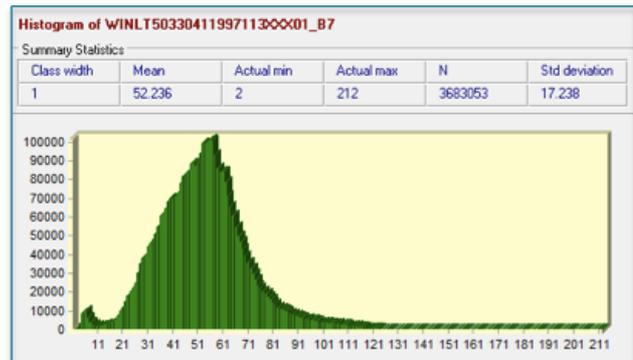
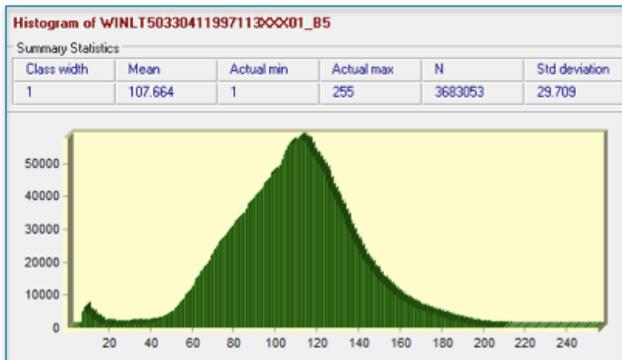


Figura A.33. Histogramas de las bandas 5 y 7 Huites 1997

Tabla A6. Niveles Digitales mínimos
Por banda Huites 1997

Valor mínimo banda 1	44
Valor mínimo banda 2	14
Valor mínimo banda 3	11
Valor mínimo banda 4	7
Valor mínimo banda 5	3
Valor mínimo banda 7	2

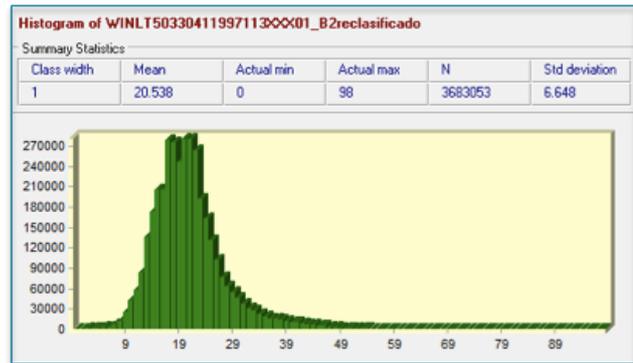
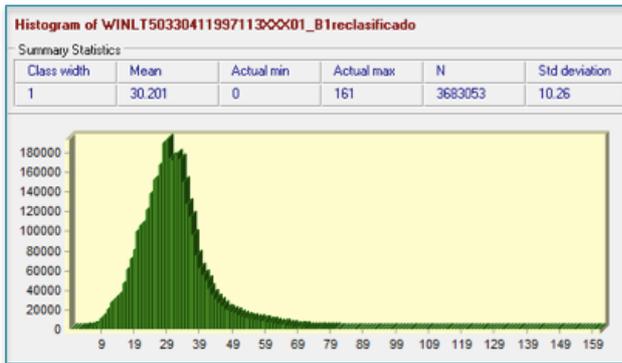


Figura A.34. Histogramas corregidos de las bandas 1 y 2 Huites 1997

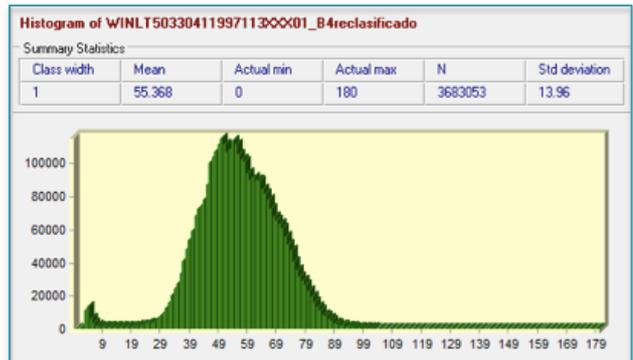
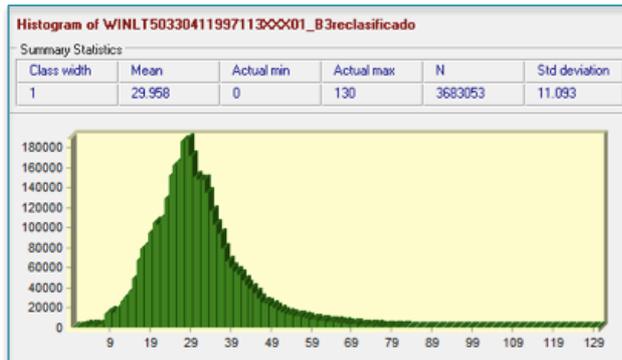


