

SECUENCIA DE TRATAMIENTO DE DATOS NOAA-AVHRR PARA EL ESTUDIO DE LOS CAMBIOS DE LA VEGETACIÓN TROPICAL

J. HERVAS DE DIEGO, A.S. BELWARD Y J.V. VOGT

Comisión de las Comunidades Europeas. Centro Común de Investigación.
Instituto de Aplicaciones de la Teledetección. ISPRA, Italia.

RESUMEN

Se expone una secuencia para el tratamiento de datos multitemporales NOAA-AVHRR a escala continental sobre zonas tropicales. Se describen los métodos existentes seleccionados y los desarrollados explícitamente, para la obtención final de parámetros geofísicos georeferenciados. Asimismo se identifican ciertas limitaciones en la secuencia. Este tratamiento se viene aplicando actualmente sobre grandes cantidades de datos, para el estudio de los principales cambios que se están produciendo en los ecosistemas tropicales y subtropicales de África.

ABSTRACT

A chain routine processing of time series of NOAA-AVHRR data at continental scale over the tropics is presented. Methods both selected from the literature and in-house developed, aimed eventually at calculating georeferenced geophysical parameters, are discussed. Some constraints in the chain are also identified. Such a processing is currently being applied to large data volumes to study major changes occurring in Africa's tropical and subtropical ecosystems.

1. INTRODUCCIÓN

Existe actualmente una creciente preocupación generalizada por los cambios producidos en los grandes ecosistemas en zonas tropicales y las posibles consecuencias que éstos puedan tener en el medio natural a escala global. Es en este contexto en el que el Centro Común de Investigación (JRC) de la Comisión de las Comunidades Europeas en ISPRA está utilizando de manera sistemática datos de satélites de observación de la tierra, fundamentalmente NOAA-AVHRR, para el estudio de dichos cambios.

Problemas tales como la deforestación tropical y la desertificación subtropical, y sus implicaciones medio-ambientales a escala regional o global (modificación de los ciclos hidrológico, del carbón, y del balance de la radiación; erosión del suelo; pérdida de especies vegetales; aumento del efecto invernadero por la emisión de CO₂ a consecuencia de la quema de biomasa y, en definitiva, el cambio climático) están siendo analizados y, en la medida de lo posible, cuantificados (Malingreau, 1990; Belward et al., 1991). Estas iniciativas están siendo recogidas en proyectos como el TREES (Tropical Ecosystem Environment Observations by Satellites, CEC-ESA, 1991), en colaboración con la ESA, o como "Land Cover Change", dentro del Programa Internacional Geosfera-Biosfera (IGBP), en colaboración con el grupo GIMMS (Global Inventory Monitoring and Modelling Studies) de la NASA y otros laboratorios de teledetección internacionales.

El seguimiento continuo de las variaciones producidas en parámetros geofísicos como el NDVI y la temperatura de su-

perficie, a través de la utilización de los datos procedentes principalmente del sensor AVHRR a bordo de los satélites NOAA, requiere el establecimiento de procedimientos adecuados de pre-tratamiento de los datos, que permitan comparar dichos parámetros tanto en el espacio como en el tiempo para su posterior análisis e interpretación (Vogt et al., 1991).

La elección de los datos NOAA-AVHRR está basada en su cobertura global e histórica, por lo que respecta al modo GAC (Global Area Coverage), de 4 km de resolución máxima, así como en la alta repetitividad de observación (una imagen diurna y otra nocturna para cada uno de los dos satélites simultáneamente en órbita), y la adecuada cobertura espectral para el estudio de la vegetación. Factores tales como la prevista continuación de las misiones NOAA-AVHRR y el coste asequible de las imágenes han sido también tenidos en cuenta a la hora de la elección. Cabe destacar, no obstante, ciertas limitaciones en la aplicación de estos datos, como son la variedad en la respuesta de los diferentes sensores utilizados, derivada de la diversidad de misiones (característica común en estudios de series multitemporales de larga duración), la gran amplitud del área observada por el sensor y la diversidad geográfica de las observaciones, unidas a condiciones atmosféricas y de iluminación variables, así como la dificultad de control sobre el terreno (sobre todo en imágenes en modo GAC). Algunas de estas limitaciones han sido subsanadas mediante adecuados procedimientos de pre-tratamiento de los datos. Otras están aún por superarse. Por otra parte, la resolución espacial de los datos AVHRR no permite observaciones muy locales, debiendo haber sido

