

REMOTE SENSING AS A TOOL FOR THE ANALYSIS OF SPATIAL DATA APPLIED TO THE STUDY OF FIRES IN ITALY

LA TELEDETECCIÓN COMO INSTRUMENTO DE ANÁLISIS DE DATOS ESPACIALES APLICADOS AL ESTUDIO DE INCENDIOS EN EL TERRITORIO ITALIANO

Zamboni Lisandra Pamela¹, Rosa Loizzo², Walter F. Sione^{1,3} & Pablo G. Aceñolaza^{1,4}

¹Centro Regional de Geomática- Facultad de Ciencia y Tecnología – UADER. Materi y España S/N. Diamante. Entre Ríos. Argentina. pamelazamboni@gmail.com,

²Agenzia Spaziale Italiana. Matera. Centro di Geodesia Spaziale G. Colombo. rosa.loizzo@asi.it,

³Universidad Nacional de Luján. Dirección postal y electrónica. wsione@gmail.com,

⁴Centro de Investigaciones Científicas y de Transferencia de Tecnologías a la Producción. CICYTTP- CONICET Diamante. Materi y España S/N. Diamante. Entre Ríos. Argentina. acenolaza@gmail.com

ABSTRACT. The relation between the vegetation's phenology and summer wildfires in Italy was studied using remote sensing and GIS techniques, in the course of the year 2008. We identified vegetation cover "that can be burned", using a mask based on the CORINE Land Cover product. The vigour of the vegetation was estimated with MODIS images (MOD01KM) available at the Italian Space Agency (ASI) for May, June, July, August and September of 2008. The greenness index called Photosynthetic Reflectivity Index (PRI) and the modal filter "majority" were employed. The occurrence of fires in Italy from May to September 2008 was studied using data from hotspots provided by the Sensor Meteosat Second Generation (MSG-SEVIRI) on a query system developed by the Italian Space Agency (ASI). To analyse the relation between the occurrence of fires and the PRI, a database of hotspots was consulted. Cartography was obtained as a result, for monthly PRI during the study period with maps of PRI changes and occurrence of fires. The PRI and detected fires increased from May to August, indicating a strong seasonality and an increased vulnerability of the vegetation to summer fires. The central areas of Italy were most affected by these summer fires.

KEY WORDS. Photosynthetic Reflectivity Index (PRI). MOD01KM. Hotspot. Meteosat Second Generation. CORINE land cover.

RESUMEN. La relación entre la fenología de la vegetación y la ocurrencia de incendios estivales en el territorio italiano en el transcurso del año 2008 se estudió mediante técnicas de teledetección y SIG. Se identificaron las coberturas de vegetación "susceptibles de ser quemadas". Estas fueron determinadas mediante la aplicación de una máscara, basada en el producto CORINE Land Cover. El vigor de la vegetación se estimó a partir de imágenes MODIS (MOD01KM) disponibles en la Agencia Espacial Italiana (ASI) para mayo, junio, julio, agosto y septiembre de 2008. El índice de verdor denominado Índice de Reflectividad Fotosintética (PRI) y el filtro modal "majority" fueron empleados. La ocurrencia de incendios desde mayo a septiembre de 2008 en el territorio italiano fue estudiada mediante de focos de calor proporcionados por el sensor Meteosat Second Generation (MSG-SEVIRI), sobre un sistema de consultas desarrollado por la Agencia Espacial Italiana (ASI). Para analizar la relación entre la ocurrencia de incendios y el PRI se consultó dicha base focos de calor. Como resultado se obtuvo cartografía de PRI mensual y para el período estudiado se generaron mapas de cambio del PRI y de los incendios ocurridos. El PRI y los incendios detectados aumentaron desde mayo a agosto, indicando una marcada estacionalidad y un aumento de la vulnerabilidad de la vegetación a los incendios estivales. Las zonas centrales de Italia resultaron ser las más afectadas por los incendios.

PALABRAS CLAVES. Índice de Reflectividad Fotoquímica (PRI). MOD01KM. Focos de calor. Meteosat Second Generation. CORINE land cover.

INTRODUCCIÓN

Los incendios afectan cada año a miles de hectáreas de los ecosistemas mediterráneos (Vélez, 2000). Los sistemas boscosos poseen una función insustituible en el ciclo del carbono, asegurando su almacenamiento en el suelo y en la biomasa epigea en forma estable. La gestión sostenible de los bosques, la reducción del uso de biomasa leñosa para la producción de energía, así como de productos renovables representan una contribución a la reducción de la concentración atmosférica de gases efecto invernadero (GEI). La capacidad del bosque para almacenar carbono en las plantas y en los suelos (media aproximada de 53 t ha⁻¹C) podría aumentarse como consecuencia de una política de gestión sustentable basada en los procesos, en la funcionalidad de los ecosistemas y en la protección del territorio. Otra medida es el control de factores antrópicos y naturales que impactan en los bosques. Entre ellos se encuentran los incendios, responsables parciales del aumento del CO₂ atmosférico (Lovreglio & Leone, 2005; Yebra *et al.*, 2008). No obstante la gran relevancia del problema, el conocimiento que existe al respecto es impreciso. Las evaluaciones de las emisiones provenientes de incendios son insuficientes, sobre todo debido a la falta de estadísticas de base, particularmente en lo referente a incendios de bosques, arbustales, sabanas y de sistemas agrícolas.

El enfoque de gestión integrada ha sido expresado, en líneas generales, por el Consejo Europeo mediante la resolución 1045 de 1986 del Parlamento Europeo y mediante la declaración de Atenas. En esta nueva organización estratégica, revisten un papel fundamental los instrumentos de análisis territorial para identificar tendencias, sitios de concentración del fenómeno, interpretar su dinámica y proponer acciones eficaces de prevención (Lovreglio & Leone, 2005). En referencia a los eventos de fuego se ha percibido un aumento en la incidencia, extensión y severidad del fuego no controlado (FAO, 2007) que ha incrementado la discusión sobre la relación entre este fenómeno y el cambio climático (Boschetti *et al.*, 2008). Este enfoque requiere de bases de datos específicas y actualizadas de las áreas afectadas. Esto permitiría, a los gestores, una comprensión más regional de los riesgos y mecanismos de regeneración de las áreas quemadas (Koutsias & Karteris, 1998). La

INTRODUCTION

Each year, fires affect thousands of hectares of Mediterranean ecosystems (Vélez, 2000). Forest systems have an irreplaceable function in the C cycle, in storing ground and epigeal bio-mass in a stable way. The sustainable management of forests, the reduced use of the woody bio-mass for energy production as well as renewable products represent a contribution to the reduction of the atmospheric concentration of greenhouse effect gases (GEG). The capacity of the forest to store C in plants and in the ground (average approximately from 53 t ha⁻¹C) could be increased as a consequence of the environmental policy based on the processes and functioning of the ecosystems and land management. Anthropogenic and natural factors have an impact on forests. Among these factors, fires are found, partially responsible for the increase of atmospheric CO₂ (Lovreglio and Leone, 2005; Yebra *et al.*, 2008). Despite the great relevance of the problem, little is known about it. Evaluations of emissions from fires are insufficient and there is a lack of basic data, particularly with reference to fires in forests, shrub lands, savannah and agricultural systems.

