

Telerilevamento multispettrale e tecniche di object classification per la carta della vulnerabilità climatica di Roma

F. Borfecchia (*), E. Caiaffa (**), M. Pollino (*), L. De Cecco (*), S. Martini (*),
L. La Porta (*), S. Ombuen (***), L. Barbieri (***), F. Benelli (***), F. Camerata (***),
V. Pellegrini (***), A. Filpa (***)

(*) ENEA - UTMEA-TER (Laboratorio Analisi e Osservazioni sul Sistema Terra)

(**) ENEA - UTMEA-CLIM (Laboratorio Modellistica Climatica e Impatti)

C.R. Casaccia, Via Anguillarese 301, 00123 Roma, tel. 0630486042, e-mail: flavio.borfecchia@enea.it;

(***) DipSU - Dipartimento di Studi Urbani – Università degli Studi Roma Tre,
Via della Madonna dei Monti, 40 Roma

Riassunto

Questo lavoro è dedicato alla messa a punto di metodologie basate sulle tecniche di telerilevamento aerospaziale (EO) a medio-alta risoluzione e tecnologie GIS per la caratterizzazione estensiva morfo-tipologica degli insediamenti urbani relativa agli aspetti climatici connessi alla temperatura ed all'idrologia (ondate di calore, "Heat Island", allagamenti, ecc...) nel quadro generale di supporto alle attività e politiche di mitigazione ed adattamento. L'obiettivo generale è quello di pervenire ad una carta della "vulnerabilità climatica" generale del comune di Roma che includa ulteriori elementi tra cui quelli legati ai dati climatici storici e di previsione (debitamente riscaldati e riclassificati), rischi idro-geologici, ventilazione ed anche aspetti di tipo socio-economico. L'obiettivo iniziale è stato quello della classificazione delle varie aree urbane sulla base di tre variabili fondamentali legate sia alla tipologia/densità edilizia sia alla presenza di vegetazione/superfici permeabili connesse al ciclo idrologico ed alla "risposta" termica alle ondate di calore che in area mediterranea caratterizzano aspetti rilevanti legati al *climate change*. Sono state definite 3 variabili di riferimento quali tipologia, compattezza, permeabilità, con cui classificare, per le finalità previste, il tessuto urbano. Si è operato tramite metodologie di fotointerpretazione a scala di dettaglio (C.T.R. 1:5000) su un'area di riferimento costituita da un transetto di circa 7x22 km esteso dal centro alla periferia e comprendente gran parte delle classi d'interesse. Oltre alla cartografia sono stati utilizzati i dati di Osservazione aerospaziale della Terra telerilevati dai sensori satellitari Landsat ETM+ che riprendono da orbite polari la superficie terrestre in 7 bande spettrali (visibile RGB, NIR, 2 SWIR, TIR) e con risoluzione di 30 m a terra. Tali dati risultano sufficientemente adatti alla caratterizzazione urbana per le finalità ipotizzate avendo anche un canale termico (TIR) a 60 m di risoluzione. Si è eseguita una classificazione "supervised", individuando le classi di riferimento su aree ben conosciute con cui "addestrare" una procedura integrata, basata su tecniche di *data mining* ed *object classification* da impiegare poi su tutta l'area comunale. Alcuni interessanti risultati preliminari sono stati ottenuti su un'area campione. Un altro risultato importante è stato il metodo di calibrazione implementato sulla base di una tipica distribuzione di temperatura UHI derivate dai dati MODIS, che ha permesso di ottenere una espressione analitica dell'indice di vulnerabilità numerico (INV), che rappresenta un potente strumento per la valutazione della risposta termica del tessuto urbano.

Abstract

This work aims at methodologies developing based on aerospace remote sensing techniques using medium-high resolution technologies, data mining/object classification methods and GIS for the extensive morpho-typological characterization of urban settlements related to climatic changes aspects connected to temperature and hydrology (heat waves or "Heat Island", floods, etc.) in the