complementada en ciertas zonas con el análisis de datos Landsat y SPOT. Asimismo, la dificultad de aprovechamiento de datos AVHRR en formato HRPT/LAC (High-Resolution Picture Transmission/Local Area Coverage), de 1,1 km de resolución máxima, derivada de la inexistencia hasta ahora de largas series históricas y de cobertura global, desaparecerá con la próxima puesta en funcionamiento de diversas estaciones de recepción directa en el cinturón tropical (CEC-ESA, 1991).

Se ha establecido una secuencia de pre-tratamiento de datos AVHRR, en base a algoritmos desarrollados tanto dentro como fuera del JRC, la cual está siendo aplicada sobre una base de datos en

modo GAC, que comprende imágenes diarias diurnas abarcando todo el continente africano, extraídas de las órbitas ascendentes de los satélites NOAA 7, 9 y 11, para el período comprendido de julio de 1981 hasta la actualidad. Dicha base de datos alcanza un volumen aproximado de 120 Gbytes. Se está recopilando también otra equivalente sobre el continente asiático, con la intención de procesarlos en un futuro próximo. Asimismo se han procesado series multitemporales recientes de datos HRPT sobre Africa, así como de LAC sobre el sureste asiático (Belward et al., 1991; CEC-ESA, 1991).

2. METODOLOGÍA DE TRATAMIENTO DE DATOS

2.1. Antecedentes.

El JRC ha desarrollado una metodología preliminar de trata-

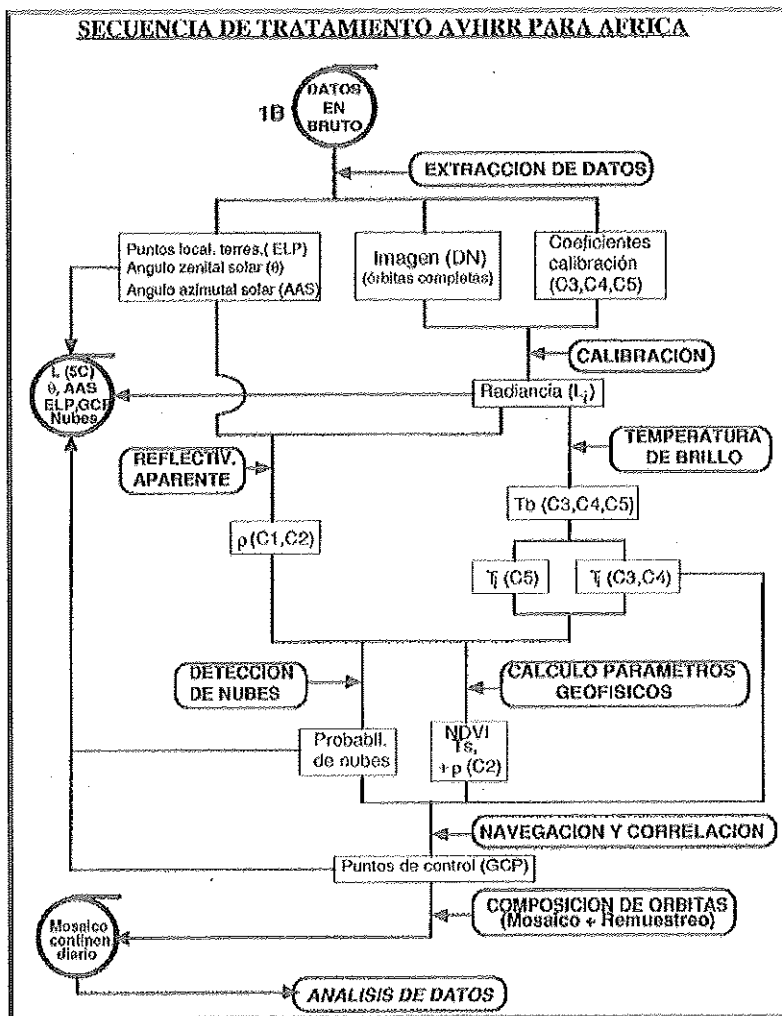


Figura 1.

VI a partir de valores de reflectividad, para los diversos modos y formatos digitales principales.

Dicha secuencia preliminar de tratamiento ha sido aplicada originalmente sobre una subescena de 512 x 512 píxeles de imágenes diarias en modo GAC, obtenidas durante el período julio 1981- agosto 1989, abarcando el Oeste de Africa. También se ha aplicado a series de datos en modo HRPT y LAC sobre diversas zonas piloto, como se ha indicado anteriormente.

2.2. Secuencia de tratamiento actual.

El análisis previo de los datos anteriormente procesados ha servido para la puesta a punto de algoritmos más apropiados y métodos de tratamiento más complejos, a la vez que se ha automatizado aún más el proceso, eliminando opciones no necesarias en una cadena que pretende funcionar de manera casi automática, lo cual es condición indispensable

