

SERIES TEMPORALES DE VEGETACIÓN PARA UN MODELO FORESTAL DESTRUIDO: EL CASO DE TADLA AZILAL (MARRUECOS)

TIME SERIES OF VEGETATION FOR A DESTROYED FOREST MODEL: THE CASE OF TADLA AZILAL (MOROCCO)

Abderrahim Nemmaoui¹, Andrés M. García-Lorca¹, Fernando J. Aguilar², Manuel A. Aguilar²

¹Facultad de Humanidades y Psicología, Área de Análisis Geográfico. ²Escuela Politécnica Superior y Facultad de Ciencias Experimentales, Departamento de Ingeniería. Universidad de Almería, España. (abdo.nemmaoui@gmail.com).

RESUMEN

La hipótesis de esta propuesta metodológica se basa en que las recientemente introducidas técnicas OBIA (Object Based Image Analysis), aplicadas a imágenes de satélite de media resolución y amplia disponibilidad histórica, representan una herramienta eficiente y precisa para detectar cambios en la cobertura y uso del suelo a escala geográfica regional. Como ejemplo de su potencial se realizó un análisis del fenómeno de la deforestación entre los años 1973 y 2010 en la región de Tadla Azilal (Marruecos) a través del uso de imágenes de satélite de la serie Landsat. Esta zona fue declarada oficialmente como afectada por deforestación aguda en varios estudios e informes ministeriales, aunque se carecía de información cuantitativa que sustentara ese dictamen. Los resultados obtenidos fueron muy prometedores en cuanto a su precisión y facilidad de implementación (Kappa=0.817 y overall accuracy=87.55±4.1 %). Se estimó un proceso neto de deforestación de la región con una pérdida de superficie forestal total de 56 % en el periodo 1973 a 2010, lo que equivale a un porcentaje medio de deforestación anual cercano al 1.5 %.

Palabras clave: imagen de satélite, técnicas OBIA, deforestación, Tadla Azilal.

INTRODUCCIÓN

La función de la vegetación en el ciclo hidrológico de una cuenca se muestra en varios estudios e investigaciones (Henderson-Sellers *et al.*, 1993; Kucharik *et al.*, 2000; Arora, 2002). Andréassian (2004) señala los efectos de la deforestación sobre su entorno y las consecuencias que pue-

ABSTRACT

The hypothesis of this methodological proposal is based on the fact that the recently introduced OBIA techniques (Object Based Image Analysis), applied to satellite images of medium resolution and wide historic availability, represent an efficient and accurate tool in detecting changes in coverage and use of soil at regional geographic scale. As an example of its potential an analysis of the phenomenon of deforestation was performed between 1973 and 2010 in the region of Tadla Azilal (Morocco) through the use of satellite images of the Landsat series. This area was officially declared affected by acute deforestation in several studies and ministerial reports, but there was lack of quantitative information to substantiate this opinion. The results were very promising in terms of accuracy and ease of implementation (Kappa=0.817 and overall accuracy=87.55±4.1 %). A net process of deforestation in the region with a total forest loss of 56 % in the period 1973-2010 was estimated, equivalent to an average annual deforestation rate close to 1.5 %.

Key words: satellite image, OBIA techniques, deforestation, Tadla Azilal.

INTRODUCTION

The role of vegetation in the hydrologic cycle of a watershed is shown in several studies and research (Henderson-Sellers *et al.*, 1993; Kucharik *et al.*, 2000; Arora, 2002). Andréassian (2004) points out the effects of deforestation on the environment and the consequences that can occur at various levels of the ecosystem. From the hydrological point of view, the vegetation affects water balance, surface or underground, because of its role in the interception of rainfall, infiltration, and

*Autor responsable ❖ Author for correspondence.

Recibido: agosto, 2012. Aprobado: febrero, 2013.

Publicado como ARTÍCULO en *Agrociencia* 47: 267-280. 2013.

den ocurrir en varios niveles del ecosistema. Desde el punto de vista hidrológico, la vegetación influye en el balance de agua, superficial o subterránea, debido a su función en la intercepción de la lluvia, infiltración, evapotranspiración y, sobre todo, en la escorrentía superficial y la erosión. La erosión origina pérdidas de suelo fértil y, además, puede generar problemas de colmatación en los embalses y, por tanto, disminuir su capacidad de almacenamiento.

La masa vegetal cambia continuamente a escala temporal y espacial debido a varios hechos naturales o antrópicos. Una de las técnicas de monitoreo más eficientes utiliza imágenes de satélite multitemporales que permiten detectar cambios temporales en los componentes superficiales de la cubierta vegetal (Lund, 1983; Meline, 1988; Duveiller *et al.*, 2008), y generar mapas de localización que ayudan en la toma de decisiones y posibles labores de intervención y corrección. Los satélites de observación terrestre permiten generar una base de datos que aumenta continuamente y realizar estudios de seguimiento con la generación de modelos cuantitativos y cualitativos de las variables observadas.

Hay varios estudios basados en la combinación de imágenes de diferentes sensores que tienen una reducida resolución espacial, pero su resolución temporal es alta (Steven *et al.*, 2003). También es posible combinar tomas desde diferentes ángulos de observación, frecuencias, etc., para estimar parámetros forestales importantes como el índice de área foliar (Manninen *et al.*, 2005).

Por tanto, el análisis multitemporal de imágenes de satélite es la herramienta principal empleada para alcanzar el objetivo de este estudio: la identificación, estimación y georreferenciación de las zonas forestadas-deforestadas de la cuenca vertiente de la zona irrigada de Tadla Azilal (Marruecos) durante el periodo 1973-2010.

MATERIALES Y MÉTODOS

Zona de estudio

La región de Tadla Azilal se ubica en la zona sureste, a 200 km de la capital económica de Marruecos (Casablanca) (Figura 1) y comprende las provincias de Beni Mellal y de Azilal. Desde el principio de las actuaciones del Protectorado francés persiste en la zona un equilibrio entre llanura y montaña. La llanura tiene potencial agronómico y el área de montaña es la fuente

evapotranspiración, especially in surface runoff and erosion. Erosion causes loss of fertile soil and also can lead to problems of silting in reservoirs and therefore reduce its storage capacity.

The vegetation mass continuously changes at time and space scale due to various natural or anthropic facts. One of the most efficient monitoring techniques uses multitemporal satellite images that can detect temporal changes in the surface components of the vegetation cover (Lund, 1983; Meline, 1988; Duveiller *et al.*, 2008), and generate location maps that help decision-making and possible works of intervention and correction. Earth observation satellites can generate a database that is continuously increasing and allow for monitoring studies with the generation of quantitative and qualitative models of observed variables.

There are several studies based on the combination of images from different sensors having a reduced spatial resolution but whose temporal resolution is high (Steven *et al.*, 2003). It is also possible to combine shots from different viewing angles, frequencies, etc., to estimate important forest parameters as leaf area index (Manninen *et al.*, 2005).

Therefore, multitemporal analysis of satellite images is the main tool used to achieve the objective of this study: identification, estimation and georeference of the forested-deforested areas of the watershed contributing to the irrigated area of Tadla Azilal (Morocco) during the period 1973-2010.

