



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE
CARTAGENA

ESCUELA DE INGENIERÍA DE CAMINOS,
CANALES Y PUERTOS Y DE INGENIERÍA
DE MINAS



INGENIERÍA TÉCNICA DE OBRAS PÚBLICAS ESPECIALIDAD EN HIDROLOGÍA

PROYECTO FIN DE CARRERA ESPECÍFICO

CONTRASTE ESPACIO - TEMPORAL DE INDICADORES DE INTERÉS HIDROLÓGICO DERIVADOS DESDE TELEDETECCIÓN

Alumna: **Josefa Esparza Gil**

Directora de Proyecto: **Sandra G. García Galiano**

Co- Director: **José Ángel Martínez Pérez**

Mayo de 2013

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a mi directora de proyecto, Sandra García, su dirección para poder llevar a cabo este proyecto, y a mi familia y amigos que me han animado a seguir adelante en todo momento.

Una especial mención a José Ángel Martínez Pérez por su ayuda en la realización de este trabajo, a Ángel Tudela por su compañía y apoyo en las tareas realizadas y a Patricia Olmos por hacer más llevaderas esas mañanas en el laboratorio.

Se agradece también la disponibilidad y uso de equipos (Servidor) financiados por fondos públicos (Proyecto del Plan Nacional CGL-2012 HYDROCLIM).

ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN	7
1.1	MOTIVACIÓN.....	7
1.2	OBJETIVOS	8
2	ANTECEDENTES	9
2.1	CONCEPTOS BÁSICOS DE TELEDETECCIÓN SATELITAL	9
2.1.1	<i>JUSTIFICACIÓN DEL EMPLEO DE LA TELEDETECCIÓN</i>	11
2.1.2	<i>RESOLUCIONES ESPECTRALES, ESPACIALES Y TEMPORALES</i>	12
2.1.3	<i>SENSOR MODIS</i>	14
2.1.4	<i>SENSOR LANDSAT5™</i>	15
2.2	INTRODUCCIÓN A SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG).....	17
2.2.1	<i>EL SIG GRASS</i>	17
3	MATERIALES Y MÉTODOS	19
3.1	DESCRIPCIÓN DE LA CUENCA DE ESTUDIO	19
3.2	DESCRIPCIÓN DE LOS PRODUCTOS DE ESTUDIO DEL SENSOR MODIS.....	21
3.2.1	<i>MOD 09. REFLECTANCIA SUPERFICIAL</i>	21
3.2.2	<i>MOD11A1. TEMPERATURA SUPERFICIAL DE LA TIERRA (LST) Y EMISIVIDAD</i>	22
3.2.3	<i>MOD13. ÍNDICES DE VEGETACIÓN (NDVI Y EVI)</i>	22
3.2.4	<i>MCD 43 A3. SUPERFICIE DE REFLECTANCIA BRDF / ALBEDO</i>	23
3.3	HERRAMIENTAS PARA EL TRATAMIENTO DE LA INFORMACIÓN.....	24
3.3.1	<i>SOFTWARE REVERB</i>	24
3.3.2	<i>FORMATO HDF (HIERARCHICAL DATA FORMAT)</i>	25
3.3.3	<i>SOFTWARE MRT (MODIS REPROJECTION TOOLS)</i>	27
3.3.4	<i>SOFTWARE SORPRESA_TOOLBOX</i>	28
3.4	ETAPAS PARA EL PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN.....	28
3.5	CÁLCULO DE LOS ÍNDICES DE VEGETACIÓN	33
3.5.1	<i>ÍNDICE DE VEGETACIÓN DIFERENCIA NORMALIZADA (NDVI)</i>	35
3.5.2	<i>ÍNDICE DE VEGETACIÓN AJUSTADO AL SUELO (SAVI)</i>	36
3.5.3	<i>ÍNDICE DE VEGETACIÓN AJUSTADO AL SUELO MODIFICADO (MSAVI)</i> . 37	
3.5.4	<i>ÍNDICE DE VEGETACIÓN MEJORADO (EVI)</i>	40
3.5.5	<i>ÍNDICE DE DIFERENCIA DE VEGETACIÓN (RDVI)</i>	40

3.5.6	<i>ÍNDICE DE VEGETACIÓN DE DIFERENCIA NORMALIZADA TRANSFORMADA (TNDVI)</i>	41
3.6	EL ESPACIO LST NDVI	41
3.6.1	<i>ÍNDICES DERIVADOS DEL ESPACIO LST-NDVI</i>	43
3.6.2	<i>OTROS PARÁMETROS DE SUPERFICIE EL ALBEDO</i>	44
4	DISCUSIÓN Y RESULTADOS	47
4.1	ANÁLISIS DE LOS ESPACIOS LST-NDVI.....	47
4.2	CONTRASTE DE INDICADORES DE VEGETACION.....	49
5	CONCLUSIONES	55
6	BIBLIOGRAFÍA	59

INDICE DE ANEXOS

ANEXO I.	Triángulos LST-NDVI para Modis y Landsat.....	61
ANEXO II.	Evolucion historica de Precipitación media mensual.....	64
ANEXO III:	Contraste de indicadores para la parcela de cultivo de Villa Antonia.....	66
ANEXO IV:	Mapas indicadores Cuenca Hidrográfica del Segura	70
ANEXO V:	Mapas de los indicadores hidrológicos para el Campo de Cartagena.....	86

INDICE DE FIGURAS

Figura 1:	Elementos del proceso de teledetección	9
Figura 2:	Espectro electromagnético	10
Figura 3:	Signaturas espectrales del suelo y la vegetación.....	11
Figura 4:	Longitudes de onda y bandas del sensor MODIS	15
Figura 5:	Bandas del sensor Landsat.....	15
Figura 6:	Situación de la Cuenca del Río Segura y subcuencas.	19
Figura 7:	Imagen Landsat 5 y Modelo de Elevación Digital del Campo de Cartagena... 20	
Figura 8:	Zona de cultivo de Villa Antonia	20
Figura 9:	Aspecto del sistema Reverb	25
Figura 10:	Distribución de tiles.....	27
Figura 11:	Aspecto del MRT Tools.....	27
Figura 12:	Sorpresa Toolbox.....	28
Figura 13:	Selección de los indicadores	29
Figura 14:	Aspecto de un archivo en .prm.....	31

Figura 15: Estructura de la base de datos bajo el SIG GRASS	33
Figura 16: Firma espectral de la vegetación.	34
Figura 17: NDVI de invierno y verano de la Cuenca del Río Segura	36
Figura 18: SAVI de invierno y verano para la Cuenca del Río Segura	37
Figura 19: Línea de suelo	38
Figura 20: MSAVI de invierno y verano de la Cuenca del Río Segura.....	39
Figura 21: EVI para invierno y verano de la Cuenca de Río Segura.....	40
Figura 22: Representación del Espacio LST-NDVI (Sandholt et al., 2002)	41
Figura 23: Distribución de las zonas del suelo en el espacio triangular.....	42
Figura 24: TVDI de otoño y verano para la Cuenca del Río Segura.....	43
Figura 25: VTCI de otoño y primavera para la Cuenca del Río Segura.....	44
Figura 26: Albedo para invierno y verano de la Cuenca del Río Segura.....	45
Figura 27: LST-NDVI 20090214.....	47
Figura 28: LST-DVI 20090606	48
Figura 29: LST-NDVI 20100524.....	48
Figura 30: LST-NDVI 20100727.....	49
Figura 31: Correlación LST MODIS-Landsat	50
Figura 32: Progresiones lineales de NDVI y TNDVI	51
Figura 33: Progresiones lineales de SAVI y MSAVI	51
Figura 34: Imágenes de Albedo del Campo de Cartagena.....	52
Figura 35: Imágenes de NDVI del Campo de Cartagena.....	53
Figura 36: Imágenes de EVI del Campo de Cartagena.....	53
Figura 37: Imágenes de SAVI del Campo de Cartagena	54

INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Resoluciones espectrales y espaciales de Landsat 5TM	16
Tabla 2: Productos seleccionados	29
Tabla 3: Selección de bandas mediante MRT tool.....	30
Tabla 4: Cambio de HDF a Geotiff	31
Tabla 5: Rango de valores y factores de escala.....	32
Tabla 6: Fechas seleccionadas para el contraste MODIS-Landsat.....	33

RESUMEN

Se presentan aplicaciones de la teledetección en el campo de la monitorización del estado de la vegetación en la Cuenca del Río Segura. A partir del procesamiento de las imágenes satélite, se derivan índices y parámetros de superficie. Entre ellos, albedo, índice de vegetación de diferencia normalizada, temperatura de superficie e índice de vegetación mejorado. La metodología ha consistido en la descarga, escalado, reproyección y geoprocésamiento de las imágenes del sensor MODIS. Esta información incorporada en un Sistema de Información Geográfica, ha permitido obtener mapas de la distribución espacio-temporal de dichos índices y parámetros que sintetizan, de forma visual, información clave como la evolución de los cultivos. Los mapas obtenidos se han contrastado con los productos respectivos derivados desde Landsat5 TM tanto a escala de cuenca, como a nivel de parcela. Esta información puede servir de base a agricultores o a planificadores del uso del agua para la toma de decisiones, permitiendo optimizar el uso de los recursos hídricos.

1 INTRODUCCIÓN

1.1 MOTIVACIÓN

La teledetección satelital presenta amplias aplicaciones en el campo de la Hidrología ambiental. La evapotranspiración real (ETreal) es de interés en la modelización hidrológica y la gestión de los recursos hídricos, si bien los métodos tradicionales basados en ecuaciones meteorológicas fallan en la captura de la distribución espacio-temporal de esta variable. Métodos más sofisticados como lisímetros, son realmente costosos y no aplicables a escala de cuenca hidrográfica.

La estimación de ETreal desde teledetección satelital es una realidad, sin embargo aún existen algunas incertidumbres en variables que forman parte de la metodología de estimación. Las torres de medidas de flujo permiten la calibración de indicadores obtenidos desde satélites. Pero este tipo de contraste sólo es factible en localizaciones concretas, no abordable desde un punto de vista espacial. El uso de información provista por distintos sensores satelitales, es un medio eficaz de contraste espacio-temporal de variables e índices que guardan correlación con la ETreal, de indudable interés hidrológico.

El sensor TM a bordo del satélite Landsat provee de información con una alta resolución espacial (desde 30 m, 120 m. para la banda térmica), y baja resolución temporal (datos cada 16 días). Mientras el sensor MODIS, a bordo del satélite TERRA de la NASA, con moderada resolución espacial (desde 250 m), y alta temporal (imágenes diarias), permite el seguimiento dinámico de variables.

En el presente Proyecto Fin de Carrera Específico (PFC), se pretende realizar un contraste espacial de indicadores y variables seleccionadas, en fechas precisas, con el objetivo de mejorar la estimación operacional de evapotranspiración real desde satélite.

1.2OBJETIVOS

El objetivo principal del presente PFC Específico, consiste en la aplicación de técnicas de teledetección satelital, considerando tanto imágenes Landsat5 TM como MODIS TERRA, para la derivación y contraste de indicadores de interés hidrológico.

Para la consecución de los objetivos del Proyecto, es necesario:

- Mejorar habilidades en la aplicación y uso de Sistemas de Información.
- Adquirir conocimientos sobre técnicas de teledetección satelital.
- Desarrollar habilidades en técnicas de tratamiento de datos espacio-temporales.
- Generar indicadores basados en teledetección.

El área de análisis donde se realizará el estudio corresponde la Cuenca del Río Segura. Esta Cuenca se presenta como muy atractiva con respecto a otras por sus contrastes climáticos (frecuentes sequías, lluvias torrenciales y frecuentes inundaciones, elevadas temperaturas y heladas catastróficas). A estos contrastes hay que añadir el aumento progresivo de las demandas hídricas asociadas a la actividad económica y a la transformación del territorio, que junto con el cambio climático, contribuyen a las frecuentes situaciones deficitarias de agua.

No obstante, esta metodología puede aplicarse a cualquier zona de la que se disponga de imágenes satélite (tanto para una gran superficie como para una parcela de pocas hectáreas). Su resolución será seleccionada en función del objetivo que se pretenda alcanzar.

2 ANTECEDENTES

2.1 CONCEPTOS BÁSICOS DE TELEDETECCIÓN SATELITAL

La teledetección es una técnica que permite obtener información de un objeto sin entrar en contacto físico con él. Ello se realiza procesando la energía emitida o reflejada por el objeto.

Los elementos implicados desde la captura de la imagen de satélite hasta su procesamiento y aplicación, están presentados en la Figura 1. Se pueden resumir en:

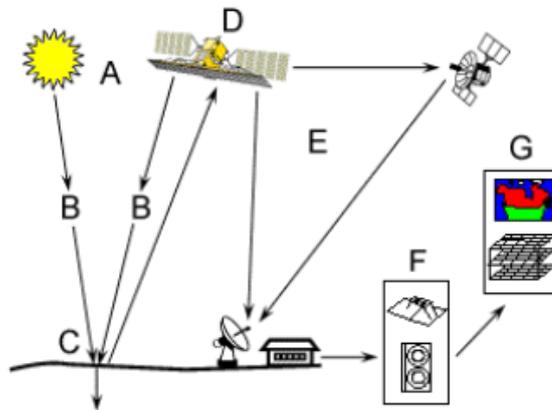


Figura 1: Elementos del proceso de teledetección

- A. Fuente de energía o iluminación. El primer requerimiento en teledetección es disponer de una fuente de energía que ilumine o provea energía electromagnética al objeto de interés.
- B. Radiación y la atmósfera. Ya que la energía "viaja" desde la fuente al objeto, entrará en contacto e interactuará con la atmósfera. Esta interacción tiene lugar incluso una segunda vez cuando la energía "viaja" desde el objeto al sensor.
- C. Interacción con el objeto. La energía interactúa con el objeto dependiendo de las propiedades de éste y de la radiación incidente.
- D. Detección de energía por el sensor. Se necesita un sensor que recoja y registre la radiación electromagnética reflejada o emitida por el objeto y la atmósfera.

- E. Transmisión, recepción y procesamiento. La energía registrada por el sensor debe ser transmitida, normalmente en forma electrónica, a una estación de recepción y procesamiento donde los datos son convertidos a imágenes digitales.
- F. Interpretación y análisis. La imagen procesada se interpreta, visualmente y/o digitalmente, para extraer información acerca del objeto que fue iluminado (o que emitió radiación).
- G. Aplicación. El paso final se alcanza en el momento en el que se utiliza la información extraída de las imágenes del objeto para un mejor conocimiento del mismo, revelando nuevas informaciones o ayudando a resolver un problema particular.

Por lo tanto, los tres elementos principales en cualquier sistema de detección remota son el sensor, el objeto observado y el flujo de energía que se produce entre ellos. De los tipos de flujo de energía, la teledetección utiliza la energía reflejada y emitida.

El fundamento de la teledetección reside en la diferente respuesta de las superficies a la radiación en las distintas zonas del espectro electromagnético (Figura 2).

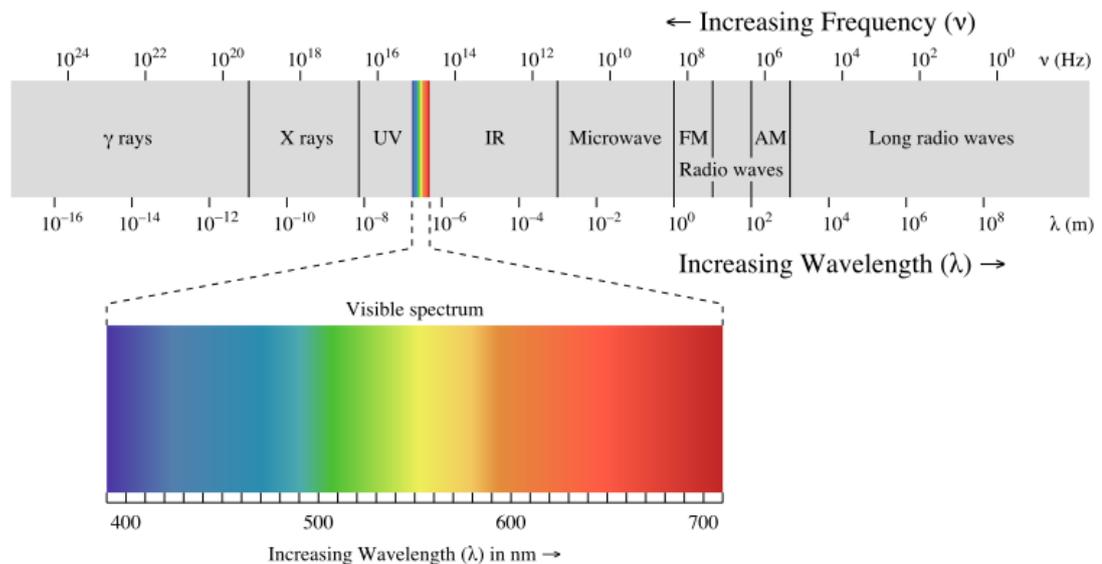


Figura 2: Espectro electromagnético

Cada superficie se caracteriza por una signatura espectral (Figura 3). Esta signatura es codificada en una imagen digital, que constituye la representación de un objeto utilizando una matriz numérica 2D, donde cada elemento de la matriz se denomina píxel o celda.

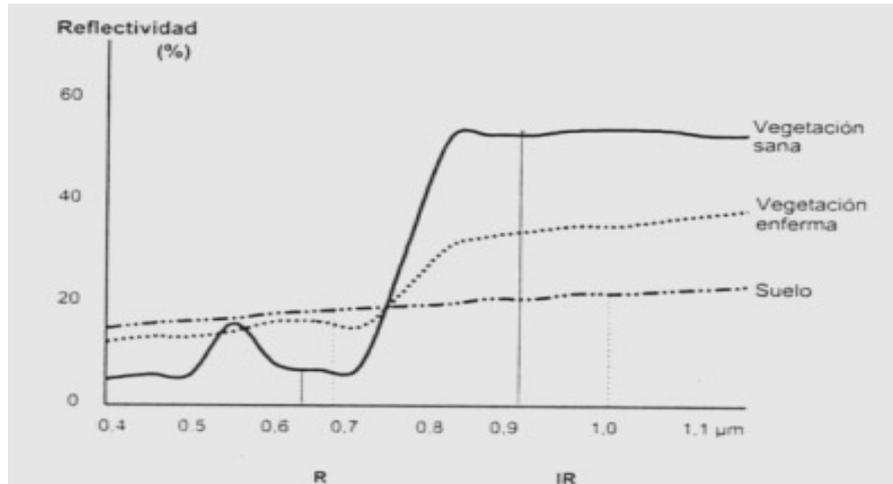


Figura 3: Signaturas espectrales del suelo y la vegetación

2.1.1 JUSTIFICACIÓN DEL EMPLEO DE LA TELEDETECCIÓN

Las utilidades de la teledetección, hacen incuestionable su uso, debido a que:

- Son mediciones objetivas.
- La información se recopila sistemáticamente, por lo que permite el cotejo de series de tiempo y la comparación entre sistemas.
- Permite el estudio de amplias zonas, como cuencas fluviales. Son observaciones multiescala, pueden abordarse estudios desde escalas 1:150.000 (con imágenes de 30 m de resolución espacial) a escalas 1:3.000, por ejemplo.
- Se pueden agregar grandes volúmenes de información o desglosar a escalas más detalladas
- Su integración en un SIG, revela más información. Posibilita una información distribuida espacialmente y actualizada.
- Gracias a su "periodicidad", al utilizarla en el seguimiento de zonas bajo riego permite:

- Identificar nuevas zonas de regadío. Gracias a su multiespectralidad de observación, captan datos no sólo en la región del espectro visible (captada por el ojo humano), también en las regiones espectrales del infrarrojo.
- Mejorar servicios de suministro de agua.
- Cumplir especificaciones de riego o modificar decisiones de riego
- Identificar desviaciones, y ante ello, realizar un diagnóstico rápido.

Por tanto la teledetección aplicada a la agricultura, es una tecnología que puede introducir mejoras en la optimización de factores de producción agrícola. Además en general, obtiene una información de especial interés en planificación y gestión de los recursos naturales (ya sea agrícola, forestal, hidrológico o minero).

Posibles beneficiarios de esta tecnología son las comunidades de regantes o agricultores, pues mejora la eficiencia y productividad del agua disponible, cumpliendo las directrices ambientales y gestión de condiciones deficitarias de riego. Así como, las propias autoridades de gestión del agua, gestión de riesgos naturales, prevención de sequías y adaptación al cambio climático. En resumen, los productos finales de la teledetección proporcionan un soporte de apoyo a los procesos de toma de decisión.

2.1.2 RESOLUCIONES ESPECTRALES, ESPACIALES Y TEMPORALES

Es imprescindible considerar una buena equivalencia entre la resolución espacial y la escala espacial a la que ocurren los fenómenos que se pretenden observar. El número de bandas y su localización en el espectro, va a depender de los objetos que se pretendan cubrir.

La resolución espectral indica el número y ancho de las bandas en las que el sensor puede captar la radiación electromagnética. En principio cuantas más bandas incluya un sensor mejor, ya que cada banda constituye una variable para caracterizar la superficie captada.

Por otro lado, es preferible que estas bandas sean estrechas para que su poder discriminante se incremente. Si las bandas son muy anchas van a recoger valores promediados que ocultarán elementos de diferenciación. Por ejemplo, resulta mucho más informativo captar 3 bandas (rojo, verde, azul) en el visible que en una sola banda (fotografía en blanco y negro).

La frecuencia de paso por un mismo punto de la superficie terrestre, indica su **resolución temporal**.

Por otro lado, **La resolución espacial** designa al objeto más pequeño que se puede distinguir en la imagen. Está determinado por el tamaño de píxel, medido en metros sobre el terreno, esto depende de la altura del sensor con respecto a la Tierra, el ángulo de visión, la velocidad de escaneado y las características ópticas del sensor.

Existe un amplio rango de resoluciones espaciales en los satélites hoy en día disponibles. Meteosat y los satélites geoestacionarios ofrecen una resolución espacial de 5000m debido a su cobertura global de la superficie terrestre, los satélites de la serie NOAA-AVHRR tienen resoluciones que van desde 500 a 1000m, Landsat TM presenta 30 metros y el sensor IKonos-1 1metro.

Meteosat y los satélites geoestacionarios (significa que están sincronizados con el movimiento de rotación de la Tierra) ofrecen una resolución espacial de 5000m debido a su cobertura global de la superficie terrestre, los satélites de la serie NOAA-AVHRR tienen resoluciones que van desde 500 a 1000m, Landsat TM presenta 30 metros y el sensor IKonos-1 1 metro.

En este trabajo se emplean imágenes de dos satélites de diferentes resoluciones, tanto espaciales, espectral y temporales. Landsat presenta mejor resolución espacial. Sin embargo MODIS presenta mejor resolución temporal. En cuanto a la resolución espectral, los dos satélites tienen anchuras de bandas parecidas, pero distinta ventana de observación. Por ejemplo la banda 3 de Landast, tiene una anchura de banda de 0,63 a 0,69 μm frente a la banda 1 de MODIS 0,62-0,67 μm .

2.1.3 SENSOR MODIS (MODERATE RESOLUTION IMAGING SPECTRORADIOMETER)

El sensor MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer, o espectroradiómetro de imágenes de resolución moderada) consta de 36 canales, 2 con 250 m de resolución, 5 con 500 m y el resto con 1 km. Los siete primeros canales, de más resolución, están orientados al estudio del suelo, los nueve siguientes al estudio del océano y el resto a estudios atmosféricos.

La infraestructura consiste en un sistema de captación de datos del sensor MODIS mediante imágenes, a bordo de los satélites TERRA (en órbita desde 1999) y AQUA (desde 2002). Ambos satélites presentan una frecuencia de paso diaria (diurna y nocturna), con una resolución espacial media (250-1000 m) y en 36 bandas espectrales entre el rango visible y el IR térmico (Figura 4).

Los datos MODIS juegan un papel importante en el desarrollo de modelos terrestres y de predicción de cambios globales, siendo muy útil para la toma de decisiones sobre la protección del medio ambiente. Su gran resolución espectral extiende su uso a muy diversas aplicaciones, tanto relacionadas con usos del suelo, como incendios forestales, inundaciones, clima, cubiertas de nieve o hielo, datos de temperatura y vapor de agua, etc. (<http://modis.gsfc.nasa.gov/>)

Los productos con los que se ha trabajado en este proyecto, corresponden a:

- Reflectancia superficial (MOD 09GQ y MOD 09 A1)
- Temperatura superficial (MOD11A1)
- Índices de vegetación (MOD 13 A1)
- Albedo (MCD 43 A1)

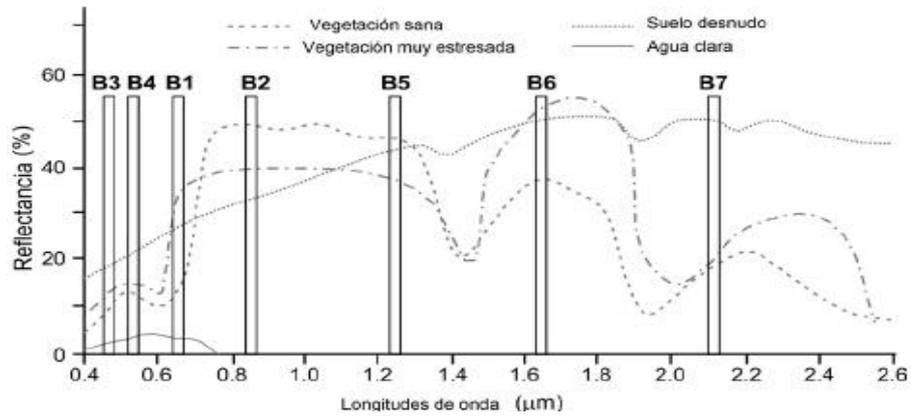


Figura 4: Longitudes de onda y bandas del sensor MODIS

2.1.4 SENSOR LANDSAT5™ (THEMATIC MAPPER)

El satélite Landsat5 fue puesto en órbita portando el sensor TM (Thematic Mapper o Mapeador Temático) que opera en siete bandas espectrales diferentes, cuatro de ellas presentadas en Figura 5. Las bandas fueron elegidas especialmente para el seguimiento de la vegetación, a excepción de la banda 7 que se agregó para aplicaciones geológicas. Landsat 5 pertenece al programa Landsat, financiado por el gobierno de los Estados Unidos.

