

**IDENTIFICACION DE CAMBIOS EN CUERPOS DE AGUA**  
**MUNICIPIO DE PAZ DE ARIPORO**

**Ing. Hernán Carvajal Gómez**

**Ing. Jaime Lopez Pava**

**Universidad Católica de Manizales**  
**Facultad de Ingeniería y Arquitectura**  
**Maestría en Teledetección**  
**Manizales 2017**

**IDENTIFICACION DE CAMBIOS EN CUERPOS DE AGUA  
MUNICIPIO DE PAZ DE ARIPORO**

**Ing. Hernán Carvajal Gómez**

**Ing. Jaime López Pava**

**Trabajo de grado para optar el título  
MAGISTER EN TELEDETECCIÓN**

**Director: Mgr. Pedro Karin Serrato Alvarez**

**Universidad Católica de Manizales**

**Facultad de Ingeniería y Arquitectura**

**Maestría en Teledetección**

**Manizales 2017**

**Nota de Aceptación**

---

---

---

---

---

---

---

**Firma del Presidente Jurado**

**Firma de Jurado**

**Firma de Jurado**

**Manizales, Junio de 2017**

## **AGRADECIMIENTOS**

## TABLA DE CONTENIDO

LISTA DE ILUSTRACIONES .....	1
LISTA DE TABLAS.....	4
INTRODUCCIÓN .....	5
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	6
2. OBJETIVOS .....	10
2.1 Objetivo general .....	10
2.2 Objetivos específicos .....	10
3. JUSTIFICACIÓN .....	11
4. ANTECEDENTES.....	13
4.1 Historia.....	13
4.2 Situación actual de la cuenca (Caracterización del Régimen hidrológico).....	16
4.2.1 Área hidrográfica de los Ríos Pauto y Ariporo.....	18
4.2.2 Recurso Hídrico Municipio de Paz de Ariporo.....	20
5. LOCALIZACIÓN Y DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO .....	22
5.1 Localización .....	22
6. MARCO TEÓRICO.....	23
7. METODOLOGIA .....	45

7.1 Identificación de sequía meteorológica – déficit de precipitación.....	46
7.2 Identificación de sequía Agrológica. Índices de la condición de la vegetación – VCI, TCI y VHI .....	53
7.2.2 Filtrado de imágenes Modis .....	60
7.2.3 Series de tiempo NVDI-EVI y cálculo del índice VCI.....	63
7.3 Identificación de sequía Hidrológica. Cambio de cuerpos de agua en temporada seca: .....	69
7.3.1 Selección del sensor .....	69
7.3.2 Búsqueda y selección de imágenes Landsat.....	72
7.3.3 Corrección geométrica y radiométrica .....	77
7.3.4 Corrección ambiental de imágenes Landsat.....	78
7.3.5 Identificación de cuerpos de agua en las imágenes Landsat .....	81
7.6.6 Medición del área total de cuerpos de agua .....	93
8. RESULTADOS.....	94
9. CONCLUSIONES .....	107
10. RECOMENDACIONES .....	109
11. BIBLIOGRAFÍA.....	110
11 ANEXOS.....	116



## LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1 Distribución porcentual de muertes por desastres naturales según la base de datos EM-DAT .....	7
Ilustración 2 Anomalía de temperatura global 1880-2016.(4). .....	8
Ilustración 3 Mapa de localización del área de estudio.....	22
Ilustración 4 Mapa de Anomalías de temperatura superficial en el Océano Pacifico Tropical. ....	24
Ilustración 5 Precipitación Acumulada para el mes de Febrero (Periodo 1981 - 2010) <a href="http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/climatologico-mensual.html">http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/climatologico-mensual.html</a> .....	25
Ilustración 6 Anomalías de la temperatura promedio global (°C) Febrero de 2016. ....	27
Ilustración 7 Temperatura Superficial Dic 23 2015– Estación Satelital (GOES).....	28
Ilustración 8 Serie de tiempo que muestra los episodios históricos del fenómeno del Niño a través del Oceanic Niño Índice (ONI).....	29
Ilustración 9 Imagen Precipitaciones Globales - Fuente: NASA & JAXA .....	39
Ilustración 10 Diagrama de flujo de la metodología usada en este trabajo.....	45
Ilustración 11 Mapa de Anomalías de Precipitación de la FAO e índice de precipitación del IDEAM para Enero de 2015.....	47
Ilustración 12 Estaciones meteorológicas del IDEAM en la zona de interés .....	49
Ilustración 13 Precipitaciones promedio de estaciones principales de Casanare.....	50
Ilustración 14 Gráfica de precipitación total mensual de la estación Reventonera del IDEAM con precipitación total mensual con datos del sensor TRMM de la NASA.....	50
Ilustración 15 Gráfica que compara precipitación total mensual de la estación San Luis Palenque del IDEAM con precipitación total mensual con datos del sensor TRMM.....	51



Ilustración 16 Precipitación mensual apilada por año para la estación Villanueva. ....	52
Ilustración 17 Comparación entre el SPI calculado a partir de datos TRMM y de la Estación pluviométrica San Luis del IDEAM.....	53
Ilustración 18 K. Didan. (2015). MOD13Q1 MODIS/Terra Vegetation Indices 16-Day L3 Global 250m SIN Grid V006. NASA EOSDIS Land Processes DAAC.....	59
Ilustración 19 Imagen original MODIS vs Filtrada. ....	62
Ilustración 20 Gráfica de serie de tiempo de un mismo píxel en el área de interés. ....	63
Ilustración 21 Historia del programa Landsat.....	70
Ilustración 22 Remuestreo de imágenes Landsat MSS a 30m.....	71
Ilustración 23 Inventario de imágenes Landsat para la zona de estudio. ....	76
Ilustración 24 Detalle superposición de imágenes para edición. ....	82
Ilustración 25 Secuencia del proceso de filtrado del índice MNDWI en Landsat.....	85
Ilustración 26 Comparación espectral de Sensores Landsat.. ....	86
Ilustración 27 Sumatoria anual de cuerpos de agua en temporada seca en el área de estudio .....	94
Ilustración 28 Superposición de serie ONI (Area verde) con el índice SPI mensual de la estación San Luis del IDEAM.....	98
Ilustración 29 Superposición de la serie ONI y la serie VHI promedio para la zona de interés. ....	99
Ilustración 30 Ubicación de los años con menor superficie de agua en la serie ONI...	100
Ilustración 31 Comparación serie de índices SPI y área de cuerpos de agua .....	101
Ilustración 32 Distribución geográfica del cambio histórico de las áreas de los cuerpos de agua.....	103

Ilustración 33 Ejemplo de la aplicación de regresión lineal para ilustrar la tendencia de aumento o disminución de los cuerpos de agua con el tiempo .....	104
Ilustración 34 Cambio en cuerpos de agua .....	104
Ilustración 35 Identificación de los cuerpos de agua que no aparecen en las imágenes Landsat de los últimos 5 años .....	105
Ilustración 36 Variación Areal cuerpos de agua 1978 .....	116
Ilustración 37 Variación Areal cuerpos de agua 1985 .....	117
Ilustración 38 Variación Areal cuerpos de agua 1986 .....	117
Ilustración 39 Variación Areal cuerpos de agua 1988 .....	117
Ilustración 40 Variación Areal cuerpos de agua 1990 .....	118
Ilustración 41 Variación Areal cuerpos de agua 1991 .....	118
Ilustración 42 Variación Areal cuerpos de agua 1998 .....	119
Ilustración 43 Variación Areal cuerpos de agua 1999 .....	119
Ilustración 44 Variación Areal cuerpos de agua 2000 .....	120
Ilustración 45 Variación Areal cuerpos de agua 2001 .....	120
Ilustración 46 Variación Areal cuerpos de agua 2002 .....	121
Ilustración 47 Variación Areal cuerpos de agua 2003 .....	121
Ilustración 48 Variación Areal cuerpos de agua 2004 .....	122
Ilustración 49 Variación Areal cuerpos de agua 2006 .....	122
Ilustración 50 Variación Areal cuerpos de agua 2009 .....	123
Ilustración 51 Variación Areal cuerpos de agua 2010 .....	123
Ilustración 52 Variación Areal cuerpos de agua 2011 .....	124
Ilustración 53 Variación Areal cuerpos de agua 2011 .....	124

Ilustración 54 Variación Areal cuerpos de agua 2012 .....	125
Ilustración 55 Variación Areal cuerpos de agua 2013 .....	125
Ilustración 56 Variación Areal cuerpos de agua 2014 .....	126
Ilustración 57 Variación Areal cuerpos de agua 2015 .....	126
Ilustración 58 Variación Areal cuerpos de agua 2016 .....	127

## **LISTA DE TABLAS**

Tabla 1 Especificaciones de las Imágenes Modis. ....	54
Tabla 2 Inventario de imágenes Landsat seleccionadas para el estudio. ....	77
Tabla 3 Especificaciones de reflectancia de superficie. Guía de usuario Landsat 4-7 Climate Data Record (CDR) Surface reflectance. USGS .....	79
Tabla 4 Gráfica comparativa de un cuerpo de agua o un área específica comparando año a año el área de un cuerpo de agua determinado. ....	87

## INTRODUCCIÓN

La sequía es un fenómeno normal del clima. La definición más simple es la disminución de la cantidad de precipitación pluvial con respecto a la considerada como normal (1) Pero siendo el agua un recurso vital para la vida, las repercusiones en la población son más fuertes y afectan más personas que cualquier otro fenómeno natural, pues impacta la producción de alimentos, deteriora los ecosistemas y repercute en la economía (2,3).

Motivados en la necesidad de información confiable acerca de las sequías y su impacto en nuestra región, se pretende con este trabajo brindar más elementos de juicio, en este caso desde la perspectiva de los sensores remotos para identificar el fenómeno de sequía, su historia, la periodicidad con que ocurre, su distribución espacial, y su impacto en el tamaño de los cuerpos de agua. En este trabajo, este proceso se realiza mediante la identificación de los cuerpos de agua permanentes en una serie multianual de imágenes Landsat, y la comparación de las extensiones de los cuerpos de agua detectados en los últimos 40 años, en un área de 6.924 km<sup>2</sup> del municipio de Paz de Ariporo en la temporada seca de los llanos orientales, Enero-Marzo de cada año.

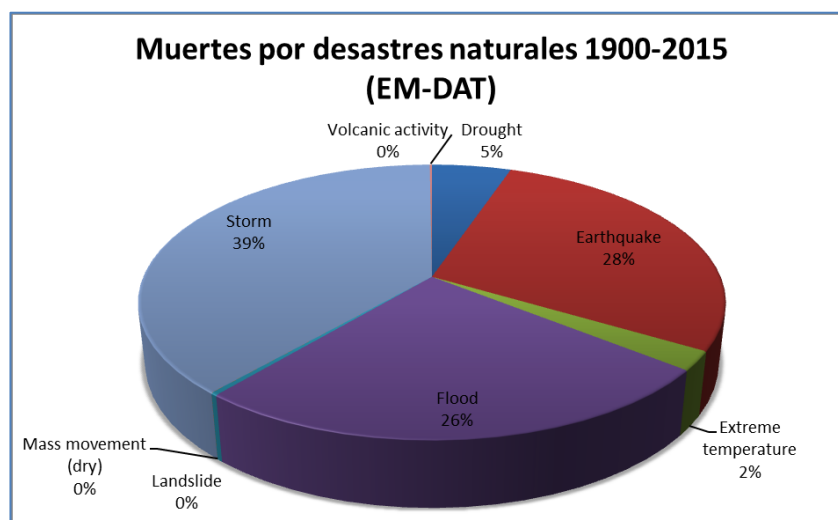
**Palabras claves:** Fuentes de agua, sequía, índice de diferencia normalizada de agua (NDWI), estaciones meteorológicas del IDEAM, cuerpos de agua permanentes, imágenes de satélite, Sensores remotos, Paz de Ariporo.

## 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

No se suele pensar en sequías en nuestra cotidianidad, pues tenemos la suerte en Colombia de contar con una gran riqueza hídrica, hemos vivido fuertes sequías que nos muestran lo vulnerables que somos ante ellas. Por tal razón el cambio climático toma gran relevancia para las comunidades afectadas, los ecosistemas y los procesos productivos, y a su vez también de gran interés para el gobierno, pues la desinformación y la escasez de estudios serios pueden llevar a las autoridades administrativas y ambientales a tomar decisiones equivocadas o de poca utilidad para su mitigación.

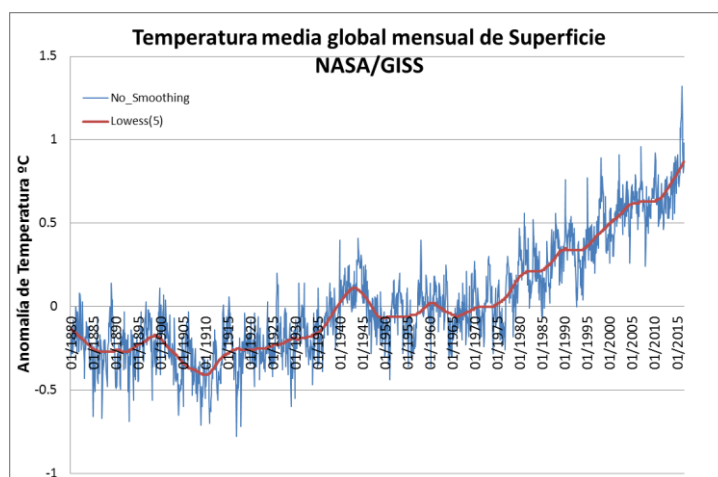
Los interrogantes que se abordan en este trabajo son: Han disminuido los cuerpos de agua permanentemente? Desde cuando? Qué tanto han disminuido? Es un fenómeno generalizado en la zona o son casos puntuales? Hay correlación entre estas sequías y el fenómeno del Niño? Y desde el punto de vista de los sensores remotos y su usabilidad en estudios climáticos, hay correspondencia entre los datos de pluviosidad de estaciones pluviométricas y los datos suministrados por satélite como TRMM?, y a su vez, hay correspondencia entre series de índices calculados a partir de pluviosidad y las series de índices de estado de vegetación calculados a partir de imágenes como MODIS?

Según la base de datos internacional de desastres naturales EM-DAT, la sequía ha causado el 51% (11.7 millones) de las muertes por desastres naturales y el 33% de personas afectadas (2293 millones) desde el año 1900 hasta el 2015 en todo el mundo.



*Ilustración 1 Distribución porcentual de muertes por desastres naturales según la base de datos EM-DAT*

Para el año 2015 se estableció que la tierra ha aumentado en 1°C la temperatura promedio del aire desde la era pre industrial 1850-1900, y para comienzos de 2016 tuvo el pico más alto de la historia, llegando a 1.32°C (Ilustración 2). Para agosto de 2016 tiene un ligero descenso, pero la tendencia general sigue en aumento. Este calentamiento global, hará que las sequías sean más frecuentes y se presenten con más fuerza, y si sumamos a esto el fenómeno del niño, tendremos sequías sin precedentes históricos.



*Ilustración 2 Anomalía de temperatura global 1880-2016.(4). Se observa la tendencia continúa de aumento desde los años 70's*

El fenómeno de sequía en Colombia se volvió un tema de preocupación nacional, desde la sequía de 1992-1993 que afectó los niveles de los embalses y generó una grave crisis energética. La sequía fuerte más reciente, ocurrida entre 2014 y 2015, tuvo un impacto inusitado en Casanare y Guajira. Esta sequía originó una tragedia ambiental focalizada en el Municipio de Paz de Ariporo, Departamento del Casanare, que en el año 2014 cobró la vida de más de 20.000 animales, y la sequía en la Guajira que afectó a miles de sus pobladores y cabezas de ganado en Riohacha Uribía y Manaure.

Los medios de comunicación han hecho eco de diversas hipótesis de las causas, pero en su gran mayoría no están soportadas por estudios científicos. El informe elaborado por el IGAC en marzo de 2014, señala: “Los estudios de suelos y coberturas vegetales del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), aseguran que la fuerte sequía en Paz de Ariporo podría estar relacionada con la excesiva ganadería, la limitada capacidad productiva de los suelos, los cultivos

agrícolas y el pastoreo en zonas de páramo, el régimen de precipitación de la región y la posible afectación de acuíferos por la actividad petrolera”. IDEAM et. al. (2006).



## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo general**

Desarrollar un estudio multitemporal en el Municipio de Paz de Ariporo, que permita verificar la existencia y periodicidad de sequías y cuantificar los cambios de forma y área de los cuerpos de aguas permanentes y semi permanentes.

### **2.2 Objetivos específicos**

Para alcanzar el objetivo principal y validar las respectivas hipótesis se plantearon los siguientes objetivos específicos:

- Identificar períodos anormalmente secos en las series de tiempo TRMM, MODIS y estaciones pluviométricas de la zona de interés.
- Identificar cuerpos de agua con sus cambios de forma o geometría en la zona más afectada por la sequía de 2014-2015 en un área de 6924Km<sup>2</sup> dentro del municipio de Paz de Ariporo a partir de la serie de imágenes Landsat y medir sus áreas.
- Comparar e identificar los cambios areales de la sumatoria de cuerpos de agua para identificar los años con déficit anormal de agua en la zona y poder correlacionar con las series que identifican los fenómenos del Niño y La Niña.

### 3. JUSTIFICACIÓN

El potencial de los sensores remotos abarca mucho más de lo que generalmente pensamos. Grandes preocupaciones nacionales pueden ser abordadas desde la perspectiva remota para ayudar a explicar los fenómenos, su extensión y sus causas. Los desastres naturales o amenazas son ejemplos de los usos más frecuentes y han sido utilizados en buena medida en Colombia. Pero hay muy poco que se ha hecho en el tema de sequía, pues se suele actuar reactivamente cuando ya estamos padeciendo sus estragos. Países que sufren más, el flagelo de la sequía, han creado centros de monitoreo que les permite anticiparse o actuar de forma rápida ante estos fenómenos. Sin estudios relevantes sobre sequía, se crean hipótesis sin fundamento y los medios las replican sin verificación, haciendo que las causas reales permanezcan mimetizadas y los correctivos de las autoridades se enfoquen equivocadamente.

Las únicas fuentes de información usadas en Colombia son las estaciones meteorológicas del IDEAM. Es obvio su uso pues las mediciones de variables climáticas tomadas en sitio son la fuente más precisa y confiable. El problema es que en algunas zonas del país son muy dispersas, y no tienen información completa: “Una gran mayoría de esas series presentan vacíos de información, debidos a diferentes causas: la interrupción de las lecturas, fallos en los instrumentos de medida, errores asociados a cambios en las condiciones de medición, errores de transcripción, entre otras.” (9). Los índices e indicadores de sequía solo son calculados con los datos de las estaciones, pero se desaprovechan otras fuentes muy útiles e importantes como las imágenes de los distintos satélites meteorológicos y ambientales como MODIS , AVHRR y TRMM, que pueden complementar de manera efectiva la información de las estaciones,

mejorando el cubrimiento de los análisis, aunque teniendo presente el limitante del relativamente corto periodo de tiempo desde el cual están disponibles estos satélites, y que sus datos deben ser validados y calibrados para la región en estudio.

La gran mayoría de análisis de sequía usando imágenes Landsat están centrados en el índice NDVI, índices de evapotranspiración y la temperatura de superficie (7,8), pero en esta área se tiene mucha discontinuidad en la disponibilidad de imágenes históricas Landsat, así que usamos MODIS para crear series EVI-NDVI; por tal razón el enfoque con Landsat se centra en los cambios de los cuerpos de agua y no tanto en la vegetación.

## 4. ANTECEDENTES

### 4.1 Historia

Las sequías han acompañado la historia del mundo. En Colombia la más antigua documentada ocurre entre 1925-1926 (Barrero, A. et. al. 2005), la asocian con el fenómeno del Niño; entre las conclusiones de Álvaro Barrero se tiene:

“Este fenómeno meteorológico junto con otros factores ayudó a deteriorar la economía que trajo como resultado un amplio malestar social y cuyas implicaciones políticas se hicieron sentir más allá, propiciando de paso el cambio del partido Conservador que gobernó el país por casi 50 años y que perdió las elecciones de 1930 frente al partido Liberal. Este es un ejemplo de cómo el impacto de la variabilidad climática puede afectar en forma amplia y en diferentes sectores la realidad socio-económica y política de un país.”

En el primer trimestre del año 2014 se presentó una fuerte y extensa sequía en el Departamento del Casanare, un poco más de lo habitual para esa época del año, donde murieron más de veinte (20) mil animales especialmente en el Municipio de Paz de Ariporo (IGAC. et. al. 2014); por tal razón en ese mismo año el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) realizó este estudio con la intención de entender las posibles causas de este desastre ambiental y emitió un comunicado con base a los mismos, identificando entre otras cinco (5) causas principales que pudiesen haber ayudado en la generación de este problema, entre estas se relacionan:

- Impactos en los páramos de alta montaña debido a las talas indiscriminadas de árboles.
- La Ganadería intensiva que compacta los suelos lo cual limita la capacidad de infiltración de los mismos.
- La baja capacidad de retención de humedad de los suelos por su textura arenosa.
- La limitada capacidad productiva de los suelos lo que limita la productividad, ya que estos suelos son ácidos, arenosos y de baja fertilidad.
- Por último, el uso de aguas subterráneas por parte de empresas petroleras.

Según el IGAC estas cinco causas sumadas al cambio climático y el fenómeno del Niño agravaron la situación en el Municipio de Paz de Ariporo. (IGAC. et. al. 2014).

En el concepto técnico del IGAC, afirman las zonas de páramos ubicadas en la parte alta de la cordillera oriental en límites de los departamentos de Boyacá, Arauca y Casanare, han sido intervenidos por los campesinos cambiando el uso del suelo; la vegetación nativa compuesta por frailejones y musgos se ha cambiado por cultivos de papa y cebolla en combinación con actividades de pastoreo de ganado. Al intervenir la cobertura vegetal nativa de los páramos que tienen la función de captar y retener el agua con que se alimentan las quebradas y ríos del departamento, los caudales de los cuerpos de agua han disminuido.

Otro punto a tener en cuenta es la ganadería intensiva. Según el estudio de conflicto de usos del suelo del IGAC, el 35,4 % de la extensión total del municipio de Paz de Ariporo, son suelos subutilizados (430.860,7 H@s), es decir, la demanda de ganado es menos intensa en

comparación con la capacidad productiva del mismo. Esta zona presenta una compactación súper-excesiva por pastoreo de ganado bovino produciendo que los poros del suelo se cierren y no haya filtración del agua, por tal razón el recurso hídrico sigue su camino hacia otras descargas o se evapora e induciendo a que los suelos se vuelvan áridos y erosivos.

Los suelos de Paz de Ariporo tienen una baja capacidad de retención de humedad, y a pesar de ser una zona donde llueve mucho en invierno, este tipo de suelo no conserva el agua; Paz de Ariporo cuenta con una precipitación de 2.150 milímetros al año, una cifra que supera a la ciudad de Bogotá que está entre 800 y 1.000 milímetros/año, sin embargo allí solo se presenta una sola temporada de lluvias entre mayo y septiembre con el pico más alto en julio y el resto de meses se pueden catalogar como secos, principalmente en el primer trimestre del año donde la sequía hace estragos.

La actividad agrícola en el departamento del Casanare en especial en el Municipio de Paz de Ariporo es mínima debido a la baja calidad de los suelos, lo que los hace poco atractivos para desarrollar este tipo de actividad debido a su baja fertilidad y que son suelos bien drenados lo cual les afecta en épocas secas como la extensa sequía del 2014.

El problema que más aqueja a los suelos del municipio es la subutilización de las tierras (en 32% de todo su territorio), debido a que los campesinos y habitantes les han dado un uso poco apto relacionado con la capacidad que ofrecen y en este caso optaron por dedicarse a la cría de ganado. Vale aclarar que en el 12% del área municipal se sobrepasa la capacidad natural

productiva por el aprovechamiento intenso de los recursos naturales (sobreutilización de los suelos).

El municipio de Paz de Ariporo cuenta con una extensión de 1.213.993 hectáreas, que equivale al 1,06 % del territorio Colombiano, siendo uno de los municipios más grandes de nuestro país, con áreas mayores que departamentos como Atlántico, Quindío, Sucre y Risaralda.

## **4.2 Situación actual de la cuenca (Caracterización del Régimen hidrológico)**

La red hidrográfica del área de estudio la conforman principalmente los ríos Pauto y Ariporo que atraviesan la zona en dirección NW – SE, vertiendo sus aguas al río Meta en el caso del río Pauto, y al río Casanare las aguas del río Ariporo, los cuales forman parte de la gran cuenca hidrográfica del río Orinoco.

**Río Pauto:** Esta cuenca tiene un área aproximada de 2.874 km<sup>2</sup> de los cuales el 87,5% están localizados en el departamento de Casanare. Este importante río nace en el cerro el Romeral (Municipio de Socotá, Boyacá) a una altura aproximada de 3.700 msnm y recorre 250km pasando por el piedemonte y posteriormente a la llanura a 300 m.s.n.m, desembocando en el río Meta a 125 m.s.n.m. En su travesía limita con los municipios de Nunchía, Támara, Pore, San Luis de Palenque y Trinidad.

**Río Ariporo:** El río Ariporo nace en el cerro el Llorón en el municipio de Sácama a 2.400 m.s.n.m con una longitud aproximada de 203 Kms. Esta cuenca tiene un área aproximada

de 5.800 km<sup>2</sup>. Entre los municipios que atraviesa se encuentran Támara, Paz de Ariporo y Hato Corozal, desciende hasta la cota 150 m.s.n.m. en su desembocadura en el río Casanare.

Estas cuencas y sus respectivos afluentes se caracterizan por tener un patrón de drenaje subdentrítico en las partes altas del piedemonte y sub paralelo en las zonas de planicie o llanura, indicando que las pendientes en la partes altas de las cuencas son altas presentando suelos en arcillas o roca madre, mientras que en las zonas bajas se encuentra un relieve plano con materiales finos los cuales son transportados por las corrientes hacia las zonas bajas. Actualmente los procesos de erosión son abundantes, los cuales generan remoción en masa, flujos de tierra y desprendimientos de materiales en las zonas altas. Además hay intensa actividad tectónica favorecida por las pendientes fuertes y las precipitaciones altas generando el arrastre de sedimentos hacia las partes bajas de las cuencas.

Las corrientes de agua que recorren las cuencas desde las partes altas son encajonados, lo cual provoca incisiones profundas, formando valles estrechos. Los lechos contienen rocas grandes donde se distinguen terrazas pedregosas, con pendientes menores del 7% y en los costados se presentan problemas de deslizamientos y flujos de tierra ocasionados por las talas indiscriminadas del bosque protector de las corrientes de agua.

Estos suelos ribereños por sus altos grados de fertilidad son muy apetecidos por los campesinos para sembrar cultivos de pan coger. En la parte media de las cuencas se localiza el piedemonte llanero el cual está ligado al sistema montañoso entre los 500 y 300 m.s.n.m con una precipitación promedio anual de 2.500 mm. Se encuentran pendientes tenues con cursos



trenzados con la presencia de meandros y áreas considerables de enlayamientos con frecuentes cambios en la dinámica de las corrientes debido a las abundantes precipitaciones y a la pérdida de profundidad de los cauces.

Por último, en la parte baja de las cuencas, la pendiente del curso del agua es mínima, disminuyendo considerablemente el arrastre de material. Estos cursos se caracterizan por ser meandricos con muchos trayectos en línea recta; la dinámica de la corriente cambia con mucha facilidad igual que en la parte media. En estas tierras bajas las llanuras de inundación se incrementan debido a la acreción lateral y vertical de arenas y limos durante las crecidas, momento en el que se deposita mayor cantidad de sedimentos por el decrecimiento de la velocidad del agua cuando se desborda el cauce del río, debido a esto se forman unos muros naturales en la orillas de los ríos los cuales reciben el nombre de bancales.

#### **4.2.1 Área hidrográfica de los Ríos Pauto y Ariporo**

La mayoría de las corrientes que vierten sus aguas a la cuenca hidrográfica del Río Meta nacen en la cordillera oriental en los departamentos de Cundinamarca, Meta y Boyacá; estos atraviesan las sabanas inundables de los Municipios de Paz de Ariporo, Pore y Trinidad por corrientes de los ríos Pauto, Guachiría y Ariporo, y los caños las Guamas y la Hermosa entre los más principales.

En las cuencas en estudio se han identificado seis (6) tipos de paisaje donde se encuentran desde la montaña, luego encontramos lomerío, piedemonte y planicie o llanura; de estos paisajes el de planicie o llanura corresponde al 70% de las cuencas con pendientes menores

al 7%, por lo cual presenta una alta condición de inundabilidad lo que conlleva al desarrollo de suelos superficiales con muy baja fertilidad lo cual limita las actividades agropecuarias. En la zonas bajas se encuentran suelos arcillosos mal drenados y en el resto de planicies se encuentran suelos arenosos con drenaje excesivo; las concentraciones de hierro son muy altas en contraste con las bajas concentraciones de materia orgánica, y son superficiales, ácidos y de baja fertilidad. Otra condición que se tiene en cuenta es que los suelos están expuestos al sol, a inundaciones y a sequías fuertes mayores a cuatro meses lo cual incide en la formación de suelos con características óxicas que se expresan con color rojizo y las ácuicas, que significa mal drenados. En las cuencas de los ríos Ariporo y Pauto es marcada la reducción de áreas de cobertura vegetal, causada especialmente por la extensión de la frontera agrícola.

El Departamento de Casanare, por encontrarse en la Zona de Convergencia Intertropical, el clima tiene un comportamiento de régimen mono modal con épocas bien marcadas, cuyo periodo de lluvias, va de abril a octubre, y de sequía o verano, de noviembre a marzo. Sin embargo, en la actualidad por el fenómeno del niño y el cambio climático a nivel mundial, estas condiciones cíclicas normales se han alterado originando fenómenos térmicos o pluviales inesperados, muchas veces catastróficos, con una tendencia a continuar variando y con mayor intensidad, los cuales están incidiendo de manera negativa en la red vial y en las parámetros de producción agropecuaria.

La cantidad e intensidad de las lluvias aumenta de noreste a suroeste, de manera, que la zona más lluviosa se localiza en los municipios de Chámeza, Recetor, Aguazul, Maní y Yopal, cuyos valores oscilan entre los 3.500 y los 4.500 mm anuales; las zonas menos lluviosas están en

la parte alta de los Municipios de Sácama y la Salina como en los municipios de Sabana, Trinidad, Paz de Ariporo y Hato Corozal los cuales oscilan entre los 2.000 y los 1.500 mm anuales.

La riqueza hidrográfica es una de las principales características del departamento; abundantes ríos, caños, lagunas y humedales (esteros) forman una intrincada red hídrica que provee a los llaneros de excelente biodiversidad de flora y fauna y les sirve como vía de comunicación y transporte durante la temporada de lluvias. El río Meta es el principal eje hidrográfico y a él confluyen por su margen izquierda todas las aguas que drenan del territorio casanareño, a través de importantes arterias fluviales tales como los ríos: Ariporo y Guachiría, los cuales delimitan el municipio de Paz de Ariporo, y los ríos Casanare, Guanapalo, Pauto, Tocaría, Cravo Sur, Cusiana, Túa y Upía, los cuales complementan la red hidrográfica del departamento.

#### **4.2.2 Recurso Hídrico Municipio de Paz de Ariporo**

El recurso hídrico del municipio de Paz de Ariporo se encuentra delimitado por dos importantes ríos como son el río Ariporo y el Guachiría, afluentes del río Meta y donde se encuentran gran cantidad de caños y lagunas conformando una muy bien estructurada red hídrica.

La oferta hídrica del municipio se está viendo mermada por la gran cantidad de proyectos agropecuarios que se han establecido en las sabanas del municipio, donde el desmonte y su respectiva extracción de material vegetal con la intención de ampliar las áreas pastoriles y pequeños sistemas agrícolas, trae como consecuencia la pérdida de la vegetación nativa y por

ende se afecta directamente la biodiversidad, además de generar erosión porque los suelos se encuentran poco protegidos de los vientos y lluvias.

Respecto al suelo, se puede afirmar que la parte del piedemonte son altamente susceptibles a la erosión, y los de llanura son ácidos, mal drenados, de baja fertilidad y con muy bajos niveles de materia orgánica; todo lo anterior debido a la abundancia de quemadas periódicas, la deforestación y el sobre pastoreo por actividades ganaderas.

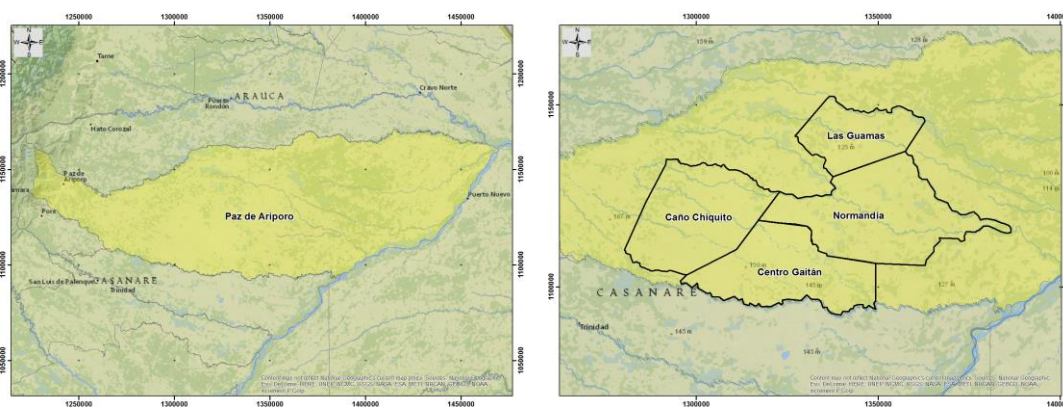
En cuanto a la flora del municipio que tiene una relación directa con el recurso hídrico, se encuentra que la diversidad de la cobertura vegetal en la región presenta un gran potencial de uso, pero desafortunadamente se ha mermado el recurso; en los últimos 70 años se talaron en el piedemonte más de 32.000 km<sup>2</sup> que según estimativos disminuyó en la Orinoquía por lo menos 1000 m<sup>3</sup>/seg el caudal de los ríos en épocas de verano.

## 5. LOCALIZACIÓN Y DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

### 5.1 Localización

Paz de Ariporo está situada al nor-orienté del Departamento de Casanare, con una extensión aproximada de 13.800 km<sup>2</sup>, convirtiéndose en uno de los municipios más extenso del país y representa el 27.14% de la superficie Departamental. La altura aproximada es de 270 m.s.n.m., y está a una distancia de 90 km de Yopal y 426 km de Bogotá. Limita al norte con el Municipio de Hato Corozal, al orienté con los Departamentos de Arauca y Vichada, al sur con el Municipio de Trinidad y por el occidente con los Municipios de Pore y Támara.

La zona rural se encuentra dividida en 54 veredas y 5 corregimientos reconocidos políticamente, y para este proyecto se tuvieron en cuenta las veredas más afectadas por la sequía de 2014 como son: Caño Chiquito, Centro Gaitán, Normandía y las Guamas.

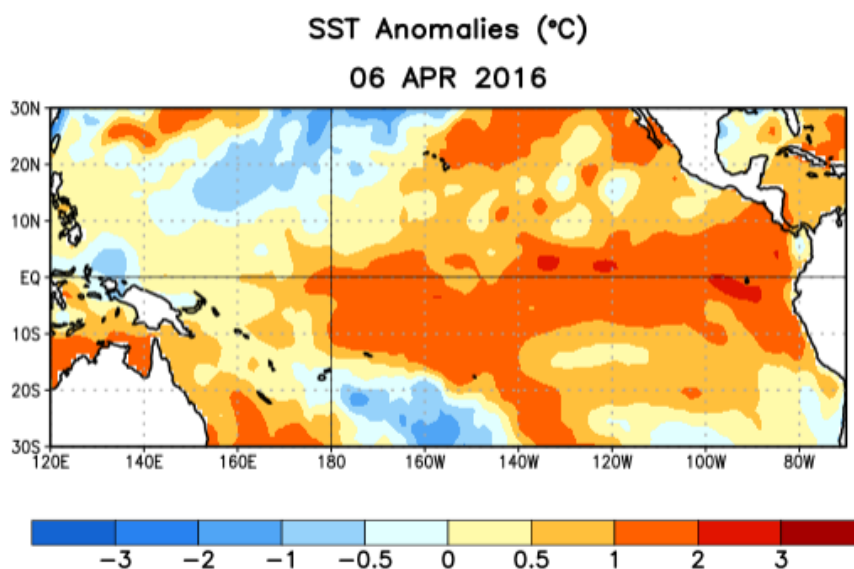


*Ilustración 3 Mapa de localización del área de estudio.*

## 6. MARCO TEÓRICO

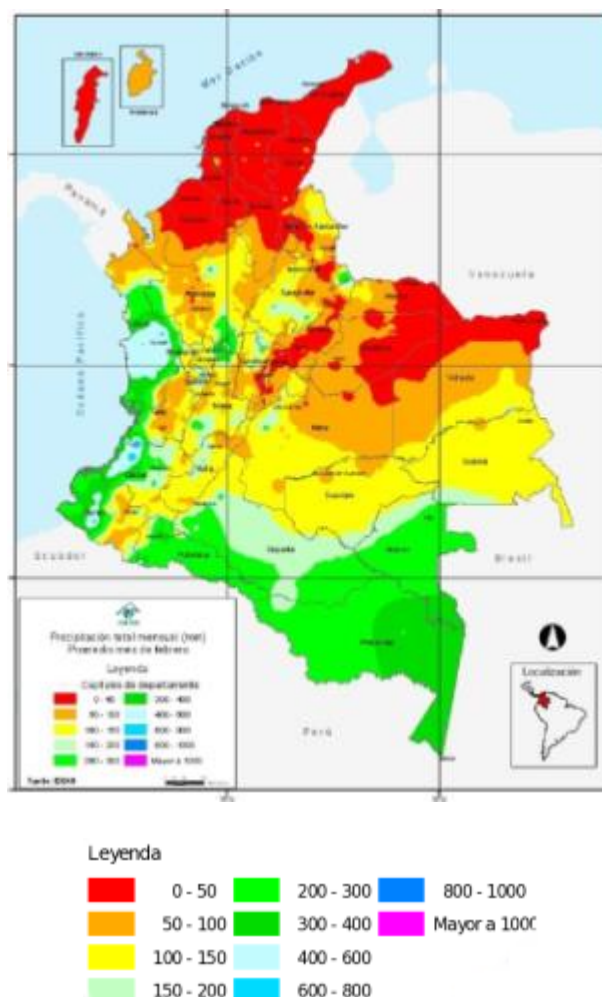
En nuestro continente, cuando aparecen aguas superficiales relativamente más cálidas de lo normal en el océano pacífico tropical central y oriental se denomina “El Niño” (IDEAM, et. al. 2016), este fenómeno se da frente a las costas del norte del Perú, Ecuador y el sur de Colombia, cubriendo grandes extensiones por su magnitud y afectando el clima en varias regiones del planeta y entre ellas el norte de Sur América donde se encuentra nuestro país; para determinar que el fenómeno va adquiriendo forma se tienen en cuenta la temperatura superficial del mar que es el indicador que más se utiliza para establecer la presencia del mismo y otros indicadores no solo oceánicos sino atmosféricos, entonces para la consolidación del evento deben existir un acoplamiento océano – atmósfera.

En condiciones normales en el pacífico tropical se encuentran vientos procedentes del oriente, y en estas condiciones las aguas son más calientes al occidente y más frescas al este; entonces cuando se presenta una disminución de los vientos que provienen del oriente por variación anormal de presión en el pacífico sur, empiezan a predominar en forma anómala vientos del occidente generando el desplazamiento de las aguas cálidas del pacífico occidental hacia la zona central y oriental, donde ocupa la mayor parte del pacífico Ecuatorial lo que promueve la ocurrencia del Fenómeno del Niño. (Ver Gráfica)



*Ilustración 4 Mapa de Anomalías de temperatura superficial en el Océano Pacífico Tropical. Tomado de: [http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis\\_monitoring](http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring)*

Con la ocurrencia de este fenómeno, se presenta un efecto en el comportamiento climático del país, donde se registra un debilitamiento en las lluvias en cuanto a cantidad y frecuencia afectando mayormente las regiones Caribe, Andina, centro norte del pacífico y áreas del piedemonte de la cordillera oriental hacia Venezuela; así mismo, en estas zonas los aumentos de temperatura son notorios en relación con lo normal para esta época del año; también es muy importante recalcar que el Niño no significa sequia total como suele interpretarse ocasionalmente.



