

## **Telerilevamento HR multispettrale/LIDAR e modellistica SVAT 3D per la stima del bilancio energetico in ambiente urbano**

Flavio Borfecchia (\*), Luigi De Cecco (\*), Maurizio Pollino (\*),  
Sandro Martini (\*), Luigi La Porta (\*), Michele Zinzi (\*\*), Emiliano Carnielo (\*\*\*)

(\*) ENEA, Unità Tecnica Modellistica Energetica ed Ambientale (UTMEA), Laboratorio Analisi e Osservazione del sistema Terra (TER)

(\*\*) ENEA, Unità Tecnica Efficienza Energetica (UTEE-ERT)

(\*\*\*) Università degli Studi Roma Tre

Centro Ricerche Casaccia, Via Anguillarese 301, 00123 Roma  
Tel. 06.3048.6042, Fax 06.3048.3362, flavio.borfecchia@enea.it

### **Riassunto**

Le grandi città, collocate nelle zone meteo-climatiche calde, come quella del bacino del Mediterraneo, a causa dei cambiamenti climatici sono sempre più soggette a fenomeni legati all'aumento di temperatura rispetto ai dintorni rurali, meglio noti come isole di calore (*Urban Heat Island*), rilevanti specialmente nelle loro aree centrali più dense ed antropizzate. Attualmente più del 50% della popolazione mondiale vive in agglomerati urbani che crescendo, spesso senza appropriata pianificazione, aumentano le loro infrastrutture, con notevoli cambiamenti nel *land cover/use* e conseguenti apprezzabili modificazioni nei parametri biofisici relativi al bilancio radiativo, al ciclo idrologico ed al microclima. Il conseguente impatto sui consumi energetici e sulla qualità dell'ambiente urbano in termini di salubrità e confort costituisce uno dei problemi più gravi che impegna le amministrazioni per la messa a punto di strategie di mitigazione dei fenomeni che, per poter essere efficaci, necessitano d'informazioni aggiornate ed a scale spazio-temporali adeguate alle quali le più recenti tecniche di osservazione aerospaziale basate su piattaforme satellitari ed aeree possono dare un contributo rilevante. In quest'ottica, l'attività qui descritta consiste pertanto nello sviluppo di metodologie integrate per il monitoraggio di parametri strutturali, climatologici e di qualità dell'ambiente urbano tramite dati di osservazione aerospaziale della terra, modellistica e rilievi in sito. In particolare, l'obiettivo è quello di supportare la caratterizzazione dei consumi energetici e di fenomeni attinenti all'inquinamento atmosferico ed all'isola di calore (UHI), legati anche all'impatto delle attività antropiche ed ai cambiamenti climatici. Un aspetto rilevante della ricerca riguarda il supporto alla sperimentazione condotta dal settore energetico dell'ENEA e connessa all'introduzione nel contesto urbano di materiali strutturali e di copertura innovativi (*cool material*) dalle caratteristiche adatte a massimizzare il potere di riflessione della radiazione solare delle superfici nella prospettiva di mitigare i fenomeni suddetti. Le metodologie proposte, basate su tecniche di image processing e GIS, prevedono l'uso integrato di dati provenienti da rilievi LiDAR, unitamente a riprese multi/iperspettrali satellitari ed aeree ad alta risoluzione spaziale (HR), per la caratterizzazione geometrica 3D e tipologica di un ambiente urbano a scala di dettaglio (risoluzione ~1-10 m.) nelle sue componenti di tipo infrastrutturale, della vegetazione e del suolo. Tali risultati sono poi utilizzati per la configurazione semiautomatica degli input ad un modello di tipo SVAT (*Soil Vegetation Atmosphere Transfer*) 3D che ha consentito di simulare le distribuzioni spaziali a scala locale con le relative dinamiche temporale delle varie variabili d'interesse su aree del comune di Avellino e Roma a partire dai valori di alcuni parametri atmosferici iniziali, della locazione geografica e del periodo dell'anno.

## Introduzione

Il tessuto urbano, rispetto alle aree rurali, è caratterizzato da una più alta eterogeneità dovuta alla presenza d'infrastrutture e materiali aventi caratteristiche termiche e di riflettanza notevolmente variabili la cui discriminazione estensiva richiede sovente tecniche di telerilevamento ad elevato livello di dettaglio. In questo contesto, le più recenti tecniche di osservazione aerospaziale multispettrale ad alta risoluzione a terra basate su piattaforme satellitari ed aeree possono dare un contributo rilevante a tali esigenze ma devono essere integrate da modellistica adeguata per sopperire alle necessità d'informazioni sulla dinamica temporale dei fenomeni legata alle interazioni che coinvolgono il suolo e l'atmosfera. Tipicamente infatti tali piattaforme satellitari sono collocate in orbita polare con periodi tipici di rivisitazione, alle nostre latitudini, di giorni, e quindi non in grado di permettere l'acquisizione di dati capaci di supportare un monitoraggio efficace della dinamica temporale dei fenomeni di scambio di calore ed acqua tra suolo ed atmosfera che governano il microclima urbano, la cui evoluzione si basa su cicli diurni (Figura 1), con tempi caratteristici inferiori all'ora.

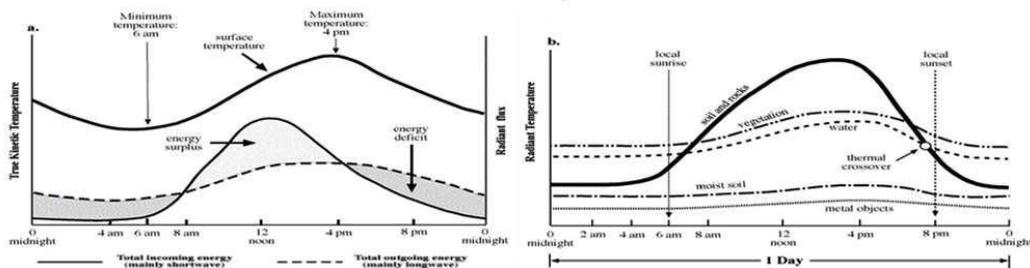


Figura 1 – Cicli giornalieri di flussi energetici (a sinistra) e temperature (a destra) nella vegetazione e nei vari materiali ed infrastrutture.