MATERIALS AND METHODS

Study area

The Azilal Tadla region is located in the southeast area, 200 km from the economic capital of Morocco (Casablanca) (Figure 1) and includes the provinces of Beni Mellal and Azilal. From the beginning of the proceedings of the French Protectorate in the area persists a balance between plain and mountain. The plain has agronomic potential and the mountain area is the main source of groundwater or surface water resources, through Medio and Alto Atlas, the epicenter of the entire hydraulic device of the Moroccan kingdom. In this sense, the plain is regarded as a useful space of national interest with an economy based mainly on intensive agriculture, while the mountain is considered as a less useful space with a subsistence economy of grazing and forest overexploitation.



Figura 1. Localización geográfica del sitio de estudio Tadla-Azilal.
Figure 1. Geographic location of the study area Azilal Tadla.

principal de sus recursos hídricos subterráneos o superficiales, gracias al Medio y al Alto Atlas, epicentro de todo el dispositivo hidráulico del reino marroquí. En este sentido, la llanura es considerada como un espacio útil y de interés nacional con una economía basada principalmente en la agricultura intensiva, mientras que la montaña es considerada como un espacio menos útil, con una economía de subsistencia de pastoreo y sobreexplotación del bosque.

El Modelo Digital de Elevaciones (MDE) (Figura 2) correspondiente a la región de Tadla Azilal se usó para delimitar la cuenca hidrográfica. Es un MDE tipo DT1 (resolución horizontal de 3 arcos de segundo ~ 90 m) generado en el año 2000 en el contexto del programa SRTM (Shuttle Radar Topographic Mission). Las coordenadas horizontales están representadas mediante la proyección UTM en el sistema WGS84, mientras que las elevaciones se expresan como cotas ortométricas sobre el geoide EGM96 (Earth Gravitational Model 1996) (Slater *et al.*, 2006).

Descripción y tratamiento de las imágenes de satélite empleadas

Descripción de las imágenes de satélite

Se obtuvieron imágenes DE la serie Landsat de la NASA, distribuidas por el USGS a través del visualizador GLOVIS (Global Visualization Viewer; <http://glovis.usgs.gov/>). Para conseguir una cobertura completa de la región estudiada fueron necesarias CUATRO escenas Landsat para el 2010 (sensor Landsat 7 ETM+) y cuatro para 1973 (sensor Landsat 1 MSS), todas dentro de una ventana temporal de 2-7 d para cada año analizado (Cuadro 1). El objetivo era obtener, para cada uno de los

We used the Digital Elevation Model (DEM) (Figure 2) corresponding to the region of Tadla Azilal to delineate the watershed. It is a DEM type DT1 (horizontal resolution of 3 arc seconds ~ 90 m) generated in 2000 in the context of the program SRTM (Shuttle Radar Topographic Mission). The horizontal coordinates are represented by projection UTM in the WGS84 system, while elevations are expressed as orthometric heights on the geoid EGM96 (Earth Gravitational Model 1996) (Slater *et al.*, 2006).

Description and treatment of satellite images used

Description of satellite images

Images were obtained from the NASA Landsat series, distributed by the USGS through the display GLOVIS (Global Visualization Viewer; <http://glovis.usgs.gov/>). To ensure complete coverage of the study area FOUR Landsat scenes for 2010 (Landsat 7 +ETM Satellite sensor) were necessary and four for 1973 (Landsat 1 MSS sensor), all within a time window of 2-7 d for each year analyzed (Table 1). The aim was to obtain, for each of the sensors, reflectance in the near-infrared band as very sensitive channel to photosynthetic activity and therefore to the presence of biomass. The bands 6 and 7 of Landsat 1 MSS sensor (images 1973) capture electromagnetic radiation in the spectrum 0.7 to $0.8 \mu\text{m}$ (band 6) and 0.8 - $1.1 \mu\text{m}$ (band 7), while the ETM+ sensor detects near-infrared through its band 4 (0.76 to $0.9 \mu\text{m}$). A suitable combination of these three bands allows obtaining temporary differences in the near-infrared reflectance at pixel level and, thus, spatially quantifies and locates the appearance and disappearance of forest biomass between 1973 and 2010.

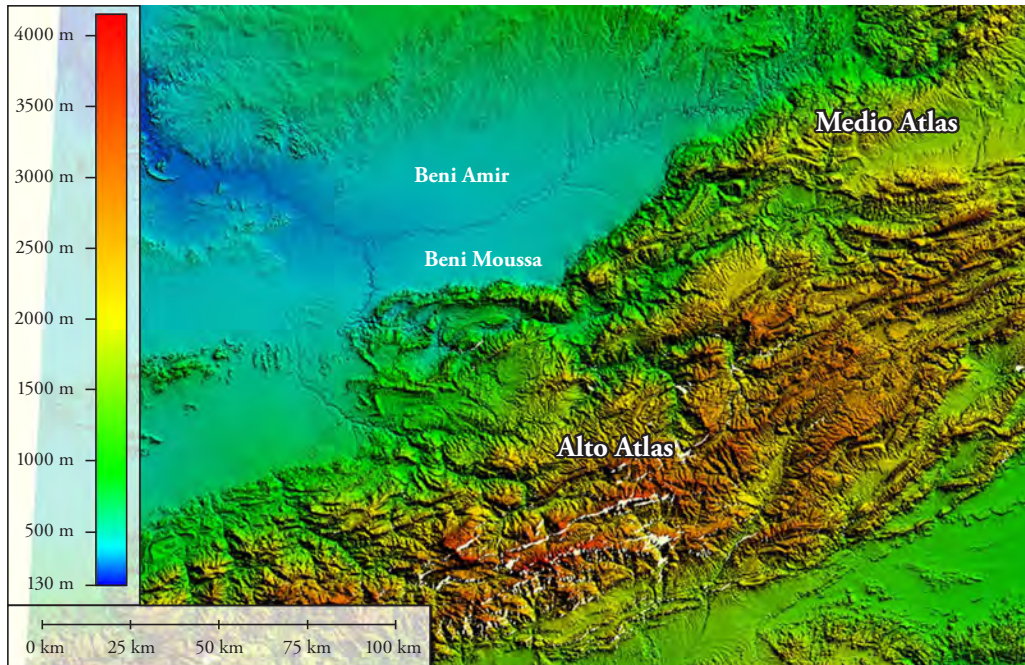


Figura 2. Modelo sombreado correspondiente al Modelo digital de elevaciones (MDE) de la zona de estudio obtenido con el programa SRTM (Shuttle Radar Topographic Mission) en el 2000. Fuente: GLOVIS [Global Visualization Viewer; <http://glovis.usgs.gov/>].

Figure 2. Shading model for the digital elevation model (DEM) of the study area obtained with the program SRTM (Shuttle Radar Topographic Mission) in 2000. Source: GLOVIS [Global Visualization Viewer; <http://glovis.usgs.gov/>].

sensores, la reflectancia en la banda de infrarrojo cercano como canal muy sensible a la actividad fotosintética y, por tanto, a la presencia de biomasa vegetal. Las bandas 6 y 7 del sensor MSS de Landsat 1 (imágenes de 1973) capturan radiación electromagnética en el espectro 0.7-0.8 μm (banda 6) y 0.8-1.1 μm (banda

Each of the scenes used is georeferenced in format GeoTIFF according to the UTM projection system on the WGS84 ellipsoid. To generate a final continuous scene in which one can collect all of our study area a mosaic of four Landsat scenes for each date was performed. This mosaic was prepared using ERDAS

Cuadro 1. Bandas utilizadas para la detección de la deforestación.
Table 1. Bands used for the detection of deforestation.