*Ilustración 5 Precipitación Acumulada para el mes de Febrero (Periodo 1981 - 2010)*

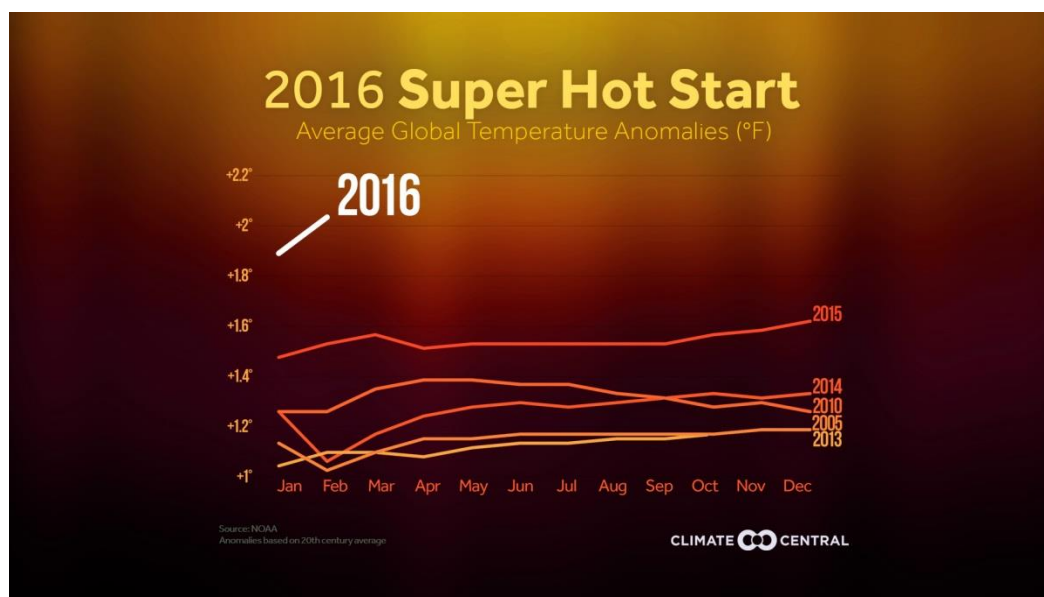
<http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/climatologico-mensual.html>

Con la intención de determinar la duración de este fenómeno (inicio y final) lo mismo que su intensidad, se utiliza a nivel mundial el índice oceánico El Niño (ONI) el cual es desarrollado por el servicio meteorológico de los Estados Unidos (Administración Nacional del Océano y de la Atmósfera – NOAA). Con base a los comportamientos de este indicador se ha considerado que este fenómeno del Niño 2015 – 2016 ha sido uno de los más fuertes de la historia de nuestro país, donde se encuentran valores similares a los que se presentaron entre



1997 y 1998; por otro lado el Índice Multivariado El Niño (MEI) es tenido en cuenta como una herramienta muy acertada para determinar la intensidad de este fenómeno el cual involucra variables del océano y de la atmósfera. Con base en el índice Oceánico El Niño (ONI), el actual fenómeno “El Niño” se puede considerar como el segundo más intenso desde el año 1950, donde se confirma que el más reciente fenómeno de El Niño ocurrió entre 2009 y 2010, el último más fuerte y de mayor impacto ocurrió entre 1997 y 1998.

El Fenómeno del Niño consta de cuatro (4) fases definidas: inicio, desarrollo, madurez y debilitamiento; entre las cuales su punto máximo en la etapa de madurez, se logra usualmente a finales del segundo semestre del año y por tal razón el IDEAM advirtió en su momento acerca de los efectos más fuertes del evento actual, también sobre los patrones de precipitación y temperatura en Colombia y que se registrarían en el comienzo del año 2016.

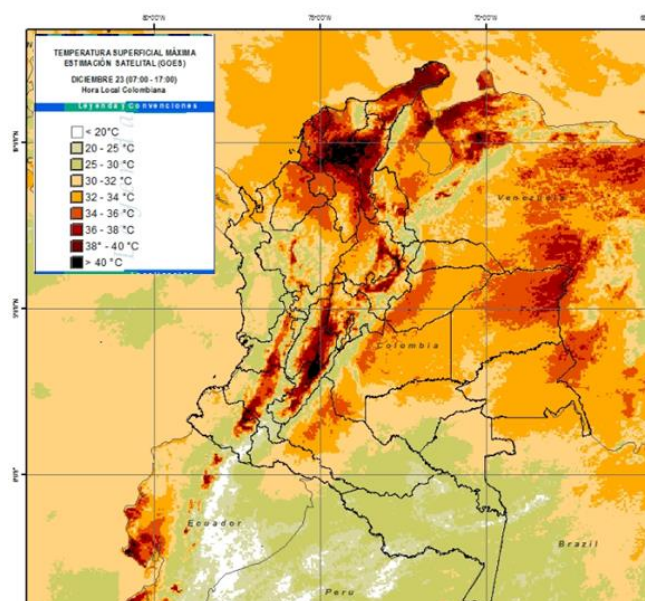


*Ilustración 6 Anomalías de la temperatura promedio global (°C) Febrero de 2016.*

Hay que recalcar que los últimos meses del 2015 y comienzos del 2016 se han reflejado las consecuencias de El Niño con una disminución muy marcada de las precipitaciones con la presencia a su vez de altas temperaturas en gran parte de las regiones Andina, Caribe y Orinoquía; también es importante como dato adicional que a nivel mundial se registró durante el mes de febrero de 2016, los valores más altos de temperatura por un alto margen, donde se pudo concluir que este mes fue uno de los más cálidos de los últimos 100 años. A nivel mundial se han venido registrando records de temperatura, inclusive superando los registros históricos que se tienen por todo el planeta.

Siguiendo las estadísticas durante el mes de febrero de 2016, se presentó nuevamente un decaimiento de las lluvias, con volúmenes muy por debajo de lo normal en la mayoría del territorio nacional especialmente en la Orinoquía en las zonas de Arauca, Meta y Casanare,

aunque vale aclarar que se presentaron excesos de lluvia en amplios sectores del sur en la región Amazónica.



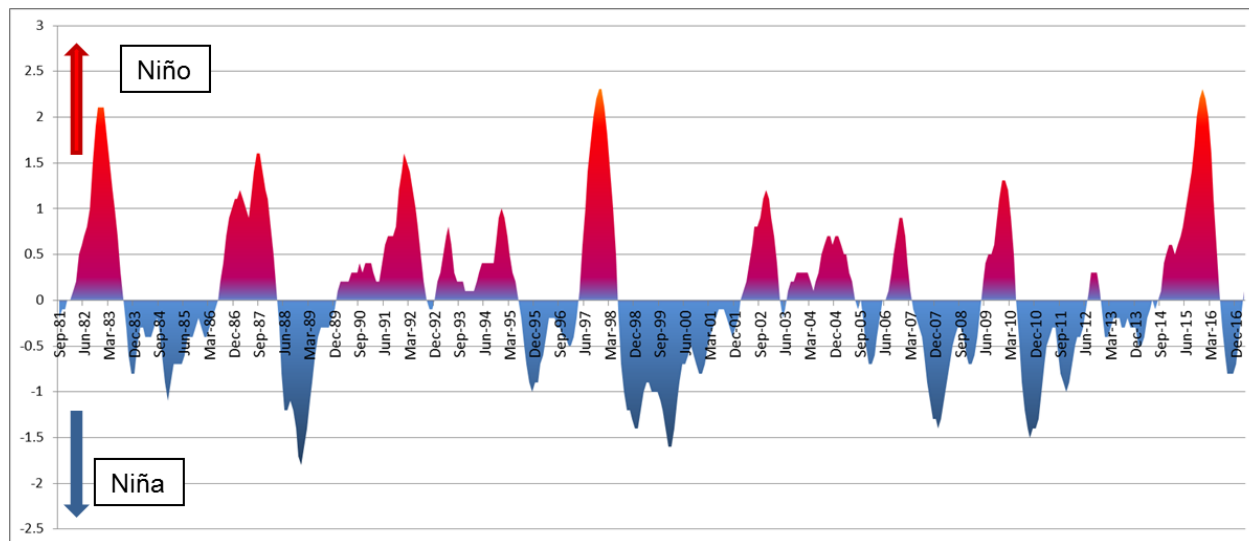
*Ilustración 7 Temperatura Superficial Dic 23 2015– Estación Satelital (GOES)*

*Fuente: <http://www.ideam.gov.co/web/pronosticos-y-alertas/temperatura-superficial>*

En cuanto a las anomalías de temperatura media con base a la diferencia entre los valores medios del mes de febrero del 2016 y los valores medio de información histórica para el mismo mes, mostraron nuevamente valores por encima de los promedios en todo el territorio nacional; donde se pudo constatar que para la región de la Orinoquia se presentaron anomalías entre 1,0° y 2,0° arriba de los valores promedios de la época.

Para poder identificar los eventos cálidos y fríos que caracterizan los fenómenos del niño y la niña la NOAA calcula el índice Oceánico de El Niño. Este se calcula mediante la media

móvil de tres meses consecutivos de las anomalías de temperatura superficial del mar, en una zona específica de la región pacífica denominada región Niño 3.4 (29)



*Ilustración 8 Serie de tiempo que muestra los episodios históricos del fenómeno del Niño a través del Oceanic Niño Index (ONI). . Datos tomados de*

*[http://www.cpc.noaa.gov/products/analysis\\_monitoring/ensostuff/ensoyears\\_ERSSTv3b.shtml](http://www.cpc.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ensoyears_ERSSTv3b.shtml)*

En los últimos tiempos se han utilizado diferentes mecanismos de reconocimiento para la detección de cuerpos de agua, con base a las características identificables de esta cobertura debido a sus altos índices de reflectancia, hacen viable la labor en las longitudes de ondas cortas (Bandas azul y verde), además de utilizar su característica principal que es la absorción y transmisión en altos porcentajes de la energía que recibe en el dominio óptico del espectro electromagnético; entre los componentes y atributos se tienen en cuenta: la profundidad, tipos de elementos de suspensión y la rugosidad de las superficies de agua.

Los cuerpos de agua muestran una baja reflectividad en el rango de onda del espectro visible (480 ~580nm, equivalente a la Banda1 y Banda2 de las imágenes Landsat TM/ETM), f

~5%, y disminuye a 2% ~3% hacia los 580 nm. Hacia el infrarrojo, los cuerpos de agua tienen la característica de tener una fuerte absorción (740 ~ 2500nm, equivalente a las bandas 4, 5 y 7 de TM/ETM). Permitiendo usar este rango de longitud de onda para distinguir el agua del suelo, vegetación, construcciones y otros tipos de coberturas. Chuvieco, 2008 (26).

Múltiples técnicas de extracción de cuerpos de agua muestran varios grados de precisión y a su vez resultados notablemente distintos con base al índice y al tipo de metodología usadas se han venido utilizando recientemente; existe una gran variedad de índices de vegetación que fueron desarrollados para monitorear la vegetación, donde la evaluación cuantitativa de la biomasa o flora de la vegetación verde es realizada a través de algoritmos de índices de vegetación (VI).

Índice de Vegetación (VI) Es un parámetro que se calcula con base a los valores de reflectividad a distintas longitudes de onda, donde se pretende determinar rasgos fisiológicos relacionados con la vegetación, así como de los nutrientes de la misma, y en lo posible minimizar factores externos como las propiedades del suelo, la irradiación solar, etc; según Jackson et. al. (1983) el índice de vegetación ideal es *“aquel particularmente sensible a la cubierta vegetal, insensible al brillo y color del suelo y poco afectado por las perturbaciones atmosféricas, los factores medioambientales y la geometría de la iluminación y de observación”*. Por tal razón se evidencia que este índice ideal no existe y los que encontramos son diversas aproximaciones, además se sabe que más del 90% de la información espectral de una cobertura vegetal se contiene en las bandas roja e infrarroja cercana y por esto se utilizan estas bandas principalmente en los cálculos de los índices radiométricos; el desarrollo de estos índices se debió a la observación de

la consistencia de la respuesta a la reflectancia de la luz roja e infra roja de la vegetación verde, donde a mayor cantidad de clorofila más alta es la absorción de la luz incidente roja y a mayor volumen foliar es mayor la reflectancia de la luz del infrarrojo cercano; entonces solo la vegetación viva produce ambas respuestas y por tal razón cuando la primera aumenta la segunda disminuye y el cociente o diferencia será mayor entre más vegetación exista en un área determinada. Towers et. al. (2002).

Indice de Diferencia de Vegetación Normalizado (NDVI) Este tipo de índice utiliza las bandas relacionadas con la estructura externa de la planta y se calcula con base en la relación de la máxima reflexión de la banda del infrarrojo cercano (NIR) y la absorción de la banda del rojo; es sin lugar a dudas el más utilizado en aplicaciones agronómicas, es un índice de vegetación bidimensional, Rouse et. al. (1974), también es muy utilizado para los estudios de erosión del suelo debido fundamentalmente a su sencillez de cálculo y de facilitar la interpretación directa de los parámetros biofísicos de la vegetación.

Indice de Anomalías de Vegetación (VAI) Se estableció con la intención de explicar y mostrar la importancia de la diferencia del índice de vegetación normalizado (NDVI) con su significado estadístico, estos procesos de normalización de las anomalías tiene significados especiales en la determinación de falsas alarmas y en el aumento en la tasa de detección, por tal razón es muy útil en la detección de casos de anomalías leves por ejemplo sequias, deforestaciones, estado de la vegetación, etc. Para determinar estas anomalías se hace necesario como requisito tener un buen archivo de datos previo, la detección de anomalías de vegetación y su dinámica en el tiempo depende de la confiabilidad del conjunto de datos de referencia

calculados en los NDVI's, lo cual permite y enriquecen los estudios de cambios de las coberturas vegetales.

Indice de Condición Vegetal (VCI) Es un indicador del estado de la cobertura vegetal en función de los NDVI máximos y mínimos de varios años consecutivos, este índice compara el NDVI actual con el rango de valores observado en el mismo periodo de tiempo en años anteriores; se expresa en % y nos da una idea de donde se encuentra ubicado el valor observado a la fecha entre los valores mínimos y máximos de años atrás. Los valores más bajos y altos representan las condiciones de estado vegetativo si es bueno o malo respectivamente.

$$VCI = (NDVI - NDVI_{min}) / (NDVI_{max} - NDVI_{min}) * 100$$

Acerca de los métodos que frecuentemente se usan para extraer superficies de agua con base a la utilización de sensores remotos se encuentran los siguientes a saber: Clasificación temática, alineación lineal (Estira o expande el contraste), umbral de una sola banda y los índices espectrales de dos (2) bandas, este último escogido para el desarrollo de este trabajo; se utilizaron los índices NDWI (índice de agua normalizado) y el MNDWI (índice de agua normalizado modificado), donde este último es más adecuado para resaltar los cuerpos de agua comparados con otras coberturas porque puede reducir más eficientemente e incluso eliminar el ruido generados por estas últimas, entonces los valores de umbral para el MNDWI para lograr el mejor resultado en la extracción de agua son generalmente menores que los del NDWI, y por tal razón son muy útiles para la detección de pequeñas diferencias de forma en los cuerpos de agua.

Para nuestro caso de estudio utilizamos la ecuación (3) en las imágenes Landsat

$$MNDWI = (\rho_{verde} - \rho_{SWIR}) / (\rho_{verde} + \rho_{SWIR})$$

Ahora bien el índice de diferencia normalizada de agua (NDWI) es un buen indicador para la vegetación y el agua líquida, es menos sensible a los efectos de dispersión atmosférica que el Índice de Vegetación (NDVI), se usa para detectar y vigilar el estado de humedad de la vegetación en grandes zonas cubiertas, es un derivado del infrarrojo cercano (NIR) y de infrarrojo de onda corta (SWIR) los cuales son canales que reflejan los cambios en el contenido de agua (SWIR absorción de radiación). También es útil para la tele observación de los cambios en el contenido de agua líquida de la vegetación desde el espacio, las propiedades reflectoras del color verde de la vegetación, suelos y la vegetación seca.

Este se obtiene utilizando principios similares a los del índice normalizado de Vegetación (NDVI), el cual es usado para mostrar la densidad de la cubierta vegetal en imágenes de satélite. La vegetación producirá una fuerte reflexión dado que la firma espectral de esta, no suele presentar problemas para distinguir entre suelo desnudo y vegetación verde. La diferencia entre la reflexión de las gamas visible y de infrarrojo cercano, puede utilizarse para determinar la fotosíntesis y el crecimiento de las plantas; los pigmentos de las células de las hojas absorben la mayor parte del rojo y reflejan la mayoría de la radiación de infrarrojo cercano procedente del Sol.

La extracción de cuerpos de agua mediante el uso de sensores remotos ha sido uno de los métodos más utilizados en la investigación de los recursos del agua, donde la evaluación y la predicción de riesgos de inundación han permitido con base a una buena planificación que se



eviten catástrofes ocasionados por inundaciones; debido a esto múltiples métodos se utilizan, a saber: La clasificación supervisada, la clasificación no supervisada, el umbral de una sola banda, método de análisis espectral y el método del índice de agua (Índice de diferencia normalizada de agua o el índice de diferencia normalizada de agua modificado).

Las técnicas de teledetección proporcionan herramientas importantes para delimitar las características y monitorear la dinámica del agua en superficie, el índice de diferencia de agua normalizado (NDWI) ha sido utilizado con éxito para delinear y mapear estas características de los cuerpos de agua; aunque a menudo se han encontrado dos (2) problemas donde los NDWIs calculados a partir de diferentes combinaciones de bandas (visible, infrarrojo cercano o infrarrojo de onda corta SWIR) pueden generar diferentes resultados y por otra parte, los umbrales de los NDWI varían dependiendo de las proporciones de los componentes de sub píxeles agua y no agua; por tal razón debemos evaluar todos los NDWIs para determinar el índice de mejor rendimiento y así establecer los umbrales adecuados para la clara identificación de las características del agua.

El índice espectral del agua es un número único derivado de una operación aritmética (ej. La relación, la diferencia, y la diferencia normalizada) de dos o más bandas espectrales. Un umbral apropiado se debe establecer para separar los cuerpos de agua de otras coberturas de la tierra con base a las características espectrales. El diseño de un índice espectral del agua se basa en el hecho de que el agua absorbe energía en las longitudes de onda del infrarrojo cercano (NIR) y el infrarrojo de onda corta (SWIR). La operación aritmética no solo mejora las señales espectrales contrastando la reflectancia entre diferentes longitudes de onda, sino que también

anula una gran parte de los componentes de ruido los cuales son muy comunes entre diferentes longitudes de onda, es decir la calibración del sensor y el cambio de las condiciones de radiación causada por la iluminación, la superficie del suelo, topografía y las condiciones atmosféricas.

Una vez implementado el formato del índice de diferencia de vegetación normalizado (NDVI) en el año 1996 por McFeeters, se implementó el índice de diferencia de agua normalizado (NDWI) con la siguiente ecuación:

$$NDWI = (\rho_{verde} - \rho_{NIR}) / (\rho_{verde} + \rho_{NIR}) \quad (\text{ecuación 1})$$

Los valores de  $\rho_{verde}$  y  $\rho_{NIR}$  indican la reflectancia de las bandas verde e infrarrojo cercano, el valor del índice de diferencia de agua normalizado está en el rango de -1 y 1; McFeeters (1996) registró el cero (0) como el umbral y los resultados indican que la cobertura es agua si el índice NDWI > 0 y a su vez no es agua si el índice NDWI < 0, otro índice implementado por Gao (1996) para determinar los contenidos de agua de la cobertura vegetal también fue utilizado en su época; vale aclarar que estos índices tienen la misma terminología pero sus conceptos difieren entre sí, donde el índice NDWI de Gao se obtiene de la diferencia normalizada de las bandas NIR y SWIR. Ahora bien, por otro lado Rogers y Kearney (2004) utilizaron las bandas 3 (rojo) y 5 (SWIR) del sensor Landsat TM para calcular índices NDWI con la siguiente ecuación:

$$NDWI = (\rho_{rojo} - \rho_{SWIR}) / (\rho_{rojo} + \rho_{SWIR}) \quad (\text{ecuación 2})$$

Estos valores de  $\rho_{rojo}$  y  $\rho_{SWIR}$  indican la reflectancia de las bandas del color rojo y del infrarrojo de onda corta; en el año 2006 Xu demostró que el índice NDWI implementado por

McFeeters no realizaba la separación completa de las coberturas de áreas urbanizadas de las coberturas que contenían agua, ya que los índices calculados mostraban valores positivos en las dos (2) coberturas indicando que la reflectancia del NIR (infrarrojo cercano) era menor que la reflectancia de la banda verde. Por tal razón y con la intención de balancear las desventajas del índice NDWI de McFeeters, Xu (2006) recomienda la implementación de un índice NDWI modificado (MNDWI) tomando la banda del infrarrojo de onda corta (SWIR) banda 5 del sensor Landsat TM para reemplazar la banda del infrarrojo cercano (NIR) en la ecuación correspondiente del índice NDWI implementado por McFeeters (31):

$$MNDWI = (\rho_{verde} - \rho_{SWIR}) / (\rho_{verde} + \rho_{SWIR}) \quad (\text{ecuación 3})$$

Tomando como base el índice implementado por McFeeters, igualmente se estableció los valores del umbral para el índice modificado (MNDWI) como cero (0); aunque en el año 2006 (Xu) realizando ajustes manualmente del umbral, demostró que se podían obtener resultados más precisos en la determinación de los límites de las coberturas que contengan agua. Del mismo modo Lacaux et al. (2007) por su propia cuenta implementó un índice de diferencia normalizado para estanques (NDPI) con la intención de clasificar dichas coberturas en el África Occidental, donde este índice NDPI se calcula con la diferencia normalizada de la reflectancia de las bandas 1 y 4 (verde y SWIR) del sensor SPOT5.

$$NDPI = (\rho_{SWIR} - \rho_{verde}) / (\rho_{SWIR} + \rho_{verde}) \quad (\text{ecuación 4})$$

Ahora bien, cómo podemos ver las ecuaciones 3 (MNDWI) y 4 (NDPI) son muy idénticas, y lo que las diferencia es el orden de las bandas verde y SWIR en las dos (2) ecuaciones; Lacaux et al. (2007) implementó estos criterios con la intención de determinar

estanques, teniendo en cuenta que si el índice NDPI < umbral 1 y la reflectancia de la banda SWIR < umbral 2 la cobertura es estanque o lago, en caso contrario la cobertura es diferente; así se determinaron los umbrales para cada imagen. Lei Ji, Li Zhang, Wylie Bruce, 2009 (27).

Vale aclarar que en los estudios encaminados a la detección y determinación de los cambios en la geometría de los cuerpos de agua, Ouma y Tateishi (2006) se usaron cinco (5) ecuaciones diferentes en los índices NDWI en imágenes Landsat TM / ETM:

$$NDWI\_1 = (\rho b7 - \rho b5) / (\rho b7 + \rho b5)$$

$$NDWI\_2 = (\rho b4 - \rho b2) / (\rho b4 + \rho b2)$$

$$NDWI\_3 = (\rho b5 - \rho b4) / (\rho b5 + \rho b4)$$

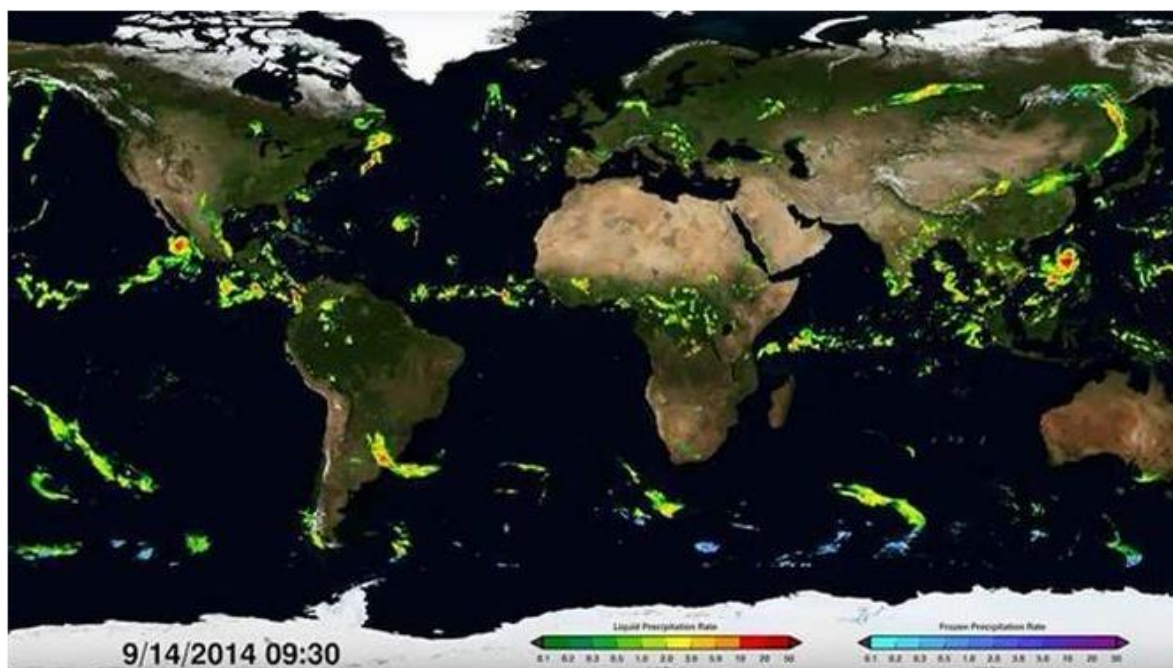
$$NDWI\_4 = (\rho b5 - \rho b2) / (\rho b5 + \rho b2)$$

$$NDWI\_5 = (\rho b7 - \rho b2) / (\rho b7 + \rho b2).$$

En las cinco (5) ecuaciones arriba mencionadas y que se utilizaron para calcular índices NDWI, la ecuación NDWI\_2 es la misma implementada por McFeeters para determinar los índices NDWI (ecuación 1), a su vez la ecuación NDWI\_4 es similar a la ecuación MNDWI utilizada por Xu (ecuación 3). Por último Ouma y Tateishi (2006) clasificaron los índices con base a su rendimiento de menor a mayor en la detección y su respectiva determinación de coberturas de agua así: *NDWI1*, *NDWI5*, *NDWI4*, *NDWI2* y *NDWI3*. La modificación del NDWI utilizando la banda SWIR en lugar de la banda NIR puede mejorar considerablemente la identificación de las características de las aguas abiertas y a su vez discrimina rápidamente con precisión cuales de estas características no son del agua; como se acotó anteriormente, Xu et. al. (2006), Demostró que el índice de diferencia normalizado de agua modificado MNDWI es más

adecuado para la diferenciación de los cuerpos de agua sobre otras coberturas que el índice de diferencia normalizado de agua NDWI, ya que puede reducir muy eficientemente e incluso eliminar el ruido de áreas construidas y a su vez detectar sutiles diferencias de forma de las diferentes coberturas en especial los cuerpos de agua.

La NASA y la Agencia de Exploración Aeroespacial de Japón (JAXA) implementaron la Misión de Medición de Lluvias Tropicales (TRMM), la cual fue puesta en operación en el año 1997 con la intención de aprender acerca del papel de las lluvias tropicales en los ciclos del agua y de la energía de la tierra, la TRMM fue la primera misión encargada de la medición de las lluvias en el trópico (lluvias tropicales y subtropicales) y la respectiva liberación de energía asociada, dicha medición se realiza a través de microondas y sensores infrarrojos visibles, los cuales se encontraban en el primer radar de lluvia instalado en vehículos espaciales. Este satélite constaba con el primer radar de precipitación espacial que generaba imágenes de microondas especialmente diseñado para observar las lluvias tropicales moderadas e intensas.



*Ilustración 9 Imagen Precipitaciones Globales - Fuente: NASA & JAXA*

El entender y mejorar la comprensión de la circulación atmosférica era una de las intenciones de los científicos, ya que las precipitaciones y la respectiva evaporación son partes fundamentales en el movimiento de calor a través de la atmósfera, debido a que la evaporación del agua transfiere energía a la atmósfera, energía que se libera en forma de calor cuando el vapor de agua se condensa formando nubes. A su vez este calor permite que se formen tormentas unidas a los vientos que se mueven a través del planeta, por esto se dedujo que la mayor parte del calor que se encuentra en la atmósfera proviene de las lluvias tropicales.

Por ser la primera misión dedicada a la medición de lluvias tropicales y sub tropical (TRMM), aporta información importante como el entendimiento de las precipitaciones y su variabilidad lo cual es fundamental para comprender y predecir el cambio climático global; la información de datos recopilada, es la más informativa que cualquier otro dato que se tenga

disponible. La órbita del TRMM se encuentra entre los 35° de Latitud Norte y 35° al sur del Ecuador, lo cual permite al TRMM para volar sobre cualquier punto de la tierra a una hora local diferente y así los científicos usan los datos de este tipo de órbita para calcular las variaciones de las lluvias en periodos de 24 horas.

Los objetivos principales de este proyecto eran el de obtener y estudiar los datos de varios años medidos de las precipitaciones tropicales y sub tropicales, entender cómo las interrelaciones entre el mar, el aire y las masas de la tierra producen cambios en las precipitaciones y en el clima, predecir las precipitaciones y sus respectivas variabilidades en diferentes periodos de tiempo con base al modelado de la intensidad de las lluvias y su influencia en la circulación global, y por último se prueba, se evalúa y se mejoran las técnicas de medición de las precipitaciones por satélite.

La Misión utiliza cinco (5) instrumentos de medición de la precipitación en el satélite TRMM, a saber:

- El Radar de Precipitación PR que determina la distribución vertical de la precipitación con base a la medición de la reflectividad del sistema de nubes cuando la señal se debilita a medida que atraviesa la precipitación, la característica del PR es la medición de lluvias sobre la tierra.
- El TRMM Microwave Imager (TMI) es un radiómetro multicanal que con sus señales combinadas mide con bastante precisión la precipitación sobre los océanos y un poco menos precisa sobre la cobertura terrestre; estos datos TMI en combinación con los datos PR conforman el conjunto de datos de precipitación primaria.

- El infrarrojo visible del escáner (VIRS) mide la luminosidad en cinco (5) anchos de banda desde el visible hasta el infrarrojo, los científicos utilizan los datos del infrarrojo (IR) para realizar cálculos aproximados de precipitación en los trópicos.

- El sensor de Imágenes de relámpagos (LIS) es un telescopio óptico con un sistema de filtrado de la imagen, el cual muestra la distribución y variabilidad de los relámpagos; estos datos permiten al usuario el entendimiento de la dinámica de la tormenta y se correlaciona con la intensidad de la precipitación y la respectiva liberación de calor.

- Por último el sistema de energía radiante de la tierra (CERES) es un sensor en el rango del visible al infrarrojo diseñado especialmente para medir la energía que se presenta de la tierra a la atmósfera, esta energía cuando se nivela con la misma recibida por el globo terrestre desde el sol genera el balance de radiación de la tierra; entender este balance es importante para comprender la variabilidad del clima.

De estos instrumentos mencionados el PR y TMI son los más representativos que se utilizan en el cálculo de la precipitación, la información de estos instrumentos se utilizan en un algoritmo que forma el instrumento combinado TRMM generando el conjunto de datos de calibración TRMM 2B31, con los cuales se calculan los promedios de precipitación diarios y mensuales utilizados como base en la investigación del clima (30).

Ahora bien, con base a nuestra intención de identificar los cambios de los cuerpos de agua permanentes, utilizamos las herramientas y/o información primaria de fuentes fidedignas que nos permitiesen lograr los objetivos de este trabajo, donde la integración de una buena base



datos con imágenes multitemporales del área de estudio, análisis de datos pluviométricos, y una metodología acertada se pueden obtener resultados que validen los objetivos de este proyecto de investigación.

Después de la firma de la Convención Ramsar en el año 1971, donde se estableció el tratado entre países y diferentes organizaciones no gubernamentales buscando identificar y clasificar los ecosistemas de humedal para consolidarlos en bases de datos, permitió que varios países se interesaran e implementaran políticas de manejo y conservación de los mismos en áreas locales y regionales.

Con base al anterior tratado se realizó uno de los primeros trabajos encaminado a la identificación y clasificación de humedales en los Estado Unidos, es el de Cowardin et al. (1979), donde se realizó un inventario de cuerpos de agua (humedales) y a su vez una primera propuesta de clasificación de este tipo de ecosistemas.

Estos estudios han demostrado y confirmado que la teledetección es una gran herramienta de mucha utilidad para estimar y/o calcular anomalías de las diferentes coberturas que se encuentren en un área de estudio; en nuestro país en el año 2002 se formuló la Política Nacional de Humedales con base en un proceso de análisis de documentos generados por el Instituto Humboldt, y donde se asigna al instituto el trabajo de delimitar los ecosistemas de humedales a nivel nacional tomando información secundaria de mapas temáticos e imágenes satelitales donde se caracteriza por ser un proceso de integración y agregación de información y que tenía como meta generar un mapa de Colombia escala 1:100.000 apalancados de manera conjunta por el IDEAM y el IGAC; en nuestro país después del fenómeno de la Niña 2010 –

2011 este tipo de estudios se fueron incrementando aprovechando las técnicas de interpretación digital de imágenes satelitales. (Instituto Humboldt. et. al. 2014)

En 2007 en todo el territorio nacional se realizó un estudio de Estimación de Biomasa en Colombia a partir de imágenes Modis, donde se propuso un método para estimar la biomasa aérea y su variación para el año 2004. (Anaya J, Chuvieco E, Palacios A. et. al. 2007); y en el año 2009 se adelantó un estudio de la relación entre el índice normalizado diferencial de vegetación e índices de aridez en la región del Alto Patía. (Neira F, Verbist K, Gabriels D, Lobo D, Tori I, Carvajal Y. et. al. 2009).

En 2011 en la región de la Mojana fue objeto de estudios para el monitoreo de cuerpos de agua utilizando productos Modis, esta zona ha sido objeto de múltiples estudios desde el año 1998 donde la Universidad de los Andes modeló la dinámica fluvial de la región y entre las recomendaciones de dicho estudio fue la de realizar seguimientos periódicos con sensores remotos con la intención de materializar los cambios en el comportamiento dinámico de los cuerpos de agua. (Navia J. et. al. 2011).

En el año 2014 en adelante se han realizado varios estudios a nivel nacional mediante la utilización de imágenes de sensores remotos, entre los cuales se destacan: Determinación de los sólidos suspendidos en la cuenca media del Rio Bogota (Gómez J, Dalence J. et. al. 2014), Estudio básico de amenazas PBOT de Arauca (ASONOP. et. al. 2014), Análisis espectral de sólidos en aguas continentales con presencia de actividades mineras (Gonzalez M. et. al. 2014), Desarrollo de un modelo de corrección atmosférica de imágenes de Satélite para inundación. (Ariza A, García J, Rojas S, Ramírez M. et. al. 2014), Relación entre índices de vegetación y estados de degradación de pasturas en zonas de lomerío Departamento del Caquetá (Blanco J,

Rojas A, Rodriguez C, Malagón M. et. al. 2014), Variación en el índice de Vegetación Normalizado en fincas lecheras en el norte de Antioquia, años 1995 – 2014 (Bastidas A, Barahona R, Cerón M. et. al. 2016), Temperatura de la superficie terrestre en diferentes tipos de cobertura de la región andina de Colombia (Carvajal A, Pabón J. et. al. 2014), entre otros. Las técnicas utilizadas en la evaluación e interpretación digital de los cuerpos de agua mediante la utilización de imágenes de los sensores Landsat, MODIS y TRMM permitieron identificar de forma espacial las áreas con presencia de agua utilizando los índices espectrales como el índice de Vegetación Normalizado (NDVI), el índice de agua de diferencia normalizada (NDWI), los cuales fueron utilizados como variables de entrada en los estudios arriba mencionados generando información cartográfica multitemporal mostrando la dinámica de los cuerpos de agua , permitiendo a las entidades encargadas de administrar estos recursos la formulación de planes de conservación y/o mitigación ambiental en las áreas estudiadas.

## 7. METODOLOGIA

El siguiente diagrama de flujo (figura 10) muestra la metodología propuesta:

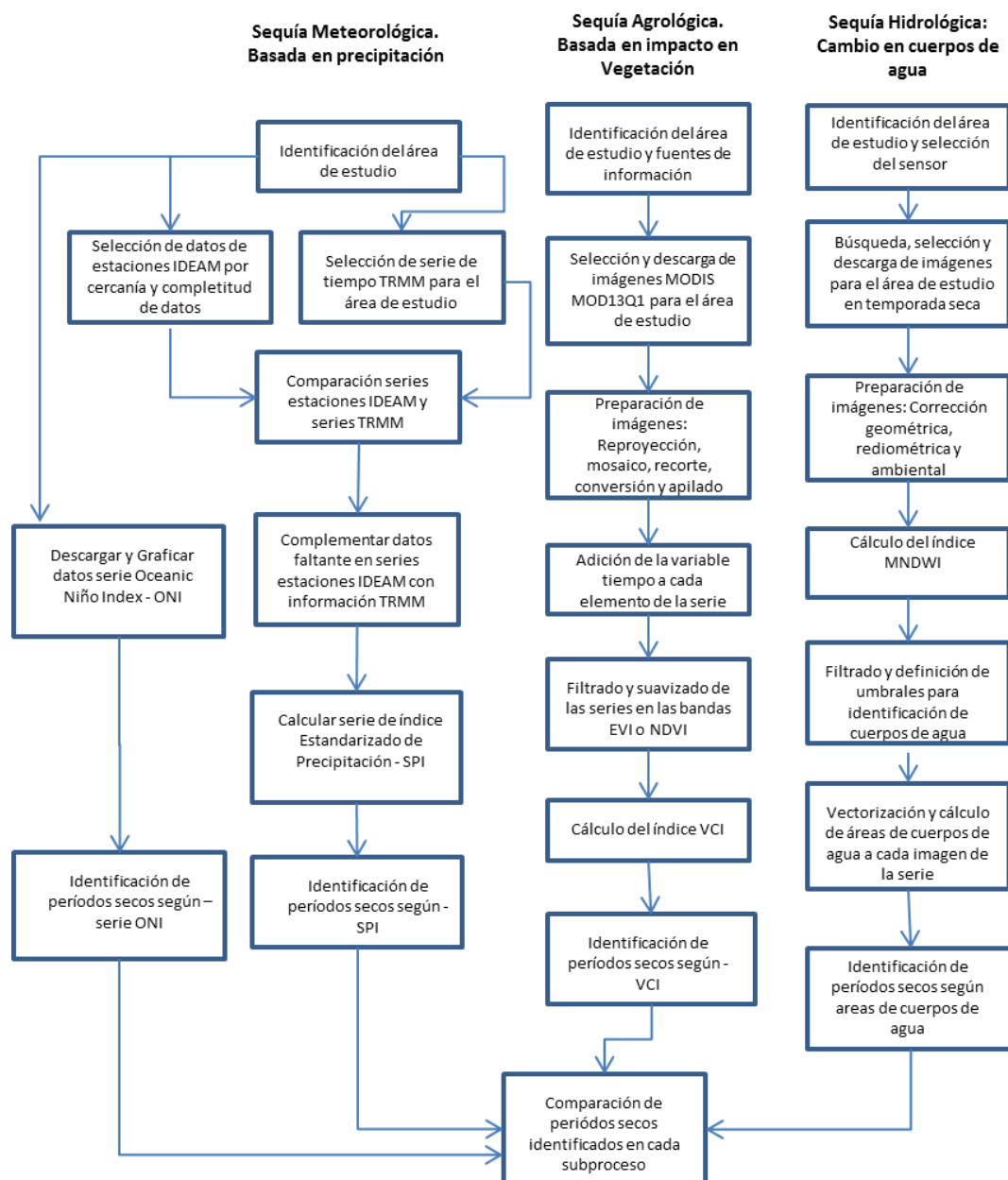


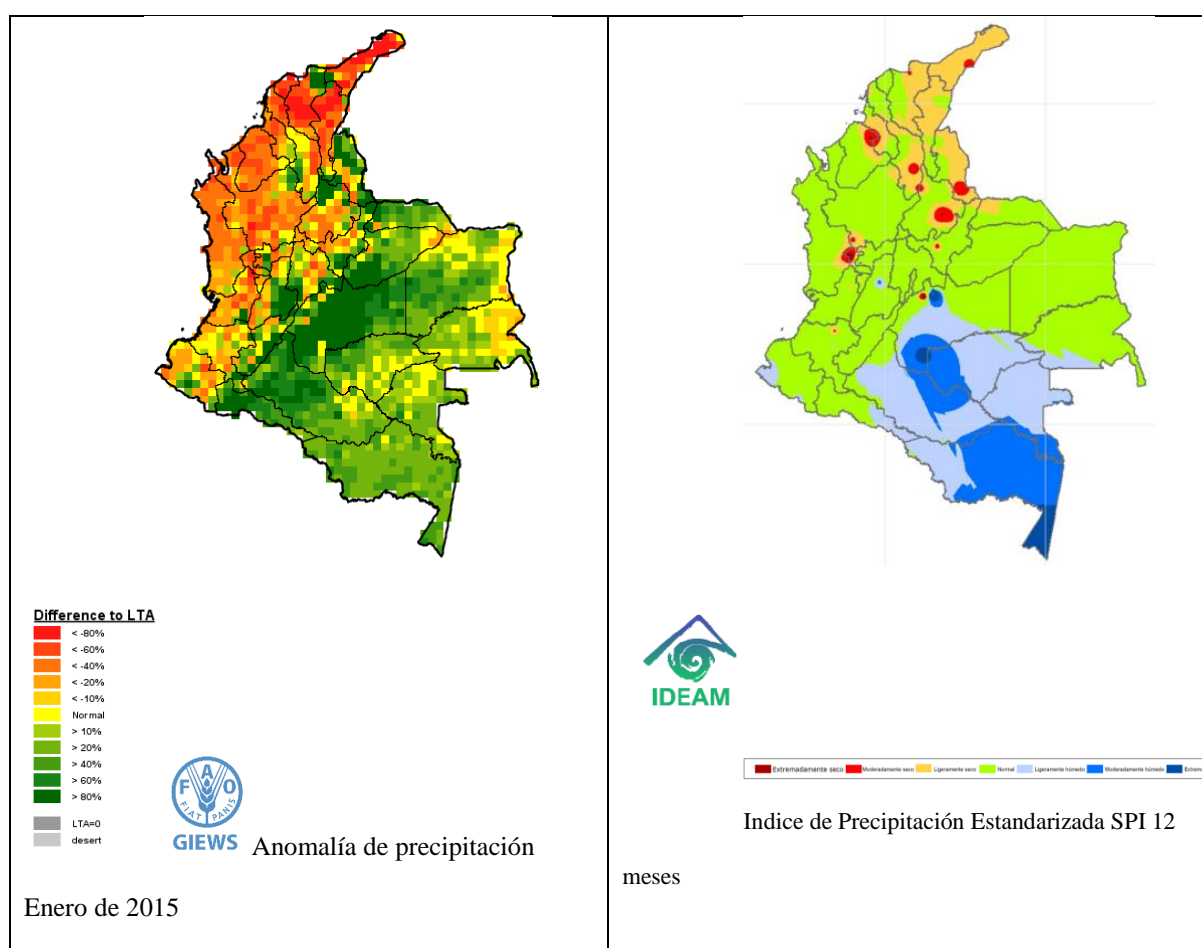
Ilustración 10 Diagrama de flujo de la metodología usada en este trabajo

La metodología comprende 3 procesos que buscan identificar desde diferentes puntos de vista períodos de tiempo anormalmente secos. El primer proceso aborda la sequía meteorológica (basada en déficit de precipitación): Este primer proceso se subdivide en la identificación de los períodos de ocurrencia del fenómeno del Niño que afectan el régimen de lluvias en Colombia a partir del índice ONI y otro subproceso que identifica períodos con déficit de precipitación a través del índice SPI. El segundo proceso aborda la sequía Agrológica, que tiene en cuenta el impacto de la sequía en la vegetación a través del índice “Vegetation Condition Index - VCI”. El tercer proceso aborda la sequía Hidrológica que cuantifica el cambio areal en los cuerpos de agua). Cada subproceso nos da como resultado un gráfico en función del tiempo donde se identifica los períodos anormalmente secos, donde podemos compararlos en escala de tiempo y analizar la concordancia de ellas y su posible relación con los cambios en el área de los cuerpos de agua.

