

INFLUENCIA DE LAS CONDICIONES ATMOSFERICAS SOBRE EL NDVI-AVHRR

P. Illera Gutiérrez, A. El-Kaouri y A. Vegas Hernández

Universidad de Valladolid. Departamento de Física Aplicada I, E.T. S. de Ingenierías Agrarias. Avda. de Madrid 57, 34071 Palencia. Tfno: 34 79 729048. Fax: 34 79 712099. E-mail: jois@cpd.uva.es

RESUMEN.- En este trabajo se analiza la influencia de las condiciones atmosféricas sobre el índice de vegetación diferencia normalizado NDVI calculado a partir de las imágenes del radiómetro AVHRR a bordo de los satélites NOAA. Para cuantificar los valores de las correcciones atmosféricas a aplicar se ha utilizado el código 5S. El efecto de la absorción por parte del ozono y del vapor de agua resulta importante sobre zonas áridas o de vegetación escasa, mientras que las dispersiones molecular y de aerosoles tienen una mayor incidencia sobre superficies de vegetación densa. En un segundo paso se han estudiado las posibilidades de utilización de los radiosondeos atmosféricos proporcionados por la sonda TOVS, también a bordo de los NOAA, para corregir el efecto del vapor de agua. Se discuten también los pasos a seguir para utilizar el código en un esquema operativo de corrección atmosférica.

ABSTRACT.- In this paper the influence of the atmospheric conditions in the Normalized Difference Vegetation Index NDVI derived from NOAA-AVHRR images has been analysed. The atmospheric corrections have been worked out by using the 5S code. The absorption due to ozone and water vapor is important over arid or sparsely vegetated areas whereas molecular and aerosols scattering has a bigger incidence in dense vegetated covers. In a second step, the possibility of using the atmospheric radiosoundings provided by the TOVS sounder on board the NOAA satellites to correct the effect of water vapor has been studied. The steps to implement the code in an operational scheme of atmospheric correction are also discussed.

1.- INTRODUCCION

Los satélites de la serie NOAA, diseñados inicialmente con fines meteorológicos, se han introducido paulatinamente en el campo de los satélites de recursos naturales. El producto más ampliamente utilizado es el índice de vegetación diferencia normalizado NDVI y la ventaja de los NOAA es su excelente resolución temporal, con varias imágenes al día. Como consecuencia, los satélites son muy adecuados para llevar a cabo estudios de evolución temporal de la vegetación, pero la comparación de distintas fechas hace aconsejable la corrección atmosférica.

Los canales 1 y 2 del AVHRR miden la radiación solar reflejada por la superficie terrestre en el visible y el infrarrojo próximo. Las imágenes calibradas proporcionan el valor de las reflectancias que se pueden combinar para calcular el índice de vegetación $NDVI = (\rho_2 - \rho_1) / (\rho_2 + \rho_1)$ relacionado con la actividad fotosintética, biomasa, productividad neta primaria y contenido en agua de la vegetación. El problema surge debido a que la reflectancia obtenida a partir de las imágenes de los canales 1 y 2 es la del suelo perturbada por la absorción y dispersión que produce la atmósfera en el camino sol-suelo-sensor atravesado por la radiación. La absorción atmosférica tiene como consecuencia la atenuación de la radiación.

En el caso de la dispersión se produce un cambio en la dirección de propagación, por lo que parte de la radiación que llega al satélite puede haber sido dispersada por el aire sin alcanzar el suelo o proceder de pixeles adyacentes al estudiado. Todo ello introduce ruidos en la señal del satélite que deben ser cuantificados si se quieren comparar distintas zonas de una imagen o estudiar la evolución de un área determinada en distintas fechas.

En el canal 1 las principales perturbaciones son producidas por la dispersión de aerosoles, dispersión molecular o de Rayleigh y absorción del ozono. En el canal 2 hay que destacar la absorción por parte del vapor de agua y se mantiene la dispersión por parte de los aerosoles. La corrección atmosférica consiste en determinar la reflectancia real de la superficie terrestre a partir de la aparente proporcionada por las imágenes. El NDVI combina las reflectancias de ambos canales y está también afectado por el efecto de la atmósfera. La influencia de los distintos efectos depende de la geometría sol-píxel-sensor y de la presencia en la atmósfera del componente responsable. En este sentido hay que establecer una diferencia entre la absorción por parte del ozono y la dispersión molecular, caso en que se puede suponer una presencia prácticamente constante de dicho componente, de la absorción del vapor de agua y dispersión de aerosoles, ya que la distribución en estos dos casos resulta altamente variable espacial y temporalmente.

