

Correzione atmosferica di immagini satellitari mediante l'impiego di proprietà ottiche degli aerosol derivate da misure *in-situ*.

Barbara Sara FERRINI (*), Ezio BOLZACCHINI (**), Alessandra CACCIARI (***), Roberto COLOMBO (****), Walter DI NICOLANTONIO (***), Francesco FAVA (****), Luca FERRERO (**), Alessandro MONDINI (*), Giovanna OBER (*), Lucia TAMPELLINI (*)

(*)Carlo Gavazzi Space Spa, Via Gallarate, 150, 20151 Milano, tel. 0238048269

(**)Università degli Studi di Milano – Bicocca, Atmospheric Research Group, Piazza della Scienza, 1, tel. 0264482814

(***)Carlo Gavazzi Space Spa @ ISAC – CNR, Via p.Gobetti, 101 – 40129 Bologna, tel 0516398097

(****)Università degli Studi di Milano - Bicocca, LTDA, Piazza della Scienza, 1, tel. 0264482819

Abstract

Le immagini satellitari acquisite da sensori operanti nei canali del visibile e del vicino infrarosso, necessitano di essere corrette a causa del contributo al segnale dovuto al particolato presente in atmosfera, soprattutto nel caso in cui si esegua un'analisi multi-temporale. I modelli attualmente disponibili per la correzione atmosferica tengono conto della caratterizzazione delle proprietà ottiche degli aerosol in atmosfera.

In particolare, nel modello 6S utilizzato in questo studio, sono stati considerati specifici modelli di aerosol, le cui proprietà ottiche sono state derivate da una caratterizzazione chimico-fisica del particolato presente in Lombardia, in aggiunta a quelli già presenti nel modello. Inoltre, il valore di *Aerosol Optical Depth* (AOD) in input al modello è stato ricavato da dati MODIS-MOD04.

Satellite images, acquired by sensors working in visible and near infrared channels, require to be corrected because of the atmospheric disturb on the measured signal due to particulate in atmosphere. Models currently available for the atmospheric correction depend on the optical properties characterization of the aerosol in atmosphere.

In the 6S model used in this study, specific aerosol models have been implemented by physically and chemically characterizing the particulate in Lombardia region, in addition to models already present. The AOD has been obtained by MODIS images.

Introduzione

La corretta valutazione del contributo dell'atmosfera al segnale misurato da un sensore satellitare è di primaria importanza, in particolare per studi multi-temporali di immagini satellitari. Le particelle di aerosol presenti in atmosfera, interagendo con la radiazione solare e terrestre, alterano le proprietà ottiche atmosferiche influenzando la radianza registrata dal sensore. Di conseguenza, in un'analisi multitemporale, in assenza di correzione atmosferica, è possibile interpretare erroneamente un diverso contributo dell'atmosfera nel tempo come una modifica nella firma spettrale della sorgente a terra.

La complessità della trattazione degli aerosol è dovuta alla varietà delle sorgenti (naturali e antropiche), alle proprietà chimico-fisiche e alla loro breve vita media in sospensione rispetto a quella tipica dei gas. Di fatto, su scala globale si registra una grande variabilità spazio temporale

delle proprietà degli aerosol (Seinfeld,1998). La metodologia proposta in questo lavoro, finalizzata alla valutazione del contributo dell'aerosol atmosferico al segnale satellitare, consiste nella caratterizzazione degli aerosol su scala locale in modo tale che la correzione atmosferica tenga conto delle proprietà ottiche tipiche del territorio oggetto di indagine e non interamente basata su modelli presi dalla letteratura.

Il modello di trasferimento radiativo (RTM) considerato è il 6S (Vermote et al,1997) che, oltre a utilizzare modelli standard di aerosol (*Urban, Continental, Biomass, Marine*), permette l'inserimento di parametri ottici definiti dall'utente.