miento de datos AVHRR procedentes de diversas fuentes y suministrados en diferentes modos (GAC, HRPT, LAC, GVI-Global Vegetation Index) y formatos digitales (SHARP-1, NOAA, Lannion, etc), que ha dado lugar a la creación de un paquete de software que utiliza las librerías del paquete comercial ERDAS (Van Camp, 1988; ERDAS, 1982-1990; Hervás de Diego, 1990). Junto con algoritmos para la obtención de parámetros marinos, se incluían en esta versión algoritmos para la corrección geométrica de los datos en diversas proyecciones y la obtención de parámetros geofísicos, como valores de temperatura superficial y ND-

para el tratamiento de grandes volúmenes de datos. El proceso, aun siendo complejo, es relativamente abierto y modular, lo que permitirá en el futuro la inserción de nuevos algoritmos y su codificación en las partes donde sea necesario, sin tener que volver a reprocesar todas las series de imágenes desde su formato en bruto inicial.

Los diferentes procesos han sido codificados en FORTRAN 77, utilizando originalmente las librerías de subrutinas suministradas con el software ERDAS (ERDAS, 1982-1990), si bien actualmente se está desarrollando una versión completamente independiente de dicho paquete. La versión actual del software desarrollado opera sobre sistemas VAX/VMS y MS-DOS.

La secuencia de tratamiento consta de los siguientes procesos (Figura 1):

EXTRACCION DE DATOS

Los datos en modo GAC y HRPT, suministrados en cinta magnética (CCT y Exabyte) en formato bruto a nivel 1B (Kidwell, 1984-88; ESA, 1989), son en primer lugar transferidos a disco magnético. En esta operación se extraen las imágenes en órbitas completas, junto con los puntos de localización terrestre (ELP) y los ángulos zenital (θ) y azimutal solares. El proceso genera a su vez un fichero auxiliar de datos (AUX), que contiene toda la información relevante asociada a las imágenes y al tratamiento realizado, siendo necesariamente utilizado y actualizado en los sucesivos procesos.