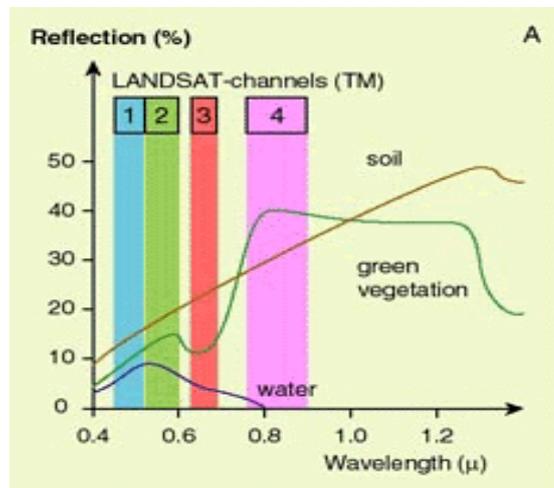


Figura 5: Bandas del sensor Landsat

El Sensor TM tiene mayor sensibilidad radiométrica que su antecesor, el MSS, y mejor resolución espacial, ya que el tamaño de celda en todas las bandas excepto la 6, es de 30 metros. Esto permite la clasificación de zonas tan pequeñas como 2,5 o 3 hectáreas.

La banda 6, que es una banda térmica, tiene un píxel de 120 metros en el terreno. Cada imagen cubre una superficie 185 x 185 Km.

Tabla 1: Resoluciones espectrales y espaciales de Landsat 5TM

Band Number	μm	Resolution
1	0.45-0.52	30 m
2	0.52-0.60	30 m
3	0.63-0.69	30 m
4	0.76-0.90	30 m
5	1.55-1.75	30 m
6	10.4-12.5	120 m
7	2.08-2.35	30 m

A continuación se presentan algunos detalles de las bandas de Landsat 5:

- Banda 1: (0,45 a 0,52 micrones - azul). Diseñada para penetración en cuerpos de agua, es útil para la representación de costas, para diferenciar entre suelo y vegetación y para clasificar distintas coberturas boscosas, por ejemplo coníferas. También es útil para diferenciar los diferentes tipos de rocas presentes en la superficie terrestre.
- Banda 2: (0,52 a 0,60 micrones - verde). Especialmente diseñada para evaluar el vigor de la vegetación sana, midiendo su pico de reflectancia (o radiancia) en la banda verde. También es útil para diferenciar tipos de rocas y, al igual que la banda 1, para detectar la presencia o no de limonita.
- Banda 3: (0,63 a 0,69 micrones - rojo). Es una banda de absorción de clorofila, muy útil para la clasificación de la cubierta vegetal. También sirve en la diferenciación de las distintas rocas.
- Banda 4: (0,76 a 0,90 micrones - infrarrojo cercano). Es útil para determinar el contenido de biomasa, para la delimitación de cuerpos de agua y para la clasificación de las rocas.
- Banda 5: (1,55 a 1,75 micrones - infrarrojo medio). Indicativa del contenido de humedad de la vegetación y del suelo. También sirve para discriminar entre nieve y nubes.
- Banda 6: (10,40 a 12,50 micrones – infrarrojo térmico). El infrarrojo térmico es útil en el análisis del estrés de la vegetación, en la determinación de la humedad del suelo y en la estimación de temperatura superficial.

- Banda 7: (2,08 a 2,35 micrones - infrarrojo medio). Especialmente seleccionada por su potencial para la discriminación de rocas y para la representación hidrotermal. Mide la cantidad de hidróxilos (OH) y la absorción de agua.

Estas siete bandas pueden combinarse, produciendo una gama de imágenes de color compuesto (o falso color) que incrementan notablemente sus aplicaciones, especialmente en el campo de los recursos naturales.

2.2 INTRODUCCIÓN A SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG)

Un Sistema de Información Geográfica (SIG) se puede definir como un sistema de hardware, software y procedimientos elaborados para facilitar la obtención, gestión, manipulación, análisis, modelado, representación y salida de datos espacialmente referenciados, para resolver problemas complejos de planificación y gestión (NCGIA, 1990).

2.2.1 EL SIG GRASS (GEOGRAPHIC RESOURCES ANALYSIS SUPPORT SYSTEM)

El Sistema de Información Geográfica GRASS (Geographic Resources Analysis Support System), ha sido originalmente desarrollado por el U.S. Army Corps of Engineers Construction Engineering Research Laboratory (USACERL) en Champaign, Illinois (EEUU).

Es un software de dominio público que presenta poderosas herramientas de análisis ráster, por lo que se le puede clasificar como un SIG eminentemente ráster, aunque también presenta herramientas de análisis vectorial. Otras posibilidades que brinda son un sistema de procesamiento de imágenes y sistema de producción gráfica. Según Fedra y Kubat (1993), GRASS sería un SIG híbrido ya que combina formatos de representación basados en datos vectoriales, y funciones con componentes basadas en estructura ráster. En la actualidad GRASS presenta más de 300 comandos que le dan una gran funcionalidad.

3 MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 DESCRIPCIÓN DE LA CUENCA DE ESTUDIO

La cuenca de estudio corresponde a la Cuenca del Río Segura (Figura 6). Se encuentra ubicada en el Sureste del territorio Español con una superficie aproximada de 18.870 km², e involucra a cuatro Comunidades Autónomas: prácticamente en su totalidad a la de Murcia y parcialmente a las Comunidades de Andalucía (Provincias de Jaén, Granada y Almería), Castilla-La Mancha (Provincia de Albacete) y Valencia (Provincia de Alicante).

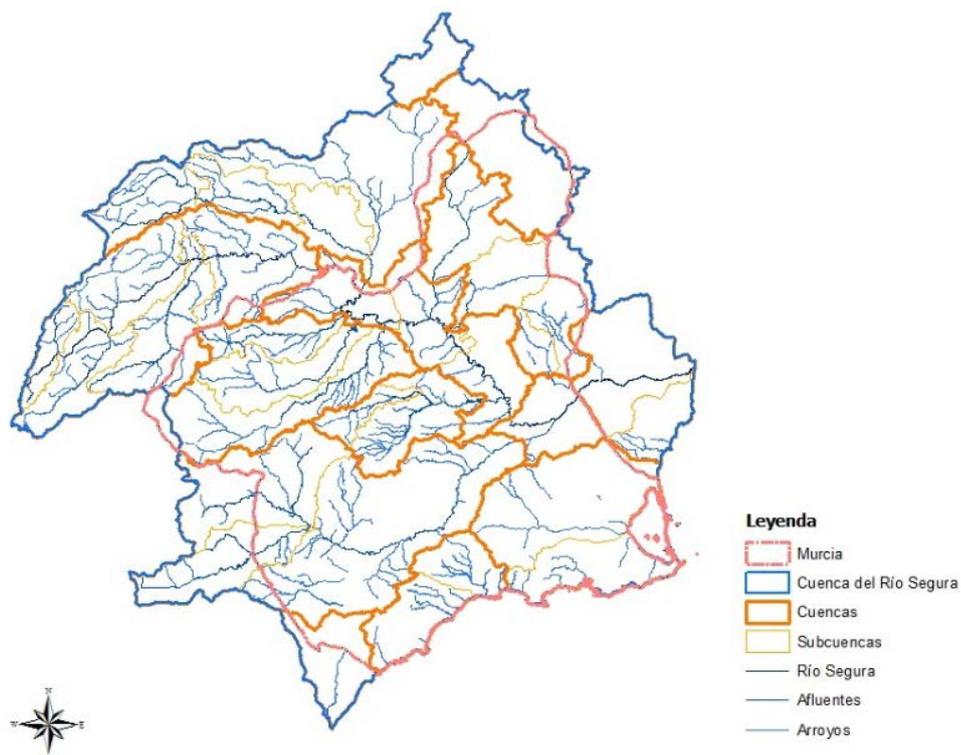


Figura 6: Situación de la Cuenca del Río Segura y subcuencas.

En el marco de la cuenca del Río Segura, el estudio del contraste espacio-temporal de indicadores, se centra en el Campo de Cartagena. Se trata de una superficie con una altitud máxima de 360m, como se presenta desde el Modelo Digital de Elevaciones, Figura 7. La zona presenta un clima en general seco, con precipitaciones anuales del orden de 300mm.

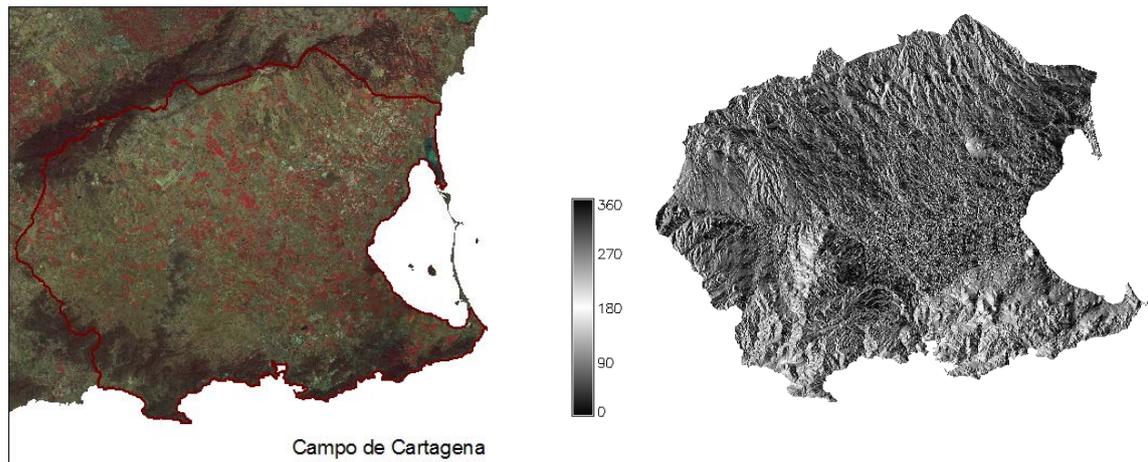


Figura 7: Imagen Landsat 5 (combinación falso color, bandas 432) y Modelo de Elevación Digital del Campo de Cartagena (MED)

Dentro del Campo de Cartagena se ha seleccionado la parcela de cultivo Villa Antonia (Figura 8), para realizar la validación de indicadores derivados desde teledetección. Esta parcela de cítricos está equipada con torres de flujos que miden directamente y en continuo ETreal además de otras variables de superficie como flujo de calor sensible, intercambio de CO₂, radiación neta y temperatura superficial de la vegetación y del suelo.



Figura 8: Zona de cultivo de Villa Antonia

3.2 DESCRIPCIÓN DE LOS PRODUCTOS DE ESTUDIO DEL SENSOR MODIS

3.2.1 MOD 09. REFLECTANCIA SUPERFICIAL

La reflectancia superficial (MOD 09) se calcula a partir de las bandas 1, 2, 3, 4, 5, 6, y 7 (centrados a 648 nm, 858 nm, 470 nm, 555 nm, 1240 nm, 1640 nm y 2130 nm, respectivamente).

Este producto proporciona una estimación de la reflectancia espectral de la superficie. Se mide a nivel del suelo en ausencia de la dispersión atmosférica o absorción. La estimación se lleva a cabo para todos los píxeles sin nubes, corrigiendo los efectos atmosféricos producidos por gases, aerosoles y nubes cirrus.

Para el estudio de las características de la superficie terrestre como la distribución de la vegetación o los incendios, es importante eliminar o corregir los efectos atmosféricos de los datos.

La reflectancia de la superficie terrestre es la base para una variedad de productos MODIS: Índices de vegetación, BRDF (Función de Distribución de Reflectancia Bidireccional), las anomalías térmicas (incendios), y FPAR / LAI (Fracción de radiación fotosintéticamente activa / Índice de Área Foliar). El producto de reflectancia de la superficie se utiliza habitualmente en las caracterizaciones de cobertura de la Tierra, los modelos climáticos globales y regionales, y modelado de superficies de balance de energía

MOD09GQ.

Posee una resolución de 250 metros. El conjunto de datos proporcionados para este producto incluyen reflectancia para bandas 1 y 2, un índice de calidad, la cobertura de observación y el número de observaciones.

MOD09A1.

Ofrece de 1 a 7 bandas con una resolución de 500 metros en 8 días. Contiene la mejor observación posible durante un periodo de 8-días,

seleccionado sobre una base de cobertura de observación alta, ángulo de visión baja, y con ausencia de nubes o sombras por nubes y carga de aerosoles.

Este producto es utilizado para el cálculo de los índices de vegetación, desarrollados en apartados posteriores.

3.2.2 MOD11A1. TEMPERATURA SUPERFICIAL DE LA TIERRA (LST) Y EMISIVIDAD.

El producto MOD11A1 proporciona información sobre la temperatura superficial de la tierra (LST) y la emisividad.

LST es el resultado de la compleja interacción de energía entre la superficie de la Tierra y la atmósfera. Dado que la temperatura de la superficie terrestre es uno de los parámetros clave en la física de los procesos de la superficie de la Tierra, es un buen indicador de efecto invernadero.

La capacidad de medir LST, es muy importante para el proceso de clasificación de tipos de superficie terrestre y también tiene un impacto significativo sobre los procesos hidrológicos, como la evapotranspiración.

La emisividad es un número adimensional, igual al cociente entre la radiación emitida por un objeto y un cuerpo negro a la misma temperatura.

El producto MOD11 brinda estimaciones de LST en grados Kelvin al contacto entre la cobertura y la atmósfera, tiene una resolución espacial de 1000 m, tanto a escala diaria como composiciones de 8 días (MOD11A1 y MOD11A2).

3.2.3 MOD13. ÍNDICES DE VEGETACIÓN (NDVI Y EVI)

MODIS incluye productos estándar de Índices de Vegetación (VI), el índice de diferencia normalizada de vegetación (NDVI) y el índice de vegetación mejorado (EVI). Estos IV caracterizan eficazmente los estados bio-físicos y bioquímicos de las superficies con vegetación.

Este producto tiene una resolución espacial de 250 m, y una resolución temporal de 16 días.

3.2.4 MCD 43 A3. SUPERFICIE DE REFLECTANCIA BRDF / ALBEDO

La superficie terrestre es anisotrópica, es decir, dependiendo del ángulo de iluminación solar, la energía reflejada no es la misma en todas las direcciones como ocurre con superficies isotrópicas.

Debido a la anisotropía, la reflectancia superficial depende de las propiedades espectrales de la radiación incidente, y también de la dirección desde la cual dicha superficie es iluminada y vista, es decir, de la geometría iluminación-visión (sol-sensor) con la cual es captada.

La dependencia de la reflectancia superficial en la geometría sol-sensor es descrita por la Función de Distribución de la Reflectancia Bidireccional (BRDF), la cual permite ajustar los valores de la reflectancia para minimizar los efectos de la anisotropía. Esto es particularmente importante en el caso de sensores que tienen ángulos de observación muy amplios como MODIS.

La serie de productos MOD43 describe el albedo, los parámetros de distribución de la función de reflectancia bidireccional (BRDF), que caracteriza la anisotropía de las coberturas del suelo y la reflectancia corregida por esta función.

El producto MODIS BRDF / Albedo se utiliza para determinar albedos globales superficiales de la tierra. El producto se basa en múltiples fechas, y cielo despejado. Se obtiene cada 16 días y su resolución espacial de 1 km.

El producto BRDF / Albedo permite:

- 1) Normalizar datos de MODIS para ángulos de visualización estándar e iluminación, eliminando así efectos geométricos a partir de imágenes multi-dato.

- 2) Cuantificar la información de la señal, que está relacionada con el tipo de la cubierta de suelo

3) Proporcionar un modelo de superficie de la dispersión para la modelización de la capa límite superficial y del clima global.

3.3 HERRAMIENTAS PARA EL TRATAMIENTO DE LA INFORMACIÓN

En este apartado se presentan las herramientas utilizadas para la consecución de los objetivos del Proyecto.

Como primera fase se recopilaron los datos necesarios para el análisis y procesamiento de la información satelital, a partir del sensor MODIS TERRA.

Se ha utilizado Reverb que es una aplicación Web para la descarga de imágenes satelitales en el marco de la plataforma creada por la NASA National Aeronautics and Space Administration de los Estados Unidos, agencia gubernamental responsable de los programas espaciales.

La reproyección y transformación del formato de las imágenes, se realiza a través de la aplicación Modis Reprojection Tools (MRT). Esta información ha sido integrada en un Sistema de Información Geográfica (SIG), utilizando el software GRASS (Geographic Resources Analysis Support System) versión 6.4.2, bajo licencia GPL (software libre). Para el procesamiento de la gran cantidad de datos y generación de indicadores se utiliza la herramienta SORPRESA toolbox (Sistema Operacional Regional de Previsión de Efectos de Sequías Agudas, García Galiano *et al.*, 2007), embebida en dicho sistema de información, desarrollada para el seguimiento de zonas de riego y condiciones de sequía mediante teledetección.

3.3.1 SOFTWARE REVERB

La herramienta utilizada para descargar los archivos en formato HDF correspondientes al sensor MODIS es Reverb

(<http://reverb.echo.nasa.gov/reverb/>).

Esta herramienta permite la selección de la zona de estudio así como la fecha y la hora, y los indicadores de interés hidrológico. La Figura 9 presenta el aspecto de la página web del sistema Reverb.

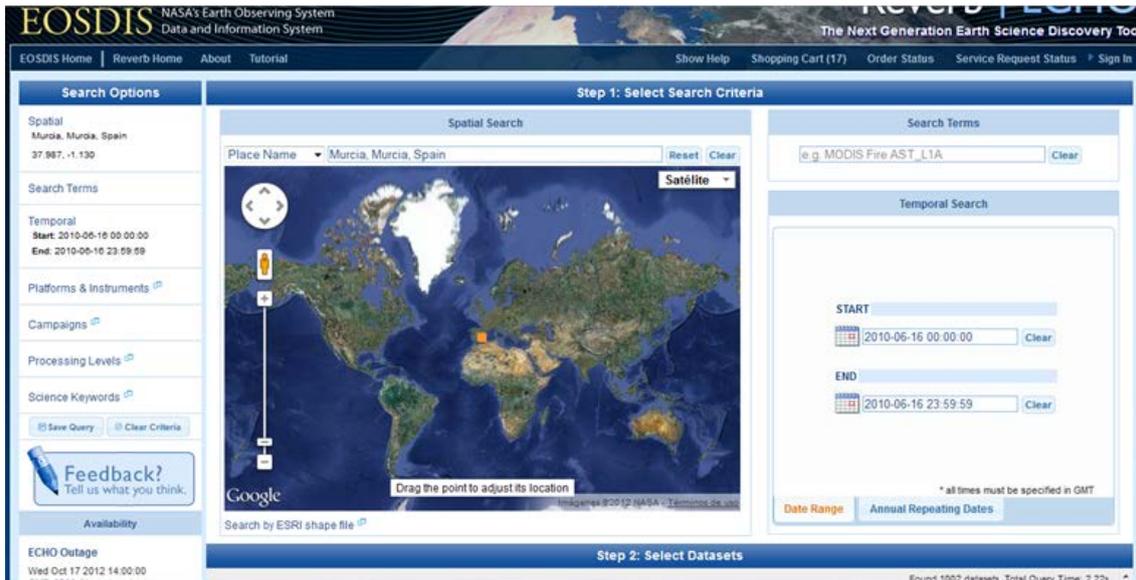


Figura 9: Aspecto del sistema Reverb

3.3.2 FORMATO HDF (HIERARCHICAL DATA FORMAT)

El Formato de datos Jerárquico HDF (Hierarchical Data Format), tiene la particularidad de que es un conjunto de formatos de archivos para almacenar y organizar grandes cantidades de datos numéricos.

Las características más representativas del formato HDF (Hierarchical Data Format), son las siguientes:

- Permite obtener información acerca de los datos de un archivo analizando el mismo, sin necesidad de recurrir a fuentes externas.
- Permite almacenar datos de distinta naturaleza en un mismo archivo y relacionarlos entre ellos.
- Estandariza los formatos y las descripciones de los tipos de datos más comúnmente empleados.
- Se trata de un formato abierto, con sus especificaciones publicadas, lo que permite su implementación en diversas aplicaciones informáticas, facilitando la portabilidad, así como permitiendo al usuario desarrollar sus propias aplicaciones específicas.

Es flexible y puede ser adaptado para almacenar cualquier tipo de dato.

Dentro del archivo de HDF se almacenan un conjunto de datos científicos (SDS). Los valores almacenados en el SDS (aparte de las matrices de geolocalización) son valores de entero corto con el fin de ahorrar espacio de almacenamiento. Para calcular el valor de datos real, se necesita aplicar al valor almacenado un `scale_factor` y `add_offset`. Se utiliza para obtener el valor real la siguiente ecuación:

$$\text{valor} = \text{scale_factor} * (\text{stored_value} - \text{add_offset}) \quad (1)$$

Una vez obtenida la imagen del Reverb en formato HDF, se convierte al formato Geotiff con el programa Modis Reprojection Tool (MRT), para que pueda ser procesada bajo el SIG GRASS.

El formato de los HDF es el siguiente:

ESDT.AYYYYDDD.hHHvVV.CCC.YYYDDDDHHMMSS.hdf

- ESDT = Earth Science Data Type name (e.j., MOD19A1). La primera parte del nombre, es su nombre corto. Las tres primeras letras hacen referencia a la plataforma: MOD para Terra, MYD para Aqua y MCD para datos combinados Terra/Aqua. El número se refiere al tipo de producto, CMG indica el producto global "Climatic Modeling Grid"
- YYYYYDDD = Año y día de adquisición; Después de la letra A aparece la fecha de adquisición (año y día juliano en los cuatro primeros y tres últimos dígitos respectivamente)
- HH = Número horizontal de "tile".(0-35)
- VV = Número vertical de "tile".(0-17)
- CCC = Número de version de la colección (001, 002, 003, etc.)
- YYYDDDDHHMMSS = Finalmente aparece la fecha de procesamiento (año, día juliano, hora, minutos y segundos).
- hdf = Sufijo denotando fichero format HDF.

El "tile" correspondiente a España es el h17v05, y la distribución de los tiles de la superficie terrestre se muestra en la Figura 10.

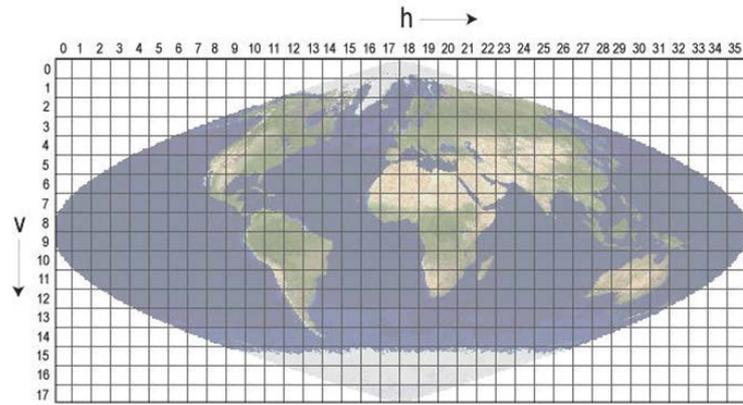


Figura 10: Distribución de tiles

Ejemplo:

MOD09A1.A2010209.h17v05.005.2010219055426.hdf

3.3.3 SOFTWARE MRT (MODIS REPROJECTION TOOLS)

La herramienta de reproyección MODIS Tool (MRT) es un software diseñado para ayudar a trabajar con datos MODIS. Se puede reproyectar sólo partes seleccionadas de la imagen o producto (subconjuntos espaciales), y seleccionar bandas de las imágenes (subconjuntos espectrales). El software guarda los datos de MODIS en formatos compatibles con los paquetes de software existentes (binario y Geotiff).

La herramienta se ejecuta en varias plataformas, incluyendo estaciones de trabajo Sun Solaris, estaciones de trabajo SGI IRIX, Linux y Microsoft Windows. La figura 11 presenta el aspecto del MRT.

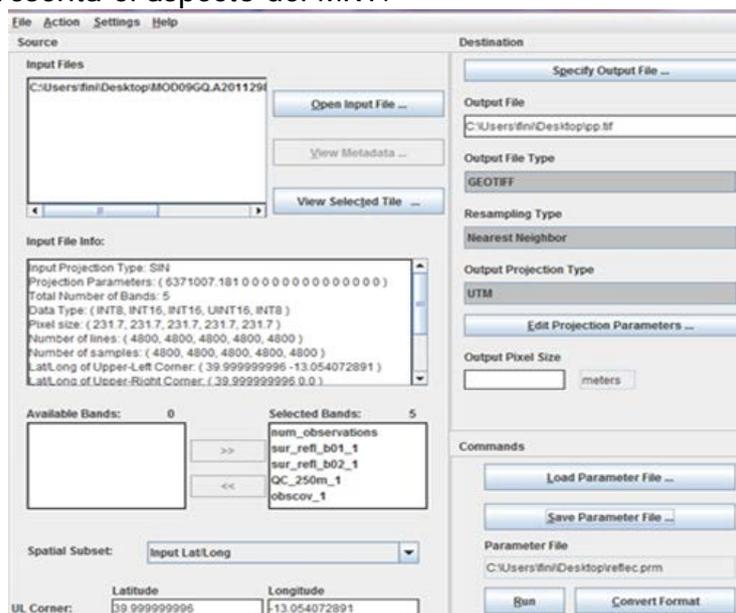


Figura 11: Aspecto del MRT Tools

3.3.4 SOFTWARE SORPRESA_TOOLBOX

La herramienta Sorpresa Toolbox (García y otros, 2007) fue desarrollada para el seguimiento y alerta temprana de sequías desde teledetección. Esta herramienta desarrollada en Tcl-tk bajo Linux, es empleada para automatizar procesos y algoritmos que emplean imágenes de satélite, entre otras aplicaciones, como por ejemplo transformar gran cantidad de datos del formato HDF a formato Geotiff a la vez. La Figura 12 presenta el aspecto de la aplicación Sorpresa Toolbox.



Figura 12: Sorpresa Toolbox

3.4 ETAPAS PARA EL PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN

Un primer paso, es la descarga de las imágenes objeto de estudio a través de la plataforma Reverb NASA. En esta herramienta se selecciona el área de interés de la que se desea obtener información, en este caso se seleccionará la Región de Murcia (España), a través de la pestaña de la página principal donde se indica el nombre de la zona ("place name").

El segundo paso, consiste en seleccionar el intervalo de tiempo de la base de datos. De esta manera se obtendrán las imágenes de cada indicador para el intervalo seleccionado, tanto diarios como 16 días.

El tercer paso consiste en seleccionar la base de datos disponible. La tabla 2 resume los datos y fechas de los productos de interés.

Tabla 2: Productos seleccionados

INDICADOR	BASE DE DATOS	FECHAS
Surface reflectance Daily L2G Global 250m	MOD 09GQ	80 fechas entre 2009-2011
Surface Reflectance 8-Day L3 Global 500m SIN rid V005	MOD 09A1	Periodo del 2009-2012
Land Surface Temperature/ Emissivity Daily L3 Global 1 Km	MOD 11A1	2012
Vegetation Indices 16-Day L3 Global 250m	MOD13Q1	2012
Albedo 16_Day L3 Global 1 Km	MCD43A3	2009-2011

Finalmente, se selecciona los datos en "Search for Granules" (Figura 13).