Figura A.35. Histogramas corregidos de las bandas 3 y 4 Huites 1997

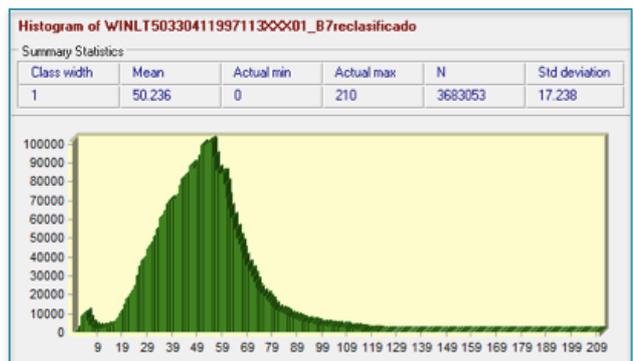
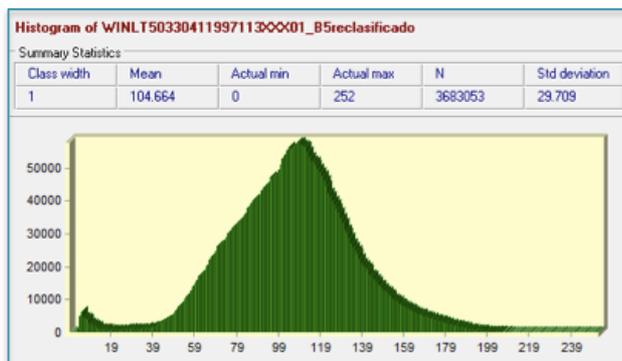


Figura A.36. Histogramas corregidos de las bandas 5 y 7 Huites 1997

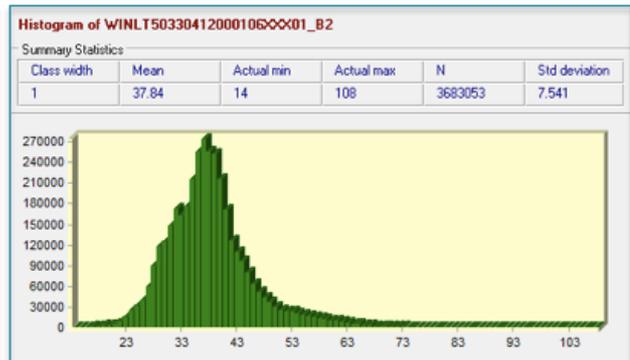
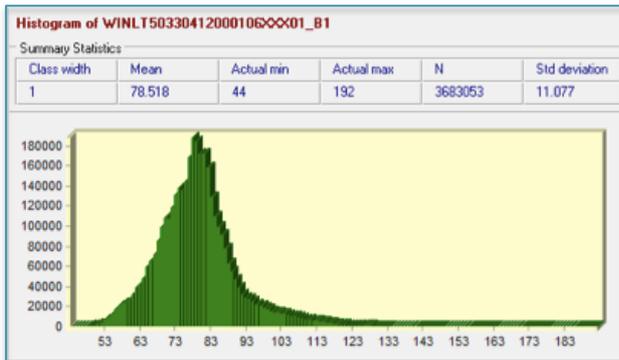