	ID de las bandas	Fecha de toma de la imagen
Banda Nº 6	L1217037_03719730308_B60	8/3/1973
	L1217038_03819730308_B60	
	L1216037_03719730307_B60	7/3/1973
	L1216038_03819730307_B60	
Banda Nº 7	L1217037_03719730308_B70	8/3/1973
	L1217038_03819730308_B70	
	L1216037_03719730307_B70	7/3/1973
	L1216038_03819730307_B70	
Banda Nº 4	L5202037_03720100630_B40	30/6/2010
	L5202038_03820100630_B40	
	L5201037_03720100623_B40	23/6/2010
	L5201038_03820100623_B40	

7), mientras que el sensor ETM+ detecta el infrarrojo cercano a través de su banda 4 (0.76-0.9 μm). Una adecuada combinación de esas tres bandas permite obtener diferencias temporales en la reflectancia al infrarrojo cercano a nivel de pixel y, por tanto, cuantificar y localizar espacialmente la aparición y desaparición de biomasa forestal entre 1973 y 2010.

Cada una de las escenas empleadas se encuentra georreferenciada en formato GeoTIFF según el sistema de proyección UTM sobre el elipsoide WGS84. Para generar una escena continua final en la que se recoja la totalidad de nuestra zona de estudio se realizó un mosaico de cuatro escenas Landsat para cada fecha. Dicho mosaico se elaboró mediante ERDAS Imagine v 9.1[®] considerando: 1) la coincidencia geométrica de las escenas unidas y 2) la coincidencia radiométrica, para lo cual se escogieron imágenes o escenas de las mismas fechas y del mismo sensor aplicando un ajuste o de histogramas.

Quantificación y corrección de los errores geométricos

Previo al análisis y tratamiento de las imágenes de satélite, se hicieron algunas comprobaciones y, en su caso, correcciones con el fin principal de reducir en lo posible la presencia de errores geométricos o radiométricos.

Las imágenes Landsat empleadas en este trabajo recibieron un nivel de corrección 6 el cual implica, además de la corrección sistemática de los errores del sensor o nivel de corrección 5 (a partir de datos almacenados por el propio sensor como efemérides, altitud, posición, etc.), el marcado manual en el espacio imagen de puntos de control terreno dotados de coordenadas geográficas para la rectificación geométrica y georreferenciación de las escenas Landsat. De esta forma se obtuvo una imagen rectificadas y georreferenciada según una determinada proyección cartográfica. Para conocer la precisión del proceso de georreferenciación se determinó el índice de error global denominado error medio cuadrático (EMC; RMSE, siglas en inglés), calculado mediante la siguiente expresión:

$$RMSE_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N e_x^2}{N}}; RMSE_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N e_y^2}{N}} \tag{1}$$

$$RMSE_{xy} = \sqrt{RMSE_x^2 + RMSE_y^2};$$

donde $RMSE_{xy}$ representa el error medio cuadrático planimétrico (2D), $RMSE_x$ el error medio cuadrático en la dirección X (Este-Oeste), $RMSE_y$ el error medio cuadrático en la dirección Y (Norte-Sur), e_x y e_y la diferencia entre las coordenadas reales y las

Imagine v 9.1[®] considerando: 1) the geometric coincidence of the scenes together and 2) the radiometric coincidence, for which we chose images or scenes from the same dates and the same sensor applying an adjustment or of histograms.

Quantification and correction of geometric errors

Prior to the analysis and processing of satellite imagery, some checks were made and, if necessary, corrections for the main purpose of minimize the presence of geometric or radiometric errors.

The Landsat images used in this study received a correction level 6, which implies, besides the systematic correction of errors of sensor or correction level 5 (from data stored by the sensor itself as ephemeris, altitude, position, etc.), the manual marking in the space image of terrain control points equipped with geographic coordinates for the geometric rectification and georeference of Landsat scenes. In this way a rectified and georeferenced image was obtained according to a particular map projection. To know the precision of the georeferencing process it was determined the overall error index called mean square error (MSE, RMSE), calculated using the following expression:

$$RMSE_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N e_x^2}{N}}; RMSE_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N e_y^2}{N}} \tag{1}$$

$$RMSE_{xy} = \sqrt{RMSE_x^2 + RMSE_y^2};$$

where $RMSE_{xy}$ represents the planimetric mean square error (2D), $RMSE_x$ the mean square error in the X direction (East-West), $RMSE_y$ the mean square error in the Y direction (North-South) e_x and e_y the difference between the actual coordinates and the measures of the image to each control point, and N is the number of control points used.

The georeferencing mean error (expressed as $RMSE_{2D}$ planimetric error) of the images used in this study was 28.5 m and 5.6 m for scenes of 1973 and 2010. This means an error relative to the pixel size of each scene less than 0.40 pixels (subpixel error), so that images may be considered valid for the purposes of the study.

Atmospheric correction

In certain circumstances it is necessary a radiometric correction or normalization prior to treatment or operation of satellite imagery, especially in studies to detect changes over time

medidas en la imagen para cada punto de control, y N el número de puntos de control empleados.

El error de georreferenciación medio (expresado como error planimétrico $RMSE_{2D}$) de las imágenes utilizadas en este estudio fue 28.5 m y 5.6 m para las escenas de 1973 y 2010. Esto significa un error relativo al tamaño de pixel de cada escena inferior a 0.40 píxeles (error subpixel), por lo que las imágenes pueden considerarse válidas para los propósitos del estudio.

Corrección atmosférica

En ciertas circunstancias es necesaria una corrección radiométrica o normalización previa al tratamiento o explotación de las imágenes de satélite, sobre todo en estudios para detectar cambios a lo largo del tiempo (Duggin y Robinove, 1990). En este último caso se debe conseguir que la radiometría que presentan las escenas multitemporales analizadas sea independiente de las condiciones atmosféricas particulares presentes durante el día de su adquisición. Pero, teniendo en cuenta la metodología de integración de la información multitemporal mediante imágenes en falso color propuesta en este estudio y que se describe en los siguientes apartados, se puede prescindir completamente de este tipo de corrección porque se realiza un solo proceso de entrenamiento para efectuar la correspondiente clasificación supervisada. En efecto, dado que se clasifica una sola imagen en falso color con información multitemporal (2 bandas de 1973 y 1 banda de 2010 integradas en una misma imagen RGB), se realiza un solo entrenamiento *ad hoc* que se aplica a toda la imagen (Potter, 1974). En ningún caso se extrapola dicho entrenamiento a clasificaciones de escenas tomadas en años diferentes. Con esta metodología, y de acuerdo con Song *et al.* (2001), no es necesario aplicar ninguna corrección atmosférica en el pre-procesamiento de las imágenes Landsat, lo que constituye una de las ventajas del método propuesto en este estudio.

Composición 1973-2010 y aplicación de técnicas OBIA

Con el propósito de detectar la aparición o desaparición de biomasa forestal, se utilizó la banda del infrarrojo cercano como referencia.