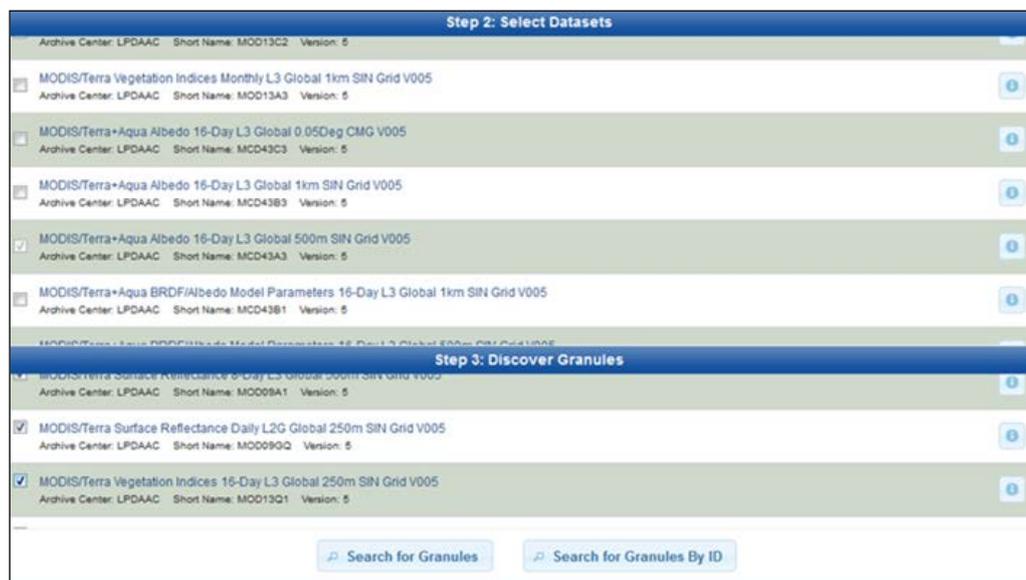


Figura 13: Selección de los indicadores

La ventana que aparece después de realizar el tercer paso, presenta las opciones de los datos disponibles para el intervalo de tiempo seleccionado. A continuación se lleva a cabo la descarga de la selección en formato HDF.

Una vez descargado el archivo/s HDF, es necesario transformarlos a formato Geotiff. Se utiliza la herramienta MRT tool mencionada previamente (Figura 12).

Cada producto presenta una serie de bandas, y de todas esas bandas se seleccionan aquellas que van a ser objeto de estudio. En la Tabla 3 se recogen en azul, las bandas seleccionadas para su procesamiento.

Tabla 3: Selección de bandas *mediante* MRT tool

Reflectancia superficial	Índices de vegetación	Temperatura superficial	Albedo
Sur_refl_b01	250m_16_days_NDVI	LST_Day_1km	Albedo_BSA_Band1
Sur_refl_b02	250m_16_days_EVI	QC_Day	Albedo_BSA_Band2
Sur_refl_b03	250m_16_days_VI_Quality	Day_view_time	Albedo_BSA_Band3
Sur_refl_b04	250_16_days_red_reflectance	Day_view_angle	Albedo_BSA_Band4
Sur_refl_b05	250m_16_days_NIR_reflectance	LST_Night_1km	Albedo_BSA_Band5
Sur_refl_b06	250m_16_daus_blue_reflectance	QC_Night	Albedo_BSA_Band6
Sur_refl_b07	250m_16_days_MIR_reflectance	Night_view_time	Albedo_BSA_Band7
Sur_refl_qc_500m	250m_16_days_view_zenith_angle	Night_view_angle	Albedo_BSA_nir
Sur_refl_szen	250m_16_days_sun_zenith_angle	Emis_31	Albedo_BSA_shortwave
Sur_refl_vzen	250m_16_days_relative_azimuth_angle	Emis_32	Albedo_WSA_Band1
Sur_refl_state_500m	250m_16_days_composite_day_of_the_year	Clear_day_cov	Albedo_WSA_Band2
Sur_refl_date_500m	250m_16_days_pixel_reliability	Clear_night_cov	Albedo_WSA_Band3
Sur_refl_day_of_year			Albedo_WSA_Band4
			Albedo_WSA_Band5
			Albedo_WSA_Band6
			Albedo_WSA_Band7
			Albedo_WSA_vis
			Albedo_WSA_nir
			Albedo_WSA_shortwave

Empleando el MRT tool, se obtiene el archivo de configuración (.prm), que facilita la automatización del proceso. Este archivo contiene los parámetros de proyección de coordenadas elipsoidales al sistema de coordenadas geográficas proyectado UTM (sistema WGS_84, UTM 30) y los parámetros de conversión de formato .hdf a .tiff.

Una vez obtenido el archivo para una imagen en concreto, se aplica los mismos parámetros al resto de imágenes, empleando el archivo .prm en un "script" de la herramienta Sorpresa Toolbox. La figura 14 presenta el archivo .prm con los parámetros de conversión.

```

INPUT_FILENAME = C:\Users\fini\Desktop
\MOD09GQ.A2011250.h17v05.005.2011252060134.hdf
SPECTRAL_SUBSET = ( 1 1 1 1 1 )
SPATIAL_SUBSET_TYPE = INPUT_LAT_LONG
SPATIAL_SUBSET_UL_CORNER = ( 39.99999996 -13.054072891
)
SPATIAL_SUBSET_LR_CORNER = ( 29.99999997 0.0 )
OUTPUT_FILENAME = C:\Users\fini\Desktop\pp.tif
RESAMPLING_TYPE = NEAREST_NEIGHBOR
OUTPUT_PROJECTION_TYPE = UTM
OUTPUT_PROJECTION_PARAMETERS = (
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 )
DATUM = WGS84
UTM_ZONE = 30

```

Figura 14: Aspecto de un archivo en .prm

En dicho "script" se renombra los archivos tiff obtenidos, para facilitar la búsqueda de acuerdo al siguiente criterio:

FECHA.RESOLUCIONTEMPORAL.RESOLUCIONESPACIAL.INDICADOR.geotiff

Ejemplo de los cambios que se realizan:

Tabla 4: Cambio de HDF a Geotiff

INDICADOR	NOMBRE HDF	TIFF
MOD 09GQ	MOD09A1.A2010209... (.hdf)	2010209.1_250_refl_b01.tiff
MOD 11A1	MOD11A1.A2010209... (.hdf)	2010209.1_1_LST.tiff
MOD13Q1	MOD13Q1.A2010209... (.hdf)	2010209.16_250_NDVI.tiff
MCD43A3	MCD43A3.A2010209... (.hdf)	2010209.1_1_albedo.tiff

Además se hace un filtrado de valores de acuerdo con el rango de valores máximos y mínimos definido para cada indicador, habiendo aplicado el factor de escala correspondiente. Se realiza también el cambio de unidades que se requiera, por ejemplo para el indicador de temperatura superficial (LST), los datos se expresan en K y ha sido necesario pasarlo a °C.

Tabla 5: Rango de valores y factores de escala

Indicador	BD	Unidades	Rango de valores	Factor de escala	Offset
Reflectancia superficial	MOD09A1	reflectancia	-100 -16000	0.0001	0
Índices de vegetación	MOD13Q1		-2000-100000	0.0001	0
Temperatura superficial	MOD11A1	Kelvin	7500-65535	0.02	0
Albedo	MCD43A3	Adimensional	0-32766	0.0010	0

Finalmente se carga a la vez todas las bandas de cada indicador en el SIG GRASS, mediante la orden "r.in.gdal". La orden "r.in.gdal" utiliza la herramienta GDAL (GRASS Raster Data Import Program), para la carga de archivos ráster y su transformación en una capa de mapa ráster binario.

Bajo el entorno GRASS, se ha creado una base de datos, denominada SIG_BD, que incorpora toda la información tanto ráster como vectorial. Dentro de ésta, se han definido *Locations*, en diferentes sistemas de referencia, para facilitar la reproyección de los diferentes mapas empleados en el PFC. La Location principal es la creada en el sistema de referencia geodésico European Terrestrial Reference System 1989 (ETRS89), proyección Universal Transversal Mercator (UTM), sistema de referencia oficial para España (REAL DECRETO 1071/2007, de 27 de julio).

Se define dentro de éste, diferentes MAPSET en función del tipo de información a tratar (MODIS, LANDSAT...) (Figura 15).

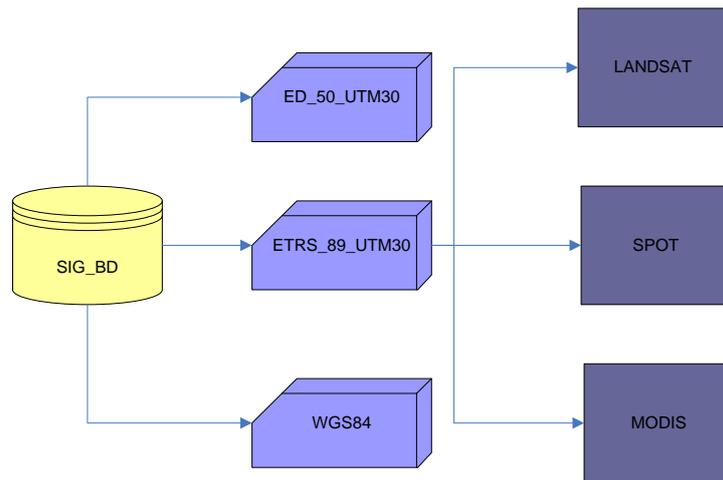


Figura 15: Estructura de la base de datos bajo el SIG GRASS

De entre todos los datos recogidos, se han seleccionado diez fechas para las que se va a realizar el contraste espacio-temporal de los productos: NDVI, SAVI, MSAVI, EVI, ALBEDO, TVDI, y VTCI, tanto del sensor Landsat como del sensor MODIS; las fechas seleccionadas han sido:

Tabla 6: Fechas seleccionadas para el contraste MODIS-Landsat

2009	2010	2011
20090214	20100508	20110511
20090606	20100524	20110628
20090910	20100727	
	20100929	
	20101031	

3.5 CÁLCULO DE LOS ÍNDICES DE VEGETACIÓN

La firma espectral de una masa de hojas, Figura 16, presenta tres zonas diferenciadas del espectro electromagnético: el visible, el infrarrojo próximo y el infrarrojo medio.

- En el visible la reflectancia es baja y también la transmitancia, debido a la absorción de pigmentos fotosintéticos (clorofila, xantofila, antocianinas y carotenos).

- En el infrarrojo próximo, las hojas presentan una meseta alta de reflectancia (alrededor de 50%). El resto de energía es transmitida
- En el infrarrojo medio, el agua marca su presencia en las hojas produciendo fuertes bandas de absorción en la signatura resultante.

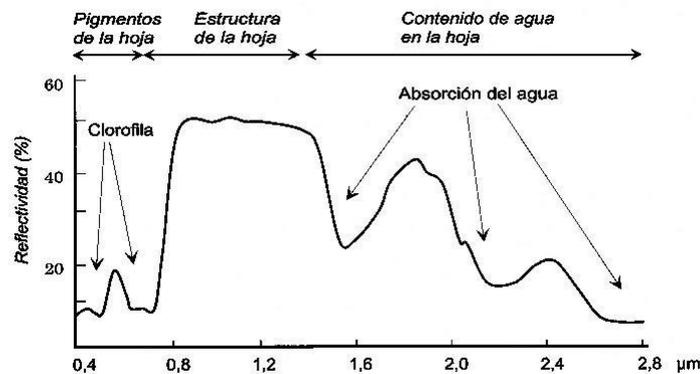


Figura 16: Firma espectral de la vegetación.

La vegetación vigorosa absorbe la radiación en la zona del visible, especialmente en el rojo (0,6-0,7) en tanto que refleja gran parte de la que le incide del infrarrojo próximo (0,7-1,1).

Para estudiar la cobertura vegetal de una zona mediante imágenes de satélites, se han desarrollado diversas técnicas que permiten tener datos cualitativos y cuantitativos del estado de la vegetación.

Los índices espectrales de vegetación son transformaciones desarrolladas para caracterizar las cubiertas vegetales reforzando la contribución espectral debida a la cubierta vegetal, en tanto que minimizan la influencia de factores distorsionante como el suelo, la irradiancia solar, el ángulo de elevación solar y la propia atmósfera (Pinilla 1995).

De acuerdo a la recopilación de indicadores, realizada por García (2011) los índices de vegetación parten del supuesto de que la vegetación tiene un comportamiento distinto en cada longitud de onda en función de su estado vegetativo y desarrollo alcanzado, y consisten en la combinación de bandas espectrales de la vegetación al tiempo que atenúan las de otros factores como el suelo, y las condiciones de iluminación y atmosféricas.

3.5.1 *ÍNDICE DE VEGETACIÓN DIFERENCIA NORMALIZADA (NDVI)*

La formulación original es atribuida a Rouse *et al.*, (1974), este índice ha sido y está siendo ampliamente utilizado, estando basado en un intento de realzar las diferencias en la reflectividad entre las regiones espectrales del rojo y el infrarrojo cercano.

El NDVI es un índice derivado de las medidas de los valores de la reflectancia en la banda roja (banda 3) y el infrarrojo cercano (banda 4) del espectro electromagnético que describe la cantidad relativa de biomasa de una región a otra (Lillesand y Kieffer, 1987). Se calcula mediante la fórmula.

$$NDVI = \frac{(\rho_{NIR} - \rho_{RED})}{(\rho_{NIR} + \rho_{RED})} \quad (2)$$

donde:

- ρ_{NIR} = reflectancia en la banda 4 (infrarrojo Cercano)
- ρ_{RED} = reflectancia en la banda 3 (rojo)

NDVI puede adquirir valores comprendidos entre -1 y 1. El valor 0 corresponde a suelo completamente desnudo, sin vegetación) y 1 a suelo con una cubierta de biomasa máxima. Se puede presentar el caso en que NDVI presente valores negativos, lo que indicaría presencia de lámina de agua, nieve, nubes.

La importancia de este índice reside en su utilidad para determinar la presencia de vegetación, y realizar un seguimiento en su desarrollo. Así pues, permite determinar la eficiencia metabólica de la vegetación o localizar áreas donde el crecimiento de la vegetación es menor, distinguir vegetación sana, o vegetación con estrés por falta de agua, sequía, etc.

Para el cálculo del NDVI se utiliza la formulación (ecuación 2), pero las bandas utilizadas son diferentes dependiendo del sensor. El infrarrojo cercano corresponde a la banda 3, y el rojo a la banda 2 para Landsat, y en el cálculo de NDVI para MODIS se emplearían las bandas 1 y 2.

A modo de ejemplo se presenta dos imágenes (Figura 17) de la distribución espacial de NDVI para las estaciones de invierno y verano. Para la imagen de invierno se observan valores elevados de NDVI próximos a 1 (representados con tonos verdes oscuros) que se corresponden a zonas montañosas con vegetación. La otra imagen correspondiente a verano, los valores no son tan altos como en invierno, ganando espacio los tonos marrones, próximos a 0.

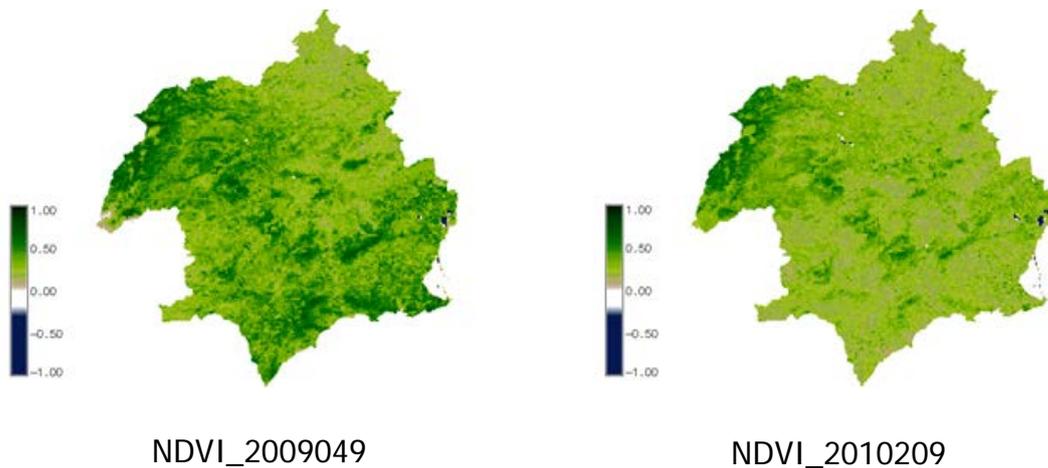


Figura 17: NDVI de invierno y verano de la Cuenca del Rio Segura

3.5.2 *ÍNDICE DE VEGETACIÓN AJUSTADO AL SUELO (SAVI)*

Índice propuesto por Huete (1988), es un índice muy similar a NDVI, introduce el valor de una constante en la ecuación L (factor de corrección de brillo del suelo), el cual está en función de la densidad de la vegetación del suelo, para lo que se requiere un conocimiento previo del estado del desarrollo del cultivo. Pero es necesario especificar L a través del ensayo de prueba y error, basado en la cantidad de vegetación en el área de estudio.

$$SAVI = (1 + L) \frac{(\rho_{NIR} - \rho_{RED})}{(L + \rho_{NIR} + \rho_{RED})} \quad (3)$$

donde L :

- $L=1$, densidad de vegetación baja.
- $L=0.5$, densidad de vegetación intermedia.
- $L=0.25$, densidad de vegetación alta.

En la siguiente figura se presenta dos imágenes del índice SAVI obtenidas de la Cuenca del Río Segura (Figura 18). Los valores más elevados corresponden a invierno (tonos marrones oscuros). En cambio en verano los valores son muy bajos, próximos a 0. Invierno presenta una distribución más uniforme, sin embargo verano presenta mayores diferencias. La presencia de valores altos no corresponden con las mismas zonas que muestra NDVI, principalmente en la cabecera de la cuenca.

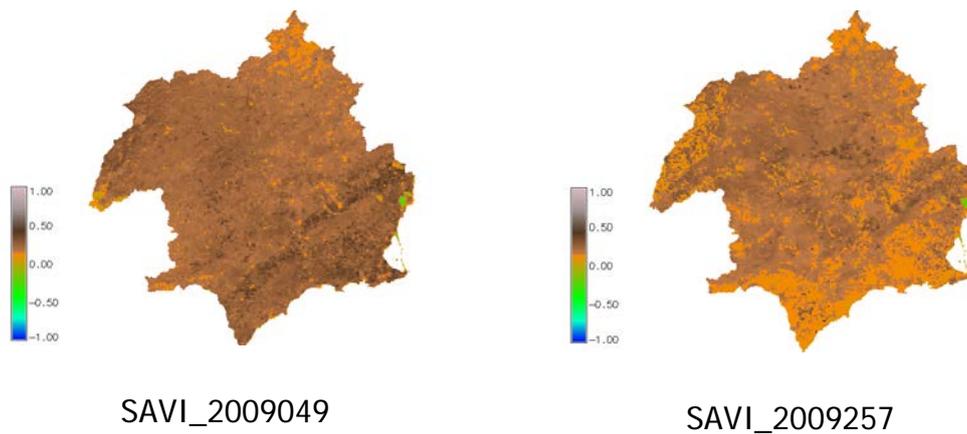


Figura 18: SAVI de invierno y verano para la Cuenca del Río Segura

3.5.3 ÍNDICE DE VEGETACIÓN AJUSTADO AL SUELO MODIFICADO (MSAVI)

El índice de vegetación ajustado al suelo modificado se denomina MSAVI y su posterior revisión, MSAVI2, Qi et al. (1994 a) desarrolló el MSAVI, y más tarde el MSAVI2 (Qi et al. 1994b), son índices de vegetación ajustados al suelo que pretenden abordar algunas de las limitaciones de NDVI cuando se aplica a zonas con un alto grado de la superficie expuesta del suelo. El MSAVI2 para mayor fiabilidad elimina la necesidad de encontrar la línea de suelo (Figura 19) de una parcela característica o incluso especificar explícitamente el factor de corrección de brillo de suelo.

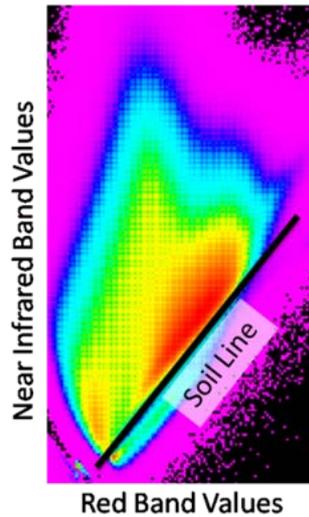


Figura 19: Línea de suelo

La fórmula para calcular MSAVI, en sí es la misma que la fórmula para el cálculo de SAVI:

$$MSAVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED} + L} (1 + L) \quad (4)$$

donde:

- R = Reflectancia de la banda roja
- NIR = Reflectancia de la banda infrarroja
- L =Brillo del suelo, factor de corrección

La diferencia entre SAVI y MSAVI viene dada por la diferencia a la hora de calcular L . En SAVI, L se calcula por la cantidad de vegetación que hay (generalmente se adopta un valor de $L=0.5$), y en MSAVI se utiliza la siguiente fórmula para calcular L :

$$L = 1 - \frac{2 \times s \times (\rho_{NIR} - \rho_{RED}) \times (\rho_{NIR} - s \times \rho_{RED})}{(\rho_{NIR} + \rho_{RED})} \quad (5)$$

donde:

- s = pendiente de la línea de suelo de una trama de valores de brillo del rojo frente al infrarrojo cercano.

Qi *et al.* (1994b), a partir de la ecuación MSAVI, ha sustituido $1-MSAVI(n)$ para una serie de n y luego resolvió la ecuación recursiva hasta $MSAVI(n) =$

MSAVI (n-1). Ello ha dado lugar a la siguiente fórmula, comúnmente llamada MSAVI2, lo que elimina la necesidad de encontrar la línea del suelo de una parcela característica de capacidad o incluso especificar explícitamente el brillo del suelo factor de corrección:

$$MSAVI = \frac{2 \cdot \rho_{NIR} + 1 - \sqrt{(2 \cdot \rho_{NIR} + 1)^2 - 8 \cdot (\rho_{NIR} - \rho_{RED})}}{2} \quad (6)$$

En todos los índices de vegetación se hacen las presunciones básicas: primero que una combinación algebraica de bandas espectrales puede proporcionar información útil sobre la vegetación y en segundo lugar que el suelo desnudo formará una línea en el espacio espectral, es decir, la línea del brillo del suelo como línea de vegetación cero. MSAVI2 es generalmente la versión que se utiliza.

Como ejemplo del cálculo de indicador MSAVI para la Cuenca del Río Segura se presenta la Figura 20. Presenta una distribución más realista que SAVI. Prestando atención a la cabecera de la Cuenca, en verano presenta los valores más elevados incluso para invierno. Sin embargo, en esta estación los mayores valores se registran en zonas que puede tratarse de regadíos en el valle del Segura y del campo de Cartagena.

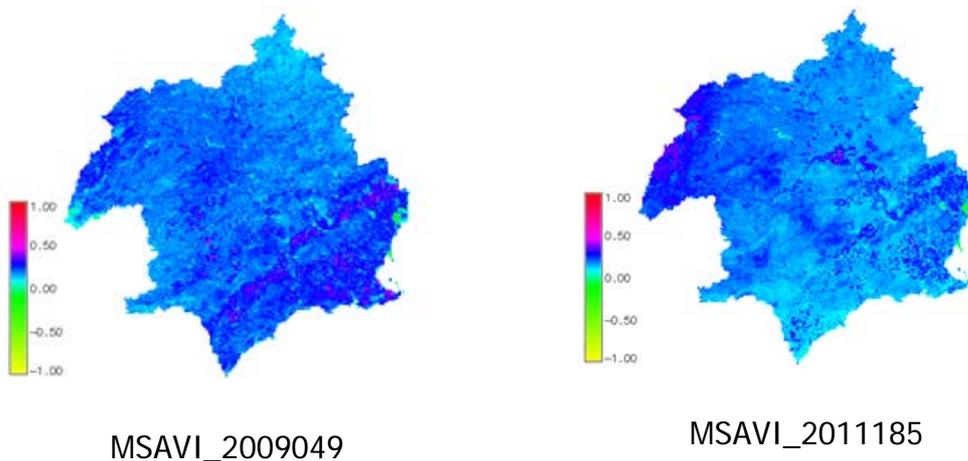


Figura 20: MSAVI de invierno y verano de la Cuenca del Río Segura.

3.5.4 ÍNDICE DE VEGETACIÓN MEJORADO (EVI)

Índice de Vegetación Mejorado (EVI) Huete, (2002) que incorpora coeficientes a partir de datos experimentales para mejorar el ajuste de este índice de vegetación al porcentaje de suelo desnudo.

$$EVI = \frac{G \cdot (\rho_{NIR} - \rho_{RED})}{(\rho_{NIR} + C1 \cdot \rho_{RED} - C2 \cdot \rho_{BLUE} + L)} \quad (7)$$

donde;

- A, R, IR_p: Reflectividad en la banda Azul, Rojo e Infrarrojo Cercano.
- C₁=6.0, coeficiente de resistencia atmosférica.
- C₂=7.5, coeficiente de resistencia atmosférica.
- G=2.5, Factor de ganancia.
- L=1, Factor de corrección.

La figura 21 presenta la distribución espacial del indicador EVI. Se observa que en invierno predominan valores altos, representados en tonos naranjas, principalmente en las zonas más elevadas próximas al litoral. Sin embargo en verano los valores son más bajos, tonos más amarillentos. Presenta una distribución parecida al indicador NDVI.

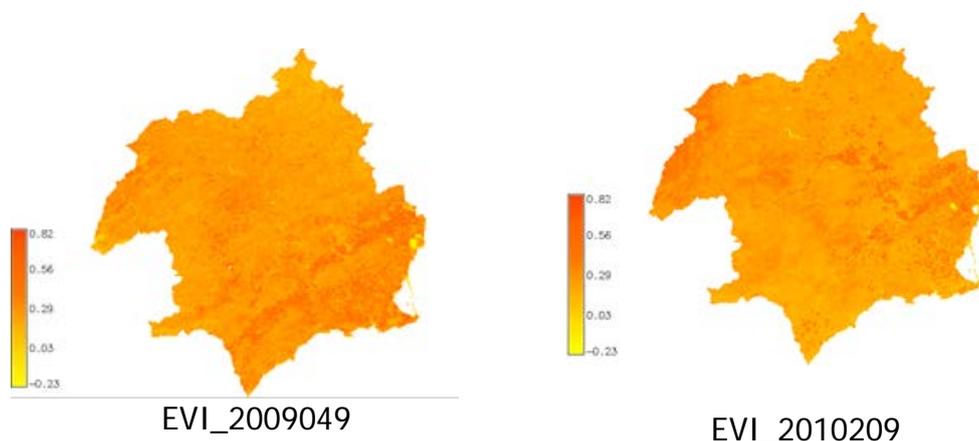


Figura 21: EVI para invierno y verano de la Cuenca de Río Segura.

