

Aplicación de índices de vegetación derivados de imágenes satelitales para análisis de coberturas vegetales en la provincia de Loja, Ecuador

Application of Vegetation Index Derived from Satellite Imagery Analysis Vegetation Coverage in the Province of Loja, Ecuador

Carlos Gonzaga Aguilar^{1*}

¹. Analista de la Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo SENPLADES - Dirección de Ordenamiento Territorial.

*Autor para correspondencia: cgonzaga80@gmail.com

Recibido: 28 de febrero 2015; Aceptado: 11 septiembre 2015

Resumen

Las variaciones temporales y espaciales de coberturas vegetales son un importante indicador de las dinámicas de los ecosistemas. La teledetección ha sido utilizada como valiosa herramienta para este fin. Entre las técnicas de empleo de datos satelitales multiespectrales se destacan los índices de vegetación. El presente estudio evaluó tres índices de vegetación, como estimadores de tipos de vegetación en Loja Ecuador. Los índices empleados fueron: el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada NDVI, Índice de Estrés Hídrico MSI y el Índice de Vegetación Ajustado al Suelo SAVI, aplicados a imágenes Landsat 7 ETM+ y ASTER. Además se analizó la relación entre los índices con precipitación y temperatura. Los resultados muestran que los índices permitieron discriminar tipos de vegetación, no hubo diferencias significativas entre estos en las dos imágenes. El MSI tuvo ligeramente mejor correspondencia con las características de las coberturas. Los periodos de temperatura y precipitación empleados y vacíos de información influyeron al establecer correlaciones con los índices, no se encontraron correlaciones significativas.

Palabras clave: Coberturas vegetales, índices de vegetación, sensor ASTER, sensor Landsat 7 ETM+, superficies climáticas, teledetección.

Abstract

The temporal and spatial variations of vegetation cover is an important indicator of ecosystem dynamics. Remote sensing has been used as a valuable tool for this purpose. Among the techniques using multispectral satellite data of vegetation indexes stand out. This study evaluated three vegetation indices as estimators of vegetation types in Loja Ecuador. The indices used were: Index NDVI Normalized Difference Vegetation, Water Stress Index MSI and Adjusted Vegetation Index Soil SAVI, applied to images Landsat 7 ETM+ and ASTER. Furthermore, the relationship between precipitation and temperature indices was analyzed. The results show that the rates allowed discrimination of vegetation types; there were no significant differences between those in the two images. The MSI was slightly better match with the characteristics of hedges. Periods of temperature and precipitation employees and information gaps influenced the correlations with indices, no significant correlations were found.

Key words: remote sensing, vegetation indices, vegetation cover, ASTER sensor, Landsat 7 ETM+ sensor, weather surfaces.

Introducción

La vegetación es un importante indicador para evaluar diferentes procesos biofísicos en los ecosistemas; como por ejemplo los fenómenos relacionados a la pérdida de biodiversidad, desertificación, relación entre la vegetación y erosión del suelo e interacción vegetación-clima.

La teledetección ha sido utilizada como valiosa herramienta y determinante a la hora de evaluar dinámicas en los cambios de usos de suelo y coberturas vegetales. La aplicación de la teledetección es posible gracias a la interacción de la energía electromagnética con las cubiertas terrestres que tienen un comportamiento reflectivo variable, condicionado por su estado al momento de la adquisición de la imagen (Pérez y Muñoz, 2006). Entre las técnicas derivadas del uso de datos satelitales multiespectrales, se destacan el empleo de los índices de vegetación. Los índices de vegetación son transformaciones que implican efectuar una combinación matemática, entre los niveles digitales almacenados en dos o más bandas espectrales de la misma imagen. (Esperanza y Zerda, 2002). Estos índices están condicionados por cambios en el estado fisiológico de las coberturas vegetales, sus variaciones pueden ser utilizadas para estudios espacio-temporales del comportamiento de la vegetación.

El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada NDVI, Rouse *et al.*, (1974) se ha utilizado ampliamente como indicador del vigor de la biomasa vegetal, en estudios relacionados a comportamiento de cultivos, así como de vegetaciones boscosas naturales; sin embargo, muchas han sido las modificaciones de éste índice con el fin de corregir ciertas deficiencias, como por ejemplo, el Índice de Vegetación Ajustado al Suelo SAVI, (Huete, 1988) con el fin de minimizar el efecto del suelo en áreas con baja densidad de vegetación.

En ese sentido, el presente estudio consistió en una evaluación de índices de vegetación derivados de imágenes adquiridas por dos sensores, con el fin de realizar una descripción de la calidad, estado y diferenciación de los tipos de vegetación utilizando como referencia un mapa de cobertura y uso de suelo, y su relación con elementos del clima como la precipitación y temperatura.

Para ello, se emplearon: El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada NDVI (Rouse *et al.*, 1974) Índice de Estrés Hídrico MSI (Rock *et al.*, 1985) y el índice de Vegetación Ajustado al

Suelo SAVI, (Huete, 1988), aplicados a imágenes satelitales Landsat 7 ETM+ y ASTER adquiridas en noviembre 2001 y julio 2004 respectivamente; además se analizaron los resultados en relación con los datos de precipitación y temperatura.

Materiales y métodos

Los datos satelitales multiespectrales, corresponden al satélite Landsat 7 sensor ETM+ (Enhanced Thematic Mapper) adquirida el 03 de noviembre del 2001, la escena de toma es PATH = 010 y ROW = 063 del sistema WRS de Landsat, posee 6 bandas reflectivas, tamaño de pixel de 30 m en la región del visible e infrarrojo cercano (bandas 1-5 y 7) y una banda en la región térmica (banda 6) con 60 m. El área de cobertura aproximada es de 170 x 183 kilóm.

La otra imagen, Satélite Terra sensor ASTER (Advanced Space-borne Thermal Emission and Reflection Radiometer) adquirida el 22 de julio del 2004, tiene 9 bandas, 3 en el visible e infrarrojo cercano (VNIR), y 6 bandas en el infrarrojo medio (SWIR) (el número total de bandas de las imágenes ASTER es de 14 las 5 restantes se ubican en el rango del infrarrojo térmico TIR), la resolución espacial de las bandas 1, 2 y 3 es de 15 m; las bandas 4, 5, 6, 7, 8 y 9 tienen 30 m de resolución (las bandas 10, 11, 12, 13 y 14 del TIR tienen 90 m de resolución espacial) el tamaño aproximando de la escena es de 60 x 60 kilóm. Los datos están contenidos en grupos separados para cada uno de los tres sistemas de sensores (VNIR, SWIR y TIR).