I dati satellitari sono rilevati tipicamente con varie periodicità da sensori su piattaforme in orbita polare o geostazionaria. I sensori in orbita polare, collocati mediamente a 400-800 Km dalla superficie terrestre, sono basati prevalentemente su sistemi passivi od attivi di acquisizione dei segnali elettromagnetici di risposta dalla superficie terrestre ed hanno caratteristiche spettrali, di risoluzione radiometrica e spaziale di maggior interesse in questo contesto. La loro periodicità di ripresa dipende in prevalenza dalla risoluzione spaziale e dalla copertura della frame ma anche dalla loro capacità di orientamento “in flight” del sensore verso l’area target anche da orbite diverse, in ogni caso i valori minimi non scendono al di sotto di 0,5-3 giorni. Le risoluzioni spaziali variano da valori submetrici a vari Km, mentre le bande di acquisizione, per quanto attiene i sistemi multi/iperspettrali passivi, notevolmente diffusi, si distribuiscono negli intervalli dal visibile, al NIR (Near InfraRed) e SWIR (Short Wave InfraRed) sino al TIR (Thermal Infra Red) e risultano utili per la caratterizzazione dei materiali e della vegetazione anche dal punto di vista del bilancio energetico e termico, alla base della modellistica SVAT. I modelli SVAT sono rappresentazioni matematiche dei vari meccanismi fisici interagenti che controllano i trasferimenti di energia e di massa tra suolo vegetazione ed atmosfera ( bilanci radiativo e idrico) utilizzate sotto forma di codici informatici per simulazioni deterministiche degli andamenti temporali delle variabili di stato d’interesse relative ai tre mezzi a scale temporali compatibili con quelle dei vari processi, tipicamente quelli atmosferici, che in genere risultano maggiormente dinamici.

## Materiali e metodi

Specialmente nelle aree urbane la grande varietà di superfici differenti e delle infrastrutture può produrre una varietà di distinti sistemi microclimatici. Per simulare convenientemente questi tipici effetti locali (i.e. effetto canyon) è necessario considerare non solo gli schemi di interazione a

microscala superficie-pianta-aria ma si deve tener conto adeguatamente anche delle infrastrutture presenti che giocano un ruolo rilevante negli scambi e nelle resistenze aerodinamiche al flusso d'aria all'interno del tessuto urbano dove i meccanismi di feedback tridimensionale tra vegetazione lungo i viali e le superfici artificiali possono avere un peso significativo. In quest'ottica non solo risulta importante la caratterizzazione radiometrica delle infrastrutture ma anche la stima adeguata dei loro parametri geometrici tridimensionali relativi sia all'estensione delle superfici interagenti che agli ostacoli che determinano i flussi turbolenti di aria all'interno del "urban canopy". Per queste esigenze, è stato utilizzato il modello SVAT 3D non-idrostatico ENVI-met<sup>1</sup> (Bruse & Fleer, 1998), che, tramite i metodi di discretizzazione spaziale e temporale CFD (*Computational Fluid Dynamics*), è in grado di simulare i flussi di vapore e calore tenendo conto degli ostacoli tridimensionali rappresentati sia dalle infrastrutture artificiali che dalla vegetazione, caratterizzata anche dai parametri specifici di densità fogliare e capacità di evapo-traspirazione (stomi). Il codice è in grado di trattare adeguatamente anche le interazioni che coinvolgono i suoli tenendo conto delle specifiche caratteristiche radiative, termiche ed idrauliche. Le sue simulazioni permettono di stimare le distribuzioni delle variabili di stato specifiche relative alla vegetazione, al suolo ed all'atmosfera dell'area d'interesse nonché il loro andamento temporale, tipicamente giornaliero. In aggiunta il codice ENVI-met prevede la valutazione di mappe tematiche analoghe relative alla diffusione d'inquinanti (particelle o gas) o a parametri legati al confort umano. Le simulazioni del codice ENVI-met si basano sulle distribuzioni delle infrastrutture artificiali, della vegetazione e dei suoli nell'area d'interesse, opportunamente discretizzata (sino ad un massimo di 256x 256 pixel), ottenute manualmente tramite un apposito editor. Per gli edifici ed infrastrutture a differente altezza sono previsti parametri radiometrici e termici a livello dell'intera area, mentre per la vegetazione sono selezionabili diverse tipologie sulla base di un data-base aggiornabile di corredo al codice. E' prevista anche la selezione interattiva dei diversi suoli in termini di profili stratigrafici (sino a 14 strati) da un data-base alfanumerico aggiornabile da parte dell'utente. Negli scambi di calore ed acqua tra suolo ed atmosfera a livello di superficie terrestre la vegetazione riveste un'importanza rilevante in quanto grazie alle sue capacità di evapotraspirazione determina la ripartizione locale tra i flussi di calore sensibile e latente sulla base dei processi di turbolenza determinati anche dalla sua struttura tridimensionale. Tenendo conto quindi dell'importanza di disporre preventivamente delle distribuzioni della vegetazione e dei differenti materiali nonché della loro tipologia e configurazione geometrica tridimensionale ad idonee risoluzioni ed accuratezza per supportare adeguatamente la modellistica SVAT 3D a microscala di ENVI-met, sono stati implementati vari metodi per utilizzare differenti dati telerilevati da satellite

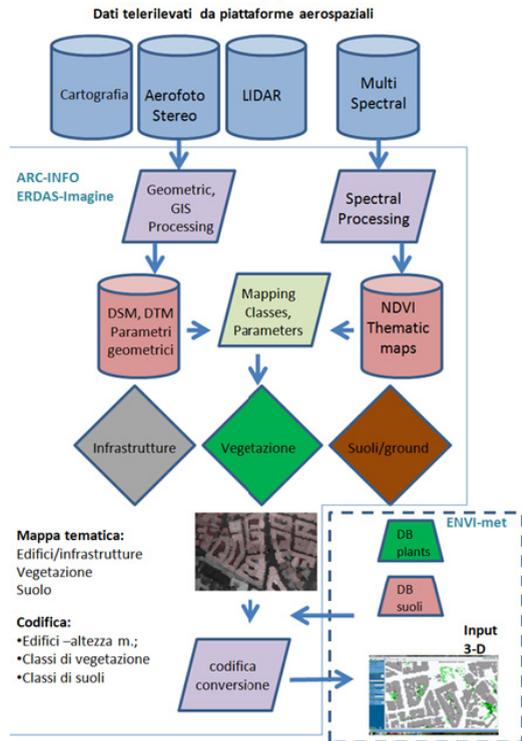


Figura 2 – Schema generale della metodologia sviluppata per la generazione semiautomatica della mappa di input al codice ENVI-met da dati telerilevati e cartografia.