Nella prima fase del lavoro è stata effettuata un'analisi di sensibilità del segnale corretto alla variazione dei valori di spessore ottico (AOD) ed ai modelli di aerosol già presenti nell'RTM.

Successivamente, applicando la Teoria di Mie (Seinfeld,1998), sono state calcolate le proprietà ottiche di tre nuovi modelli di aerosol tipici del Nord Italia: urbano, rurale e alpino, sulla base di analisi chimico-fisiche del particolato atmosferico campionato in differenti aree della Lombardia.

Il valore di AOD utilizzato è quello derivato dall'analisi dei dati del sensore MODIS/Terra e direttamente fornito dalla NASA via web come prodotto MODIS-MOD04.

Gli obiettivi di questo lavoro sono di integrare i modelli di aerosol disponibili nel 6S con modelli di aerosol caratteristici dell'area di studio e di integrare i valori di AOD del prodotto MODIS-MOD04 nello stesso RTM, ottenendo una affidabile correzione atmosferica che possa prescindere la necessità di ricorrere a campagne di misure al suolo.

Analisi di sensibilità

Nella prima parte del lavoro è stata effettuata l'analisi della variazione della correzione del segnale al sensore corretto rispetto ai parametri di input del 6S. Per tale analisi è stata utilizzata un'immagine ASTER acquisita in data 23 marzo 2003 sulla regione Piemonte.

I parametri considerati da definire in input al 6S sono: il modello atmosferico, il valore di spessore ottico a 550 nm e il modello di aerosol. Dapprima, mantenendo costanti i valori di spessore ottico ($AOD=0.4$) e il tipo di aerosol (*Continental*), sono stati variati i modelli atmosferici (*No absorption, Midlatitude Winter, Midlatitude Summer, US62*). I risultati ottenuti non hanno mostrato sostanziali variazioni. Di conseguenza si è applicato per le immagini acquisite in primavera ed estate il modello *MidLatitudeSummer*.

Successivamente, i quattro modelli di aerosol sono stati applicati per valori di AOD compresi tra 0.01 e 0.8 con intervalli di 0.05. Si è provato che cambiamenti significativi, ovvero superiori al 5% e tali da poter commettere errori nell'interpretazione dell'immagine, si verificano per intervalli tra valori di AOD pari a 0.2. Per operare il confronto tra le immagini in riflettanza corretta ottenute variando i parametri sono state identificate sulle immagini 9 ROI (*Region Of Interest*), di dimensioni di 3x3 pixel e rappresentative di superfici vegetate e non vegetate, e per ognuna di esse sono stati calcolati i valori medi e le relative deviazioni standard.

Per valori di $AOD \leq 0.2$ l'applicazione dei diversi modelli di aerosol permette di ottenere firme spettrali simili, come è possibile osservare dai grafici esemplificativi riportati per un suolo nudo (*Figura 1*), mentre le differenze aumentano al crescere dell'AOD.

Sono stati quindi introdotti nuovi modelli di aerosol derivati dai campionamenti effettuati nel territorio lombardo, applicabili in ambito urbano, rurale e remoto. Le percentuali delle classi *dust*, *water soluble*, *oceanic* e *soot* sono state definite, per ogni tipologia di modello di aerosol, a partire dalla caratterizzazione chimica del particolato atmosferico relativo ai siti di Milano per la caratterizzazione di aerosol urbano, Ispra per la caratterizzazione dell'aerosol rurale e Alpe S. Colombano per la caratterizzazione dell'aerosol remoto. Valori di EC (*Elemental Carbon*), OC (*Organic Carbon*), componente ionica inorganica e concentrazione elementare, sono stati utilizzati per definire le percentuali di ogni classe per ciascun modello di aerosol (Putaud, 2004). In particolare si è identificata la classe *soot* con il contenuto percentuale in EC del particolato atmosferico, la classe *dust* è stata ricavata a partire dall'analisi degli elementi Al, Si, Fe e Ca, mentre la classe *oceanic* viene identificata da elevate concentrazioni di NaCl; per quanto riguarda la

classe *water soluble* essa raggruppa la restante porzione del particolato atmosferico costituita principalmente da SO_4^{2-} , NO_3^- , NH_4^+ e OC.