The focus of integrated management has been expressed, in general terms, by the European Council by the resolution 1045 of 1986 in the European Parliament through the declaration of Athens. In this new strategic organization, a fundamental role is given to tools of territorial analysis to identify tendencies and places where the phenomenon is concentrated, to understand their dynamism and to propose efficient preventive measures (Lovreglio & Leone, 2005). With reference to fires an increase in incidence, extension and severity of uncontrolled fires has been perceived (FAO, 2007). This has increased discussions on the relation between this phenomenon and climatic change (Boschetti *et al.*, 2008). This focus requires specific, up-to-date data bases on affected areas. This would bring about more regional understanding of the risks and mechanisms of regeneration of the burned areas to those managing them (Koutsias & Karteris, 1998). The management of fires is favoured with the identification of areas with a high susceptibility to fire, the prevention, early warning, and follow up events. Remote sensing is an important contribution for the study of fires and their ecological, climatic, atmospheric and chemical effects among others. It is, in itself, a unique, repetitive, synoptic source of information on the distribution of the fires, the affected areas, and the phenology of the vegetation (Justice *et al.*, 1993).

gestión de los incendios puede verse favorecida con la identificación de áreas susceptibles al fuego, la prevención, la alerta temprana, y el seguimiento de los eventos. Los sensores remotos pueden ser una contribución importante para el estudio de los incendios y de sus efectos ecológicos, climáticos, atmosféricos, químicos, entre otros, y son asimismo una fuente de información única, repetitiva y sinóptica de la distribución de los incendios, de las áreas quemadas, del estado de la vegetación (Justice *et al.*, 1993).

La cartografía de las áreas susceptibles de ser quemadas necesita de métodos consistentes, confiables y veloces que permitan obtener resultados en períodos breves de tiempo y a una escala espacial y temporal adecuada para la gestión. Entre los métodos actualmente disponibles, la teledetección es una de las técnicas más prometedoras y la evaluación de las áreas afectadas por incendios ha crecido notablemente en los últimos años (Chuvieco & Martín, 1994; Ahern *et al.*, 2001).

Los índices de vegetación registran y realzan la respuesta espectral de la vegetación, aprovechando las diferencias espectrales entre el rojo y el infrarrojo. Si se emplean los valores digitales de la imagen se obtiene un parámetro relativo. En cualquier caso, cuanto mayor sea el valor del índice de vegetación obtenido mayor vigor vegetal tendrá el área observada. La reflectividad foliar en la región del visible (0.4 - 0.7 nm) está influenciada por la presencia de pigmentos fotosintéticos en el infrarrojo cercano (Quintano *et al.*, 2001). Entre el rojo y el infrarrojo, la curva de reflectividad llega a un intervalo de máxima pendiente denominado "borde rojo". La posición de este centro está relacionada al contenido de clorofila y al estado fenológico de la vegetación, así como al estado de estrés hídrico o ambiental. El estrés proviene de una variedad de factores con efectos específicos que limitan el crecimiento potencial de la vegetación. Las plantas responden al estrés con una gama de mecanismos que llevan progresivamente a la pérdida de su vitalidad y productividad (Meroni, *et al.*, 2008). En general se emplean las bandas del rojo e infrarrojo cercano porque contienen cerca del 90% de la respuesta espectral de la vegetación (Turner *et al.*, 1999). Valores bajos pueden indicar desde vegetación enferma o senescente a coberturas sin vegetación (Chuvieco & Martín, 1994; Evrendilek & Gulbeyaz, 2008). El índice de verdor

The cartography of the areas susceptible to burning requires consistent, reliable and quick methods that allow results to be obtained in brief time periods with a spatial and temporal scale suited for management. Among the methods now available, remote sensing is one of the most promising techniques and the evaluation of the areas affected by fires has increased notably in recent years (Chuvieco & Martin, 1994; Ahern *et al.*, 2001).

The vegetation indices register and bring out the spectral response of the vegetation, making use of the spectral differences between the red and infrared channels. If digital values of the image are employed, a relative parameter is obtained. In any case, a greater value of the vegetation index obtained, indicate a major vigour of the vegetation in the area observed. The foliar reflectivity in the visible region (0.4 - 0.7 nm) is influenced by the presence of photosynthetic pigments in the near infrared (Quintano *et al.*, 2001). Between red and infrared, the curve of reflectivity reaches an interval of maximum sloping named "border red". The position of this centre is related to the chlorophyll content and the phenological state of the vegetation as well as the hydric and environmental stress level. The stress comes from a variety of factors with specific effects that limit the potential growth of the vegetation. The plants respond to the stress with a range of mechanisms that lead progressively to the loss of their vigor and productivity (Meroni *et al.*, 2008). In general, bands of red and infrared are mainly used because they contain close to 90% of the spectral response of the vegetation (Turner *et al.*, 1999). Low values can indicate unhealthy or senescent vegetation and land cover without vegetation (Chuvieco & Martin, 1994; Evrendilek & Gulbeyaz, 2008). The most frequently applied greenness index is the NDVI (Index of Normalised Differentially Vegetation). This is influenced by atmospheric conditions, and is based on blue, red and near infrared bands. Other indices is EVI (Enhanced Vegetation Index; Pardi Lacruz & Araújo Sousa Junior, 2008; Potter *et al.*, 2007).

Recent studies (Zarco-Tejada *et al.*, 2000) evidence the possibility to estimate natural fluorescence of the chlorophyll through variations of the apparent reflectivity in the zone of the red and near infrared (685 and 730 nm respectively), and those of maximum fluorescence corresponding to the values of this zone. The index of Photochemical Reflectance (Photochemical Reflectivity Index, PRI) allows the estimation of the reflectivity and identification of the various carotenoid pigments, indicators of photosynthetic efficiency, which is a

más frecuentemente empleado es el NDVI (Índice de Vegetación Normalizado Diferenciado). Éste es influenciado por las condiciones atmosféricas, por lo que se han desarrollado otros índices de vegetación que emplean las bandas del azul, rojo y del infrarrojo cercano. La banda del azul se emplea fundamentalmente para la corrección atmosférica de las imágenes y puede asimismo ser empleada para mejorar la respuesta de los índices de vegetación basados en las bandas del rojo y del infrarrojo cercano. Uno de esos índices es el EVI (índice de vegetación mejorado); (Pardi Lacruz & Araújo Sousa Júnior, 2006; Potter *et al.*, 2007).

Estudios recientes (Zarco-Tejada *et al.*, 2000) han evidenciado la posibilidad de estimar la fluorescencia natural de la clorofila mediante variaciones de la reflectividad aparente en la zona del rojo y del infrarrojo cercano (685 y 730 nm respectivamente), correspondiendo a los valores de esta zona los de máxima fluorescencia. El índice de Reflectividad Fotoquímica (Photochemical Reflectance Index - PRI) permite estimar la reflectividad y detectar las variaciones de los pigmentos carotenoides, indicadores de la eficiencia fotosintética, por lo que es un buen estimador de la productividad vegetal (Drolet, *et al.*, 2005). El PRI se ha descrito asimismo como una técnica capaz de captar variaciones en los mecanismos de disipación de la energía cuando la actividad fotosintética disminuye en las plantas expuestas al estrés (A' *et al.*, 2006; Garbulsky *et al.*, 2008; Meroni *et al.*, 2008). El PRI disminuye cuando la actividad fotosintética disminuye. Así, el índice se define como: $PRI = (\rho_{531} - \rho_{570}) / (\rho_{531} + \rho_{570})$; y ρ : reflectividad.