Figura A.37. Histogramas de las bandas 1 y 2 Huites 2000

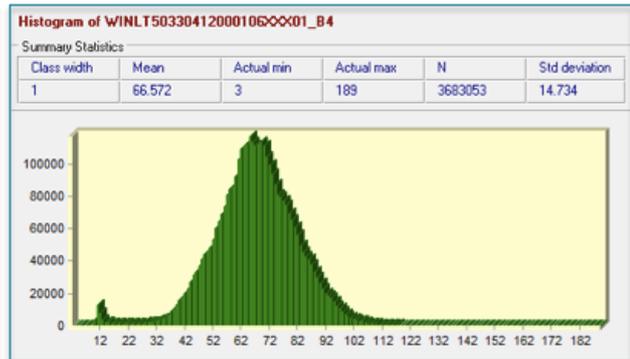
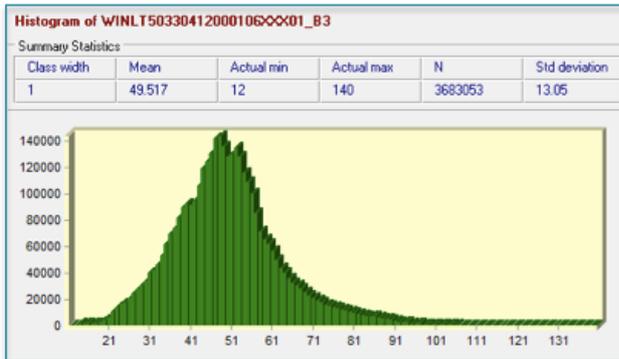


Figura A.38. Histogramas de las bandas 3 y 4 Huites 2000

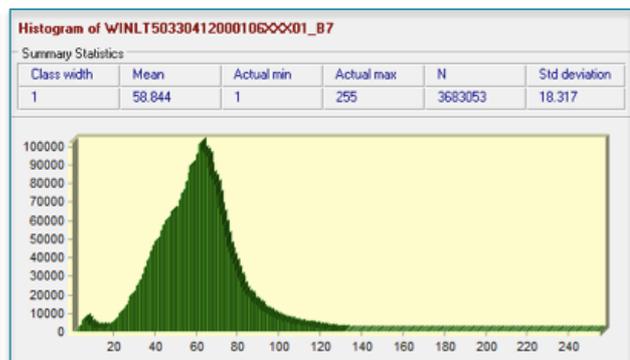
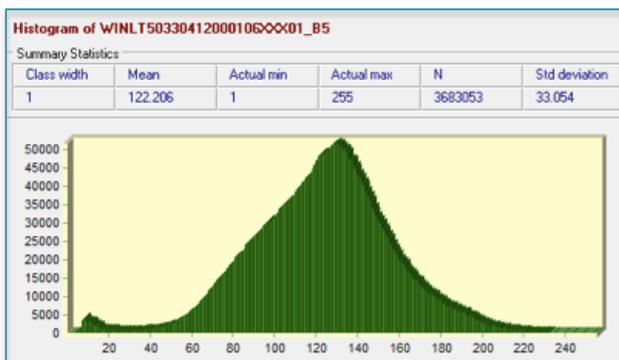


Figura A.39. Histogramas de las bandas 5 y 7 Huites 2000

Tabla A7. Niveles Digitales mínimos
Por banda Huites 2000

Valor mínimo banda 1	44
Valor mínimo banda 2	14
Valor mínimo banda 3	12
Valor mínimo banda 4	7
Valor mínimo banda 5	3
Valor mínimo banda 7	1

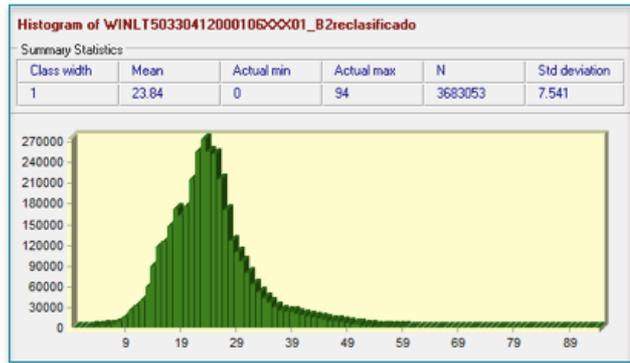
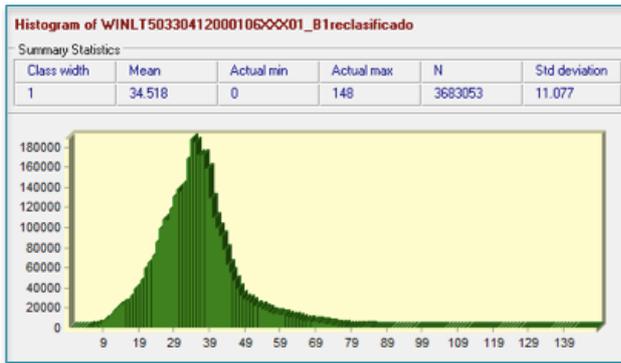