Es importante destacar que para una correcta comparación de los índices analizados es necesario utilizar imágenes adquiridas en fechas muy cercanas entre sí; lamentablemente no fue posible obtener imágenes Landsat ETM+ y ASTER que cumplan estas condiciones, debido a la alta cobertura nubosa del área de estudio. Sin embargo, dado que la cobertura vegetal de la zona presenta relativamente poca variación interanual y los bosques naturales están relativamente poco intervenidos por actividades agrícolas, se decidió utilizar las dos imágenes disponibles que a pesar de haber sido adquiridas con una diferencia de 3 años, ambas corresponden a la estación seca.

Las imágenes fueron obtenidas del Departamento Geológico de los Estados Unidos de Norte América, U.S. Geological Survey USGS, (<http://glovis.usgs.gov/>)

Pre Procesamiento de Imágenes Satelitales

Corrección geométrica

Se realizó una rectificación polinomial de la imagen Landsat ETM+ (georeferenciación) a partir de la imagen ASTER que estaba rectificada en la proyección cartográfica UTM zona 17 S y sistema WGS84, mediante puntos de control.

Corrección radiométrica

Esta corrección radiométrica es imprescindible al comparar imágenes adquiridas por diferentes sensores o en distintas fechas. La corrección consistió en convertir los valores digitales (ND valores crudos) de la imagen a magnitudes físicas de radiancia y reflectancia, previo a la obtención de los índices de vegetación.

Para la Imagen Landsat ETM+.

$$L = a1 + a0 * ND$$

Donde:

L: Radiancia que llega al instrumento

a0: Pendiente o gain obtenida del header de la imagen

a1: Constante o bias obtenida del header de la imagen

ND: Valor o nivel digital

$$\rho(\lambda) = L * \pi * d^2 / E_i(\lambda) * \cos \theta$$

Donde:

$\rho(\lambda)$: Reflectancia al tope de la atmósfera

L: Radiancias

d: Distancia tierra-sol. Expresada en Unidades Astronómicas y se calcula como: $dT-S = 1 - 0,0167 * \cos(2 * \text{PI}(\text{día juliano} - 3) / 365)$

$E_i(\lambda)$: Irradiancia solar

θ : ángulo cenital solar

Para la imagen ASTER.

La conversión de los valores digitales (ND) a magnitudes físicas de radiancia:

$$L = (ND - 1) * UCC$$

Dónde:

L: Radiancia que llega al instrumento

UCC: Unidad de Coeficiente de conversión

ND: Valor o nivel digital

El cálculo de los valores de reflectividad se realizó con la misma ecuación (2) que se utilizó para la imagen Landsat ETM+.

Los coeficientes de corrección para las dos imágenes son obtenidos de las entidades encargadas de la gestión de los sensores. En el caso de Landsat ETM+ además, de los datos obtenidos del archivo de cabecera (header) (APN – SIB, 2005).

Cálculo de los Índices de Vegetación

Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI).

Este índice es derivado de la combinación de las reflectancias captadas en el rango espectral del rojo e infrarrojo cercano.

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R}$$

Donde:

NIR = reflectancia corregida atmosféricamente correspondiente al infrarrojo cercano

R = reflectancia corregida atmosféricamente correspondiente al rojo.

$$NDVI(Landsat7ETM+) = \frac{B4 - B3}{B4 + B3}$$

$$NDVI(ASTER) = \frac{B3 - B2}{B3 + B2}$$

Índice de estrés hídrico (MSI)

El MSI combina las reflectancias captadas en el infrarrojo cercano e infrarrojo medio. La fórmula utilizada fue:

$$MSI = \frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR}$$

Donde:

NIR = reflectancia corregida atmosféricamente correspondiente al infrarrojo cercano

SWIR = reflectancia corregida atmosféricamente correspondiente al infrarrojo medio

Gonzaga 2015; Aplicación de Índices de Vegetación Derivados de Imágenes Satelitales para análisis de Coberturas Vegetales en la Provincia de Loja, Ecuador

$$MSI(Landsat7ETM+) = \frac{B4 - B5}{B4 + B5}$$

$$MSI(ASTER) = \frac{B3 - B4}{B3 + B4}$$

Para el cálculo de este índice con la imagen ASTER, previamente se remuestreó la banda del SWIR (banda 4), es decir se cambió de 30 a 15 m con el propósito de tener el mismo tamaño de pixel en las dos bandas.

Índice de vegetación ajustado al suelo (SAVI)

Los mismos del NDVI, incorpora un factor de corrección del efecto suelo llamado “línea de suelo”, parámetro L. Este índice trata de corregir el efecto del suelo en el valor del índice. Es propio para zonas áridas.

El SAVI se calculó mediante la siguiente expresión:

$$SAVI = \frac{IR - R}{IR + R + L} (1 + L)$$

Donde:

IR = reflectancia corregida atmosféricamente correspondiente al infrarrojo cercano

R = reflectancia corregida atmosféricamente correspondiente al rojo

L = es un parámetro que varía según la densidad de la vegetación, en las 2 imágenes se utilizó 0,5.

$$SAVI(Landsat7ETM+) = \frac{B4 - B3}{B4 + B3 + 0,5} (1 + 0,5)$$

$$SAVI(ASTER) = \frac{B3 - B2}{B3 + B2 + 0,5} (1 + 0,5)$$

Las coberturas se obtuvieron a partir del mapa de cobertura y uso de suelo, en este caso se seleccionaron bajo dos criterios: la selección de coberturas vegetales permanentes, y la segunda que sean coberturas que queden comprendidas dentro de la superficie de las dos imágenes. Se seleccionaron 10 polígonos por cada cobertura, como se muestra en la figura 1.