Este trabajo constituye un primer paso en el desarrollo de un esquema operativo de corrección atmosférica del NDVI-AVHRR. En primer lugar presentamos los resultados del código 5S (Tanré et al., 1990), desarrollado en el Laboratorio de Optica Atmosférica de Lille, Francia, en la corrección atmosférica de las reflectividades de los canales 1 y 2 del AVHRR y del NDVI. Se cuantifica la influencia de los fenómenos de absorción y dispersión considerando distintas condiciones atmosféricas y variaciones en las condiciones geométricas de iluminación y observación. En un segundo paso se discuten las posibilidades de utilización de los radiosondeos atmosféricos proporcionados por la sonda TOVS, también a bordo de los NOAA, para corregir el efecto del vapor de agua. Se discuten también los pasos a seguir para desarrollar un procedimiento operativo de corrección.

2.- EL CODIGO 5S

El código 5S o Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum (Tanré et al., 1990), desarrollado en el Laboratorio de Optica Atmosférica de Lille, Francia, es un modelo de estimación de la radiación solar reflejada por el sistema tierra atmósfera y que llega al radiómetro de un satélite. Suponiendo la superficie terrestre homogénea y lambertiana, la reflectancia aparente ρ^* medida por el sensor y registrada en las imágenes es la correspondiente a la cima de la atmósfera y se puede expresar como:

$$\rho^*(\theta_s, \theta_v, \Phi) = T_G(\theta_s, \theta_v) \left[\rho_A(\theta_s, \theta_v, \Phi) + \frac{T(\theta_s) \downarrow}{1 - \rho S} \rho T(\theta_v) \uparrow \right] \quad (1)$$

siendo θ_s y θ_v los ángulos cenitales solar y del satélite, Φ el acimutal sol-satélite, T_G la transmitancia por absorción de los gases, ρ_A la reflectancia de la atmósfera, $T(\theta)$ la transmitancia por dispersión, S el albedo esférico de la atmósfera y ρ la reflectancia real de la superficie. El código permite calcular ρ^* en el intervalo espectral de 0,4 a 2,3 μm especificando como parámetros de entrada las condiciones geométricas θ_s , θ_v y Φ , los modelos de atmósfera y aerosoles, la banda espectral de observación, la función filtro del sensor del radiómetro y la reflectividad de la superficie ρ . Dispone de seis atmósferas estandar y distintos modelos de aerosoles aunque también permite introducir perfiles del usuario que asimismo puede definir su propio modelo de aerosol. Por último, junto con la banda espectral de observación, se puede introducir la función filtro del sensor. El código

lleva implementadas las de los sensores de los satélites NOAA, Landsat, SPOT, Meteosat y GOES y se puede introducir cualquier otra función definida por el usuario.

El 5S se puede utilizar para calcular los términos que aparecen en la ecuación (1) y analizar la influencia de los distintos componentes atmosféricos sobre la reflectancia del suelo (cálculo de ρ^* a partir de ρ) o bien invertir la ecuación y llevar a cabo la corrección atmosférica (cálculo de ρ del suelo a partir de ρ^* que es la que proporcionan las imágenes).

Como hemos indicado, para operar en cualquiera de los dos sentidos descritos es necesario conocer las condiciones geométricas de iluminación y observación, que se pueden calcular para cada pixel de la imagen, los perfiles atmosféricos y la distribución del vapor de agua y los aerosoles. Es necesario también desacoplar los fenómenos de absorción y dispersión que se encuentran en continua interacción en el paso de la radiación a través de la atmósfera (Tanré et al., 1992). Por último, si se quiere plantear un procedimiento operativo de corrección atmosférica, es conveniente reducir el tiempo de cálculo evitando la aplicación del modelo en todos los pixeles de la imagen.