Figura A.40. Histogramas corregidos de las bandas 1 y 2 Huites 2000

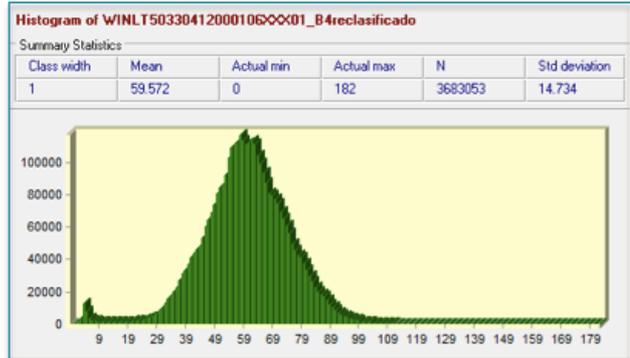
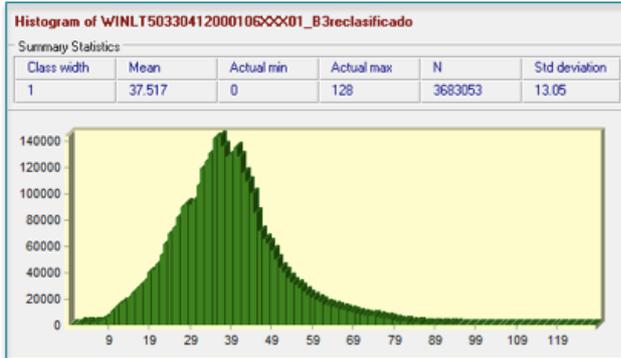


Figura A.41. Histogramas corregidos de las bandas 3 y 4 Huites 2000

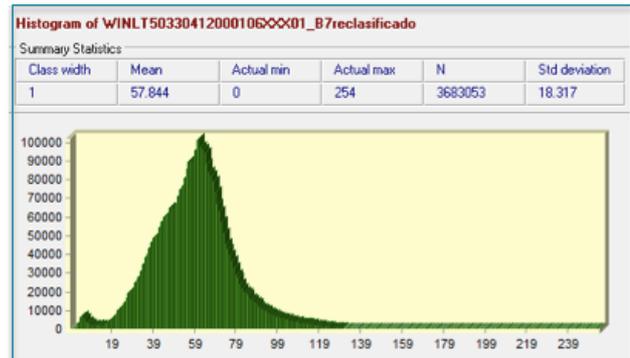
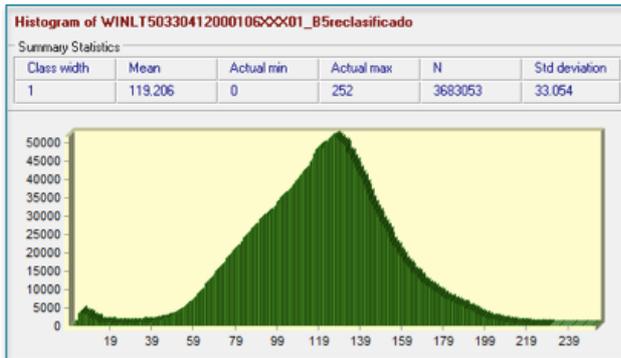


Figura A.42. Histogramas corregidos de las bandas 5 y 7 Huites 2000

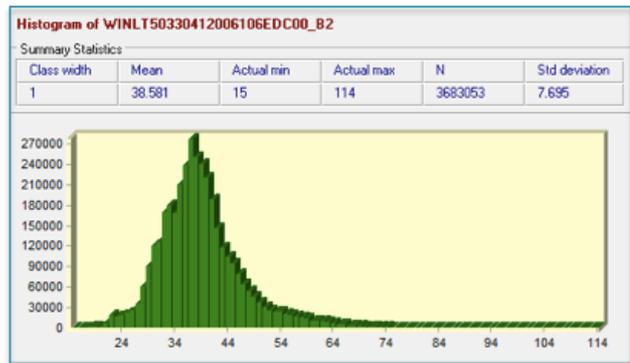
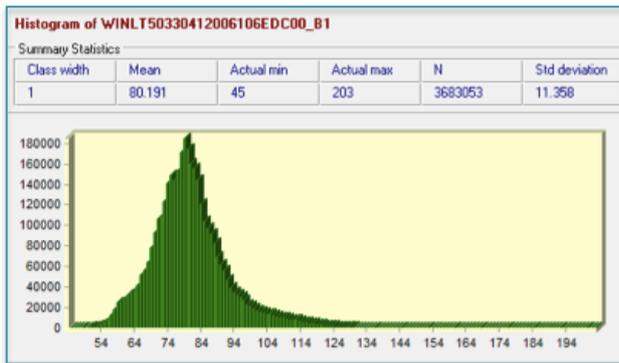