Evaluación de los Índices de Vegetación para cada cobertura

Obtenidas las imágenes de los índices (3 para Landsat 7 ETM+ y 3 para ASTER) se procedió

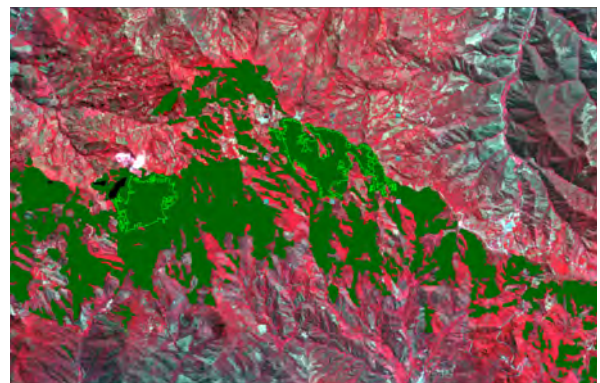
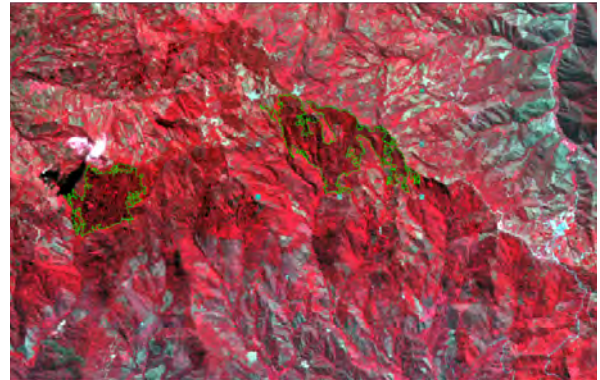


Figura 1. Obtención de los polígonos a partir de las imágenes satelitales y el mapa de cobertura y uso de suelo (ejemplo de toma de la cobertura bosque húmedo denso).

a extraer las estadísticas individuales para cada índice. Para este fin se realizó una operación espacial entre dos capas de información, vector (polígonos de coberturas vegetales) y raster (las imágenes de los índices).

Teniendo como objetivo determinar cuál de los tres índices discrimina mejor el estado y tipo de las coberturas vegetales, partiendo de una variable cuantitativa (valor de los índices), se realizó pruebas estadísticas paramétricas para establecer si existen diferencias estadísticamente significativas entre los valores de los índices para cada una de las coberturas.

Evaluación de los índices de vegetación para cada cobertura

Obtenidas las imágenes de los índices (3 para Landsat 7 ETM+ y 3 para ASTER) se procedió a extraer las estadísticas individuales para cada índice. Para este fin se realizó una operación espacial entre dos capas de información, vector (polígonos de coberturas vegetales) y raster (las imágenes de los índices).

Teniendo como objetivo determinar cuál de los tres índices discrimina mejor el estado y tipo de las coberturas vegetales, partiendo de una variable cuantitativa (valor de los índices), se realizó pruebas estadísticas paramétricas para establecer si existen diferencias estadísticamente significativas entre los valores de los índices para cada una de las coberturas.

Procesamiento de Datos Meteorológicos

Los datos se obtuvieron de los anuarios meteorológicos del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología de Ecuador INAMHI.

Existieron inconvenientes en la obtención de estos datos, la densidad de las estaciones en el área de estudio no fue la apropiada para la generación de superficies climáticas; y existieron vacíos de información en el registro de datos en algunas estaciones.

Se trabajó con datos de precipitaciones medias mensuales en un periodo desde 1964 hasta 2001, para el caso de temperatura con un periodo desde 1974 hasta 2001 (para algunos años no hay registro de datos), promediados cada 3 meses para el caso de temperatura y la suma para precipitación. Los datos corresponden a los meses de agosto, septiembre y octubre que son los meses cercanos de la fecha de toma de la imagen Landsat 7 ETM+.

Obtención de Superficies Climáticas Mediante el Método de Interpolación Kriging.

El trabajo geoestadístico se llevó a cabo en 3 etapas:

Análisis exploratorio de los datos

Análisis estructural: Esta etapa consistió en el estudio de la continuidad y variabilidad espacial de la precipitación y la temperatura mediante el cálculo del variograma.

Predicción de las variables precipitación y temperatura: Superficies continuas de estas variables obtenidas mediante método de kriging.

Determinación de la Correlación entre Precipitación – Temperatura y los Índices de Vegetación.

Obtención de puntos muestrales, mediante herramientas GIS se obtuvieron 173 puntos al

azar dentro del polígono del área de estudio a una distancia no menor a 500 m.

Posteriormente mediante técnicas de análisis espacial (función zonal entre raster y vector), se pasaron los valores de los índices de vegetación, precipitación y temperatura (rasters) a los puntos muestrales (vector).

Para determinar la relación lineal entre las variables cuantitativas se calculó el coeficiente de correlación de Pearson. Cabe indicar que para establecer las co-relaciones entre las variables climáticas y los índices de vegetación solo se utilizó los 3 índices obtenidos a partir de la imagen Landsat 7 ETM+, debido a que fue la imagen que mayor se ajustó a las superficies climáticas obtenidas.

Resultados

El estado de las coberturas vegetales se definió en base a la densidad y vigor vegetal, de acuerdo a la descripción de cada una de ellas en el trabajo de elaboración del mapa de cobertura y uso de suelo.

Las desviaciones estándar nos permite determinar las coberturas que tienen los valores más alejados con respecto a su valor promedio, en consecuencia, partimos del supuesto que, mientras más bajos son las desviaciones estándar mejor calidad de la muestras (son más homogéneas), y contrariamente las desviaciones más altas tuvieron mayor heterogeneidad de los valores de pixeles seleccionados para cada cobertura (Figuras 1 y 2).

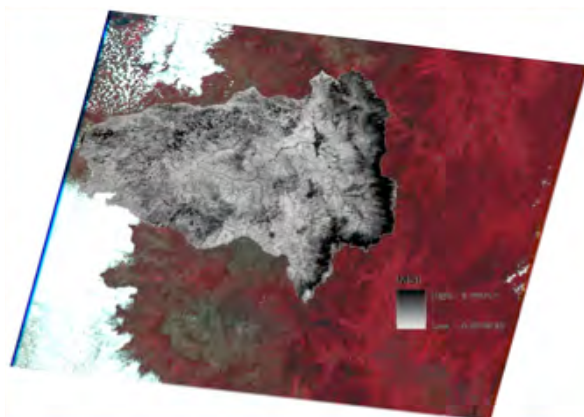


Figura 2. Índice de estrés hídrico obtenido a partir de la imagen Landsat ETM + 7

Gonzaga 2015; Aplicación de Índices de Vegetación Derivados de Imágenes Satelitales para análisis de Coberturas Vegetales en la Provincia de Loja, Ecuador

Evaluación de los índices de vegetación NDVI, MSI y SAVI para estimar el estado de la cobertura vegetal