En cuanto a los datos espaciales empleados para el estudio del fuego los índices utilizan, frecuentemente los provenientes de los sensores NOAA-AVHRR, ATSR (Piccolini & Arino, 2000), y Terra-MODIS (González-Alonso *et al.*, 2007). El Sensor MODIS (MODerate Resolution Imaging Spectroradiometer) tiene una resolución espacial que varía entre los 250 (banda 1-2), 500 (bandas 3-7) hasta los 1.000 metros (bandas 8-36) (Schueler & Barnes, 1997; MODIS, 2003; EOS, 2004). Las bandas aportan información relativa a la forma y propiedades de la superficie de las nubes y aerosoles, del océano, de la geoquímica, del vapor atmosférico, de la temperatura atmosférica, de la superficie del mar y de las nubes, Ozono, entre otras. La resolución radiométrica es de 12 BITS y la resolución temporal es diaria (órbita de las 10:30

good estimator to plant productivity (Drolet *et al.*, 2005). The PRI is described as a technique capable of capturing variations of the mechanisms of energy dissipation when photosynthetic activity diminishes in plants exposed to stress (A' *et al.*, 2006; Garbulsky *et al.*, 2008; Meroni *et al.*, 2008). The PRI is low when photosynthetic activity is also low. Thus, the index is defined as: $PRI = (\rho_{531} - \rho_{570}) / (\rho_{531} + \rho_{570})$; and ρ : reflectance.

With respect to the spatial data employed for the study of fires, the indexes frequently use those coming from the sensors NOAA-AVHRR, ATSR (Piccolini & Arino, 2000), and Terra-MODIS (González-Alonso *et al.*, 2007). The sensor MODIS (MODerate Resolution Imaging Spectroradiometer) has a spatial resolution that varies between 250 (1-2 band), 500 (3-7 band) up to 1.000 metres (8-36 bands) (Schueler and Barnes, 1997; MODIS, 2003; EOS, 2004). The bands provide information relative to the form and properties of the surface, of clouds and aerosols, of the ocean, the geochemistry, atmospheric vapour, and atmospheric temperature, from the surface of the sea and the clouds, Ozone, amongst others. The radiometric resolution is of 12 BITS, and the temporal resolution is daily (orbit from 10:30 AM and 1:30 PM respectively for Italian territory), obtaining an image of the same area every day or every other day. MODIS-Terra provides information from 36 spectral bands (between 400 and 14400 nm), of which 10 operate in the visible, 6 in the near infrared, 4 in the SWIR, 8 in the medium infrared and 8 in the thermal band (TIR). MODIS products have different levels of processing. The product MOD01KM (level 1B) presents data on earth cover calibrated at 1 km of spatial resolution, with data on reflectance, radiance and emissivity (Modis, 2003). Its principal application is the observation of the characteristics of the earth's surface, the ocean and the atmosphere and also the fires (Quintano *et al.*, 2001).

In this context, the general objective of this study is: analysing the behaviour of the vegetation through the greenness PRI index with respect to the occurrence of fires on Italian territory in 2008 using the product MOD01KM as a base and ancillary data.

MATERIALS AND METHODS

Characteristics of the studied area

The study area is the Italian Peninsula (Fig 1). From the climatic point of view, the Italian territory is influenced by the water mass of the seas that surround it. Annual average temperatures ranging from 14-16°C are registered. Within the country's territory areas, risk

AM y 1:30 PM respectivamente para el territorio Italiano), obteniéndose una imagen cada día o cada dos días sobre la misma área. MODIS-Terra aporta información de 36 bandas espectrales (entre los 400 y 14400 nm) de las cuales 10 operan en el visible, 6 en el infrarrojo cercano, 4 en el SWIR, 8 en el Infrarrojo medio y 8 en el térmico (TIR). Los productos MODIS poseen diferentes niveles de procesamiento. El producto MOD01KM (nivel 1B) presenta datos de cobertura de la tierra calibrados a 1 km de resolución espacial con datos de reflectividad, de radiancia y de emisividad (Modis, 2003). Su principal aplicación es la observación de las características de la superficie de la tierra, el océano y la atmósfera por lo que son idóneas para el relevamiento de fenómenos y cambios de tendencia instantánea como los incendios (Quintano *et al.*, 2001).

En este contexto, se ha propuesto como objetivo general de trabajo analizar el comportamiento de la vegetación mediante el índice de verdor PRI, respecto a la ocurrencia de incendios en el territorio italiano en 2008, utilizando de base el producto MOD01KM e información auxiliar.

MATERIALES Y MÉTODOS

Características del área de estudio

El área de estudio es la Península italiana (Fig 1). Desde el punto de vista climático, el territorio italiano está influenciado por la masa de agua de los mares que lo circundan. Se registran temperaturas medias anuales cercanas a los 14-16°C. Se han identificado para el territorio áreas de riesgo de desertificación, particularmente en la región centro-meridional e insular que se encuentra expuesta a presiones ambientales (ej incendios). Las áreas afectadas son, esencialmente, Cerdeña, Sicilia, Apulia y parte de Basilicata y Calabria (CRA, 2008).

En cuanto a la información sobre la cobertura del suelo en el territorio italiano, se ha tomado de referencia el sistema CORINE Land Cover (Co-Ordination of INformation on the Environment) (CORINE, 2001), desarrollado a partir de cartografía de clases de coberturas de vegetación, con un tamaño de píxel de 250 mts. La primera clase incluye territorios modelados artificialmente donde se discriminan: 1) zonas urbanizadas, 2) zonas industriales y comerciales, 3) zonas de redes de comunicaciones, 4) zonas verdes artificiales no agrícolas (con áreas verdes urbanas, áreas deportivas y recreativas). La segunda clase

of desertification has been identified, particularly in the central-meridian and insular region that are exposed to environmental stress (e.g., fires). The affected areas are essentially Sardinia, Sicily, Puglia and some areas of Basilicata and Calabria (CRA, 2008).

With respect to the information on the land cover of the Italian territory, the referential source has been the CORINE Land Cover system (Co-Ordination of Information on the Environment, CORINE, 2001), developed on cartography with classes of vegetation cover with a pixel size of 250 m. The first class includes artificially modelled territories as: 1) urbanized areas, 2) industrial and commercial areas, 3) communication network areas, 4) artificial, non-agricultural green areas (with green urban areas, sports and recreational areas). The second class includes agricultural territories: 1) semi-native (in areas with and without irrigation), 2) permanent cultivations (with vineyards, fruit and olive trees) 3) stable fields (surfaces of dense herbaceous and floristic cover represented principally by grasslands, not subject to rotation), 4) (heterogeneous agricultural zones (annual cultivation associated with permanent cultivation, cultivated systems and complex land parcels, areas predominantly occupied by agricultural cultivation with presence of natural spaces, agro-forest areas). The third class includes areas of woods and semi-natural environments, such as: 1) forest zones (latifoliate forests, coniferous forests and mixed forests), 2) zones with shrubby and herbaceous vegetation (areas of natural grasses and fields of high areas, shrublands, areas of sclerophyte vegetation, areas of woody and shrubby vegetation in different successive stages), 3) open zones with scarce vegetation or lacking in it (beaches, dunes, sandy areas; flowerings, clay; areas affected by fires; areas with permanent snow). The fourth class consists of humid zones; 1) internal humid zones (internal paludals, salty, etc.). The fifth class is composed of water bodies (CORINE, 2001).