Con base en la curva de respuesta espectral típica de la vegetación (Figura 3), se generó una serie de índices diseñados para mejorar la segmentación y la clasificación de la clase vegetación en relación a otras coberturas. Los índices más empleados con este propósito son los siguientes: RVI (Ratio Vegetation Index) (Pearson y Miller, 1972), NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) (Rouse *et al.*, 1974) y DVI (Difference Vegetation Index) (Richardson y Everitt, 1992). Todos estos índices de

(Duggin and Robinove, 1990). In the latter case it should be obtained that radiometry representing the multitemporal scenes analyzed be independent of the particular atmospheric conditions present during the day of acquisition. But, given the methodology of multitemporal information integration by false color images proposed in this study and described in the following sections, one can completely ignore this type of correction because it only takes a training process to make the corresponding supervised classification. Indeed, it is classified as a single image in false color with multitemporal information (2 bands of 1973 and 1 band of 2010 integrated into one RGB image), only one ad hoc training is done that applies to the entire image (Potter, 1974). In no case such training is extrapolated to classifications of scenes taken in different years. With this methodology, and according to Song *et al.* (2001), it is not necessary to apply any atmospheric correction in the pre-processing of Landsat images, which is one of the advantages of the proposed method in this study.

Composition 1973-2010 and application of techniques OBIA

In order to detect the appearance or disappearance of forest biomass, the near infrared band was used as reference.

Based on the typical spectral response curve of the vegetation (Figure 3), we generated a series of indices designed to improve the segmentation and classification of the vegetation class relative to other covers. The indices mostly used for this purpose are: RVI (Ratio Vegetation Index) (Pearson and Miller, 1972), NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) (Rouse *et al.*, 1974) and DVI (Difference Vegetation Index) (Richardson and Everitt, 1992). All these vegetation indices have two objectives (Chuvieco, 2008): to improve discrimination between two covers with reflective behavior very different between red and near-infrared bands (NIR), and reduce the effect of the relief (slope and orientation) in the spectral characterization of different covers.

The indices applied in this study are similar to those commented vegetation indices, although in this case were applied to a RGB image obtained by multitemporal composition of the near-infrared bands 6 and 7 (Landsat 1 scene of 1973) and band 4 (NIR of Landsat 7 scene of 2010), as shown in Figure 4.

The red and blue color space (RGB color space visualization) were assigned to the bands of the oldest image (1973), whereas the green color space was applied to display the most recent image band (2010) (Figure 4). In the resulting RGB image green regions can be seen showing recent presence of forest vegetation, as indicated in the legend reforestation. The color magenta, as composition of blue and red, indicates a reduction of vegetation, interpreted as deforestation. Areas with plant cover in the two

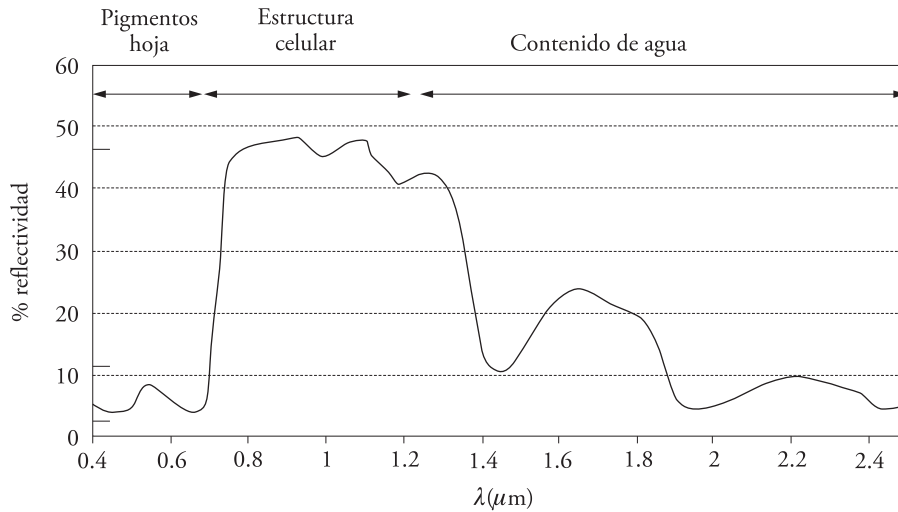


Figura 3. Respuesta espectral típica de la vegetación. (Fuente: Chuvieco, 2008).
Figure 3. Typical spectral response of the vegetation. (Source: Chuvieco, 2008).

vegetación tienes dos objetivos (Chuvieco, 2008): mejorar la discriminación entre dos cubiertas con comportamiento reflectivo muy distinto entre las bandas rojo e infrarrojo cercano (NIR), y reducir el efecto del relieve (pendiente y orientación) en la caracterización espectral de distintas cubiertas.

Los índices aplicados en este estudio son análogos a los índices de vegetación comentados, aunque en este caso se aplican sobre una imagen RGB obtenida por composición multitemporal de las bandas del infrarrojo cercano 6 y 7 (escena Landsat 1 de 1973) y la banda 4 (NIR de la escena Landsat 7 de 2010), como se indica en la Figura 4.

A las bandas de la imagen más antigua (1973) se asignó el cañón rojo y el cañón azul, y a la banda de la imagen reciente (2010) el cañón verde (Figura 4). En la imagen RGB resultante se pueden apreciar regiones verdes que indican presencia reciente de vegetación forestal, indicado en la leyenda como reforestación. El color magenta, como composición del azul y rojo, indica una reducción de la vegetación, interpretándose como deforestación. Las zonas con cobertura vegetal en las dos fechas de toma de las imágenes se presentan con color gris y un valor digital elevado debido a la reflectividad en la banda NIR de la vegetación, lo que permite diferenciarlas del suelo desnudo.

Sobre esta composición multitemporal y para ayudar en la identificación de zonas arboladas y no arboladas mediante clasificación supervisada, se aplicaron los siguientes índices basados en los índices de vegetación tradicionales (Bandas 6 y 7 para 1973 y Banda 4 para 2010):

$$RVI_{674} = \frac{B6 + B7}{B4} \quad (2)$$

acquisition dates of images are presented with gray and a high digital value due to reflectivity in the NIR band of vegetation, allowing differentiate them of bare soil.

On this multitemporal composition and to assist in identifying forested and non-forested lands by supervised classification, the following indices were applied based on traditional vegetation indices (Band 6 and Band 7 for 1973 and 4 for 2010):

$$RVI_{674} = \frac{B6 + B7}{B4} \quad (2)$$

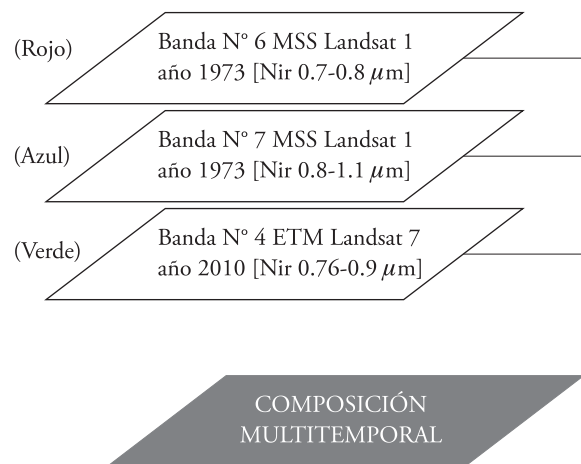


Figura 4. Composición multitemporal de los canales Landsat NIR empleados.