3.5.5 ÍNDICE DE DIFERENCIA DE VEGETACIÓN (RDVI)

Fue propuesto para combinar las mejoras del índice de diferencia de vegetación (DVI=NIR-RED, Jordan, 1969) y el NDVI.

$$RDVI = \frac{(\rho_{NIR} - \rho_{RED})}{\sqrt{(\rho_{NIR} + \rho_{RED})}} \quad (8)$$

3.5.6 ÍNDICE DE VEGETACIÓN DE DIFERENCIA NORMALIZADA TRANSFORMADA (TNDVI)

El índice de vegetación de diferencia normalizada (Rouse, et al., 1974), indicado para la comparación de la biomasa de plantas de diversas condiciones ambientales.

$$TNDVI = \frac{\sqrt{(\rho_{NIR} - \rho_{RED})}}{(\rho_{NIR} + \rho_{RED})} \quad (9)$$

3.6 EL ESPACIO LST NDVI

Si se representan gráficamente los valores de LST versus NDVI, se obtiene un espacio con forma triangular o trapezoidal, Figura 22. En este espacio, el borde izquierdo representa el suelo desnudo. Cuando aumenta la cantidad de vegetación verde, el valor de NDVI aumenta a lo largo del eje X.

De este espacio se puede obtener rectas de regresión de los límites que forman el triángulo (o trapecio) que comprende la nube de puntos. La línea que define el límite superior es el borde seco, y la línea que define el límite inferior determina el borde húmedo.

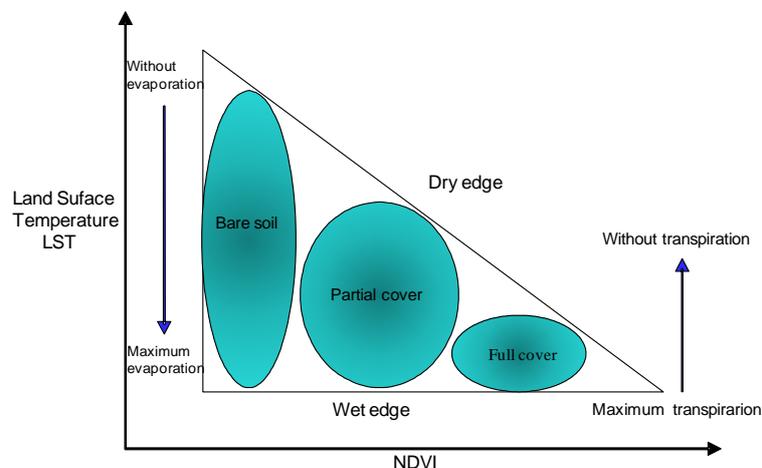


Figura 22: Representación del Espacio LST-NDVI (Sandholt et al., 2002)

El espacio triangular Figura 23, representa la distribución de las zonas de suelo desnudo (C), de cobertura parcial (B), de cobertura total (A) y de agua cuando NDVI es menor a 0, para un triángulo obtenido para la fecha 20100628. Como se observa el borde seco (suministro hídrico limitado o zonas secas) describe una correlación negativa con NDVI ($a = 46,31955$ y $b = -18,2734$). El borde húmedo en este caso, presenta una correlación positiva con NDVI ($a' = 25,38912$ y $b' = 7,91497$).

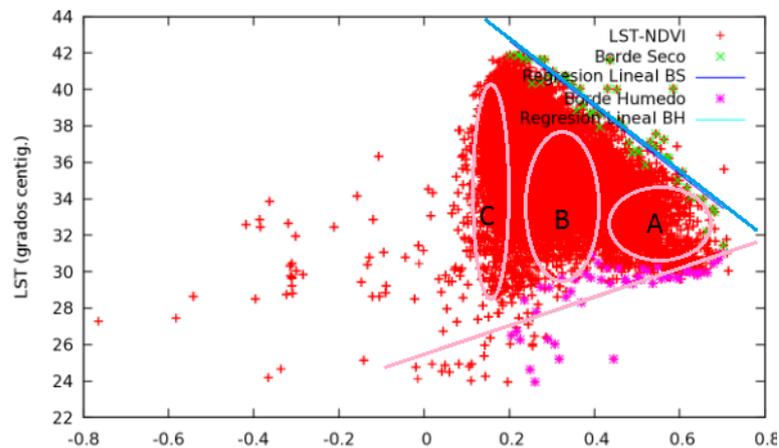


Figura 23: Distribución de las zonas del suelo en el espacio triangular

Se debe destacar que los coeficientes a , b , a' y b' de las rectas de regresión lineal se deben estimar para un área lo suficientemente grande como para que la humedad del suelo, en la capa superficial del terreno, pueda variar entre el punto de marchitez y la capacidad de campo a escala de celda, y exista una suficiente variabilidad de los tipos de vegetación. En caso de no ser así, los bordes seco y húmedo no serán adecuadamente definidos.

Para un punto LST-NDVI próximo al límite seco, existirá en el suelo una mínima disponibilidad de agua. Para un punto cercano al límite húmedo existirá en el suelo una máxima disponibilidad de agua.

En condiciones secas, la relación LST y NDVI se define por el borde superior borde seco del triángulo, que corresponde a la hipotenusa del triángulo (Sandholt *et. al.*, 2002).

Para la Cuenca del Río Segura, se observan triángulos en invierno y en verano, y trapecios en otoño y en primavera. Las imágenes a las que se hace referencia se presentan en el Anexo III.

3.6.1 ÍNDICES DERIVADOS DEL ESPACIO LST-NDVI.

El Índice de Sequedad Temperatura-Vegetación (TVDI, Sandholt *et al.*, 2002), está inversamente relacionada con la humedad del suelo, donde los valores altos indican condiciones secas y valores bajos condiciones húmedas.

$$TVDI = \frac{(LST_{NDVI} - LST_{NDVI \min})}{(LST_{NDVI \max} + LST_{NDVI \min})} \quad (10)$$

A modo de ejemplo la figura 24 presenta la distribución de TVDI correspondiente a otoño y verano. En la imagen de otoño los colores verdáceos se pueden deber a zonas en las que se registran mayores precipitaciones y temperaturas más bajas. En la imagen de verano los valores bajos pueden ser debidos a la influencia del mar y de igual forma a las zonas de mayor relieve.

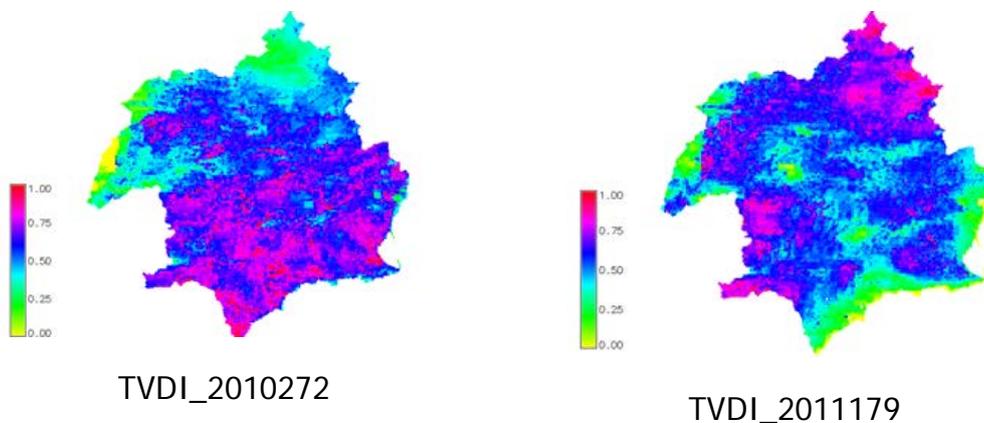


Figura 24: TVDI de otoño y verano para la Cuenca del Río Segura.

Otro Índice es el de Condición Temperatura-Vegetación (VTCI, Vegetation Temperature Condition Index) propuesto por Wang *et al.*, (2001), y aplicado para el seguimiento de sequías, se define como:

$$VTCI = \frac{(LST_{NDVI \max} + LST_{NDVI})}{(LST_{NDVI \max} - LST_{NDVI \min})} \quad (11)$$

$$LST_{NDVI_{i \max}} = a + bNDVI_i \quad (12) \text{ y } (13)$$

$$LST_{NDVI_{i \min}} = a' + b'NDVI_i$$

LSTNDVI_{max} y LSTNDVI_{min}, las rectas de regresión que definen el «borde seco» y «borde húmedo» del triángulo LST-NDVI, respectivamente. El borde seco representa la tasa de evapotranspiración mínima (zonas secas), mientras que el borde húmedo da su máximo valor (zonas sin restricción de agua).

La figura 25 corresponde a la distribución del VTCI, donde se puede realizar una interpretación similar a TVDI. Principalmente en las zonas de costa y cabecera.

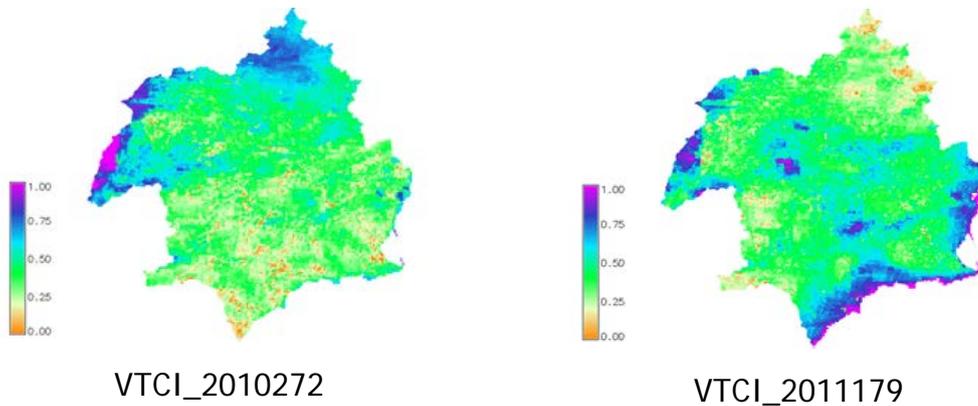


Figura 25: VTCI de otoño y primavera para la Cuenca del Río Segura.

3.6.2 OTROS PARÁMETROS DE SUPERFICIE EL ALBEDO

El albedo de superficie es estimado a partir de los valores de reflectancia de cada una de las siete bandas, usando la fórmula (14), estimación propuesta por Liang (2000).

$$\alpha = 0,160\alpha_1 + 0,291\alpha_2 + 0,243\alpha_3 + 0,116\alpha_4 + 0,112\alpha_5 + 0,081\alpha_7 - 0,0015 \quad (14)$$

Donde α de 1 a 7, corresponde al valor de la reflectancia de las bandas del sensor MODIS TERRA.

En la figura 27 se presentan dos imágenes de albedo, una correspondiente a invierno en la que se observa que albedo alcanza valores mínimos en las

zonas de montaña, y en la imagen de verano se alcanzan mayores valores, en torno a 0.5.

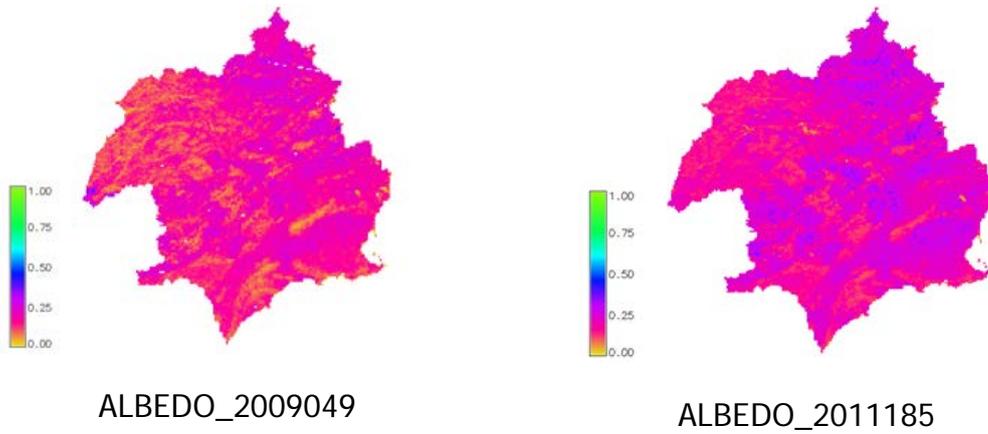


Figura 26: Albedo para invierno y verano de la Cuenca del Río Segura.

4 DISCUSIÓN Y RESULTADOS

4.1 ANÁLISIS DE LOS ESPACIOS LST-NDVI

Se analizan los gráficos de LST-NDVI para las fechas objeto de estudio. El análisis de este espacio, permite identificar dos rectas delimitando (i) condiciones de suelo seco (LSTmax), y (ii) otra correspondiente a condiciones no limitantes de agua (LSTmin). Las rectas de los bordes seco y húmedo se obtiene mediante ajuste por mínimos cuadrados. A partir de su análisis se deduce que, en todos los casos, la recta que se ajusta al borde seco se correlaciona de una manera inversa con NDVI (pendiente b negativa en todos los casos).

Para la interpretación de dichos espacios se ha tenido en cuenta las precipitaciones registradas en la cuenca del Segura para el periodo 2009-2012, valores de precipitación obtenidos de la Confederación Hidrográfica del Río Segura, CHS (AnexoII).

Los triangulos obtenidos (Anexo I) presentan las siguientes apreciaciones, entre las que destaca cambio de pendiente (b') en la recta que se ajusta al borde húmedo.

Para la fecha 20090214 (Figura 27) se observa una pendiente positiva para el borde húmedo. Teniendo en cuenta las precipitaciones de meses anteriores y la del propio mes, se interpreta que aunque no ha sido muy lluvioso, sí que existe una relación positiva entre la temperatura superficial del terreno y la vegetación.

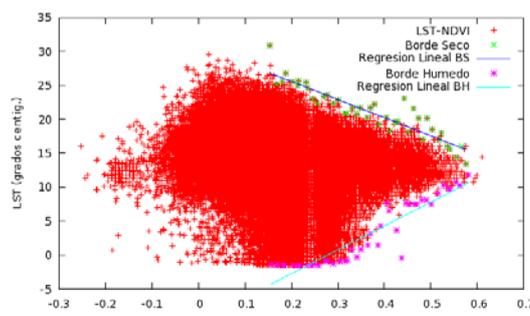


Figura 27: LST-NDVI 20090214

En la fecha 20090606 (Figura 28), se observa una pendiente del borde húmedo negativa con elevada temperatura superficial. Una posible causa de este fenómeno, puede ser debido a que los meses anteriores a la fecha, fueron secos, tal y como se desprende de los datos de precipitación. Por este motivo se interpreta la existencia de valores bajos de evapotranspiración, de NDVI y poca humedad.

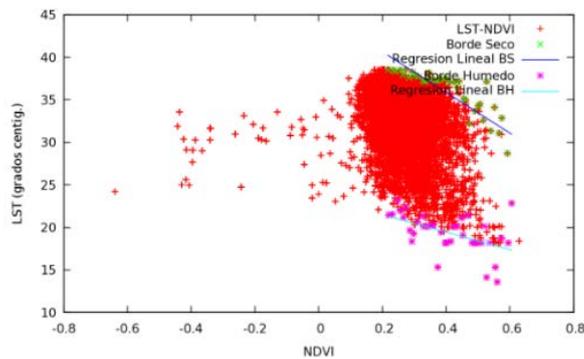


Figura 28: LST-DVI 20090606

Para las fechas 20100508 y 20100524, correspondientes a mayo, las rectas que representa el borde húmedo, tienen pendiente negativa (Figura 29). Si se analiza la serie de precipitación de los meses anteriores, fueron de poca importancia, unido a las elevadas temperaturas superficiales, se desprende un disminucion de la transpiración de las plantas.

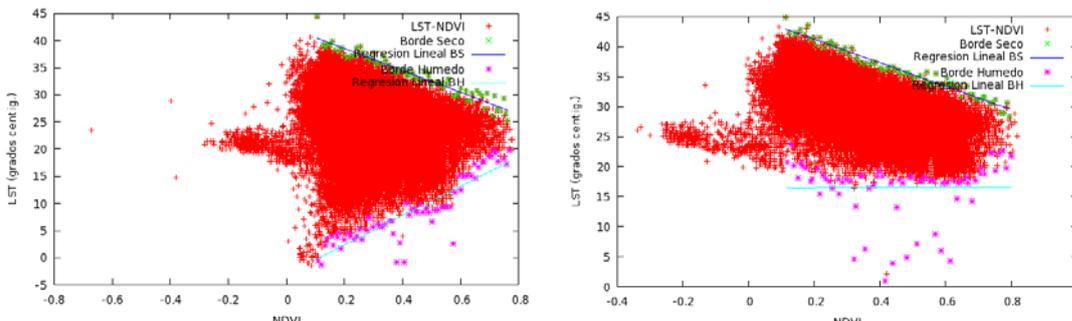


Figura 29: LST-NDVI 20100524

En el mes de julio la precipitación fue escasa $1,3 \text{ l/m}^2$, pero en el mes anterior, sí se produjeron precipitaciones de mayor cuantía, en torno a $29,9 \text{ l/m}^2$. Puede ser éste el motivo por el cual, en 20100727 (Figura 31), se observa una pendiente de borde húmedo positiva en el triángulo. Aunque las temperaturas sean elevadas las precipitaciones favorecen el desarrollo de la vegetación, con altos valores de NDVI.

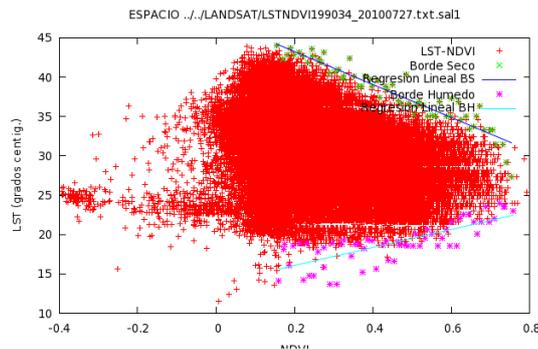


Figura 30: LST-NDVI 20100727

Para la fecha 20110628, el borde húmedo presenta pendiente positiva y elevada temperatura superficial. En los meses anteriores a esta fecha las precipitaciones fueron en torno a 30 l/m² por lo que hay una disminución de la evapotranspiración.

De manera general, se puede interpretar que en los meses secos, especialmente en los meses de verano con escasas precipitaciones, se produce un cambio de pendiente del borde húmedo, hacia una pendiente positiva, elevada temperatura superficial para altos valores de NDVI.

Se puede deducir estrés en la vegetación para los meses de verano, pero también presentan elevados valores de NDVI (tendencia del borde húmedo positiva), aunque exista una elevada temperatura superficial.

Para los meses de primavera la pendiente del borde húmedo es negativa. Aunque corresponde a meses secos, disminuye la temperatura superficial y aumentan los valores de NDVI en comparación con los meses de verano, lo que indica existencia de zonas de cultivo y zonas con vegetación seca.

4.2 CONTRASTE DE INDICADORES DE VEGETACION.

Considerando las diez fechas seleccionadas se ha llevado a cabo el cálculo de distintos indicadores derivados desde teledetección con interés hidrológico.

En el proyecto "Desarrollo y aplicación de indicadores de alerta temprana frente a sequías a escala regional desde MODIS", se realizó un estudio de indicadores basados en teledetección y datos meteorológicos para alerta temprana de sequías en cuencas del Sureste Español (García y otros, 2007).

Tomando de apoyo dicho proyecto, se ha comparado espacial y temporalmente distintos indicadores obtenidos con Landsat y Modis. El análisis se ha realizado tanto a nivel de cuenca (Cuenca del Río Segura), comarca (Campo de Cartagena) y parcela de cultivo (Villa Antonia). Los datos se presentan en el Anexo II y los mapas correspondientes figuran en el Anexo III. Desde los resultados obtenidos, se puede interpretar:

- **Análisis a nivel de parcela**

Analizando la Temperatura de la Superficie Terrestre (LST), los valores de MODIS son superiores a los de Landsat. De las fechas seleccionadas para el estudio, tres de ellas presentan nubes para Landsat (20100929, 20101031 y 20110511). Se observa que eliminando la última fecha, se obtiene un mejor ajuste para LST. En general, el contraste de LST se considera satisfactorio.

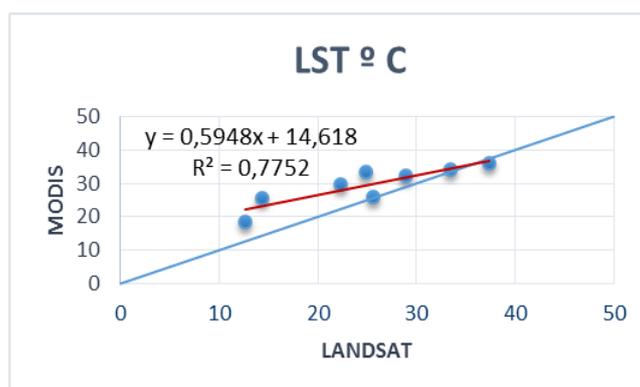


Figura 31: Correlación LST MODIS-Landsat

Para NDVI una diferencia apreciable entre los valores de Landsat y Modis principalmente para las dos primeras fechas, correspondientes a 20090214 y 20090606. En estas fechas la vegetación es menos vigorosa, quizás porque el cultivo se encuentre en fase de crecimiento. Quitando estos dos valores se observa un mejor ajuste de los datos a la recta de regresión. Esta divergencia también podría deberse a la diferente resolución de ambos satélites. En el caso de Landsat al tener mayor resolución espacial, existen píxeles con sólo vegetación. Sin embargo MODIS tiene menor resolución, y los píxeles están mezclados con otros usos del suelo.

Comparando los valores para NDVI y TNDVI (Figura 32), se observa igualmente una notable diferencia en los valores obtenidos, MODIS subestima para el caso de NDVI, sin embargo para el indicador TNDVI se obtiene lo contrario (sobreestima).

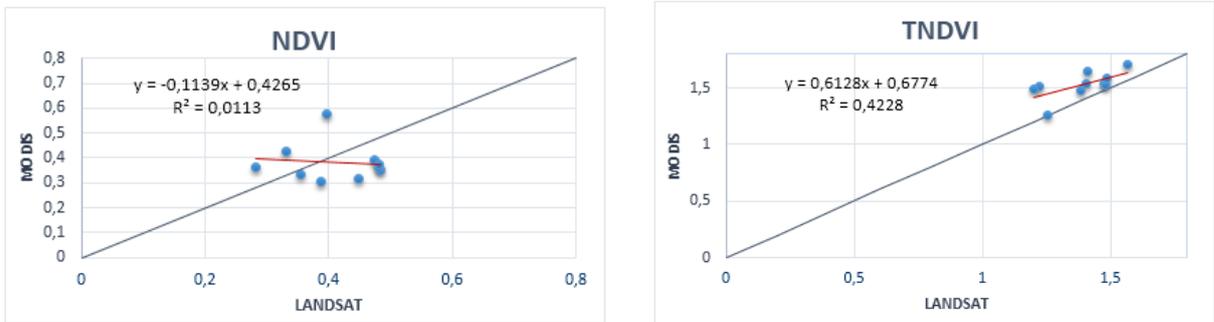


Figura 32: Progresiones lineales de NDVI y TNDVI

Realizando similares análisis entre los indicadores SAVI y MSAVI, se obtiene similares rectas de ajuste (Figura 33).

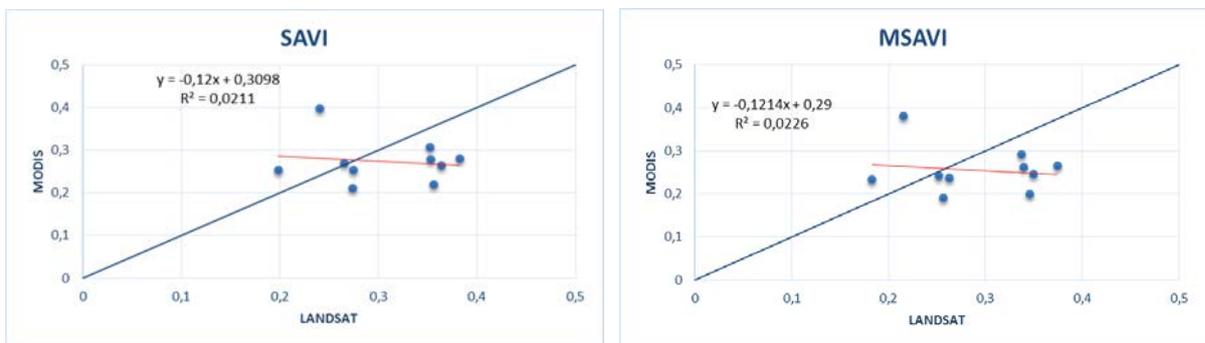


Figura 33: Progresiones lineales de SAVI y MSAVI

- **Análisis a nivel de comarca**

Para el Campo de Cartagena se ha realizado la diferencia Modis-Landsat de los mapas obtenidos para cada uno de los indicadores. Los mapas a los que se hace referencia se presentan en el Anexo IV.

Para albedo, en la fecha 20090214, correspondiente a invierno, se aprecia valores negativos (Figura 34). Es decir, los valores de albedo de MODIS son menores a los obtenidos para Landsat. Sin embargo en primavera los valores son positivos (los valores de Modis son superiores a Landsat).