METHODOLOGY

In general terms, methodology was developed according to the following steps:

1) Construction of a data base:

1-a) Acquisition of MODIS images (MOD01KM) available in CD format at the Italian Spatial Agency (ASI).

1-b) Exploration and selection of MODIS images available in CDs (see point 1. a), corresponding to the months May to September of 2008.

1-c) Storage of the MODIS Terra AML1B images (MOD01KM) in the PC, daily descending orbit

incluye territorios agrícolas: 1) semi-nativos (en áreas no irrigadas, en áreas irrigadas), 2) cultivos permanentes (con viñedos, frutales y olivares), 3) praderas estables (superficies de cobertura herbácea densa y de composición florística representada principalmente por gramíneas no sujetas a rotación), 4) zonas agrícolas heterogéneas (cultivos anuales asociados a cultivos permanentes, sistemas cultivados y parcelarios complejos, áreas predominantemente ocupadas de cultivos agrícolas con presencia de espacios naturales, áreas agroforestales). La tercer clase incluye a los territorios boscosos y ambientes seminaturales como: 1) zonas boscosas (bosques latifoliados, bosques de coníferas y bosques mixtos), 2) zonas con vegetación arbustiva o herbácea (áreas de pasto natural y praderas de áreas altas, brezales y matorrales, áreas de vegetación esclerófito, áreas de vegetación boscosa y arbustiva en diferentes etapas sucesionales), 3) zonas abiertas con vegetación rala o ausente (playas, dunas, arenales, rocas, afloramientos, rípios; áreas afectadas por incendios; áreas con nieve permanente). La cuarta clase está integrada por zonas húmedas: 1) zonas húmedas internas (paludales internos, turberas), 2) zonas húmedas marítimas (paludales salobres, salinas, etc.). La quinta clase está compuesta por cuerpos hídricos (CORINE, 2001).

METODOLOGÍA

En términos generales la metodología se desarrolló de acuerdo a los siguientes pasos:

1) Construcción de la base de datos:

1-a) Adquisición de imágenes MODIS (MOD01KM) disponibles en formato CD en la Agencia Espacial Italiana (ASI).

1-b) Exploración y selección de imágenes MODIS disponibles en los CD, mencionados en el punto 1.a), correspondiente a los meses de mayo a septiembre de 2008.

1-c) Almacenamiento en PC de las imágenes MODIS Terra AM L1B (MOD01KM) órbita descendiente diurna (hora 9:30-10:30 AM) en su formato original (.hdf) seleccionadas de acuerdo a lo indicado en el punto 1-b).

1-d) Análisis de características de las imágenes disponibles y selección visual de aquellas sin errores/anomalías.

1-e) Georreferenciación de las imágenes seleccionadas (6 por mes), obteniéndose una base de datos de 30 imágenes de mayo a septiembre de

(time:9:30-10:30 AM) in its original format (.hdf), selected according to indication at item 1-b)

1-d) Analysis of characteristics of available images and visual selection of these without errors/anomalies.

1-e) Geo-reference to the selected images (6 per month), obtaining a database of 30 images from May through September 2008.

1-f) Selection of bands to generate the PRI (B11 and B12). The tool "Geo-reference MODIS". From ENVI/IDL software (Version 7.0.1 (linux x86 m32)). (c) 2008, ITT Visual Information Solutions. Installation number 45282. License for use: ASI). Selection of the system of geographic projection; Geographic Coordinates Lat-Long, Datum WGS84.

1-g) Standardization of the work area: editing of images using "Layer Stacking" for bands of the product MOD01KM to apply PRI index with the CORINE mask.

2) Selection of land cover susceptible to fires:

2-a) Construction of the CORINE mask. In a first instance, the image CORINE Land Cover was georeferenced through control points (available in TIFF format).

2-b) Selection of cover classes: The geo-codified CORINE image was exported as a variable to IDL Software (Ramirez Flandes, 2001), and an algorithm which allowed the assignment of values to the variable was constructed according to the following criteria: "give equal values to 1 (one) to the land cover susceptible to fire". These were: 2.2) Permanent surfaces: vineyards (2.2.1), orchards (2.2.2), olive fields (2.2.3); 2.4) Heterogeneous agricultural zones: annual cultivation associated with permanent cultivation (2.4.1), Cultural systems and complex parcelling (2.4.2), Areas predominantly occupied by agricultural cultivation with natural spaces (natural vegetation formations, woods, shrublands, etc.) (2,4,3), agro-forest areas (2,4,4); 3.1) Forests: of latifoliates (3,1,1), of conifers (3,1,2), mixed (3,1,3); 3.2) Zones with shrubby/herbaceous vegetation: natural grassland, and raised areas (3,2,1), brezales and shrublands (3,2,2), areas with sclerophyll vegetation (3,2,3), with woody and bushy vegetation in succession (3,2,4), areas affected by fires (3,3,4). The rest of the cover has 0 (zero) value.

2-d) Reduction of errors: due to confusion with other similarly spectral areas (water, dark ground, shade, mixtures of water and other covers, etc), no burned vegetation and water bodies were masked. The segmentation of the resulting image in two categories (burn and non-burn covers), allow the identification

2008.

1-f) Selección de bandas para generar el PRI (B11 y B12). Se ha empleado la herramienta "Georeference MODIS" del Software ENVI/IDL (Versión 7.0.1) (Linux x86 m32). (c) 2008, ITT Visual Information Solutions. Instalación numero: 45282. Licencia para uso: ASI). Selección del sistema de proyección geográfica; Coordenadas Geográficas Lat-Long, Datum WGS84.

1-g) Estandarización del área de trabajo: recorte de las imágenes mediante la herramienta "Layer Stacking" para las bandas del producto MOD01KM a emplear en el índice PRI y la máscara CORINE.

2) Selección de coberturas de suelo susceptibles de ser quemadas:

2-a) Construcción de la máscara CORINE. En una primera instancia se georreferenció mediante puntos control la imagen CORINE Land Cover (disponible en formato TIFF).