3.- INFLUENCIA DE LA ATMOSFERA SOBRE LOS CANALES 1 Y 2 DEL AVHRR

El primer paso ha consistido en la utilización del código 5S para estimar la influencia de la atmósfera en los canales 1 y 2 del AVHRR. En la Figura 1 presentamos la función filtro de ambos canales junto con las transmitancias espectrales debidas a la absorción por parte del ozono y vapor de agua y a las dispersiones molecular y de aerosoles, todas ellas calculadas a partir del código 5S para una atmósfera estandar de latitudes medias en invierno. En el canal 1 las principales perturbaciones son producidas por la dispersión de aerosoles, dispersión molecular y absorción por el ozono. En el canal 2 hay que destacar la absorción por parte del vapor de agua y se mantiene la dispersión debida a los aerosoles.

Del análisis de la ecuación (1) se desprende que la influencia atmosférica depende de la geometría, perfiles atmosféricos, espesores ópticos de los distintos componentes y también de los propios valores de la reflectancia de la superficie ρ . La absorción produce una disminución de la reflectancia más importante para valores de ρ altos o sobre superficies brillantes. La dispersión molecular incrementa la reflectancia fundamentalmente para superficies oscuras. En cuanto a la dispersión de aerosoles, el efecto es de aumento para valores de ρ bajos y de disminución a partir de un cierto valor de la reflectancia.

Considerando las variaciones en la geometría de iluminación y observación típicas del AVHRR (paso de mediodía) y diferentes condiciones atmosféricas, en la Tabla I se muestra la influencia (valores máximos o rangos típicos de variación) de los distintos efectos en los dos canales.

4.- INFLUENCIA DE LAS CONDICIONES ATMOSFERICAS SOBRE EL NDVI

El NDVI combina las reflectancias en los canales 1 y 2 del AVHRR y está afectado también por el efecto atmosférico. De su definición y de los resultados de la Tabla I se puede esperar, por ejemplo, que el vapor de agua produzca una disminución del índice y el ozono un aumento, pero el principal problema es que un mismo valor del NDVI puede provenir de distintas combinaciones de las reflectancias ρ_1 y ρ_2 . Dado que la influencia atmosférica depende de las propias reflectancias, la corrección a aplicar al índice de vegetación depende no sólo de su valor sino también de las reflectancias de partida.

Debido a esto, en este trabajo hemos analizado la influencia atmosférica para tres casos diferentes que denominaremos:

TRANSMISIVIDADES Y FUNCIONES FILTRO

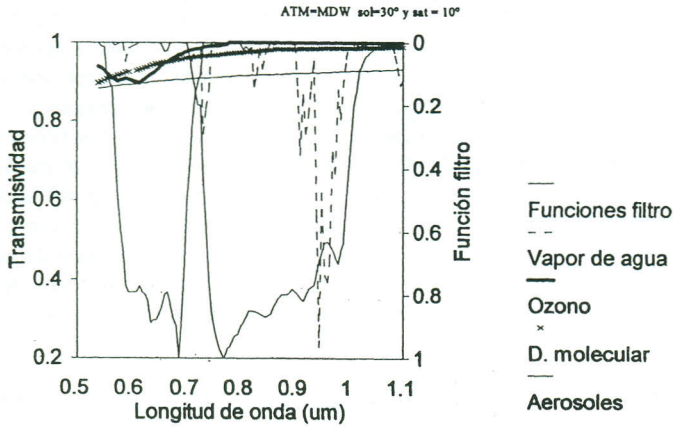


Figura 1.- Funciones de filtro de los canales 1 y 2 del AVHRR y transmitancias atmosféricas

	CANAL 1	CANAL 2
vapor de agua	↓ 2-4%	↓ 10-26%
ozono	↓ 10%	sin efecto
dispersión molecular	↑ 10%	↑ 5%
dispersión de aerosoles	↑↓ 5-20%	↑↓ 5-20%

Tabla I.- Influencia de la atmósfera en los canales 1 y 2 del AVHRR.

		V. DENSA	V. MEDIA
vapor de agua	↓	0,01-0,04	0,02-0,15
		1,5-6%	7-50%
ozono	↑	0,02	0,04
		3%	13%
dispersión molecular	↓	0,04-0,1	0,02
		6-15%	6%
dispersión de aerosoles	↓	similar a la dispersión molecular pero con gran variabilidad	

Tabla II.- Influencia de la atmósfera sobre el NDVI.