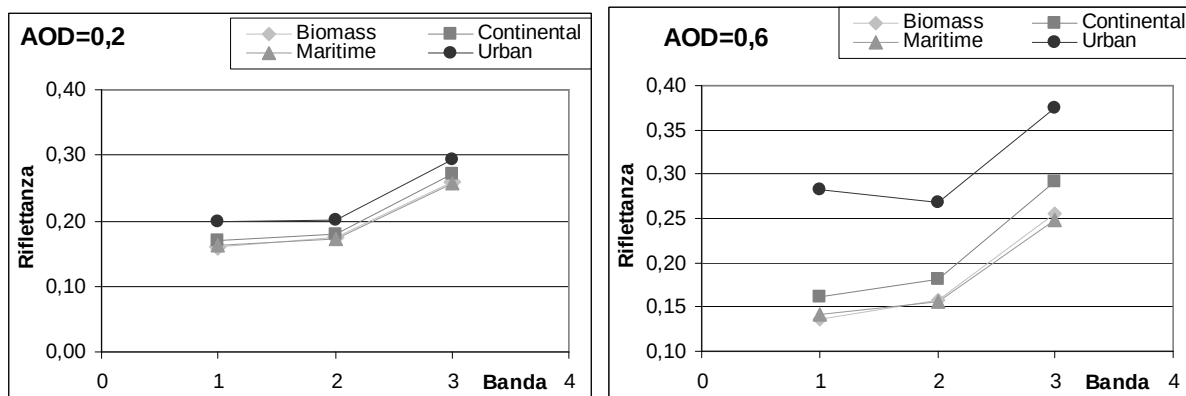


Figura 1 – Firma spettrale di un suolo nudo, ottenuta per $\text{AOD}=0,2$ e $\text{AOD}=0,6$, applicando i quattro modelli di aerosol disponibili nel 6S (Banda 1 = $0,52 - 0,60 \mu\text{m}$; Banda 2 = $0,63 - 0,69 \mu\text{m}$; Banda 3 = $0,76 - 0,8 \mu\text{m}$).

Confronto AERONET-MODIS

Parallelamente è stato effettuato un confronto tra i valori di AOD ricavati dal prodotto MODIS-MOD04 e i valori di AOD misurati dalla rete AERONET sul sito di Ispra.

La procedura seguita è la seguente:

1. Sono stati scaricati da internet (<http://aeronet.gsfc.nasa.gov>) i dati di Aeronet, relativi al sito di Ispra, da aprile 2005 a settembre 2006;
2. Sono state scaricate le immagini MODIS-MOD04 (<http://ladsweb.nascom.nasa.gov/index.html>) relative alle giornate corrispondenti alle date in cui le serie di dati Aeronet erano disponibili;
3. Su ogni immagine MODIS è stato individuato il pixel corrispondente al sito di Ispra ed è stato considerato il valore di AOD(550nm);
4. Per i dati Aeronet, non essendo disponibili i dati a 550nm, sono stati ricavati tali valori tramite il calcolo (http://aeronet.gsfc.nasa.gov/V2/climo_new/explain/explain_new.html) del coefficiente di Angstrom. Inoltre, non essendo sempre disponibili i dati all'orario di passaggio del satellite, si è ipotizzato che tra due orari successivi la variazione del parametro AOD sia lineare e si è ricavato il valore all'ora esatta tramite regressioni lineari.