general framework of support to the mitigation and adaptation activities and policies. The overall objective is to map the "climate vulnerability" in the municipality of Rome using also additional elements, including those related to historical climate data and forecasting (properly rescaled and preprocessed), hydro-geological risks, ventilation and aspects of socio-economic development. The initial goal was to classifying the various urban areas based on three fundamental variables related both to the type / building density and the presence of vegetation / permeable surfaces related to the hydrological cycle and the "response" to the thermal heat waves or urban heat islands (UHI) that characterize one of the relevant aspects related to Mediterranean climate changes. In particular we have defined three reference variables such as type, compactness, permeability, for each of which have been introduced different scores to classify the urban fabric. The starting point was then working through photo-interpretation methods at detail scale (1:5000 CTR) on a reference area consisting of a transect of about 7x22 km extending from the center to the periphery and including most of the classes of interest found within predefined areas delimited by viability network. In addition remotely sensed data from the Landsat ETM + and MODIS satellite sensors on board of polar platform were used by exploiting their capability to acquire multispectral imagery of earth's surface in various spectral bands (visible RGB, NIR, SWIR 2, TIR) and with a ground resolution ranging from 1 km. to 30 m. The main goal was to explore their spectral/spatial features in order to better support the characterization urban areas of interest by means of more automatic procedures to assess the distribution of the above cited variable. Some preliminaries interesting results were obtained using the "supervised" classification scheme based on data mining techniques and object classification used across the selected municipal area. Another important achievement was the implemented calibration method based on a typical UHI temperature distribution derived from the MODIS data, which allowed us to obtain an analytical expression of the numerical vulnerability index (INV) which represents a powerful tool for urban fabric thermal response evaluation.

Introduzione

Quest'attività di ricerca mira alla messa a punto di metodologie per la caratterizzazione morfotipologica degli insediamenti urbani relativa agli aspetti climatici connessi alla temperatura ed all'idrologia (ondate di calore o "Heat Island", allagamenti, ecc...). L'utilizzo delle correnti tecniche di telerilevamento aerospaziale a medio-alta risoluzione e delle tecnologie GIS costituisce un elemento rilevante delle applicazioni sviluppate sia per gli aspetti di standardizzazione che di replicabilità nonché di validazione (tramite le mappe di temperatura ottenibili sistematicamente da satellite e dalle serie storiche/di previsione). L'obiettivo generale è quello di pervenire poi ad una carta della "vulnerabilità climatica" più ampia che includa ulteriori elementi tra cui quelli legati ai dati climatici storici e di previsione (debitamente riscaldati), rischi idro-geologici, ventilazione ed aspetti di tipo socio-economico. L'area di progetto selezionata è quella del comune di Roma, che per ampiezza e presenza di diverse tipologie edilizie rappresentative della realtà italiana ben si presta a fornire un banco di prova valido per lo sviluppo di una metodologia adeguata ad essere applicata proficuamente a livello nazionale. Poiché l'obiettivo iniziale era quello della classificazione delle varie aree urbane sulla base di tre variabili fondamentali legate sia alla tipologia/densità edilizia sia alla presenza di vegetazione/superfici permeabili connesse sia alla "risposta" idrologica che a quella termica alle ondate di calore che in area mediterranea caratterizzano gli aspetti legati al *climate change*, sulla base di conoscenze pregresse sono state definite 3 variabili di riferimento quali: tipologia, compattezza, permeabilità. Per ognuna di esse sono stati introdotte scale diverse (categorie per la prima, gradi crescenti per le altre) con cui classificare per le finalità previste il tessuto urbano. Si è partiti quindi operando tramite metodologie di fotointerpretazione a scala di dettaglio (C.T.R. 1:5000) su di un'area di test costituita da un transetto di circa 7x22 km esteso dal centro alla periferia (Figura 2) e comprendente gran parte delle classi d'interesse. Considerando che l'acquisizione di questi dati Landsat viene effettuata sistematicamente di essi esistono serie storiche che coprono con diverse periodicità tutta la superficie terrestre a partire dagli anni '80. Alle nostre latitudini la periodicità delle riprese è

dell'ordine di 20 giorni e compatibilmente con la copertura nuvolosa al momento del passaggio satellitare mattiniero esse risultano utilizzabili per i nostri scopi. Per l'analisi degli aspetti legati alla distribuzione di temperature sul comune di Roma specialmente in coincidenza con i noti fenomeni delle ondate di calore che hanno caratterizzato alcuni degli ultimi periodi estivi sono stati inoltre impiegati i dati acquisiti dal sistema satellitare in orbita polare MODIS (*MODerate resolution Image Spectrometer*) della NASA in grado di rilevare immagini multispettrali in oltre 30 bande spettrali con risoluzioni da 250 m a 1 km. Dai rilievi effettuati da questo satellite si è in grado di ricavare mappe di temperature a terra LST (*Land Surface Temperature*) ad 1 km di risoluzione debitamente corrette per gli effetti d'assorbimento atmosferico e di emissività dei diversi materiali. Inoltre grazie ai suoi passaggi giornalieri multipli il sistema fornisce mappe di temperatura a terra diurne e notturne, anche in assenza dell'irradianza diretta del sole che può costituire un elemento di disturbo per la rilevazione della temperatura LST dalla stima della componente emissiva.