Coberturas	Identificación
Bosque húmedo denso BHD	1
Bosque húmedo intervenido BHI	2
Bosque seco denso BSD	3
Bosque seco ralo BSR	4
Bosque seco semi denso BSSM	5
Matorral húmedo alto MHA	6
Matorral húmedo degradado MHD	7
Matorral seco alto MSA	8
Matorral seco bajo MSB	9
Pastos P	10
Suelo desnudo SD	11

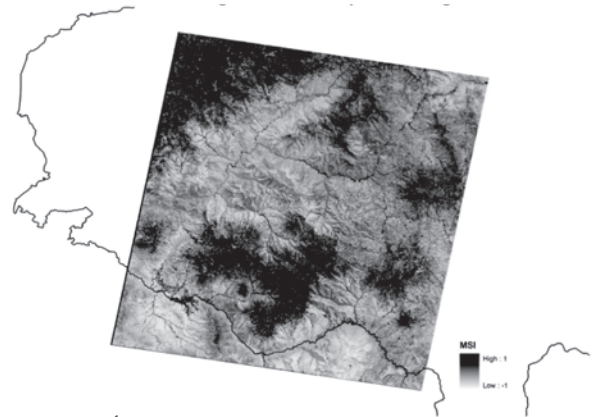


Figura 3. Índice de estrés hídrico MSI obtenido a partir de la imagen ASTER.

Cuadro 2. Valores promedio y desviaciones estándares de los 3 índices para cada cobertura vegetal, con la imagen Landsat 7 ETM +.

Coberturas	MSI		NDVI		SAVI	
	Media	DS	Media	DS	Media	DS
Bosque húmedo denso BHD	101,73	10,18	186,33	17,96	150,79	18,70
Bosque húmedo intervenido BHI	115,71	13,29	208,76	19,31	165,54	14,27
Bosque seco denso BSD	97,35	9,59	166,61	25,75	137,61	17,75
Bosque seco ralo BSR	68,39	5,99	119,15	13,51	101,73	11,23
Bosque seco semi denso BSSM	83,42	4,91	147,63	9,76	122,23	8,62
Matorral húmedo alto MHA	101,58	13,00	188,79	18,73	152,94	13,79
Matorral húmedo degradado MHD	85,83	9,04	165,05	18,28	139,77	15,19
Matorral seco alto MSA	65,92	7,87	112,85	14,01	95,77	10,11
Matorral seco bajo MSB	66,65	6,19	97,27	6,48	90,55	4,28
Pastos P	74,61	9,5	145,02	15,26	123,32	11,64
Suelo desnudo SD	61,27	7,66	91,10	16,01	90,33	12,42

Del cuadro 2 se desprende que las muestras con los valores más altos son bosque seco denso, matorral húmedo alto y matorral húmedo degradado, los valores más bajos están en las coberturas matorral seco bajo y bosque seco semi denso. En la mayoría de las muestras se mantienen desviaciones estándar cercanas a los valores más bajos.

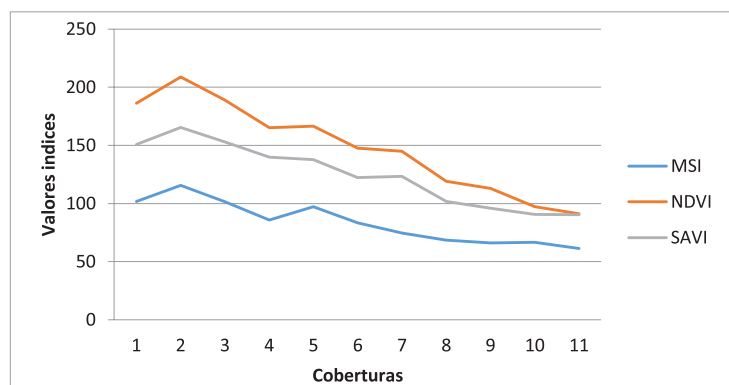


Figura 4. Valores promedio de los índices MSI, NDVI y SAVI derivados de la imagen Landsat 7 ETM+ para todas las coberturas analizadas.

En la figura 4 se evidencian la tendencia de los valores obtenidos para todos los índices es similar, se aprecia que el índice que registra los valores más bajos en todas las coberturas es el MSI, seguido del SAVI y los más altos el NDVI.

Los valores más bajos corresponden a áreas con menor densidad vegetal y suelo desnudo en los tres índices (como se esperaba), el índice que registró valores más bajos en suelo desnudo fue el MSI (61.27), las coberturas con índices más bajos son: Matorral seco bajo (66.65 MSI, 97.27 NDVI y 90,55 SAVI), matorral seco alto (65.92 MSI, 112.85 NDVI y 95.77 SAVI) y bosque seco ralo (68.39 MSI, 119.15 NDVI y 101.73 SAVI). Los

valores más altos se evidencian en tres coberturas, bosque húmedo intervenido (115.71 MSI, 208.76 NDVI, 165.34 SAVI) matorral húmedo alto (101.58 MSI, 188.79 NDVI y 152.94 SAVI) y bosque húmedo denso (101.73 MSI, 186.33 NDVI y 150,79 SAVI). En la figura 1 se aprecia que el MSI es el índice con los valores que tienen ligeramente mayor correspondencia con el estado vegetal de las coberturas, esto se aprecia mejor con las coberturas menos densas, desde el bosque seco denso (5) hasta suelo desnudo (11). La cobertura que alcanza los mayores valores en los 3 índices es la número 2, bosque húmedo intervenido.

Cuadro 3. Valores promedio y desviaciones estándares de los 3 índices para cada cobertura vegetal, con la imagen ASTER.