### **7.1 Identificación de sequía meteorológica – déficit de precipitación**

Los estudios de sequía hechos por el IDEAM (29)(18)(15) son basados en puntos en donde existen estaciones meteorológicas y del nivel de los ríos. De allí se sacan índices de severidad de sequía como el SPI (McKee 1993, 1995) para la sequía meteorológica, y PDSI (Palmer 1965, 1968) para la sequía agrícola. Pero en nuestro caso, en muchas regiones de Colombia, la densidad de estaciones es muy baja, y en varias de ellas los registros son incompletos.

Como ejemplo de la baja densidad de estaciones pluviométricas, se muestra un mapa de anomalía de precipitación calculado con datos de satélite publicados por el Sistema mundial de información y alerta sobre la alimentación y la agricultura (SMIA) de la FAO (Organización de las naciones Unidas Para la Alimentación y la Agricultura) y el mapa de índice de precipitación estandarizada SPI del IDEAM comparando el mismo mes de Enero de 2015. (Figura 11)



*Ilustración 11 Mapa de Anomalías de Precipitación de la FAO e índice de precipitación del IDEAM para Enero de 2015*

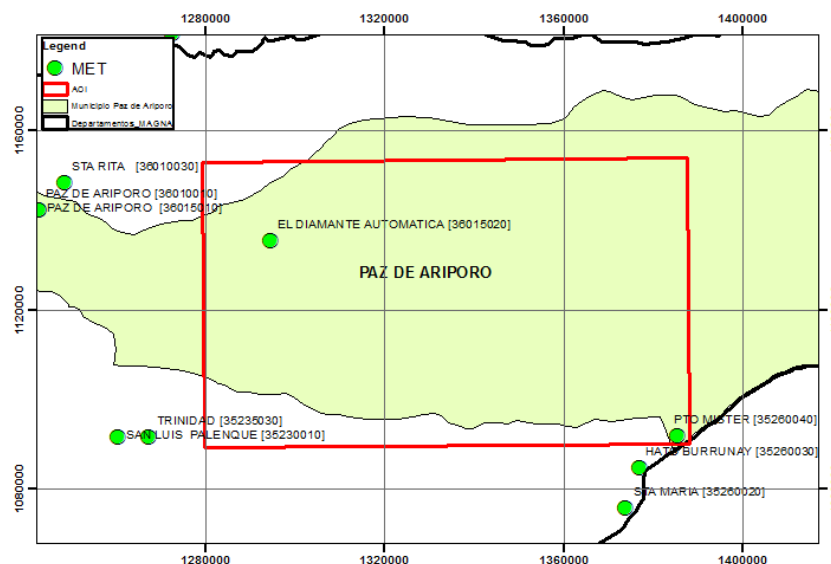
A pesar que el mapa de la FAO es obtenido a partir de una grilla de datos de baja resolución (0.25 grados), nos da una mejor idea de la distribución areal de las anomalías de precipitación y muestra coincidencia con lo mostrado en las estaciones del IDEAM, (que se identifican claramente como círculos en el mapa). El mapa del IDEAM, aunque es obtenido a partir de datos duros, es interpolado a partir de una muy baja densidad de estaciones, lo cual resulta en un mapa de muy poca confiabilidad en zonas alejadas de las estaciones. Esta simple comparación nos hace ver desde el comienzo el potencial de uso de imágenes de satélites atmosféricos y climáticos en nuestro entorno.

### **7.1.1 Identificación de déficit de precipitación a través de estaciones pluviométricas y datos de satélite TRMM**

Para ver la concordancia entre la precipitación derivada de satélites meteorológicos, realizamos una comparación entre las series históricas de precipitación total mensual del IDEAM, con las series de precipitación provenientes del satélite TRMM (Tropical Rainfall Measurement Mission), específicamente el producto 3B43 v7 en mm/mes, promediados para el área de interés.

Lo primero que notamos en Paz de Ariporo es que existen pocas estaciones para la gran extensión que tiene. En la zona de interés solo hay dos estaciones. Puerto Mister y El Diamante, pero la primera solo funcionó un par de años, y la segunda fue instalada en el 2005. De acuerdo a la nota técnica del IDEAM (15), se deben tomar estaciones con series de datos completos y de más de 15 años de registros pluviométricos, pues estos faltantes pueden inducir a errores. Por otro lado la organización meteorológica mundial (OMM) no recomienda el uso de estaciones con menos de 15 años de información, pues los índices se basan en la desviación de un promedio

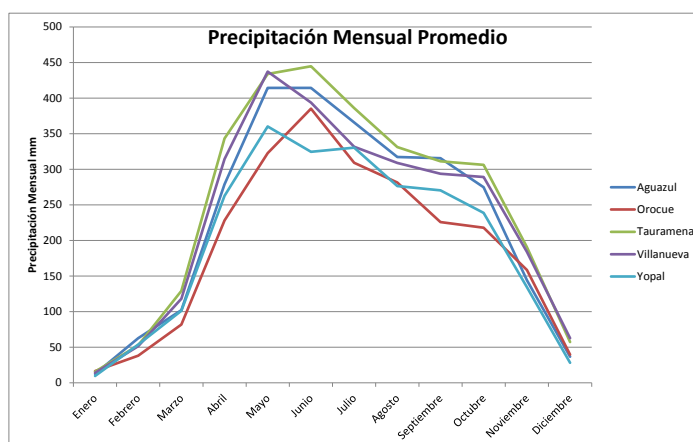
histórico. Por esta razón debimos ampliar el área geográfica para incluir más estaciones, para tener un histórico de precipitaciones más amplio. Para esta ampliación del área se tuvo en cuenta la selección de estaciones de la misma zona homogénea propuesta por Hurtado, G (2000), que para Paz de Ariporo y todo Casanare es la zona Rio Arauca y Cuenca Media del Meta.



*Ilustración 12 Ubicación de estaciones meteorológicas del IDEAM en la zona de interés*

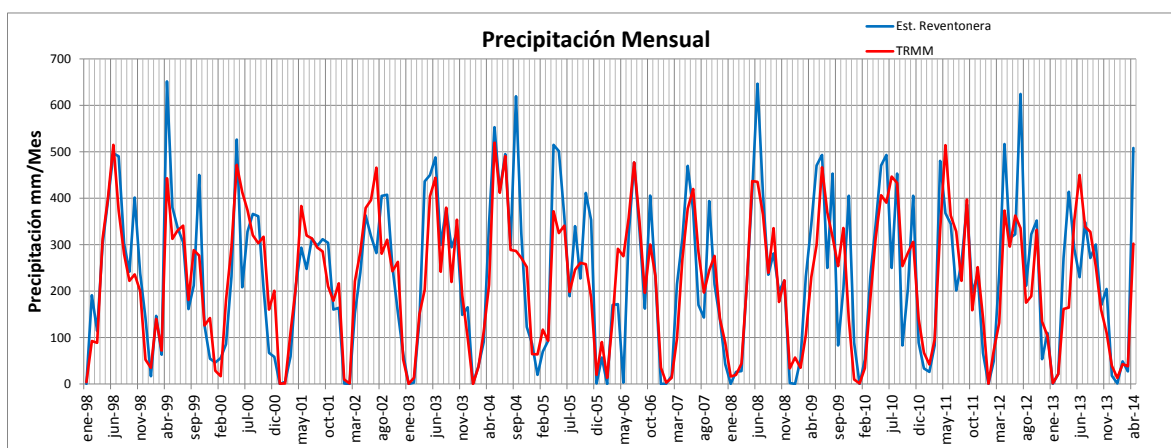
También se comparó la uniformidad de las precipitaciones promedias de las principales estaciones de Casanare para comprobar el comportamiento mono modal del régimen de lluvias e identificar los meses más secos para seleccionar y procesar las imágenes correspondientes a ese rango de meses de temporada seca.



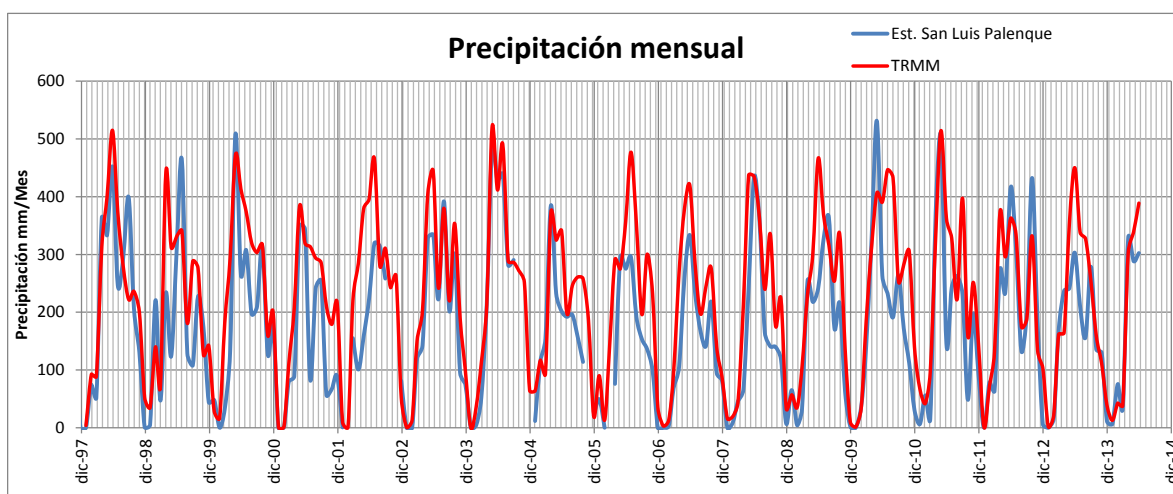


*Ilustración 13 Precipitaciones promedio de estaciones principales de Casanare*

La ilustración 13 de precipitación mensual promedio permite identificar el período seco en Casanare que va de diciembre a marzo cada año, seguido de la temporada de lluvias abril-noviembre.



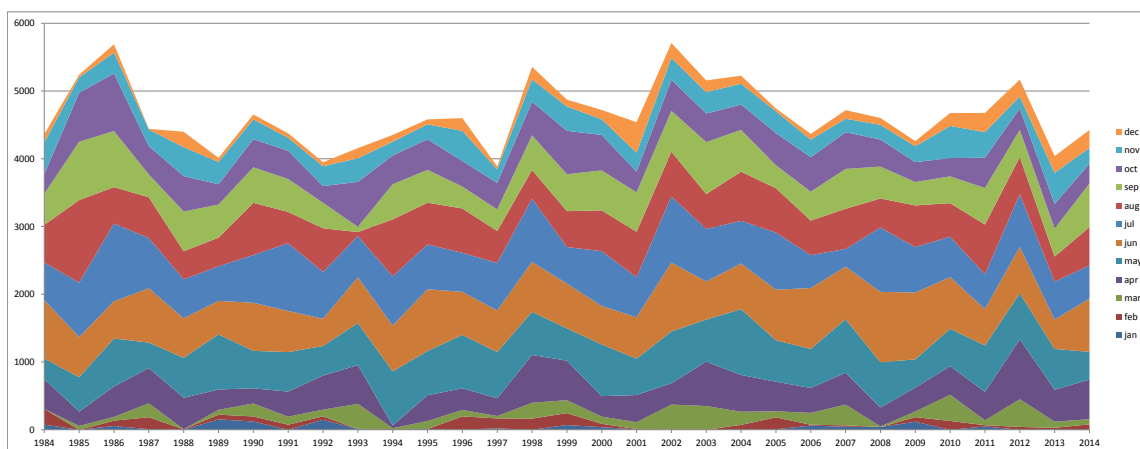
*Ilustración 14 Gráfica que compara una serie de precipitación total mensual de la estación Reventonera del IDEAM (línea azul) con precipitación total mensual con datos del sensor TRMM de la NASA (línea roja)*



*Ilustración 15 Gráfica que compara una serie de precipitación total mensual de la estación San Luis Palenque del IDEAM (línea azul) con precipitación total mensual con datos del sensor TRMM de la NASA (línea roja)*

En las gráficas 14 y 15 se grafican las series de precipitación mensual medidas por las estaciones del IDEAM y la precipitación calculada del satélite TRMM. Notamos la similitud general de la forma de las curvas, aunque los picos altos de corta duración no se ven en la serie TRMM. Las dos series de datos de las estaciones del IDEAM, comparados con la serie TRMM, presentan un coeficiente de correlación de 0.83 para la estación Reventonera y 0.85 para la estación San Luis Palenque, lo que nos permite usar datos TRMM para interpolar información faltante en los datos de precipitación del IDEAM con un bajo grado de incertidumbre. La validación de las series de datos de precipitación como TRMM en el entorno Colombiano se describe con detalle en la tesis de Alex castellanos -2016 (33). Se debe tener en cuenta que los datos TRMM solo están disponibles desde el año 1998, por lo cual no podemos extrapolar información faltante anterior a dicho año, y además, que este satélite cumplió su ciclo de vida en

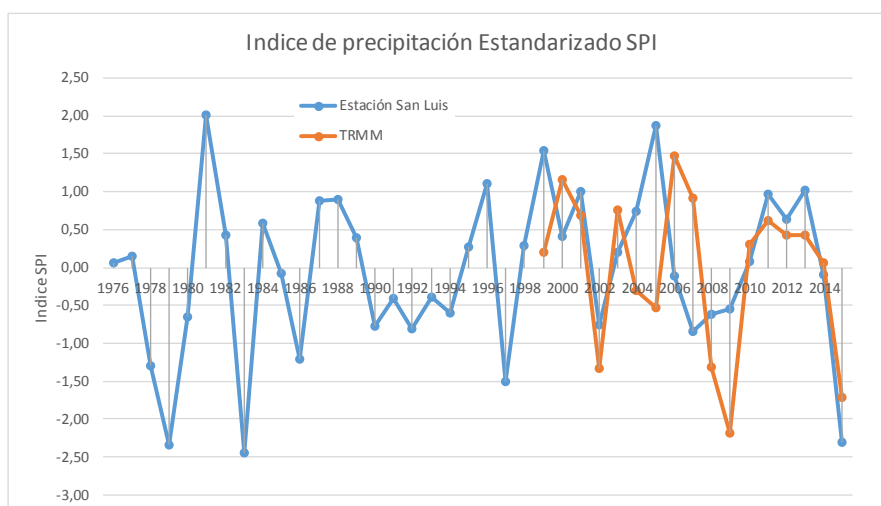
Abril de 2014, por lo cual los datos posteriores a 2014 provienen de otro programa sucesor de TRMM denominado “Global precipitation Measurement – GPM”.



*Ilustración 16 Este gráfico ilustra la precipitación mensual apilada por año para la estación Villanueva. Podemos ver el déficit de lluvia de diciembre – Marzo de cada año*

Este gráfico apilado (Ilustración 16) nos permite ver los meses con menores precipitaciones, y los años con déficit de lluvias, se presentan valores bajos en los años 1984, 1989, 1992, 1997 y 2013.

El índice basado en precipitación SPI es sencillo y se basa únicamente en precipitación, y representa el número de desviaciones estándar que cada registro de precipitación se desvía del promedio histórico (11).



*Ilustración 17 Comparación entre el SPI calculado a partir de datos TRMM y de la Estación pluviométrica San Luis del IDEAM*

El gráfico del índice estandarizado de precipitación SPI (Ilustración 17) indica déficit pronunciado de lluvias en los períodos 1978-1979, 1983, 1986, 1997, y déficit moderados entre 1990-1994, 2002, 2007-2009. No alcanza a aparecer completa la información de 2014-2015 aunque se ve la tendencia hacia déficit de precipitación.

## **7.2 Identificación de sequía Agrológica. Índices de la condición de la vegetación – VCI, TCI y VHI**

Los índices basados en la salud de la vegetación, son una medida indirecta de sequía pues miran las consecuencias de ella. Cuando se presenta un período de insuficiencia de agua, al poco tiempo después se ve reflejado en el deterioro de la salud de la vegetación, y esto se puede percibir de manera clara en los sensores que tienen bandas infrarrojas además de las visibles.

Estos índices se pueden calcular en diversidad de sensores que incluyen bandas infrarrojas, pero como se quiere analizar el cambio con el tiempo, es necesario utilizar un sensor que tome imágenes de forma periódica y uniforme, y también es deseable que lleve varios años haciéndolo para poder contar con una serie histórica para poder calcular tendencias y/o anomalías, así como valores mínimos y máximos de una serie amplia de datos (al menos 10 años en el caso de índices climáticos).

Aunque podemos calcular índices de vegetación en las imágenes Landsat, se presenta el inconveniente de la falta de continuidad en los datos, por lo cual solo tendríamos datos puntuales y dispersos en el tiempo.

Teniendo en cuenta la falta de continuidad temporal de las imágenes disponibles Landsat en la zona, y para un enfoque más regional del fenómeno de sequía se emplearon imágenes MODIS que aunque cuentan con una resolución espacial moderada (250 m) cuentan con una resolución temporal y espectral altas y cubren un área mucho más extensa. La única limitante de Modis es que las imágenes de este sensor solo están disponibles desde el año 2001.

Otro factor de selección fue la disponibilidad del sensor de bandas en la zona verde, roja e infrarroja cercana y media del espectro, para poder usarlas en el cálculo de los índices para la detección de agua; este factor se cumple en el caso de las imágenes Landsat y en Modis.

*Tabla 1 Especificaciones de las Imágenes Modis.*

### **Specifications**

<b>Orbit</b>	705 km, 10:30 a.m. descending node (Terra) or 1:30 p.m. ascending node (Aqua), sun-synchronous, near-polar, circular
<b>Scan rate</b>	20.3 rpm, cross track
<b>Swath</b>	2330 km (cross track) by 10 km (along track at nadir)

### Dimensions

<b>Telescope</b>	17.78 cm diam. off-axis, afocal (collimated), with intermediate field stop
<b>Size</b>	1.0 × 1.6 × 1.0 m
<b>Weight</b>	228.7 kg
<b>Power</b>	162.5 W (single orbit average)
<b>Data rate</b>	10.6 Mbit/s (peak daytime); 6.1 Mbit/s (orbital average)
<b>Quantization</b>	12 bits
<b>Spatial Resolution</b>	250 m (bands 1–2) 500 m (bands 3–7) 1000 m (bands 8–36)
<b>Temporal Resolution</b>	1-2 days [15]
<b>Design life</b>	6 years

<b>Primary Use</b>	<b>Band</b>	<b>Bandwidth<sup>1</sup></b>	<b>Spectral Radiance<sup>2</sup></b>	<b>Required SNR<sup>3</sup></b>
<b>Land/Cloud/Aerosols</b>	1	620 - 670	21.8	128
<b>Boundaries</b>	2	841 - 876	24.7	201
<b>Land/Cloud/Aerosols</b>	3	459 - 479	35.3	243
<b>Properties</b>	4	545 - 565	29.0	228
	5	1230 - 1250	5.4	74
	6	1628 - 1652	7.3	275
	7	2105 - 2155	1.0	110
<b>Ocean Color/</b>	8	405 - 420	44.9	880
<b>Phytoplankton/</b>	9	438 - 448	41.9	838
<b>Biogeochemistry</b>	10	483 - 493	32.1	802
	11	526 - 536	27.9	754
	12	546 - 556	21.0	750
	13	662 - 672	9.5	910
	14	673 - 683	8.7	1087
	15	743 - 753	10.2	586
	16	862 - 877	6.2	516
<b>Atmospheric</b>	17	890 - 920	10.0	167
<b>Water Vapor</b>	18	931 - 941	3.6	57
	19	915 - 965	15.0	250

<b>Primary Use</b>	<b>Band</b>	<b>Bandwidth<sup>1</sup></b>	<b>Spectral Radiance<sup>2</sup></b>	<b>Required NE<math>\Delta</math>T(K)<sup>4</sup></b>
<b>Surface/Cloud</b>	20	3.660 - 3.840	0.45(300K)	0.05
<b>Temperature</b>	21	3.929 - 3.989	2.38(335K)	2.00
	22	3.929 - 3.989	0.67(300K)	0.07
	23	4.020 - 4.080	0.79(300K)	0.07
<b>Atmospheric</b>	24	4.433 - 4.498	0.17(250K)	0.25
<b>Temperature</b>	25	4.482 - 4.549	0.59(275K)	0.25
<b>Cirrus Clouds</b>	26	1.360 - 1.390	6.00	150(SNR)
<b>Water Vapor</b>	27	6.535 - 6.895	1.16(240K)	0.25
	28	7.175 - 7.475	2.18(250K)	0.25
<b>Cloud Properties</b>	29	8.400 - 8.700	9.58(300K)	0.05
<b>Ozone</b>	30	9.580 - 9.880	3.69(250K)	0.25
<b>Surface/Cloud</b>	31	10.780 - 11.280	9.55(300K)	0.05
<b>Temperature</b>	32	11.770 - 12.270	8.94(300K)	0.05
<b>Cloud Top</b>	33	13.185 - 13.485	4.52(260K)	0.25
<b>Altitude</b>	34	13.485 - 13.785	3.76(250K)	0.25
	35	13.785 - 14.085	3.11(240K)	0.25
	36	14.085 - 14.385	2.08(220K)	0.35

Aprovechando la extensa cobertura espacial de MODIS (ancho de 2330Km), se trabajó un área de interés más amplia para ver el fenómeno de impacto de la sequía en la vegetación de manera más regional, abarcando todo el departamento de Casanare.

Aparte de la información medida directamente por los instrumentos de las plataformas AQUA y TERRA, el MODIS Adaptive Processing System (MODAPS) produce gran cantidad productos de Alto Nivel para el suelo y la atmósfera a partir de los datos crudos del sensor. Estos productos son distribuidos de forma gratuita por los centros de distribución LP DAAC (Land Processes Distributed Active Archive\_center).

[https://lpdaac.usgs.gov/dataset\\_discovery/modis/modis\\_products\\_table](https://lpdaac.usgs.gov/dataset_discovery/modis/modis_products_table)



Entre la diversidad de productos de alto nivel, elaborados por MODAPS, encontramos de particular interés para estudios de vegetación y sequía el producto MOD13Q1, que contiene los índices de vegetación EVI y NDVI, calculados y distribuidos en series compuestas de imágenes de 250 metros de resolución agrupadas y promediadas en imágenes que comprenden 16 días. Las características del producto MOD13Q1 se describen en las siguientes tablas (Gráfico 18):

## Characteristics

### Collection

Characteristic	Description
Temporal Granularity	16-day
Temporal Extent	February 2000 - Present
Spatial Extent	Global
File Size	~92.96 MB
Coordinate System	Sinusoidal
Datum	N/A
File Format	HDF-EOS
Geographic Dimensions	1200 km x 1200 km

### Granule

Characteristic	Description
Number of Science Dataset (SDS) Layers	12
Rows/Columns	4800 cols x 4800 rows
Pixel Size	250 m

### Data Layer Characteristics

SDS Layer Name	Description	Units	Data Type	Fill Value	Valid Range	Scaling Factor
250m_16_days_NDVI	16 day NDVI average	NDVI	16-bit signed integer	-3000	-2000 to 10000	0.0001
250m_16_days_EVI	16 day EVI average	EVI	16-bit signed integer	-3000	-2000 to 10000	0.0001
250m_16_days_VI_Quality	VI quality indicators	Bit Field	16-bit unsigned integer	65535	0 to 65534	N/A
250m_16_days_red_reflectance	Surface Reflectance Band 1	Reflectance	16-bit signed integer	-1000	0 to 10000	0.0001
250m_16_days_NIR_reflectance	Surface Reflectance Band 2	Reflectance	16-bit signed integer	-1000	0 to 10000	0.0001
250m_16_days_blue_reflectance	Surface Reflectance Band 3	Reflectance	16-bit signed integer	-1000	0 to 10000	0.0001
250m_16_days_MIR_reflectance	Surface Reflectance Band 7	Reflectance	16-bit signed integer	-1000	0 to 10000	0.0001
250m_16_days_view_zenith_angle	View zenith angle of VI pixel	Degree	16-bit signed integer	-10000	0 to 18000	0.01
250m_16_days_sun_zenith_angle	Sun zenith angle of VI pixel	Degree	16-bit signed integer	-10000	0 to 18000	0.01
250m_16_days_relative_azimuth_angle	Relative azimuth angle of VI pixel	Degree	16-bit signed integer	-4000	-18000 to 18000	0.01
250m_16_days_composite_day_of_the_year	Day of year of VI pixel	Julian day of year	16-bit unsigned integer	-1	1 to 366	N/A
250m_16_days_pixel_reliability	Quality reliability of VI pixel	Rank	8-bit signed integer	255	0 to 3	N/A

*Ilustración 18 K. Didan. (2015). MOD13Q1 MODIS/Terra Vegetation Indices 16-Day L3 Global 250m SIN Grid V006. NASA EOSDIS Land Processes DAAC.*

<http://doi.org/10.5067/MODIS/MOD13Q1.006>

### **7.2.1 Preparación de la información del sensor MODIS**

Aunque la información del sensor MODIS es de uso común en los estudios de clima y vegetación, hay que tener especial cuidado en el control de calidad de la información. El proceso de preparar una serie de tiempo con imágenes MODIS es muy engorroso debido a la gran cantidad de imágenes que se deben procesar. Para el caso de las imágenes MOD13Q1, tenemos una imagen cada 16 días por 15 años ~340 imágenes por cada cuadrángulo, pero en nuestro caso el área de interés queda entre dos cuadrángulos MODIS, lo cual hace necesario procesar 680 imágenes. Cada imagen viene en una proyección polar, por lo cual deben ser reproyectadas al datum de trabajo una a una.

También debe realizarse un mosaico de las imágenes por fecha. Esta tarea es facilitada por el software “Modis Reprojection Tool” que se descarga de manera gratuita en el portal LP DAAC de la USGS ([https://lpdaac.usgs.gov/tools/modis\\_reprojection\\_tool](https://lpdaac.usgs.gov/tools/modis_reprojection_tool)).

Este software permite seleccionar el formato de salida, la proyección, la resolución y las bandas. Crea una imagen por banda, por lo cual la cantidad de archivos resultantes será multiplicada por cada banda que deseemos usar. Para este trabajo se extrajeron las bandas de NDVI, EVI y Pixel reliability, teniendo entonces que manejar 1020 imágenes.

### **7.2.2 Filtrado de imágenes Modis**

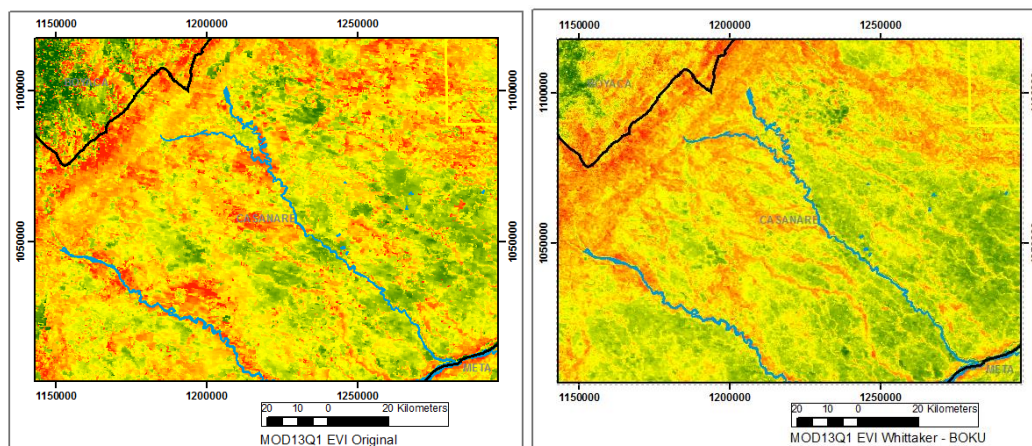
Cuando se hace una serie de tiempo con las imágenes MODIS, se percibe de inmediato la gran cantidad de ruido en las curvas. También es visible el ruido en muchas de las imágenes.

Esto se debe principalmente a la cobertura de nubes y nieve, corrección ambiental o direccional imperfecta y la inestabilidad del proceso de inversión (12).

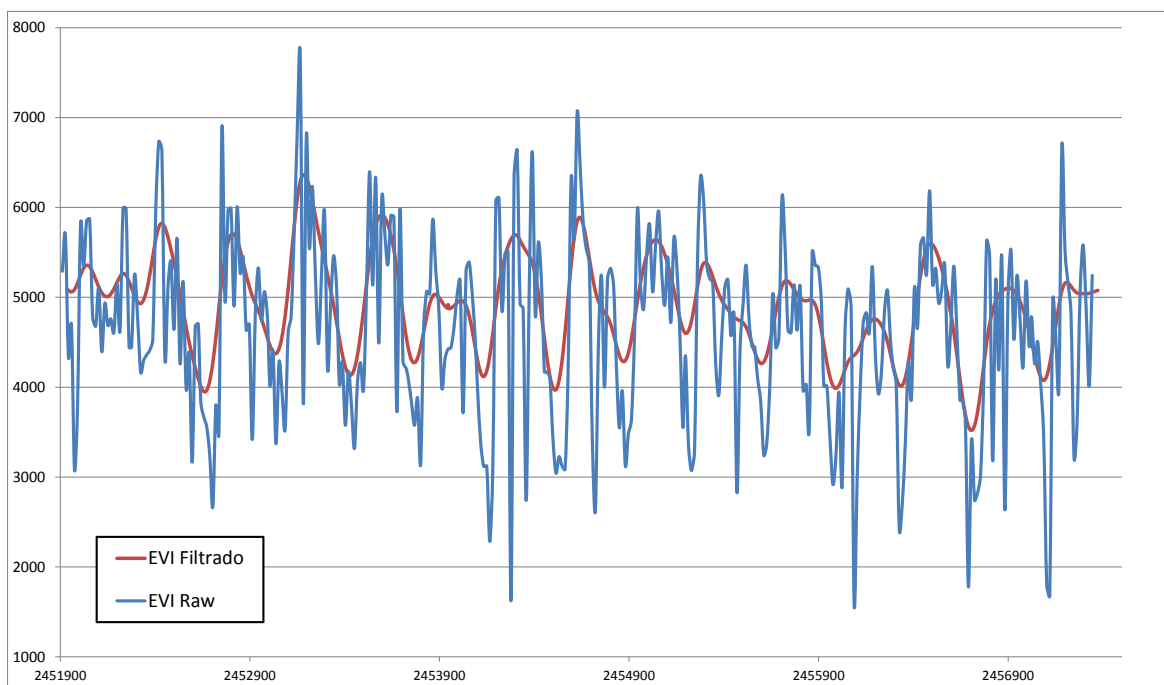
Debido al gran trabajo que requiere procesar y filtrar esta gran cantidad de imágenes, la University of Natural Resources and Life Sciences (BOKU), diseñó una plataforma que realiza el pre-proceso de series de tiempo MODIS (6).

El portal permite seleccionar un área de interés, la resolución temporal, seleccionar los índices deseados (EVI y NDVI) y seleccionar el rango de tiempo. Lo beneficioso de este portal es que realiza un trabajo que resulta muy tedioso y consume mucho tiempo, que es el mosaico, re-proyección, recorte del área de interés, y más importante aún, el filtrado. El método usado por la Universidad es el de suavizado de Whittaker, el cual llena automáticamente los pixeles faltantes y hace correcciones por nubes y malas condiciones atmosféricas.

Como ejemplos se muestran las figuras 19 y 20 que ilustran el resultado del filtrado de Whittaker en las series MODIS.



*Ilustración 19 La imagen izquierda muestra la imagen original MOD13Q1-EVI del 26 de Abril del 2001, donde aparece mucho ruido ambiental. A la derecha la misma imagen filtrada con el método Whittaker por la plataforma de la Universidad BOKU de Viena.*



*Ilustración 20 Gráfica de serie de tiempo de un mismo píxel en el área de interés. La curva azul muestra la serie de tiempo con valores de EVI con imágenes crudas y la curva roja los valores de EVI filtrados con el método Whittaker por la plataforma de la Universidad BO*

### 7.2.3 Series de tiempo NVDI-EVI y cálculo del índice VCI

El índice de la condición de vegetación (Vegetation Condition Index VCI), escala los valores de NDVI entre sus valores máximos y mínimos para separar las señales climáticas de corto plazo, de las señales ecológicas de largo plazo, para el monitoreo de la sequía. Es calculado a través de:

$$VCI = (NDVI - NDVI_{min}) / (NDVI_{max} + NDVI_{min}).$$

Otro índice relacionado a sequía, obtenido del sensor MODIS, es el TCI (Temperature Condition Index), el cual identifica estrés en la vegetación causado por altas temperaturas y falta de humedad (25). Este índice se obtiene usando la LST (Land Surface Temperature) del producto MOD11C3 de MODIS a través de la siguiente ecuación:

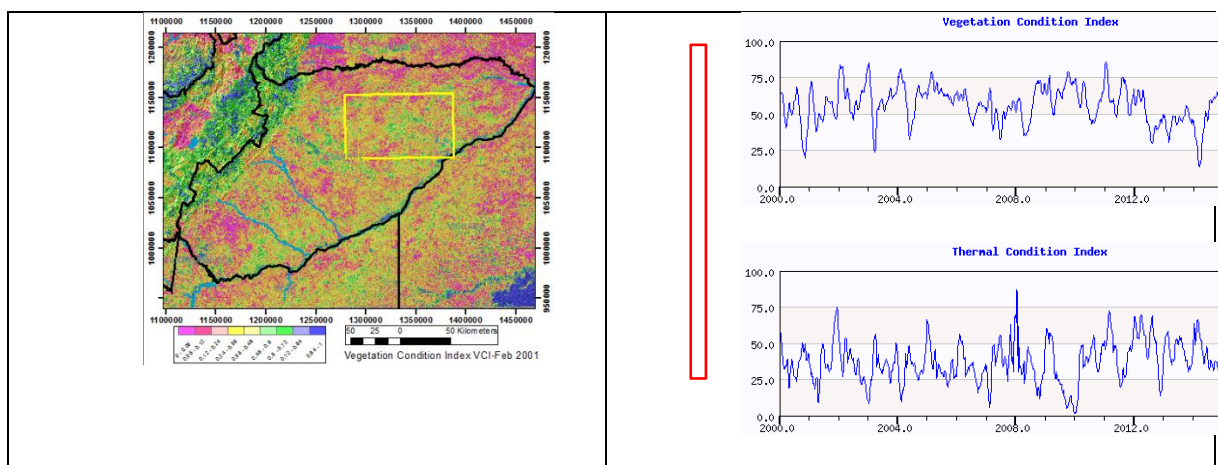
$$TCI_i = ((LST_{max} - LST_i) / (LST_{max} - LST_{min})) \times 100$$

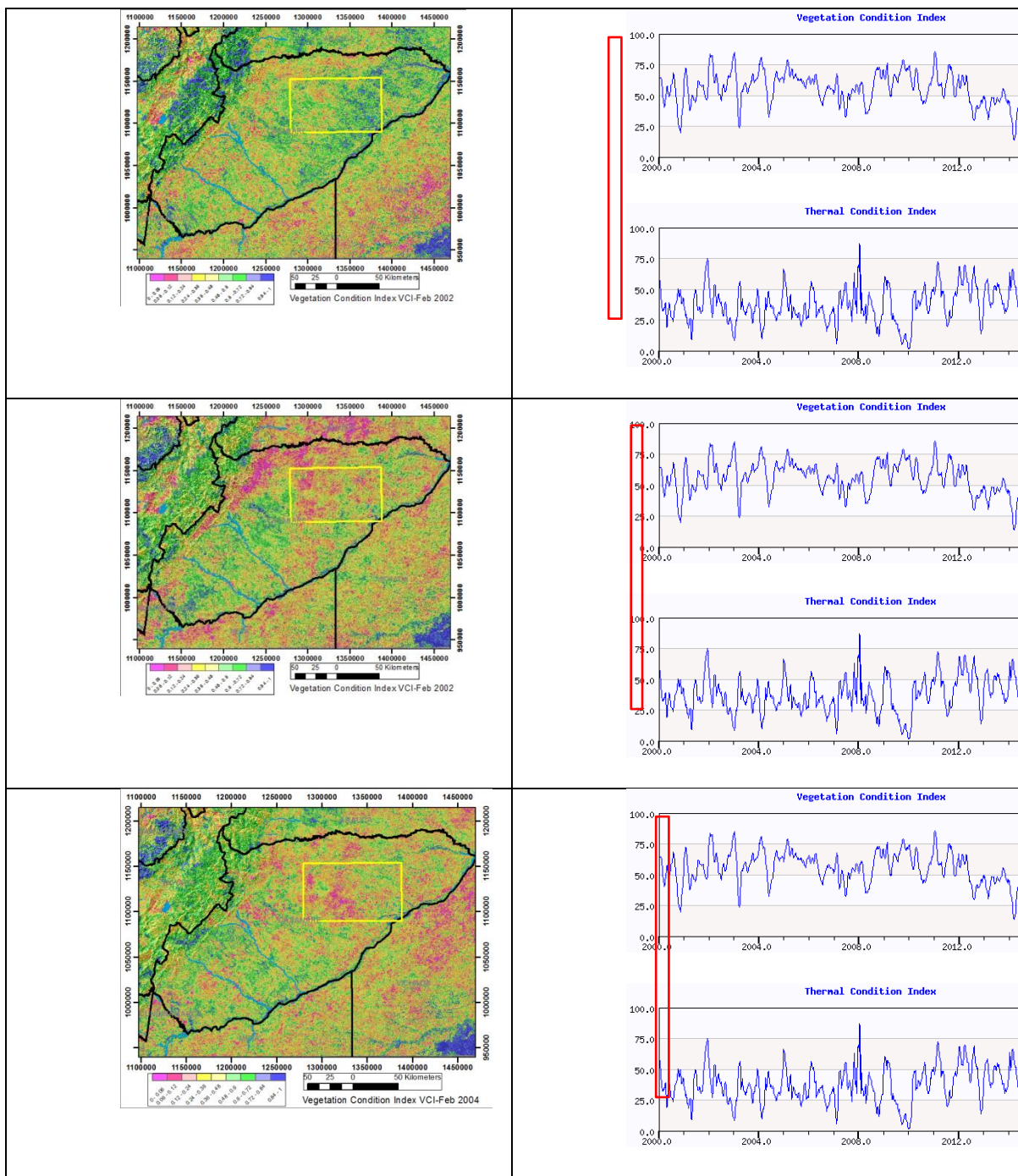
Una vez obtenidos los índices VCI y TCI se puede obtener un índice compuesto VHI (Vegetation Health Index) que describe la salud de la vegetación mediante la combinación de estos dos índices mediante:  $VHI = 0.5 * VCI + 0.5 * TCI$

Las series de tiempo nos permiten ver patrones de cambio a través del tiempo, los cuales no son evidentes con imágenes fijas. Una vez se han pre-procesado y filtrado las imágenes

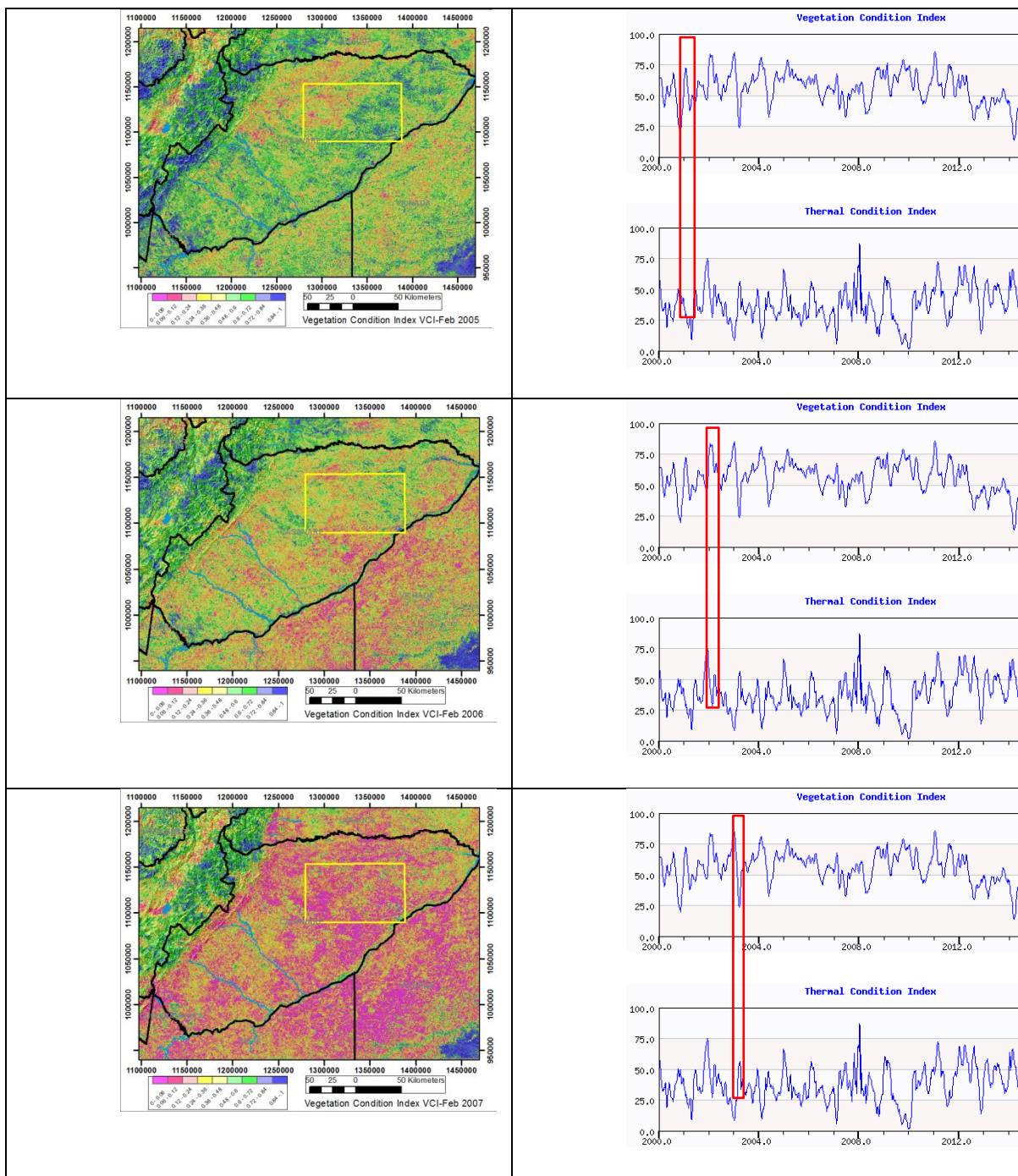
de índices MODIS, es necesario agregarles la variable del tiempo a cada una de las imágenes que componen la serie. Este es otro proceso que se debe realizar manualmente y puede ser muy tedioso sin ayuda de un script.