Figura A.43. Histogramas de las bandas 1 y 2 Huites 2006

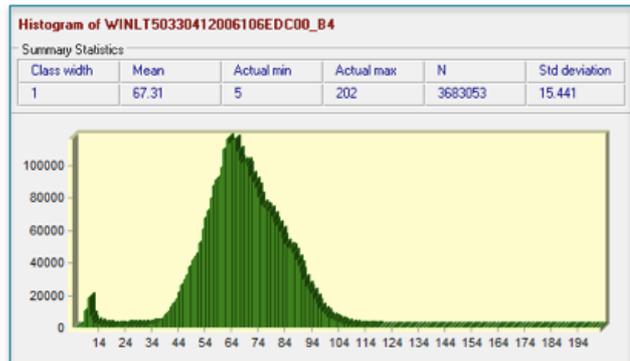
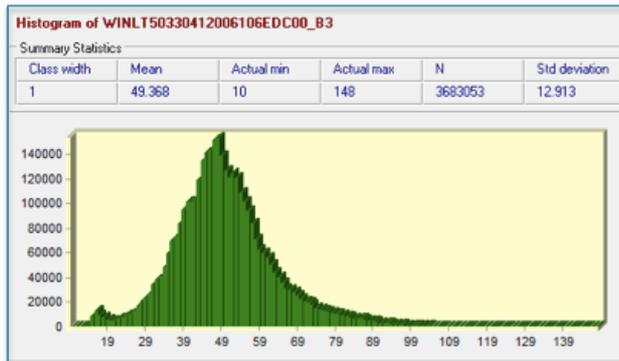


Figura A.44. Histogramas de las bandas 3 y 4 Huites 2006

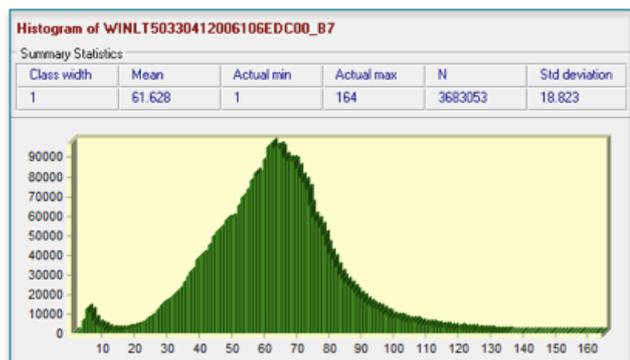
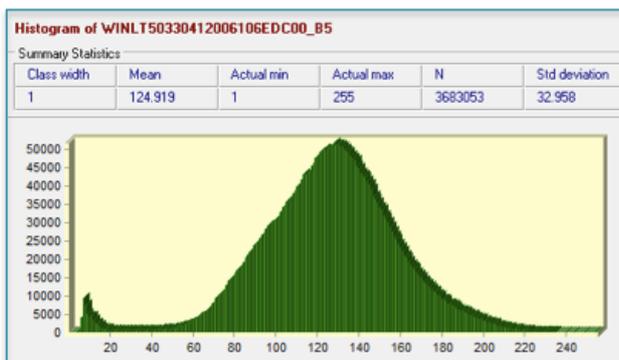


Figura A.45. Histogramas de las bandas 5 y 7 Huites 2006

Tabla A8. Niveles Digitales mínimos
Por banda Huites 2006

Valor mínimo banda 1	46
Valor mínimo banda 2	15
Valor mínimo banda 3	11
Valor mínimo banda 4	5
Valor mínimo banda 5	3
Valor mínimo banda 7	1