2-b) Selección de clases de cobertura: la imagen CORINE geocodificada se exportó como variable al Software IDL (Ramírez Flandes, 2001) y se construyó un algoritmo que permitió asignar valores a la variable de acuerdo a los siguientes criterios: "otorgar valores iguales a 1 (uno) a las coberturas susceptibles de incendio". Las mismas fueron: 2.2) superficies permanentes: viñedos (2.2.1), frutales (2.2.2), olivares (2.2.3); 2.4) zonas agrícolas heterogéneas: cultivos anuales asociados a cultivos permanentes (2.4.1), sistemas culturales y parcelarios complejos (2.4.2), áreas predominantemente ocupadas cultivos agrícolas con espacios naturales (formaciones vegetales naturales, bosques, matorrales, etc.) (2.4.3), áreas agro-forestales (2.4.4); 3.1) bosques: de latifoliadas (3.1.1), de coníferas (3.1.2), mixtos(3.1.3); 3.2) zonas con vegetación arbustiva/herbácea: áreas de pastizal natural y de altura (3.2.1), brezales y matorrales (3.2.2), áreas con vegetación esclerófila (3.2.3), con vegetación boscosa y arbustiva en sucesión (3.2.4), áreas afectadas por incendios (3.3.4). El resto de las coberturas adquieren valor 0 (cero).

2-d) Reducción de errores: debido a la confusión con otras áreas espectralmente similares (agua, suelos oscuros, sombras, mezclas de agua y otras coberturas, etc) se enmascararon cubiertas no incendiables y cuerpos de agua. La segmentación de la imagen resultante en dos categorías (coberturas incendiables y no incendiables) permitió identificar áreas con posibilidad de incendiarse. Los datos de

of areas with a high susceptibility to fire. The data of CORINE provided the base for the selection of vegetation susceptible to burning. With respect to the woods, the consulted cartography of reference (SIAM, 2008) aimed at counting on another source of information that permitted definition of improved criteria on the areas to be identified for later analysis.

3) Construction and analysis of the PRI

3-1) Band Math: construction of the PRI index with the tool "Band Math" between the bands 11 (530 μm) and 12 (547 μm), according to the algorithm (Drolet et al; 2005): $\text{PRI} = (\rho_{11} - \rho_{\text{ref}}) / (\rho_{11} + \rho_{\text{ref}})$, where ρ_{11} =reflectivity in the band 11, and ρ_{ref} =reflectivity of the band of reference (band 12) (Garbusky et al., 2008).

3-2) Correction of the PRI in order to eliminate negative values: $\text{PRIC} = (\text{PRI} + 1) / 2$

3-3) Calculation of the maximum PRIC for each month of interest. 30 images have been exported from the software ENVI to the software Q-Gis-Grass, using the Gdal library and calculating the monthly PRIC using the "map calculator" tool.

3-4) Application of the "majority analysis" filter. This tool was employed to eliminate pixels with isolated values from neighbouring pixels. It consists of replacing the values of a cell (pixel) in one raster, with the value of the majority of its neighbouring cells. The size of the window, to which a similar value was assigned, was 3 by 3 pixels (window kernel 3x3). The resulting product was named mPRIC.

4) Integration of products generated in a SIG (Quantum Gis Software and the Grass tool -GNU)

5) Relation between the mPRIC and hotspots.

An evaluation was made using hotspots as a database from the satellite Meteosat Second Generation, MSG-SEVIRI (MSG). The ASI has developed an experimental prototype at the Centre of Spatial Geodesy of Matera (Italy). This tool detects hotspots by the remote sensor with a frequency of 15 minutes. This used an historic high frequency database of thermal anomalies. Hotspots corresponding to summer months were selected, in concordance with the PRI data obtained. Through this system it is possible to consult, select, and group those hotspots detected on Italian territory with an occurrence of 3 repetitions per hour, through an algorithm generated for this purpose. This selection criteria permit discrimination between thermal anomalies (of a lesser time duration) and fires. Moreover, it has thrown light upon thermal anomalies of constant occurrence (e.g.: corresponding to industrial chimneys).

cobertura de CORINE han aportado así la base para la selección de las coberturas susceptibles de ser quemadas. Respecto a la cobertura de los bosques, se ha consultado cartografía de referencia (SIAM, 2008) a los fines de contar con otra fuente de información que permita definir mejor los criterios sobre las áreas a descartar y a conservar para el análisis posterior.

3) Construcción y análisis del PRI:

3-1) Álgebra de bandas: construcción del índice PRI con la herramienta "Band Math" para hacer un álgebra entre las bandas 11 (530 μm) y 12 (547 μm) de acuerdo al algoritmo (Drolet et al; 2005): $\text{PRI} = (\rho_{11} - \text{pref}) / (\rho_{11} + \text{pref})$ donde ρ = reflectividad en la banda 11 -y pref = reflectividad de la banda de referencia (banda 12) (Garbulsky et al. 2008).

3-2) Corrección del PRI a fin de eliminar valores negativos: $\text{PRIC} = (\text{PRI} + 1) / 2$

3-3) Cálculo del PRIC máximo para cada mes de interés. Se han exportado 30 imágenes del software ENVI al paquete Q-Gis-Grass, utilizando la librería Gdal y se calculó el PRIC mensual máximo utilizando la herramienta "calculadora de mapa".

3-4) Aplicación del filtro "majority analysis". Esta herramienta es empleada frecuentemente para eliminar píxeles con valores aislados y otorgarles valores iguales tomando en cuenta los rangos de valores de los píxeles vecinos. Consiste en reemplazar los valores de una celda (pixel) en un ráster, con los valores de mayoría de sus celdas vecinas contiguas. Se ha tomado como tamaño de la ventana, a la cual se asignó valores similares, 3 por 3 píxeles (ventana kernel 3x3). El producto resultante se ha denominado PRICm.

4) Integración de productos generados en un SIG, empleando el Software Quantum Gis y el Paquete Grass (GNU)

5) Relación entre el PRICm y focos de calor.

Se ha realizado una consulta a la base de Focos de Calor relevados del satélite Meteosat Second Generation, MSG-SEVIRI (MSG). La ASI ha desarrollado un prototipo en experimentación en el Centro de Geodesia Espacial de Matera. Esta herramienta pone a disposición los Focos de Calor detectados por el mencionado sensor con una frecuencia de 15 minutos. Así se dispone de datos históricos de alta frecuencia de detecciones de anomalías térmicas. Se han seleccionado los Focos de Calor correspondientes a los meses de verano, en concordancia con los datos de PRI obtenidos. Mediante este sistema es posible

Thus, such a tool that permits the interpretation of hotspots observed in terms of "occurred fires" is counted on.

6) Analysis of occurrence of hotspots and PRI. The relation between occurred fires and the phenology of the vegetation represented by the estimated PRI index was analysed. Spatial analysis tool (SIG) was employed to quantify the hotspots, and values of the PRI for each of studied months registered.