CALIBRACION

Este proceso conlleva la corrección de los valores digitales de las cinco bandas de la imagen, tanto por la diferente sensibilidad de los diversos sensores como por la degradación sufrida durante su periodo de operación (Holben et al., 1990). La corrección radiométrica así efectuada transforma los valores digitales de la imagen en radiancia según la expresión:

$$L_i = \alpha_i * DN_i + \beta_i \quad (\text{Wm}^{-2} \text{sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1})$$

en la que L_i es la radiancia espectral medida por el sensor; DN_i son los valores digitales en la banda respectiva, y α_i y β_i son los coeficientes de calibración. Dichos coeficientes han sido obtenidos empíricamente para las bandas 1 y 2 durante las diferentes misiones de los satélites NOAA-AVHRR (Holben et al., 1990; Vogt, 1990). Para las bandas 3, 4 y 5, los coeficientes son obtenidos mediante calibración del sensor en vuelo con medidas respecto al espacio exterior y a un cuerpo negro interno, viniendo suministrados con los datos en bruto (Kidwell, 1984-88).

Estos valores de radiancia, junto a los puntos de localización y ángulos extraídos en la primera fase del tratamiento son archivados de forma permanente.

Por otra parte, los valores de radiancia para los canales 1 y 2 (visible e infrarrojo próximo) son transformados en valores más significativos de reflectividad aparente (ρ_i), suponiendo una superficie Lambertiana, a fin de compensar las diferencias en la geometría de iluminación, mediante la siguiente expresión:

$$\rho_i = \frac{\pi L_i}{E_{O_i} \cos \theta} * 100 \quad (\%)$$

siendo L_i la radiancia en cada uno de los dos canales; E_{O_i} , la irradiancia solar extraterrestre para el canal del sensor correspondiente; θ , el ángulo zenital solar, y d , la distancia actual tierra-sol. Los valores de E_{O_i} usados proceden de Price (1984), estando basados en valores de irradiación solar (Neckel et al., 1981).

TEMPERATURA DE BRILLO

A continuación se calcula la temperatura de brillo (T_b) para los canales 3, 4 y 5. La función empleada para cada uno de ellos es:

$$T_b(L_i, \nu) = \frac{(c_2 \nu)}{\ln[1 + (c_1/L_i) \nu^3]} \quad (\text{K})$$

donde L_i es la radiancia en los respectivos canales; ν es el número de onda central del filtro del canal (Kidwell, 1984-88), y c_1 y c_2 son constantes calculadas en función de las constantes de Planck y de Boltzman, respectivamente.

Se ha aplicado asimismo una corrección de no linealidad del sensor sobre las temperaturas de brillo para las bandas 4 y 5, utilizando coeficientes de corrección (ΔT) derivados de datos procedentes de diversas fuentes (Planet, 1988; Vogt, 1990). De esta manera se han obtenido las denominadas temperaturas de brillo verdaderas (T_i) de los canales 4 y 5, mediante la siguiente fórmula:

$$T_i = T_{b_i} + \Delta T$$

OBTENCION DE PARAMETROS GEOFISICOS

En la actualidad se están obteniendo dos parámetros principales de forma sistemática, el índice de vegetación (NDVI) y la temperatura superficial.

El NDVI se calcula a partir de los valores de reflectividad aparente (ρ) de las bandas 1 y 2, obtenidos anteriormente, mediante la expresión:

$$\text{NDVI} = \left[\frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} \right] 200 + 50$$

dando lugar a valores de pixel comprendidos entre 50 para un NDVI=0, y 250 para NDVI=1.

La temperatura superficial (T_s) se calcula a partir de los valores de temperatura de brillo verdadera de los canales 4 y 5, a través del siguiente algoritmo "split-window":

$$T_s = aT_{i4} + b(T_{i4} - T_{i5}) + c \quad (\text{K})$$

siendo a , b y c los coeficientes estimados por Price (1984). Por el momento no se ha introducido el factor emisividad, debido a la falta de datos fiables, como los relativos a la ocupación del suelo y un adecuado control de localización en el terreno, entre otros. El problema ha sido ampliamente tratado por Becker y Li (1990). Se estima que la exclusión de dicho factor puede afectar a las medidas de temperatura así

obtenidas entre 2 y 4°C, con efectos contrarios según la estación, por lo que actualmente se están estudiando diversos supuestos para incorporar dicho factor.