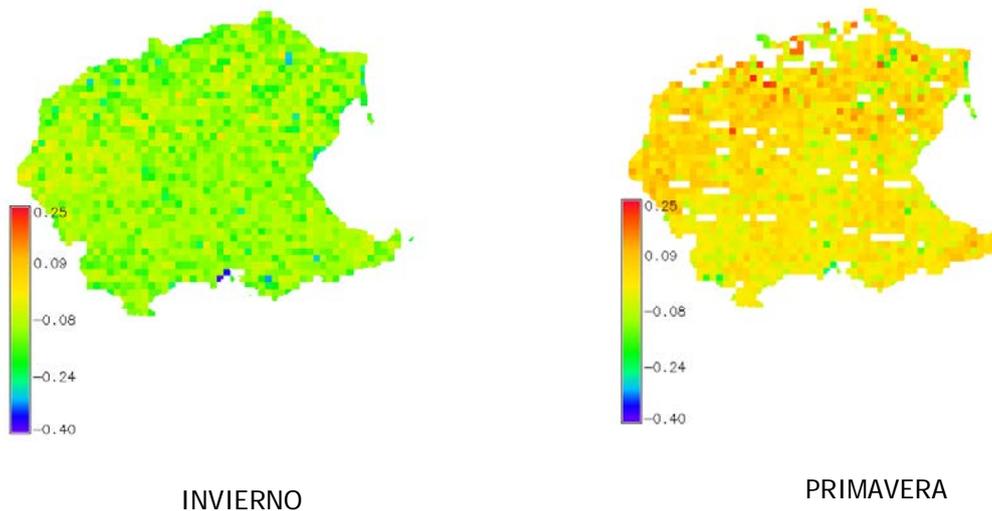


Figura 34: Imágenes de Albedo del Campo de Cartagena

Para NDVI, la diferencia es notable entre mapas de invierno con respecto a primavera-verano (Figura 35). Invierno presenta valores positivos, representados en verde, sobretodo en las zonas costeras. Es en estas zonas, donde se localizan las mayores altitudes y mayor humedad por la influencia del mar. MODIS obtiene mayores valores de NDVI, quizás por la existencia de masa forestal en el sur. En zonas llanas, se observan valores bajos de NDVI.

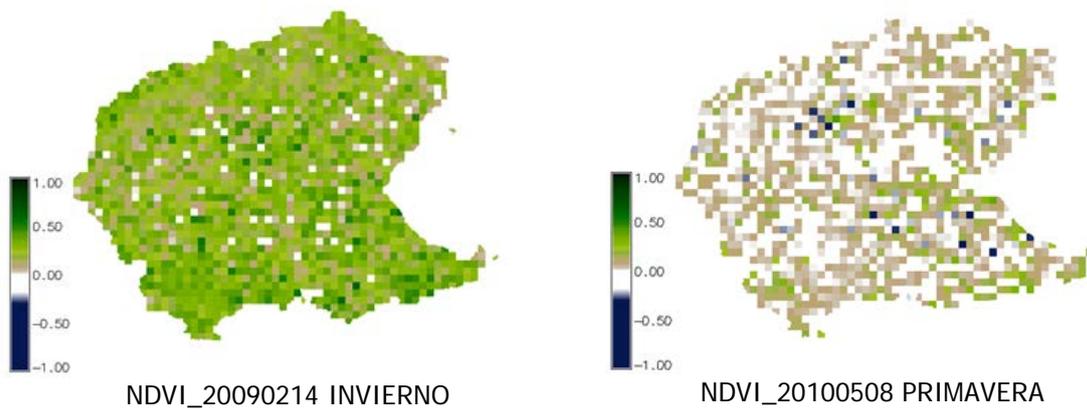


Figura 35: Imágenes de NDVI del Campo de Cartagena

Sin embargo, para los mapas de primavera-verano, las diferencias son menores. Se obtienen mapas muy similares para ambas estaciones. Los valores negativos representados en el mapa con pixeles azules. Se debe a que Landsat obtiene valores de NDVI muy altos, pixeles con sólo vegetación, sin ningún otro uso del suelo.

Para el indicador EVI, en el mapa correspondiente a la estación de invierno, se obtienen valores positivos (Figura 36). EVI obtenido con MODIS es superior a EVI de Landsat. Para la estación de verano, los valores son similares, apenas existe diferencia Modis-Landsat, principalmente donde se localizan gran parte de las zonas cultivadas, representadas en azul claro.

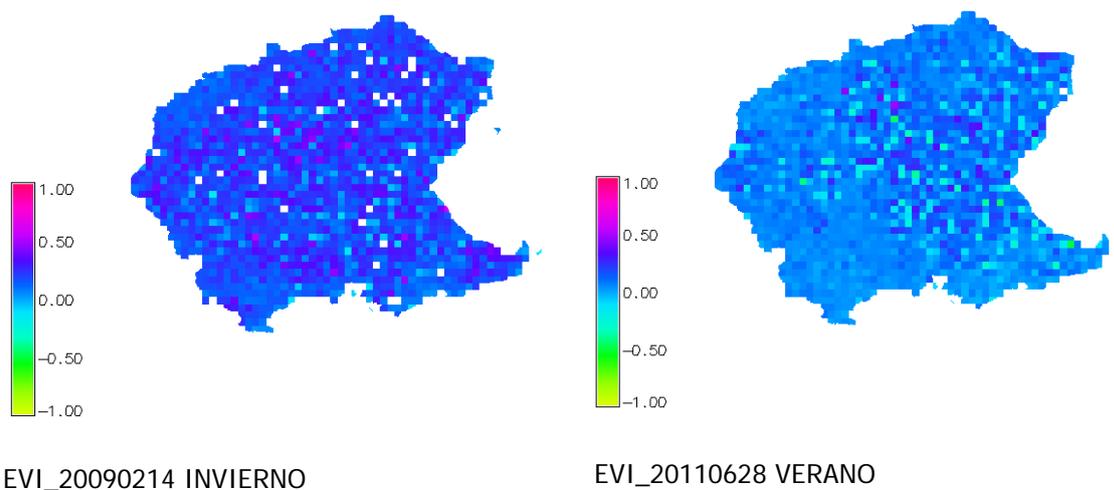


Figura 36: Imágenes de EVI del Campo de Cartagena

Al analizar el contraste SAVI MODIS-Landsat se observa valores positivos para invierno (Figura 37), predominando los colores ocres. Sin embargo para el resto de estaciones ganan espacio las tonalidades de verdes, que se corresponde con los valores negativos. Esto se debe a un mayor SAVI de Landsat con respecto al obtenido con MODIS.

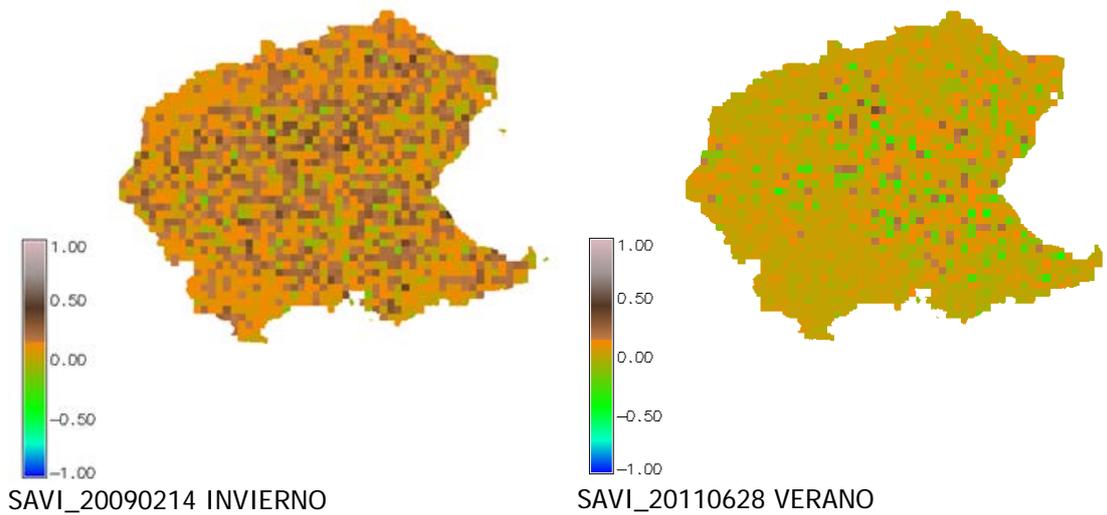


Figura 37: Imágenes de SAVI del Campo de Cartagena

Para MSAVI a excepción de un valor correspondiente a otoño, todos los valores obtenidos de la diferencia son negativos, es decir los valores de Landsat son superiores a MODIS.

En general se observa que los indicadores obtenidos con MODIS son superiores a los de Landsat en invierno. Para verano las diferencias MODIS-Landsat son menores, aunque se observan mayores valores de Landsat.

5 CONCLUSIONES

Con la realización de este proyecto se ha conseguido adquirir conocimientos sobre el uso de un SIG, sobre técnicas de teledetección satelital, desarrollo de habilidades en técnicas de datos espacio-temporales, descarga, uso y reproyección de imágenes satelitales y generación de indicadores basados en teledetección. Por lo que se puede deducir que:

1. Las imágenes satelitales del sensor MODIS son una herramienta de gran valor e importancia para los proyectos medio ambientales en Ingeniería Civil por su libre acceso. Es fundamental conocer las potencialidades de los productos ofrecidos por la NASA.
2. El sensor MODIS ha transformado la idea acerca de los fenómenos planetarios, gracias a la obtención de información del océano, atmósfera, tierra y criosfera, ofreciendo datos desde los que se pueden realizar estudios bastante precisos.
3. La utilización de un SIG, maximiza las posibilidades de aprovechamiento de los datos derivados desde imágenes satelitales, así como optimiza la calidad de los resultados en el procesamiento de la información.
4. Un inconveniente al utilizar sensores pasivos es la cobertura nubosa, o la falta de disponibilidad de imágenes debido a errores (principalmente errores de captura) que inutiliza muchas imágenes perdiendo continuidad y afectando a la periodicidad.
5. La obtención de parámetros biofísicos, a partir de información proveniente de sensores remotos, permite el seguimiento y vigilancia de la dinámica espacio-temporal de la vegetación de manera eficiente y económica.

6. Otro hándicap comprende a la resolución espacial, reñida con la resolución temporal. Ya que a más detalle de píxel, la resolución temporal es menor afectando a la periodicidad de paso del satélite.
7. Resulta difícil comparar MODIS-Landsat por las diferentes resoluciones (espacial, temporal y sobretodo en la espectral). En lo relativo a la resolución espectral, la ventana de observación es diferente por el desigual ancho de banda para ambos satélites, siendo mayor el ancho de banda de Landsat. En la resolución espacial, Landsat puede observar pixeles con sólo vegetación, mientras que en MODIS los pixeles están mezclados con otros usos del suelo.
8. Del contraste entre índices de vegetación a nivel de cuenca, podemos deducir mejores resultados para NDVI y EVI. Estos indicadores obtienen una distribución más realista que los índices SAVI y MSAVI, ya que refleja mejor la distribución espacial de la vegetación.
9. Entre los índices SAVI y MSAVI, se obtienen mejores resultados para el indicador MSAVI. Este indicador elimina la necesidad de calcular la línea de suelo, y con ello la necesidad conocer las características del suelo (tipo de vegetación, densidad, ...)
10. Para TVDI y VTCI se tienen resultados similares, valores elevados de humedad en la zona de la costa por la influencia del mar, y también en la cabecera de la cuenca (es donde se registran las precipitaciones más elevadas y temperaturas más bajas).
11. De los triángulos LST-NDVI obtenidos, se puede interpretar que en los meses secos, especialmente en verano, se produce un cambio de pendiente del borde húmedo. La pendiente positiva, refleja elevada temperatura superficial para valores altos de NDVI. Este hecho puede indicar estrés en la vegetación, ya que aunque existe elevada temperatura superficial también presenta elevado NDVI.

12. Se observa que los valores de los indicadores calculados con MODIS en invierno son superiores a los calculados con Landsat. Para verano las diferencias MODIS-Landsat son menores, aunque se observan mayores valores de Landsat.

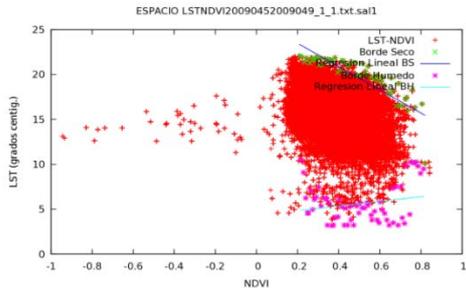
6 BIBLIOGRAFÍA

- Chuvienco E., 1995. Fundamentos de Teledetección Espacial. Rialp. Madrid.
- Chuvienco E. Estimación del Estado Hídrico de la Vegetación a partir de sensores de baja y alta resolución. *Geofocus* (Artículos), nº 1, 1-16.
- Confederacion Hidrográfica del Segura [On line]. www.chsegura.es
- Fedra, K., Kubat, M. 1993. Hybrid GIS and Remote Sensing in Environmental Applications. *International Institute for Applied Systems Analysis* RR-93-20.
- Flores, A., Pérez, F., 2007. Comparación de tres modelos de estimación de Evapotranspiración Mediante Imágenes Modis. *Teledetección, hacia un mejor entendimiento de la dinámica global y regional*, Ed. Martin.
- Flores V., Campanero A., y Escudero R., 2001. El sistema de vigilancia y alerta temprana de situaciones de sequía agrícola del M.A.P.A. a partir de análisis de datos diarios. *Teledetección, Medio Ambiente y Cambio Global*, 86-90.
- García A.G., Campos, A.N., Di Bella, C.M., 2000. Estimación de ET a partir del uso de sensores remotos e información meteorológica usando el método propuesto por Jackson. Fórmula para el cálculo de albedo, Manual de aplicación.
- García Galiano, S.G., Baille, A., González, M.M., Martínez, V., Urrea, M., Hernández, Z., Nortes, P., y Tanguy, M., 2007. Desarrollo y aplicación de indicadores de alerta temprana frente a saquías a escala regional desde MODIS. *Teledetección, Hacia un mejor entendimiento de la dinámica global y regional*. Ed. Martin, 223-229.
- García, S., González Real, M.M., Baille, A. and Martínez Álvarez, 2006. Desarrollo de un sistema de alerta temprana frente a sequías a nivel regional para las cuencas del Río Júcar y Río Segura. *Teledetección, hacia un mejor entendimiento de la dinámica global y regional*. Ed. Martin, 220-223.
- García, S.G., 2008. Apuntes de Hidrología (ITOP). Universidad Politecnica de Cartagena.
- Gilabert, M.A., González-Piqueras, J., García-Haro, F.J., Meliá, J. 2002. A generalizad soil-adjusted vegetation index. *Remote Sensing of Environment*, 303-310.
- Haboudane, D., Miller, J., Pattey, E., Zarco-Tejada, P., Strachan, I. B., 2004. Hyperspectral Vegetation Indices and novel algorithms for predicting green LAI of crop canopies: Modeling and validation in the context of precision agriculture. *Remote Sensing of Environment*, 337-352.
- Huete, A.R., 1988. A Soil Adjusted Vegetation Index. (SAVI), *Remote Sensing of Environment*, 25, 295-309.
- NCGIA, (Natural Centre of Geographic Information and Analysis), 1990.

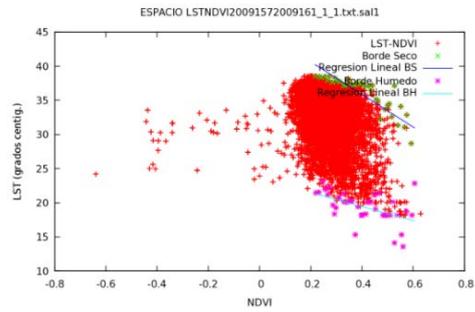
- Palomo, M., Ormeño, S., Rincón, J.A., El Formato HDF. Un modelo de ambiental. Universidad Politécnica de Madrid. http://www.conama10.es/conama10/download/files/CT%202010/Paneles/40852_panel.pdf
- Pinilla, C. 1995. Elementos de Teledetección. Ra-Ma. Madrid.
- Poveda, I., González, I., Diaz, A., Balbontin, C., 2009. Curso de especialista en SIG y Teledetección. Universidad de Castilla La Mancha. Instituto de desarrollo regional. On line
- Qi, J., Chehbouni, A., Huete, A.R., Kerr, Y.H. and Sorooschian, S. 1994. A Modified Soil Adjusted Vegetation Index. *Remote Sensing of Environment*. 48:119-126.
- Reca, J., Medina, J.L., Camacho, E., López, R. y Roldán, J. Aplicación de las técnicas de Teledetección satelital y SIG a la determinación y análisis de mapas de evapotranspiración, *Ingeniería del agua*, vol.6, nº1, 63-68.
- Rondeaux, G.; Steven, M.; and Baret. B., Optimization of Soil-Adjusted Vegetation Indices.
- Sandholt I., Rasmussen K. and Andersen, J., 2002, A simple interception of the surface temperature, vegetation index space for assessment of surface moisture, 79 (2-3), 213-224.
- Schott, J., 2007. Remote Sensing: The Image Chain Approach. 2 ed. New York Us. Oxford University Press.
- Shuling Liang, 2000. Narrowband to broadband conversions of land surface albedo, Algorithms. *Remote Sensing of Environment*, 76, 213-238.
- Vermote, E. 2008, Modis Land Surface Reflectance Science Computing Facility, Prepared by E.F. Vermote and S.Y. Kotchenova, Versión 1.1 (on line) <http://modis-sr.ltdri.org>
- Introducción a los SIG(online). <http://www.geogra.uah.es/gisweb/1modulosespanyol/IntroduccionSIG/GISModule/GISTheory.htm>
- MOD11A1 Daily LST (on line). http://www.icesb.ucsb.edu/modis/LstUsrGuide/usrguide_1dtil.html

ANEXO I. Triángulos LST-NDVI para Modis y Landsat.

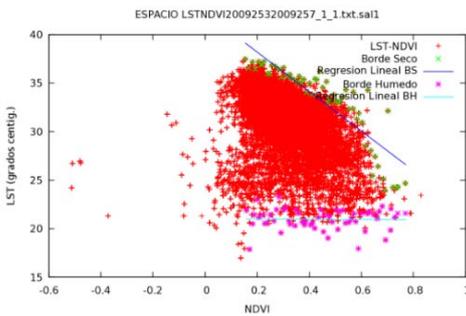
Triángulos LST-NDVI MODIS



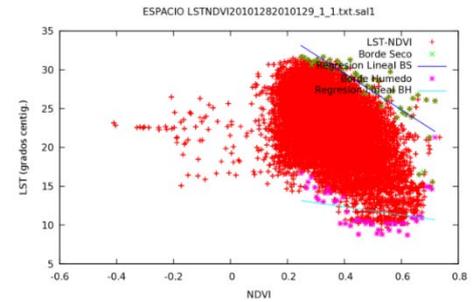
LST_NDVI2009045_2009049



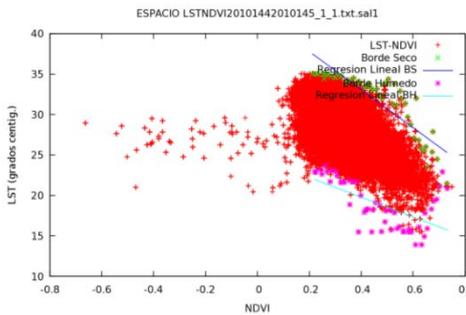
LST_NDVI2009157_2009161



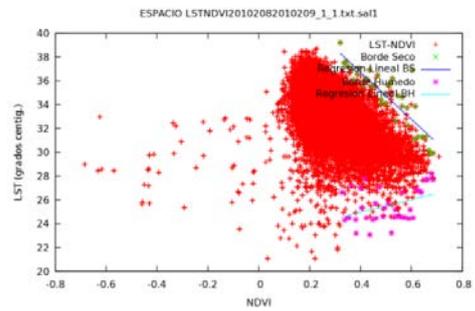
LST_NDVI2009253_2009257



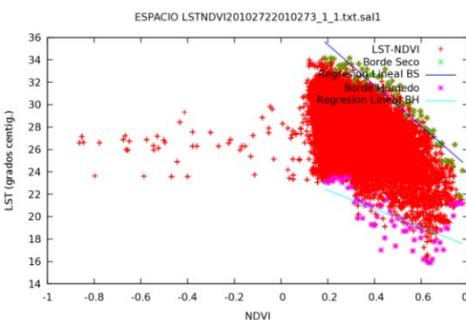
LST_NDVI_2010128_2010129



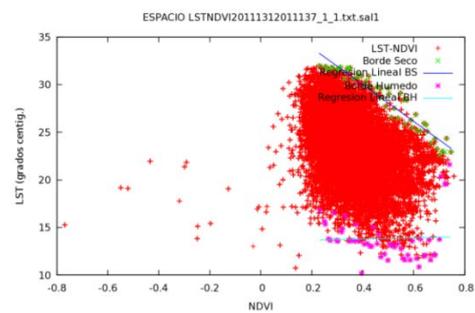
LST_NDVI_2010144_2010145



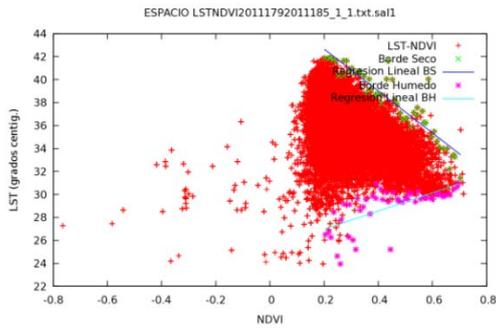
LST_NDVI_2010208_2010209



LST_NDVI_2010272_2010273



LST_NDVI_2011131_2011137



LST_NDVI_2011179_2011185

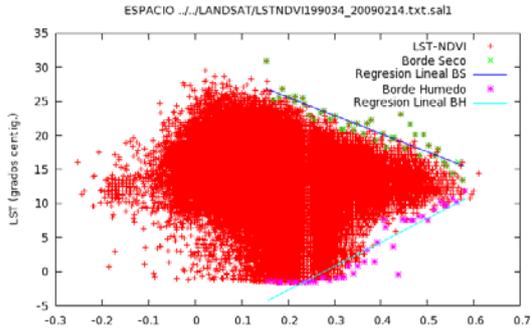
Tabla AI.1: Triángulos LST-NDVI para MODIS

FECHAS	a	b	a´	b´	Ts Max	Ts Min
LSTNDVI 2009045 2009049	26.062	-12.939	4.318	2.596	26.062	5.688
LSTNDVI 2009157 2009161	45.409	-23.872	23.535	-10.235	45.409	19.744
LSTNDVI 2009253 2009257	42.257	-20.327	21.048	-0.136	42.257	21.280
LSTNDVI 2010128 2010129	38.943	-23.491	14.412	-5.134	38.943	12.112
LSTNDVI 2010144 2010145	42.467	-23.485	24.655	-12.180	42.467	19.211
LSTNDVI 2010208 2010209	44.635	-19.782	22.896	5.198	44.635	26.097
LSTNDVI 2010272 2010273	38.998	-18.211	24.010	-8.289	38.998	20.276
LSTNDVI 2011131 2011137	37.730	-19.311	13.538	0.626	37.730	14.043
LSTNDVI 2011179 2011185	46.320	-18.270	25.389	7.915	46.320	29.430

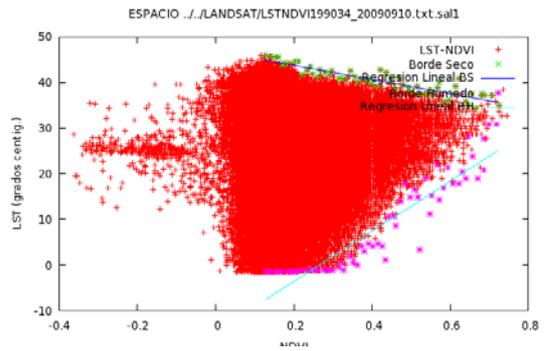
Tabla AII.2: Triángulos LST-NDVI para Landsat

Fechas	a	b	a´	b´	Ts max	Ts min
20090214	30.726	-27.190	-5.881	26.839	30.726	2.620
20090606	48.183	-20.104	6.858	32.085	48.183	17.006
20090910	47.221	-18.186	-14.553	58.802	47.221	9.025
20100508	41.643	-18.964	-1.638	25.434	41.643	8.481
20100524	45.687	-20.798	10.356	11.950	45.687	16.877
20100727	46.830	-20.527	13.616	13.483	46.830	20.299
20100929	41.179	-24.865	-2.334	31.284	41.179	11.248
20101031	25.142	-13.971	-4.729	11.607	25.142	23.919
20110511	46.001	-19.207	-10.369	29.098	46.001	3.207
20110628	61.203	-27.789	24.682	6.516	61.203	27.944

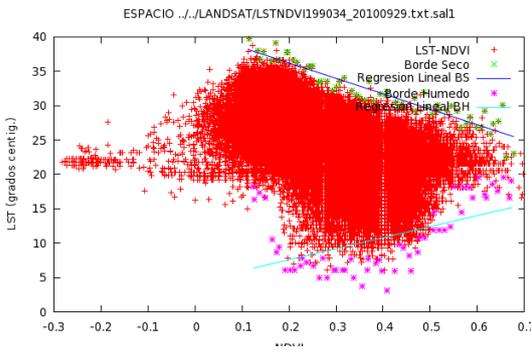
Triángulos LST-NDVI Landsat



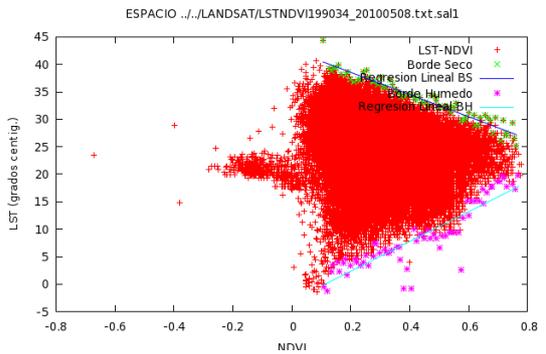
LST_NDVI_20090214



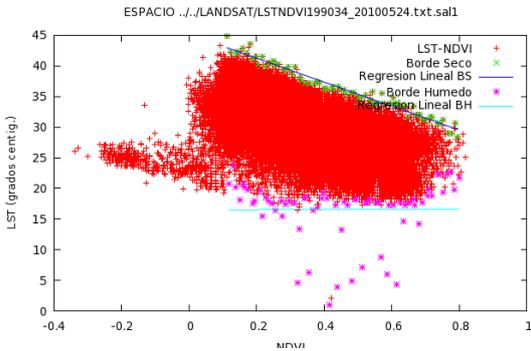
LST_NDVI_20090910



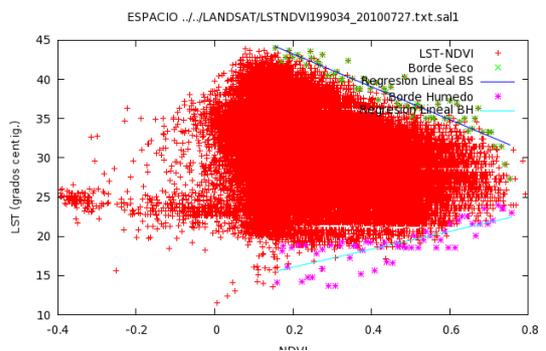
LST_NDVI_20090929



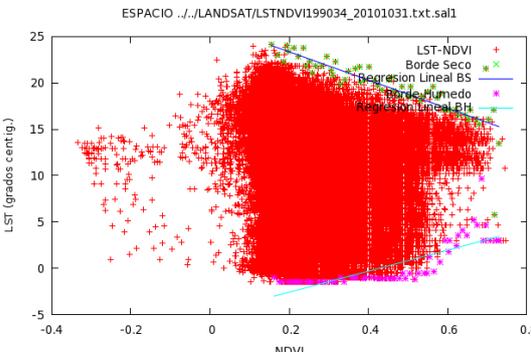
LST_NDVI_20100508



LST_NDVI_20100524



LST_NDVI_20100727



LST_NDVI_20101031

ANEXO II. Evolucion historica de Precipitación media mensual.