RESULTS

Monthly Index of Photochemical Reflectivity (mPRIC): thematic cartography for Italian territory was obtained as a function of the analysed products. The cartography for the months of May, June, July, August and September 2008 with the values of mPRIC (Fig 1) is presented. Classes of values expressed in a gradient that varies from dark grey (values of mPRIC less than 0,3) to light grey (values of mPRIC between

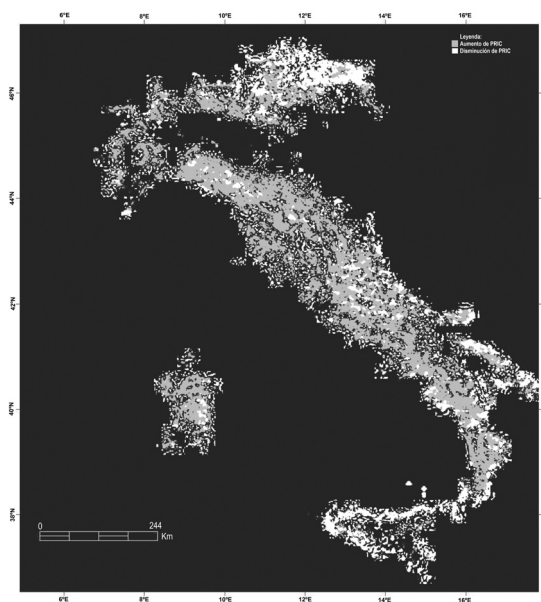


Figura 1: mapa de valores máximos de PRIC para el territorio italiano, obtenidos para el período mayo, junio, julio, agosto y septiembre de 2008. Se observan clases de valores expresadas en un gradiente que varía desde gris oscuro (valores de PRICm menores a 0,3) a gris claro (valores de PRICm entre 0,3 a 0,6) y blanco (valores de PRICm mayores a 0,6).

Figure 1: map of maximum PRIC values, obtained for the period May, June, July, August and September 2008. Classes of values where expressed in a degree of colors from dark grey (mPRIC values lesser than 0,3) to light grey (mPRIC values between 0,3 and 0,6) and white (mPRIC values higher than 0,6).

consultar, seleccionar y agrupar mediante un algoritmo generado para tal fin, aquellos focos de calor detectados en el territorio italiano con una ocurrencia de un mínimo de 3 repeticiones por hora. Este criterio de selección permite discriminar entre anomalías térmicas (de menor tiempo de duración) e incendios. Asimismo se han descartado anomalías térmicas de ocurrencia constante (ej; correspondientes a chimeneas industriales).

Se cuenta así con una herramienta que permite realizar consultas e interpretar los Focos de calor observados en términos de "incendios ocurridos".

6) Análisis de ocurrencia de FC y PRI. Con los resultados de esta consulta se ha analizado la relación entre los incendios ocurridos y el estado de vegetación representado por el índice PRI estimado. Para esto se han empleado la herramienta de análisis espacial del SIG y tomado registro de la cantidad de Focos de Calor y valores del PRI para cada uno de los períodos estudiados.

RESULTADOS

Índice de Reflectividad Fotoquímica (PRICm) mensual: se ha obtenido cartografía temática para el territorio italiano, en función de los productos analizados. Se presenta la cartografía de los meses de mayo, julio, agosto y septiembre de 2008, con los valores de PRICm (Fig.1). Se observan clases de valores expresadas en un gradiente que varía desde gris oscuro (valores de PRICm menores a 0,3) a gris claro (valores de PRICm entre 0,3 a 0,6) y blanco (valores de PRICm mayores a 0,6).

Análisis de cambios del PRICm: se han analizado los cambios en el PRICm para el período estudiado, mediante mapas de cambio (Fig 2). Los aumentos de PRICm se han señalado en tono gris mientras que las disminuciones del índice se han indicado en tono blanco en los mapas. Los cambios corresponden a aumentos o disminuciones de un mes al siguiente.

Relación PRICm y la ocurrencia de incendios: a partir de la superposición de los mapas de Focos de Calor seleccionados a partir de las detecciones de anomalías térmicas del sensor MSG-SEVIRI y de los mapas de PRIc obtenidos, se ha elaborado cartografía que relaciona la ocurrencia de incendios a valores de vigor de la vegetación (PRICm). En la misma (Fig 1) se aprecia la mayor ocurrencia de Focos de Calor en áreas con valores de PRIC elevados.

0,3 to 0,6) and white (values of mPRIC higher than 0,6) were observed.

Analysis of changes in mPRIC: the changes in mPRIC for the studied period was analysed using maps of change (Fig 2). The increases in PRIC in a grey tone while the decreased areas are in white color.

Relation between mPRIC and the occurrence of fires: Hotspot maps based on the detection of thermal anomalies by the sensor MSG-SEVIRI and mPRIC (based on MODIS product) maps, where linking. In the same (Fig 1) the greater occurrence of Hotspots in areas with high PRIC values can be seen.

DISCUSSION

An increase in mPRIC from May to August was identify, indicating an increase in the vigour of the vegetation susceptible to burning from summer. Also seen is a decrease for the month of September, beginning of autumn), possibly associated with an increase of temperatures, affecting the photoperiod between other processes that indicated a marked phenologic seasonality (Fig 1).

In relation to the spatial distribution of mPRIC on Italian territory, the highest values (close to 0,5) were observed in the extreme North and South of the peninsula with a lesser gradient towards the territory's interior (Fig 1).

With respect to the analysis of changes carried out in the mPRIC cartography, in global terms an increase in PRI was observed, signalled in grey (change of positive magnitude corresponding to 2 percent) on the map (Fig 2). In other areas, where the PRI corresponds with those regions of mPRIC with higher values (North-Central and South of peninsula), negative changes close to 20 percent have been verified (represented in white). These changes have been interpreted in phenological terms with regard to the vegetation whose vigour increases with the start of the summer period and with high temperatures.

Some fires have been seen in areas that have been excluded in the analysis, having not been considered as zones susceptible to burning; this was interpreted as being an occurrence in agricultural zones which are subject to processes with different dynamics to the areas that are the focus of this study.

A link was observed between the increase in detected fires in the months and areas where the vigour of the vegetation is higher (mPRIC). For the summer months (June, July, August), the quantity of fires was higher while there is a notable decrease in September. Approximately 80 percent of the identified fires on the