<sup>1</sup> ENVI-met è un software freeware, scaricabile - previa registrazione - al seguente link: <http://www.envi-met.com/>

ed aereo al fine di produrre in modo semiautomatico tali informazioni complementari in formato opportuno tramite una metodologia appositamente sviluppata che s'interfaccia alle basi-dati di suoli e vegetazione presenti nel codice (Figura 2). Tale metodologia prevede elaborazioni specifiche con differenti strumenti (principalmente in ambiente ERDAS Imagine ed ESRI ArcGIS) per ricavare sia i parametri geometrici che tipologici delle classi di suoli, vegetazione ed edifici/infrastrutture dopo una loro preventiva discriminazione. Tali informazioni dopo un'opportuna codifica sono elaborate da un software appositamente sviluppato al fine di generare mappe tematiche secondo il formato previsto per l'input al codice ENVI-met. Le mappe così ottenute sono state utilizzate per condurre simulazioni in aree dei comuni di Roma ed Avellino su base giornaliera in coincidenza ad eventuali riprese satellitari/aeree e/o fenomeni climatici d'interesse. Al fine di testare il metodo alla massima risoluzione su aree sufficientemente grandi ma compatibili con i requisiti generali indicati per il codice (1÷10 m<sup>2</sup> di risoluzione) per questo lavoro sono state selezionate zone di circa 1 Km<sup>2</sup>. rappresentative di tipologie edilizie localmente diffuse e/o d'interesse per le sperimentazioni sui *cool material* suddetti.

Per la caratterizzazione della vegetazione, oltre alla sua distribuzione, in questo contesto, assume rilevanza la discriminazione delle diverse specie/tipologie alle quali sono legati i parametri che regolano le interazioni con l'atmosfera ed il suolo quali ad esempio il LAI (*Leaf Area Index*) od il LAD (*Leaf Area Density*). Tenendo conto degli aspetti peculiari che presentano le misure di riflettanza nell'infrarosso vicino (NIR) e nel rosso (RED) della vegetazione fotosintetica, varie loro combinazioni algebriche sono diffusamente utilizzate operativamente sotto forma di indici spettrali per la stima estensiva dei relativi parametri biofisici, a partire dalle immagini telerilevate multispettrali. Tra i vari indici utilizzati per avere informazioni riguardanti la distribuzione spaziale della vegetazione ed il suo monitoraggio, quello più comunemente usato è il *Normalized Difference Vegetation Index* NDVI:

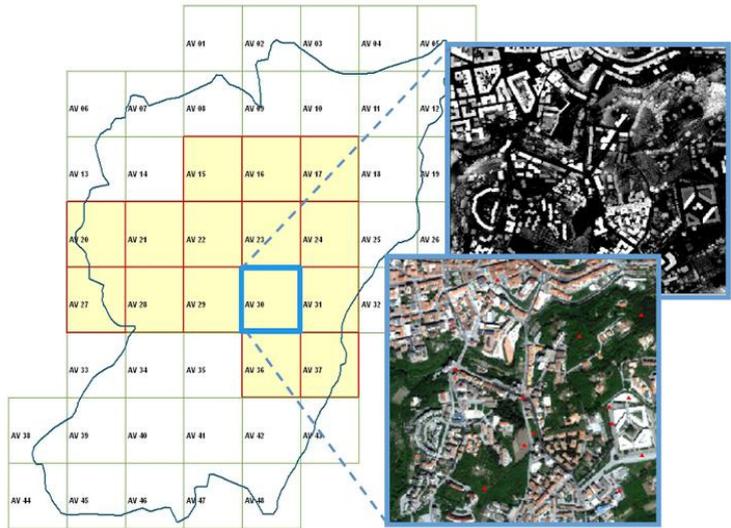
$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad [1]$$

Esso si basa sulla combinazione di bande spettrali (quella del rosso-RED e dell'infrarosso-NIR). Essendo tutte le piante caratterizzate da un'alta riflettanza nel NIR e bassa nel RED (per l'assorbimento fotosintetico), tale indice normalizzato (con variabilità tra -1 ed 1) non solo risulta proporzionale, con buona approssimazione, a vari parametri biofisici della pianta, tra cui il LAI/LAD, ma permette anche di minimizzare gli eventuali effetti di rumore introdotti dall'atmosfera e dal suolo. Su queste basi, considerando che tipicamente la maggior parte di sensori per telerilevamento aerospaziale ad alta risoluzione spaziale d'interesse per queste applicazioni in ambito urbano dispone di bande di acquisizione nel visibile e NIR per la mappatura della vegetazione attraverso questo indice è stato utilizzata una soglia inferiore per l'NDVI posta a valori positivi all'incirca maggiori del 10%. Per la discriminazione successiva delle varie tipologie vegetali è stata quindi implementata e messa a punto una procedura integrata basata sia sui valori di NDVI compresi nella soglia sia sui risultati di procedure semiautomatiche di classificazione multispettrale di tipo hard o soft. La prima è stata impiegata per dati multispettrali con risoluzione paragonabile a quella adottata nel modello (~ 4 m) ENVI-met, mentre la seconda, assimilabile con la SMA (*Spectral Mixture Analysis*), è stata prevista e testata su dati multispettrali ETM+ con risoluzione meno dettagliata (da 10 a 50 m). Metodologie analoghe sono state utilizzate per la stima delle distribuzioni dei vari materiali e superfici di tipo naturale od artificiale presenti nell'area d'interesse. Per la stima dei parametri geometrici della vegetazione e delle infrastrutture sono state implementate due procedure basate sull'elaborazione di aerofoto stereo e cartografia vettoriale 2D tramite tecniche fotogrammetriche digitali e LIDAR. Da rilievi Landsat ETM+ effettuati nella banda termica (10.4-12.5 μ) debitamente corretti per gli effetti atmosferici è stata, infine, dedotta una mappa termografica di temperatura superficiale tenendo conto delle differenti emissività ed utilizzata per operazioni di validazione delle distribuzioni simulate tramite ENVI-met.