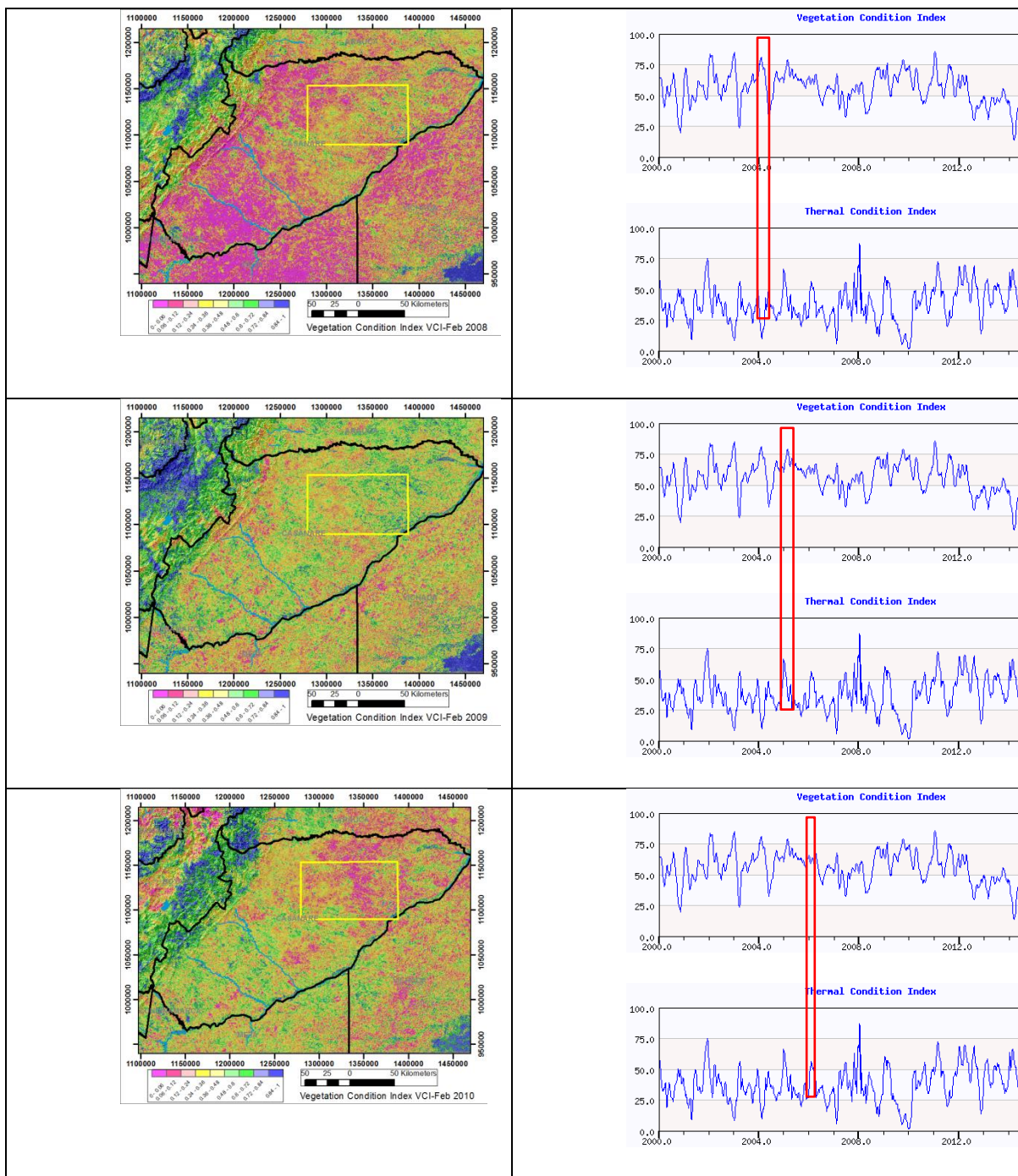
Las series también nos permiten crear perfiles de valores vs tiempo, que nos resultan útiles para ver en un solo gráfico el comportamiento en el tiempo de la salud de la vegetación en un punto determinado del espacio. Las siguientes imágenes muestran el cambio en la vegetación a través del tiempo a través del índice VCI. Por cada año se muestra la variación areal en la grilla en el mes de Febrero (temporada seca en el área), y la serie de tiempo de los valores VCI y TCI promedios para el área. Se indica en rojo en la serie de tiempo el año al que pertenece la grilla mapeada.

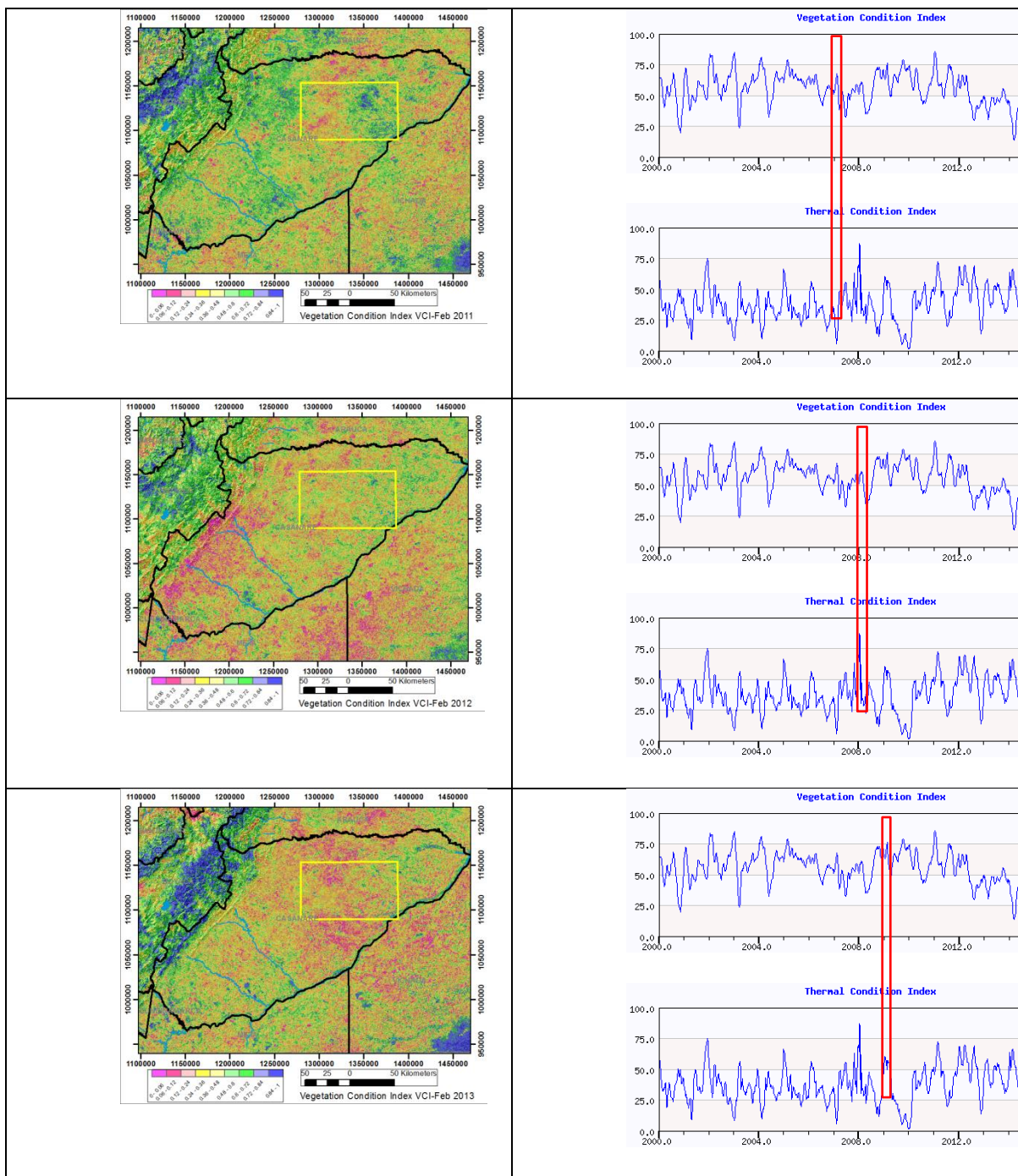


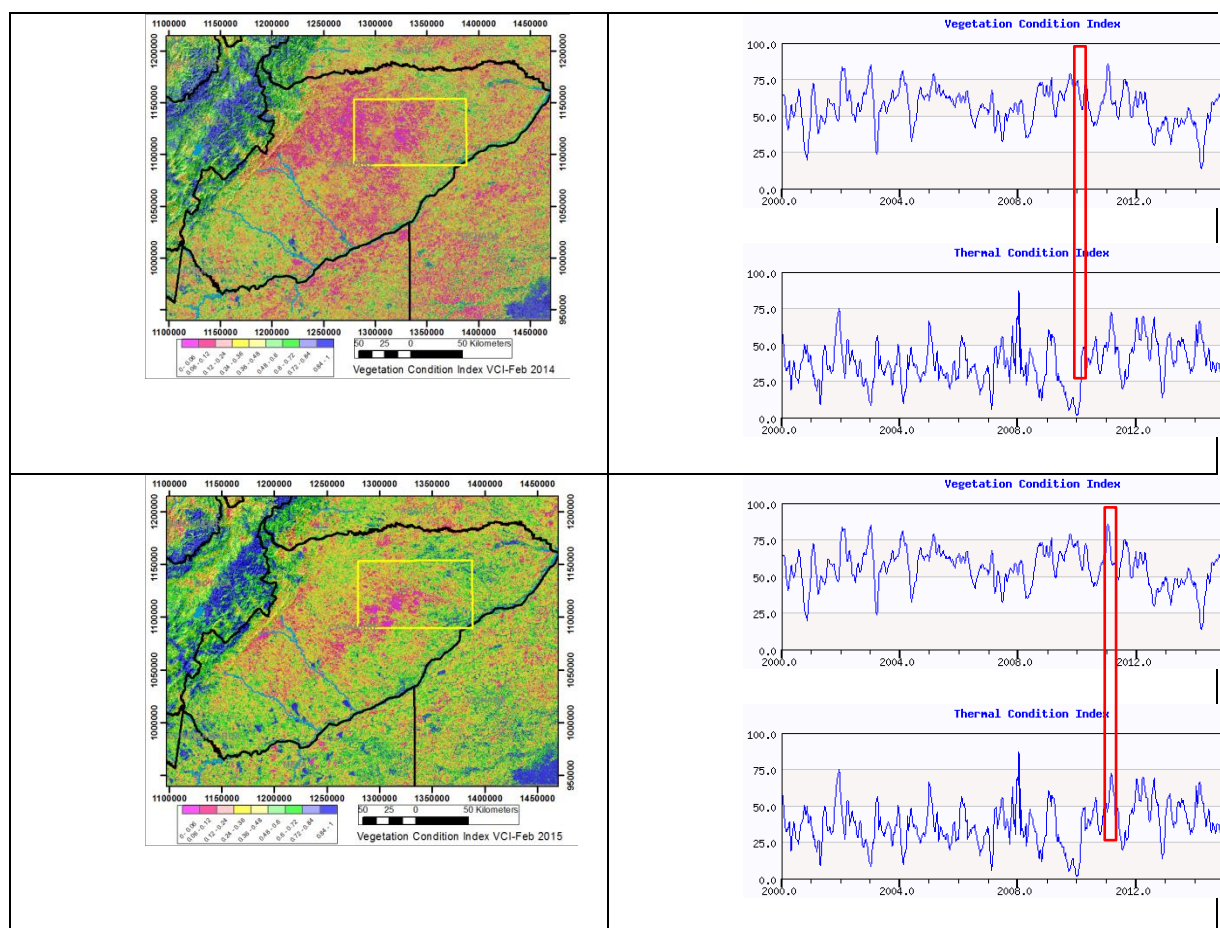












[http://www.star.nesdis.noaa.gov/smcd/emb/vci/VH/vh\\_browseByCountry\\_province.php](http://www.star.nesdis.noaa.gov/smcd/emb/vci/VH/vh_browseByCountry_province.php)

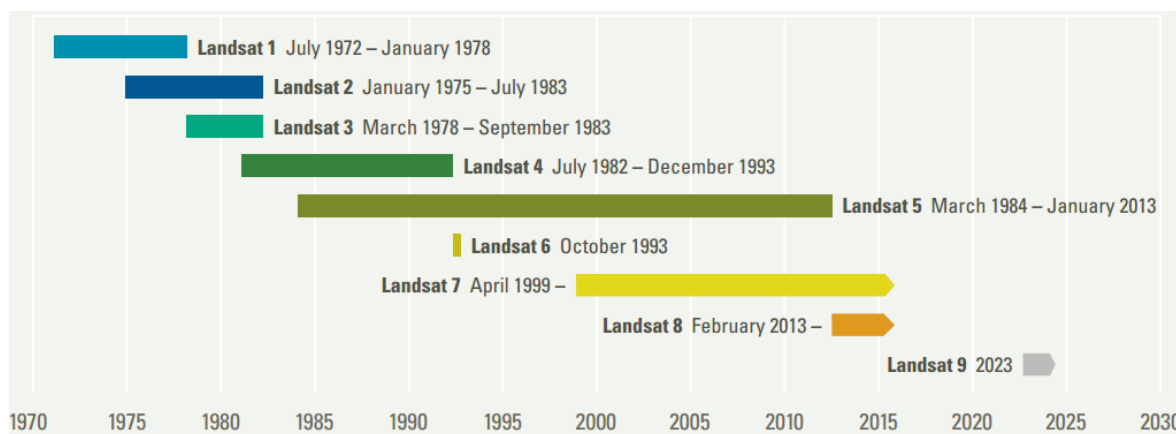
[?country=COL&provinceID=9&year1=2000&year2=2016](http://www.star.nesdis.noaa.gov/smcd/emb/vci/VH/vh_browseByCountry_province.php?country=COL&provinceID=9&year1=2000&year2=2016)

### 7.3 Identificación de sequía Hidrológica. Cambio de cuerpos de agua en temporada seca:

#### 7.3.1 Selección del sensor

En todo estudio que involucra sensores remotos siempre tendemos a buscar las más altas resoluciones espaciales y espectrales, pero para un análisis multitemporal tenemos la gran limitante de la disponibilidad de una serie histórica de imágenes en nuestra área de interés. Esto

nos lleva al uso de imágenes Landsat pues es el programa de mayor disponibilidad y continuidad desde 1972, año en el cual nació el programa.

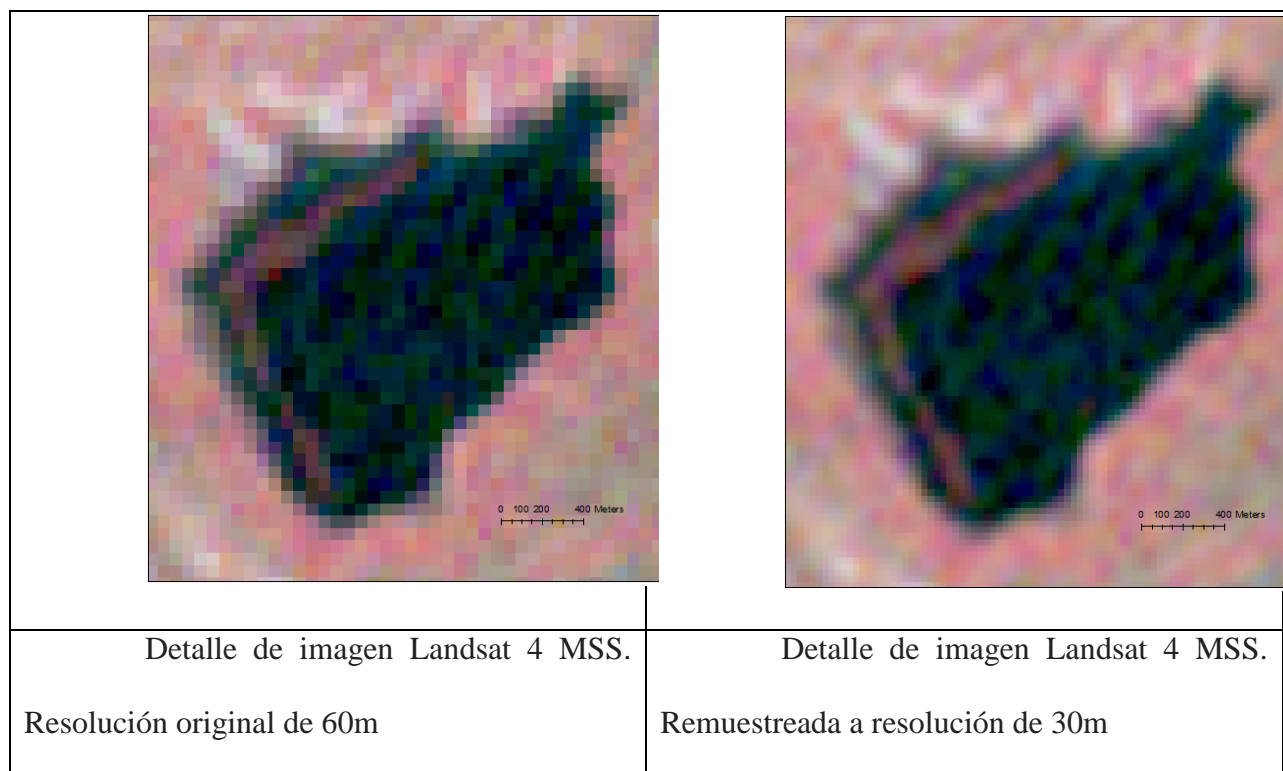


*Ilustración 21 Historia del programa Landsat. Para este estudio se utilizaron imágenes de todos los satélites Landsat, debido a que es el programa más continuo, antiguo y homogéneo.*

Para la detección de los cuerpos de agua en este trabajo, se utilizaron Imágenes Landsat – 2, 4, 5, 7 y 8, MSS ETM, y OLI, adquiridas entre los años 1972 a 2016. También se usaron imágenes ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer), adquiridas entre los años 2001 a 2016 las cuales se obtuvieron de la base de datos de la página del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS). Sin embargo, el cubrimiento temporal y espacial de Aster, no resultó suficientemente amplio para complementar de manera importante la serie Landsat.

La Tabla 2. Presenta las especificaciones de Landsat MSS, TM , ETM + y las imágenes OLI. Podemos apreciar diferencias radiométricas y geométricas de las imágenes MSS con

respecto a las otras imágenes Landsat. La resolución original del sensor MSS era de 79x57 metros, pero la USGS remuestrea las imágenes a 60m para su distribución. Para la zona de interés encontramos muy pocas imágenes utilizables del sensor MSS, pero para poder comparar con las demás imágenes que tienen resolución original de 30m, las imágenes MSS fueron remuestreadas a 30m mediante convolución cúbica, y el resultado se muestra en la figura 22.



*Ilustración 22 Comparación del resultado del remuestreo de imágenes Landsat MSS a 30m*

*Tabla 2 Especificaciones de las Imágenes Landsat TM, ETM y OLI*

Satellite	Sensor	Resolution	Wavelength ( $\mu\text{m}$ )
Landsat 1-5	MSS	60	Band 4: 0.5-0.6 Band 5: 0.6-0.7 Band 6: 0.7-0.8

			Band 7: 0.8-1.1
Landsat 4-5	TM	30	Band 1: 0.45-0.52 Band 2: 0.52-0.60 Band 3: 0.63-0.69 Band 4: 0.76-0.90 Band 5: 1.55-1.75 Band 7: 2.08-2.35
Landsat-7	ETM+	30	Band 1: 0.45-0.515 Band 2: 0.525-0.605 Band 3: 0.63-0.69 Band 4: 0.75-0.90 Band 5: 1.55-1.75 Band 7: 2.09-2.35
Landsat-8	OLI	30	Band 1: 0.435-0.451 Band 2: 0.452-0.512 Band 3: 0.533-0.590 Band 4: 0.636-0.673 Band 5: 0.851-0.879 Band 6: 2.08-2.35 Band 7: 2.107-2.294 Band 9: 1.363-1.384

### 7.3.2 Búsqueda y selección de imágenes Landsat


































Aunque se esperaba encontrar varias imágenes Landsat por año, donde se pudieran seleccionar imágenes de una misma época del año por cada año de la serie de tiempo a estudiar, se encontró una disponibilidad limitada de imágenes. Lamentablemente, muchas de las imágenes tomadas por los primeros satélites Landsat, fueron recopiladas por diferentes estaciones terrestres

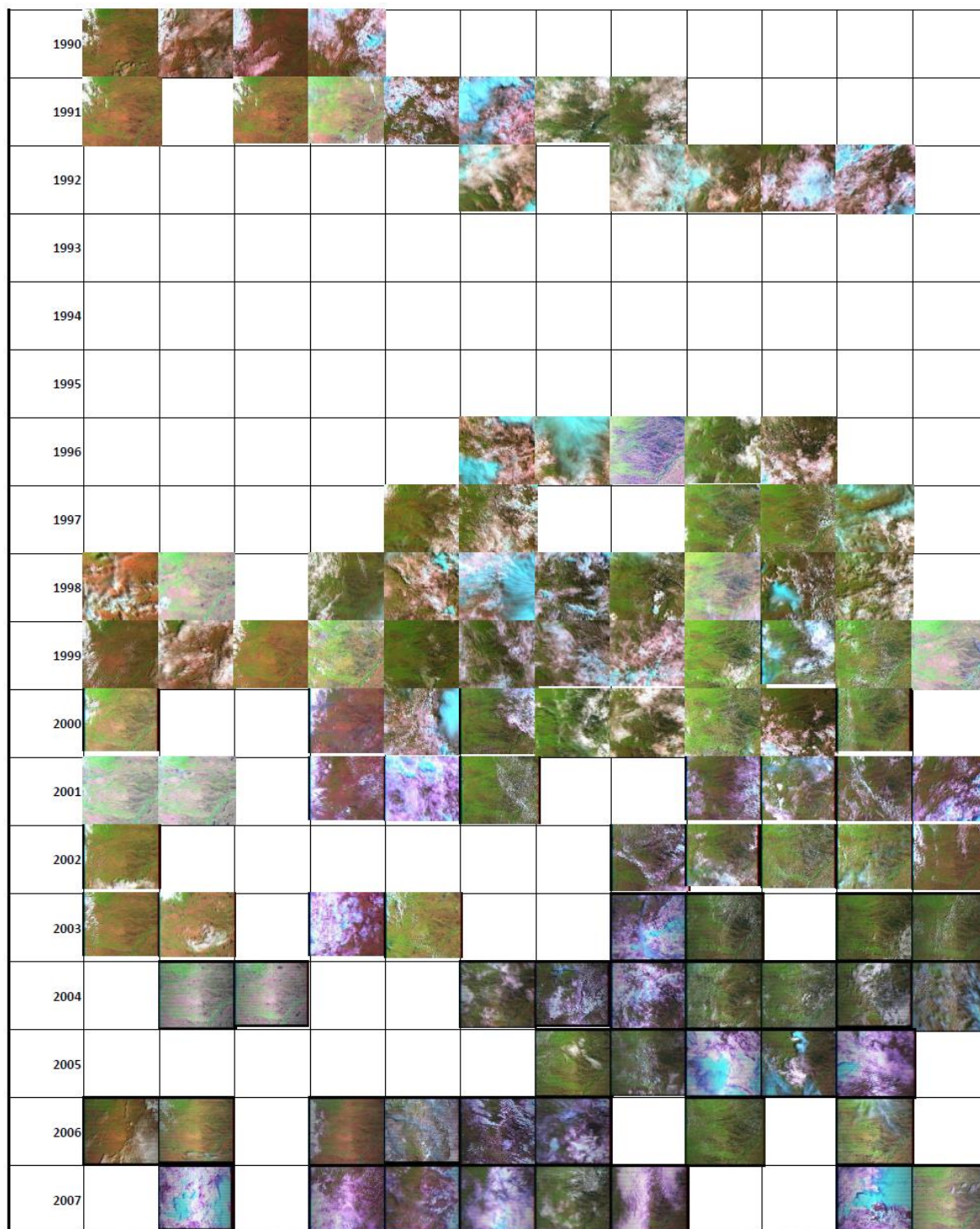
alrededor del mundo, y esta información no se recopiló en un repositorio central (20). Cada estación terrestre era independiente, y procesaba y archivaba la información con sus propios parámetros y estándares. Muchas estaciones terrestres dejaron de funcionar al pasar de los años y la información allí almacenada no se preservó de la mejor manera, haciendo que mucha información se haya perdido.

En el 2010 comenzó un esfuerzo denominado Landsat Global Archive Consolidation (LGAC), que ha venido recopilado en un solo sitio y a una sola entidad todas las imágenes que ha podido recuperar de las distintas estaciones terrestres alrededor del mundo. Mucha de la información recopilada en las estaciones receptoras internacionales es única, y no existe copia de ella en los archivos de la USGS; hoy día esa recopilación aún continúa.

Durante el proyecto, realizamos un inventario de las imágenes disponibles en la USGS y el INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - Brasil) para la zona de interés, que corresponde al Path 6 Row 56 de la grilla de Landsat.



	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
1972												
1973												
1974												
1975												
1976												
1977												
1978												
1979												
1980												
1981												
1982												
1983												
1984												
1985												
1986												
1987												
1988												
1989												



2008												
2009												
2010												
2011												
2012												
2013												
2014												
2015												
2016												

*Ilustración 23 Inventario de imágenes Landsat disponibles para la zona de estudio.*

*Path 6 Row 56*

Se encontraron 229 imágenes Landsat de la zona de interés, abarcando los sensores Landsat 1, 2, 4, 5, 7, 8; en la tabla se incluye una muestra gráfica con la selección de la mejor imagen disponible por mes, sin embargo se puede notar que en los meses de invierno en el área, (Abril-Octubre) es muy difícil encontrar imágenes útiles debido a la alta cobertura de nubes. Sin embargo, el interés principal son los cuerpos de agua permanentes, es decir, los que existen en temporada seca. Por esto se seleccionaron imágenes de Diciembre a Marzo, una por año priorizando las de menor cobertura de nubes en el área de interés. Con estos criterios de selección, finalmente quedaron 23 imágenes Landsat utilizables para el área de estudio, listadas en la Tabla 2. Por lo tanto el período de estudio que se pretendía inicialmente 1972-2016 de 40 años, se ve reducido a 23 años de 1978-2016 de forma discontinua.

La tabla 3 muestra además las características principales de las imágenes seleccionadas. Se incluye un campo en la tabla “Año que representa” debido a que no se encontraron imágenes enero-marzo de un año determinado, por lo que se recurre a diciembre del año anterior, como es el caso de la imagen de diciembre 28 de 1999, que es más representativa de la temporada seca del año 2000 que la del año 1999.

*Tabla 3 Inventario de imágenes Landsat seleccionadas para el estudio.*

Imagen	Satelite	Sensor	Proveedor	Fecha Adquisición	Año que representa
LC80060562016009LGN00	Landsat 8	OLI-TIRS	USGS/EROS	9-ene-2016	2016
LC80060562015006LGN00	Landsat 8	OLI-TIRS	USGS/EROS	6-ene-2015	2015
LC80060562014019LGN00	Landsat 8	OLI-TIRS	USGS/EROS	19-ene-2014	2014
LE70060562014027EDC00	Landsat 7	ETM	USGS/EROS	27-ene-2014	2014
LE70060562013024EDC00	Landsat 7	ETM	USGS/EROS	24-ene-2013	2013
LE70060562012022EDC00	Landsat 7	ETM	USGS/EROS	22-ene-2012	2012
LE70060562011019EDC00	Landsat 7	ETM	USGS/EROS	19-ene-2011	2011
LE70060562009365EDC00	Landsat 7	ETM	USGS/EROS	31-dic-2009	2010
LE70060562008363EDC00	Landsat 7	ETM	USGS/EROS	28-dic-2008	2009
LE70060562006037EDC00	Landsat 7	ETM	USGS/EROS	6-feb-2006	2006
LE70060562004032EDC01	Landsat 7	ETM	USGS/EROS	1-feb-2004	2004
LE70060562003013EDC00	Landsat 7	ETM	USGS/EROS	13-ene-2003	2003
LE70060562002026AGS00	Landsat 7	ETM	USGS/EROS	26-ene-2002	2002
LE70060562001023AGS00	Landsat 7	ETM	USGS/EROS	23-ene-2001	2001
LT50060561999362CPE00	Landsat 5	TM	USGS/EROS	28-dic-1999	2000
LT50060561999090CPE01	Landsat 5	TM	USGS/EROS	31-mar-1999	1999
LT50060561998055CPE00	Landsat 5	TM	USGS/EROS	24-feb-1998	1998
LT50060561991084XXX03	Landsat 5	TM	USGS/EROS	25-mar-1991	1991
LT50060561990017CPE03	Landsat 5	TM	USGS/EROS	17-ene-1990	1990
LT40060561988020XXX08	Landsat 4	TM	USGS/EROS	20-ene-1988	1988
LT50060561986070XXX02	Landsat 5	TM	USGS/EROS	11-mar-1986	1986
LT50060561985003XXX03	Landsat 5	TM	USGS/EROS	3-ene-1985	1985
L2MSS65619771213	Landsat 2	MSS	INPE Brasil	13-dic-1977	1978

### 7.3.3 Corrección geométrica y radiométrica

La mayoría de imágenes Landsat disponibles hoy día ya vienen con corrección radiométrica, geométrica y orto corregidas de origen. Sin embargo, las imágenes más antiguas solo tienen corrección “L1G”, es decir que no tienen una georreferenciación basada en puntos de control terrestres ni corregida por elevación del terreno. Esto hace que al incluir en un estudio multitemporal imágenes de los primeros sensores Landsat (1,2 y 3), estas deben ser georreferenciadas, remuestreadas a 30m y orto corregidas manualmente para que puedan ser comparadas con imágenes más recientes. Los errores de posición encontrados en las imágenes antiguas con procesamiento L1G son de varios kilómetros y en direcciones aleatorias de imagen a imagen, lo que hace impráctico su uso sin una corrección manual de su ubicación espacial. En nuestro caso, usamos una imagen orto corregida del año 2001 como referencia para tomar los puntos de control y hacer georreferencia imagen a imagen usando suficientes puntos de control para lograr un error RMS < de 1 pixel (~30m)

#### **7.3.4 Corrección ambiental de imágenes Landsat**

El Servicio Geológico de Estados Unidos USGS puso a disposición del público los productos “Landsat Surface Reflectance High Level Data Products” que pueden ser descargados de forma gratuita a través de sus portales Earthexplorer y Glovis(17). Este servicio realmente hace una gran diferencia pues crea una fuente homogeneizada de información lista para ser usada, pues cada metodología para corrección atmosférica da resultados visiblemente diferentes. Los productos de alto nivel de la USGS para el caso de imágenes Landsat 4,5 y 7, son procesados por el algoritmo 6S Second Simulation of a Satellite Signal in the Solar Spectrum (21) (22). Las imágenes Landsat 8 son procesadas mediante el “Landsat Surface Reflectance Code (LaSRC)”.

Estos productos procesados de alto nivel, muestran buena concordancia con imágenes procesadas con alto nivel de precisión usando el algoritmo estándar ATCOR-2, como lo describe Francesco Vuolo et al (16).

A pesar de que actualmente no se encuentran corregidas ambientalmente todas las imágenes Landsat existentes, existe la posibilidad de solicitar dicha corrección en línea sin costo a través de los portales de la USGS Earthexplorer y Glovis.

Las especificaciones de las imágenes procesadas y llevadas a reflectancia de superficie por la USGS están detalladas en la siguiente tabla:

*Tabla 4 Especificaciones de reflectancia de superficie. Guía de usuario Landsat 4-*

*7Climate Data Record (CDR) Surface reflectance. USGS*

[http://landsat.usgs.gov/documents/cdr\\_sr\\_product\\_guide.pdf](http://landsat.usgs.gov/documents/cdr_sr_product_guide.pdf)

Band Designation	Band Name	Data Type	Units	Range	Valid Range	Fill Value	Saturate Value	Scale Factor
sceneid_sr_band1	Band 1	INT16	Reflectance	-2000 – 16000	0 - 10000	-9999	20000	0.0001
sceneid_sr_band2	Band 2	INT16	Reflectance	-2000 – 16000	0 - 10000	-9999	20000	0.0001
sceneid_sr_band3	Band 3	INT16	Reflectance	-2000 – 16000	0 - 10000	-9999	20000	0.0001
sceneid_sr_band4	Band 4	INT16	Reflectance	-2000 – 16000	0 - 10000	-9999	20000	0.0001
sceneid_sr_band5	Band 5	INT16	Reflectance	-2000 – 16000	0 - 10000	-9999	20000	0.0001
sceneid_sr_band7	Band 7	INT16	Reflectance	-2000 – 16000	0 - 10000	-9999	20000	0.0001
sceneid_sr_atmos_opacity	Atmospheric Opacity	INT16	Reflectance	-2000 – 16000	0 - 10000	-9999	NA	0.0010
sceneid_sr_fill_qa	Fill QA	UINT8	Flag	0 not fill 255 fill	0 not fill 255 fill	NA	NA	NA
sceneid_sr_ddv_qa	DDV QA	UINT8	Flag	0 not DDV 255 DDV	0 not DDV 255 DDV	NA	NA	NA
sceneid_sr_cloud_qa	Cloud QA	UINT8	Flag	0 not cloud 255 cloud	0 not cloud 255 cloud	NA	NA	NA
sceneid_sr_cloud_shadow_qa	Cloud Shadow QA	UINT8	Flag	0 not cloud shadow 255 cloud shadow	0 not cloud shadow 255 cloud shadow	NA	NA	NA
sceneid_sr_snow_qa	Snow QA	UINT8	Flag	0 not snow 255 snow	0 not snow 255 snow	NA	NA	NA
sceneid_sr_land_water_qa	Land Water QA	UINT8	Flag	0 land 255 water	0 land 255 water	NA	NA	NA
sceneid_sr_adjacent_cloud_qa	Adjacent Cloud QA	UINT8	Flag	0 not adjacent cloud 255 adjacent cloud	0 not adjacent cloud 255 adjacent cloud	NA	NA	NA
sceneid_sr_cfmask	CFmask	UINT8	Flag	0 clear 1 water 2 shadow 3 snow 4 cloud	0 clear 1 water 2 shadow 3 snow 4 cloud	255	NA	NA
sceneid_sr_cfmask_conf	CFmask Cloud Confidence	UINT8	Flag	0 none 1 <= 12.5% conf. 2 > 12.5% & <= 22.5%		255	NA	NA

De esta forma, todas las imágenes Landsat-4 a Landsat-8 utilizadas en este trabajo fueron descargadas ya procesadas a reflectancia de superficie a través de USGS Earth Resources Observation and Science (EROS) Center Science Processing Architecture (ESPA) On Demand Interface (<https://espa.cr.usgs.gov/>).

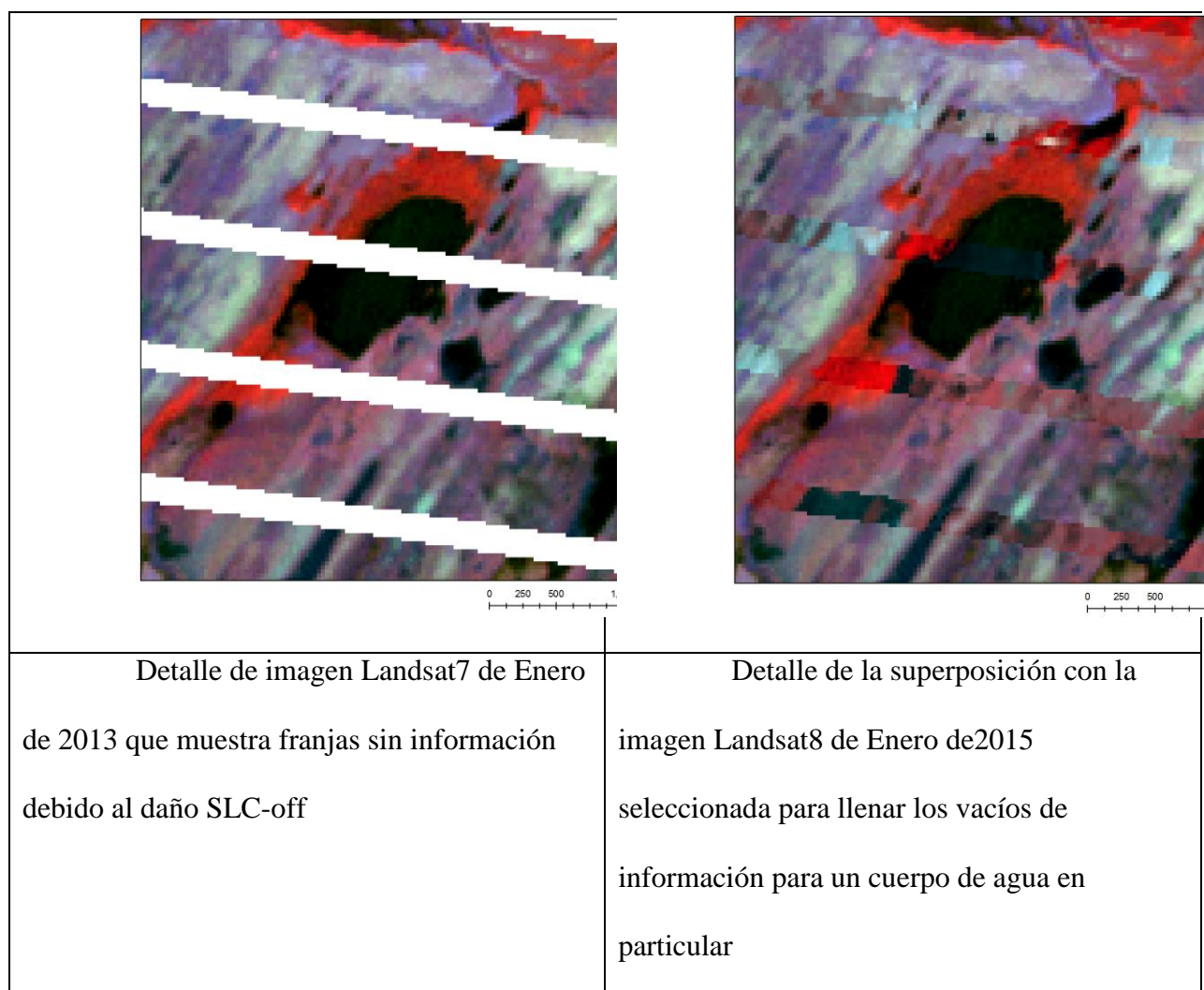
Debido a que los algoritmos actuales de la USGS no procesan a reflectancia imágenes Landsat 1,2 y 3, para ellas se utilizó el método Dark Object Subtraction DOS de Pat Chavez (1998) (3)

### **7.3.5 Identificación de cuerpos de agua en las imágenes Landsat**

Uno de los objetivos principales de este proyecto, es identificar la existencia o no en el tiempo de los cuerpos de agua permanentes a través de los últimos 40 años. Para lograr esto, se seleccionaron las mejores imágenes disponibles año a año durante el período de temporada seca en el área de interés (diciembre-marzo), y se obtuvieron ya corregidas ambientalmente en reflectancia de superficie.