Coberturas	MSI		NDVI		SAVI	
	Media	DS	Media	DS	Media	DS
Bosque húmedo denso BHD	147,04	4,72	198,63	4,21	160,15	8,77
Bosque húmedo intervenido BHI	156,21	4,52	199,31	3,09	168,27	7,02
Bosque seco denso BSD	141,60	6,73	193,89	4,62	152,46	8,93
Bosque seco ralo BSR	113,82	5,56	161,32	5,12	119,44	5,74
Bosque seco semi denso BSSM	118,94	4,11	171,39	3,31	127,83	4,54
Matorral húmedo alto MHA	151,37	5,38	200,57	3,94	172,41	7,96
Matorral húmedo degradado MHD	148,57	4,94	198,02	5,54	176,36	7,29
Matorral seco alto MSA	114,10	6,01	161,64	6,67	118,61	6,79
Matorral seco bajo MSB	114,42	4,48	150,58	2,63	113,15	2,85
Pastos P	134,33	8,77	182,78	10,03	154,99	17,59
Suelo desnudo SD	111,79	3,58	147,92	4,60	112,70	5,71

Para el caso de la imagen ASTER, del cuadro 3 se desprende que, las muestras en todos los casos presentan desviaciones estándar más bajas con respecto a las muestras obtenidas con la imagen Landsat ETM+. Es decir que estas muestras presentan mayor homogeneidad, a pesar de haberse

utilizado los mismos polígonos de las coberturas, esto puede deberse a las diferencias de resolución espacial (tamaño de píxeles) entre las 2 imágenes. El valor más alto corresponde a la cobertura de pastos.

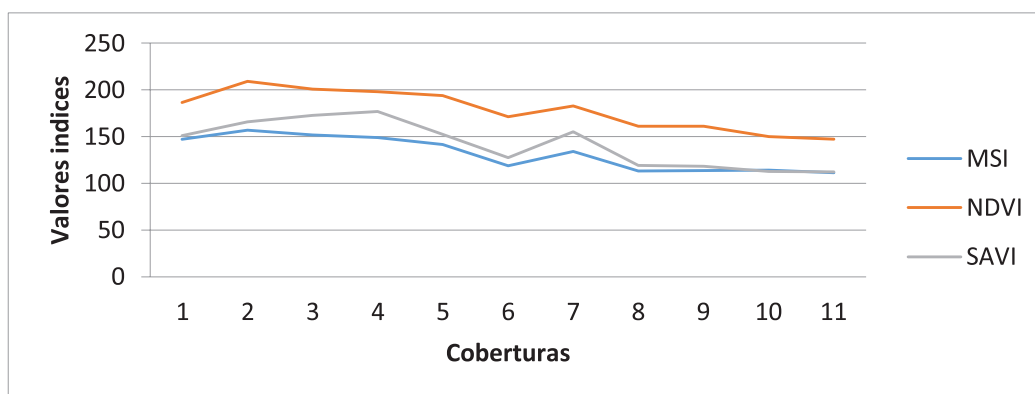


Figura 5. Valores promedio de los índices MSI, NDVI y SAVI derivados de la imagen ASTER para todas las coberturas analizadas.

La tendencia de los valores obtenidos para todos los índices es similar, el índice que registra los valores más bajos en todas las coberturas es el MSI, seguido del SAVI y los más altos el NDVI (las coberturas están ordenadas según la cuadro 2).

Con los valores registrados con la imagen ASTER se evidencia un comportamiento parecido en los tres índices; los valores más bajos corresponden a ecosistemas con menor densidad vegetal y suelo desnudo, en los tres índices, como se esperaba, el suelo desnudo mantiene el menor valor en el MSI (111.79), pero con poca diferencia con respecto al SAVI (112.70), las coberturas con valores más bajos en orden descendente son: bosque seco ralo, matorral seco alto y matorral seco bajo. En los valores más altos se aprecia la misma correspondencia que en la imagen Landsat 7 ETM+, con excepción del pasto, así tenemos los valores más altos en: bosque húmedo intervenido, combinación de bosque pastos y agricultura, (156.21 MSI, 199.31 NDVI y 168.27 SAVI), matorral húmedo alto (151.37 MSI, 200,57 NDVI y 172.41 SAVI) y matorral húmedo degradado (148.77 MSI, 198.02 NDVI y 176.36 SAVI). En la figura 2 se aprecia que la cobertura que destaca es

pastos, teniendo valores mayores que coberturas más densas (el mismo comportamiento en los 3 índices).

Se utilizaron test estadísticos que nos permitieron establecer diferencias significativas entre los valores de cada índice para las coberturas vegetales. Se aplicó la Prueba T de Student-Welch para dos muestras independientes con varianzas no homogéneas.

En este caso las hipótesis fueron:

H1: Existe diferencias significativas entre los valores de índice de vegetación para cada cobertura.

Ho: No existe diferencia significativa entre los valores de índice de vegetación para cada cobertura, por lo tanto todos los grupos son iguales y no difieren entre si.

El nivel de significancia es del 5 %, es decir, para todo valor de probabilidad (valor de p o sig) menor o igual a 0,05, se acepta la hipótesis H1, y se rechaza la Ho, si es mayor que 0,05, se acepta la Ho y se rechaza la H1

Cuadro 4. Prueba robusta de igualdad de medias de Welch para los índices MSI, NDVI y SAVI con la imagen ASTER Y Landsat 7 ETM+.

Índices /imagen		Estadístico ^a	gl1	gl2	Sig.
MSI ASTER	Welch	348,490	10	101,801	5.4979E-74
NDVI ASTER	Welch	707,896	10	102,321	1.1452E-89
SAVI ASTER	Welch	362,397	10	101,713	8.9201E-75
MSI Landsat	Welch	88,877	10	101,169	1.6942E-45
NDVI Landsat	Welch	185,023	10	101,832	1.3607E-60
SAVI Landsat	Welch	144,838	10	101,747	1.7285E-55

En el cuadro 4 se observa que en todos los casos el valor de p es menor a 0,05, por lo tanto rechazamos la hipótesis nula Ho y aceptamos la alterna H1, y se concluye que existen diferencias significativas entre los valores medios de los tres índices de vegetación en las diferentes coberturas vegetales analizadas.

Para el caso del MSI, desestimando el suelo desnudo, las medias de las coberturas que guardan mayor diferencia son: bosque húmedo intervenido

(2), Bosque seco ralo (4); las que tienen mayor similitud son: matorral seco alto (8) y matorral seco bajo (9).