Los valores de T_s resultantes se convierten de K a °C y se distribuyen de 0 a 250 en la imagen de la siguiente forma:

$$T_{s(C)} = [T_{s(K)} - 273.15] \cdot 5$$

Para imágenes diurnas procedentes de órbitas ascendentes de los NOAA 7, 9 y 11 sobre África, las temperaturas por debajo de 0°C, obtenidas mediante este método, se convierten a 0, ya que no se pueden esperar tales condiciones en el terreno. Sólo las nubes pueden dar valores más bajos. Asimismo, el máximo valor que puede ser medido por el sensor es de 50°C, al saturarse a 320 K (Vogt, 1990).

DETECCION DE NUBES

Este proceso incluye, en primer lugar, la creación de una imagen o canal de probabilidad de nubes de cualquier tipo, a partir de las temperaturas de brillo verdaderas en las bandas 3, 4 y 5 y de la reflectividad aparente en las bandas 1 y 2. A continuación se clasifica cada imagen píxel a píxel con referencia a dicha imagen de probabilidad mediante un algoritmo basado en la distancia de Mahalanobis.

Esta imagen ha sido generada mediante un método basado en los tests realizados sobre los parámetros anteriores por Saunders y Kriebel (1988), con ajustes empíricos de los umbrales obtenidos para África, utilizando imágenes tomadas sobre diversas regiones en diferentes épocas del año (Van Hengel, 1990). La imagen de probabilidad de nubes se archiva permanentemente junto a las de radiancia y a los datos extraídos al inicio de la secuencia (ver Figura 1).

CORRECCION GEOMETRICA

La corrección geométrica de los datos AVHRR sobre áreas tropicales, y su composición en mosaicos continentales, representa un proceso bastante complejo, debido principalmente a la geometría intrínseca de los datos y a la carencia de puntos de control en el terreno, sobre todo en el interior de los continentes. En nuestra secuencia de tratamiento se corrigen las siguientes imágenes: el NDVI, la temperatura superficial (T_s), la reflectividad en el canal 2 (ρ_2), la imagen de probabilidad de nubes, y las de temperaturas de brillo verdaderas para los canales 3 y 4.

El método de corrección geométrica desarrollado para África se basa en la correlación de las 3 ó 4 órbitas ascendentes diurnas (imágenes diurnas) que cubren el continente, con una base de datos de imágenes de referencia, y consta de tres fases:

La primera consiste en la creación de una base de datos de ventanas de referencia para posterior correlación. Este proceso implica, en primer lugar, la codificación de la información geométrica de los píxeles de las imágenes a corregir, en base a la información suministrada en la cinta por los puntos de localización terrestre (ELP). A continuación se crean imágenes de referencia a partir de las de reflectividad en el canal 2. Dichas imágenes son corregidas geométricamente a una proyección predefinida utilizando un modelo orbital basado en los ELP, complementado con el uso de

puntos de control sobre el terreno (GCP). De estas imágenes se extraen las ventanas de referencia.

La segunda fase consiste en la correlación de las imágenes a corregir con la base de datos de ventanas anteriormente creadas, a fin de suministrar automáticamente, sobre las imágenes sin corregir, plantillas asociadas a las ventanas de referencia dentro de la órbita correspondiente. A continuación se realiza la correlación de plantillas con ventanas, utilizando para ello una función de correlación de frecuencia con un umbral de confianza determinado empíricamente. Durante este proceso tiene lugar una validación de las plantillas, en función principalmente de su contenido en nubes, estación, varianza (contraste), distancia al nadir y localización dentro de la órbita, excluyendo así las plantillas inadecuadas. El número y distribución de plantillas y ventanas de referencia ha sido determinado empíricamente. Se obtienen así los puntos de control adicionales, los cuales contienen la posición y errores residuales de los centros de las ventanas de referencia. Estos puntos son archivados permanentemente a fin de proporcionar datos de localización más precisos para las imágenes sin remuestrear (Belward et al., 1991).