Una limitante que se presenta con las imágenes Landsat-7 es el daño del Scan Line Corrector – SLC en Mayo del 2003, pues 11 de las imágenes usadas son Landsat 7, y 8 de ellas tienen este error. La página web de la USGS muestra varios métodos para llenar las franjas vacías de las imágenes Landsat 7, pero no logramos resultados satisfactorios, pues los cambios en los cuerpos de agua no son homogéneos de una imagen a otra de una fecha distinta. En este trabajo resolvimos editar manualmente cada cuerpo de agua que estuviera afectado con el problema SLC-off, usando como fondo otras imágenes de la serie en que dicho cuerpo de agua tuviera la extensión y forma más similar, como se muestra en la gráfica 24





*Ilustración 24 Detalle que muestra la forma de superponer imágenes de cada año hasta hallar la mejor concordancia con la forma y extensión del cuerpo de agua y editarlo manualmente para el cálculo de área.*

En la literatura encontramos varias alternativas con diferentes grados de precisión y de complejidad para discriminar superficies de agua. Seleccionamos para este trabajo el MNDWI debido a su efectividad comparado con otros índices, su sencillez, y a que presenta umbrales más estables en series de imágenes y es menos afectado por la vegetación y el suelo (23), (24).

Después de calculado el índice hay que calcular el umbral para diferenciar el agua con un bajo grado de incertidumbre. Los cuerpos de agua más profundos son fácilmente identificados con el índice MNDWI, pero como estamos identificando cuerpos de agua en una región muy plana donde los cuerpos de agua no son muy profundos, se deben ajustar manualmente los umbrales pues los bordes de los cuerpos de agua o esteros de poca profundidad tienen una mezcla de elementos de vegetación y suelo mezclados con el agua, haciendo que los valores de reflectividad del agua en el infrarrojo cercano se aumenten o se enmascaren con la vegetación y el suelo del fondo del cuerpo de agua. Otra limitante es que estos índices no diferencian bien entre agua y nubes, pues el contenido de agua en las nubes hace que el índice las clasifique en valores muy similares a los cuerpos de agua.

Para eliminar el problema de las nubes, podemos usar la banda CFMask que viene en las imágenes en reflectancia y en las imágenes Landsat 8. Esta banda CFMask permite excluir la nubes, las sombras de las nubes y la nieve en nuestro cálculo (Provisional Landsat 8 Surface Reflectance Product Version 1.8, December 2015 – US Geological Survey).

Como nuestro interés es diferenciar el agua, para el caso de imágenes muy antiguas, que la USGS no ofrece en reflectancia (Landsat 1,2 y 3) Se puede hacer un procedimiento sencillo con un condicional donde se calcule el MNDWI de forma normal si cumple dos requisitos: El valor del pixel en la banda azul o verde están por debajo de un umbral que descarte los pixeles más cercanos a 255 (blanco) para evitar las nubes.

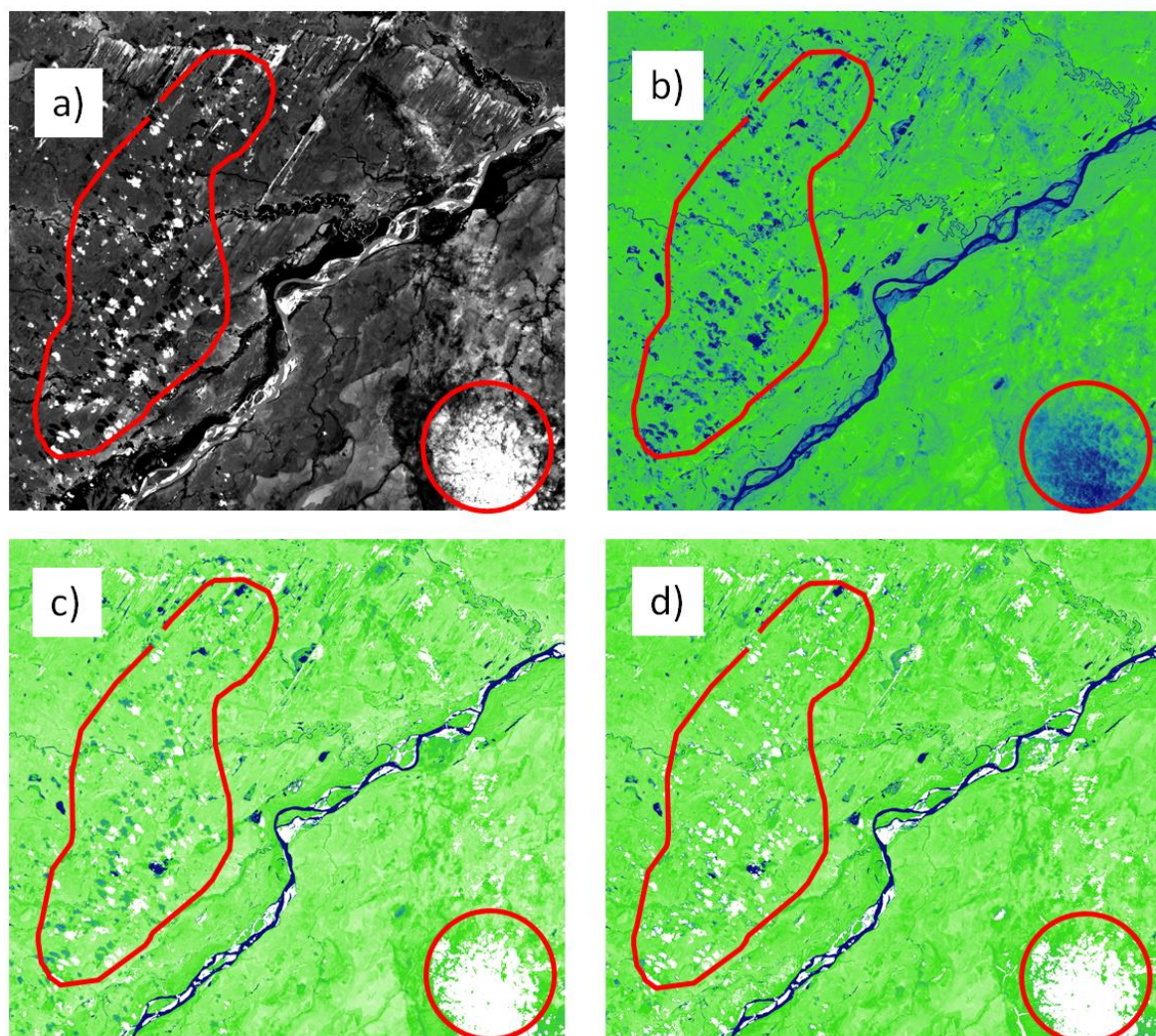
filtradaNubes=If B2 < 240 Then calcule MNDWI Else MNDWI -1

La imagen resultante tendrá valores con un offset de -1 donde hay nubes y otros objetos muy claros en la banda 2, que se pueden obviar para el mapeo del agua.

Se puede aplicar un segundo filtro para enmascarar las sombras de nubes y se aplica a la imagen MNDWI:

Si  $B3 > 40$  and filtrada nubes  $> 0$  conservar valor del pixel Else Setnull

Esto permite tener una imagen MNDWI resultante limpia de nubes y de sombra de nubes, conservando los valores mayores a 0 que identifican el agua.



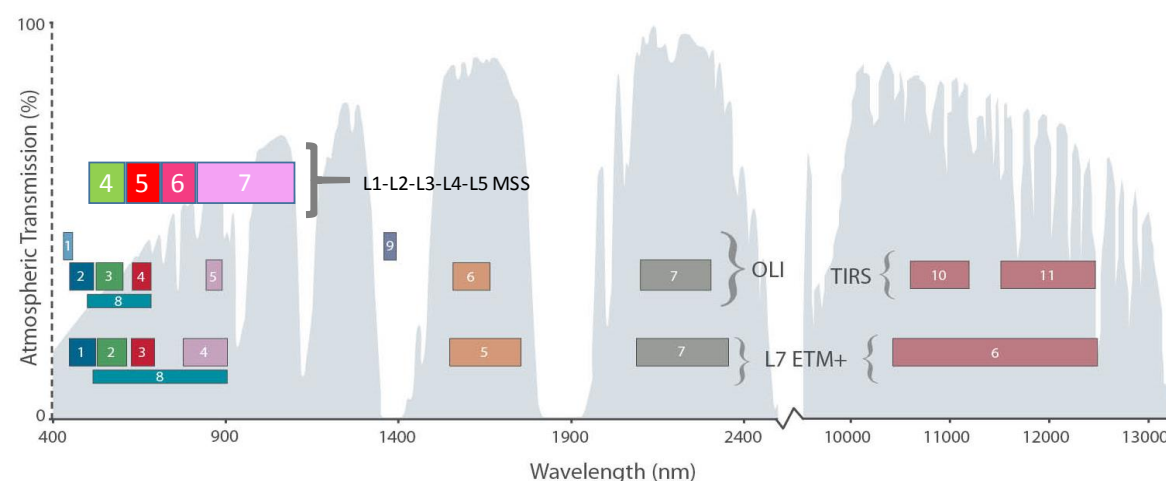
*Ilustración 25 Secuencia del proceso de filtrado del índice MNDWI en Landsat*

La figura 23 muestra la secuencia de filtrado. a) Banda 3 original. Hay varios cuerpos de agua, pero presenta nubosidad dispersa en la imagen. b) MNDWI calculado sin filtrar. Se distingue bien el contraste entre agua y suelo-vegetación, pero las nubes y sus sombras tienen valores parecidos al agua. c) Se ha recalculado en NDWI normalmente para pixels que en la banda 1 o 2 se acercan mucho al blanco. d) se ha filtrado partiendo de la imagen c, pero esta vez aprovechando que las sombras de nubes tienen valores bajos en todas las bandas, mientras que el

agua en las bandas 1 2 y 3 tienen valores mucho mayores que las sombras, por lo tanto se ven grises en estas bandas.

Este sencillo procedimiento permite hacer un cálculo del MNDWI evitando el ruido de las nubes y sus sombras, permitiendo obviar el ruido de nubes.

Algo importante que debemos tener en cuenta, es la nomenclatura de las bandas y su ubicación en el espectro dependiendo del sensor que estemos usando para el cálculo de los índices en series históricas.



*Ilustración 26 Comparación espectral de Sensores Landsat. Modificado de:*

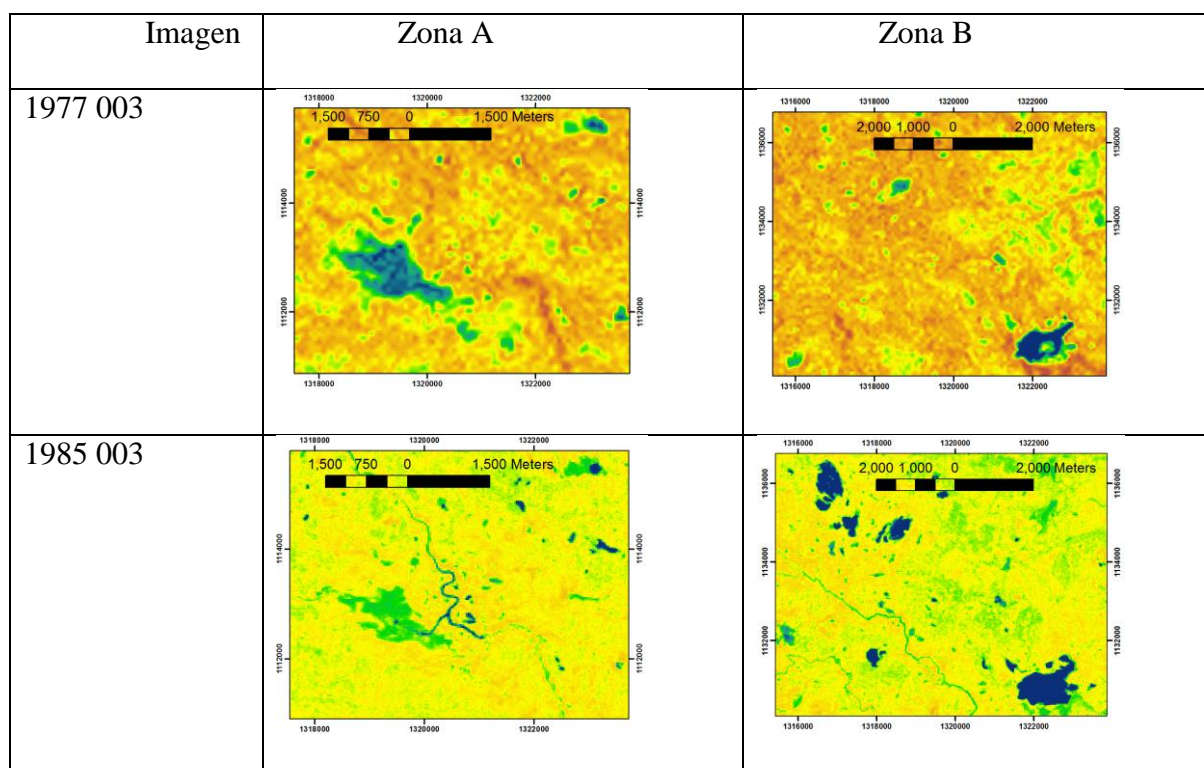
*<http://landsat.gsfc.nasa.gov/?p=3186>. Graphic created by L.Rocchio & J.Barsi.*

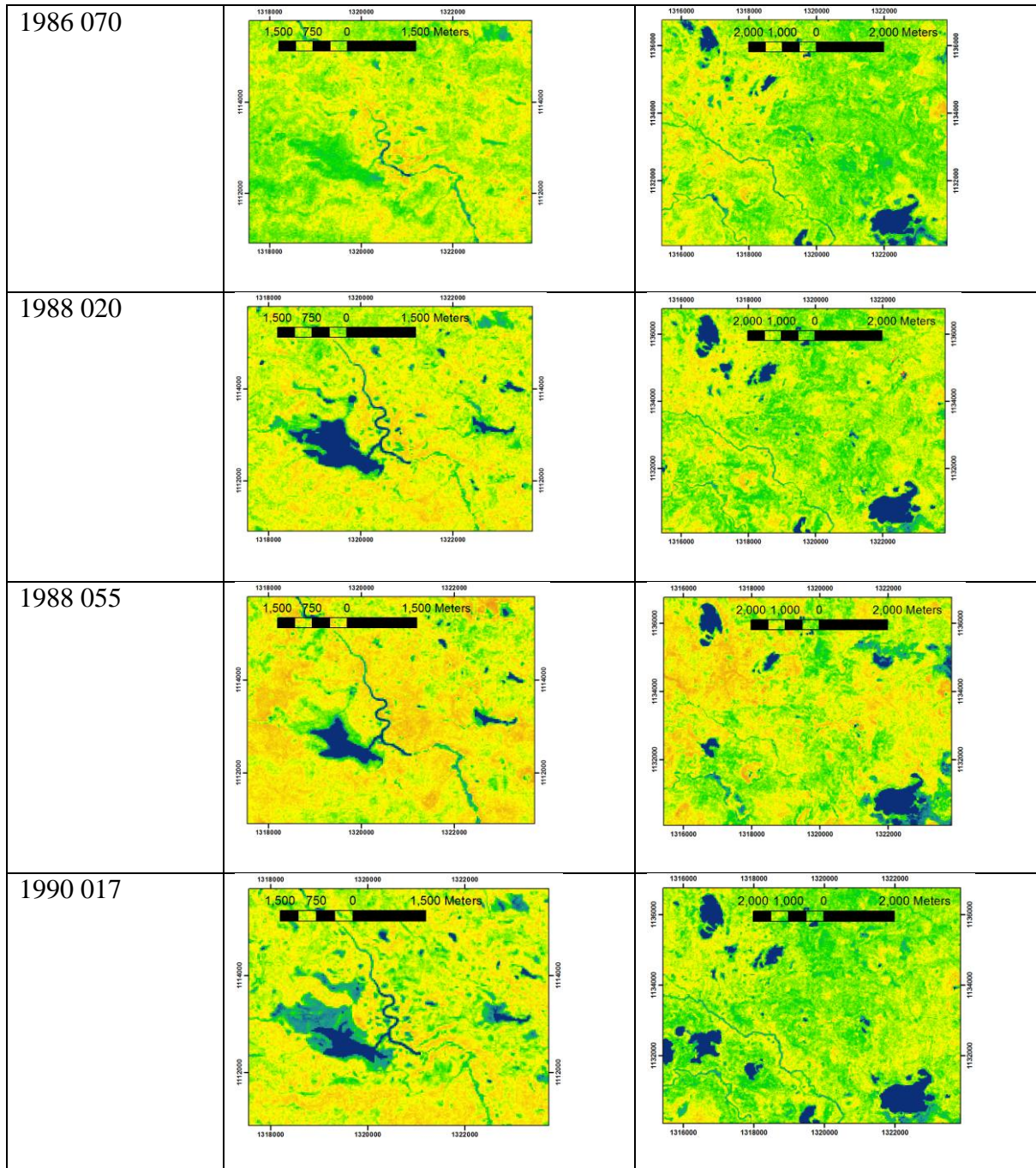
Como podemos apreciar en la gráfica 26, las bandas de los sensores MSS tienen una numeración distinta a las bandas de los sensores TM, ETM y OLI de LANDSAT, y están situadas en diferentes zonas del espectro por lo tanto debemos fijarnos bien en las especificaciones

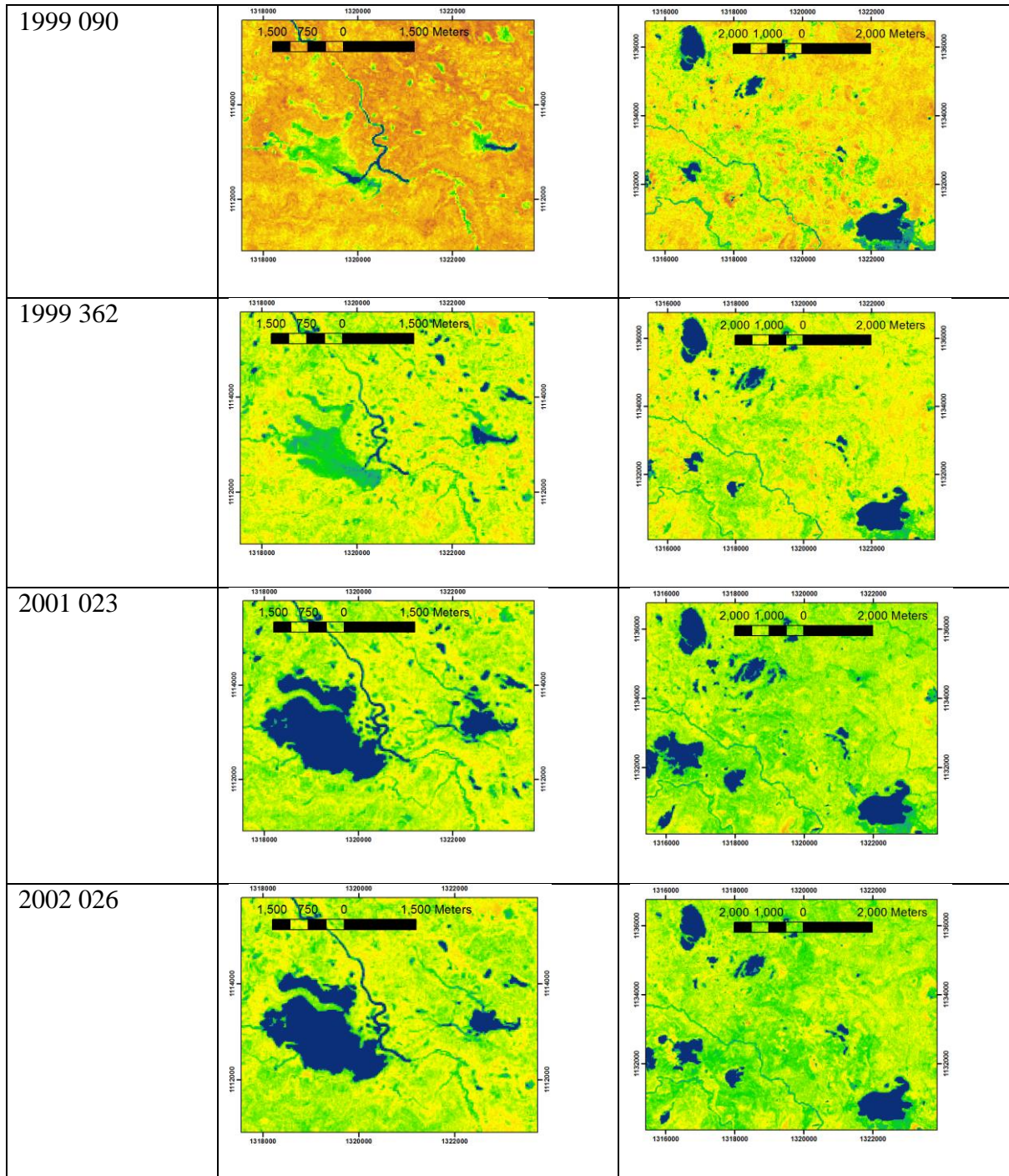
espectrales de las bandas verde e infrarrojas para realizar un cálculo correcto de los índices de agua.

En la tabla 5 tomamos como ejemplo dos zonas del área de estudio, para mostrar gráficamente la variación de los cuerpos de agua a través de los años. Las imágenes corresponden al índice MNDWI con una escala de colores que nos permite diferenciar el agua en cada imagen. El agua aparece en azul, verde muestra cierto grado de humedad y amarillo-naranja zonas secas. De particular interés es la variabilidad de las áreas a través de los años de algunos cuerpos de agua, como ocurre en la Zona A, y una menos variabilidad en la Zona B, siendo áreas cercanas y correspondientes a la misma imagen cada año.

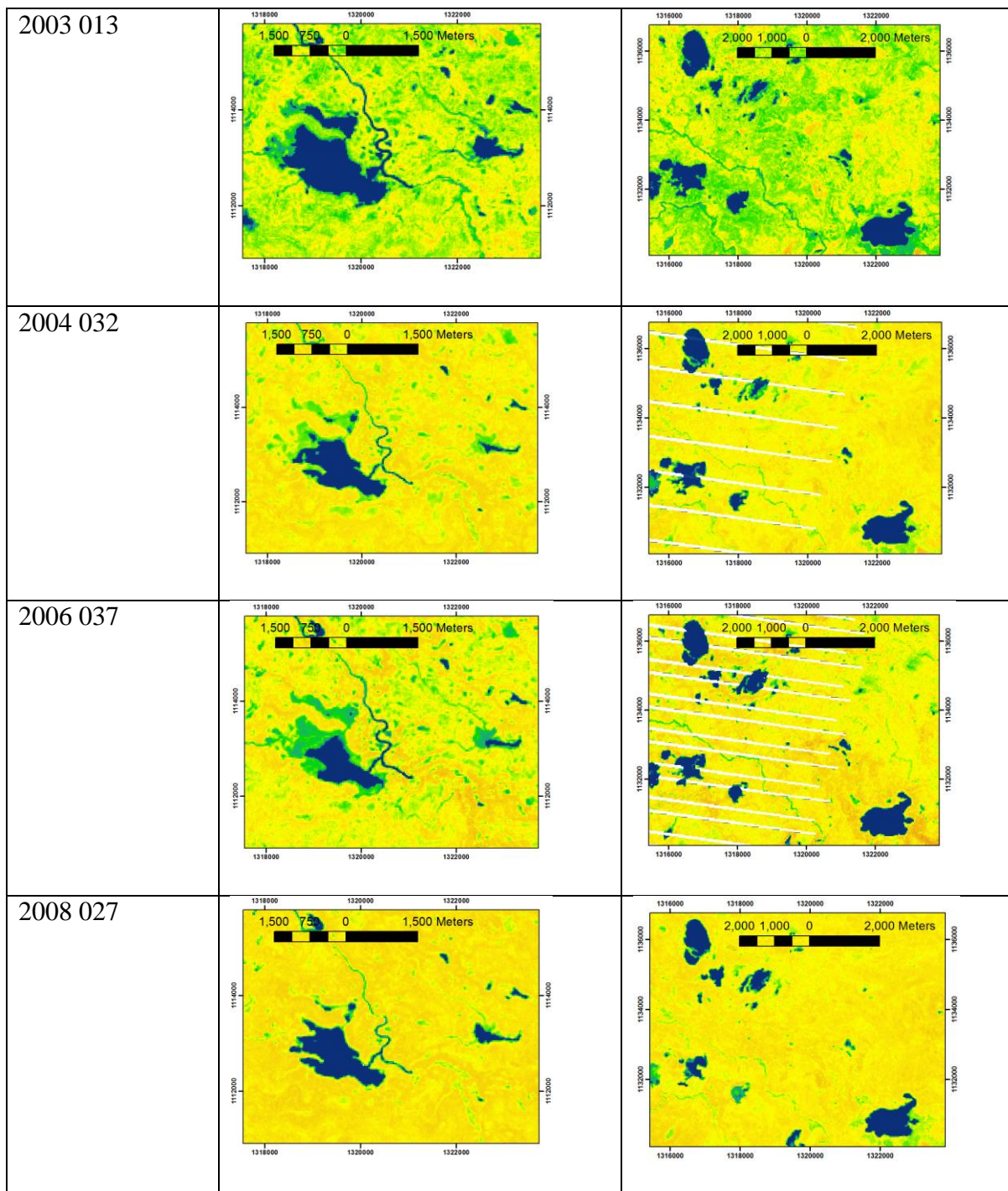
*Tabla 5 Gráfica comparativa de un cuerpo de agua o un área específica comparando año a año el área de un cuerpo de agua determinado.*

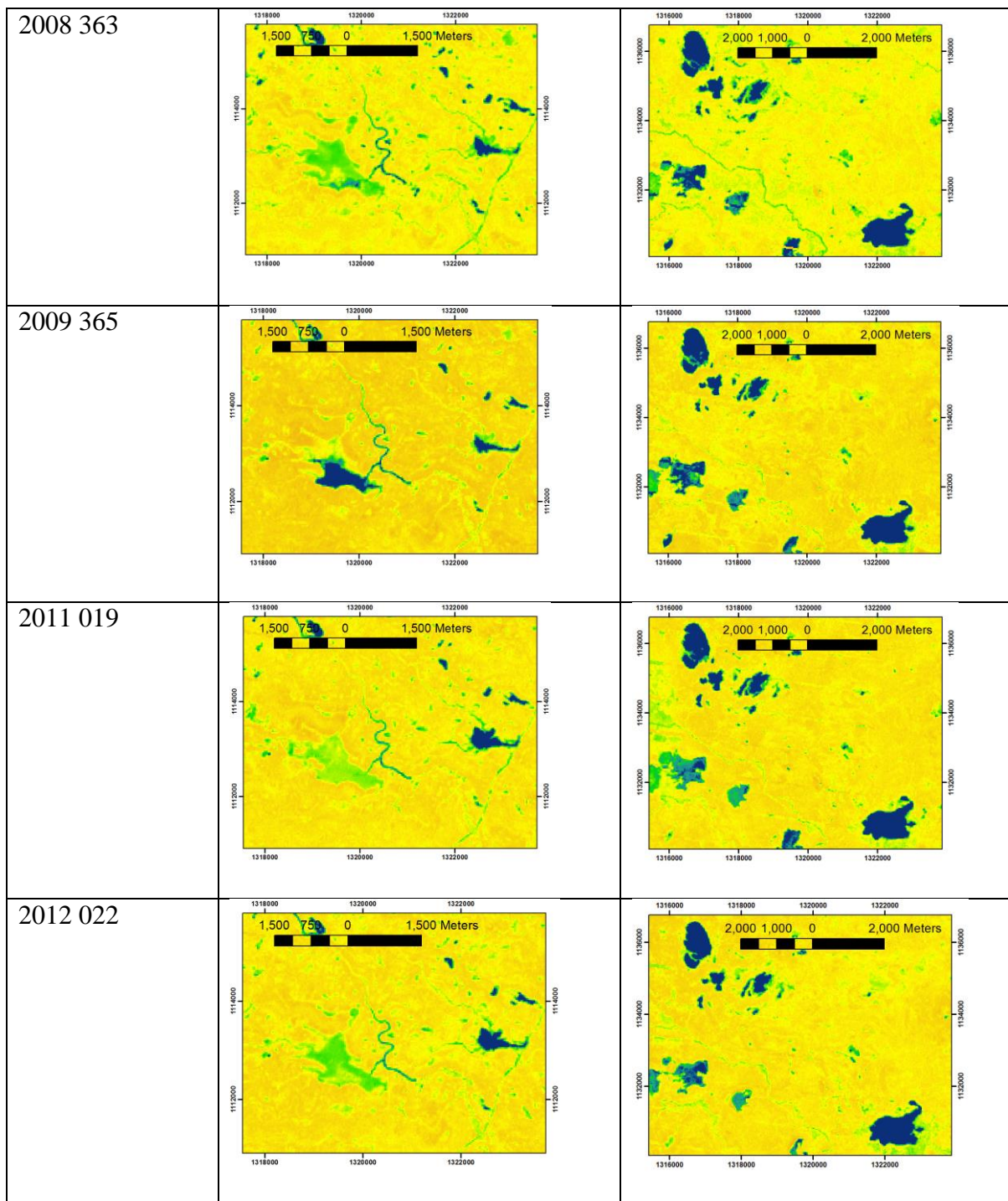


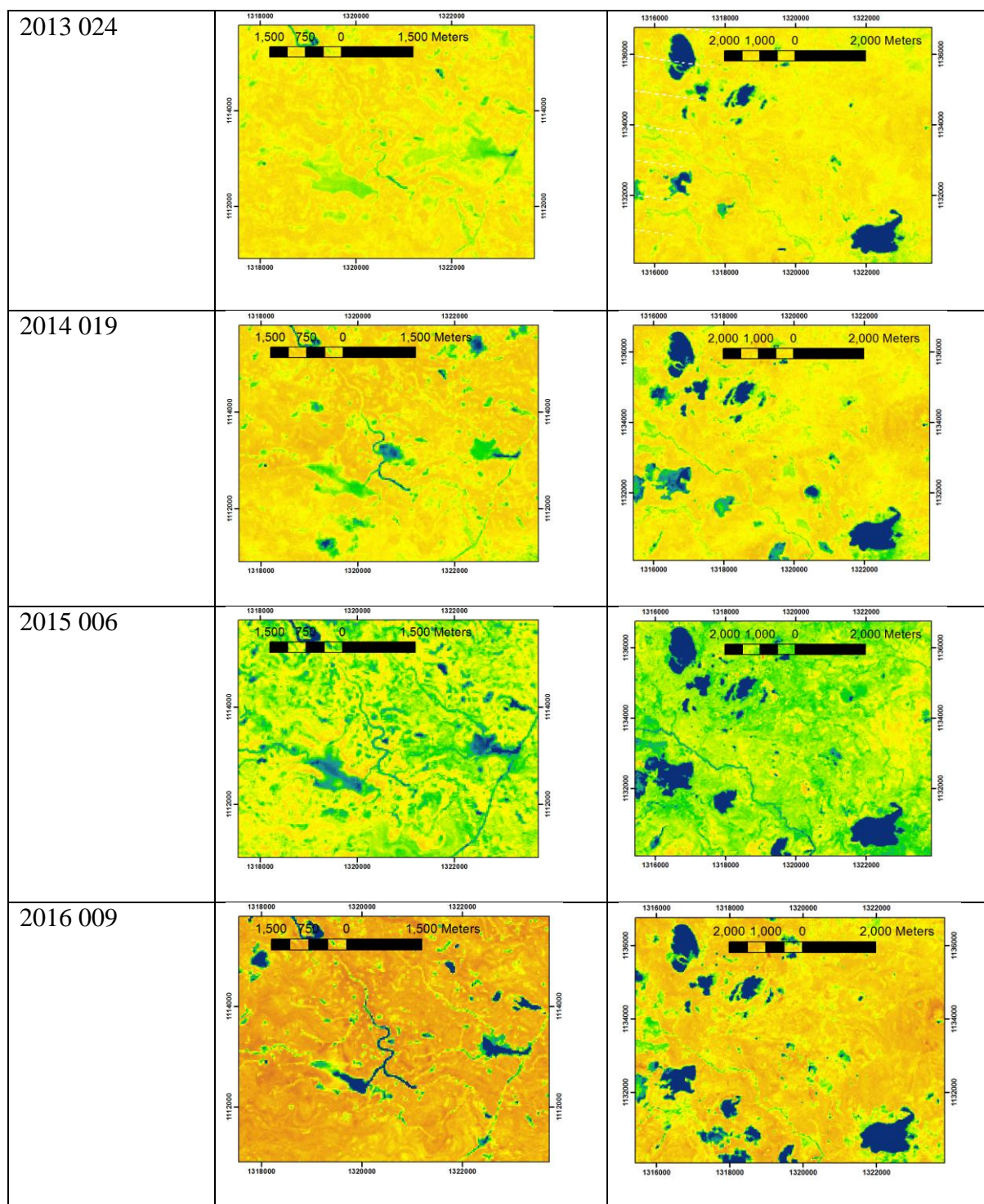






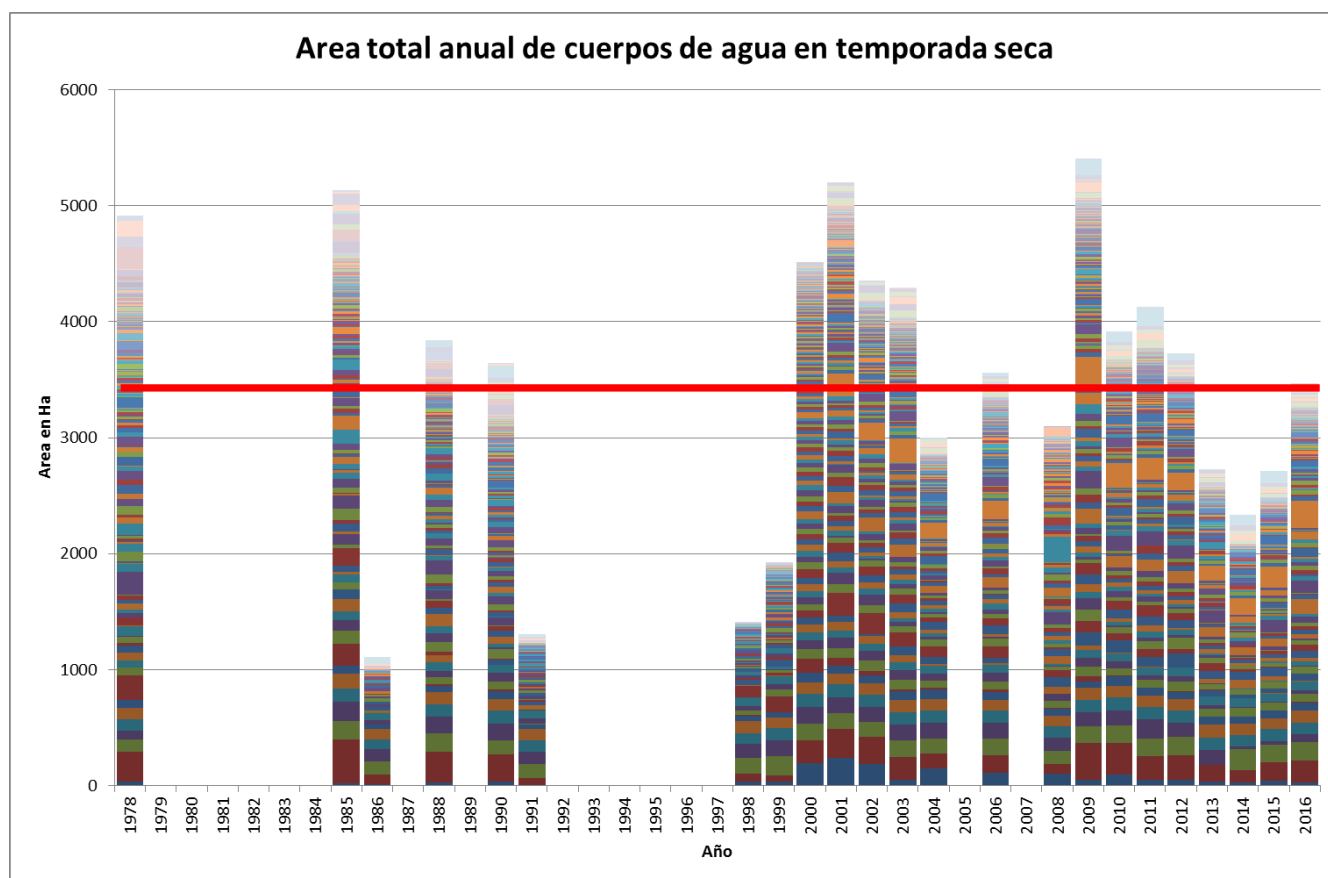






### **7.6.6 Medición del área total de cuerpos de agua**

Partiendo de las imágenes calculadas del MNDWI, se clasifican los píxeles correspondientes a cuerpos de agua definiendo un rango de valores que puede variar entre imagen e imagen. La literatura del índice indica que el agua se identifica con valores  $> 0$ . En la práctica estos rangos deben ser ajustados para cada imagen para minimizar los errores. Para los índices calculados a partir de imágenes que están en reflectancia, los valores mínimos para identificar el agua están entre 0.44 y 0.32, mientras que los índices provenientes de imágenes en radianza si son cercanos a cero. Según Yuanbo Liu (2012) y Lei Ji (2009), estas variaciones son debidas a diferentes ángulos del sol, condiciones atmosféricas diferentes y la proporción de agua respecto a otros componentes dentro de cada pixel.



*Ilustración 27 Sumatoria anual de cuerpos de agua en temporada seca en el área de estudio*

La gráfica 27 muestra la sumatoria anual de las áreas de los cuerpos de agua seleccionados de la zona de interés en Hectáreas. Permite ver la variación areal de los cuerpos de agua e identificar los años con déficit de agua. La línea roja es el promedio de área de los cuerpos de agua de los años con información. A pesar del faltante de información de varios años, se pueden identificar años con un déficit de agua muy pronunciado, muy por debajo del promedio (1986, 1991, 1998, 1999, 2014)

## 8. RESULTADOS

Se ha mirado la sequía en Casanare desde 3 perspectivas diferentes: la sequía meteorológica, la agrícola y la hidrológica. Y desde cada una de ellas se han identificado los períodos anormalmente secos según los índices respectivos. La siguiente tabla resume visualmente los años abarcados en este estudio y se marcan en color naranja los años en que cada índice o método identifica un período anormalmente seco. Se muestra también en la tabla las ocurrencias del fenómeno del Niño como factor proclive a la ocurrencia de sequías en la región. En la parte derecha de la tabla hay un número indicativo de en cuántos índices aparecen ocurrencias de sequía para un año determinado. Aunque el análisis de esta tabla es descriptivo, nos da una idea rápida de la coincidencia entre los diferentes índices para identificar ocurrencias de sequía, y la relación entre sequía y fenómeno del El Niño.