El SAVI denota también un comportamiento parecido en las dos imágenes, con una ligera diferencia entre matorral húmedo alto (6) y matorral húmedo degradado (7) con la imagen ASTER, en este caso la mayor diferencia se establece entre las medias 7-9 (matorral seco bajo)

Relación entre los índices de vegetación y las variables de precipitación y temperatura

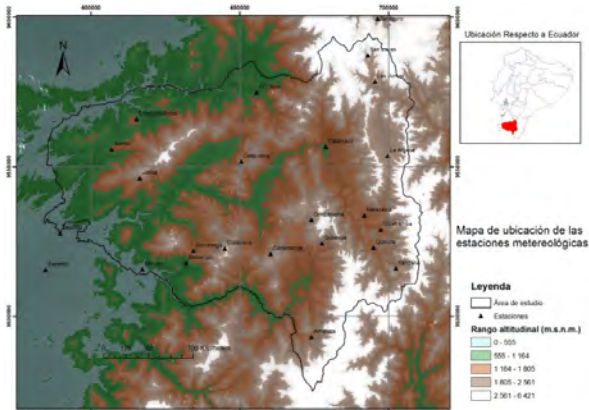


Figura 6. Ubicación de las estaciones meteorológicas utilizadas para la obtención de las superficies de precipitación y temperatura del área de estudio (INAMHI 2000).

Análisis estructural de los datos

Cuadro 5. Modelo ajustado del variograma experimental para las variables precipitación y temperatura

Parám	Valores	Parám	valores
Modelo	Spherical	Modelo	Spherical
Nugget	486,19	Nugget	1,7
Range	111352	Range	66678
Sill	4981,9	Sill	14,37

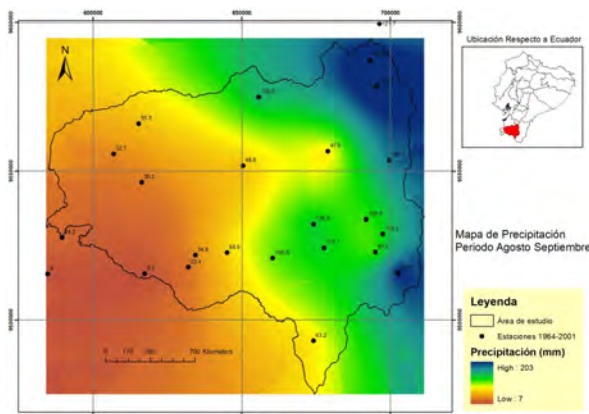


Figura 7. Interpolación de la variable precipitación mediante el método de Kriging

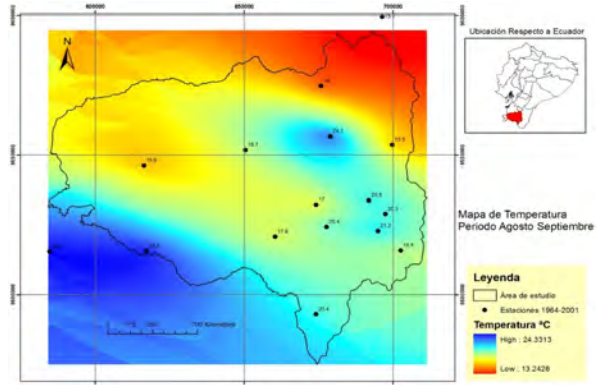


Figura 8. Interpolación de la variable temperatura mediante el método de Kriging

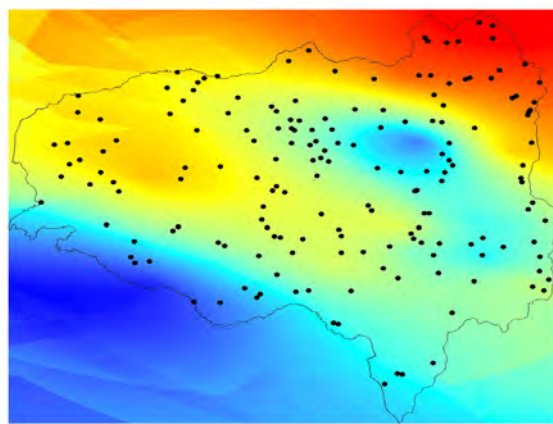


Figura 9. Puntos muestrales para determinar la correlación entre los índices de vegetación y las variables precipitación y temperatura

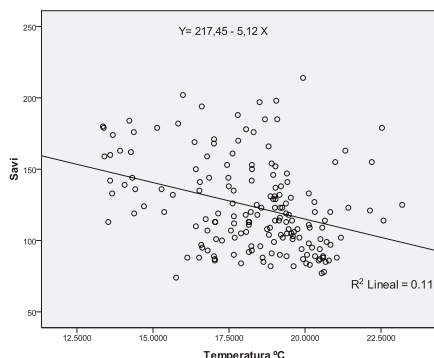
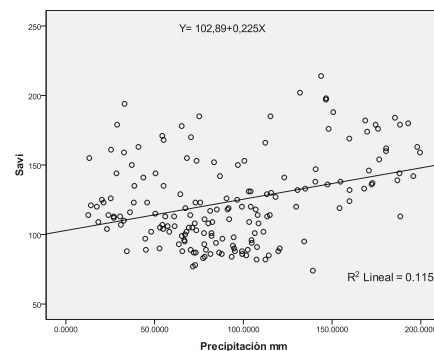


Figura 10. Correlación de Pearson entre el índice SAVI y las variables precipitación y temperatura.

Gonzaga 2015; Aplicación de Índices de Vegetación Derivados de Imágenes Satelitales para análisis de Coberturas Vegetales en la Provincia de Loja, Ecuador

El valor de los coeficientes de correlación es de 0,34 para precipitación y -0,342 para temperatura, esto se traduce en correlaciones muy bajas de estas dos variables con el índice SAVI. La figura 10 corrobora una correlación positiva y negativa para precipitación y temperatura respectivamente. Sin embargo, al centrarse en los R2 (coeficiente de determinación) 0,115 y 0,117, se observa que estos son muy bajos o próximos a cero, es decir, la proporción de la variabilidad del índice con respecto a las variables precipitación y temperatura es muy baja, (alrededor del 11 %), en consecuencia, no se observa una correlación entre las variables.

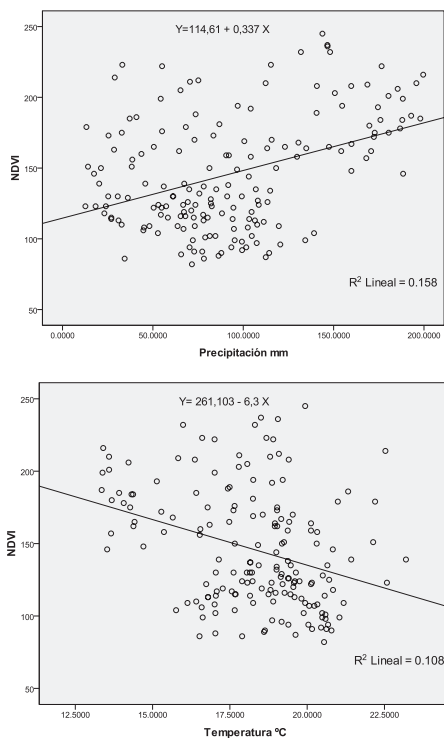


Figura 11. Correlación de Pearson entre el índice NDVI y las variables precipitación y temperatura.