## Casi di Studio

### Avellino

Per la caratterizzazione preventiva dell'area del comune di Avellino (Figura 3) scelta per i test di simulazione con il codice ENVI-met, le metodologie sviluppate si basano sull'uso integrato di rilievi di tipo LIDAR precedentemente acquisiti e dati multispettrali satellitari *QuickBird* (4 bande: RGB NIR; 2,5 m risoluzione a terra). Il rilievo LIDAR è stato effettuato nel 2007 da elicottero tramite una apparecchiatura Optech ALTM 3100



multimpulso sull'intero comune di Avellino con un'accuratezza di 4 punti/m<sup>2</sup> ed un piano di volo adeguato ad ottimizzare la restituzione tridimensionale degli edifici nelle aree urbanizzate. Da questi

rilievi sono stati estratti tramite metodi appositamente calibrati sulle aree d'interesse sia il DEM (*Digital Elevation Model*) del suolo sia le altimetrie in corrispondenza degli edifici (DSM, *Digital Surface Model*) ad adeguata risoluzione. Da questi è stato poi possibile derivare estensivamente le altezze e le planimetrie vettoriali per ogni singolo edificio. Tramite procedure di filtraggio morfologico e dimensionale sulla base delle sue risposte multiple sono state inoltre ottenute la distribuzione e caratterizzazione morfologica 3D della vegetazione nell'area d'interesse. I rilievi multispettrali satellitari *QuickBird* sono stati utilizzati per la produzione di mappe tematiche di NDVI e relative alle tipologie di coperture (strade/vie) dell'urbanizzato e della vegetazione (Figura 4) con le metodologie di classificazione precedentemente citate. Le simulazioni con ENVI-met sono state effettuate per il giorno 21 giugno 2007, in coincidenza con l'acquisizione *QuickBird*, a partire dalle ore 6.00 sino alle 18.00, sulla base di dati meteo di temperature, umidità e campo di vento rilevati da stazioni meteo cittadine dell'area con altezza media a circa 300 m sul livello del mare.

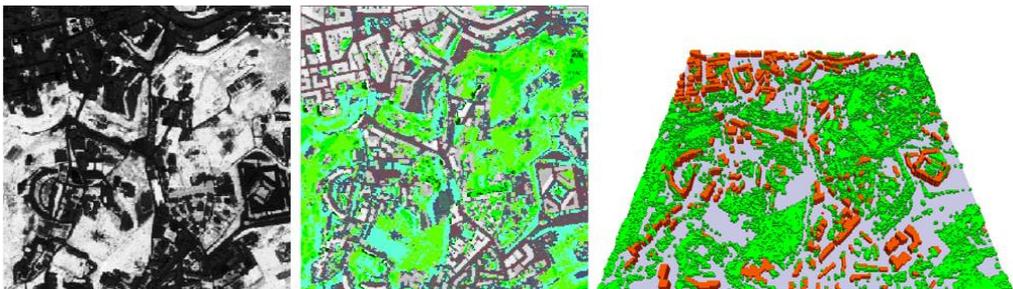


Figura 4 – Mappa NDVI (a sin.) e mappa tematica (al centro) codificata con 4 classi di vegetazione in verde, 2 classi di suoli (tonalità scure) ed edifici con altezze (tonalità di grigio). A destra, input 3D ENVI-met con edifici/infrastrutture (arancione/marrone) vegetazione e suoli (grigio).

Per la discretizzazione spaziale l'area d'interesse di circa 1Km<sup>2</sup> (riquadrate in azzurro in Figura 3) è stata divisa in 222x 232 pixel orizzontali di 4 m e 33 verticali di 6 m. Le temperature superficiali simulate come si vede (Figura 5) sono notevolmente influenzate dalla presenza della vegetazione con differenze medie tra le superfici vegetate e non di circa 7-9 °C nelle ore centrali della giornata corrispondenti a massimi di oltre 36 °C in corrispondenza di aree di asfalto assolate nei pressi delle infrastrutture a cui sono associati valori unici dei parametri (scambio, coibentazione, albedo, remissività, ecc.) in questa versione del software. In queste aree, come si vede in Figura 6, la temperatura radiante dell'aria simulata ad un metro dal suolo può risultare più alta di anche di decine di °C mentre la diminuzione di calore sensibile rilasciato da parte della vegetazione (Figura 6) mantiene le aree alberate a temperature sensibilmente più basse. In Figura 7 è riportata la distribuzione dell'umidità relativa alla sezione verticale indicata con linea tratteggiata bianca in Figura 6. L'andamento temporale delle temperature superficiali e dell'aria ad 1 m di altezza derivanti dalle simulazioni nei punti corrispondenti a differenti tipologie di copertura indicati in Figura 3 è stato riportato nei grafici di Figura 8. I valori simulati per la temperatura superficiale sono confrontabili con quelli medi registrati dalla vicina stazione di meteo di Montella della rete meteo regionale in quella data. Sempre in Figura 8 si nota anche come l'effetto schermante delle strutture tridimensionali influisce sull'andamento delle temperature superficiali della vegetazione e del suolo (curve meno regolari).

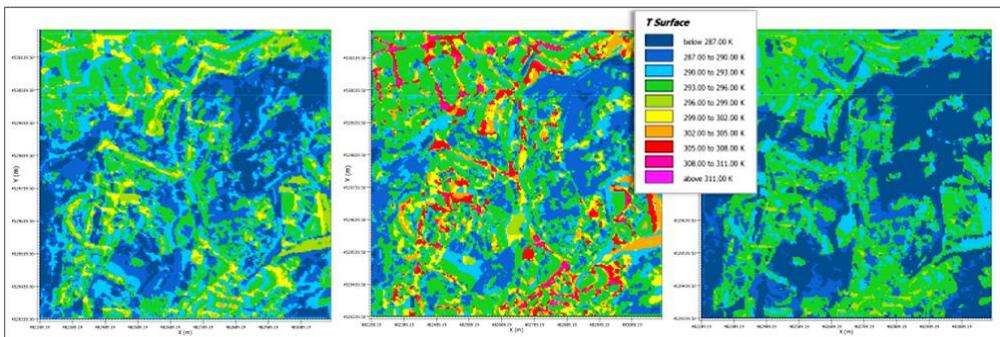


Figura 5 – Mappe di distribuzione della temperatura superficiale (K) del 21-6-2007 alle ore 9.00 (a sinistra), 11.00 (al centro) e 18.00 (a destra) ottenute da ENVI-met.