Figure 4. Multitemporal composition of the Landsat NIR channels used.

$$NDVI_{674} = \frac{B4 - (B6 + B7)}{B4 + B6 + B7} \quad (3)$$

$$DVI_{674} = B4 - (B6 + B7) \quad (4)$$

$$DVI_{674} = B4 - B6 \quad (5)$$

$$DVI_{47} = B4 - B7 \quad (6)$$

$$NDVI_{674} = \frac{B4 - (B6 + B7)}{B4 + B6 + B7} \quad (3)$$

$$DVI_{674} = B4 - (B6 + B7) \quad (4)$$

$$DVI_{674} = B4 - B6 \quad (5)$$

$$DVI_{47} = B4 - B7 \quad (6)$$

Un vez obtenida la imagen compuesta se aplicaron técnicas de clasificación de imágenes basadas en objetos (denominadas genéricamente OBIA por Object Based Image Classification; Blaschke, 2010) y, en particular, la modalidad de clasificación supervisada de acuerdo con los siguientes pasos: 1) segmentación de la imagen y obtención de grupos de píxeles homogéneos, 2) selección de muestras de entrenamiento, 3) clasificación supervisada basada en las firmas de las muestras o en índices, 4) validación de la clasificación obtenida.

Las clases objetivo del proceso de clasificación automático fueron las siguientes: 1) área reforestada (aparición neta de superficie arbolada), 2) área deforestada (desaparición neta de superficie arbolada), 3) bosque actual (áreas que se mantienen arboladas en 1973 y en 2010), y 4) suelo desnudo sin cambios (áreas sin biomasa vegetal aparente en 1973 y en 2010).

Los términos reforestación y deforestación hacen mención a la aparición o desaparición neta de biomasa vegetal arbolada desde el punto de vista del valor de reflectancia en la banda NIR. En ningún caso se pretende valorar el proceso que originó la aparición o desaparición de biomasa (puesta en producción de nuevo suelo agrícola, incendios, aprovechamiento silvícola excesivo, etc.). El estudio no pretende mostrar que los cambios (pérdida o ganancia de cobertura arbórea) son irreversibles. Tampoco se puede definir si los cambios observados son producto intencional y necesario de la forma de cultivo o manejo de estos terrenos, tanto desde el punto de vista de las labores silvícolas como de las agrícolas. Con el fin de no incluir las zonas donde hubo cambios en la biomasa vegetal debido a la presencia de cultivos agrícolas, se aplicó una máscara a toda la zona agrícola para no incluirla en el estudio de deforestación. Igualmente, la clase suelo desnudo sin cambios fue clasificada e introducida en el estudio de precisión de la clasificación supervisada, pero no aparece en el mapa final con una leyenda concreta. Esa clase estaría constituida por las áreas intercalares dispuestas entre las zonas catalogadas como forestación, deforestación y bosque actual.

Para clasificar las cuatro clases objetivo se aplicó una segmentación sobre los píxeles de base con el software eCognition 8.0[®] (algoritmo multiresolución), con los valores RGB de la imagen compuesta (Figura 4) como información espectral y

After obtaining a composite image techniques of image classification were applied based on object-based image processing (known generically OBIA for Object Based Image Classification; Blaschke, 2010) and, in particular, the supervised classification modality according to the following steps: 1) segmentation of the image and obtaining homogeneous pixel groups, 2) selection of training samples, 3) supervised classification based on the signatures of the samples or indices, 4) validation of the classification obtained.

The classes aim of automatic classification process were: 1) reforested area (net occurrence of forest area), 2) deforested area (net disappearance of forest area), 3) current forest (areas that are kept forested in 1973 and 2010), and 4) bare soil unchanged (areas without apparent plant biomass in 1973 and 2010).

The terms reforestation and deforestation make mention to the net appearance or disappearance of woody plant biomass from the viewpoint of the reflectance value on the NIR band. In no way it is intended to assess the process that led to the appearance or disappearance of biomass (start of production of new agricultural land, fire, excessive forest exploitation, etc.). The study does not aim to show that changes (gain or loss of tree cover) are irreversible. Nor can it define whether the observed changes are intentional and necessary product of the type of crop or management of these lands, both from the point of view of forestry work and agriculture. For not including areas where there were changes in the plant biomass due to the presence of agricultural crops, a mask was applied to the entire agricultural area not included in the study of deforestation. Similarly, the class bare soil unchanged was classified and introduced in the study of supervised classification accuracy, but does not appear in the final map with a concrete legend. That class would consist of interlayer areas disposed between the areas classified as forest, deforestation and forest today.

To classify the four objective classes a segmentation was applied on the pixels of base with the eCognition 8.0 software[®] (multi-resolution algorithm) with RGB values of the composite image (Figure 4) as spectral information and with the following parameters: scale 50, form 0.3 (*i.e.*, 70 %

con los siguientes parámetros: escala 50, forma 0.3 (*i.e.* 70 % de peso para la información espectral) y compactness 0.5. Una vez obtenidos los objetos o segmentos de base, se procedió al entrenamiento del clasificador Nearest Neighbour mediante un adecuado número de muestras (objetos) señalados como claramente pertenecientes a alguna de las clases objetivo. Así, el número de muestras de entrenamiento para cada clase de referencia fue siempre superior a 25 objetos, con una media de alrededor de 200 píxeles cada uno. De esta forma el clasificador crea unas reglas de decisión en función de los valores medios de cada objeto para los índices (ecuaciones 2 a 6). Después se aplicó el clasificador al resto de segmentos para la asignación de la clase correspondiente en función del entrenamiento recibido.

Validación de los resultados de clasificación obtenidos

Para validar la precisión de las estimaciones ofrecidas por la metodología aquí propuesta se procedió a la extracción de 249 píxeles mediante un muestreo aleatorio estratificado sobre las escenas Landsat de 1973 y 2010. Así se identificaron 249 píxeles distribuidos aproximadamente de forma proporcional al peso en el área de estudio de las cuatro clases objetivo, *i.e.*, 101 pertenecientes a la clase Bosque actual, 90 a Deforestación, 14 a Forestación y 44 a Suelo desnudo sin cambios. Ninguno de los píxeles empleados en la validación de la clasificación supervisada OBIA fue previamente incluido en los objetos usados para el entrenamiento del clasificador Nearest Neighbour, por lo que se considera un procedimiento de análisis de la precisión totalmente independiente de las muestras de entrenamiento (Congalton, 1991).

Cada uno de los 249 píxeles del conjunto de validación se clasificó con una cuidadosa inspección visual en cada una de las cuatro clases objetivo, obteniéndose lo que se denomina el *ground truth* para comparar los resultados ofrecidos por la clasificación. El resultado se presenta como una clásica matriz de confusión (Congalton *et al.*, 1983). Esta matriz muestra en su diagonal las categorías clasificadas correctamente, en las columnas las categorías estimadas por la clasificación supervisada y en las filas las clases de referencia (*ground truth*). Así el error asociado a cada una de las columnas se denomina error de inclusión o comisión y representa aquellos píxeles que fueron asignadas a dicha categoría sin pertenecer a ella. Y el error asociado a cada fila se denomina error de exclusión u omisión y representa aquellos píxeles asignados a dicha categoría aún cuando pertenecían a ella.