*Tabla 6 Identificación de sequías según los diferentes índices y según el área de los cuerpos de agua*

Año	ONI	SPI	VHI	area Cuerpos de agua	
1978					1
1979					1
1980					1
1981					
1982					3
1983					3
1984					1
1985					2
1986					4
1987					1
1988					1
1989					2

	Sequía fuerte
	Sequía Moderada
	Sin información
	Fenómeno de El Niño

1990					
1991	■	■	■	■	4
1992	■	■	■	■	3
1993				■	
1994		■		■	1
1995				■	
1996			■	■	1
1997	■	■		■	2
1998	■			■	2
1999				■	1
2000					
2001		■	■		2
2002	■	■			2
2003					
2004				■	1
2005				■	
2006					
2007				■	
2008		■	■	■	2
2009	■	■			2
2010	■		■		2
2011					
2012					
2013			■	■	2
2014	■	■		■	3
2015	■	■		■	3
2016			■		1

Se esperaría ver gran correlación entre los diferentes índices al identificar positivamente una condición de sequía, pero no se hace evidente al compararlos en la tabla. Los años en donde la mayoría de indicadores evidencian sequía son (1982-83, 1986, 1991-1992, 2014 y 2015), pero en general se presenta dispersión en la identificación positiva de una sequía. Como lo describe la Nota Técnica del IDEAM (15), los diferentes tipos de sequía tienen una secuencia en su aparición, comenzando por déficit de lluvias (sequía meteorológica), seguida de la repercusión

negativa en la salud de la vegetación (sequía agrológica) y finalmente repercute en los niveles de cuerpos de agua y ríos. Debido a esta secuencia, es previsible que haya un desfase entre la aparición de los diferentes tipos de sequía y que sea escalonado, pero además incurren factores externos a la precipitación que influyen en las sequías:

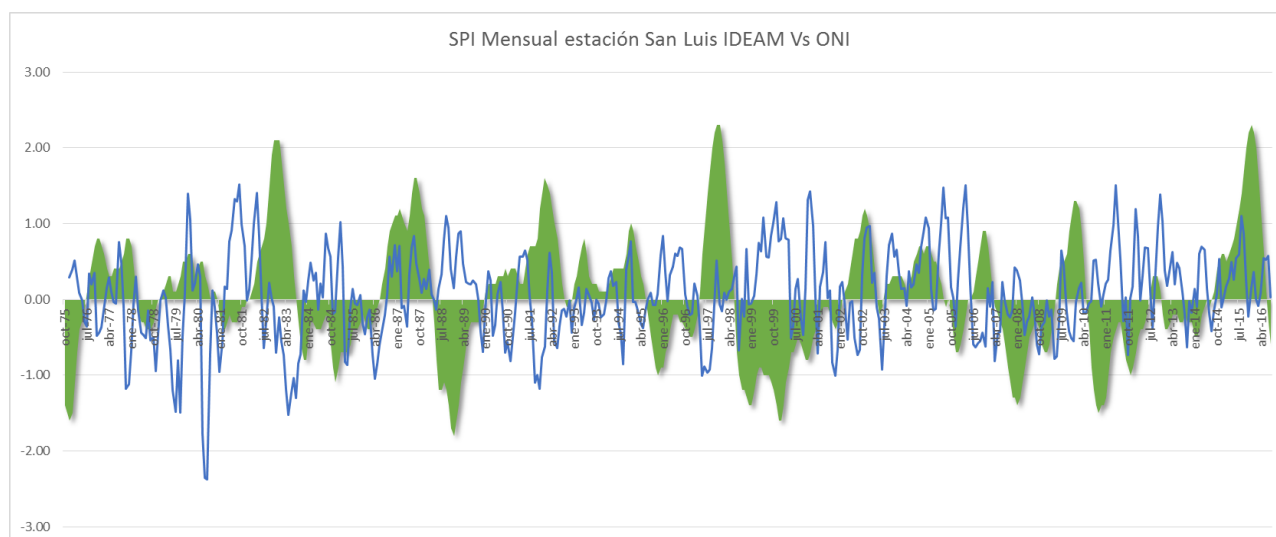
“. Aunque el clima es el principal contribuyente a la sequía hidrológica, otros factores como cambios en el uso del suelo, degradación del suelo y construcción de presas entre otros afectan las características hidrológicas de una zona.” (15)

“La sequía agrícola tiene lugar cuando hay periodos de baja precipitación, evapotranspiración actual y potencial altas, déficit de agua en el suelo, reducción del nivel de agua en los ríos y acuíferos, entre otros. La demanda de agua por parte de la planta depende de las condiciones climáticas que prevalecen, de las características biológicas de la planta, de la etapa de crecimiento en la que se encuentre, y de las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo. Una buena definición de sequía agrícola debe tener en cuenta la susceptibilidad variable del cultivo durante las diferentes etapas del desarrollo que incluye desde la germinación hasta la madurez.” (15)

Uno de los interrogantes planteados era la correspondencia entre las series de índices indicadores de déficit de lluvia tomados de estaciones y del satélite TRMM y de estaciones pluviométricas. En el capítulo 7.2 verificamos una buena correlación entre estas series, lo cual nos permite usar los datos del satélite TRMM como complemento a la información de las estaciones pluviométricas, pues cuenta con mayor densidad de información homogénea que resulta importante en zonas donde no contamos con densidad suficiente de estaciones pluviométricas, o que las estaciones disponibles tienen datos incompletos.



La otra comparación es determinar la correlación que existe entre el índice estandarizado de precipitación y el índice ONI que identifica períodos del fenómeno del Niño y la Niña. Esto nos permitiría extender el período de tiempo de estudio y usar la serie ONI para correlacionar períodos anormalmente secos desde los años 50.

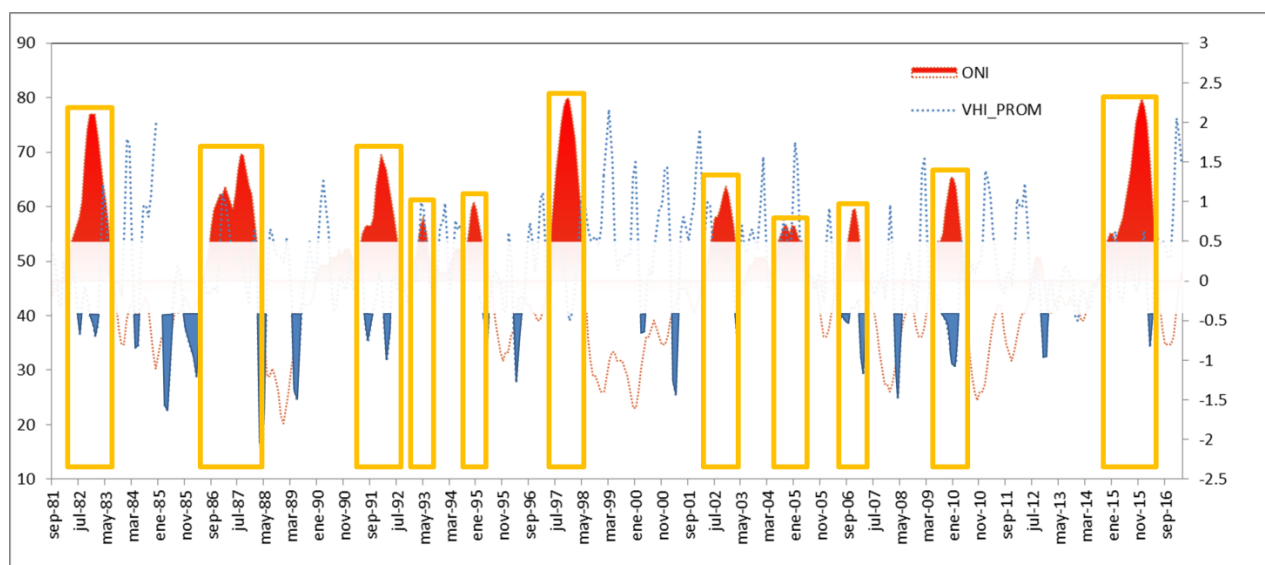


*Ilustración 28 Superposición de serie ONI (Área verde) con el índice SPI mensual de la estación San Luis del IDEAM*

En la gráfica 20, visualmente no se percibe una buena correlación negativa entre la serie ONI y el índice SPI para identificar períodos secos, aunque hay mejor concordancia para identificar alta lluviosidad con el fenómeno de La Niña. Solamente habría coincidencia de periodos secos en 1977-78, 1983, 1991, 1997, 2006, 2009. Las curvas SPI y ONI dan un coeficiente de correlación de 0.6

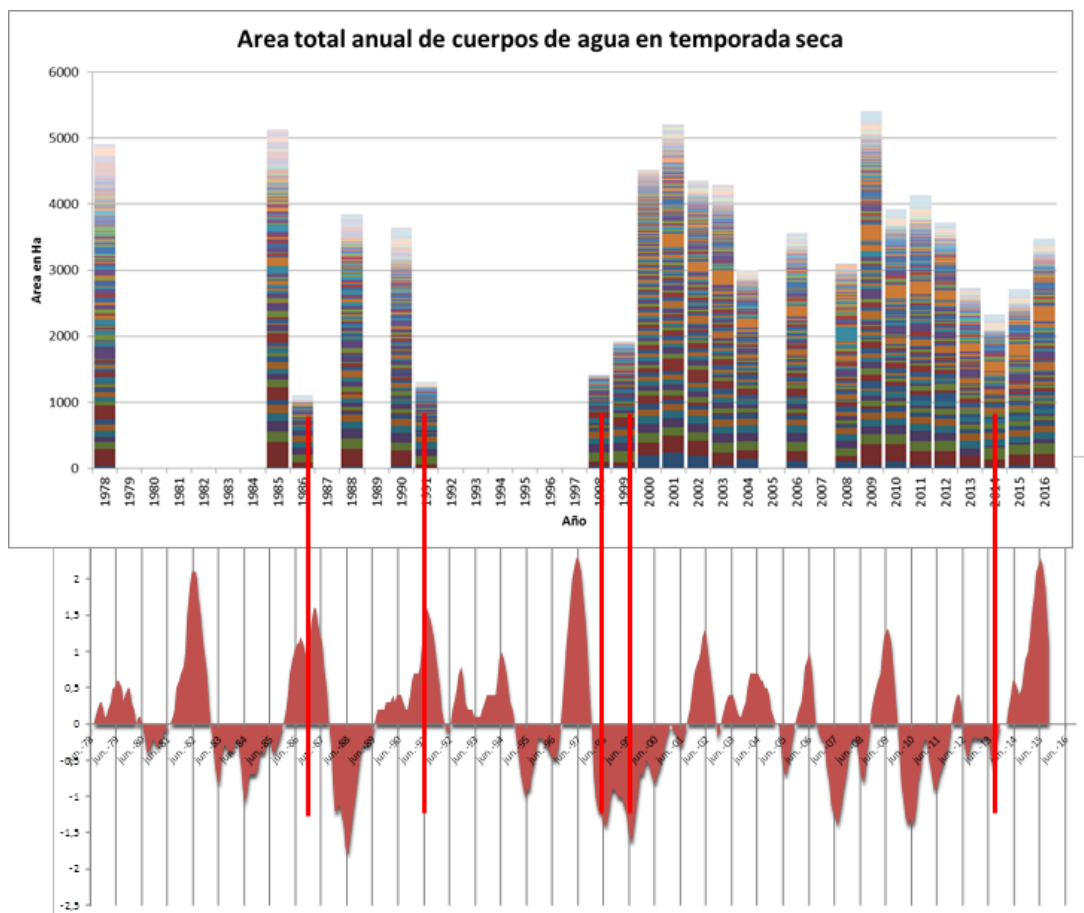
La concordancia entre el índice VHI y la serie ONI se muestra en la gráfica 21. En ella se ilustra visualmente la curva sombreada en rojo los fenómenos de El Niño y en sombreado azul

los valores de VHI por debajo de 40 que denotan sequía. Los cuadros naranja comparan visualmente los fenómenos del niño que deberían coincidir con las áreas azules. La concordancia es baja, y se corrobora con un coeficiente de correlación de  $-0.16$ . Filtrando los datos para los meses de Diciembre a Marzo que comprenden la temporada seca, el coeficiente de correlación mejora y llega a  $-0.31$  pero sigue siendo bajo.



*Ilustración 29 Superposición de la serie ONI y la serie VHI promedio para la zona de interés. Nótese la baja concordancia entre fenómeno de El Niño y el indicador de sequía agrológica VHI*

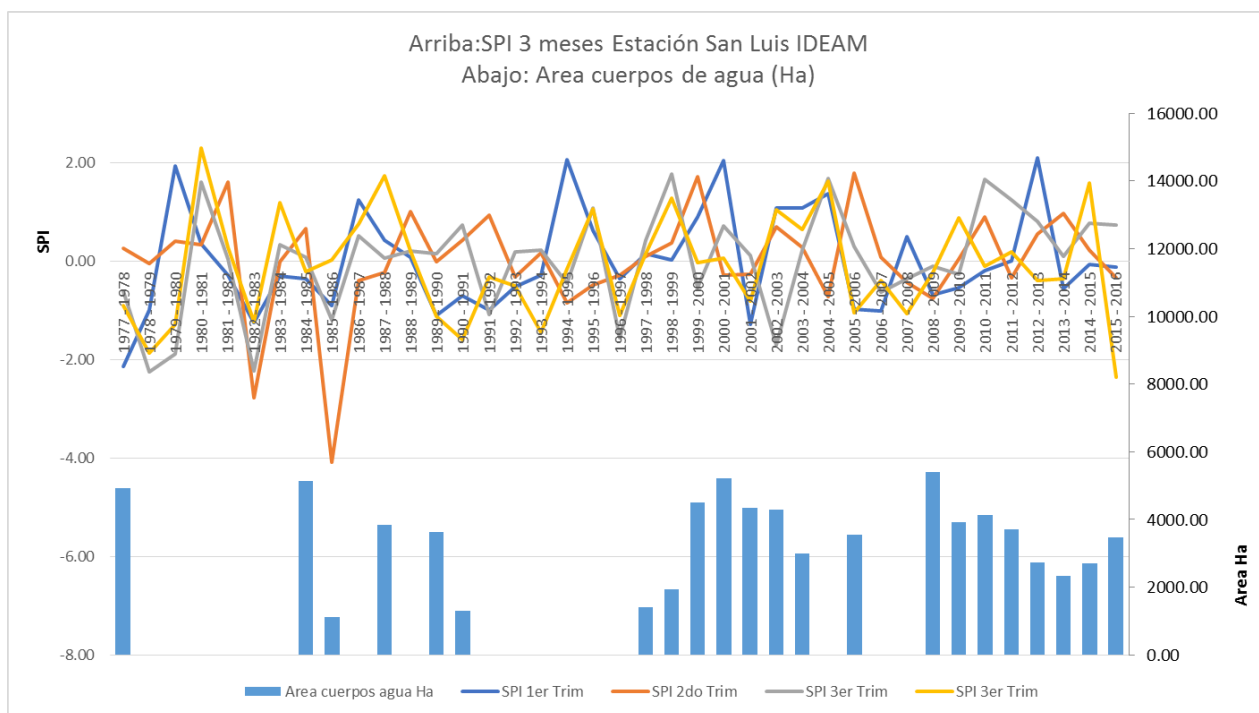
Para evidenciar la concordancia entre fenómenos Niño-Niña y la variación areal de los cuerpos de agua permanentes, colocamos las dos gráficas a la misma escala de tiempo. Resaltadas en rojo en la gráfica los años de menor área de los cuerpos de agua: 1986, 1991, 1998, 1999 y 2014. De estos 5 años, observamos en la serie ONI que los años 1986, 1991 y 2014 coinciden con fenómenos del Niño pronunciados. Sin embargo, los años 1998 y 1999 coinciden en la serie ONI con un período de la Niña.



*Ilustración 30 Ubicación de los años con menor superficie de agua en la serie ONI*

La imagen 23 compara visualmente la relación entre precipitación local y área de los cuerpos de agua. La precipitación se muestra como la serie del índice SPI trimestral y el área total anual de los cuerpos de agua. La correspondencia de las series SPI con las áreas es muy baja. Hay coincidencia en el año 1985, y no se tiene información de cuerpos de agua del año 1983 donde se evidencia una fuerte sequía, pero en los otros años no hay concordancia, pues las series que deberían mostrar concordancia son las del primer y segundo semestres pues abarcarían Octubre a

Marzo de cada año. Esto podría deberse a que los cuerpos de agua se alimentan primordialmente de los Ríos y quebradas que vienen aguas arriba desde Piedemonte Llanero y la Cordillera, que tienen un régimen de lluvia distinto al de los llanos orientales.



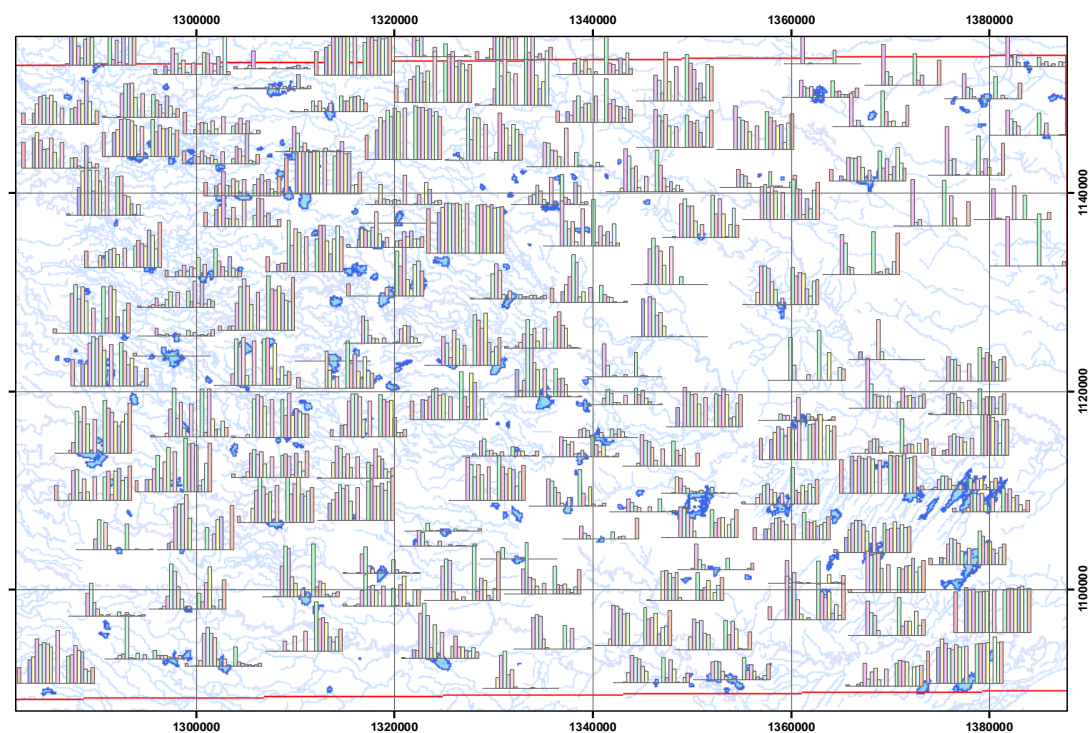
*Ilustración 31 Comparación serie de índices SPI y área de cuerpos de agua*

En las imágenes del ANEXO, podemos ver la variación areal y espacial de todos los cuerpos de agua por año respecto al área promedio de cada cuerpo de agua. Se decidió usar el área promedio de cada cuerpo de agua como base de comparación debido a la gran variabilidad en las áreas de cada cuerpo de agua de un año a otro, sin un patrón de decrecimiento o aumento generalizado desde el año 78. Para la obtención de la grilla tomamos como base el área promedio de cada cuerpo de agua durante los 23 años que se evaluaron (correspondientes a las 23 imágenes Landsat Analizadas) y luego calculamos el porcentaje de cambio de cada cuerpo de agua cada año respecto al promedio:

$$\% \text{ Cambio} = (\text{Area\_año}(i)\text{-cuerpo}(n) - \text{Area\_Promedio\_Cuerpo}(n)) * 100 / \text{Area\_Promedio\_Cuerpo}(n)$$

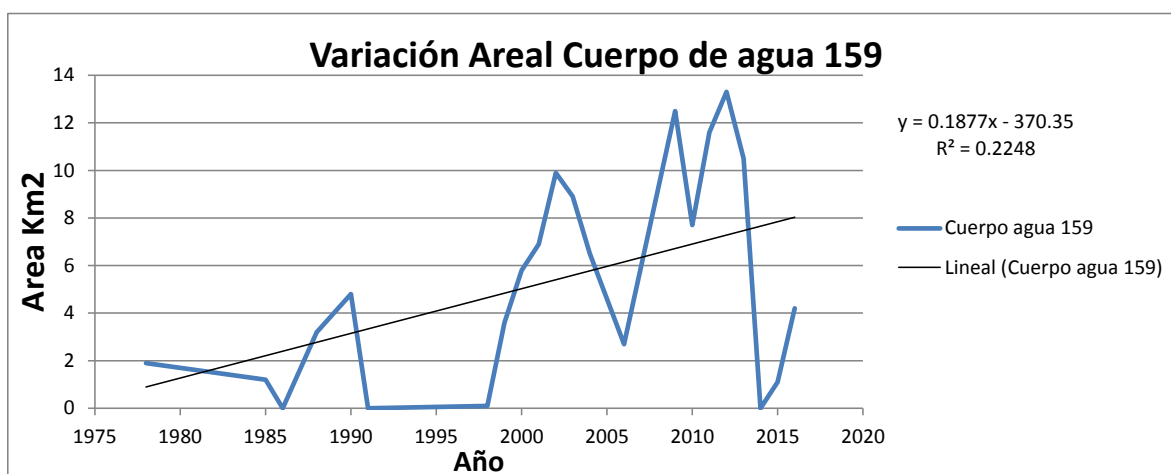
De estas graficas de porcentaje de cambio podemos decir que no existe un patrón homogéneo de disminución a aumento en los cuerpos de agua. Cada año hay variaciones heterogéneas en el comportamiento de los cuerpos de agua. Sin embargo, se evidencia en las grillas y los histogramas una disminución generalizada en los cuerpos de agua en los años 1986, 1991, 1998, 1999, 2014, 2015.

La siguiente imagen muestra la distribución geográfica del histórico de las áreas de los cuerpos de agua. Esta gráfica resume la variación de cada cuerpo de agua, pero nuevamente no es posible generalizar un patrón de disminución o aumento generalizado. Los cuerpos de agua disminuyen y aumentan de forma dispersa.



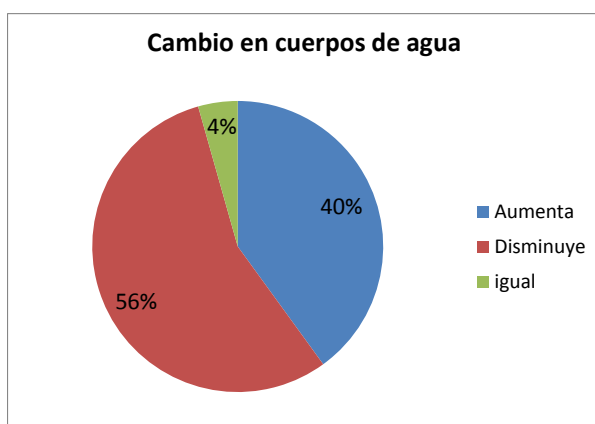
*Ilustración 32 Distribución geográfica del cambio histórico de las áreas de los cuerpos de agua*

Una forma posible de medir el aumento o disminución del cuerpo de agua en el tiempo, es mediante una regresión lineal y tomar la pendiente como una medida de aumento o disminución, como se aprecia en la gráfica 29.



*Ilustración 33 Ejemplo de la aplicación de regresión lineal para ilustrar la tendencia de aumento o disminución de los cuerpos de agua con el tiempo*

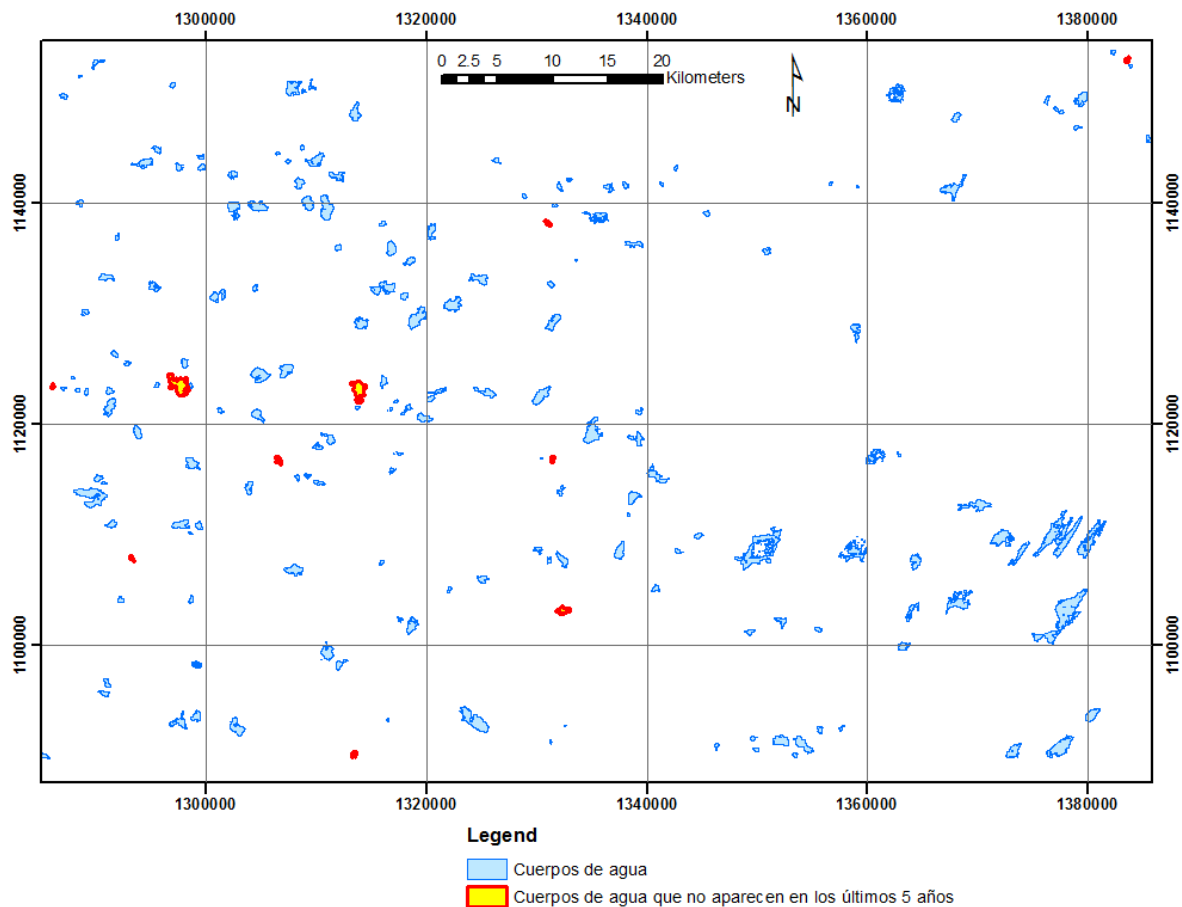
Este sería un caso de aumento. Si hacemos esto mismo a todos los cuerpos de agua identificados en este estudio, tenemos que de los 205 cuerpos de agua analizados, 82 presentan pendiente positiva (aumentan su área), 114 presentan pendiente negativa (disminuyen su área) y 9 permanecen prácticamente invariables.



*Ilustración 34 Cambio en cuerpos de agua*

Debido a la variabilidad en el comportamiento interanual de las áreas, no es tan sencillo crear una definición de un cuerpo de agua que desaparezca. Sin embargo al hacer el ejercicio de

buscar en los resultados los cuerpos de agua con área = 0 durante los últimos 5 años, se identifican 11 cuerpos de agua, los cuales se identifican en el siguiente mapa



*Ilustración 35 Identificación de los cuerpos de agua que no aparecen en las imágenes*

*Landsat de los últimos 5 años*

Estos cuerpos de agua no están concentrados en una sola parte sino que están distribuidos dentro del área de interés. La tabla 5 muestra la ubicación espacial de los cuerpos de agua identificados como desaparecidos en los últimos 5 años. En la cartografía 25.000 del IGAC solo aparecen 2 de ellos con nombre geográfico. La ubicación espacial de estos cuerpos de agua se muestra en la tabla como el centroide geométrico en Coordenadas MAGNA origen Bogotá.



*Tabla 7 Identificación y ubicación cuerpos de agua que no aparecen en los últimos 5 años en las imágenes Landsat*

ID Cuerpoagua	Centroide X	Centroide Y	NMG
68	1306534.10	1116749.67	-
119	1313420.86	1090099.27	-
129	1383550.02	1153049.74	-
135	1330959.21	1138259.53	-
147	1331405.00	1116871.60	-
174	1286025.29	1123440.41	-
185	1332447.91	1103133.21	-
203	1293194.51	1107880.24	-
208	1331371.71	1116615.80	-
209	1297497.26	1123558.54	Estero El Esterón
221	1313795.32	1123091.33	Estero Los Siguarataros

## 9. CONCLUSIONES

No resulta fácil correlacionar la variación de cuerpos de agua con las variables climáticas como la precipitación, ni con los otros índices de sequía. La precipitación por ejemplo, que en nuestro caso es analizada con el índice SPI mensual y trimestral no explica las variaciones anuales de los cuerpos de agua. La falta de continuidad temporal de los datos areales a partir de imágenes no nos permite estimar un coeficiente de correlación confiable para comparar con las otras series, por lo que algunas comparaciones se hacen de manera visual.

La serie ONI, que identifica la presencia del fenómeno del Niño, muestra una regular correlación de 0,6 con el índice SPI y más baja aún con el índice relacionado a salud de vegetación VCI.

La sequía en la zona estudiada es un fenómeno recurrente que se ha presentado de manera fuerte en cuatro períodos que pudimos evidenciar: 1982-83, 1986, 1991, 1998-1999 y 2014. Estos períodos se identificaron en las diferentes fuentes estudiadas, en la medición areal de los cuerpos de agua, en las series de tiempo de los índices SPI de las estaciones meteorológicas, y en la serie del índice VCI calculada a partir de MODIS.

Resulta lamentable no poder contar con más imágenes LANDSAT que nos ayudaran a completar la serie histórica desde 1972. Esperamos que el esfuerzo de recopilación de esta información histórica adelantada por la USGS pueda brindarnos a futuro esta valiosa información, aunque también podría buscarse apoyo del IGAC para gestionar la adquisición de estas imágenes a la estación Cotopaxi de Ecuador, que era la estación encargada de recibir las

imágenes Landsat 4 y 5 de Ecuador y países aledaños (incluido Colombia) entre Abril de 1990 y Julio de 2001 según <https://landsat.usgs.gov/historical-international-ground-stations>.

Al analizar las grillas de variación areal de los cuerpos de agua del anexo, año por año, no se evidencia un patrón espacial definido de aumento o disminución en los cuerpos de agua y que sea repetitivo. Sí se evidencian años de un aumento o disminución generalizada (evidente también en los histogramas que acompañan las grillas), pero inclusive en los años más secos (colores rojizos) hay cuerpos de agua que aumentan su área respecto al promedio (colores azulados), y su distribución es dispersa año tras año.

Se lograron identificar los cuerpos de agua que sí han mostrado una tendencia a disminuir su área en la serie de tiempo, los cuales deben ser analizados de forma más detallada en estudios posteriores para identificar las causas de esta disminución, pues constituyen el 56% de los cuerpos de agua. De estos cuerpos se identificaron 11 cuerpos de agua que no aparecen ya en las imágenes de los últimos 5 años, por lo cual requieren la revisión detallada de estudios posteriores para buscar las causas de su desaparición.

Otro factor que no fue analizado en este trabajo es la variación de profundidad en los cuerpos de agua, que se evidencian en los ajustes de los umbrales de los índices de agua. Los cuerpos de agua profundos tienen mayores valores de NDWI, y en el límite inferior del umbral agua- no agua se pueden discernir aguas someras que fácilmente desaparecen en períodos secos. Los cuerpos de agua más profundos son los que aparecen más invariables en el tiempo.

Este trabajo está enfocado en la identificación y dimensionamiento del fenómeno de sequía, y su relación con fenómenos cíclicos como el fenómeno del Niño, pero hay otros factores de afectación en las sequías que pueden abordarse desde la percepción remota, tales como crecimiento de la frontera agrícola, deforestación, desvío de drenajes, obras de infraestructura que se constituyan en barreras a los drenajes, represamiento aguas arriba de los drenajes, entre otros.

## **10. RECOMENDACIONES**

Al buscar información sobre sequía en Colombia, se evidenció la escasez de estudios al respecto. Un portal especializado en el monitoreo de la sequía en Colombia resultaría de gran utilidad para varias entidades que deben planear la mitigación de los impactos de las sequías y el invierno. La Universidad tiene la capacidad de montar un portal que se nutra de información gratuita como las imágenes MODIS y TRMM y que genere periódicamente mapas de índices de sequía para todo el país.

Hay varios interrogantes que se desprenden de este trabajo que pueden ser retomados por trabajos posteriores como el cambio en la hidrodinámica superficial de la zona causada por el hombre que podría explicar la variabilidad heterogénea de los cuerpos de agua, así como la influencia de la profundidad de cada cuerpo de agua en la variabilidad. También buscar la relación entre precipitación en cordillera y piedemonte con los cuerpos de agua, pues la correlación con precipitación local no es lineal.

## 11. BIBLIOGRAFÍA

1. A comparison of methods for smoothing and gap filling time series of remote sensing observations – application to MODIS LAI products S. Kandasamy, F. Baret, A. Verger, P. Neveux, and M.Weiss INRA-EMMAH, UMR1114, Site Agroparc, 84914 Avignon, France 2CREAF-CEAB-CSIC-UAB Global Ecology Unit, Campus de Bellaterra, 08913 Barcelona, Spain. Biogeosciences, 10, 4055–4071, 2013 [www.biogeosciences.net/10/4055/2013/](http://www.biogeosciences.net/10/4055/2013/) doi:10.5194/bg-10-4055-2013
2. AghaKouchak, A.; Farahmand, A.; Melton, F. S.; Teixeira, J.; Anderson, M. C.; Wardlow, B. D.; and Hain, C. R., "Remote sensing of drought: Progress, challenges and opportunities" (2015). NASA Publications. Paper 151. <http://digitalcommons.unl.edu/nasapub/151>
3. Chavez PS. An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data. Remote Sensing of Environment. Pat S. Chavez, Jr. U.S. Geological Survey, 2255 N. Gemini Drive, Flagstaff, Arizona 86001 USA Remote Sensing of Environment (Impact Factor: 6.39). 04/1988; 24(3):459-479. DOI: 10.1016/0034-4257(88)90019-3
4. Comparison of the Landsat Surface Reflectance Climate Data Record (CDR) and manually atmospherically corrected data in a semi-arid European study area. Francesco Vuolo, Matteo Mattiuzzi, Clement Atzberger University of Natural Resources and Life Sciences (BOKU), Institute of Surveying, Remote Sensing & Land Information (IVFL), Peter Jordan Straße 82, 1190 Vienna, Austria
5. EFECTO DE LAS SEQUÍAS SOBRE LA INFLACIÓN EN COLOMBIA, Rodrigo Avella, Banco de la República, Subgerencia de Estudios Económicos, Julio de 2001

6. Francesco Vuolo ; Matteo Mattiuzzi ; Anja Klisch and Clement Atzberger "Data service platform for MODIS Vegetation Indices time series processing at BOKU Vienna: current status and future perspectives ", Proc. SPIE 8538, Earth Resources and Environmental Remote Sensing/GIS Applications III, 85380A (October 25, 2012); doi:10.1117/12.974857; <http://dx.doi.org/10.1117/12.974857>)
7. Gao Bo-Cai , NDWI –A Normalized Difference Index for Remote Sensing of Vegetation Liquid Water from Space, P 258 – 260, Remote Sensing Environment, Elsevier Science Inc. 1996.
8. GISTEMP Team, 2016: GISS Surface Temperature Analysis (GISTEMP). NASA Goddard Institute for Space Studies. Dataset accessed 2016-08-15 at <http://data.giss.nasa.gov/gistemp/>
9. IGAC, Estos son los cinco Pecados que podrían haber desencadenado la tragedia ambiental en Casanare, Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Oficina de Comunicaciones Extensas y Prensa, Bogota, Colombia. P 1-4, 2014.
10. Informe del IGAC 31 de Marzo de 2014. Estos son los 5 “pecados” que podrían haber desencadenado la tragedia ambiental en Casanare. Tomado de:  
<http://www.igac.gov.co/wps/wcm/connect/ef2a84804391398596edf7f9d08ae71d/Estos+son+los+5+pecados.pdf?MOD=AJPERES>
11. ISDR Drought Discussion Group 2003 Drought Living with risk: An integrated approach to reducing societal vulnerability to drought. Geneva, International strategy for disaster reduction.
12. Karnieli, A., Agam, N., Pinker, R.T., Anderson, M., Imhoff, M.L., Gutman, G.G., Panov, N., and Goldberg, A., 2010, Use of NDVI and land surface temperature for drought assessment—Merits and limitations: Journal of Climate, v. 23, no. 3, p. 618-633, at <http://dx.doi.org/10.1175/2009JCLI2900.1>.

13. LA DESERTIFICACIÓN ESA INVISIBLE LÍNEA DE FRENTE, 2014 Convención de las Naciones Unidas de lucha contra la Desertificación. ISBN: 978-92-95043-76-3. Segunda edición. Recuperado de: [http://www.unccd.int/Lists/SiteDocumentLibrary/Publications/NEW\\_Invisible %20Front Line%20 SPA.pdf](http://www.unccd.int/Lists/SiteDocumentLibrary/Publications/NEW_Invisible%20Front%20Line%20SPA.pdf)
14. Municipio de Paz de Ariporo, Plan de Desarrollo del Municipio de Paz de Ariporo, Gestion Empleo y Desarrollo, Unitropico, Oficina de Planeación Municipal, P 11 – 13, 2008.
15. Ruth Mayorga Márquez, Gonzalo Hurtado. IDEAM–METEO/004-2006.LA SEQUÍA EN COLOMBIA-NOTA TÉCNICA DEL IDEAM. Diciembre 2006. Recuperado de: <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21147/NotaT%C3%A9cnicaSequia.pdf/d9ba4965-f7cd-4a2f-a875-2a38b1d6a941>
16. Use of Landsat Land Surface Temperature and Vegetation Indices for Monitoring Drought in the Salt Lake Basin Area, Turkey The Scientific World Journal, Volume 2014 (2014), Article ID 142939, 11 pages. <http://dx.doi.org/10.1155/2014/142939>
17. USGS U.S. Geological Survey (2016). Global Visualization Viewer, Quick Start Guide. Recuperado de <http://glovis.usgs.gov/QuickStart.shtml>
18. VARIABILIDAD CLIMÁTICA DE LA PRECIPITACIÓN EN COLOMBIA ASOCIADA AL CICLO EL NIÑO, LA NIÑA – OSCILACION DEL SUR (ENSO) Arango; C.; Dorado, J; Guzmán D.; Ruíz, J. F. Grupo de Modelamiento de Tiempo, Clima y Escenarios de Cambio Climático Subdirección de Meteorología – IDEAM. Recuperado de: <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21789/Variabilidad+Climatica+Trimestral+Precipitacion+%28Ruiz%2C+Guzman%2C+Arango%2C+Dorado%29.pdf/eec9752d-05ac-43f5-913c-4a3c7adc7860>
19. Walsh, J., D. Wuebbles, K. Hayhoe, J. Kossin, K. Kunkel, G. Stephens, P. Thorne, R. Vose, M. Wehner, J. Willis, D. Anderson, S. Doney, R. Feely,

- P. Hennon, V. Kharin, T. Knutson, F. Landerer, T. Lenton, J. Kennedy, and R. Somerville, 2014: Ch. 2: Our Changing Climate. Climate Change Impacts in the United States: The Third National Climate Assessment, J. M. Melillo, Terese (T.C.) Richmond, and G. W. Yohe, Eds., U.S. Global Change Research Program, 19-67. doi:10.7930/J0KW5CXT
20. Wulder, M.A., et al., The global Landsat archive: Status, consolidation, and direction, *Remote Sensing of Environment*(2015), <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2015.11.032>
21. Vermote, E. F., D. Tanré, et al. (1997). "Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum, 6S: An overview." *Ieee Transactions On Geoscience and Remote Sensing* 35(3): 675-686. <http://dx.doi.org/10.1109/36.581987>
22. USGS U.S Geological Survey (2012) Landsat Ecosystem Disturbance Adaptive Processing System (LEDAPS), Algorithm Description Document. Versión 1.3. Recuperado de: [https://landsat.usgs.gov/sites/default/files/documents/ledaps\\_add.pdf](https://landsat.usgs.gov/sites/default/files/documents/ledaps_add.pdf)
23. Ji, L, Zhang, L, Wylie, B (2009). Analysis of Dynamic Thresholds for the Normalized Difference Water Index. *PHOTOGRAMMETRIC ENGINEERING AND REMOTE SENSING*, 75(11), 1307-1317. ISSN: 0099-1112
24. Rokni, Komeil; Ahmad, Anuar; Selamat, Ali; Hazini, Sharifeh (2014) "Water Feature Extraction and Change Detection Using Multitemporal Landsat Imagery" *Remote Sensing* . Sep2014, Vol. 6 Issue 9, p4173-4189. 17p. DOI: 10.3390/rs6054173
25. Luisa Febrina Amalo, Rahmat Hidayat and Haris (2009). Comparison between remote-sensing-based drought indices in East Java. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 54 (2017) 012009. doi:10.1088/1755-1315/54/1/012009
26. Chuvieco, E. 2008 *Fundamentos de Teledetección Espacial*, segunda edición, P 131 – 134, 156 – 164, Ediciones Rialp S.A. Madrid España

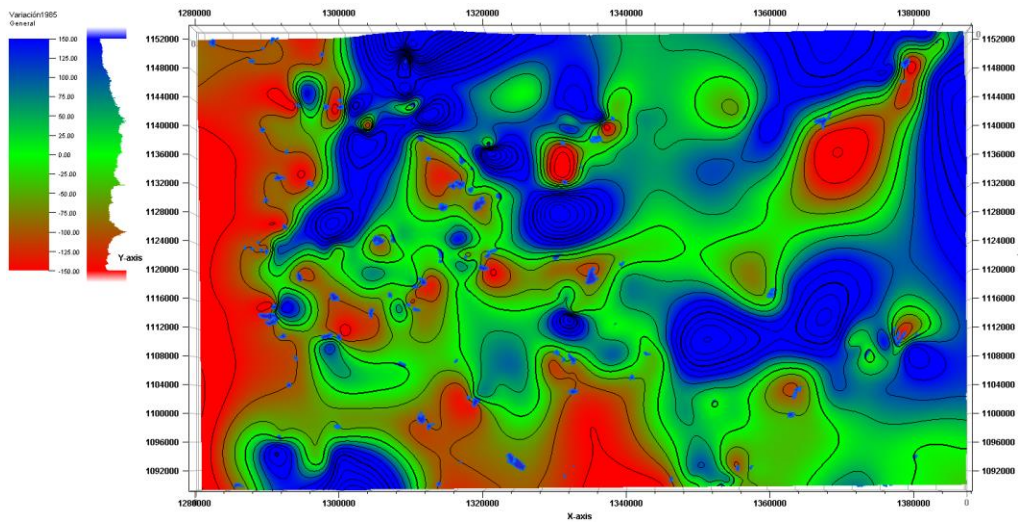
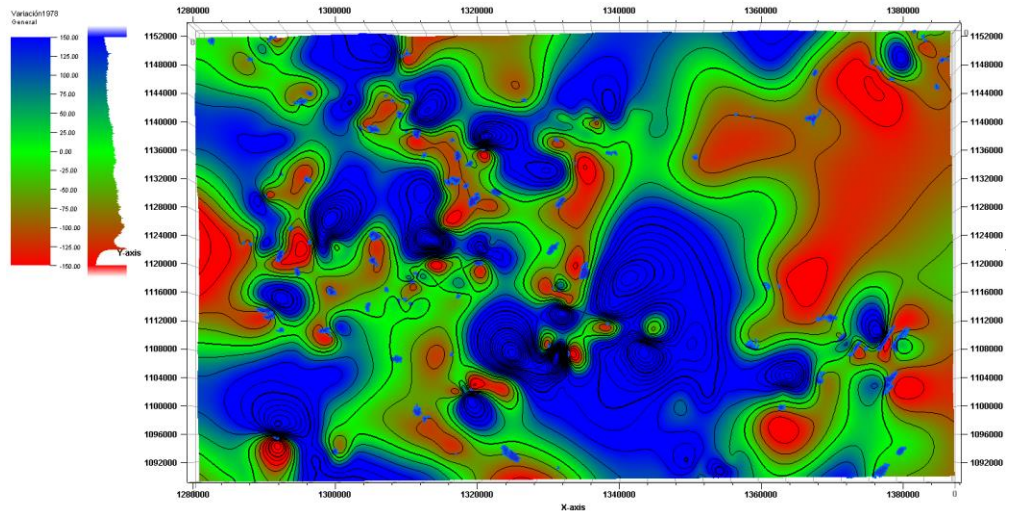