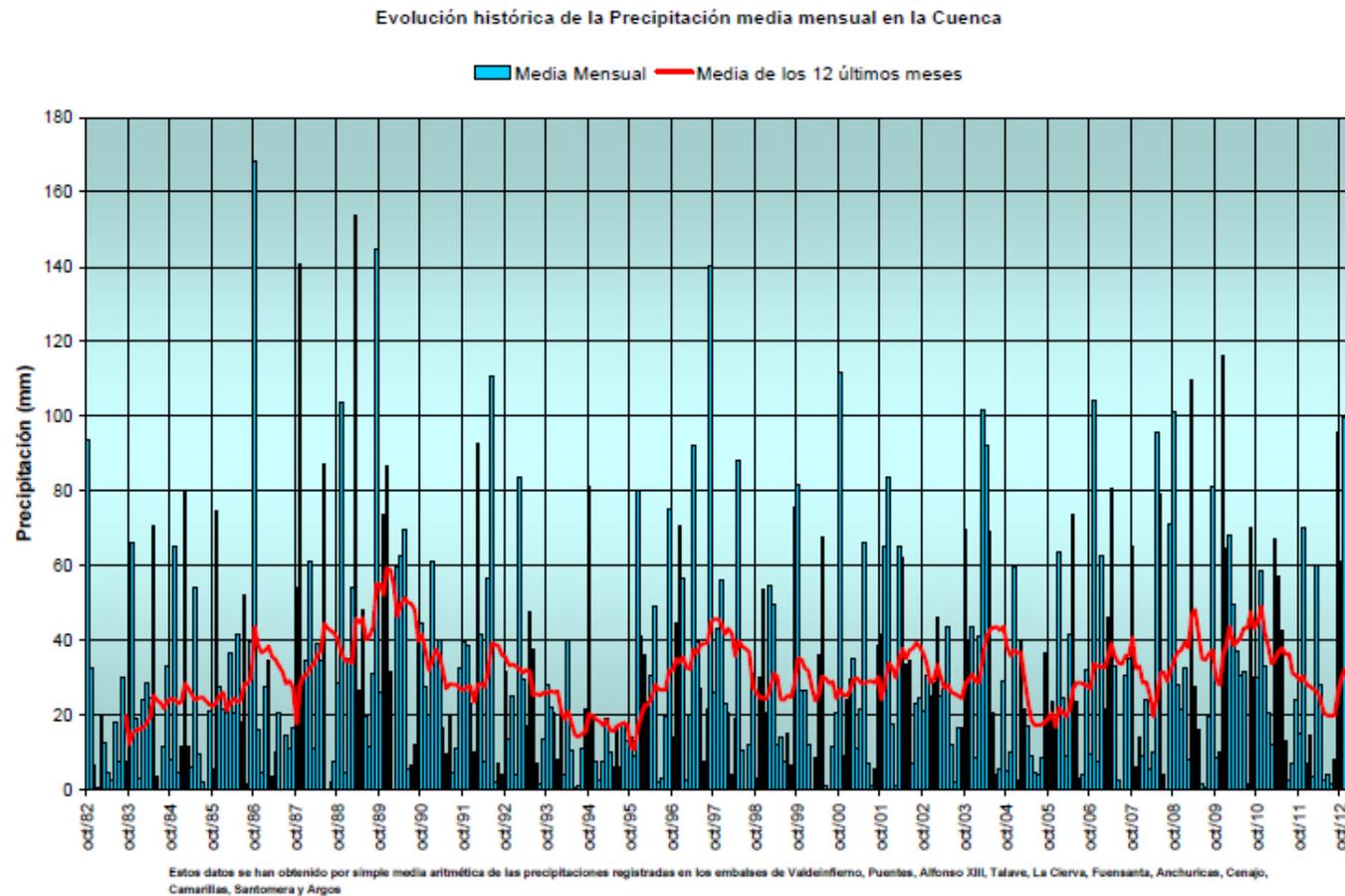


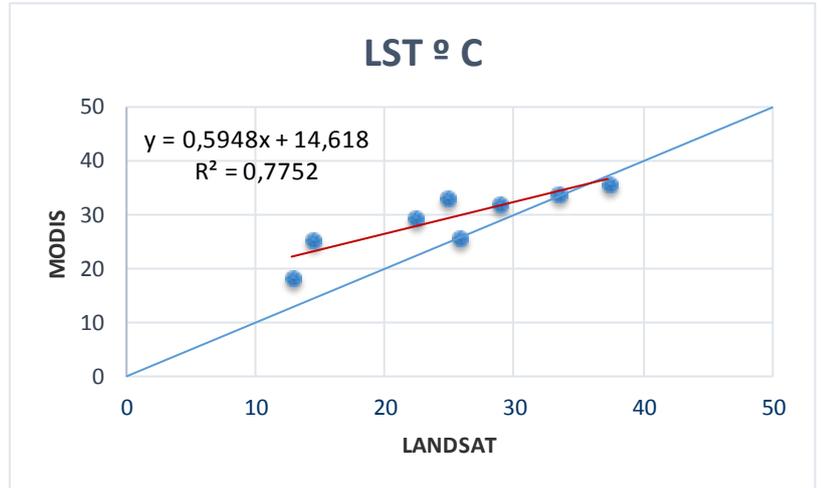
Figura AII.1: Evolucion historica de Precipitación media mensual.

Fuente: Confederación Hidrográfica del Segura (CHS)

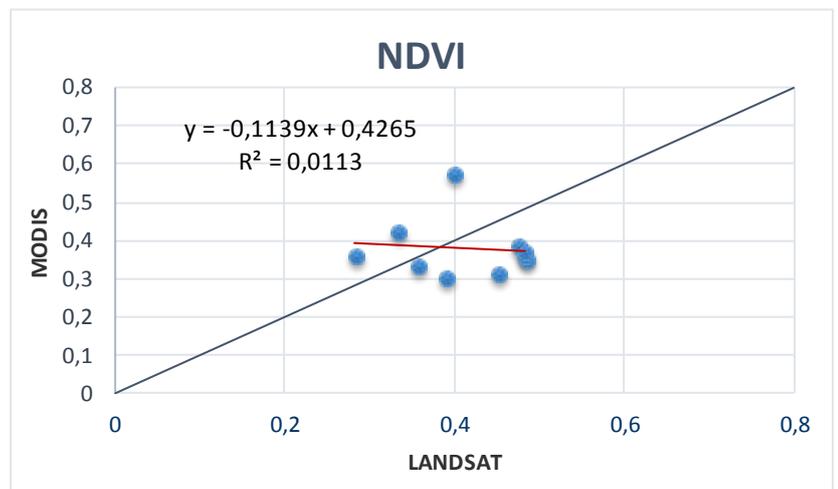
PFC

ANEXO III: Contraste de indicadores para la parcela de cultivo de Villa Antonia

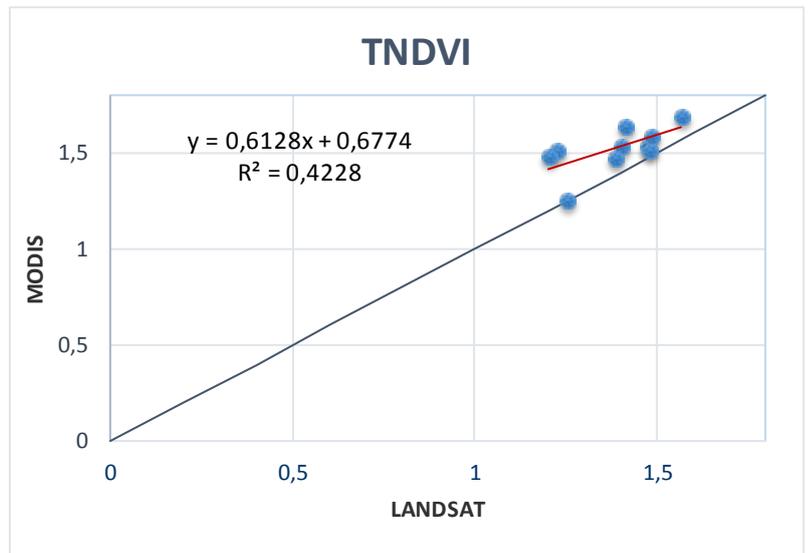
LST		
FECHAS	LANDSAT	MODIS
20090214	12,6949753	18,5601152
20090606	33,4153771	34,2258631
20100508	25,6445599	26,07092
20100524	24,8441472	33,2047626
20100727	28,8863668	32,2559261
20100929	22,2578915	29,8019543
20110511	14,3666019	25,4966659
20110628	37,2946471	35,9258625



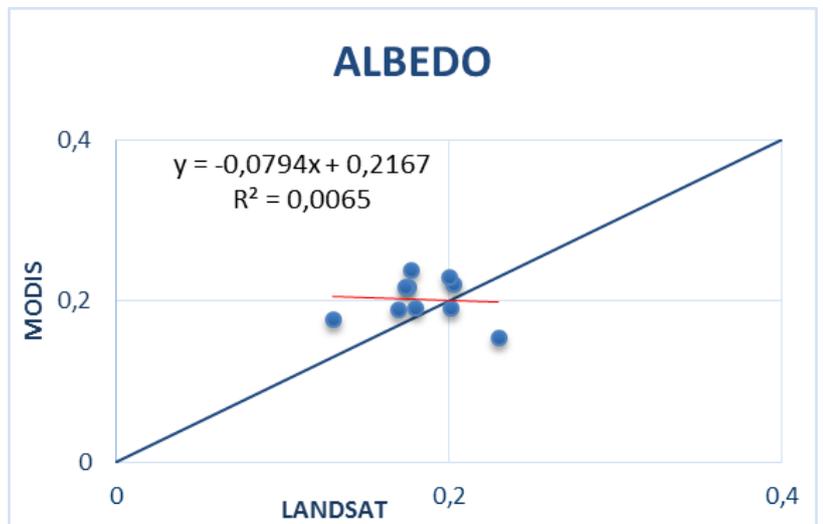
NDVI		
FECHAS	LANDSAT	MODIS
20090214	0,33145546	0,42724905
20090606	0,28131411	0,36090278
20090910	0,38778642	0,30413666
20100508	0,48347911	0,35226556
20100524	0,35561721	0,33541483
20100727	0,48187567	0,36271807
20100929	0,44958091	0,3129996
20101031	0,39726998	0,57682327
20110511	0,47469828	0,38970396
20110628	0,48092367	0,37320626



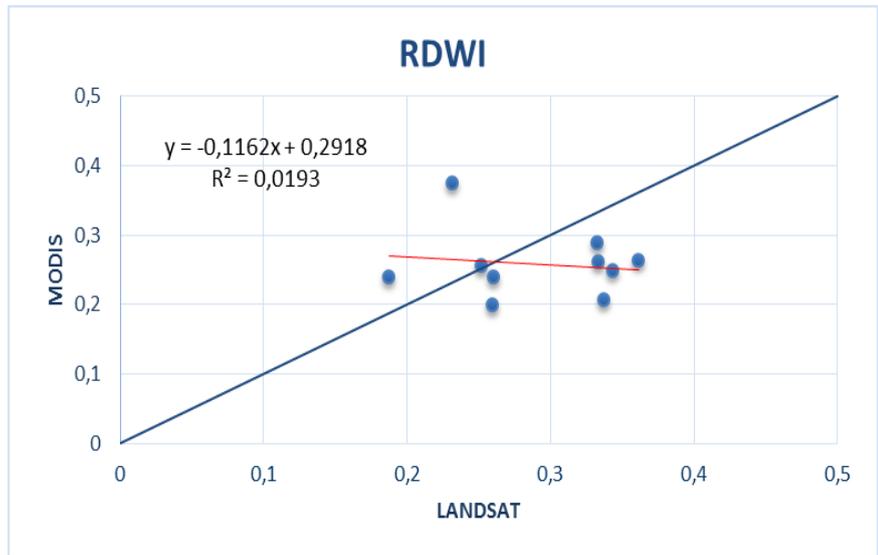
TNDVI		
FECHAS	LANDSAT	MODIS
20090214	1,25454032	1,26367159
20090606	1,22301906	1,51757663
20090910	1,41278381	1,6476101
20100508	1,47383862	1,538599
20100524	1,20245036	1,49075188
20100727	1,40324148	1,539587
20100929	1,38543317	1,47690287
20101031	1,56800448	1,7015065
20110511	1,47949581	1,51913753
20110628	1,48563238	1,58993631



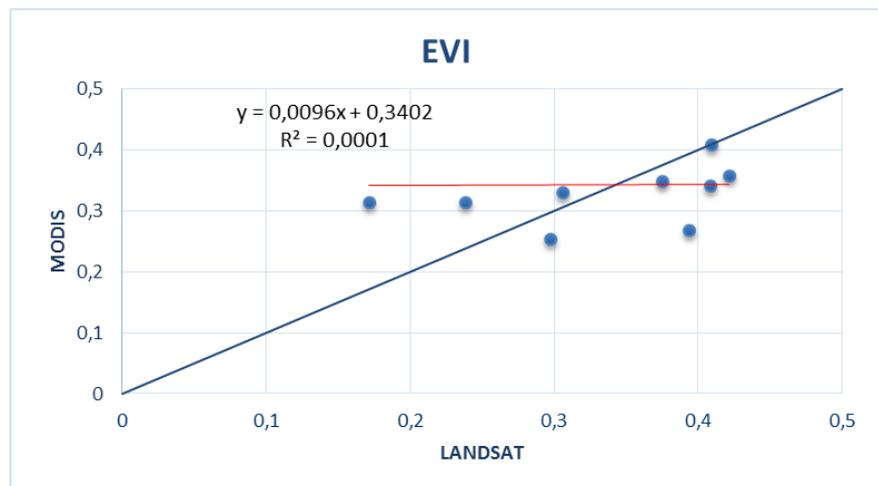
ALBEDO		
FECHAS	LANDSAT	MODIS
20090214	0,23002244	0,15376337
20090606	0,18046089	0,19120674
20090910	0,16996514	0,18873825
20100508	0,17577132	0,21611447
20100524	0,20286802	0,22121933
20100727	0,20057262	0,22886122
20100929	0,20106563	0,19058508
20101031	0,13024798	0,17669905
20110511	0,17784804	0,23707565
20110628	0,17396257	0,21684592



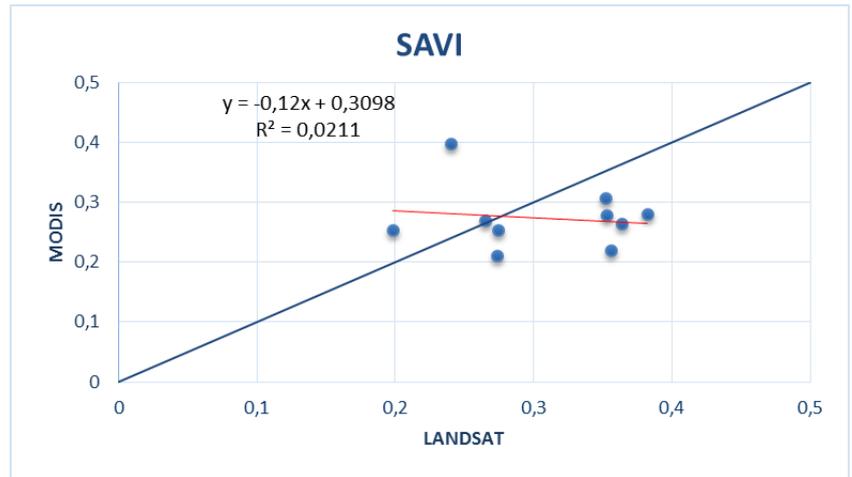
RDWI		
FECHAS	LANDSAT	MODIS
20090214	0,25124063	0,25649902
20090606	0,18753724	0,23978479
20090910	0,2597249	0,19943992
20100508	0,34307844	0,24888267
20100524	0,26006007	0,239293
20100727	0,3613493	0,26387073
20100929	0,33669557	0,20680163
20101031	0,23149195	0,37584134
20110511	0,33243136	0,2888336
20110628	0,33334501	0,262183



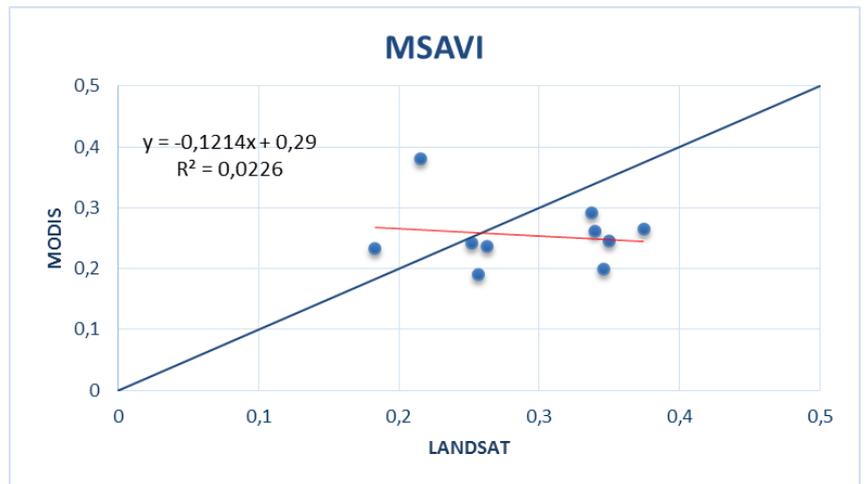
EVI		
FECHAS	LANDSAT	MODIS
20090214	0,23819721	0,31246769
20090606	0,1715313	0,31323055
20090910	0,29777683	0,2524159
20100508	0,40885353	0,34135434
20100524	0,30599393	0,32960138
20100727	0,42167554	0,35699154
20100929	0,39421051	0,2672487
20101031	0,25593855	0,50291786
20110511	0,40939056	0,40847628
20110628	0,37506071	0,34828556



SAVI		
FECHAS	LANDSAT	MODIS
20090214	0,26560257	0,26842916
20090606	0,19842603	0,25380657
20090910	0,27432383	0,21073351
20100508	0,36379311	0,26393857
20100524	0,27507571	0,25374514
20100727	0,38236167	0,27975375
20100929	0,35640749	0,21878883
20101031	0,24069693	0,39722757
20110511	0,35247344	0,30598955
20110628	0,3533994	0,27802272



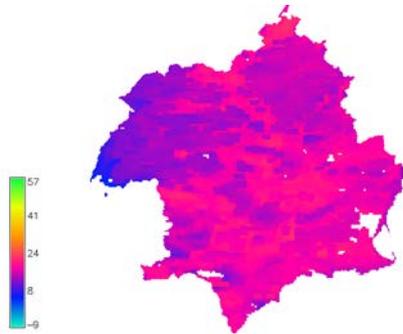
MSAVI		
FECHAS	LANDSAT	MODIS
20090214	0,25217487	0,24259285
20090606	0,18289047	0,23307009
20090910	0,25658369	0,19090808
20100508	0,35015722	0,24614824
20100524	0,26289107	0,23657512
20100727	0,37461643	0,26434115
20100929	0,34577621	0,19913801
20101031	0,21523459	0,38015425
20110511	0,33711615	0,29096124
20110628	0,33991157	0,26158798