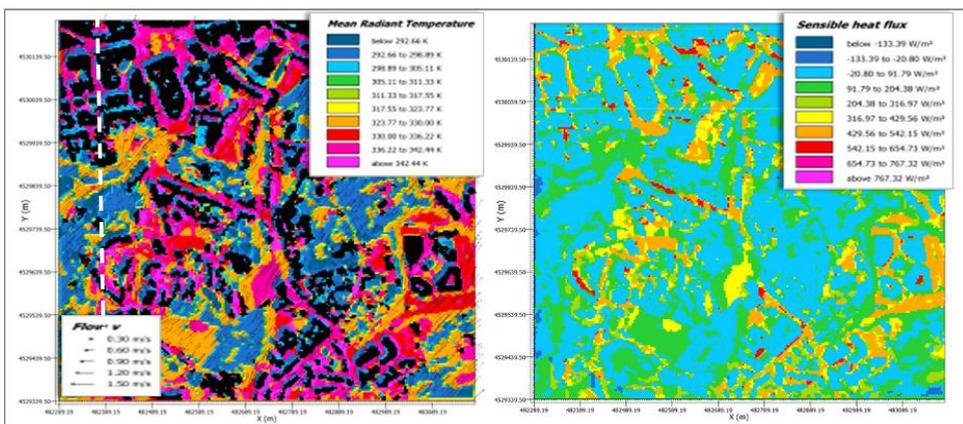


Figura 6 – Mappe di distribuzione della temperatura di radianza dell'aria ad 1 m da terra (sezione verticale in tratteggiato bianco, edifici/infrastrutture in nero e flow vettoriale in overlay a sinistra) e flusso di calore sensibile (destra) del 21-4-2007 alle ore 11.00 ottenute da ENVI-met.

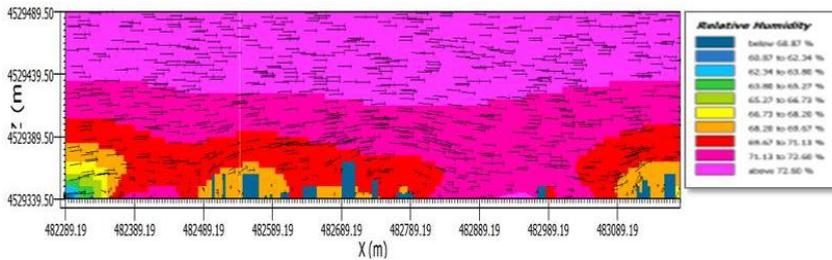


Figura 7 – Distribuzione verticale dell'umidità ed air flow alle ore 11.00 in corrispondenza della sezione indicata in Figura 6 ottenuta da ENVI-met.

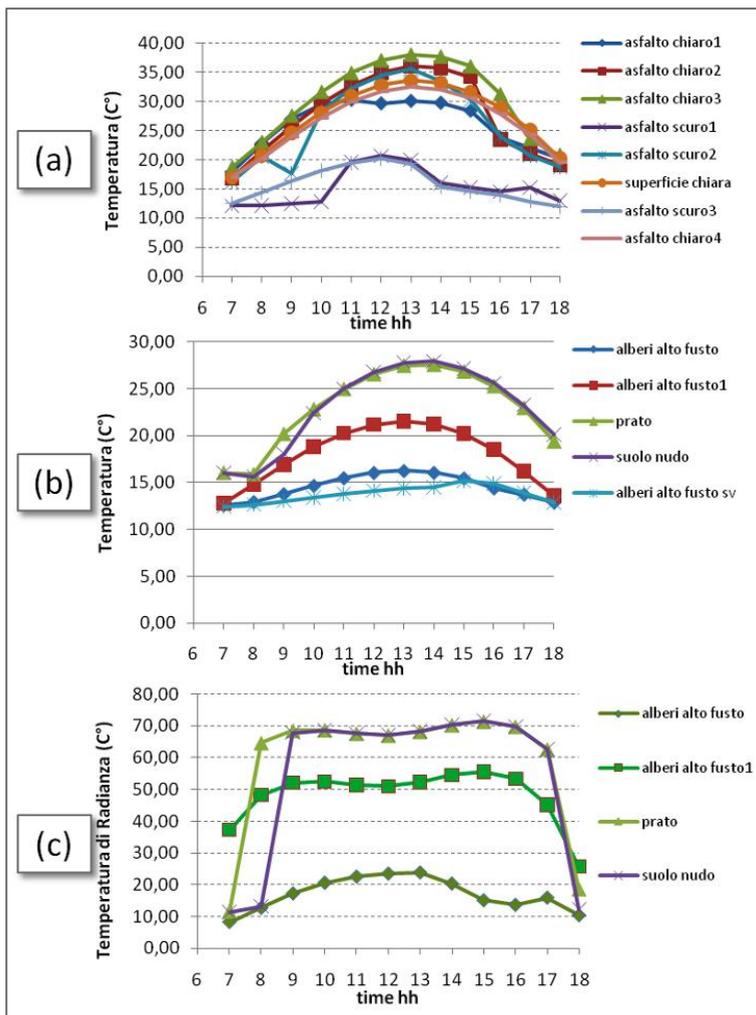


Figura 8 – Andamento temporale delle temperature simulate a terra (grafici a e b) ed ad 1 m di altezza (grafico c) per l'area di Avellino in data 21-06-2007 in corrispondenza dei punti a terra riportati in Figura 3 relativi a varie tipologie di coperture.

### Roma-Prati

Le attività svolte nell'area di Roma centrale del quartiere Prati (Figura 9) sono state finalizzate come si è detto a supportare le ricerche qui in corso dedicate ai *cool material*, aventi caratteristiche di riflettanza (albedo) ed emissività tali da ridurre il calore immagazzinato da parte delle infrastrutture (edifici, asfalti, superfici artificiali,..) dando luogo ed un bilancio energetico più favorevole tra le superfici in gioco e l'aria esterna. Una temperatura minore dell'aria della zona induce un conseguente risparmio energetico indiretto su scala di edificio che si aggiunge a quello diretto dovuto al decremento della temperatura interna legato all'applicazione dei suddetti materiali. È stata selezionata l'area centrale di Roma nel quartiere Prati di circa 1 Km<sup>2</sup> indicata in Figura 9 utilizzando un'immagine multispettrale Landsat ETM+ a 7 bande (6 nell'intervallo riflessivo del visibile, NIR e SWIR, una nel termico-emissivo), acquisita il 29 Luglio 2005 e con risoluzione spaziale di 30 m a terra (60 m per il canale termico).