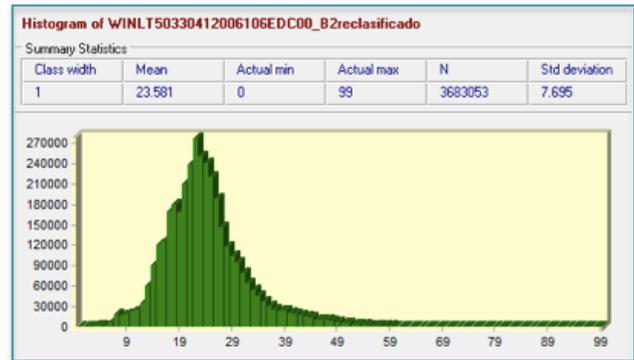
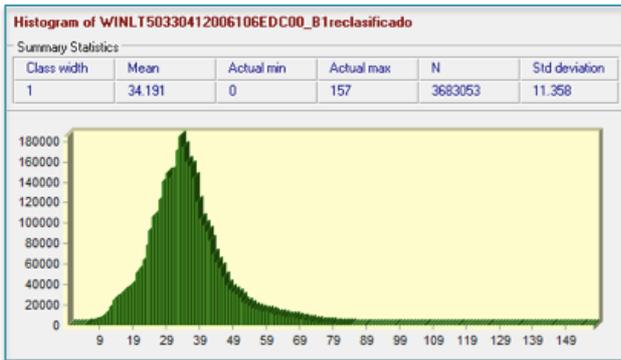


Figura A.46. Histogramas corregidos de las bandas 1 y 2 Huites 2006

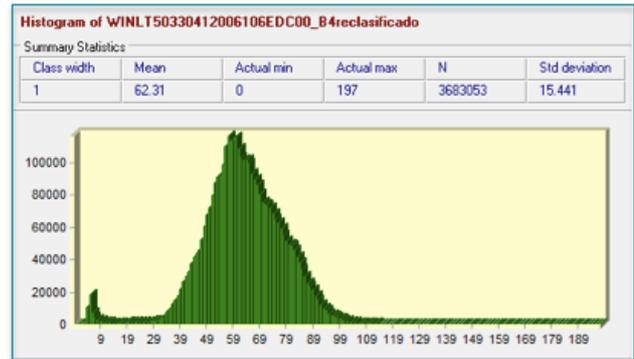
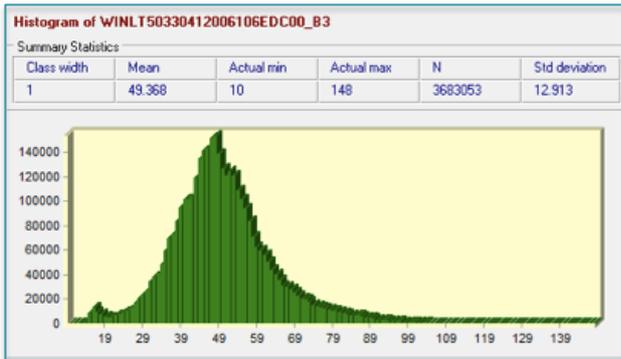


Figura A.47. Histogramas corregidos de las bandas 3 y 4 Huites 2006

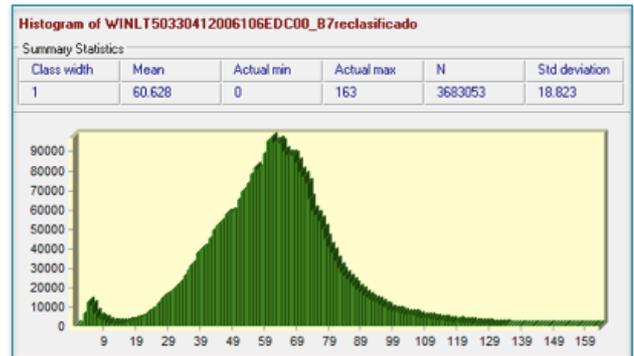
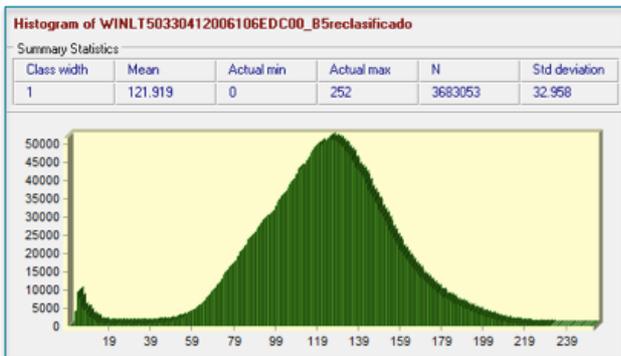


Figura A.48. Histogramas corregidos de las bandas 5 y 7 Huites 2006