Las variables tienen una correlación, con un riesgo (máximo) de equivocarnos de 0,05. Sin embargo el valor del coeficiente de correlación es de -0,328, por lo tanto una correlación muy baja.

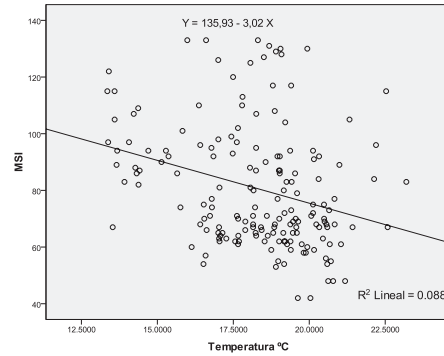
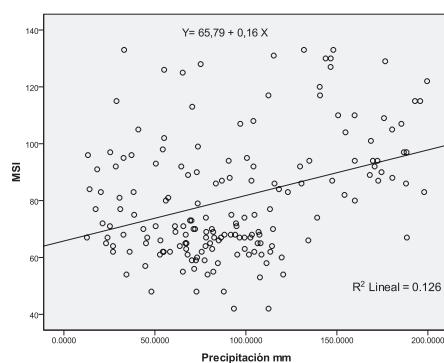


Figura 12. Correlación de Pearson entre el índice MSI y las variables precipitación y temperatura.

Ambas variables tienen una correlación, con un riesgo (máximo) de equivocarnos de 0,05. Los R² (coeficiente de determinación) 0,158 y 0,087, son muy bajos o próximos a cero, por lo tanto, la proporción de la variabilidad del MSI con respecto a las variables precipitación y temperatura es muy baja, no se observa una correlación significativa.

Discusión

Comparando los datos de las dos imágenes, si bien no se aprecia una correspondencia exacta, se destaca que se mantienen los valores bajos y altos para las mismas coberturas, tanto con ASTER como Landsat 7 ETM+, los valores más altos se registran en bosques y matorrales húmedos y los más bajos en los bosques y matorrales secos, estos últimos después del suelo desnudo.

Se observa que las desviaciones estándar de los índices para cada cobertura son menores en todos los casos en ASTER; por lo tanto se deduce que esta imagen consigue mejor homogeneidad cuando extraemos muestras de coberturas a partir de polígonos de mapas de uso de suelo, resultado que era esperado debido a las diferencias de resolución espacial.

Los tres índices tuvieron un comportamiento similar en la diferenciación de los tipos de coberturas y como indicador del estado o vigor vegetal. El MSI fue el índice que tuvo ligeramente mejor correspondencia entre sus valores y los tipos de las coberturas vegetales en las dos imágenes. Este resultado es coincidente con los resultados alcanzados por Esperanza y Zerda (2002) donde el MSI (denominado como NDVI 154) derivado de una imagen Landsat 7 ETM+ fue el índice que aportó mayor información en la discriminación de coberturas forestales.

Llama la atención que la cobertura bosque húmedo

denso (1), la cobertura con mayor densidad y vigor vegetal, no es precisamente la que alcanza el mayor valor, esto en los tres índices. Según la descripción de las coberturas, es posible que en ésta cobertura (bosque húmedo intervenido BHI) exista mezcla de pastizales y agricultura, que origina valores más altos. Los valores altos en las coberturas de pastos puede deberse a la presencia de mayor contenido de humedad en su estructura que los árboles de los bosques, en consecuencia mayor vigor vegetal.

En los índices NDVI y SAVI se observa un comportamiento similar en las coberturas densas, como bosques y matorrales húmedos (coberturas 1,2,3, 6 y 7), sin embargo, al observar el comportamiento en las coberturas menos densas (4,8,9 y 10) vemos que, el SAVI a pesar de ser un índice que incorpora un coeficiente de corrección del efecto suelo, no discrimina las coberturas mejor que el NDVI.

Contrariamente a los resultados obtenidos por Sánchez *et al.*, (2000) donde el NDVI fue el índice que mejor discriminó los modelos de combustible compuestos por diferentes tipos de coberturas vegetales, en el presente trabajo no se observa una mayor discriminación con el NDVI ni el SAVI. Algo coincidente entre los dos trabajos, es que llama la atención que el SAVI en coberturas menos densas, a pesar de ser un índice que incorpora un coeficiente de corrección del efecto suelo, no discrimina mejor las coberturas que el NDVI. Los resultados obtenidos por Huete (1988), muestran que el SAVI pudo discriminar el efecto suelo en plantaciones de algodón obteniendo valores más ajustados que el NDVI. La constante L (que elimina el efecto del suelo en el índice SAVI) puede tomar valores entre 0 y 1, dependiendo de la densidad de la vegetación, siendo más alto para densidades más bajas. Con el conocimiento previo de las densidades de vegetación se puede elegir mejor el valor del coeficiente de corrección del efecto suelo, aunque un factor de ajuste ideal no se mantiene constante debido a que la naturaleza de la interacción suelo – vegetación varía con la cobertura del dosel. El SAVI ($L = 0,5$) minimiza el ruido del suelo con éxito para densidades intermedias, sin embargo, para otros tipos de coberturas, agrícolas y forestales son necesario estudios de campo para garantizar la aplicabilidad del mismo. En el presente estudio se utilizó $L = 0,5$ para todas las coberturas, esto hace presumir que los resultados obtenidos con SAVI, que ese valor podría no haber sido el adecuado para el análisis de las coberturas analizadas.