Nel giorno selezionato l'andamento delle temperature rilevate dalle stazioni meteo locali presenta un massimo (Figura 10) superiore alle medie stagionali del periodo per cui la situazione risulta idonea alla stima degli effetti massimi aspettati dall'introduzione dei *cool material* in condizioni tipiche dell'UHI tipicamente notturna. Tale fenomeno è documentato anche dalla mappa (1 Km di risoluzione) di differenze tra le temperature diurne (10.00) e notturne (21.00) rilevate dal sensore MODIS nello stesso giorno (Figura 11). I dati multispettrali Landsat ETM+, preventivamente corretti geometricamente e per gli effetti atmosferici sono stati utilizzati per l'individuazione e la caratterizzazione preventiva della vegetazione e delle infrastrutture (edifici e superfici artificiali) con le metodologie sopra descritte.

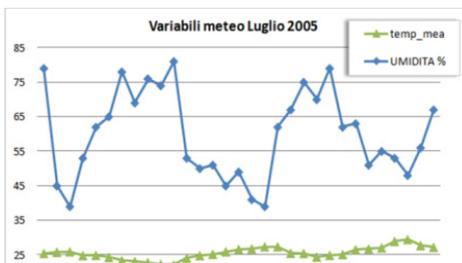


Figura 9 – Variabili meteo medie dell'area di Roma-Prati del Luglio 2005.



Figura 10 – Area d'interesse Roma-Prati, individuata su frame Landsat ETM del 29-07-2005. Dettaglio (in basso) dell'area di simulazione riquadrata in viola su true-color RGB con punti di verifica (triangoli rossi) in overlay.

In particolare oltre al NDVI, considerando che a causa della risoluzione di 30 m, a differenza del dato *QuickBird*, gran parte dei pixel dell'ETM+ corrispondenti all'area urbana risultano di tipo "mixed", cioè caratterizzati dalla presenza di più coperture differenti in termini di firma spettrale, è stata adottata una *soft-classification* ed SMA per l'individuazione preventiva delle firme spettrali delle coperture pure (*endmembers*) tramite l'algoritmo SMACC (*Sequential Maximum Angle Convex Cone*, Gruninger et al., 2004). In questo modo sono state individuate 6 coperture corrispondenti alle tipologie

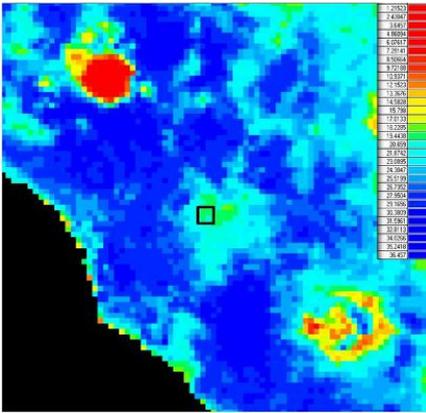


Figura 11 – Differenza (°C) di temperature rilevate da passaggi MODIS diurno (10.00) e notturno (21.00) del 29-7-2005. Area d’interesse riquadrata in nero al centro.

informazioni tipologiche e geometriche della vegetazione e delle infrastrutture nell’area d’interesse è stato derivato il modello 3D dell’area su cui sono state poi effettuate le simulazioni.

Tali simulazioni sono state progettate tenendo conto delle esigenze preliminari di valutare gli effetti dell’introduzione di *cool material* in quest’area per le superfici relative agli edifici (tetti e pareti) ed alle strade/vie, tipicamente coperte di asfalto. In particolare si è partiti da set di valori di albedo (riflettanza) ed emissività relativi sia a materiali comunemente usati (*normal*) in queste infrastrutture che a *cool material* sperimentali a basso (*cool1*) ed ad alto (*cool2*) impatto sul bilancio energetico e quindi sulla temperatura. I valori di riferimento utilizzati sono riportati nella Tabella 1.

	Edifici		Asfalto	
	Albedo		Albedo	Emissività
Materiali	Tetti	Mura		
Normal	0,25	0,45	0,13	0,9
cool 1	0,5	0,45	0,25	0,9
cool 2	0,7	0,6	0,35	0,9

Tabella 1 – Parametri relativi ai cool material utilizzati nella simulazione.

principali (*endmembers*) della vegetazione, delle superfici infrastrutturali e degli edifici presenti nell’area di test le cui firme spettrali tipiche unitamente alla loro denominazione riscontrata tramite foto interpretazione sono riportate nella Figura 12. Come si vede sono state individuate differenti tipologie di tetti e vegetazione, caratterizzata per il massimo in corrispondenza della banda 4 (NIR) e con due specie principalmente presenti nell’area (platani e lecci). Per ogni pixel dell’area di test sono state infine stimate le percentuali di tali coperture “pure” presenti (*soft-classification*). Per la caratterizzazione geometrica ed altimetrica, non disponendo di dati LIDAR, ci si è avvalsi di cartografia vettoriale planimetrica degli edifici a scala 1:2000 e di una stereocoppia di foto aeree (altezza volo 2400 m circa, scala 1:14.000) del ’94 dalle quali sono stati estratti il DSM ed il DTM con tecniche di stereo restituzione digitale debitamente calibrate sul sito. Dalla mappa tematica ottenuta come descritto precedentemente e contenente le

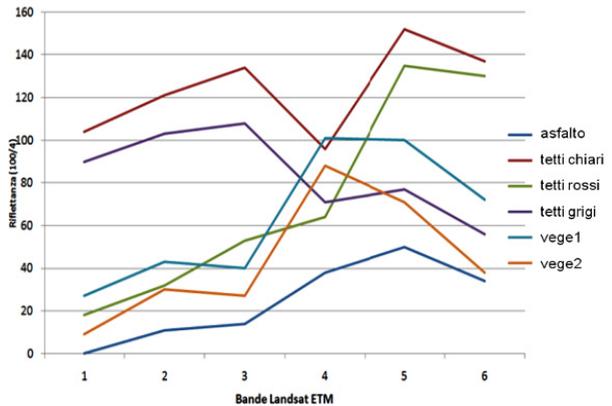


Figura 12 – Firme spettrali delle coperture principali individuate con l’algoritmo SMACC per l’area d’interesse rispetto alle 6 bande riflesse Landsat ETM.