Lo *scatter plot* (Figura 2) tra i valori ricavati da MODIS e AERONET mostra una buona correlazione tra i dati, data da un $R^2=0.869$ ed il grafico associato indica che l'andamento dell'AOD (τ) è simile nel tempo e che il valore ottenuto da AERONET ricade sempre all'interno della barra di errore di MODIS ($\Delta\tau=\pm 0,05\pm 0,2*\tau$). Tale variabilità, in base all'analisi di sensibilità effettuata, è risultata essere ininfluente rispetto ai valori corretti.

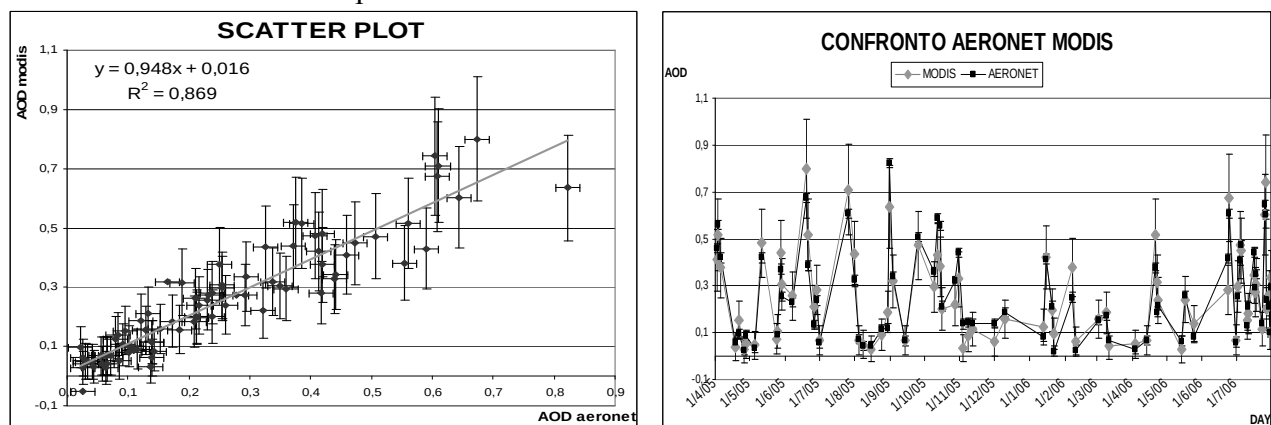


Figura 2 – Scatter plot tra i valori di MODIS ed AERONET nel periodo aprile 2005 – agosto 2006 e relativo confronto degli andamenti nel tempo.

Correzione con nuovi modelli - metodo

L'immagine ASTER utilizzata nel processo di correzione atmosferica è stata acquisita il 31 agosto 2006 sulla Regione Lombardia e comprende l'area di Milano.

La correzione atmosferica è stata applicata ad una parte dell'immagine complessiva, comprendente l'area tra i comuni di Bresso e Cinisello Balsamo ed avente estensione 7x7 Km².

I parametri in input nel 6S sono stati definiti ricavando le caratteristiche geometriche del sensore e il valore di AOD dall'immagine *MODIS* acquisita in contemporanea all'immagine *ASTER* ed in particolare il valore di AOD in input è 0.176. La quota a cui si trova il sensore è impostata a 1000 Km e la quota media del suolo, impostata a 150m, corrisponde alla quota media dell'area..

Dal momento che l'area di studio ricade all'interno dell'area di influenza del comune di Milano, i modelli di aerosol applicati sono tre modelli di Aerosol Urbano, quello predefinito nel 6S (Urb6S), quello appositamente creato dall'analisi chimica del particolato (Urb) e un modello presente in letteratura (UrbL) (Levoni et al,1997).

Correzione con nuovi modelli – risultati e validazione

Al fine di valutare i miglioramenti apportati alla correzione atmosferica dell'immagine dall'applicazione di modelli di aerosol definiti *ad hoc* per l'area di studio, è stato attuato un confronto tra le firme in riflettanza estratte dalle immagini ASTER e le firme spettrali acquisite a terra mediante lo spettrometro *ASD Fieldspec HH* (Analytical Spectral Devices, Inc.).