Vegetación densa: $\rho_1=0,1$; $\rho_2=0,5$; NDVI=0,65

Vegetación media: $\rho_1=0,2$; $\rho_2=0,4$; NDVI=0,3

Suelo: $\rho_1=0,3$; $\rho_2=0,3$; NDVI=0

En todos ellos calculamos la diferencia d entre el NDVI real y el correspondiente a la cima de la atmósfera NDVI*:

$$d = NDVI - NDVI^* = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} - \frac{\rho_2^* - \rho_1^*}{\rho_2^* + \rho_1^*} \quad (2)$$

dónde las reflectancias aparentes ρ^* se calculan a partir de la ecuación (1).

Comenzando con el efecto del vapor de agua, un ejemplo del resultado se presenta en la Figura 2 en la que se ha utilizado también la atmósfera estandar de latitudes medias en invierno. De su observación se deduce que el vapor de agua produce una disminución del NDVI, obteniéndose valores a partir de las imágenes menores que los reales ($NDVI^* < NDVI$). La influencia es mucho más importante en los casos de vegetación media y suelo que para vegetación densa. La variación de d con la geometría de observación es casi despreciable para ángulos inferiores a 50° , que son los correspondientes a las imágenes NOAA. Por otra parte, y como era de esperar, hemos obtenido que la la diferencia d aumenta con la cantidad de absorbente que resulta altamente variable en el espacio y el tiempo. En la Tabla II se presentan los rangos típicos de variación.

En lo que se refiere al ozono, produce un aumento del índice, con valores de NDVI* mayores que los reales. El comportamiento para los tres casos analizados es muy similar al del vapor de agua, con una influencia mayor para vegetación media y suelo. La variación con el ángulo de observación es también despreciable. La principal diferencia es que la variabilidad espacio temporal de la distribución de ozono no es grande, por lo que la corrección se puede suponer dependiente únicamente de la geometría. Además los valores de d son considerablemente menores que los que puede alcanzar el correspondiente al vapor de agua. Los resultados para la dispersión molecular se muestran en la Figura 3. Se produce una disminución del NDVI ahora más importante en el caso de vegetación densa. Las variaciones con el ángulo de observación son pequeñas y la corrección depende también sólo de la geometría. Para los aerosoles los resultados son similares, con importancia sobre vegetación densa y un aumento con la turbiedad o espesor óptico, que produce una importante variabilidad espacio temporal e introduce el problema de caracterizar la cantidad y el tipo de aerosol. En la Tabla II se presentan también rangos indicativos de la influencia de ambos factores.

5.- PLANTEAMIENTO DE UN ESQUEMA OPERATIVO DE CORRECCION

Del análisis realizado se desprende que, a la hora de plantear un esquema operativo de corrección atmosférica, nos encontramos con dos problemas diferentes. Se puede hablar de efectos invariables como la absorción por parte del ozono y la dispersión molecular, dependientes únicamente de la geometría, y de efectos variables o absorción del vapor de agua y dispersión de aerosoles, en los que la variación espacio temporal de los componentes responsables es grande y debe ser conocida. Por otra parte, ahora es necesario invertir la ecuación (1) para calcular ρ a partir de ρ^* y es conveniente tratar de reducir el tiempo de cálculo.

En el apartado anterior vimos como la corrección a aplicar al NDVI no depende fuertemente de la geometría, lo que facilita la reducción del tiempo de cálculo en las correcciones

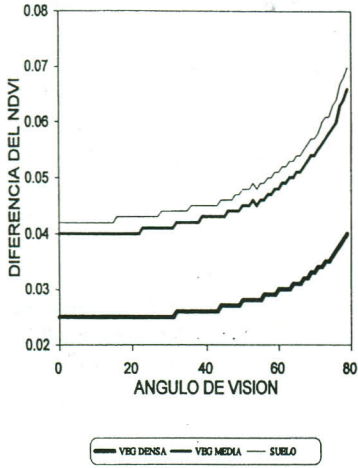


Figura 2.- Influencia de la absorción del vapor de agua sobre el NDVI. Se representa la corrección d en función del ángulo de visión para $\theta_s = 15^\circ$.