Nella versione 3.5 qui utilizzata di ENVI-met gli edifici sono trattati ciascuno con la loro specifica struttura tridimensionale mentre per i parametri di albedo e di trasmittanza termica (tetti e pareti) nonché di temperatura interna (fissata) sono utilizzati valori unici per l'intera area di simulazione preselezionati a cura dell'utente. Al fine di simulare adeguatamente l'andamento temporale delle distribuzioni dei parametri dell'area nell'intervallo di maggior interesse senza appesantire i calcoli anche in termini di output, è stato selezionato l'intervallo temporale dalle 06.00 sino alle 18.00, considerando che al suo interno sono contenuti i previsti valori massimi di variazione delle temperature (Figura 1). A differenza delle simulazioni effettuate su Avellino, per Roma-Prati è stata adottato un "forcing" (disponibile nella versione 3.5 ma non nella 3.1 utilizzata per Avellino) basato sull'andamento delle temperature giornaliere misurato dalle stazioni meteo al fine di conservare una maggior aderenza alla situazione reale. I risultati delle 3 simulazioni con i parametri della Tabella 1 sono sintetizzati nei grafici di Figura 14. Come si evidenzia l'introduzione di *cool material* a diverso impatto ha un sensibile effetto di mitigazione delle temperature, sino ad oltre 5 C° di differenza sui massimi per le superfici asfaltate ed artificiali mentre per la vegetazione dalle temperature notevolmente più basse, l'effetto è meno rilevante ed addirittura negativo in corrispondenza delle periodo pomeridiano nel caso dei *cool material* a basso impatto (cool1).

L'elaborazione della componente termica dell'immagine multispettrale Landsat ETM+ è stata finalizzata a produrre la mappa LST (*Land Surface Temperature*), corrispondente al passaggio satellitare Landsat (9.30-10.00), dell'area d'interesse con cui effettuare una prima validazione delle simulazioni. Dopo la correzione atmosferica per gli effetti prevalenti di attenuazione del vapor d'acqua, la relativa radianza  $L$  ( $W / m^2 \text{ str } \mu$ ) è stata convertita in temperatura  $T$  utilizzando i valori dei coefficienti ( $K_1$ ,  $K_2$ ) di corredo all'immagine (Mallick et al., 2008) e dell'emissività ( $\epsilon$ ):

$$T = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1 \epsilon}{L} + 1\right)} \quad [2]$$

Oltre al calcolo con un valore costante dell'emissività (0.97), per tener conto dei valori di  $\epsilon$  variabili per i vari materiali infrastrutturali e la vegetazione presenti in percentuali diverse nei vari pixel dell'immagine sono stati utilizzati altri due metodi basati rispettivamente sull'NDVI (Jose' A. Sobrino et al., 2004) e sulla decomposizione SMA precedentemente calcolata (Figura 12) con dati di riferimento desunti dalla letteratura (Tabella 2) per le coperture principali. La simulazione effettuata con i parametri relativi alla situazione normale è stata confrontata con la distribuzione di temperature così ottenuta dalle riprese Landsat ETM+ alle ore 10.00 con differenze risultanti nei punti di controllo riportate in Figura 15 che per le superfici asfaltate (*asfxx*) si attestano dai 3 ai 6 C°, mentre quelle rilevate corrispondenti alla vegetazione (*vegxx*) risultano notevolmente (oltre 10 C°) più alte, presumibilmente a causa del maggior impatto della risoluzione del sensore ETM+ che

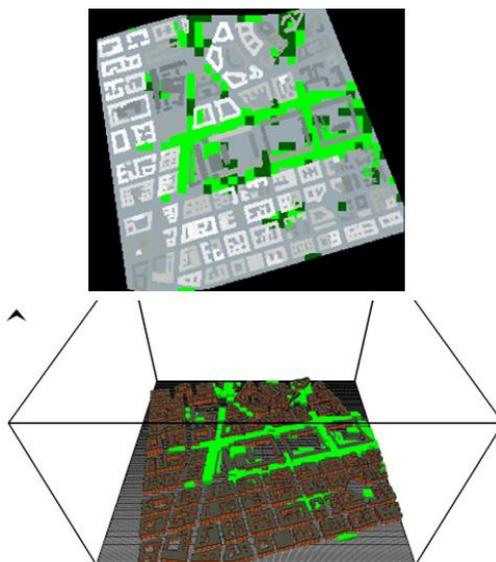


Figura 13 – Mappa tematica della distribuzione della vegetazione (2 tipologie in verde) e delle infrastrutture (suoli ed edifici) nell'area d'interesse (sopra) e relativo modello 3D derivato per l'input ad ENVI-met (sotto).

nel canale termico si atterra sui 60 m a terra. Le differenti metodologie per la stima dell'emissività producono valori che portano a stime di temperatura che differiscono per frazioni di grado C°.

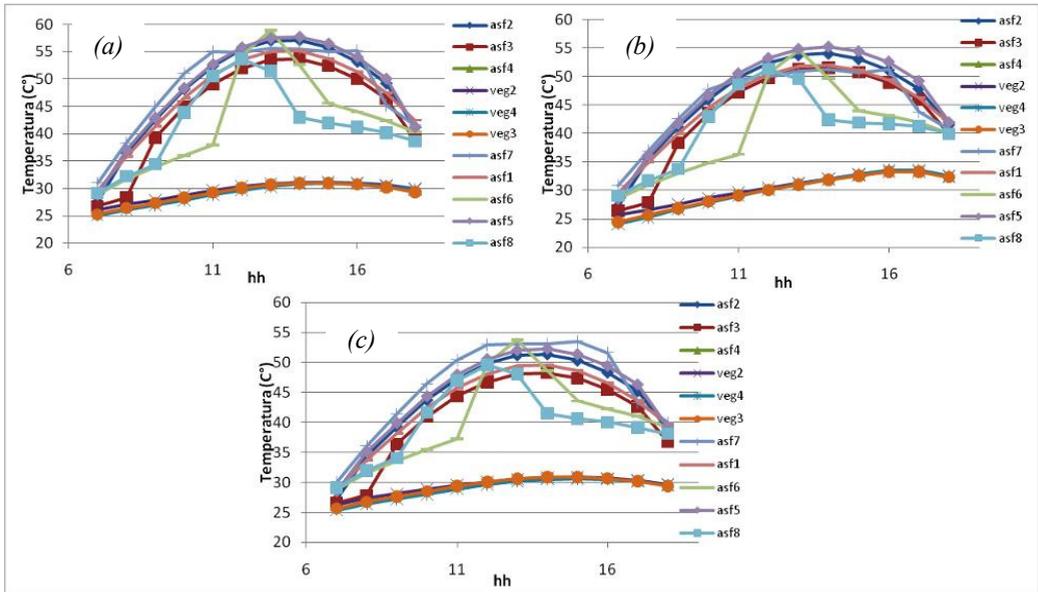


Figura 14 – Andamento delle temperature superficiali simulate sui punti di controllo introducendo cool material con parametri riportati in Tabella 1 (Normal (a), cool1 (b) e cool2 (c) dall'alto).