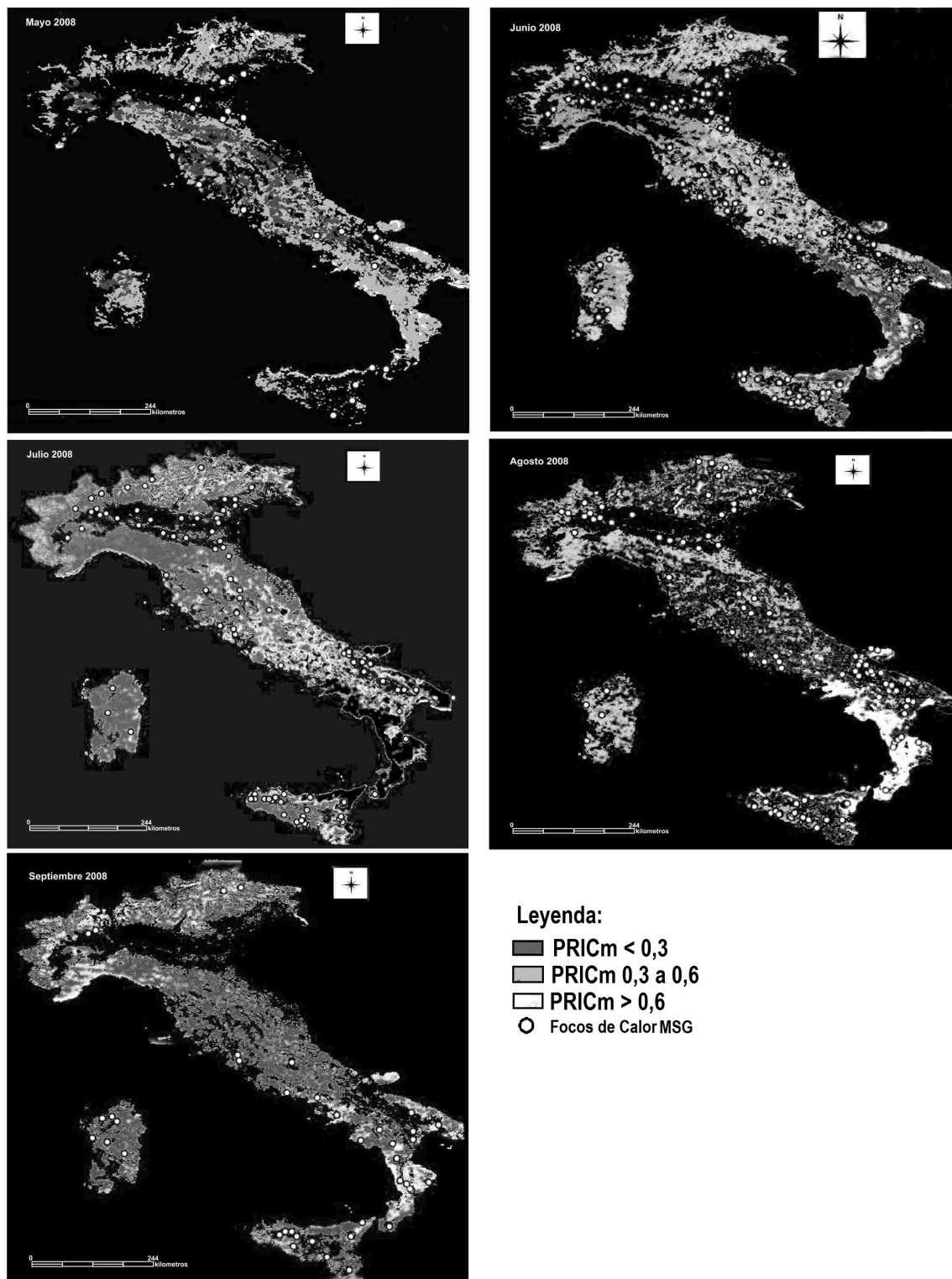


Figura 2: mapa de cambios del PRIC de mayo a septiembre de 2008. Se observa que en algunas áreas el PRI ha aumentado (tono gris) mientras que en otras ha disminuido (tono blanco).

DISCUSIÓN

Al analizar las imágenes resultantes se aprecia un aumento del PRICm desde mayo a agosto, indicando un aumento del vigor de la vegetación susceptible de ser quemada hacia el verano y una disminución para el mes de septiembre (inicio del otoño). Esto estaría posiblemente asociada a una disminución de las temperaturas, afectando el fotoperiodo, entre otros procesos que indican una marcada estacionalidad fenológica (Fig 1).

En relación a la distribución espacial del PRICm para el territorio italiano, los valores más altos (cerca de 0,5) se observaron en el extremo norte y sur de la península, observándose un gradiente de disminución hacia el interior del territorio (Fig 1).

En cuanto al análisis de cambios realizado a la cartografía de PRICm, en términos globales, se observa un aumento del PRI señalado en color gris (cambio de magnitud positiva correspondiente al 20%) en el mapa (Fig 2). En otras áreas, donde el PRI correspondientes a aquellas regiones de PRICm con valores más altos (centro-norte y sur de la península), se han verificado cambios negativos cercanos al 20% (representados en color blanco). Estos cambios se han interpretado en términos de la fenología de la vegetación, cuyo vigor aumenta con el inicio del período estival y de las altas temperaturas.

Si bien algunos incendios se han observado en áreas que se han excluido del análisis, al no considerarlas como zonas susceptibles de ser quemadas, se interpretó que esto se debe a la ocurrencia de quemadas en zonas de uso agrícola evidenciando procesos que se cumplen con dinámicas diferentes a las que son objeto de estudio del presente trabajo.

Se observó una correspondencia entre el aumento de los incendios detectados en los meses y áreas en los que el vigor de la vegetación (PRICm) es mayor. Para los meses de verano (junio, julio y agosto) los incendios se presentan en mayor cantidad mientras que en el mes de septiembre la disminución es notable. Aproximadamente, el 80% de los incendios identificados en el territorio en los 5 meses de estudio de 2008 ocurrieron en los meses de junio, julio y agosto. Para el mes de mayo y septiembre los incendios representaron el 20% restante.

territorio durante los 5 meses de estudio en 2008 tuvo lugar en junio, julio y agosto. El restante 20 por ciento ocurrió en los meses de mayo y septiembre.

CONCLUSIONES

El vigor de la vegetación puede estudiarse en el territorio italiano con el producto MODO1KM usando técnicas simples de teledetección. La información complementaria es vital en estos análisis. Es conveniente contar con información sobre las características climáticas, antropogénicas y ambientales entre otras. Así fue posible interpretar que los valores más altos del vigor de la vegetación y la consecuente ocurrencia de incendios de verano en áreas de Italia se ven con un mayor riesgo de desertificación según las evaluaciones disponibles (principalmente en el Sur, en Basilicata, Calabria, Campania, Puglia, Sicilia y otros en el Norte).

Los incendios se identificaron en áreas con cobertura herbácea, con diferentes usos del suelo. El PRI ha demostrado su utilidad como indicador del estado de la vegetación y puede emplearse en el análisis de la vulnerabilidad a incendios a través del estudio de mapas de cambio estacional. En general, la frecuencia de incendios es mayor en el verano (junio, julio y agosto) y aumenta en correspondencia con los valores del PRI.

Para una evaluación completa de la relación entre incendios y el comportamiento del PRI, es necesario realizar un análisis de diferentes años y temporadas (temperatura, vientos y lluvia) en una escala adecuada. Además, sería conveniente explorar los cambios en el PRI para los diferentes tipos de cobertura vegetal así como su relación con el uso del suelo.

ACKNOWLEDGEMENTS

Este estudio se realizó con una beca otorgada por ASI-CONAE en 2008. Gracias a la Agencia Espacial Italiana, Centro de Geodesia Espacial G. Colombo (ASI-Matera), a la Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE), a CeReGeo-FCyT-UADER por su apoyo institucional, al Dr. Franco Nirchio y Cósimo Marzo de ASI, al Dr. Marcelo Scavuzzo de CONAE y a Lic. Estefanía De Elia y al Ingeniero Forestal Rocquina Guarini por su colaboración. Gracias a Dra. Anya Hartpence (EROS-USGS Center -US) por la revisión del trabajo.

CONCLUSIONES

El vigor de la vegetación puede estudiarse en el territorio italiano a partir del producto MOD01KM, mediante técnicas de teledetección simples. La información auxiliar complementaria es imprescindible en estos análisis. Es conveniente contar con información sobre las características climáticas, antropogénicas, ambientales, entre otras. Así, fue posible interpretar que los mayores valores de vigor de la vegetación y la consecuente ocurrencia de incendios estivales, han sido observados en áreas del territorio italiano con elevado riesgo de desertificación de acuerdo a las evaluaciones disponibles (mayormente al sur en Basilicata, Calabria, Campania, Puglia, Sicilia, y otros al norte).