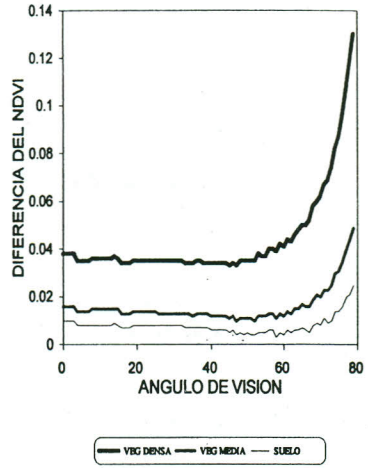


Figura 3.- Influencia de la dispersión molecular sobre el NDVI. Se representa la corrección d en función del ángulo de visión para $\theta_s = 15^\circ$.

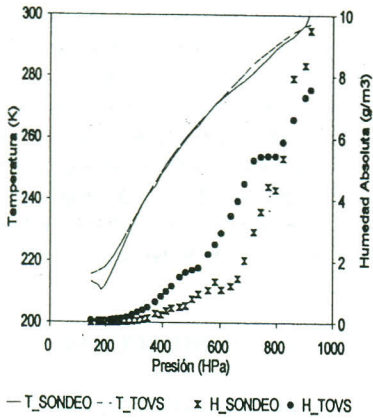


Figura 4.- Comparación entre perfiles obtenidos a partir de un radiosondeo y datos TOVS.

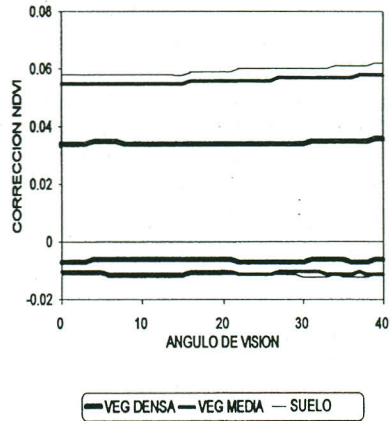


Figura 5.- Corrección del efecto del vapor de agua mediante un sondeo (parte superior) y diferencia entre los resultados obtenidos con el sondeo y datos TOVS.

constantes. Nos proponemos realizarlas mediante la elaboración de tablas que proporcionen la corrección en función de los ángulos y de las que se podrá deducir el valor a aplicar en cada pixel mediante un simple procedimiento de interpolación.

En lo que se refiere al vapor de agua, es necesario conocer los perfiles atmosféricos de temperatura y humedad, con una resolución del orden de 100 x 100 km, lo que constituye un problema importante, ya que no se dispone de estos datos medidos en tierra en redes lo suficientemente densas. Una alternativa consiste en determinar el agua precipitable a partir de la diferencia entre las temperaturas de brillo de los canales 4 y 5 (Justice et al., 1991). La segunda posibilidad, que analizaremos en el próximo apartado, la ofrece el uso de los datos de la sonda TOVS.

Finalmente, la corrección del efecto de los aerosoles constituye también un problema ya que se requiere el conocimiento de la cantidad y tipo de aerosol con una resolución espacial igual o superior a la requerida para el vapor de agua. Nos proponemos obtener esta información a partir de las propias imágenes NOAA (Kaufman and Sendra, 1988; Holben et al., 1992).

6.- CORRECCION DEL VAPOR DE AGUA A PARTIR DE DATOS TOVS

Los satélites de la serie NOAA están equipados con un sondeador atmosférico llamado TOVS (Tiros Operational Vertical Sounder) provisto de sensores con un gran número de canales infrarrojos que, aplicando los correspondientes modelos de inversión, permiten obtener los perfiles de temperatura y humedad atmosféricas. Nosotros hemos utilizado datos TOVS captados y calibrados en la Universidad de Valladolid, junto con el modelo 3I (Chedin et al., 1985), para obtener dichos perfiles.

En la Figura 4 presentamos un ejemplo en el que se compara el resultado de un sondeo realizado desde el suelo y los correspondientes perfiles deducidos de los datos TOVS. Se observa un buen acuerdo en las temperaturas. En el caso de la humedad se produce, en cambio, una importante sobreestimación por parte de los datos TOVS, debida probablemente a que se calcula únicamente la humedad relativa media en cuatro capas de la atmósfera. Este resultado se repite en el resto de los sondeos analizados.