Le firme sono state acquisite nel corso della campagna di misura, in data 31 agosto 2006, in contemporanea al passaggio del satellite, su aree omogenee (90x90m, 3x3 pixel ASTER) di differenti superfici: filato di polipropilene (erba sintetica), suolo nudo, vegetazione erbacea, frumento. In ogni area omogenea sono state eseguite cinque misure di riflettanza spostandosi dal centro lungo le quattro direzioni cardinali; successivamente questi valori sono stati mediati in modo da ottenere un unico dato spettrale di riferimento per ciascuna tipologia di superficie.

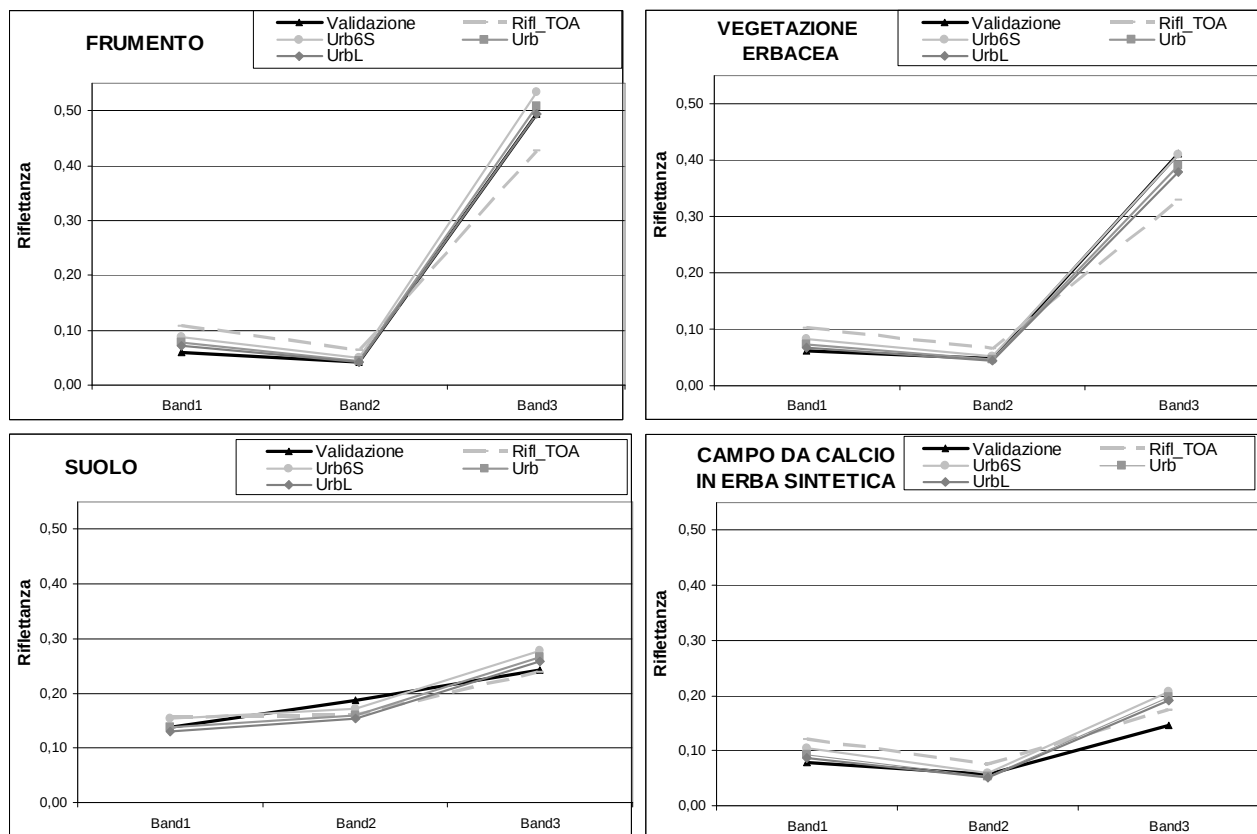


Figura 3 –Confronto tra le firme spettrali delle superfici omogenee ottenute mediante l'applicazione dei diversi modelli di aerosol, le firme al suolo ed il segnale al top dell'atmosfera.