La exactitud global de la clasificación (*overall accuracy*) sólo considera los aciertos situados en la diagonal de la matriz de confusión y descarta la información suministrada por los errores de comisión y omisión. Esta limitación suele soslayarse mediante el empleo de un estadístico multivariado discreto como el

of weight for spectral information) and compactness 0.5. After obtaining the base objects or segments, we proceeded to the Nearest Neighbor classifier training by an adequate number of samples (objects) clearly identified as belonging to one of the target classes. Thus, the number of training samples for each class of reference was always higher to 25 objects, with an average of about 200 pixels each. Thus the classifier creates decision rules based on the mean values for each object for the indices (equations 2 to 6). Classifier was then applied to the other segments for assigning the corresponding class in function of the training received.

Validation of the classification results obtained

To validate the accuracy of the estimates provided by the methodology proposed here we proceeded to the extraction of 249 pixels using a stratified random sample of Landsat scenes from 1973 and 2010. Thus 249 pixels were identified distributed approximately in a proportional way to weight in the study area of the four target classes, *i.e.*, 101 belonging to the class current Forest, 90 to deforestation, 14 to afforestation and 44 to bare soil unchanged. None of the pixel used in the validation of supervised classification OBIA was previously included in the objects used to train the Nearest Neighbor classifier for what it is considered a procedure of analysis of the precision totally independent of training samples (Congalton, 1991).

Each of the 249 pixels in the validation set was classified with careful visual inspection at each of the four target classes, thus obtaining what we call the *ground truth* to compare the results provided by the classification. The result is presented as a classic confusion matrix (Congalton *et al.*, 1983). This matrix shows in its diagonal the correctly classified categories, in columns the estimated categories by the supervised classification and in rows the kinds of reference. Thus, the error associated with each of the columns is called inclusion or commission error and represents those pixels that were assigned to that category without belonging to it. And the error associated with each row called exclusion or omission error and represents those pixels assigned to that category even if they belonged to it.

The *overall accuracy* of the classification only considers the successes located on the diagonal of the confusion matrix and discard the information provided by the errors of commission and omission. This limitation is often overlooked by the use of discrete multivariate statistics as the Cohen's Kappa (K) concordance estimate. Indeed, in the classification of a series of target classes it is interesting comparing the classification obtained against a reference, for example, that based on mere randomness (Congalton *et al.*, 1983). The Kappa index is constructed so that:

estimador de concordancia Kappa de Cohen (K). En efecto, en la clasificación de una serie de clases objetivo interesa comparar la clasificación obtenida frente a una de referencia; por ejemplo, aquella basada en el mero azar (Congalton *et al.*, 1983). El índice Kappa se construye de forma que: 1) sea un número único para toda la matriz, 2) sea mayor para una clasificación más exacta y menor para una inexacta, y 3) introduzca el azar como un proceso de referencia. En este sentido, el estimador K considera tanto la información sobre la precisión global de la clasificación como los errores de comisión y omisión, por lo que es un índice de calidad de la clasificación muy valorado en procedimientos de validación como el de este estudio.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Estimación de la precisión de la clasificación OBIA

En la matriz de confusión (Cuadro 2) se muestra una precisión global de la clasificación (*overall accuracy*) de 87.55 %, valor adecuado para los objetivos del estudio y valida la aplicación del método en otros escenarios similares donde puede resultar útil y eficiente. Además, bajo el supuesto de una distribución binomial para cada clase y con una aproximación normal de dicha distribución, el intervalo de confianza para la precisión global es ± 4.1 % con un nivel de confianza de 95 %.

La exactitud del usuario para cada clase objetivo indica el error esperado al utilizar el mapa de clasificación en campo o error de comisión (Cuadro 2). La fiabilidad de la clasificación es muy elevada para las clases Bosque actual y Deforestación, con probabilidades de acierto superiores al 90 %. Pero esta

1) is a unique number for the entire matrix, 2) is greater for a more accurate classification and lower for an inaccurate one, and 3) enter the random as a process of reference. In this sense, the K estimator considers both information about the overall accuracy of the classification as errors of commission and omission, so it is a quality index of classification highly valued in procedures of validation as that of this study.

RESULTS AND DISCUSSION

Estimate of accuracy of OBIA classification

In the confusion matrix (Table 2) it is shown an *overall accuracy* of classification of 87.55 %, which is adequate value for the objectives of the study and validates the application of the method in other similar scenarios where it can be useful and efficient. Furthermore, assuming a binomial distribution for each class and a normal approximation of the distribution, the confidence interval for the overall accuracy is ± 4.1 % with a confidence level of 95 %.

The user's accuracy for each target class indicates the expected error when using the classification map in field or commission error (Table 2). The reliability of the classification is very high for the classes Current Forest and Deforestation, with probability of success greater than 90 %. But this probability is slightly less than 80 % in the afforestation and bare soil unchanged classes, occupying a smaller area in the study area.

All target classes showed higher values than 83 % in the accuracy of producer, related to error of omission (Table 2), representing the probability of leaving without classifying a pixel belonging to one

Cuadro 2. Matriz de confusión de la clasificación obtenida.

Table 2. Confusion matrix of the classification obtained.

N=249 píxeles		Datos procedentes de la clasificación				Total	Exactitud del productor
		Bosque actual	Deforestación	Forestación	Suelo desnudo sin cambios		
<i>Ground Truth</i>	Bosque actual	89	5	2	5	101	88.11 %
	Deforestación	7	75	2	6	90	83.33 %
	Forestación	1	0	13	0	14	92.85 %
	Suelo desnudo sin cambios	1	2	0	41	44	93.18 %
Total		98	82	17	52		
Exactitud del usuario		90.81 %	91.46 %	76.47 %	78.84 %	<i>Overall accuracy</i> 87.55 %	

probabilidad es ligeramente inferior al 80 % en las clases Forestación y Suelo desnudo sin cambios, que ocupan una menor superficie en la zona de estudio.

Todas las clases objetivo presentaron valores superiores al 83 % en la exactitud del productor, relacionado con el error de omisión (Cuadro 2), lo que representa que la probabilidad de dejar sin clasificar un pixel perteneciente a una de las clases objetivo es siempre inferior al 17 %, y en las clases con menor superficie asociada como Forestación y Suelo desnudo sin cambios es inferior al 7 %.

El indicador Kappa, índice global de la precisión de la clasificación, fue $K=0.817$. Esta cifra se interpreta como que la clasificación realizada evita 81.7 % de los errores que se cometerían si la misma fuera realizada al azar, lo cual indica una clasificación muy satisfactoria para los objetivos de este estudio.

Evolución de las superficies forestadas y deforestadas en Tadla Azilal entre 1973 y 2010

El área forestal de la zona en 2010 representaba 554 426.48 ha, un valor ligeramente superior a las 510 000 ha declaradas como dato oficial en el 2007, lo cual se puede atribuir a la ampliación de la zona de estudio para incluir zonas colindantes.

La disminución neta de áreas forestales durante el periodo 1973 a 2010 es 56 % (Figura 5), lo que puede calificarse como una situación muy alarmante. Entre las causas que podrían explicar este descenso de biomasa vegetal de tipo forestal destacan los incendios forestales que se producen sobre todo en años de sequía pronunciada (pluviometría <250 mm año⁻¹), la tala de las zonas de menor cota para desmonte y puesta en producción agrícola y la sobreexplotación de los bosques de la región para extraer madera como aprovechamiento silvícola. En el Cuadro 3 se muestran cifras de la extracción maderera media de la zona, con valores de aprovechamiento excesivos en relación a la escasa pluviometría de la región (precipitación media anual de 348 mm para el periodo 1963 al 2003; Figura 6).