Los incendios se identificaron tanto en coberturas boscosas como en herbáceas, con diferentes usos del suelo. El PRI ha demostrado su utilidad como indicador del estado de la vegetación y puede ser empleado en el análisis de vulnerabilidad a incendios, mediante el estudio de mapas de cambios estacionales. En general, la frecuencia de los incendios es mayor en verano (junio, julio y agosto) y aumenta en correspondencia con los valores de PRI.

Para una evaluación completa de la relación entre incendios y comportamiento del PRI es necesario realizar un análisis de diferentes años y estaciones, integrando asimismo información complementaria (temperatura, vientos y precipitaciones) a escala adecuada. Asimismo, sería conveniente explorar los cambios en el PRI para los diferentes tipos de coberturas vegetales así como con relación al uso del suelo.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se realizó en el marco de las becas ASI-CONAE convocatoria 2008. Se agradece a la Agencia Espacial Italiana-Centro de Geodesia Espacial G. Colombo (ASI - Matera), a la Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE), al CeReGeo-FCyT-UADER por su apoyo institucional, a los Dres. Franco Nirchio y Cósimo Marzo de ASI, al Dr. Marcelo Scavuzzo de CONAE, a la Lic. Estefanía De Elia y a la Ing. Forestal Rocquina Guarini, por su colaboración. Gracias a la Dra. Anya Hartpence (EROS- USGS Center -US) por la revisión del trabajo.

BIBLIOGRAFÍA CITADA

- A^o, A., Malenovsky, Z., Pokorný, R., Hanuš, J. & Marek, M. 2006. Field imaging spectroscopy investigating PRI spatial distribution of montane grassland canopy in diurnal course. *Geophysical Research*. 8:08336.
- Ahern, F.J., Goldammer, J.G. & Justice, C.O. 2001. Global and Regional Vegetation Fire Monitoring from Space: Planning a coordinated international effort. SPB Academic Publishing. 302 pp.
- Boschetti, L., Roy, D., Barbosa, P., Boca, R. & Justice, C. 2008. A MODIS assessment of the summer 2007 extent burned in Greece. *International Journal of Remote Sensing*. 29 (8):2433 – 2436.
- Chuvieco, E. & Martín, M.P. 1994. Global fire mapping and fire danger estimation using AVHRR images. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 60:563-570.
- CRA. 2008. Consiglio per la ricerca e la sperimentazione in agricoltura. <http://sito.entecra.it>
- Drolet, G.G., Huemmrich, K.F., Hall, F.G., Middleton, E.M., Black, T.A., Barr, A.G. & Margolis, H.A. 2005. A MODIS-derived photochemical reflectance index to detect inter-annual variations in the photosynthetic light-use efficiency of a boreal deciduous forest. *Remote Sensing of Environment*. 98:212-224.
- EOS. 2004. *Data Products Handbook*. Volume 1. 261 pp.
- Evrendilek, F. & Gulbeyaz, O. 2008. Deriving Vegetation Dynamics of Natural Terrestrial Ecosystems from MODIS NDVI/EVI Data over Turkey. *Sensors*. 8:5270-5302 pp.
- FAO. 2006. *Fire management global assessment 2006*. FAO Forestry Paper. 156 pp.
- Garbulsky, M.F., Peñuelas, J., Ourcival, J.M. & Filella, I. 2008. Estimación de la eficiencia del uso de la radiación en bosques mediterráneos a partir de datos MODIS. Uso del Índice de Reflectancia Fotoquímica (PRI). *Ecosistemas*. 17(3):89-97.
- González-Alonso, F., Merino de Miguel, S. & Cuevas, J.M. 2007. Un nuevo algoritmo para la cartografía de áreas quemadas a partir de imágenes AWIFS Y MODIS. *Cuadernos de Investigación Geográfica*. 33:9-17.
- Justice, C.O., Malingreau, J.P. & Setzer, A.W. 1993. *Fire in the Environment: The Ecological, Atmospheric, and Climatic Importance of Vegetation Fires*. John Wiley & Sons Ltd. 77-88 pp.
- Koutsias, N. & Karteris, M. 1998. Logistic regression modelling of multitemporal Thematic Mapper data for burned area mapping. *International Journal of Remote Sensing*. 19:3499-3514.
- Lovreglio, R. & Leone, V. 2005. Difesa dagli incendi boschivi e contenimento dell'effetto serra. *Forest@*. 2:160-165.
- Meroni, M., Rossini, M., Picchi, V., Panigada, C., Cogliati, S., Nali, C. & Colombo, R. 2008. Assessing Steady-state Fluorescence and PRI from Hyperspectral Proximal Sensing as Early Indicators of Plant Stress: The Case of Ozone Exposure. *Sensors*. 8:1740-1754.
- MODIS. 2003. *MODIS Level 1B Product User's Guide*. Members of the MODIS Characterization Support Team. 74 pp.
- Pardi Lacruz, M.S. & Araújo Sousa Júnior, M. 2006. Uso de series temporais EVI/MODIS e análise harmônica para o estudo da bacia do rio Taquari. Anais 1o Simpósio de Geotecnologias no Pantanal, Campo Grande, Brasil. Embrapa Informática Agropecuária/INPE. 848-855 pp.
- Piccolini, I. & Arino, O. 2000. Towards a Global Burned Surface World Atlas. *Earth Observation Quarterly*. 65:14-18.
- Potter, C., Klooster, S. Huete, A. & Genovese, V. 2007. Terrestrial Carbon Sinks for the United States Predicted from MODIS Satellite Data and Ecosystem Modeling. *Earth Interactions*. 11:269-282.
- Quintano, C., Fernández-Manso, A. & Delgado de la Mata, J.A. 2001. *Estimación del área quemada por incendios forestales empleando modelos de mezclas lineales*. Teledetección y Cambio Global. 257-260 pp.
- Ramírez Flandes, S. 2001. Tutorial de IDL Básico. Tutorial de IDL básico. 24 pp.
- Schueler, C.F. & Barnes, W.L. 1997. Next-Generation MODIS for Polar Operational Environmental Satellites. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. 15: 430-439.
- SIAM. 2008. http://www.siam.it/inventarioforestale/img/cartogrammi/boschi_e_altre_terre_boscat.jpg
- Turner, D.P., Cohen, W.B., Kennedy, R.E., Fassnacht, K.S. & Briggs, J.M. 1999. Relationships between leaf area index and landsat TM spectral vegetation index across three temperate zone sites. *Remote Sensing of Environment*. 70:52-68.
- Vélez, R. 2000. *La defensa contra incendios forestales*. Ed. McGraw-Hill/Interamericana de España.
- Yebra, M., Chuvieco, E. & Riano, D. 2008. Estimation of live fuel moisture content from MODIS images for fire risk assessment. *Agricultural and Forest Meteorology*. 148:523-536.
- Zarco-Tejada, P.J., Miller, J.R., Mohammed, G.H. & Noland, T.L. 2000. Chlorophyll fluorescence effects on vegetation apparent reflectance: I. Leaf-level measurements and model simulation. *Remote Sensing of Environment*. 74(3): 582-595.

Recibido: julio 2011.

Aceptado: septiembre 2011.