Finalmente se crea un mosaico continental de imágenes diurnas basado en una proyección adecuada predefinida, mediante la composición de hasta 4 órbitas y remuestreo de píxeles utilizando el vecino más próximo, aplicando una transformación polinómica de primer grado a partir de los GCP obtenidos en la fase anterior. La precisión media en la registración obtenida por este método es de 1 píxel. El resultado se archiva para posterior análisis por los usuarios.

Por otra parte, a fin de poder comparar los datos multitemporales cuantitativamente de una manera más precisa, se estima que, además del factor de emisividad, es necesario considerar los efectos de la atmósfera, así como los efectos bidireccionales producidos por las cubiertas vegetales. La secuencia de tratamiento de datos AVHRR debería incorporar, en primer lugar, adecuados algoritmos de corrección atmosférica especialmente por efectos del vapor de agua, dispersión Rayleigh, aerosoles y, en menor cuantía, ozono (Hervás de Diego, 1990). Algunos métodos y algoritmos existentes (Tanré et al., 1985; López García y Caselles, 1987), no pueden ser aplicados sobre zonas tropicales en general, bien al carecerse de datos como, por ejemplo, perfiles meteorológicos detallados, o debido a la heterogeneidad de la atmósfera sobre extensos continentes y a la posible variación en la clase de ocupación del suelo en muchas zonas a lo largo del decenio considerado. Se podrían usar, no obstante, otros métodos de obtención de los datos necesarios para algunos algoritmos, aunque por el momento no son operativos (Belward et al., 1991). El JRC continúa realizando investigaciones en estas áreas, conjuntamente con otros laboratorios de teledetección.

3. CONCLUSIONES

Se ha desarrollado una secuencia de tratamiento de series multitemporales de datos NOAA-AVHRR de zonas tropicales y subtropicales, con el fin de localizar y analizar los pro-

cesos, naturales o provocados por el hombre, que producen grandes cambios en los ecosistemas de dichas zonas, algunos de los cuales con posibles repercusiones a escala global.

La comparación de los datos en el espacio (escala continental) y en el tiempo (un decenio, al menos) requiere en primer lugar la recopilación de los archivos adecuados. Esto sólo ha sido posible hasta la fecha con datos AVHRR en modo GAC, si bien la próxima disponibilidad de datos en modo HRPT sobre todo el cinturón tropical abre grandes posibilidades para una mejor caracterización de dichos procesos en el futuro. La metodología de tratamiento aquí presentada permite la georeferenciación de los datos procedentes del sensor AVHRR junto como un cierto grado de confianza en el análisis espacio-temporal cuantitativo de diver-

sos parámetros geofísicos obtenidos a partir de dichos datos. Se reconoce, no obstante, la necesidad de desarrollar métodos adecuados para eliminar las influencias atmosféricas y otros factores físicos que enmascaran parcialmente los valores reales de algunos de estos parámetros, o al menos dificultan su relativa comparación entre diversas áreas y a lo largo del tiempo.

4. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo está financiado por la Comisión de las Comunidades Europeas. Nuestro agradecimiento a GAF y TWS, de Munich, por la codificación de una gran parte del software, y a T. Barker y M. Righetti por su colaboración en dicha tarea.