Le firme acquisite a terra sono state ricampionate sulle bande ASTER mediante il *Tool Spectral Library Resampling* di ENVI e sono state poi confrontate con le firme estratte dalle immagini ASTER in corrispondenza delle aree omogenee, per i singoli modelli di aerosol applicati e per l'immagine corretta al top dell'atmosfera (Rifl_TOA) (Figura 3).

Il confronto tra le firme è stato effettuato mediante l'applicazione di due indici statistici: il MAD (*Mean Absolute Deviation*) e l'MSE (*Mean Squared Error*) (de Barreto et al, 2000).

I valori ottenuti sono visualizzati nei grafici di Figura 4.

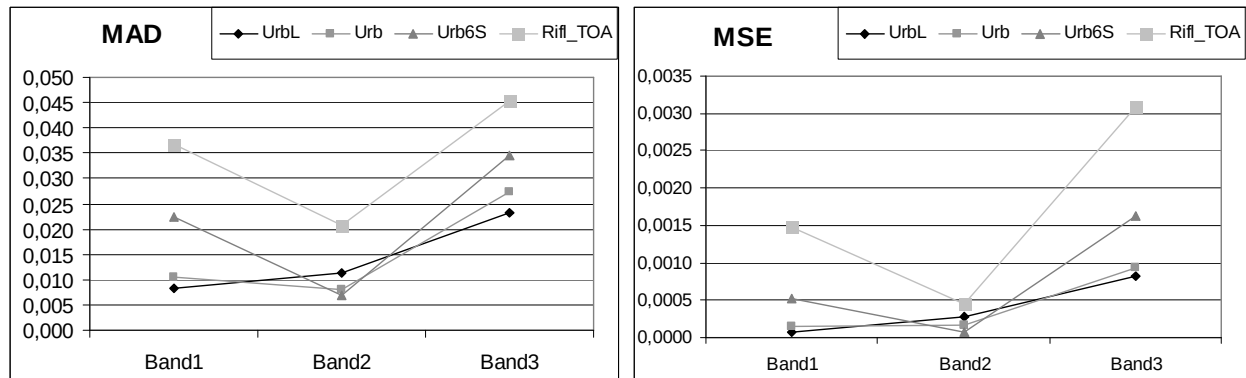


Figura 4 – Rappresentazione grafica degli errori medi per banda e calcolati per ogni modello.

I grafici mostrano che l'errore associato alle firme spettrali non corrette (Rifl_TOA) è sempre molto maggiore rispetto a quello del segnale corretto, in particolare per le bande del verde (Band1) e dell'infrarosso (Band3). Tra i tre modelli di aerosol applicati è verificato che quello predefinito nel 6S ha un errore maggiore rispetto agli altri due, che hanno un errore minore ma simile.

La bontà della correzione ottenuta è stata verificata ulteriormente mediante il calcolo delle differenze assolute tra l'indice di vegetazione NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) calcolato per la firma di validazione e per le riflettanze corrette.

Le differenze assolute per le superfici a copertura erbacea e a frumento per singolo modello sono rappresentate in Figura 5 e mostrano che l'errore associato alla mancata correzione atmosferica dell'immagine è almeno 10 volte maggiore rispetto a quello delle immagini corrette e tra i modelli utilizzati quelli appositamente definiti risultano essere molto più precisi del modello predefinito.