27. Lei Ji, Li Zhang, Wylie Bruce. 2009 Analysis of Dynamic Thresholds for the Normalized Difference Water Index, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, P 1 – 4, California Institute of Technology, Pasadena California, USA
28. Ouma, Y.O, Tateishi R. 2006 A water index for rapid mapping of shoreline changes of five East African Rift Valley lakes, An empirical analysis using Landsat TM and ETM+ data. Int Journal of Remote Sensing 2006, P 27, 3153 – 3181
29. IDEAM, Boletín informativo sobre el monitoreo de los fenómenos de variabilidad climática El Niño Niña, Boletín No.94, mayo 2016, P 1 – 5, Bogota Colombia
30. Huffman, G., Pendergrass, Angeline y Centro Nacional de Investigación Atmosférica Personal (Eds).(Mayo 31 del 2016) "La Guía de datos climáticos: TRMM:. "Tropical Rainfall Measuring Mission". Recuperado de: <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/trmm-tropical-rainfall-measuring-mission>
31. McFeeters S.K (1996) the use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features, International Journal of Remote Sensing. P 1425 – 1432. Olaode, A. Recuperado de: <http://dx.doi.org/10.1080/01431169608948714>
32. Hurtado M Gonzalo. (2012) "SEQUÍA METEOROLÓGICA Y SEQUÍA AGRÍCOLA EN COLOMBIA: INCIDENCIA Y TENDENCIAS". IDEAM. Contrato 223-2012. Recuperado de: <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21138/Sequias+Incidencias+y+Tendencias.pdf/3e72c86c-cf4a-42f9-95f1-07e7cf88861a>
33. Estupiñan Alex Ricardo. (2016). Tesis de Maestría en Ingeniería de Recursos Hidráulicos "Estudio de la variabilidad espacio temporal de la precipitación en Colombia". Universidad Nacional, Facultad de Minas, Escuela de Geociencias y Medio Ambiente. Medellín – 2016. Recuperado de: <http://www.bdigital.unal.edu.co/54014/1/1110490004.2016.pdf>

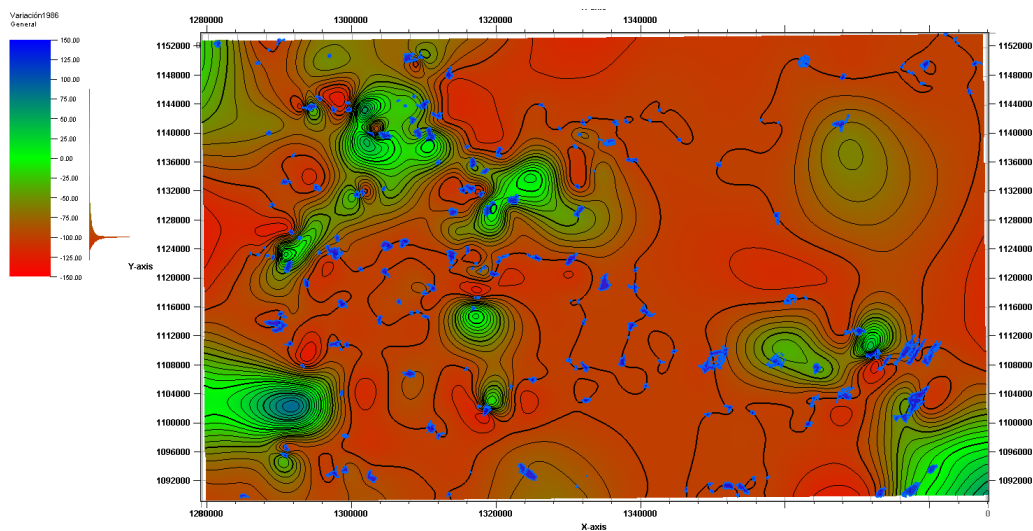
34. U.S Geological Survey (2017). Product Guide “Landsat 8 Surface Reflectance Code (LaSRC) Product Version 3.8. Recuperado de: [https://landsat.usgs.gov/sites/default/files/documents/lasrc\\_product\\_guide.pdf](https://landsat.usgs.gov/sites/default/files/documents/lasrc_product_guide.pdf)
35. Yuanbo Liu, Ping Song, Jian Peng & Chun Ye (2012). “A physical explanation of the variation in threshold for delineating terrestrial water surfaces from multi-temporal images: effects of radiometric correction”. International Journal of Remote Sensing Vol. 33 , Iss. 18,2012. DOI: 10.1080/01431161.2012.675452

# 11 ANEXOS

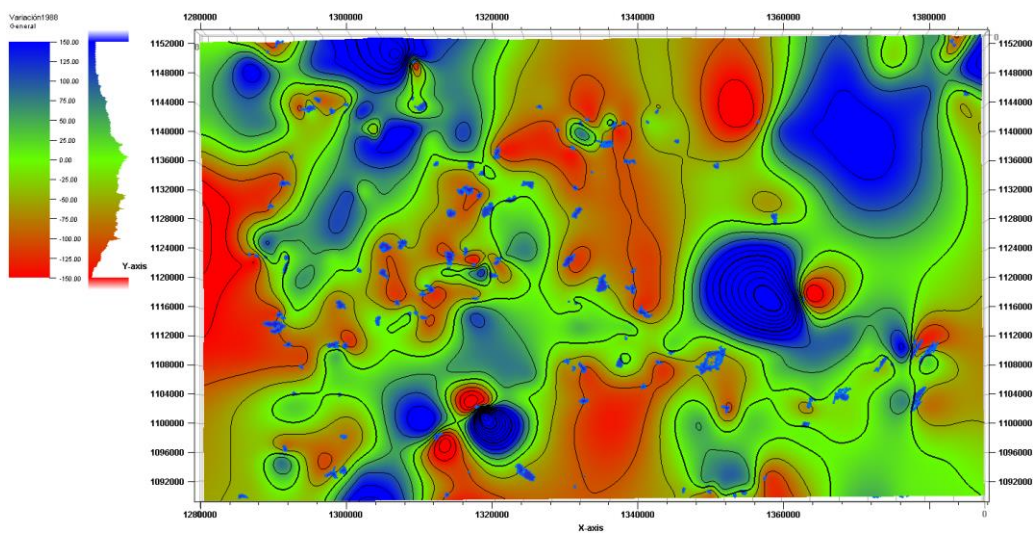
*Ilustración 36 Variación Areal cuerpos de agua 1978*



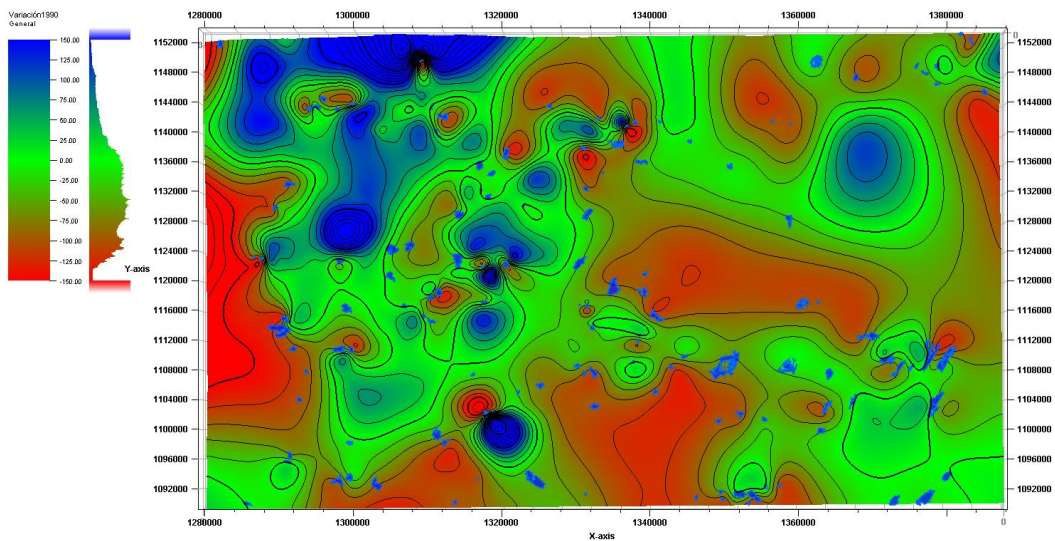
*Ilustración 37 Variación Areal cuerpos de agua 1985*



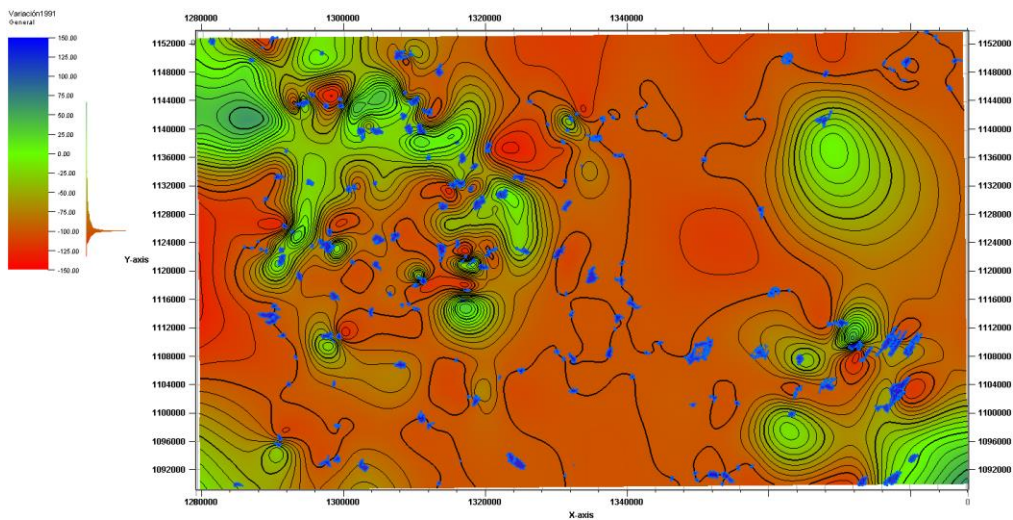
*Ilustración 38 Variación Areal cuerpos de agua 1986*



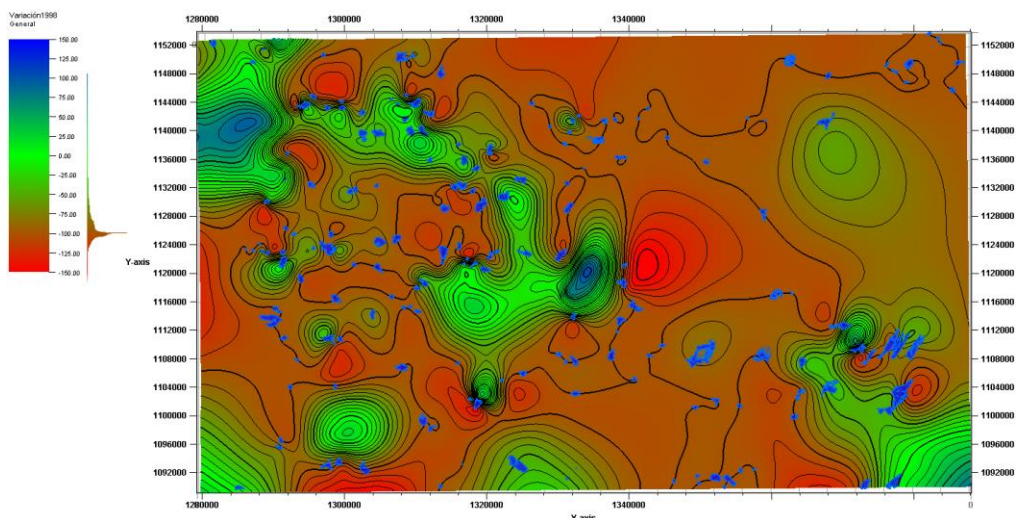
*Ilustración 39 Variación Areal cuerpos de agua 1988*



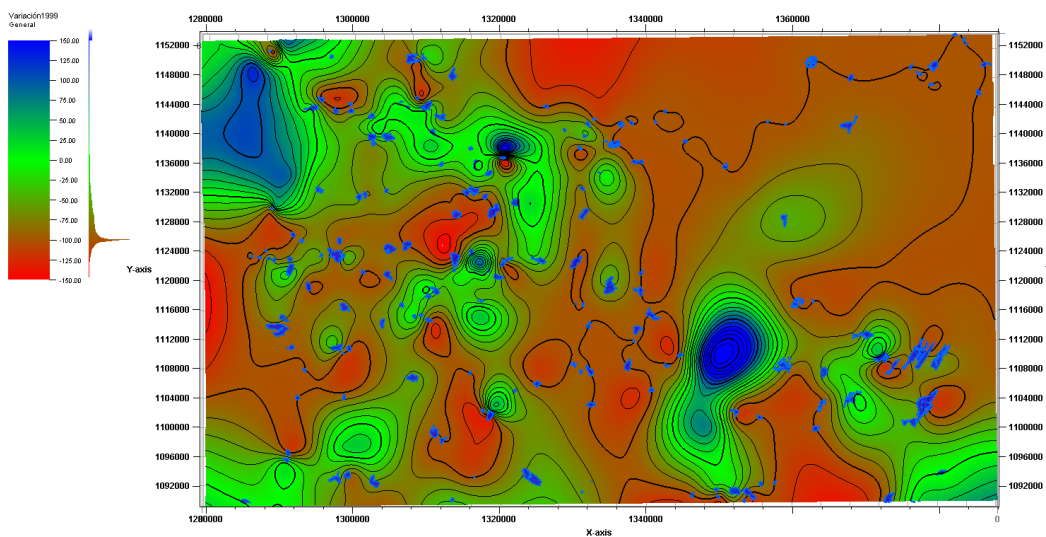
*Ilustración 40 Variación Areal cuerpos de agua 1990*



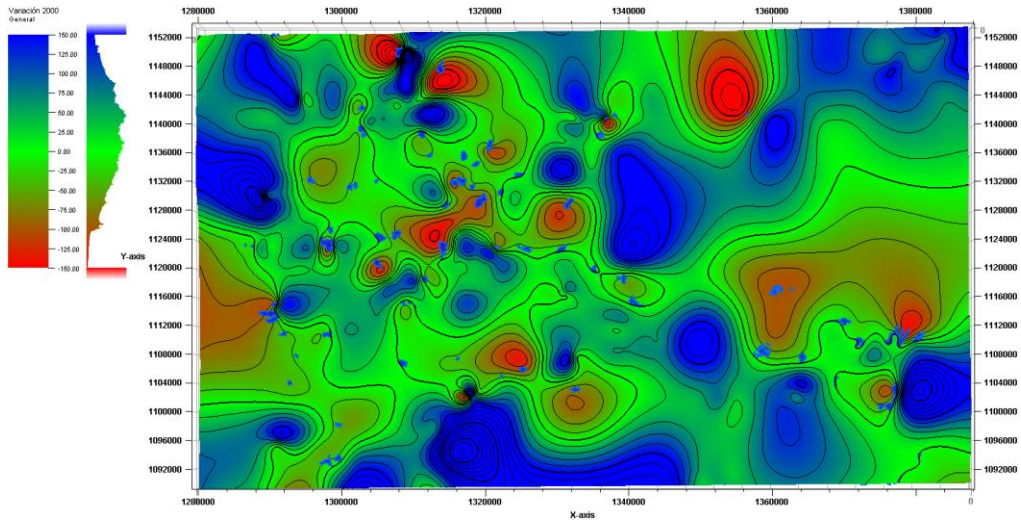
*Ilustración 41 Variación Areal cuerpos de agua 1991*



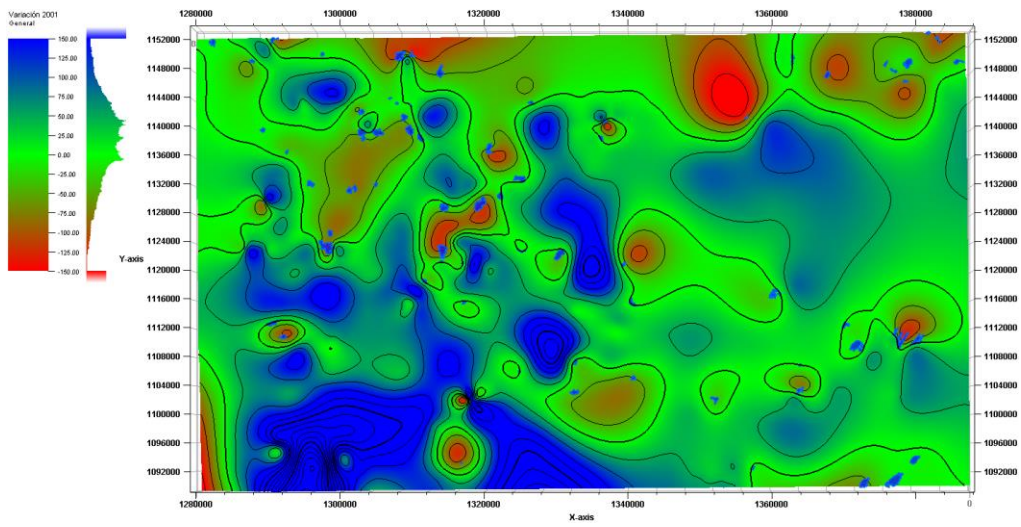
*Ilustración 42 Variación Areal cuerpos de agua 1998*



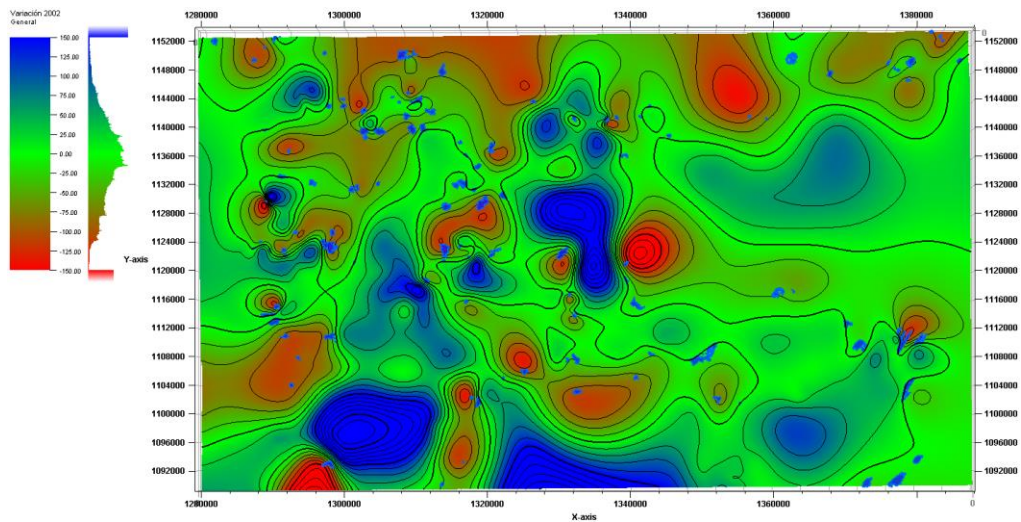
*Ilustración 43 Variación Areal cuerpos de agua 1999*



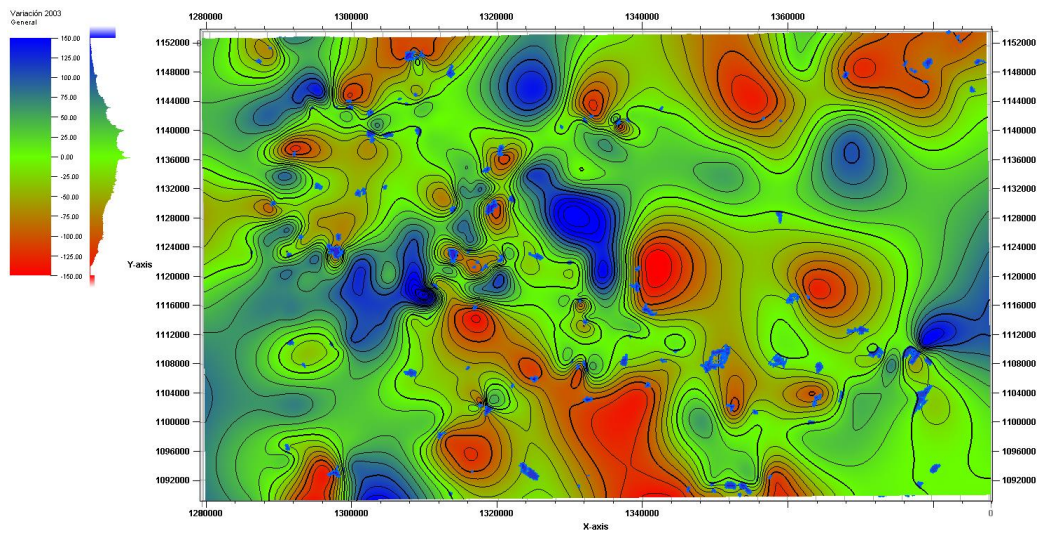
*Ilustración 44 Variación Areal cuerpos de agua 2000*



*Ilustración 45 Variación Areal cuerpos de agua 2001*

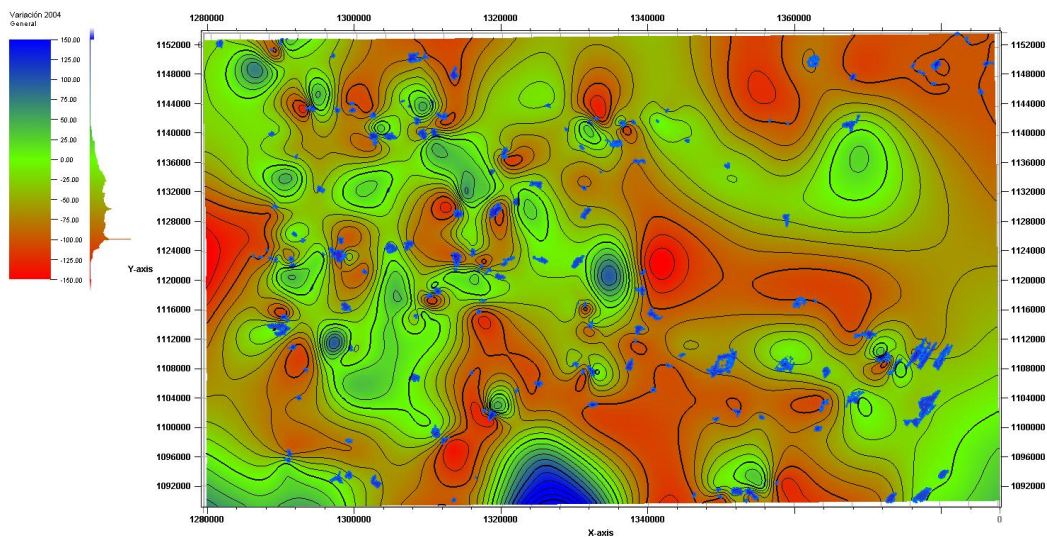


*Ilustración 46 Variación Areal cuerpos de agua 2002*

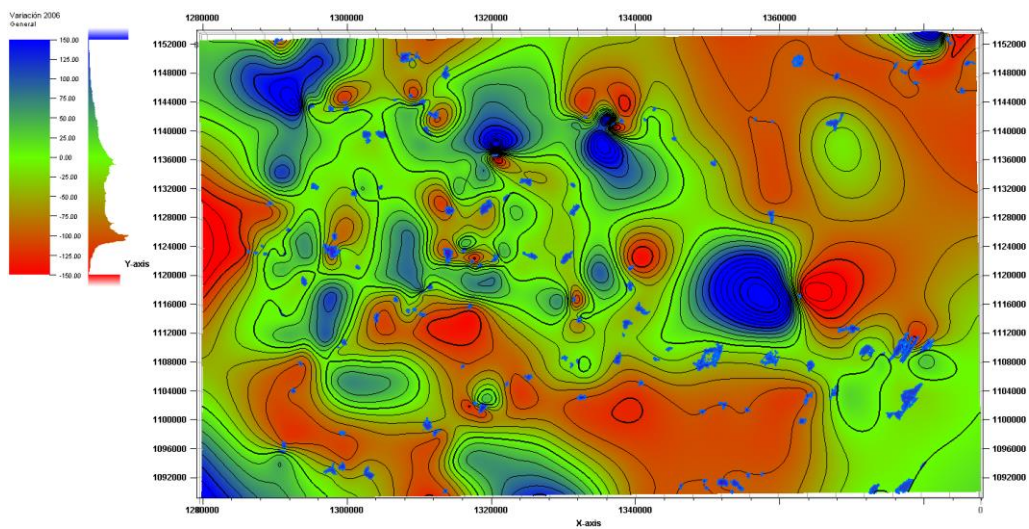


*Ilustración 47 Variación Areal cuerpos de agua 2003*

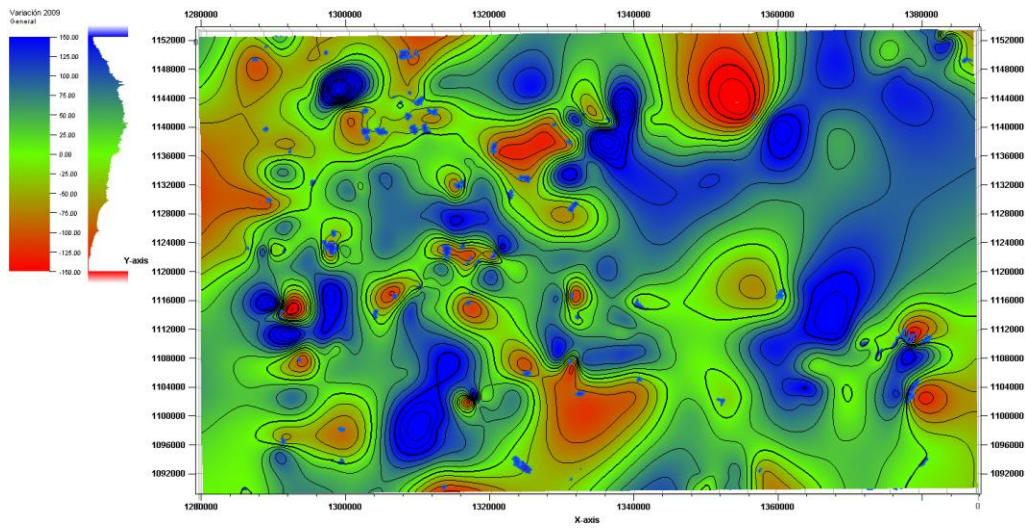




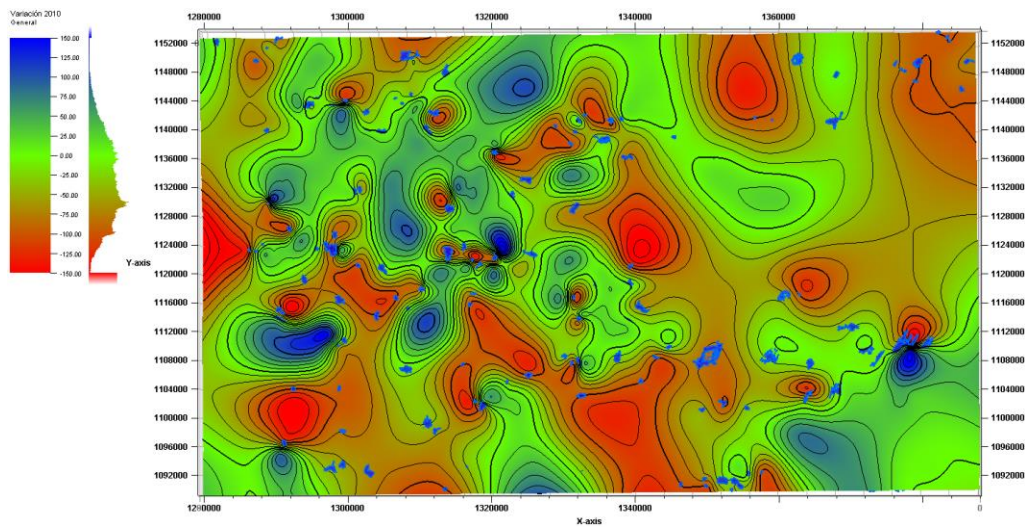
*Ilustración 48 Variación Areal cuerpos de agua 2004*



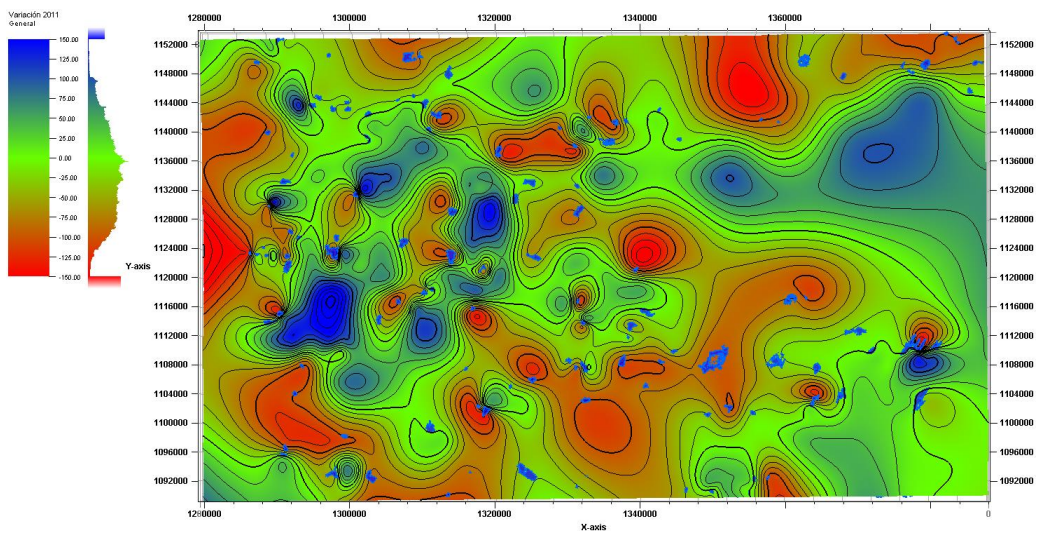
*Ilustración 49 Variación Areal cuerpos de agua 2006*



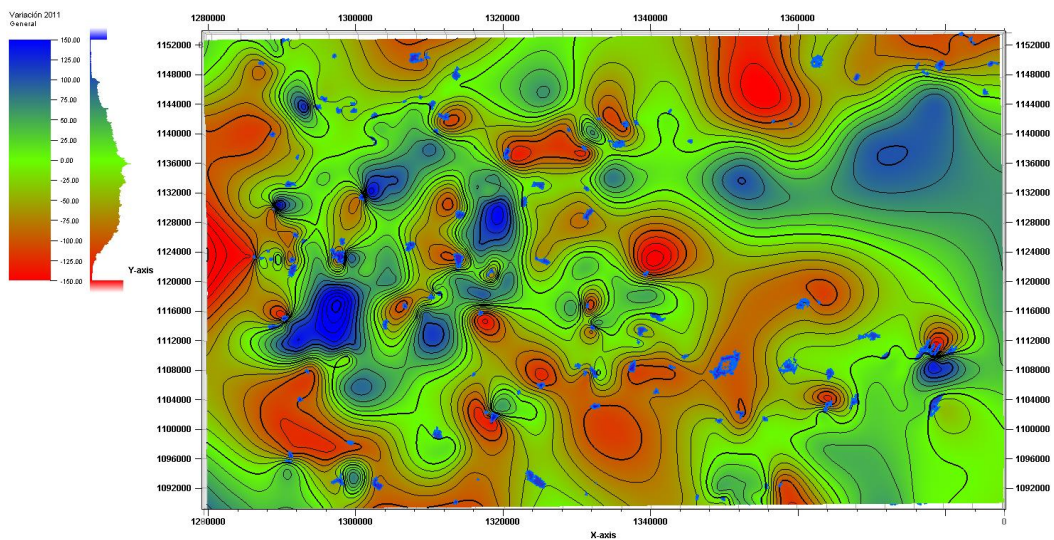
*Ilustración 50 Variación Areal cuerpos de agua 2009*



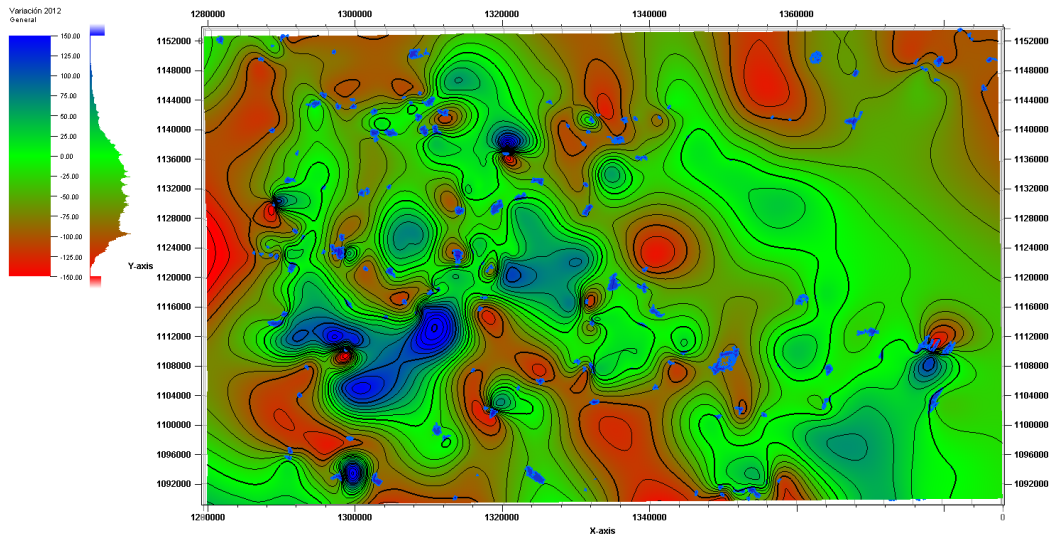
*Ilustración 51 Variación Areal cuerpos de agua 2010*



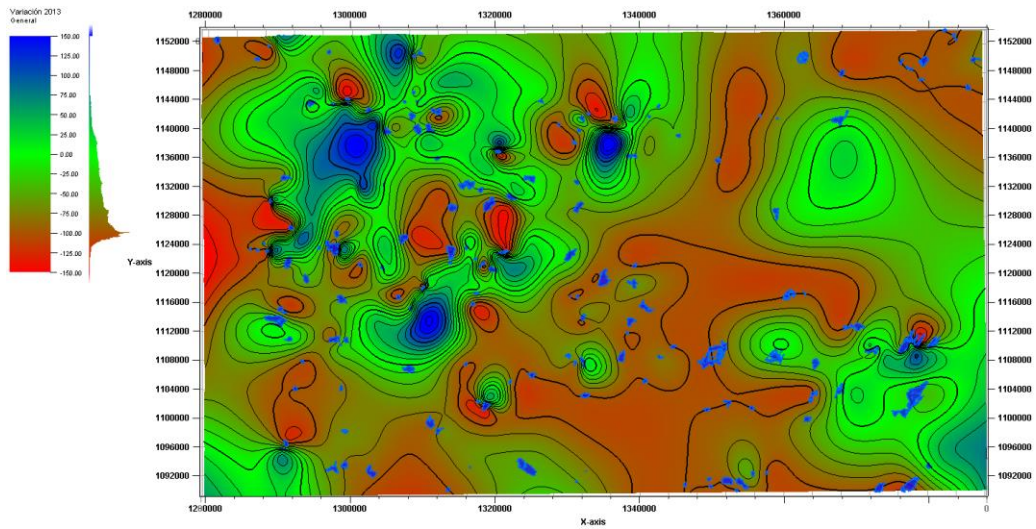
*Ilustración 52 Variación Areal cuerpos de agua 2011*



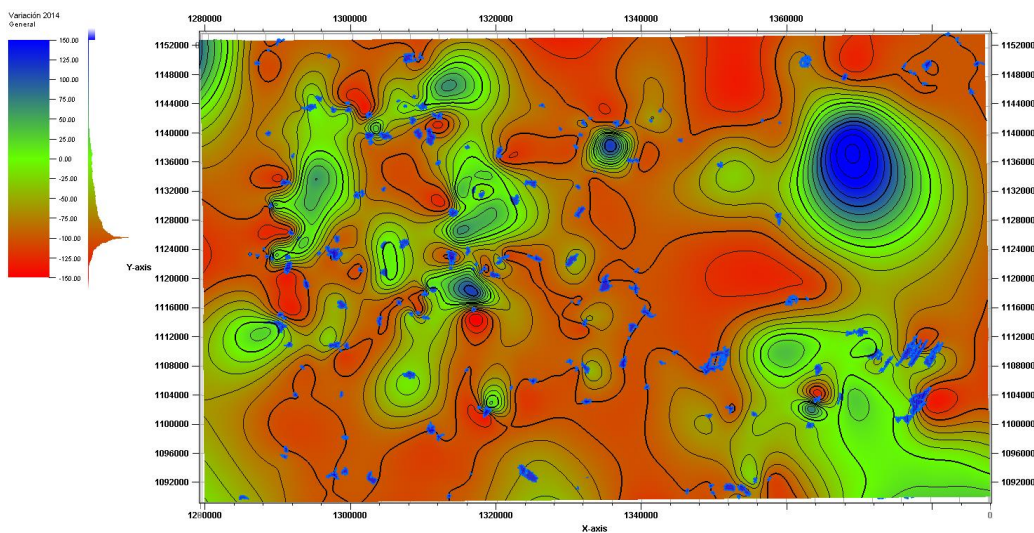
*Ilustración 53 Variación Areal cuerpos de agua 2011*



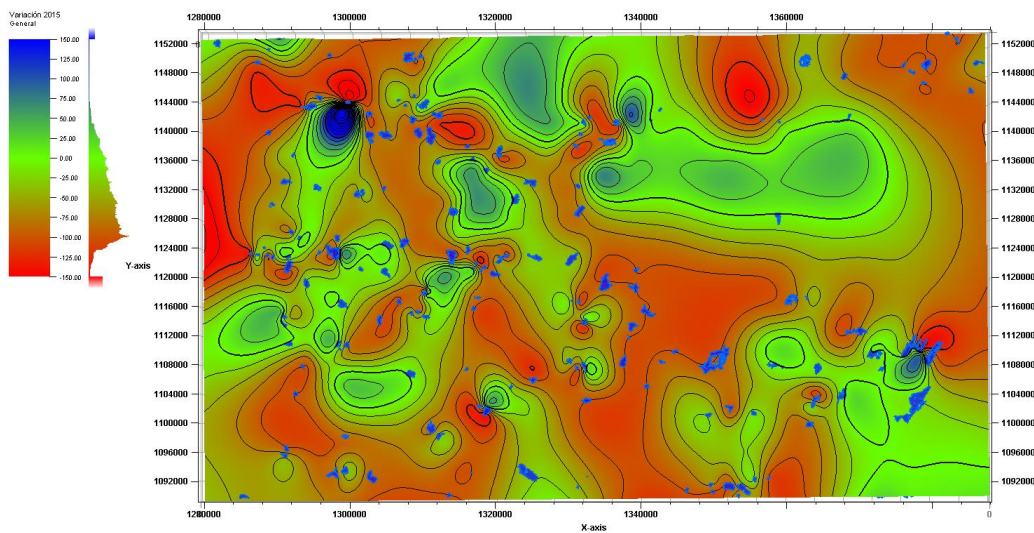
*Ilustración 54 Variación Areal cuerpos de agua 2012*



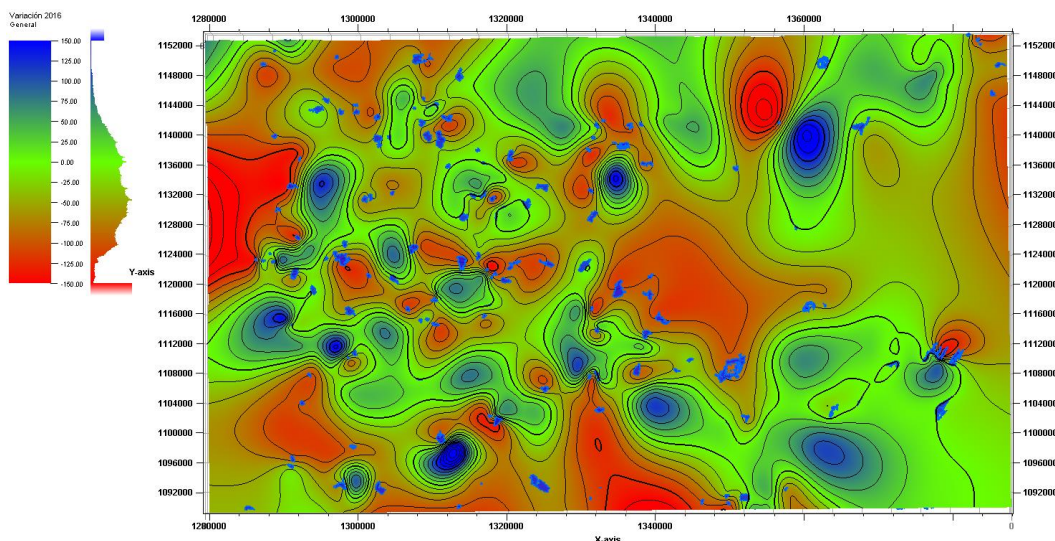
*Ilustración 55 Variación Areal cuerpos de agua 2013*