5. BIBLIOGRAFIA

- ✓ BECKER, F. & LI, Z.L. (1990): Towards a local split window over land surfaces. *Int. J. Rem. Sensing*, vol. 11, 3, pp. 369-393.
- ✓ BELWARD, A.S.; MALINGREAU, J.P. & VERSTRAETE, M.M. (1991): Long term AVHRR data sets for global environmental studies. *Proc. 5th AVHRR Data Users Meeting*, Tromsø, Noruega, 25-28 Junio 1991, pp. 195-202.
- ✓ CEC-ESA, (1991): TREES, Strategy Proposal 1991-93. Part 1: AVHRR Data Collection and Analysis. *CEC technical document EUR 14026 EN*. Comisión de las Comunidades Europeas, JRC, Ispra, Italia. 20 p.
- ✓ ERDAS, (1982-1990): *ERDAS Software Toolkit Manual*, version 7.3, 7.4 & 7.5. ERDAS Inc., Atlanta, USA.
- ✓ ESA, (1989): SHARP-1 Technical Specification of CCT Format, rel. 1.1. *ESA/EPO internal report*. 52 p.
- ✓ HERVAS DE DIEGO, J. (1990): Special Meeting on AVHRR Data Preprocessing and Compositing Methods. Ottawa, Canadá, 12-14 Marzo 1990. *JRC internal report*. Ispra, Italia. 7 p.
- ✓ HOLBEN, B.N.; KAUFMAN, Y.J. & KENDALL, J.D. (1990): NOAA-11 AVHRR visible and near IR inflight calibration. *Int. J. Remote Sensing*, vol. 11, nº 8, 1511-1519.
- ✓ KIDWELL, K.B. (1984, 1986, 1988): NOAA Polar Orbiter Data Users Guide. *NOAA/NESDIS publication*. Washington D.C. 166 p.
- ✓ LOPEZ GARCIA, M.J. y CASELLES, V. (1987): Un método alternativo de corrección atmosférica. *Actas II Reunión Nacional del Grupo de Trabajo en Teledetección*, Valencia, 17-18 Dic. 1987. pp. 165-175.
- ✓ MALINGREAU, J.P. (1990): The contribution of remote sensing to the global monitoring of fire in tropical and subtropical ecosystems. *Fire in Tropical Biota*, ed. J.G. Goldammer, Springer-Verlag, Berlin. pp. 337-368.
- ✓ NECKER, H. & LABS, D. (1981): Improved data of solar spectral irradiance from 0.33 to 1.25 μm . *Solar Physics*, 74, pp. 213-249.
- ✓ PLANET, W.G. (ed), (1988): Data Extraction and Calibration of TIROS-N/NOAA Radiometers. *NOAA Technical Memorandum NES 107*. Rev. 1.
- ✓ PRICE, J.C. (1984): Land Surface Temperature Measurements from the Split Window Channels of the NOAA-7 AVHRR. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 89, Nº D5, pp. 7231-7237.
- ✓ SAUNDERS, R.W. & KRIEBEL, K.T. (1988): An improved method for detecting clear sky and cloudy radiances from AVHRR data. *Int. J. Rem. Sensing*, Vol.9, 1, pp. 123-150.
- ✓ TANRE, D. et al., (1985): Effets atmosphériques en télédétection - Logiciel de simulation du signal satellitaire dans le spectre solaire. *Proceedings 3rd Inter. Coll. on Spectral Signatures of Objects in Remote Sensing*, Les Arcs, Francia. *ESA SP-247*, pp. 315-319.
- ✓ VAN CAMP, L. (1988): An ERDAS module for routine processing of AVHRR data. *IGARSS'88 Symposium*, Edimburgo, 12-16 Sept. 1988. *ESA SP-284*, Noorwijk, Holanda. pp. 1771-1775.
- ✓ VAN HENGEL, W. (1990): Cloud Masking for AVHRR. *CEC Joint Research Centre-Ispra Technical Note*. Nº1.90.33.
- ✓ VOGT, J.V. (1990): Calculation of T-O-A Albedo, NDVI, Surface Temperature, and Precipitable Water Content of the Atmosphere from NOAA AVHRR Data. User's Guide to the Program NEWTAN. *CEC Joint Research Center-Ispra Technical Note*. Nº1.90.72. 29 p.
- ✓ VOGT, J.V. & VERSTRAETE, M.M. (1991): Analysis of the spatio-temporal information content of a multi-temporal AVHRR-HRPT data over southern Mali. *Proc. 5th AVHRR Data User's Meeting*, Tromsø, Noruega, 25-28 June 1991, pp. 83-88.