Finalmente, en la Figura 5 presentamos los valores de la diferencia d entre los índices reales y aparentes obtenidas con el radiosondeo y , en la parte inferior el error Δd entre la corrección llevada a cabo con el sondeo y los datos TOVS para los tres tipos de superficie. El uso de perfiles TOVS conduce a un error $\Delta d/d$ que es prácticamente independiente del ángulo de observación y similar en los tres tipos de cubierta con una sobreestimación promedio del 19%. Así estos datos permiten reducir en cierta medida las imprecisiones debidas al vapor de agua. Pensamos además que los resultados se podrán mejorar con las nuevas sondas atmosféricas AMSU-A y AMSU-B planeadas para los futuros lanzamientos de los NOAA.

7.- CONCLUSIONES

En el trabajo se ha utilizado el código 5S para analizar la influencia de las condiciones atmosféricas sobre el índice de vegetación NDVI/AVHRR. Como paso previo se ha cuantificado el efecto atmosférico sobre las reflectancias de los canales 1 y 2 del radiómetro (Tabla I). Del análisis llevado a cabo se desprende que la corrección del NDVI no depende solamente del valor del índice, sino de las propias reflectancias de los canales 1 y 2, por lo que se han presentado resultados para tres tipos de superficies que denominamos de vegetación densa, vegetación media y suelo.

La absorción por el vapor de agua produce una disminución del índice que puede llegar a ser

muy importante en cubiertas de vegetación media y suelos. El ozono produce un incremento del índice también importante en ese tipo de superficies, pero con una incidencia bastante menor que la que puede tener el vapor de agua. Las dispersiones molecular y de aerosoles producen una disminución del índice mayor sobre superficies de vegetación densa. Los errores pueden ser grandes en condiciones de turbiedad alta (Tabla II).

En todos los casos se ha encontrado una influencia muy pequeña de la geometría de observación, siempre que el ángulo de visión del satélite no supere los 50°, lo que facilita la reducción del tiempo de cálculo a la hora de aplicar el código 5S en pixeles adyacentes. Para plantear un procedimiento operativo de corrección atmosférica hay que distinguir entre las correcciones constantes, únicamente dependientes de la geometría, que son la absorción del ozono y la dispersión molecular, de la absorción por vapor de agua y la dispersión de aerosoles, en las que los espesores ópticos pueden ser altamente variables espacial y temporalmente. En este caso es necesario disponer de perfiles de humedad atmosférica y de la cantidad y tipo de aerosol. Para solucionar el problema del vapor de agua se han analizado las posibilidades de uso de los sondeos calculados a partir de datos TOVS. Conducen a una sobreestimación en los valores de la corrección del orden del 19% si se comparan con los resultados obtenidos a partir un radiosondeo convencional.

Como trabajo futuro nos proponemos estimar el efecto de los aerosoles a partir de las propias imágenes y ampliar la muestra de radiosondeos y datos TOVS para delimitar la imprecisión en la corrección del vapor de agua. Todo ello nos permitiría disponer de un procedimiento operativo de corrección atmosférica del NDVI.

8.- REFERENCIAS

- Chedin, A., Scott, N. A., Wahiche, C. and Moulinier, P. 1985. The Improved Initialization Inversion method: A high resolution physical method for temperature retrievals from satellites of the TIROS-N series. *J. Climate Appl. Meteor.* **24**: 124-143.
- Holben, B. N., Kalb, J., Kaufman, Y. J., Tanré, D. and Vermote, E. 1992. Aerosol retrieval over land from AVHRR data: Application for atmospheric correction. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing.* **30**: 211-221.
- Justice, C. O., Tanré, D. and Holben, B. N. 1991. The effect of water vapour on the NDVI derived for the Sahelian Region from NOAA/AVHRR data. *Int. J. Remote Sensing.* **12**: 1165-1188.
- Kaufman, Y. J. and Sendra, C. 1988. Algorithm for atmospheric corrections of visible and near-infrared satellite imagery. *Int. J. Remote Sensing.* **9**: 1357-1381.
- Tanré, D., Deroo, C., Duhaut, P., Herman, M., Morcette, J. J., Perbos, J. and Deschamps, P. Y. 1990. Description of a computer code to simulate the satellite signal in the solar spectrum: 5S code. *Int. J. Remote Sensing.* **11**: 659-668.
- Tanré, D., Holben, B. N. and Kaufman, Y. J. 1992. Atmospheric correction algorithm for NOAA-AVHRR products: Theory and application. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing.* **30**: 231-248.