En cuanto a la relación de los índices con las variables climáticas, si bien, los datos reflejaron correlaciones positivas para precipitación y negativas para temperatura en todos los índices, si nos centramos en los coeficientes de correlación (R) y determinación (R^2) se puede establecer que no hay correlaciones significativas. Estos resultados no son los esperados cuando se los comparan con los hallados por De la Casa y Ovando (2006), quienes determinan que la relación entre valores acumulados de precipitación y NDVI, presentó coeficientes de determinación (R^2) entre 0,71 y 0,84 y por los alcanzados por Gómez (2003) quien obtuvo una relación directa entre el NDVI y la precipitación anual e inversa con las temperaturas extremas, a escala regional. Mientras que en ambos trabajos citados se utilizaron datos de campo y de larga periodicidad en precipitación, temperatura e índices de vegetación, en el presente estudio se utilizó un periodo más acotado, los datos corresponden a los meses de agosto, septiembre y octubre, si bien se promediaron datos desde 1964 a 2001 los mismos no son continuos. Probablemente se hubieran alcanzado resultados similares si se hubiera contado con mayor continuidad de datos anuales de precipitación y temperatura y mayor número de estaciones meteorológicas en el área de estudio.

El método de interpolación Kriging permitieron obtener superficies climáticas de precipitación y temperatura, sin embargo, los vacíos de información de estas variables y la falta de un número adecuado de estaciones meteorológicas, incidió en la obtención de superficies climáticas adecuadas, esto se evidenció más en la variable temperatura. Según Martínez (2009) los vacíos de información y de estaciones meteorológicas limitan la confiabilidad de las superficies obtenidas y dejan en evidencia zonas de mayor variabilidad, y a la vez incertidumbre, al aplicar varios modelos de interpolación.

Conclusiones

Los índices de vegetación evaluados, NDVI, MSI y SAVI derivados de imágenes Landsat 7 ETM+ y ASTER permitieron estimar el estado o vigor vegetal de las coberturas vegetales presentes en el área de estudio, los tres índices presentan diferencias para cada cobertura vegetal.

Los tres índices de vegetación permitieron caracterizar y discriminar los diferentes tipos de cobertura vegetal analizados, aunque el SAVI en coberturas menos densas, a pesar de ser un índice que incorpora un coeficiente de corrección del efecto suelo, no

discriminó mejor las coberturas que el NDVI.

La variación de los índices con respecto a los dos tipos de imágenes utilizadas es mínima, su comportamiento es similar en cuanto a los valores de los índices. La diferencia que resalta es que en la imagen ASTER se obtienen muestras de coberturas vegetales más homogéneas.

No existe una correlación significativa entre los valores de los índices de vegetación y los de las superficies de precipitación y temperatura obtenidas con el método de kriging a partir de datos registrados en un periodo acotado previo a la adquisición de la imagen Landsat 7 ETM+.

Literatura Citada

- APN - Administración de Parques Nacionales - Sistema de Información de Biodiversidad (APN - SIB). 2005. Protocolo para el pre procesamiento de imágenes satelitales Landsat para aplicaciones de la administración de parques nacionales. Buenos Aires - Argentina. 21 p.
- Cueva, J. y Chalán, L. 2010. Cobertura Vegetal y Uso Actual del Suelo de la Provincia de Loja. Informe Técnico. Departamento de Sistemas de Información Geográfica de Naturaleza & Cultura Internacional. Graficas Amazonas. Loja- Ecuador.
- De la Casa, A. y Ovando, G. 2006. Relación entre la precipitación e índices de vegetación durante el comienzo del ciclo anual de lluvias en la Provincia de Córdoba. En: Revista de Investigaciones Agropecuarias RIA - INTA Argentina 2006. Vol. 35 (1): p 67 -85, ISSN 0325-8718. Argentina.
- Esperanza, F y Zerda, H. 2002. Potencialidad de los índices de vegetación Para la discriminación de coberturas forestales. Universidad Nacional de Santiago del Estero, Facultad de Ciencias Forestales, Santiago del Estero, 2002.
- Gobierno Provincial de Loja, 2010. Mapa de Cobertura y Uso de Suelo de la Provincia de Loja, Departamento de Planificación Jefatura de Ordenamiento Territorial, Loja Ecuador.
- Gómez, L. 2003. La Relación entre el Índice Normalizado de Vegetación y la Variabilidad del Clima en Oaxaca: Una Herramienta para el Manejo de Ecosistemas. Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM - Mexico.
- Huete, A. R., Jackson, R. D. y Post, D. F. 1985. Spectral response of a plant canopy with different soil backgrounds. Remote Sensing of the Environment, 17. Pp. 37-53.
- Huete, A. 1988. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). Remote Sensing of Environment 25: 295-309.
- INAMHI. 2000. Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología de Ecuador. Ubicación de geográfica de estaciones meteorológicas de la Provincia de Loja; Anuarios meteorológicos 2000, 2001, 2002, 2003, 2004, 2005, 2006.
- Martínez, C. 2009. Generación de superficies climáticas para Ecuador y evaluación de su utilidad para discriminar paisajes ecológicos. Fundación Ecuatoriana de Estudios Ecológicos - Ecociencia.
- Ministerio de agricultura y Ganadería 1974-1984 - Sistema de Información Geográfica para Regionalización Agraria MAG -PRONAREG - uso potencial de suelo de la provincia de Loja.
- Pérez, C y Muñoz, A. 2006. Teledetección Nociones y Aplicaciones. Universidad de Salamanca. 356 p. ISBN-10: 84-611- 1613-5.
- Rock, B. N., D. L. Williams, and J E. Vogelmann. 1985. Field and airborne spectral characterization of suspected acid deposition damage in red spruce (*Pricea rubens*) from Vermont, Machine Processing of Remotely Sensed Data Symposium, 71-81.
- Rouse, J. W., Haas, R. W., Schell, J. A., Deering, D. H. y Harían, J. C. 1974. Monitoring the vernal advancement andretrogadation (Greenwave effect) of natural vegetation. Greenbelt, MD. USA, NASA/GSFCT.
- Sánchez, E. Torres, M. Palacios, A. Aguilar, M. Pino, S. Granado, L. 2000. Comparación del NDVI con el PVI y el SAVI como Indicadores para la Asignación de Modelos de Combustible para la Estimación del Riesgo de Incendios en Andalucía. Tecnologías Geográficas para el Desarrollo Sostenible Departamento de Geografía. Universidad de Alcalá, 2000: 164-174 Disponible en Internet en: http://age.ieg.csic.es/metodos/docs/IX_2/Sanchez_Esperanza.PDF [Consulta: 02 de abril 2011].
- U.S.G.S. 2009. Geological Survey Earth Resources Observation & Science Center (EROS). Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER), Product Description. Disponible en Internet en: http://eros.usgs.gov/#/Find_Data/Products_and_Data_Available/Aster [Consulta: 02 de abril 2012].