ANEXO IV: Mapas indicadores Cuenca Hidrográfica del Segura

LST

INVIERNO

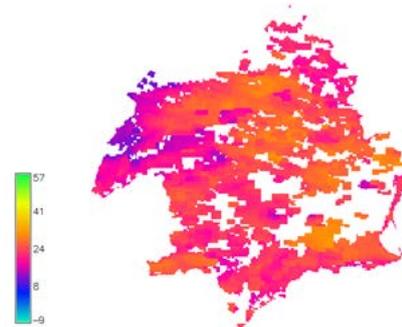


LST_2009045_1_1

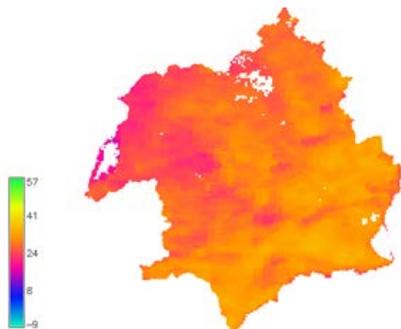
PRIMAVERA



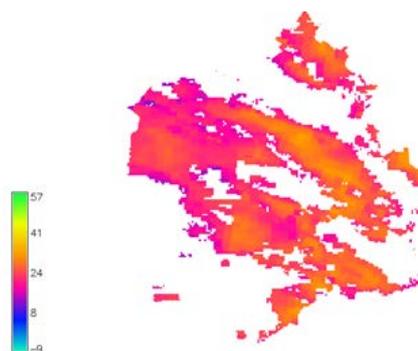
LST_2009157_1_1



LST_2010128_1_1



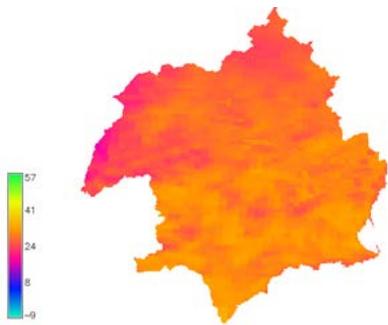
LST_2010144_1_1



LST_2011131_1_1

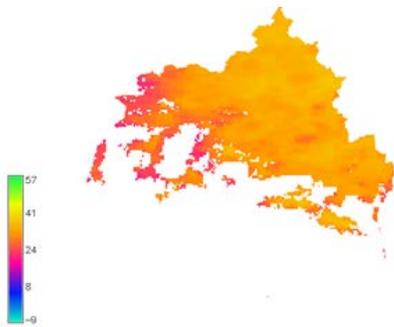
PFC

OTOÑO

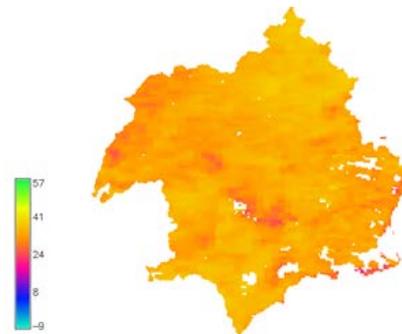


LST_2010272_1_1

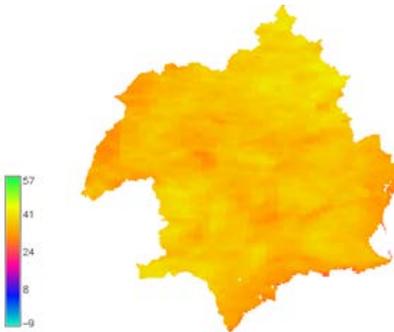
VERANO



LST_2009253_1_1



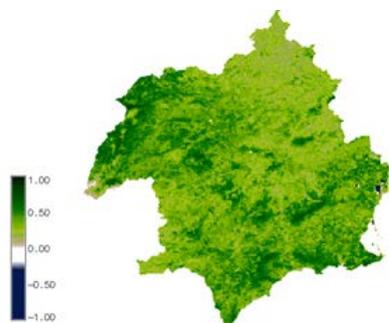
LST_2010208_1_1



LST_2011179_1_1

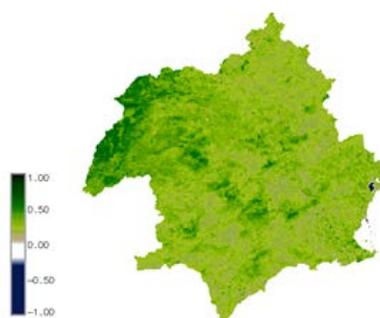
NDVI

INVIERNO

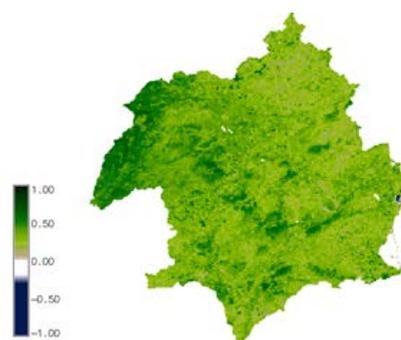


NDVI_2009049

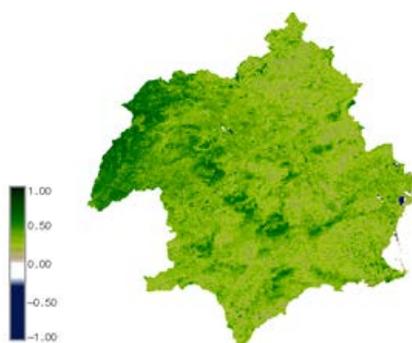
PRIMAVERA



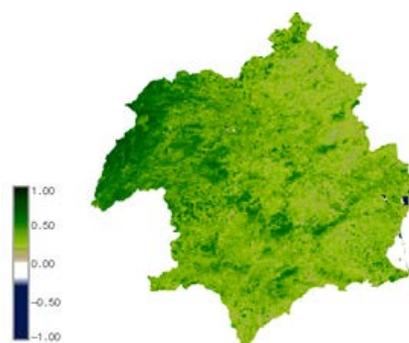
NDVI_2009161



NDVI_2010129

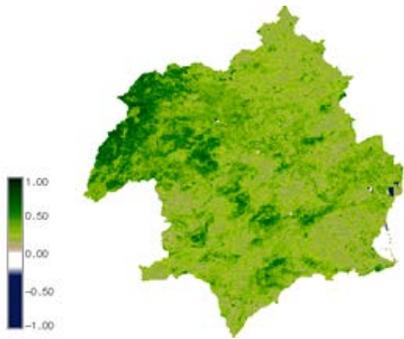


NDVI_2010145

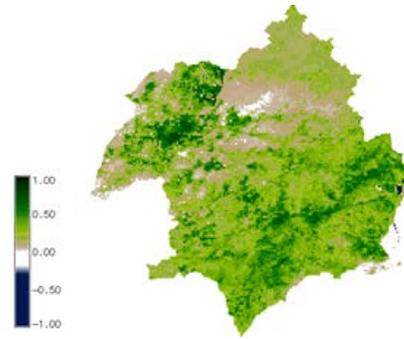


NDVI_2011137

OTOÑO

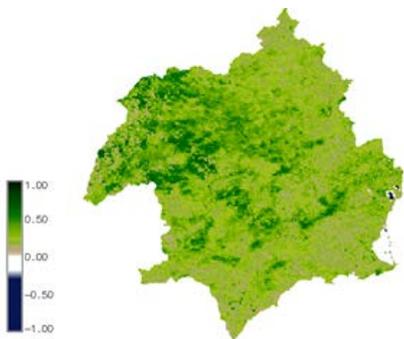


NDVI_2010273



NDVI_2010329

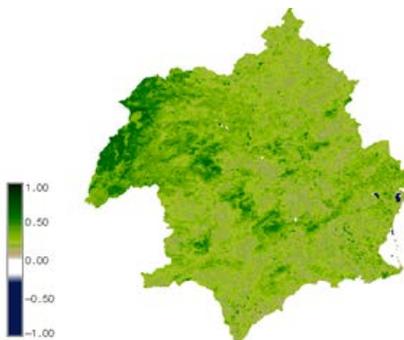
VERANO



NDVI_2009257



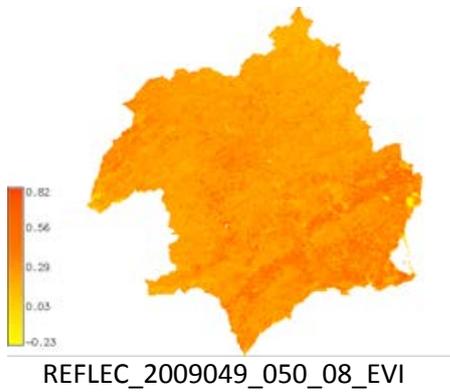
NDVI_2010209



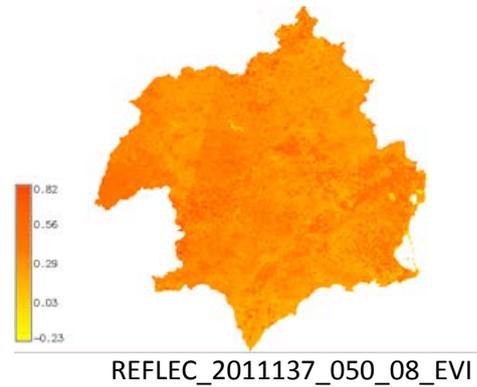
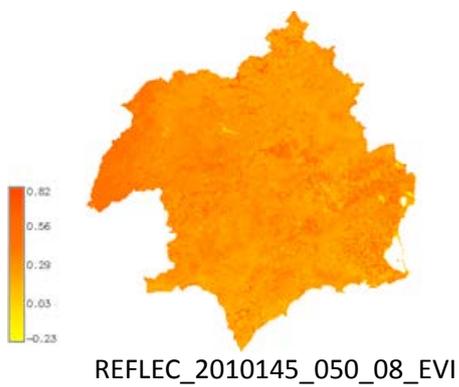
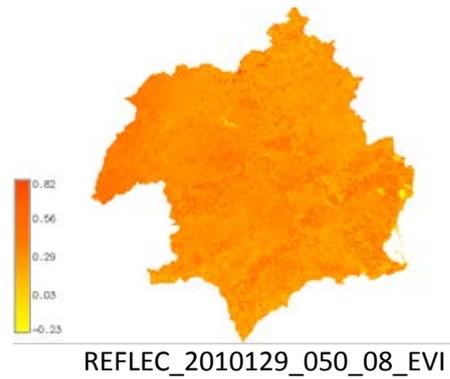
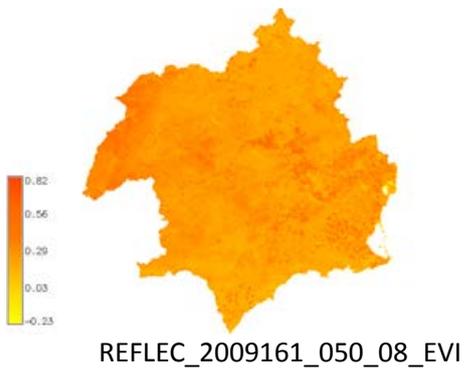
NDVI_2011185