*Ilustración 56 Variación Areal cuerpos de agua 2014*



*Ilustración 57 Variación Areal cuerpos de agua 2015*



*Ilustración 58 Variación Areal cuerpos de agua 2016*

Tabla con las áreas calculadas año a año de los cuerpos de agua seleccionados. Datos en Hectáreas

ID	1978	1985	1986	1988	1990	1991	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2006	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
1	31.2	16.4	14.0	29.0	35.2	1.4	35.6	32.4	196.9	240.7	187.5	46.8	144.9	112.4	51.1	97.6	49.1	48.9	33.3	29.9	45.3	25.7
2	263.0	380.6	77.4	259.6	232.3	60.8	67.2	57.2	191.2	249.3	236.1	196.7	128.3	149.4	314.2	269.3	205.9	214.4	148.0	105.4	156.6	193.1
3	106.5	159.9	117.3	160.7	122.8	121.4	134.7	167.6	149.5	132.5	125.1	144.1	135.6	140.4	147.8	149.1	151.6	153.6	0.0	175.6	152.0	155.4
4	72.7	164.3	105.1	146.8	145.6	110.3	125.3	133.8	137.3	135.8	127.8	135.5	132.2	136.3	116.5	133.9	161.6	124.2	125.6	26.5	28.7	65.1
5	96.8	112.1	86.8	105.3	111.2	98.9	91.0	103.2	112.8	113.2	110.6	112.3	109.0	110.2	107.4	109.1	108.8	104.7	109.1	101.1	102.9	104.4
6	97.4	132.0	88.7	106.8	98.9	92.3	100.7	90.0	100.7	95.1	94.2	99.8	94.4	90.3	104.1	100.8	102.4	101.7	107.7	96.1	97.0	101.7
7	68.8	65.4	34.1	49.8	69.8	39.6	46.8	50.2	83.7	69.0	65.5	79.7	86.0	67.1	55.7	80.9	63.8	58.5	68.8	61.8	62.3	71.7
8	214.4	194.5	0.4	15.7	13.4	0.4	6.0	134.6	124.7	62.6	41.5	17.6	12.6	25.7	46.2	6.2	1.8	6.3	0.8	0.4	0.5	4.7
9	65.6	113.0	3.6	59.1	71.6	7.0	40.8	63.6	79.6	88.3	88.3	77.3	59.6	68.7	81.0	61.8	67.2	83.7	67.5	76.3	68.5	70.7
10	0.0	91.8	36.5	55.4	68.9	46.2	38.9	39.0	74.2	86.4	82.1	86.9	62.8	72.5	75.5	60.8	38.0	48.6	34.1	2.5	8.1	31.9
11	61.7	70.1	64.4	73.2	68.1	66.0	72.7	69.7	70.3	65.6	66.0	67.5	67.5	69.8	69.4	71.7	71.0	70.5	73.2	75.2	70.5	71.5
12	69.5	108.5	1.7	62.0	3.0	6.0	0.5	10.5	65.4	76.9	64.9	56.4	12.9	13.2	38.5	8.6	4.8	3.2	2.3	0.5	2.8	5.5
13	63.0	83.3	0.0	0.0	46.7	0.0	0.0	0.0	64.2	50.3	17.6	79.5	59.9	45.5	114.6	101.1	84.4	118.0	52.5	31.5	41.9	62.6
14	18.2	1.8	0.7	31.0	9.5	1.4	96.6	22.4	58.1	192.2	183.2	122.2	96.9	99.6	100.1	63.1	67.3	44.3	2.9	1.2	1.8	2.5
15	51.3	58.2	5.9	84.4	76.6	11.7	0.0	24.9	57.2	81.0	63.8	50.5	55.1	66.0	93.3	51.2	68.9	95.9	51.3	47.3	55.2	61.6
16	9.7	0.1	0.0	76.1	15.8	0.0	0.3	0.6	57.2	93.4	89.6	36.3	25.2	13.7	98.5	18.4	28.9	25.1	3.2	0.6	6.1	8.6
17	84.2	68.0	0.0	62.6	35.0	0.0	0.0	24.3	56.9	50.2	53.6	30.0	27.8	0.2	54.1	27.4	53.1	39.1	2.3	2.0	2.2	33.0

18	5.2	21.2	11.9	105.0	60.8	27.2	12.7	4.0	56.8	54.7	55.5	57.7	33.7	26.1	71.4	30.9	53.4	16.2	34.5	80.1	42.7	31.4
19	1.9	56.1	27.7	50.0	52.5	35.6	43.0	60.8	56.3	71.4	61.9	74.0	69.6	74.3	77.4	75.8	75.2	70.9	73.0	63.5	69.6	62.0
20	64.9	151.7	3.8	57.6	34.1	14.2	11.7	16.8	75.9	80.6	75.5	79.3	34.0	61.0	100.5	77.9	96.8	61.4	69.4	29.3	9.3	50.0
21	0.0	31.4	0.0	20.3	13.7	3.1	0.0	0.2	53.7	48.2	50.1	51.3	31.6	36.0	32.8	30.2	34.4	35.2	44.8	26.6	33.6	41.6
22	40.9	90.0	17.9	76.1	65.9	23.5	28.5	34.7	51.5	14.8	13.2	32.2	13.8	43.2	19.5	47.4	46.1	17.8	22.3	1.7	1.4	11.8
23	30.5	0.0	0.4	1.7	2.3	1.6	27.6	43.8	51.4	44.1	24.3	44.1	33.8	46.8	37.8	39.0	19.6	18.4	11.6	1.0	10.4	0.0
24	52.6	17.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	50.9	42.7	28.3	42.2	30.2	39.8	53.4	39.8	31.5	38.0	36.0	17.1	33.9	41.7
26	31.8	67.7	26.9	33.8	40.7	30.2	30.2	33.6	45.9	46.4	46.2	44.0	38.7	36.6	45.9	30.5	38.3	34.5	34.7	36.4	28.5	32.9
27	37.0	32.3	0.0	22.1	19.1	0.0	0.0	14.3	45.3	45.5	43.3	27.5	18.0	7.7	43.7	33.7	38.0	36.3	18.9	10.1	27.6	29.4
28	10.4	99.4	27.8	75.4	47.9	25.0	18.0	21.9	45.0	19.4	17.6	31.7	27.4	30.6	20.6	32.0	39.3	27.0	29.8	12.5	7.7	35.4
29	192.1	117.0	10.6	120.4	72.1	16.2	3.6	9.8	44.4	60.0	58.8	47.7	18.5	23.3	50.2	31.3	46.1	49.1	22.3	9.8	33.2	50.4
31	66.9	0.0	0.0	39.0	24.8	0.0	0.0	0.0	42.3	19.2	16.9	3.4	0.0	0.0	37.1	0.5	6.4	1.0	0.0	0.0	0.0	26.7
32	11.7	15.6	0.0	10.4	53.8	10.0	9.2	9.4	66.1	105.7	123.8	106.8	61.2	91.5	130.9	100.1	97.1	106.8	89.7	72.3	68.7	128.4
33	13.6	0.0	0.1	50.4	40.8	4.4	0.0	0.0	41.8	50.9	36.1	49.1	34.2	26.1	49.0	16.2	49.6	45.6	17.8	0.0	24.4	31.9
34	0.0	0.5	0.0	7.5	21.6	2.3	0.5	6.1	41.8	72.8	27.9	51.7	13.4	49.8	72.2	6.8	71.6	27.2	11.2	12.2	23.9	14.0
35	85.7	50.5	0.0	25.3	29.4	0.0	0.0	0.0	41.8	38.3	28.3	20.4	4.1	12.3	55.0	19.4	0.4	29.0	2.4	0.0	0.5	3.7
36	0.0	75.3	1.3	60.4	45.0	20.3	15.4	16.6	59.6	66.0	55.8	55.3	41.3	52.7	149.3	134.2	121.7	114.9	105.8	36.4	108.2	108.6
37	66.9	50.4	2.6	43.4	28.5	1.7	4.0	6.3	40.0	12.8	24.7	32.0	10.5	29.6	40.0	45.6	44.4	42.5	0.0	33.9	35.7	36.3
38	13.0	25.5	0.0	0.7	9.2	0.0	0.0	0.0	39.6	22.3	15.3	21.6	3.7	33.0	41.2	3.2	18.0	9.8	12.6	3.2	19.5	3.0
39	8.4	0.4	0.0	22.1	40.7	7.8	13.1	13.3	39.3	46.7	47.3	44.1	19.3	38.9	46.1	40.6	38.7	39.7	21.5	5.0	4.6	8.1
40	20.8	0.0	0.0	23.7	27.3	0.0	5.7	7.0	39.2	42.0	41.9	50.5	28.6	0.0	20.2	0.0	14.7	27.9	30.1	0.1	0.3	40.9
41	24.7	0.0	18.5	31.3	0.0	23.4	15.4	35.4	37.6	27.8	24.7	35.4	23.8	37.4	37.9	28.7	32.2	20.9	0.0	39.5	25.3	41.9
43	6.5	8.1	0.0	15.3	10.4	9.9	0.0	0.0	34.7	25.9	29.6	15.9	4.3	1.6	28.1	22.0	17.6	21.9	5.0	11.8	3.2	28.1
44	100.7	44.9	0.0	30.7	8.1	0.0	0.0	0.0	33.9	35.6	33.2	15.9	5.1	2.3	41.0	16.7	28.6	16.2	4.9	2.1	7.7	29.2
45	49.4	61.5	0.0	29.0	16.7	0.0	0.0	0.0	33.4	20.5	18.3	21.6	4.1	0.6	32.3	11.0	11.8	5.8	5.1	4.5	11.0	17.5
46	5.2	20.9	0.8	19.2	17.6	16.8	17.3	17.6	33.3	53.6	19.5	43.4	64.8	58.2	78.3	69.5	70.8	67.5	9.2	17.7	42.1	70.8
47	22.7	4.1	1.5	11.1	19.9	11.6	17.6	19.6	32.8	28.4	30.3	28.9	26.9	39.0	20.2	20.9	28.1	24.1	23.1	10.5	9.0	11.5
49	70.3	30.2	3.6	42.8	27.1	1.9	0.2	0.9	31.9	34.2	33.2	27.5	18.8	22.2	41.4	24.7	28.8	27.9	28.9	10.3	28.4	33.0
50	63.0	54.5	0.0	58.1	57.8	24.7	26.9	25.5	30.2	39.5	42.2	32.0	34.7	31.0	64.1	30.3	17.0	61.7	49.4	0.0	27.5	1.4
51	0.0	120.9	0.0	51.8	1.4	0.1	0.0	7.5	28.9	32.8	32.5	15.1	2.3	2.4	79.6	18.4	22.1	19.8	0.4	22.5	0.0	33.7
52	44.2	125.5	22.9	58.0	37.2	7.1	0.4	19.2	28.6	52.7	56.5	40.4	33.4	30.2	102.1	37.7	32.1	53.1	35.7	55.4	46.8	68.0
53	74.7	17.0	0.0	18.8	20.3	0.0	0.4	0.5	27.6	23.4	16.7	21.2	4.5	9.0	29.3	17.3	7.6	16.2	1.4	0.2	1.3	5.8
54	44.2	43.6	0.9	14.4	0.5	0.0	0.4	4.2	27.5	20.6	5.8	9.7	0.4	0.7	3.6	0.5	0.6	0.2	1.1	0.0	0.0	0.3
55	0.0	16.8	0.7	4.6	5.3	0.0	0.0	0.0	27.4	13.2	7.3	6.6	6.4	6.5	3.2	10.8	6.4	7.0	5.7	0.0	6.4	7.8
56	75.3	73.1	30.2	23.4	56.3	3.9	12.2	28.6	27.1	25.4	31.4	56.2	20.9	15.6	9.4	11.3	24.6	16.3	25.1	12.7	12.7	16.5
58	39.6	1.5	0.0	58.2	38.6	1.3	0.1	1.3	25.5	34.5	9.4	6.2	1.4	2.3	17.7	5.3	1.2	1.7	1.0	0.2	0.7	1.4
59	11.7	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	14.5	49.8	195.7	147.4	214.5	136.3	154.5	245.7	208.0	189.8	147.3	125.9	147.1	181.1	233.1
60	73.4	56.3	18.4	49.3	28.2	19.0	16.4	16.4	25.3	33.1	33.6	28.8	22.6	24.4	41.1	27.4	25.8	28.3	20.5	22.6	26.6	35.0
61	3.2	40.5	0.0	26.8	1.4	0.0	0.0	0.0	24.8	0.7	4.4	0.3	0.0	0.0	26.1	10.8	3.7	4.3	0.0	0.1	3.2	15.6
63	42.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	14.7	17.7	23.7	29.9	27.1	29.4	16.5	27.9	33.3	34.7	28.8	28.8	31.3	25.3	32.8	37.4

64	0.0	26.9	0.0	24.5	14.4	0.0	0.0	0.0	22.9	6.6	8.4	3.1	0.0	0.5	6.4	2.0	3.5	0.2	1.7	0.0	3.2	2.9
65	0.6	0.0	2.0	10.4	20.6	9.3	9.2	16.8	22.7	23.4	21.2	23.5	18.2	13.3	13.1	13.8	19.7	16.7	34.7	18.2	1.4	10.9
67	34.4	28.4	0.3	7.6	24.1	0.6	0.2	10.8	22.1	20.8	14.9	16.5	7.5	14.6	10.6	9.0	20.2	15.3	13.3	6.4	4.3	6.8
68	7.8	6.8	0.5	1.0	10.5	1.1	0.0	6.8	21.5	20.8	22.8	22.3	13.6	4.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
70	13.0	30.3	10.5	23.7	22.9	12.2	10.2	17.6	19.4	27.5	22.3	15.8	24.0	41.9	31.3	35.1	37.2	27.3	31.9	29.3	24.5	28.8
71	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.0	0.0	0.0	22.8	27.3	26.2	5.3	1.0	2.0	35.8	6.0	14.6	13.0	3.2	0.1	7.7	32.3
72	72.1	50.0	0.0	21.2	19.4	0.0	0.0	0.2	19.2	80.7	67.6	83.7	17.2	77.4	80.8	82.3	29.3	73.6	11.6	31.7	16.7	23.9
73	35.7	92.8	32.5	55.2	49.6	23.2	15.5	12.7	22.5	14.9	10.6	16.0	7.8	21.5	9.7	30.6	27.1	14.4	55.8	6.8	4.5	16.9
74	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
75	38.3	11.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6	18.9	7.3	3.5	0.0	0.0	0.0	8.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6	4.4
76	23.4	0.3	0.0	1.4	2.0	0.0	0.0	0.0	18.5	20.3	18.4	22.9	12.1	10.6	25.3	9.5	22.9	22.5	9.0	1.0	4.3	10.8
77	0.0	20.0	0.0	11.9	4.3	0.0	0.0	0.0	18.3	5.7	6.3	0.3	0.0	0.5	15.0	1.3	6.1	3.1	0.0	0.0	0.7	12.1
78	1.3	23.8	0.0	7.1	10.2	0.0	0.1	0.0	18.1	21.1	16.9	17.0	9.0	6.8	23.0	12.8	20.9	12.6	0.4	6.8	15.8	6.5
79	3.2	0.0	0.8	16.2	19.0	5.9	6.4	12.2	17.9	4.6	0.0	3.9	10.1	13.4	0.3	0.5	2.2	0.0	0.5	0.0	0.0	0.3
80	20.1	0.5	0.0	0.0	1.2	0.0	0.0	1.3	16.7	14.0	9.3	10.0	1.4	5.9	16.3	10.3	5.1	1.8	3.8	1.1	2.4	0.7
81	24.7	0.0	0.0	3.8	0.5	0.0	0.0	0.0	16.7	11.2	9.5	2.5	0.1	0.0	18.4	4.4	6.9	7.0	0.0	11.8	5.0	7.5
82	5.8	9.4	7.2	13.5	15.9	8.3	9.6	10.0	16.3	7.5	4.8	0.0	0.0	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	3.1
83	20.1	0.0	0.0	17.9	17.0	0.0	0.0	0.0	16.2	17.6	15.2	18.5	11.0	10.6	19.7	1.4	3.3	3.6	0.7	0.2	3.9	0.0
84	17.5	25.7	14.4	11.3	19.0	8.1	0.1	3.5	15.9	16.0	4.2	11.2	4.8	12.5	12.2	15.3	3.1	15.4	16.7	10.6	11.9	18.0
85	0.0	17.5	4.8	17.3	17.6	10.1	9.6	12.9	15.7	14.6	11.3	15.4	14.8	18.0	16.7	16.9	18.6	21.3	0.0	16.4	13.6	16.0
87	2.6	0.0	0.0	1.1	2.3	0.0	2.8	6.8	15.1	12.3	13.0	3.7	3.0	1.5	1.2	9.8	10.8	8.4	5.6	5.1	2.4	1.2
89	0.0	0.1	0.0	0.0	56.0	25.4	12.3	14.2	14.8	84.4	43.7	70.4	64.6	57.7	53.9	76.9	77.3	50.7	29.9	54.4	75.9	58.2
90	16.9	0.0	0.0	14.0	10.3	0.0	0.0	2.3	14.8	14.6	13.6	11.6	11.9	0.1	14.0	9.7	10.3	11.9	4.2	6.7	7.2	13.1
91	15.6	11.6	0.0	7.9	5.3	0.0	0.0	1.3	14.2	11.5	10.9	8.4	2.6	7.7	11.4	7.0	4.8	8.0	0.0	0.0	0.0	5.9
92	0.0	24.3	4.4	12.1	9.1	4.1	1.4	6.8	13.9	18.9	13.3	10.7	7.0	8.8	13.5	11.5	8.5	6.8	10.0	0.9	3.6	5.4
93	20.1	0.0	1.6	8.7	14.9	2.5	4.5	2.1	13.8	10.8	3.2	7.4	1.1	6.0	11.3	10.8	5.8	1.8	9.1	4.2	22.8	1.6
94	2.6	12.3	6.8	14.7	11.5	2.5	10.4	11.0	13.7	14.8	12.8	13.0	11.9	12.1	13.1	12.8	11.7	12.6	11.8	9.4	11.5	12.1
95	90.9	25.2	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	13.7	15.8	12.5	4.0	0.7	8.8	14.8	6.5	14.9	10.3	0.9	0.0	0.0	0.0
96	0.0	18.0	0.0	7.9	4.2	0.0	0.0	0.0	13.1	4.4	2.7	0.0	0.0	0.0	10.3	1.7	3.2	0.0	0.0	0.0	0.0	8.0
97	11.0	0.1	0.0	3.0	0.0	0.0	0.0	0.0	13.1	8.5	10.4	0.0	0.1	0.0	8.7	0.0	3.0	0.1	0.0	0.0	0.1	0.1
98	0.0	20.5	0.2	0.7	1.6	0.5	0.0	0.1	13.0	18.5	18.5	19.1	11.1	12.9	12.6	9.3	6.8	2.3	11.8	6.2	1.9	4.6
99	18.8	0.0	2.6	12.2	18.3	11.6	13.6	16.1	12.7	8.2	8.7	13.4	6.9	11.4	4.4	4.7	0.8	0.3	10.1	2.3	0.2	1.7
100	10.4	53.3	2.0	11.5	11.5	0.4	0.9	3.2	12.6	44.1	36.9	22.0	10.1	3.1	15.6	7.0	26.0	40.8	3.0	0.4	9.2	28.8
101	13.6	10.2	2.1	15.8	25.7	6.8	5.1	8.5	12.4	23.0	19.1	2.9	5.1	7.1	8.1	3.7	2.8	2.3	0.4	0.2	0.2	0.6
102	18.8	13.1	0.0	11.1	0.0	0.2	0.0	12.2	12.4	11.3	9.6	11.7	1.4	0.0	11.6	4.2	5.3	8.2	0.0	3.3	6.2	9.5
103	2.6	2.0	0.0	0.5	1.6	0.0	1.4	4.8	12.4	18.4	18.6	21.6	0.0	6.6	8.5	3.5	4.6	5.6	6.7	2.8	4.9	3.3
104	0.6	27.7	0.0	6.0	0.6	0.0	0.0	0.0	12.2	8.1	6.8	4.8	0.0	0.0	10.9	0.4	6.1	0.0	0.0	0.0	0.5	0.5
105	24.0	0.0	0.0	4.8	1.6	0.0	0.0	0.0	12.2	2.3	5.7	0.5	0.1	0.2	11.9	0.0	0.0	4.6	0.2	0.5	0.2	4.2
106	22.1	11.7	0.0	11.1	5.7	0.0	0.0	0.0	12.2	11.6	9.8	7.8	2.5	0.0	11.0	6.0	7.7	8.0	0.0	5.2	7.6	11.1
107	20.8	0.7	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	12.1	10.1	3.4	2.4	2.1	2.2	0.5	0.7	6.5	7.8	7.6	2.8	2.3	0.5



108	22.1	4.3	0.0	1.0	1.9	0.0	0.0	0.0	11.9	17.4	7.0	3.6	0.7	0.5	2.0	0.2	0.5	0.5	0.1	0.0	0.2	0.5
109	13.0	12.2	0.0	4.8	7.4	0.0	0.0	0.0	11.8	9.6	8.1	10.1	6.6	6.4	9.9	8.0	7.6	8.5	4.7	0.4	9.3	11.5
110	0.6	0.0	0.0	11.1	3.6	0.0	0.0	0.0	11.7	1.0	1.6	0.0	0.0	0.0	11.6	0.0	7.6	2.0	0.0	0.0	0.0	6.1
113	16.2	7.8	0.3	2.3	3.6	0.2	0.1	0.1	11.3	13.3	25.4	18.0	6.3	36.2	39.7	9.7	6.5	0.9	29.9	24.7	2.7	3.6
114	4.5	2.9	0.0	2.6	2.8	0.0	0.0	0.1	11.2	23.4	7.3	6.7	3.5	4.8	12.7	4.1	3.9	4.6	2.1	0.5	3.1	11.1
115	0.0	0.0	0.0	0.0	20.8	0.0	20.9	23.7	10.7	4.1	14.3	21.6	15.4	1.4	21.2	3.2	13.7	1.6	22.7	0.0	22.0	21.9
116	1.3	14.1	0.7	17.8	17.0	10.2	4.7	9.1	10.5	12.3	9.5	11.0	10.9	17.3	10.7	15.1	10.6	12.2	11.9	8.9	1.0	9.1
117	17.5	3.7	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	10.5	3.6	0.0	0.4	0.0	0.6	7.7	0.0	0.4	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
118	0.0	10.2	0.9	9.0	8.8	2.3	2.2	2.4	10.4	9.1	10.4	9.3	5.9	7.7	9.1	5.5	7.3	3.6	4.8	1.8	1.5	4.0
119	10.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.2	9.9	11.3	4.0	5.6	0.3	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
120	11.0	22.6	0.0	8.5	18.5	0.0	0.0	0.0	15.2	14.6	10.3	9.8	6.2	23.9	8.7	1.1	0.5	0.1	0.7	0.1	2.5	0.6
121	8.4	9.3	0.0	6.2	8.7	0.0	0.0	0.0	9.6	8.8	7.3	15.5	0.8	5.6	9.1	0.0	9.3	0.1	0.0	0.0	5.9	0.3
122	0.0	10.6	5.0	7.4	6.0	6.4	5.9	6.1	9.3	6.2	5.9	6.2	5.9	7.1	6.1	5.7	6.9	5.2	5.7	5.5	2.5	5.5
123	41.6	33.2	7.7	24.2	25.9	4.8	4.1	5.0	9.1	4.7	7.7	6.9	15.2	9.5	22.1	12.4	7.9	4.5	15.9	6.7	5.0	4.1
124	0.0	13.1	0.0	0.0	14.0	0.8	0.1	0.6	8.9	24.7	16.0	26.7	17.8	17.3	28.2	24.5	24.7	16.5	8.9	13.0	25.5	0.0
125	26.6	7.7	0.0	10.0	19.1	0.7	1.2	3.4	8.9	17.5	8.3	12.4	4.2	12.5	19.2	22.3	14.2	12.5	1.8	0.5	0.6	0.0
126	10.4	8.6	0.0	3.3	6.6	0.0	0.0	0.0	8.8	6.5	5.9	5.7	3.6	4.8	7.7	6.6	5.8	4.9	5.1	1.5	5.3	7.3
127	0.6	0.0	0.0	25.8	24.8	14.9	0.0	10.9	8.3	14.1	16.3	17.3	11.9	17.8	19.4	24.6	21.8	19.8	33.5	29.3	16.9	40.9
128	16.9	8.6	0.0	6.7	1.9	0.0	0.1	3.0	8.3	7.6	7.1	5.0	3.4	0.0	7.5	1.4	6.9	4.1	0.2	0.0	1.4	2.8
129	2.6	6.2	0.0	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0	8.2	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	2.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
130	1.3	0.0	0.4	0.5	0.8	0.5	0.3	2.8	7.9	5.0	4.9	5.0	0.0	7.4	3.2	4.1	6.0	2.3	3.6	1.7	0.4	2.6
131	3.2	5.7	0.2	6.5	7.6	5.5	4.7	6.8	7.9	8.5	7.4	8.6	7.6	8.6	9.5	8.8	8.7	8.8	7.9	8.1	9.0	9.3
132	5.2	11.1	1.7	2.6	4.4	0.9	0.1	0.0	7.8	2.8	0.5	1.5	3.2	0.0	1.3	1.9	2.2	0.5	2.1	1.5	1.3	1.2
133	27.9	33.5	14.4	22.3	24.3	14.2	3.2	6.8	7.8	7.1	2.3	8.7	3.6	11.4	5.6	6.8	10.5	6.9	8.6	0.7	0.0	2.5
134	8.4	10.3	0.0	7.1	10.4	4.1	3.9	2.6	7.8	9.6	5.4	6.8	7.1	9.7	16.1	6.7	8.3	6.0	5.7	1.6	5.8	4.8
135	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	7.8	10.2	8.6	7.4	4.2	8.3	1.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
136	14.3	0.0	2.3	12.7	14.0	4.9	0.0	5.0	7.7	5.0	3.0	6.4	3.1	11.3	2.6	6.7	3.8	0.7	2.6	1.1	0.1	0.2
137	0.6	9.5	4.3	8.6	8.7	5.5	1.1	1.4	7.7	6.6	1.3	3.8	4.3	8.3	7.1	7.2	5.7	5.8	9.0	6.1	5.6	7.1
138	0.6	9.2	0.0	4.1	0.6	0.0	0.0	0.0	7.7	0.5	0.5	0.1	0.0	8.4	6.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	1.9
139	68.2	16.6	0.0	1.2	0.5	0.0	0.0	0.3	7.6	18.5	14.0	2.8	3.1	11.0	20.3	12.1	17.4	7.7	3.9	0.0	0.0	0.7
140	8.4	0.0	0.8	4.6	8.8	0.3	1.3	2.0	7.3	9.8	7.7	6.9	0.9	4.0	9.2	6.1	2.8	1.3	0.0	0.0	0.3	2.6
141	7.1	9.4	0.8	6.6	7.3	1.7	0.5	2.3	7.2	5.9	5.8	5.5	4.8	5.9	5.3	1.5	5.6	0.6	1.3	0.1	1.9	2.6
142	3.2	9.1	0.0	2.2	1.4	0.0	0.0	0.0	7.7	6.2	2.3	14.6	5.7	10.2	13.9	11.3	9.4	3.5	5.3	1.0	11.0	10.2
143	61.1	27.3	0.0	0.2	0.3	0.0	4.4	24.6	7.0	6.5	4.8	6.1	5.4	35.3	1.4	12.5	0.2	26.4	18.0	2.4	4.5	5.4
144	28.6	14.1	0.0	4.2	1.1	0.0	0.9	4.9	7.0	64.4	1.9	1.3	8.2	5.6	11.7	5.3	5.1	4.9	3.2	0.0	1.4	4.7
145	12.3	5.6	0.0	1.8	0.0	0.0	0.0	0.0	7.0	7.7	7.3	2.2	0.3	0.0	5.2	0.0	4.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3
146	13.6	0.0	1.0	7.0	9.3	0.9	0.2	1.5	6.9	8.1	6.6	7.5	4.0	5.9	6.3	6.9	6.1	0.8	7.1	4.5	1.9	7.7
147	7.1	5.8	0.0	4.3	2.5	0.0	6.5	0.0	6.8	6.4	3.6	4.1	1.8	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
148	8.4	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.4	6.7	0.7	0.2	9.6	0.0	13.1	31.8	20.9	21.6	18.5	9.3	5.9	9.5	14.4
149	10.4	4.1	0.0	3.2	0.1	0.0	0.0	0.0	6.7	7.2	6.9	2.2	1.5	0.0	7.4	2.9	5.9	2.5	0.0	1.4	1.6	6.1

150	0.0	2.7	0.0	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	6.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	6.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6
151	5.8	2.0	0.0	0.0	1.4	0.0	0.0	5.6	6.6	4.8	2.9	0.6	0.6	0.0	0.0	0.0	3.8	3.2	2.4	1.5	0.0	0.0
152	6.5	2.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	6.5	3.7	4.3	0.0	0.0	0.0	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.5
153	9.7	6.3	0.4	6.1	6.8	3.7	1.8	2.3	6.4	5.8	1.4	4.1	2.6	3.3	4.9	5.7	6.9	5.5	6.8	1.4	6.1	0.0
154	7.8	11.4	0.0	7.7	12.1	0.4	0.0	7.0	6.0	11.3	10.0	9.0	5.3	5.2	14.6	7.8	9.3	8.6	7.7	4.8	3.9	5.0
155	6.5	4.3	0.1	2.3	3.2	0.0	4.4	2.6	6.0	6.8	6.4	5.6	3.1	5.0	4.0	1.5	6.2	3.2	3.2	6.8	0.5	4.2
156	5.8	6.0	0.0	5.8	4.8	0.0	3.0	0.0	6.0	5.4	5.0	5.0	3.5	4.5	5.0	4.9	5.9	5.0	1.4	1.5	3.7	5.0
157	0.0	3.4	0.0	0.2	0.2	0.0	0.0	0.0	5.9	1.7	0.6	1.2	0.4	0.6	0.0	0.6	0.1	0.4	0.6	0.0	0.0	0.0
158	14.3	16.0	3.3	9.5	11.0	2.5	0.5	2.4	5.9	3.2	3.0	5.1	6.1	5.9	11.3	8.9	11.5	3.7	6.5	0.5	1.4	1.8
159	1.9	1.2	0.0	3.2	4.8	0.0	0.1	3.6	5.8	6.9	9.9	8.9	6.5	2.7	12.5	7.7	11.6	13.3	10.5	0.0	1.1	4.2
160	9.7	2.7	0.0	1.1	6.2	0.1	0.4	0.5	10.6	18.5	17.9	10.4	9.5	0.8	15.4	17.0	18.1	24.4	21.3	5.3	6.5	1.1
161	23.4	2.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5.6	2.4	1.5	0.0	0.0	0.0	3.0	0.1	0.8	1.1	0.0	0.0	0.0	8.9
162	3.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	5.5	6.0	0.0	0.0	0.0	1.2	4.9	0.4	0.1	0.1	0.5	0.0	0.2	0.3
163	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	6.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
164	13.6	5.8	0.7	5.1	6.7	0.6	0.2	0.7	5.4	10.8	6.5	7.0	5.4	6.8	6.0	0.3	7.2	10.3	0.9	0.3	5.6	5.7
165	34.4	24.1	1.4	10.6	19.7	0.1	0.0	0.3	5.3	1.2	0.6	1.7	0.5	1.2	3.9	0.8	2.7	0.9	1.1	0.5	1.7	4.4
166	10.4	5.6	0.2	1.6	2.7	0.1	0.0	0.4	5.3	6.3	3.5	5.2	1.6	3.1	0.5	0.0	4.5	4.0	0.4	0.4	2.3	3.6
167	0.0	4.3	0.0	3.4	0.6	0.0	0.0	0.0	5.3	4.2	4.2	4.0	0.0	3.0	5.6	4.9	3.5	4.6	0.0	0.0	0.0	5.0
169	11.0	9.0	0.0	5.9	1.7	0.0	0.0	0.0	5.2	4.6	4.6	3.3	0.0	3.6	7.1	4.9	6.1	5.4	4.1	2.9	4.5	5.2
170	3.2	5.2	0.5	4.1	5.1	2.1	2.3	4.0	5.1	3.6	4.3	0.0	3.2	3.4	1.0	3.9	3.6	3.5	3.7	3.2	3.1	3.9
171	5.2	6.2	0.0	0.0	0.6	0.0	0.0	0.0	5.0	2.7	3.7	0.3	0.0	0.8	2.2	0.4	0.8	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0
172	0.0	6.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
173	10.4	0.0	0.0	1.0	0.9	0.0	0.0	0.0	4.9	3.4	3.0	1.1	0.0	0.0	4.2	0.0	0.4	0.4	0.0	0.0	1.3	3.3
174	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.7	6.9	6.4	5.7	0.0	0.0	4.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
175	16.2	12.7	0.0	4.7	2.1	0.0	0.5	0.0	4.7	5.3	1.5	1.8	0.8	1.4	2.8	1.3	1.5	1.6	0.2	0.0	0.2	1.4
176	4.5	0.0	0.0	1.5	1.2	0.0	0.0	0.0	4.5	5.3	0.7	0.2	0.0	0.0	10.1	0.5	2.0	0.3	0.0	0.0	0.3	0.5
177	18.2	20.4	0.3	7.7	13.1	0.6	0.6	1.3	4.5	1.1	1.2	3.5	7.3	7.1	7.7	2.8	12.6	1.9	12.1	1.6	3.8	3.2
178	5.8	5.7	0.0	3.0	3.4	0.0	0.0	0.0	4.4	4.7	3.6	4.5	3.8	3.6	5.3	4.1	4.0	0.6	2.7	1.4	3.9	5.0
179	28.6	0.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.8	4.4	20.6	0.2	15.6	0.0	9.4	22.8	1.9	1.6	6.4	0.7	0.2	11.4	19.2
180	7.8	7.7	0.0	0.1	6.5	0.1	0.0	1.8	4.3	9.8	8.6	3.7	2.3	5.3	1.0	0.2	0.5	0.0	0.0	0.2	4.9	5.8
181	20.8	0.0	10.8	7.2	0.0	0.0	0.0	0.0	4.3	12.7	0.0	11.4	1.6	0.2	10.9	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.1
182	14.9	0.8	0.0	0.5	0.1	0.0	0.0	0.1	4.3	3.7	1.3	0.2	0.1	1.4	0.4	0.1	0.3	0.2	0.3	0.0	0.1	0.5
183	0.6	5.6	1.6	3.3	3.0	2.7	1.6	2.1	4.2	1.9	1.9	2.1	1.9	1.7	1.5	2.0	1.8	0.5	2.7	1.6	1.4	2.9
184	7.1	0.0	0.0	1.6	4.1	1.8	0.0	4.9	4.2	2.3	0.0	0.0	1.8	5.2	1.6	3.3	1.6	2.2	4.0	1.5	2.3	0.0
185	50.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.2	10.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
186	6.5	4.1	0.0	4.1	4.8	0.0	0.0	2.7	4.1	4.2	4.2	5.0	3.8	4.5	5.6	5.0	4.9	4.3	3.2	2.9	4.7	4.8
187	3.2	2.3	0.3	0.6	1.7	0.0	0.0	1.7	4.1	4.1	4.1	4.8	0.8	3.2	1.1	0.4	0.6	0.5	0.2	0.0	0.1	0.3
188	13.6	2.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.9	5.1	1.3	4.4	1.9	0.9	14.6	3.7	3.2	1.4	5.4	0.5	7.1	1.9
189	16.9	1.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	3.8	2.7	1.7	1.3	0.0	1.5	3.9	0.2	0.1	0.2	0.4	0.2	0.2	1.3
190	0.0	4.8	0.0	3.1	0.0	0.0	0.0	0.0	3.7	2.9	0.7	0.6	0.0	0.0	4.0	0.2	0.3	0.0	0.5	0.1	1.2	3.8

192	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
193	2.6	0.0	0.0	4.8	4.9	0.0	0.0	0.0	3.4	4.4	1.8	4.6	0.0	2.0	4.0	2.3	1.8	1.8	0.7	0.0	1.8	2.6
194	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.3	0.1	0.0	0.0	0.1	0.8	0.8	0.4	0.1	0.1	0.2	0.0	0.0	0.1
195	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.1	8.5	3.5	4.5	0.0	2.3	4.4	2.8	3.0	0.9	0.0	0.0	2.8	3.1
196	1.9	3.9	0.0	7.5	3.9	0.0	0.0	0.0	3.1	12.2	8.0	2.3	0.0	0.2	11.8	0.0	2.8	0.1	0.0	0.0	1.1	8.4
197	0.0	3.2	0.0	3.0	1.6	0.0	0.0	1.1	3.0	3.2	3.0	1.7	0.5	0.0	3.6	2.4	2.3	2.3	0.1	0.0	1.8	3.1
198	1.9	0.0	0.0	0.5	2.6	0.0	0.5	0.0	2.9	2.2	0.1	0.5	0.0	1.5	0.7	0.6	1.4	0.9	0.0	0.0	1.0	0.8
199	0.0	16.0	0.9	4.5	8.5	0.8	0.4	1.3	5.7	0.2	0.3	0.4	0.2	0.5	0.2	0.5	0.5	0.7	1.1	0.0	0.5	0.2
201	0.0	4.1	0.0	2.6	3.1	1.4	0.0	0.0	2.7	2.9	2.3	3.0	2.6	2.2	3.6	1.8	2.9	0.0	1.5	0.0	1.4	1.4
202	0.0	1.0	0.3	0.2	0.3	0.3	0.0	1.1	2.3	2.2	2.2	1.7	0.5	2.3	2.8	1.9	2.2	1.7	2.1	0.4	1.9	2.8
203	6.5	0.0	0.0	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0	2.3	8.6	0.0	2.5	0.1	0.0	0.0	5.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
204	0.0	1.9	0.0	1.8	1.1	0.0	2.2	0.0	2.3	3.0	2.1	2.3	1.3	2.3	2.7	2.3	2.2	2.4	0.0	0.0	1.3	2.3
205	49.4	100.6	4.0	67.7	82.3	2.6	2.2	2.3	2.1	2.4	1.7	2.4	3.2	4.9	4.0	3.1	1.8	4.1	30.3	2.5	2.4	6.1
206	1.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	2.1	0.3	0.0	0.1	0.1	0.0	0.0	0.3	0.3	0.0	0.0	0.1	0.2	0.0
207	3.9	1.5	0.0	0.6	2.7	0.0	3.3	3.6	1.6	13.4	12.3	3.7	0.7	0.1	0.5	0.5	0.0	0.0	0.9	0.0	0.5	0.5
208	0.0	2.0	0.0	1.2	0.0	0.0	1.8	0.0	1.5	1.9	0.4	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
209	188.4	97.8	0.1	52.6	54.6	10.4	0.0	0.0	0.0	0.3	0.2	0.0	0.3	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
210	0.0	47.0	0.0	3.3	30.8	1.6	0.0	3.2	0.0	48.2	53.6	50.9	39.3	47.2	47.2	28.1	55.6	27.4	36.1	32.6	29.9	29.3
211	0.0	95.4	8.5	6.6	12.4	1.3	0.0	2.2	1.2	44.5	60.8	50.0	8.5	14.7	7.9	4.5	3.9	6.8	6.6	1.2	3.7	6.7
212	0.0	15.8	0.1	1.0	1.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0
213	0.0	54.5	14.1	12.8	66.6	18.9	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	63.8	30.2	19.5	80.8	43.2	58.2	29.0	17.0	54.5	29.5	25.6
214	13.0	10.4	0.0	61.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	10.5	8.2	8.3	0.5	36.2	10.4	5.9	2.6	8.6	0.0	0.2	1.7	5.9
215	0.0	7.8	0.0	2.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	6.0	2.1	0.0	0.0	0.8	7.1	0.0	0.0	4.0	0.0	0.0	1.8	1.6
216	0.0	0.9	0.0	2.4	30.7	0.7	0.0	2.0	0.0	43.3	17.7	36.5	35.6	30.5	6.8	40.0	30.2	27.1	12.7	30.1	26.3	22.0
217	78.6	82.0	2.4	43.6	40.2	2.3	0.5	6.2	0.0	27.0	13.6	27.0	8.4	21.2	39.0	28.0	27.1	36.2	37.4	40.4	30.0	21.2
218	1.9	0.0	64.5	54.7	103.4	37.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0	0.0	0.0	24.8	131.9	88.8	161.6	49.0	0.1	92.3	102.3	74.3
221	140.3	17.6	0.0	0.0	12.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.3	0.2	0.1	0.5	0.0	1.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
222	40.9	9.4	0.0	8.1	1.4	0.0	0.0	0.0	0.0	5.9	0.1	0.0	0.1	0.5	1.4	0.1	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0	1.4