El informe de la FAO, redactado en el contexto del proyecto "Project Azilal", destaca la sobreexplotación de los bosques de la región desde la década de 1980, con una tasa que duplica la media nacional de Marruecos (DIRASSET, 2007). La FAO concluye así su análisis: "Las extracciones de madera para la calefacción, la alimentación del ganado y la

of the target classes is always lower than 17 %, and in classes with lower surface associated as afforestation and bare soil unchanged is less than 7 %.

The indicator Kappa, overall accuracy index of the classification, was $K=0.817$. This figure is interpreted as the classification made prevents 81.7 % of the errors that would be committed if the same was done randomly, indicating a very satisfactory classification for the purposes of this study.

Evolution of forested and deforested areas in Tadla Azilal between 1973 and 2010

The forest area of the region in 2010 represented 554 426.48 ha, a value slightly higher than the 510 000 ha declared as official data in 2007, which is attributable to the expansion of the study area to include neighboring areas.

The net decrease of forest areas during the period 1973 to 2010 is 56 % (Figure 5), which can be described as a very alarming situation. Among the factors that could explain the decline of forest-type plant biomass are included the forest fires that occur especially in pronounced dry years (rainfall <250 mm yr⁻¹), clearing areas of lower elevation to put in agricultural production and the overexploitation of the region's forests for timber and forestry exploitation. Table 3 shows figures of the average logging area, with excessive values of utilization in relation to the low rainfall in the region (average annual precipitation of 348 mm for the period 1963-2003; Figure 6).

The FAO report, drawn up in the context of the project "Project Azilal" underlines the overexploitation of forests in the region since the 1980s, with a rate that doubles the national average of Morocco (DIRASSET, 2007). The FAO has thus concluded its analysis: "The extraction of wood for heating, feeding livestock and deforestation currently exceeds 50 % of the forest production. This overexploitation would imply a rapid reduction of capital on foot, and very scarce. Only a 20 % would remain in 2020, so dispersed that no longer deserve the name of forest. (...) The disappearance of forest range can be taken as irreversible to the extent that recovery will not be possible but at extremely high, prohibitive costs, and over a very long period". (DIRASSET, 2007).

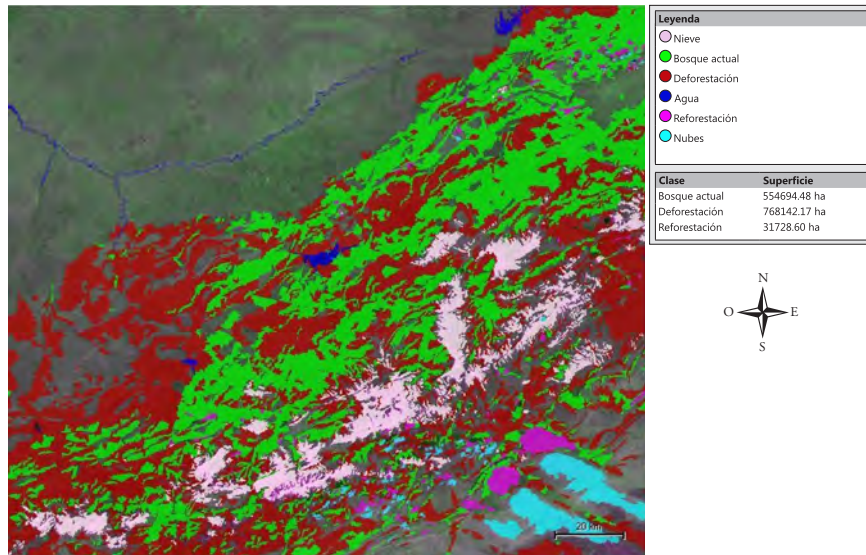


Figura 5. Mapa general sobre el proceso de deforestación de la cuenca hidrográfica de Tadla Azilal (1973-2010).

Figure 5. Overview map of the deforestation process of the watershed of Tadla Azilal (1973-2010).

Cuadro 3. Extracción anual de madera en la provincia de Azilal.

Table 3. Annual timber harvest in the province of Azilal.

Categoría de vegetación forestal	Extracción anual media (m ³ ha ⁻¹)	Superficie (ha)	Extracción anual total (m ³)
Resinosos densos	2.5	60 900	152 250
Resinosos claros	0.6	182 670	109 602
Frondosos densos	1.5	44 940	67 410
Frondosos claros	0.5	6 090	3 045
Formas arboladas bajas densas	0.6	14 240	8 544
Formas arboladas bajas claras	0.25	58 950	14 735
Total		367 790	355 586

Fuente: Dirasset (2007) ❖ Source: Dirasset (2007).

deforestación superan actualmente el 50 % de la producción del bosque. Esta sobreexplotación implicaría una rápida reducción del capital sobre pie, ya muy escaso. Sólo permanecería un 20 %, en el año 2020, tan disperso que no merecerá ya el nombre de bosque. (...) La desaparición de los macizos forestales puede darse por irreversible en la medida en que su recuperación no podrá realizarse sino a costes extremadamente elevados, prohibitivos, y sobre un periodo muy largo”. (DIRASSET, 2007).

Este informe indica que el bosque de la región, dadas las características climáticas de la zona, no puede regenerarse en forma natural al ritmo necesario para mantener la extracción de madera a la que está

This report indicates that the forest in the region, given the climatic characteristics of the area, cannot be naturally regenerated quickly enough to keep logging to which it is subjected, so stands or clearings appear (objects or segments in terminology OBIA) where vegetation density is so low that our methodology is identified as a deforested area (low digital value in the NIR band in 2010).

Deforested areas since 1973 exceed half of the original forest area. It is beyond the scope of this article to review the consequences that this phenomenon of deforestation may have on sustainability in the medium to long term of the irrigated perimeter of Azilal Tadla, although it is likely that will affect the

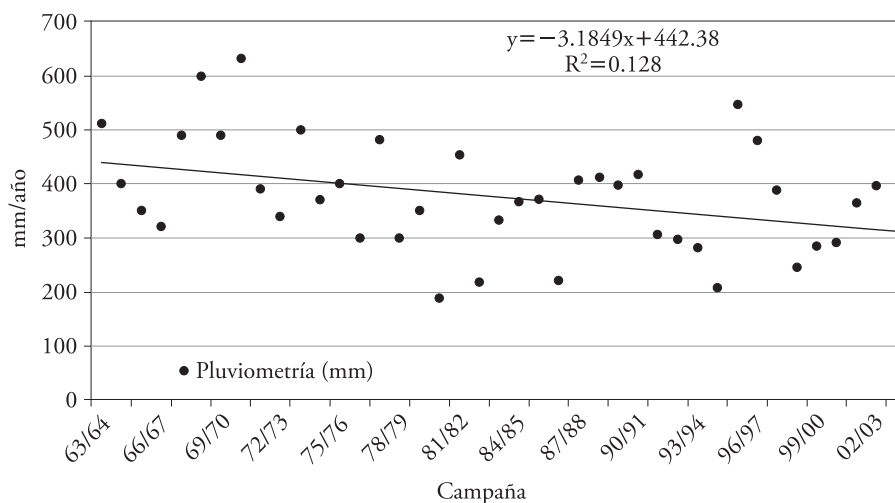


Figura 6. Evolución de la precipitación anual media (mm) en la región de Tadla Azilal.