EVI

INVIERNO



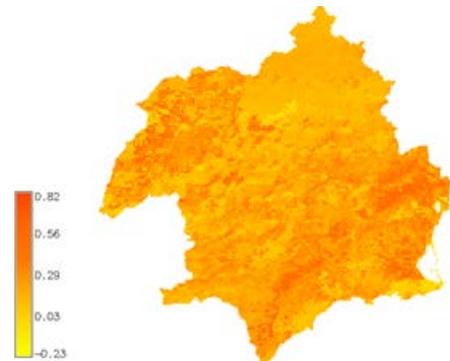
PRIMAVERA



OTOÑO

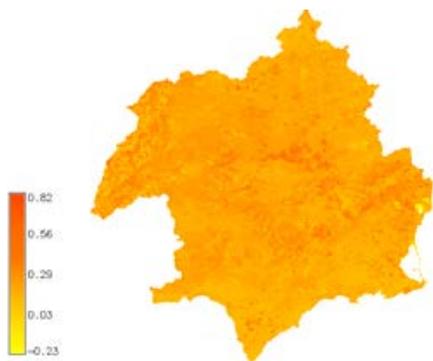


REFLEC_201027_050_08_EVI

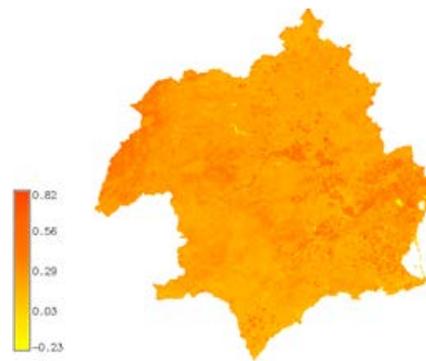


REFLEC_2010329_050_08_EVI

VERANO



REFLEC_2009257_050_08_EVI



REFLEC_2010209_050_08_EVI



REFLEC_2011185_050_08_EVI

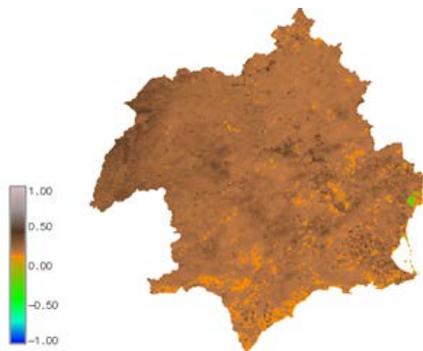
SAVI

INVIERNO

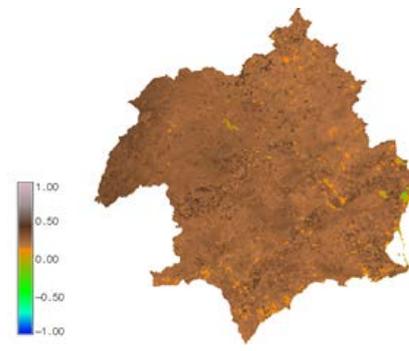


SAVI_2009049

PRIMAVERA



SAVI_2009161



SAVI_2010129

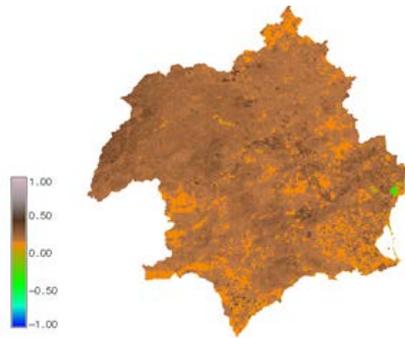


SAVI_2010145

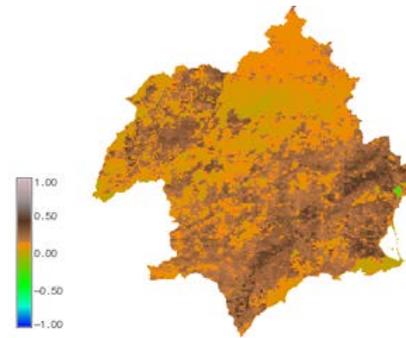


SAVI_2011137

OTOÑO

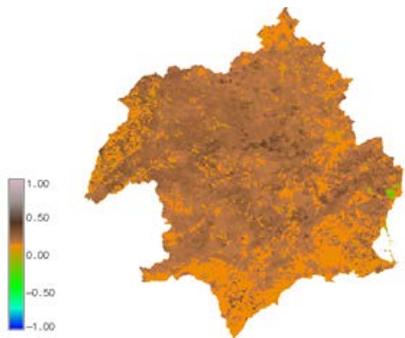


SAVI_2010273

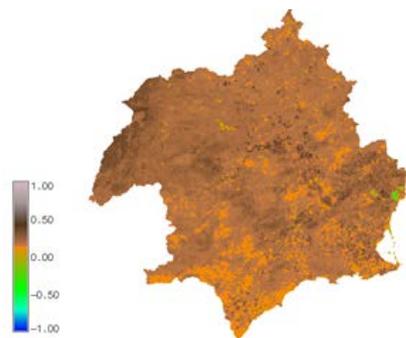


SAVI_2010329

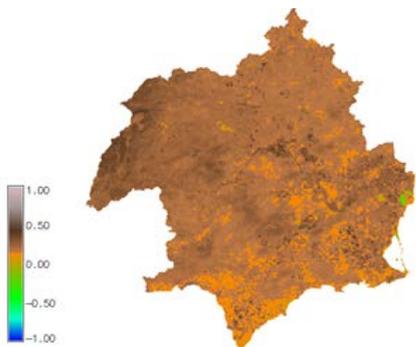
VERANO



SAVI_2009257



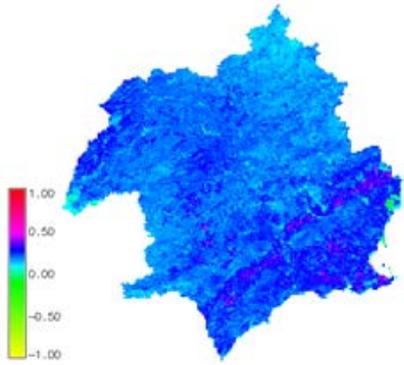
SAVI_2010209



SAVI_2011185

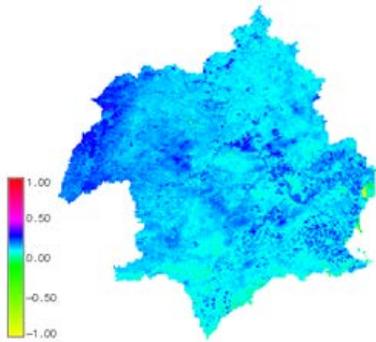
MSAVI

INVIERNO

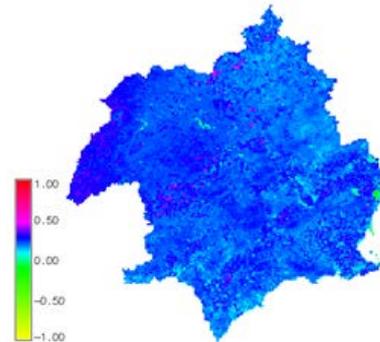


REFLEC_2009049_050_08_MSAVI

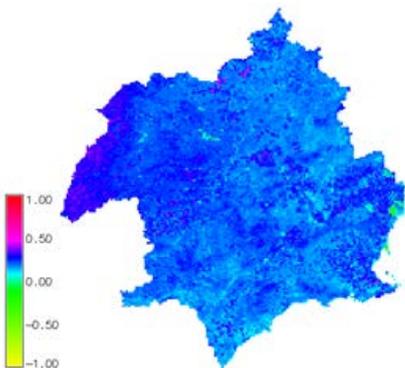
PRIMAVERA



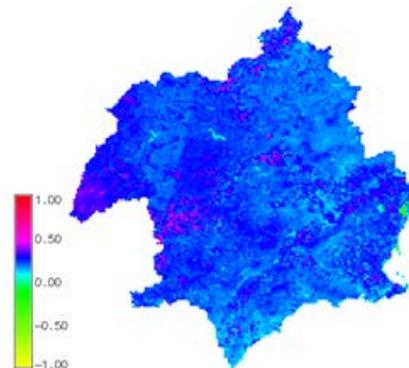
REFLEC_2009161_050_08_MSAVI



REFLEC_2010129_050_08_MSAVI



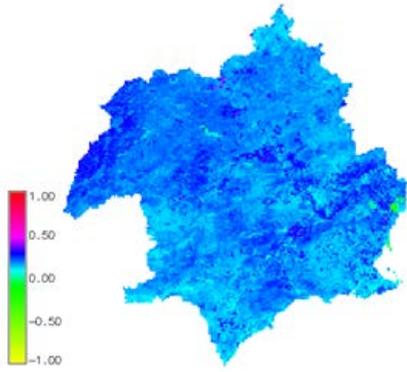
REFLEC_2010145_050_08_MSAVI



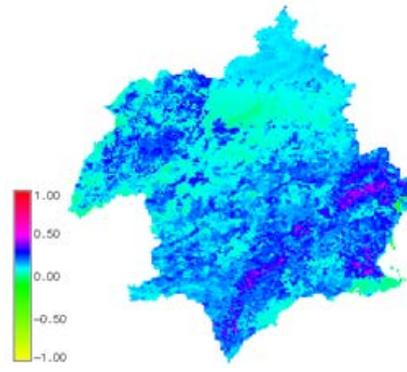
REFLEC_2011137_050_08_MSAVI

PFC

OTOÑO

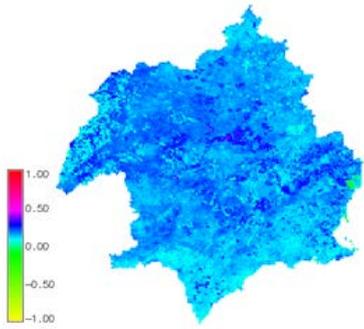


REFLEC_2010273_050_08_MSAVI

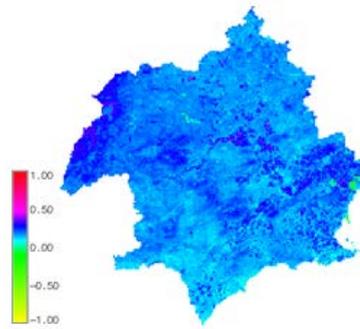


REFLEC_2010329_050_08_MSAVI

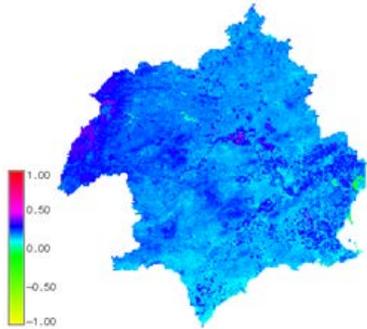
VERANO



REFLEC_2009257_050_08_MSAVI



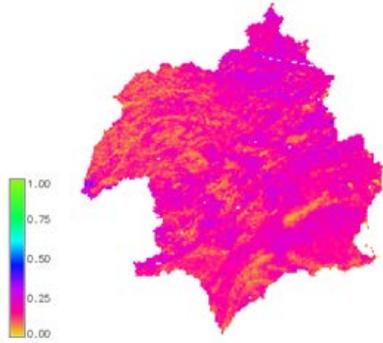
REFLEC_2010209_050_08_MSAVI



REFLEC_2011185_050_08_MSAVI

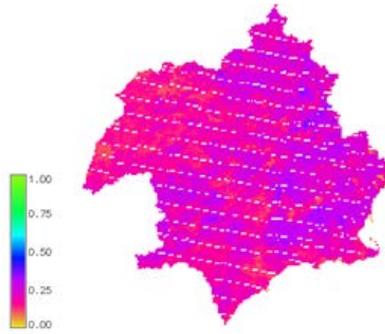
ALBEDO

INVIERNO

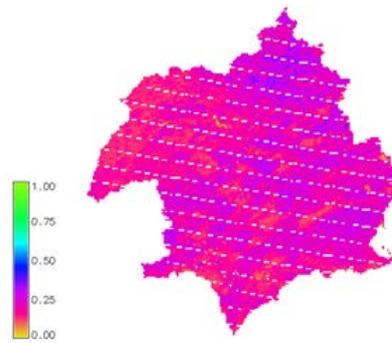


ALBEDO_2009049

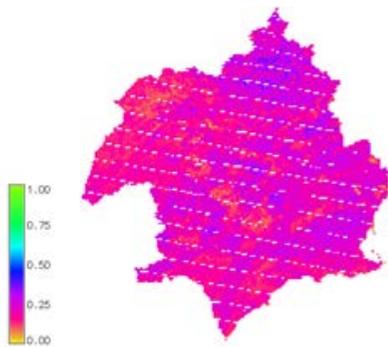
PRIMAVERA



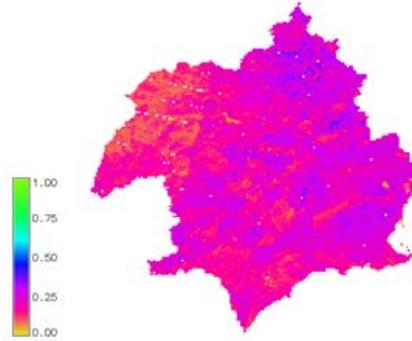
ALBEDO_2009161



ALBEDO_2010129

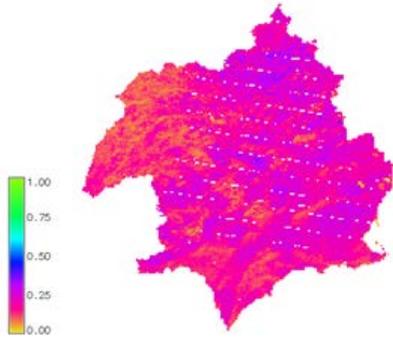


ALBEDO_2010145

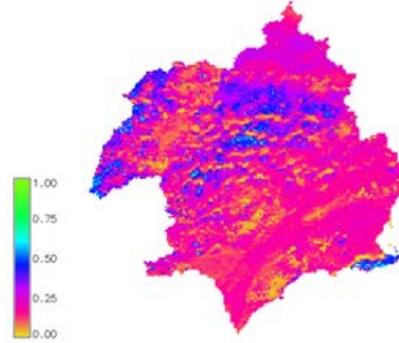


ALBEDO_2011137

OTOÑO

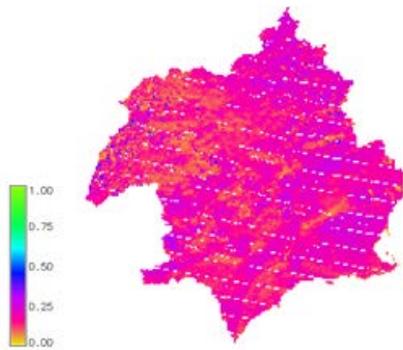


ALBEDO_2010273

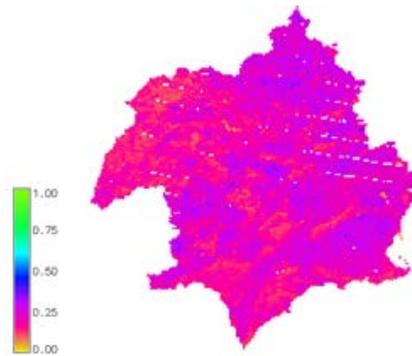


ALBEDO_2010329

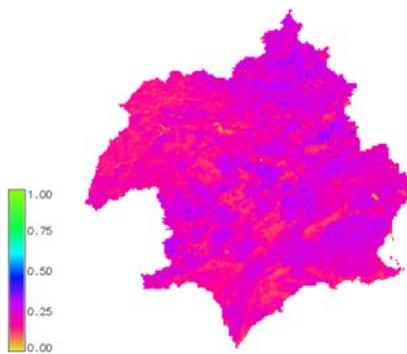
VERANO



ALBEDO_2009257



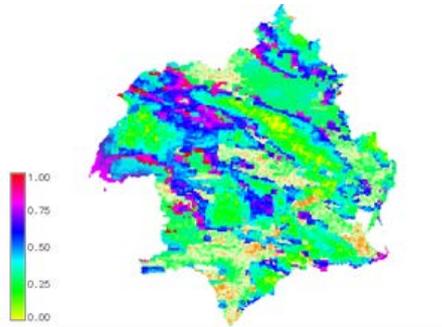
ALBEDO_2010209



ALBEDO_2011185

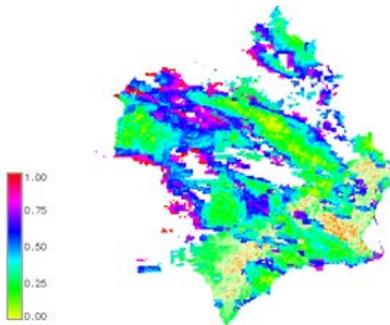
VTCI

INVIERNO

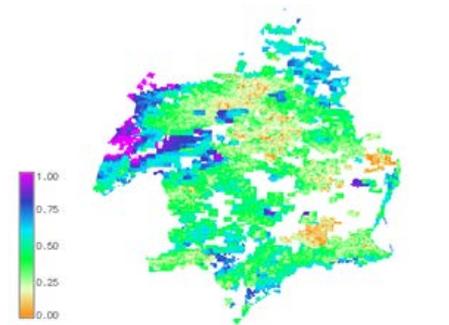


VTCI_2009145

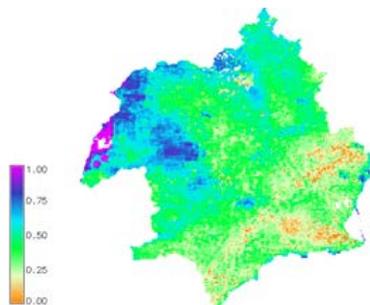
PRIMAVERA



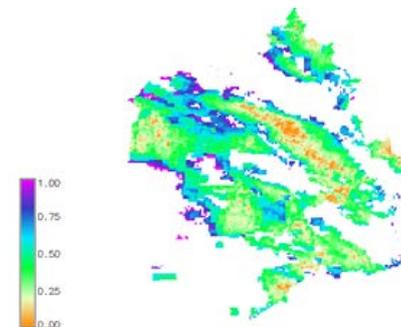
VTCI_2009157



VTCI_2010128



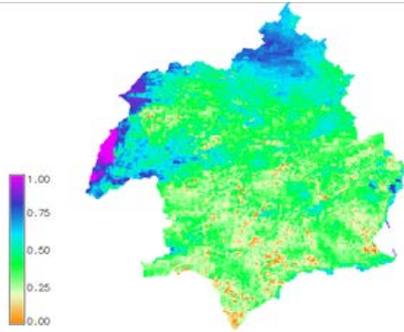
VTCI_2010144



VTCI_2011131

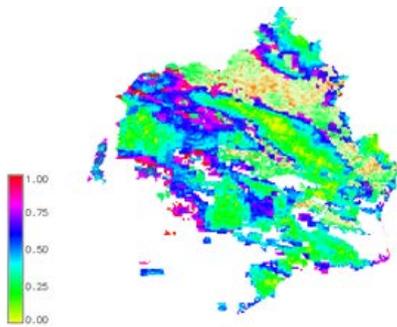
PFC

OTOÑO

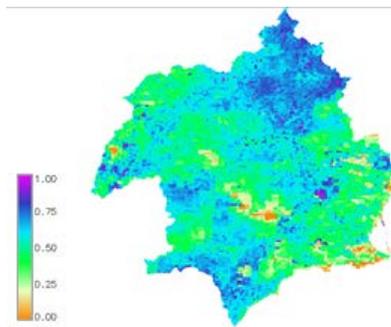


VTCI_2010272

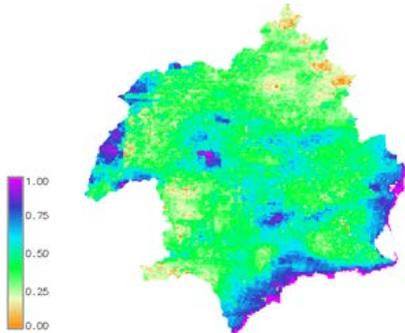
VERANO



VTCI_2009253



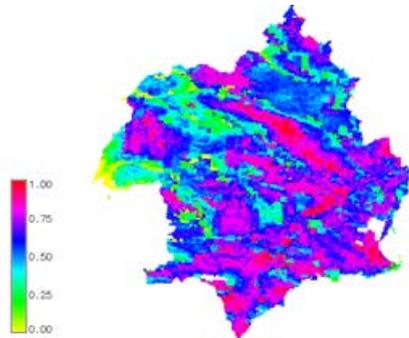
VTCI_2010208



VTCI_2011179

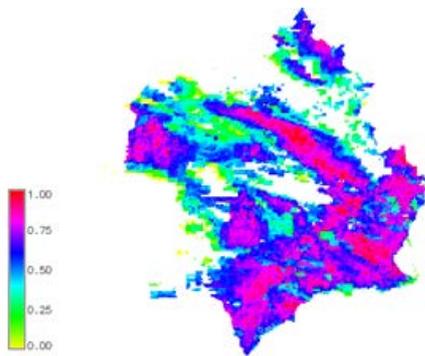
TVDI

INVIERNO

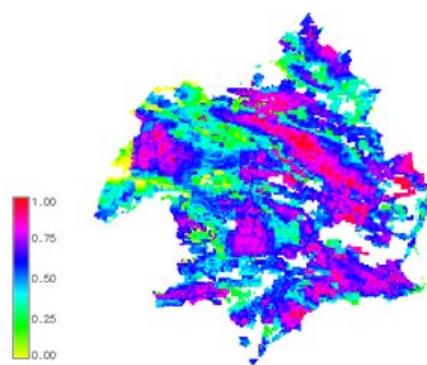


TVDI_2009045

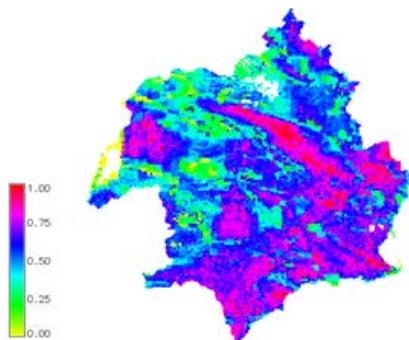
PRIMAVERA



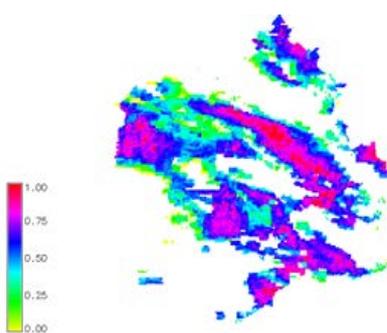
TVDI_2009157



TVDI_2010128

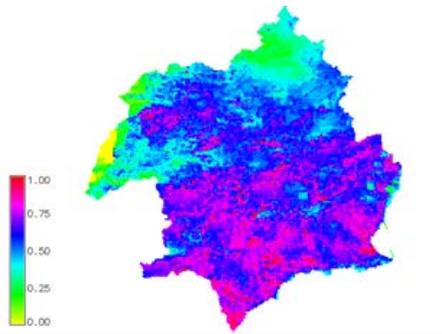


TVDI_2010144



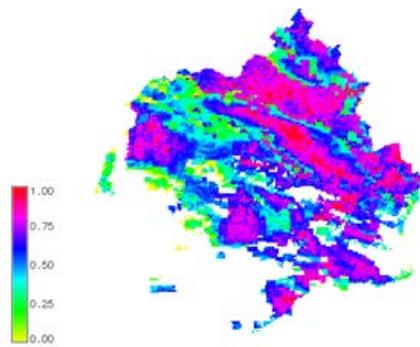
TVDI_2011131

OTOÑO

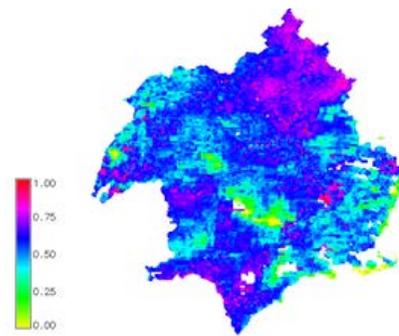


TVDI_2010272

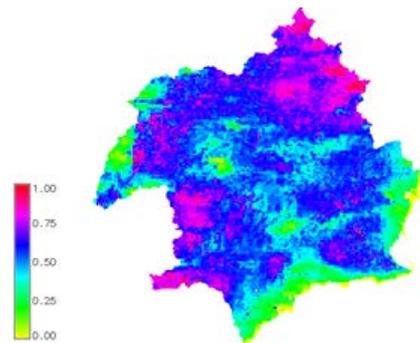
VERANO



TVDI_2009253



TVDI_2010208

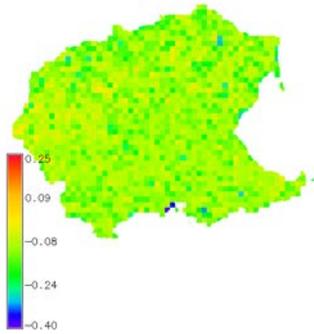


TVDI_2011179

ANEXO V: Mapas de los indicadores hidrológicos para el Campo de Cartagena

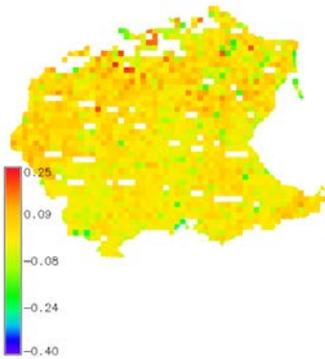
ALBEDO CAMPO CARTAGENA

INVIERNO

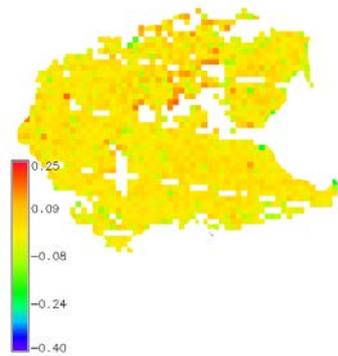


ALBEDO_20090214

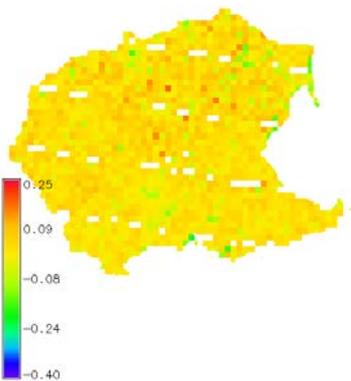
PRIMAVERA



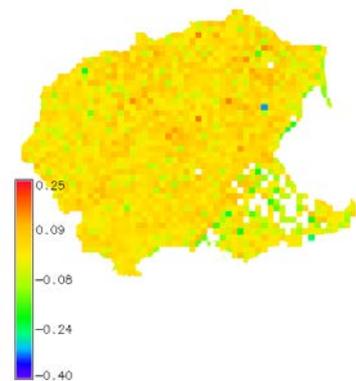
ALBEDO_20090606



ALBEDO_20100508

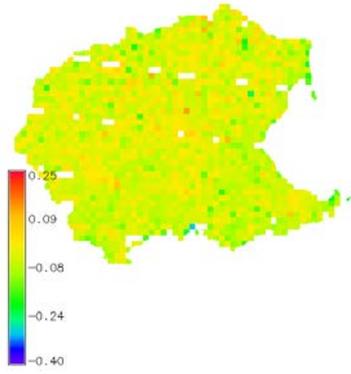


ALBEDO_20100524



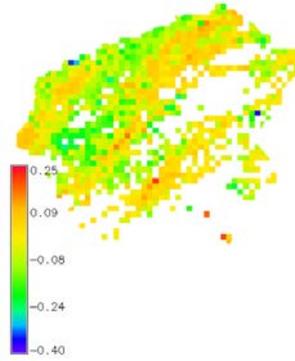
ALBEDO_20110511

PFC



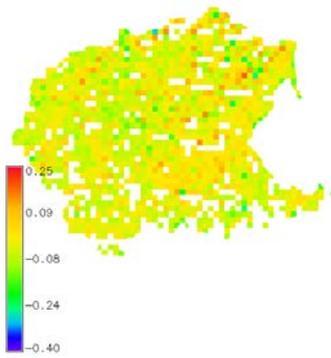
ALBEDO_20100929

OTOÑO

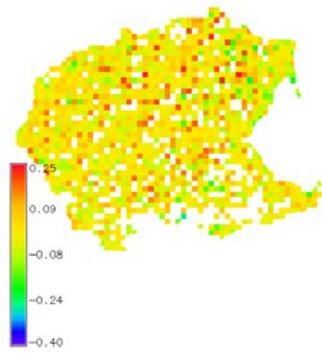


ALBEDO_20101031

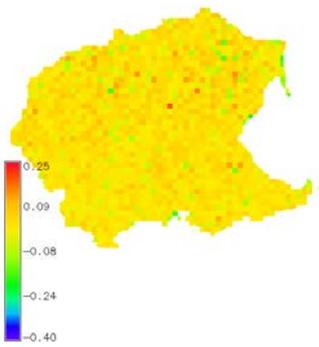
VERANO



ALBEDO_20090910



ALBEDO_20100727



ALBEDO_20110628

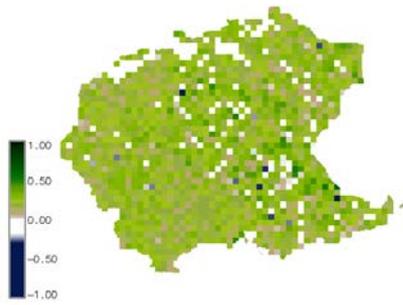
NDVI CAMPO DE CARTAGENA

INVIERNO

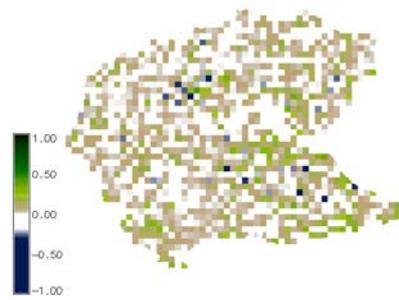


NDVI_20090214

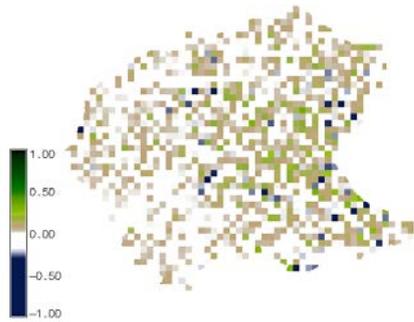
PRIMAVERA



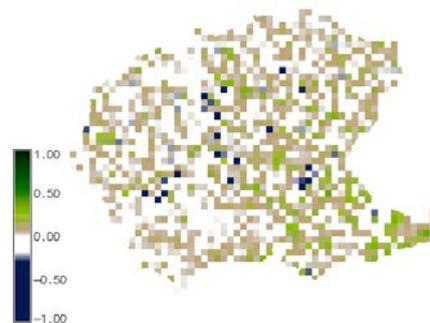
NDVI_20090606



NDVI_20100508

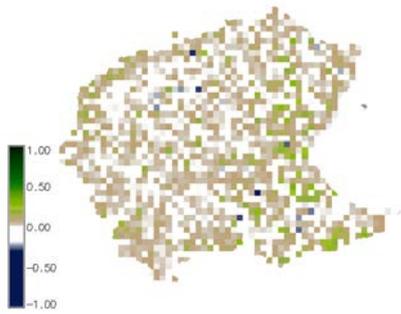


NDVI_20100524

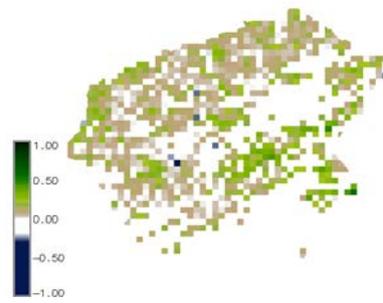


NDVI_20110511

OTOÑO

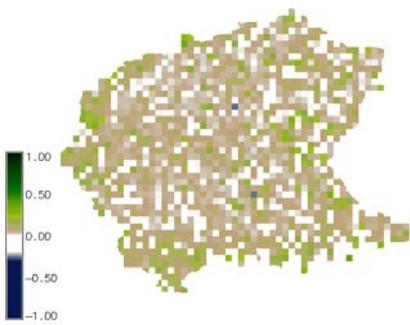


NDVI_20100929

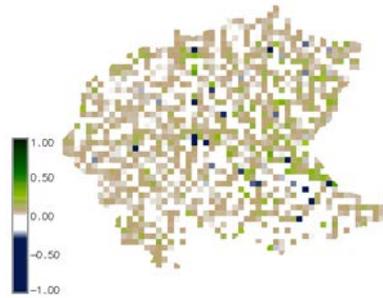


NDVI_20101031

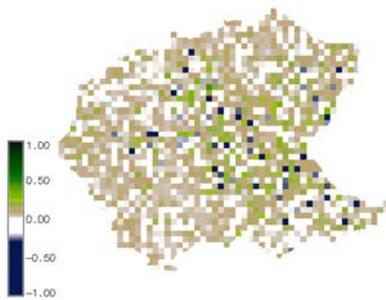
VERANO



NDVI_20090910



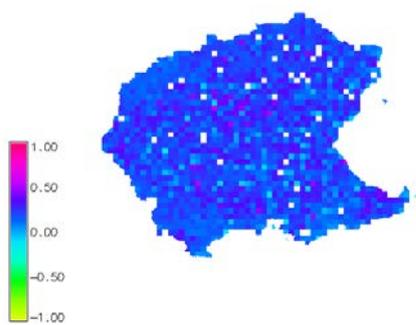
NDVI_20100727



NDVI_20110628

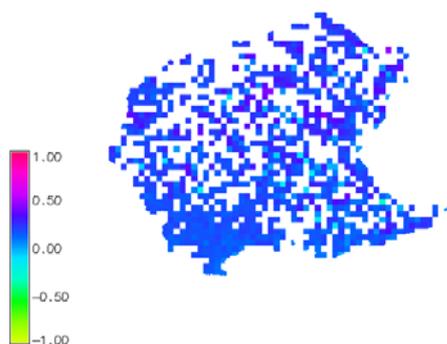
EVI CAMPO DE CARTAGENA

INVIERNO

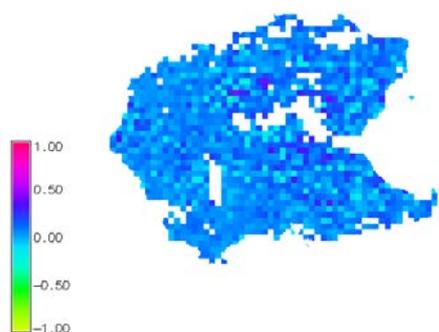


EVI_20090214

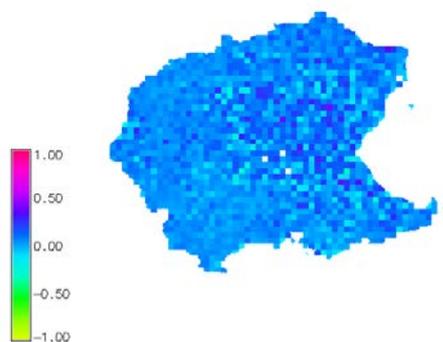
PRIMAVERA



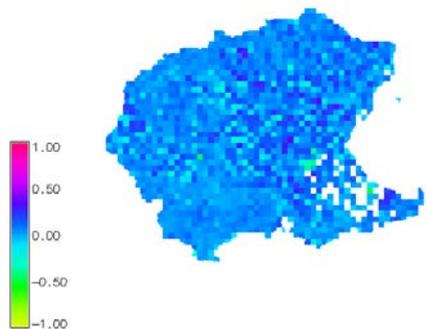
EVI_20090606



EVI_20100508



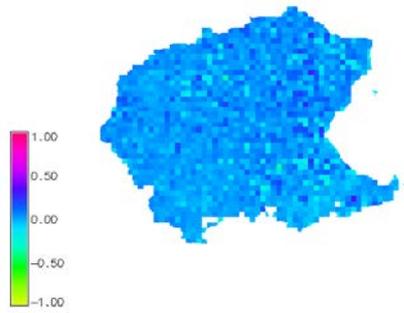
EVI_20100524



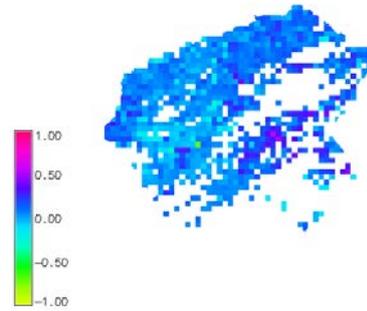
EVI_20110511

PFC

OTOÑO

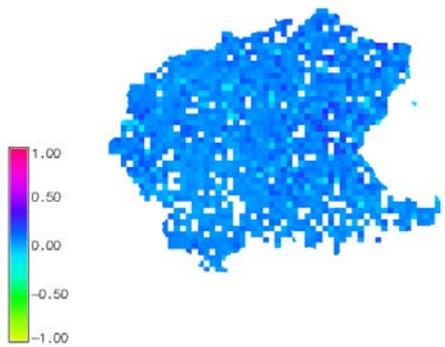


EVI_20100929

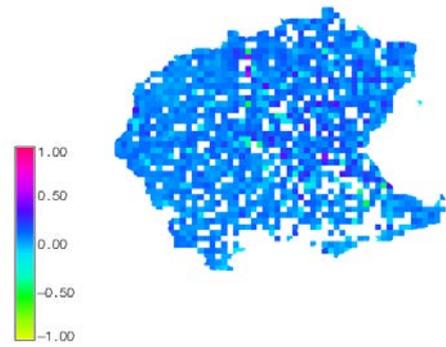


EVI_20101031

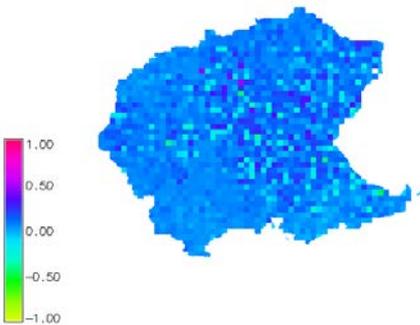
VERANO



EVI_20090910



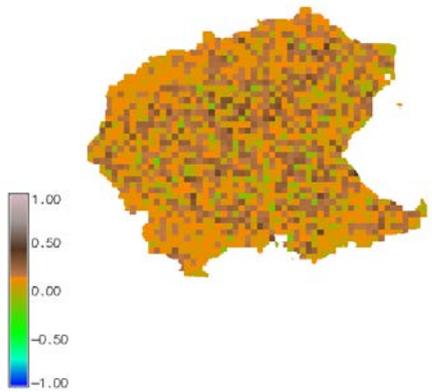
EVI_20100727



EVI_20110628

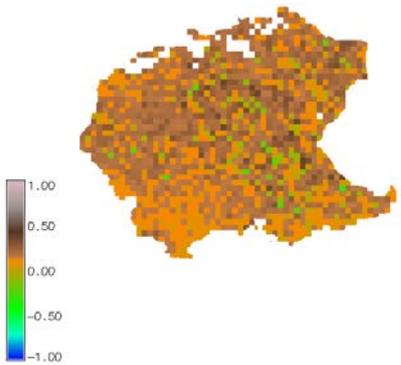
SAVI CAMPO DE CARTAGENA

INVIERNO

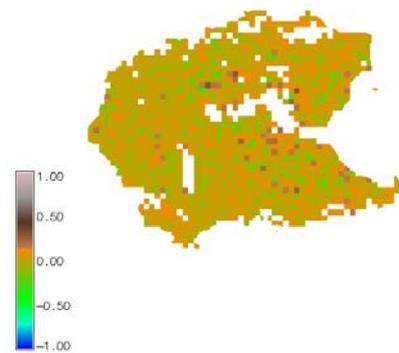


SAVI_20090214

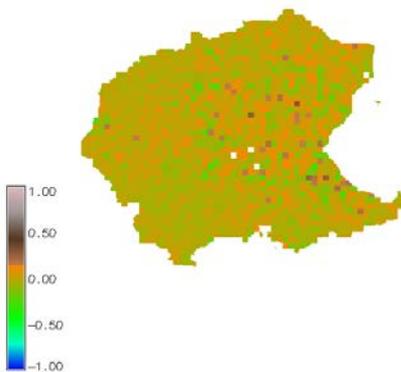
PRIMAVERA



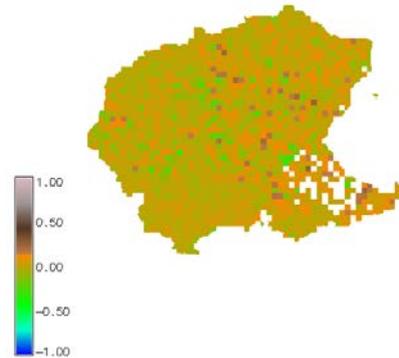
SAVI_20090606



SAVI_20100508



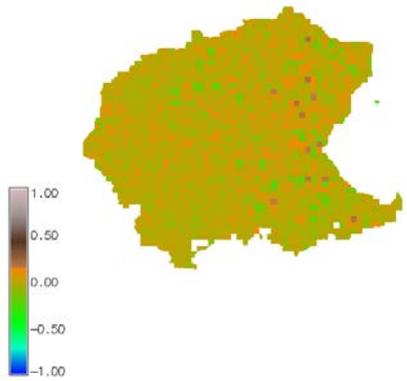
SAVI_20100524



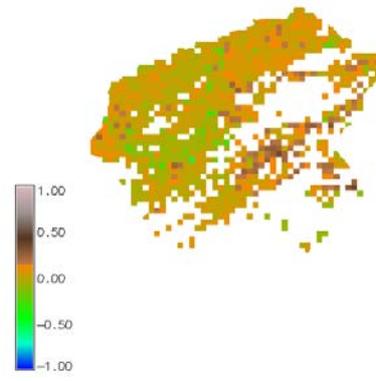
SAVI_20110511

PFC

OTOÑO

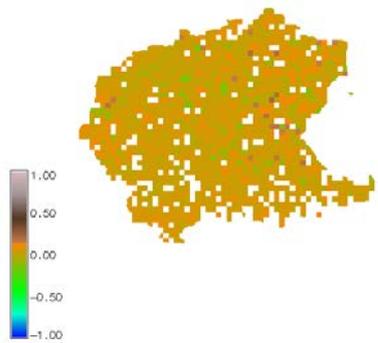


SAVI_20100929

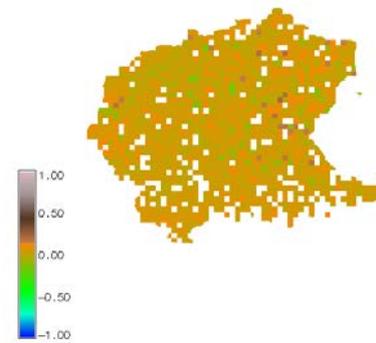


SAVI_20101031

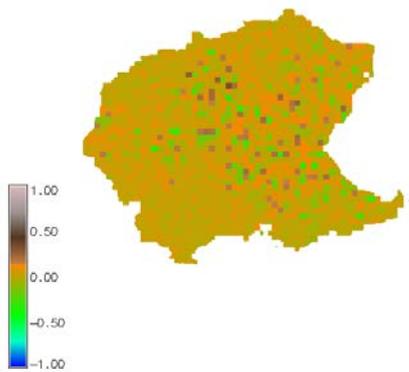
VERANO



SAVI_20090910



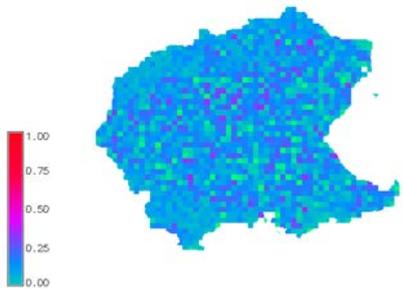
SAVI_20100727



SAVI_20110628

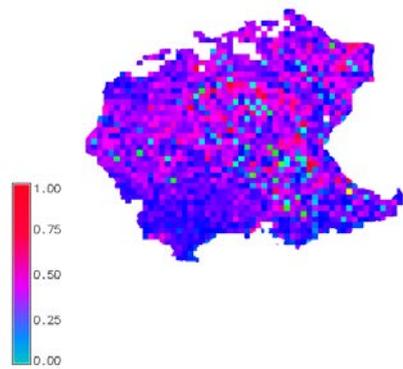
MSAVI CAMPO DE CARTAGENA

INVIERNO

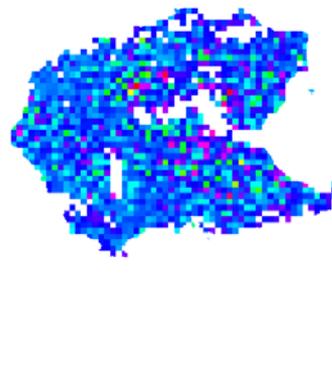


MSAVI_20090214

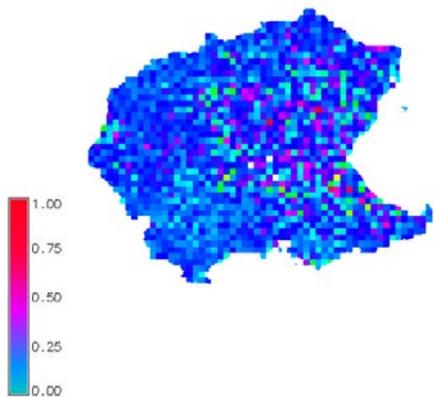
PRIMAVERA



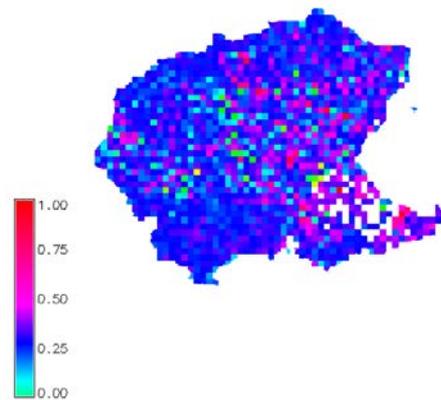
MSAVI_20090606



MSAVI_20100508



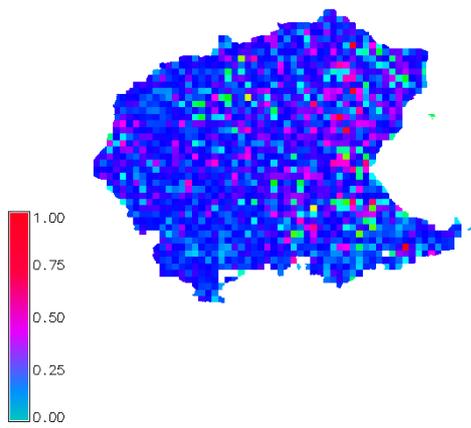
MSAVI_20100524



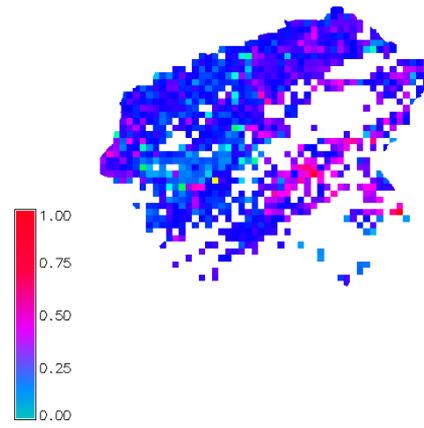
MSAVI_20110511

PFC

OTOÑO

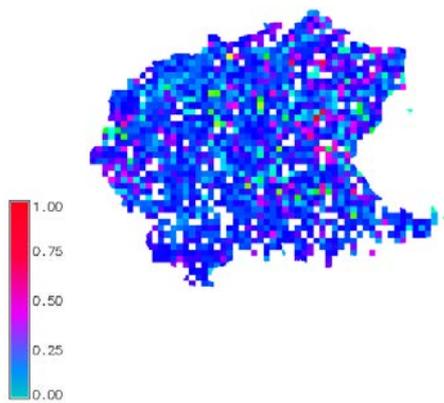


MSAVI_20090929

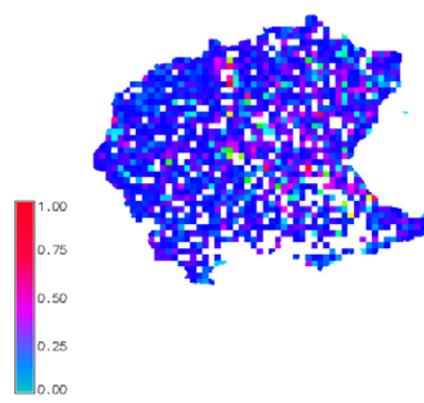


MSAVI_20101031

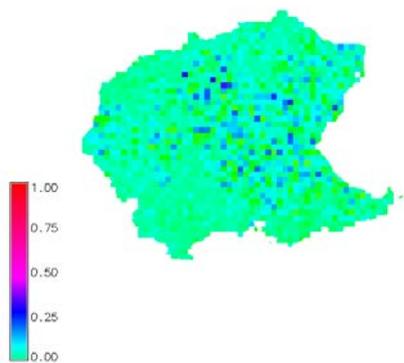
VERANO



MSAVI_20090910



MSAVI_20100727



MSAVI_20110628