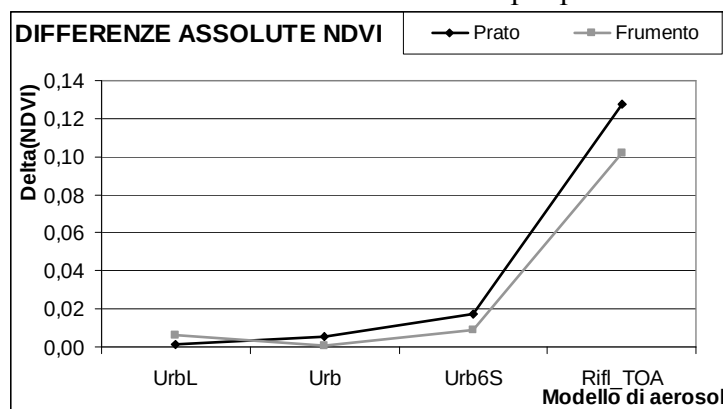


Figura 5 - Differenze assolute di NDVI per superfici vegetate

Conclusioni e sviluppi futuri.

La buona correlazione tra l'AOD fornito dal prodotto MODIS- MOD04 e dalla rete AERONET nonché la soddisfacente correzione atmosferica ottenuta, dimostrano come sia possibile utilizzare i dati MOD04 come input nel 6S. E' stato inoltre dimostrato, tramite confronto con le firme di validazione a terra, che l'utilizzo di modelli di aerosol caratteristici dell'area di studio hanno contribuito ulteriormente alla qualità della correzione in condizioni di AOD basso.

Sviluppi futuri prevedono la verifica dell'applicabilità del metodo anche per valori di AOD superiori e l'integrazione nel 6S di modelli atmosferici definiti a partire dalla distribuzione dimensionale del particolato atmosferico.

Ringraziamenti

Si ringrazia il P.I. del sito AERONET di Ispra per aver reso disponibili i dati relativi all'AOD utilizzati nel lavoro.

Si ringraziano i P.I. dello IES del JRC per aver fornito le analisi chimiche del particolato per il sito di Ispra.

Si ringrazia Claudia Notarnicola (Carlo Gavazzi Space, Milano) per i validi suggerimenti tecnici.

Bibliografia

Michael Abrams, Simon Hook "ASTER User Handbook" Jet Propulsion Laboratory/California Institute of Technology.

Charles Ichoku, D. Allen Chu, et al. "A spatio-temporal approach for global validation and analysis of MODIS aerosol products" Geophysical Research Letters.

Putaud J.P. et al. (2004) "A European aerosol phenomenology – 2: chemical characteristics of particulate matter at kerbside, urban, rural and background sites in Europe", Atmospheric Environment, 38

Levoni C, Cervino M, Guzzi R., Torricella F. (1997) "Atmospheric aerosol optical properties: a database of radiative characteristics for different components and classes" Applied optics.

Seinfeld J.H., Pandis S.N., (1998) "Atmospheric Chemistry and Physics", Wiley – Interscience publication.

Putaud J.P. et al. (2004) "A European aerosol phenomenology – 2: chemical characteristics of particulate matter at kerbside, urban, rural and background sites in Europe", Atmospheric Environment, 38.

S. N. Tripathi, Sagnik Dey, et al (2005) "Comparison of MODIS and AERONET derived aerosol optical depth over the Ganga Basin, India" Annales Geophysicae.

Vermote E., Tanrè D. et al (1997) "Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum (6S) – User Guide, Version 2"

Vermote E., Tanrè D. et al (1997) "Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum, 6S: an Overview" IEEE Transactions On Geoscience And Remote Sensing, Vol 35

Guilherme de A. Barreto, Marinho G. de Andrade "Bayesian Inference and Markov Chain Monte Carlo Methods Applied to Streamflow Forecasting" Proc. 6th Intl. Conf. on Probabilistic Methods Applied to Power Systems (PMAPS), Funchal, vol. 2, FOR-034, 2000.

http://modis-atmos.gsfc.nasa.gov/MOD04_L2/index.html