Fuente: elaboración propia a partir de datos de la ORMVAT (Office Régional de Mise en Valeur Agricole de Tadla, Marruecos).

Figure 6. Evolution of the average annual precipitation (mm) in the region of Tadla Azilal.

Source: Compiled from data ORMVAT (Office Régional de Mise en Valeur Agricole de Tadla, Morocco).

sometido, por lo que aparecen rodales o claros (objetos o segmentos en terminología OBIA) donde la densidad de vegetación es tan escasa que nuestra metodología lo identifica como una zona deforestada (valor digital bajo en la banda NIR en el 2010).

Las zonas deforestadas desde 1973 superan la mitad de la superficie forestal inicial. Queda fuera del objetivo de este artículo el análisis de las consecuencias que este fenómeno de deforestación pueda tener sobre la sostenibilidad a medio-largo plazo del perímetro irrigado de Tadla Azilal, aunque es probable que afectará el balance hidrológico de la cuenca y, por tanto, la disponibilidad de un recurso muy escaso y valioso para la región como es el agua, fundamental para la sostenibilidad y desarrollo de una región agrícola emergente.

CONCLUSIONES

En el estudio se cuantifica el proceso de deforestación que sufren las montañas del Medio Atlas colindante a la región agrícola de Tadla Azilal (Marruecos), de crucial interés para la supervivencia de la zona irrigada, pues constituye la base de su suministro hídrico. El estudio revela una severa reducción del área arbolada que afecta a todas las cuencas analizadas. La metodología original propuesta permitió evaluar y diagnosticar con una precisión

water balance of the watershed and, therefore, the availability of a very scarce and valuable resource for the region as water, essential for sustainability and development of an emerging agricultural region.

CONCLUSIONS

The study quantifies the deforestation process undergone by the Medio Atlas Mountains adjacent to the agricultural region of Tadla Azilal (Morocco), of crucial interest to the survival of irrigated areas, constituting the basis of their water supply. The study revealed a severe reduction of the forested area that affects all watersheds analyzed. The original proposed methodology allowed us to evaluate and diagnose with an estimated accuracy of 87.55 % (± 41 %) (overall accuracy) and an estimator $Kappa=0.817$ the net deforestation process of the region which was quantified in 56 %, equivalent to 1.5 % of average annual loss of forest area.

—End of the English version—



estimada del 87.55 % (± 4.1 %) (overall accuracy) y un estimador $Kappa=0.817$ el proceso neto de deforestación de la región, que se cuantificó en 56 %,

lo que equivale a 1.5 % de pérdida media anual de superficie forestal.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su más sincero agradecimiento al Editor y a los dos revisores anónimos cuyas sugerencias han mejorado significativamente la versión inicial del artículo.

LITERATURA CITADA

- Andréassian, V. 2004. Waters and forests: from historical controversy to scientific debate. *J. Hydrol.* 291: 1-27.
- Arora, V. 2002. Modeling vegetation as a dynamic component in soil-vegetation-atmosphere transfer schemes and hydrological models. *Rev. Geophys.* 40: 3.1-3.26.
- Blaschke, T. 2010. Object based image analysis for remote sensing. *ISPRS-J. Photogramm. Remote Sens.* 65: 2-16.
- Chuvieco S., E. 2008. Teledetección Ambiental: La Observación de la Tierra desde el Espacio. Ed. Ariel. Barcelona. 586 p.
- Congalton, R. G. 1991. A review of assessing the accuracy of classification of remotely sensed data. *Remote Sens. Environ.* 37: 35-46.
- Congalton, R. G., R. G. Oderwald, and R. A. Mead. 1983. Assessing Landsat classification accuracy using discrete multivariate statistical techniques. *Photogramm. Eng. Remote Sens.* 49: 1671-1678.
- DIRASSET. 2007. Schéma Régional d'Aménagement du Territoire de la région de Tadla Azilal: Diagnostique et problématique. Rabat.
- Duggin, M. J., and C. J. Robinove. 1990. Assumptions implicit in remote sensing data acquisition and analysis. *Remote Sens. Environ.* 11: 1669-1694.
- Duveiller, G., P. Defourny, B. Desclée, and P. Mayaux. 2008. Deforestation in Central Africa: Estimates at regional, national and landscape levels by advanced processing of systematically-distributed Landsat extracts. *Remote Sens. Environ.* 112: 1969-1981.
- Henderson-Sellers, A., R. E. Dickinson, T. B. Durbudge, P. J. Kennedy, K. McGuffie, and A. J. Pitman. 1993. Tropical deforestation: Modeling local to regional scale climate change. *J. Geophys. Res.* 98(4): 7289-7315.
- Kucharik, C. J., J. A. Foley, C. Delire, V. A. Fisher, M. T. Coe, J. D. Lenters, C. Young-Molling, and N. Ramankutty. 2000. Testing the performance of a dynamic global ecosystem model: water balance, carbon balance, and vegetation structure. *Glob. Biogeochem. Cycle* 14: 795-825.
- Lund, H. G. 1983. Change now you see it – now you don't!. *Proc. Int. Conf. In: Renewable Resource Inventories for Monitoring Changes and Trends.* Oregon State University, Corvallis. pp: 211-213.
- Manninen, T., P. Stenberg, M. Rautainen, P. Voipio, and H. Smolander. 2005. Leaf Area Index Estimation of Boreal Forest Using ENVISAT ASAR. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing* 43: 2627-2635.
- Meline, A. K. 1988. Change direction analysis using Landsat imagery: a review of methodology. *Proc. IGARSS'88 Symp. (ESA SP-284),* Edinburgh, Scotland, pp: 541-544.
- Pearson, R. L., and L. D. Miller. 1972. Remote mapping of standing crop biomass for estimation of the productivity of the short-grass Prairie. Pawnee National Grassland, Colorado: 8th international symposium on remote sensing of environment. pp. 1357-1381.
- Potter, J. F. 1974. Haze and sun angle effects on automatic classification of satellite data-simulation and correction. *Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng.* 51: 73-83.
- Richardson, A. J., and J. H. Everitt. 1992. Using spectra vegetation indices to estimate rangeland productivity. *Geocarto Int.* 7: 63-69.
- Rouse, J. W., R. H. Haas, J. A. Schell, D. W. Deering, and J. C. Harlan. 1974. Monitoring the vernal advancement and retrogradation (greenwave effect) of natural vegetation. *NASA/GSFC Type III Final Report, Greenbelt, Md.* 371 p.
- Slater, J. A., G. Garvey, C. Johnston, J. Haase, B. Heady, G. Kroenung, and J. Little. 2006. The SRTM data "finishing" process and products. *Photogramm. Eng. Remote Sens.* 72: 237-247.
- Song, C., C. E. Woodcock, K. C. Seto, M. P. Lenney, and S. A. Macomber. 2001. Classification and change detection using Landsat TM data - When and how to correct atmospheric effects? *Remote Sens. Environ.* 75: 230-244.
- Steven, M. D., T. J. Malthus, F. Baret, H. Xu, and M. J. Chopping. 2003. Intercalibration of vegetation indices from different sensor systems. *Remote Sens. Environ.* 88: 412-422.