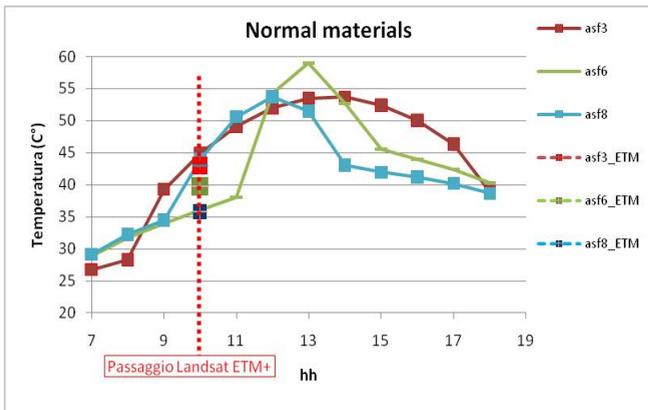


Figura 15 – Confronto tra temperature superficiali simulate e rilevate tramite sensore Landsat ETM+ alle ore 10.00 (linea verticale tratteggiata) su alcuni punti di controllo di Figura 9.

Coperture principali	Emissività
1-tetti grigi	0,93
2-asfalto	0,95
3-tetti rossi	0,94
4-tetti chiari	0,9
5-veget	0,967
6-veget2	0,977

Tabella 2 – Valori di emissività adottati.

### Conclusioni e sviluppi futuri

L'integrazione delle differenti tecniche di telerilevamento satellitare ed aereo ad alta risoluzione geometrica qui utilizzate hanno permesso di sviluppare vari metodi con i quali supportare adeguatamente la calibrazione e la validazione delle simulazioni delle variabili climatiche effettuate con il nuovo codice SVAT 3D ENVI-met, progettato per l'ambiente urbano e le analisi a scala locale. Tali metodologie hanno permesso di ottenere in modo semiautomatico dai dati

telerilevati con sensori attivi/passivi le informazioni geometriche e tipologiche relative alla vegetazione ed alle infrastrutture necessarie per l'imput alla simulazione. Inoltre, mappe termiche ottenute dalle immagini telerilevate all'infrarosso debitamente corrette per gli effetti atmosferici sono state impiegate proficuamente per una prima verifica delle distribuzioni simulate. I risultati ottenuti sull'area di Avellino utilizzando dati LIDAR e satellitari multispettrali *QuickBird* sono serviti oltre che a mettere a punto le procedure automatiche di conversione anche per una verifica preliminare dell'andamento delle temperature simulate rispetto a quelle registrate a terra da stazioni meteo della zona. Nella zona test di Roma nel quartiere Prati sono state effettuate 3 simulazioni con differenti parametri di albedo ed emissività per le infrastrutture e le superfici artificiali (prevalentemente asfalti) preventivamente identificati e caratterizzati corrispondenti a *cool material* sperimentali (Tabella 1). I risultati preliminari hanno consentito di effettuare una prima stima della riduzione di temperature superficiali ottenibile nelle condizioni relative ad una situazione tipica di UHI notturno con valori intorno ai 4-7 C° per i massimi relativi alle superfici artificiali, in particolare ad alcuni asfalti (Figura 14). Per la vegetazione gli effetti dall'introduzione dei *cool material* sono meno evidenti e nel caso dei materiali a basso (*cool I*) impatto (grafico (b) di Figura 14) le simulazioni relative agli orari successivi alle 12.00 prevedono un aumento di temperatura rispetto alla situazione standard (grafico (a) di Figura 14).

Dal confronto tra la distribuzione delle temperature simulate e registrate dal sensore ETM+ al suo passaggio alle ore 10.00 sull'area test di Roma, con la stima dell'emissività effettuata per i vari materiali artificiali (asfalti,...) sulla base della loro distribuzione preventivamente ottenuta dai dati telerilevati con tecniche di classificazione multi spettrale, si registrano differenze contenute entro 3-7 C° mentre per la vegetazione tali differenze aumentano sensibilmente sino ad oltre 10 C°, a causa probabilmente della scarsa risoluzione geometrica del canale termico e di una poco adeguata parametrizzazione suscettibile di miglioramento col supporto di rilievi a terra.

Per quanto attiene le differenti metodologie di stima dell'emissività, i valori forniti da quella originale qui introdotta, basata sulla decomposizione SMA, danno luogo a valori di temperatura maggiormente vicini a quelli simulati rispetto all'altra più diffusa basata sull'NDVI. Questa procedura unitamente a quelle precedenti per la discriminazione dei vari materiali avrebbero portato senz'altro a risultati migliori potendo disporre di dati iperspettrali ad idonea risoluzione geometrica supportati da adeguati rilievi a terra sincroni alle riprese aerospaziali.

Sebbene l'integrazione tra le tecniche applicative del telerilevamento HR ed il codice ENVI-met abbia prodotto risultati preliminari notevolmente interessanti ed utili a supportare la caratterizzazione energetica e la pianificazione urbana permangono difficoltà connesse alla necessità di notevoli risorse di calcolo da parte del codice (circa una settimana per ciascuna simulazione su Workstation con CPU Xeon E5504 a 2 Ghz e 6 GB di RAM) su cui comunque è concentrato attualmente lo sforzo degli sviluppatori che nel prossimo futuro dovrà portare sensibili miglioramenti anche sul versante della capacità di gestire singolarmente le varie infrastrutture aumentando così le sue capacità predittive.

### **Bibliografia e riferimenti**

- Bruse M., H. Fleer (1998), "Simulating Surface- Plant-Air Interactions Inside Urban Environments with a Three Dimensional Numerical Model", *Environmental Software and Modelling*, 13, 373-384
- Gruninger J., Ratkowski A. J., Hoke M. L. (2004), "The Sequential Maximum Angle Convex Cone endmember model", *SPIE proceedings - Algorithms for multispectral, hyperspectral and ultraspectral imagery*, Vol. 5425:1
- ENVI-met online manual, <http://www.envi-met.com/htmlhelp/helpindex.htm>
- Mallick J., Kant Y., Bharath B.D. (2008), "Estimation of land surface temperature over Delhi using Landsat-7 ETM+", *J. Ind. Geophys. Union*, 12:3, 131-140
- Jose´ A. Sobrino, Juan C. Jimenez-Mun˜oz, Leonardo Paolini (2004), "Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5", *Remote Sensing of Environment*, 90, 434-440.