Training area e fotointerpretazione

In considerazione degli obiettivi precedentemente evidenziati si è proceduto, mediante metodi di fotointerpretazione, ad una classificazione delle zone del transetto corrispondenti a aree residenziali sulla base delle tipologie prevalenti degli edifici, della loro compattezza (intesa come numero dei piani ed ampiezza delle vie contigue); da ultimo è stata considerata la percentuale di superfici permeabili (vegetazione inclusa). La classificazione dei morfotipi caratterizzanti il transetto rispecchia i seguenti parametri:

1. Funzione prevalente (1 classe costruito residenziale, 7 classi costruito non residenziale, 3 classi non costruito);
2. tipologia prevalente degli edifici (11 classi definite sulla base di conoscenze professionali pregresse);
3. compattezza del tessuto insediativo (4 classi: alta, medio-alta, medio-bassa, bassa);
4. presenza di superfici permeabili (3 classi: bassa, media, alta).

La classificazione dei poligoni è stata effettuata tramite fotointerpretazione. La copertura del territorio è totale e topologicamente verificata (assenza di poligoni sovrapposti e/o "buchi"). Il poligono minimo ha grandezza 5000 m². Al momento, la classificazione è stata approfondita solo per i poligoni con funzione prevalentemente residenziale, classificati per fasi successive:

- nella prima fase singolarmente secondo i parametri 1- 2-3-4 (attributi);
- nella seconda fase in base alla combinazione dei parametri 2 e 3, sono state individuate 7 classi morfotipologiche (morfotipo I livello);
- nella terza fase in base alla combinazione delle 7 classi sopra indicate e del parametro 4, sono state individuate 12 classi morfotipologiche (morfotipo II livello).

Nella Tabella 1 è riportato il risultato di questa classificazione "manuale", basata sulle caratteristiche suddette del tessuto urbano, estratte sia mediante fotointerpretazione della cartografia a scala adeguata sia da rilievi fotogrammetrici. In tal modo, sono stati etichettati circa 290 poligoni rilevate manualmente dalla cartografia e delimitate prevalentemente dalla rete viaria.

In tale Tabella si evidenzia un'aggregazione di diverse tipologie e relativi attributi di compattezza di vari morfotipi di tessuto urbano: essa è stata effettuata tenendo conto dei dati rappresentativi di varie situazioni diffuse all'interno del Comune di Roma. La classificazione finale dei morfotipi di primo livello è stata attuata tenendo conto di 3 livelli (o gradi) di presenza di superfici impermeabili presente nelle aree, in modo da arrivare ad individuare preliminarmente 12 classi di vulnerabilità stimata, tramite il presente metodo semiempirico e fotointerpretativo (Figura 1).

Sebbene l'approccio seguito abbia portato ad una prima individuazione di 12 classi di vulnerabilità relative al tessuto urbano, esso tuttavia non permette di evidenziare il diverso peso dei fattori considerati, che potrebbero contribuire quantitativamente in maniera diversa al valore globale del parametro, né di quantificare maggiormente la sua stima con un valore numerico da assegnare ad ogni classe: ciò permetterebbe di effettuare una verifica visiva e successivamente una calibrazione e validazione sulla base delle distribuzioni di temperature rilevate.

Morfotipo I liv. (tipo edilizio/compattezza)		Presenza superfici permeabili		
		alta	media	bassa
1	palazzina bassa	1		
	villino basso	6	1	
	villino medio basso	12	20	
2	palazzina medio bassa		23	
	schiera medio bassa		1	
	villino medio alto		8	5
3	linea medio alta		1	1
	palazzina medio alta		14	27
	palazzina medio bassa		5	
4	blocco medio alto			1
	linea alta			8
	palazzina alta			3
	palazzina alta			12
	palazzina medio alta		10	8
5	blocco alta		3	42
	intensivo alta		1	19
	semi intensivo alta		1	26
	semi intensivo medio alta		3	
	articolato alta		1	
10	articolato medio bassa	6		
	linea medio bassa	1	14	
	torre medio bassa		2	
20	spontaneo medio alta		1	3
	spontaneo medio bassa	1	1	

classe n.	Morfotipo
1	A
2	B
3	C
4	D
5	E
6	F
7	G
8	H
9	I
10	L
11	M
12	N

Tabella 1. Classificazione del tessuto urbano residenziale incluso nel transetto.

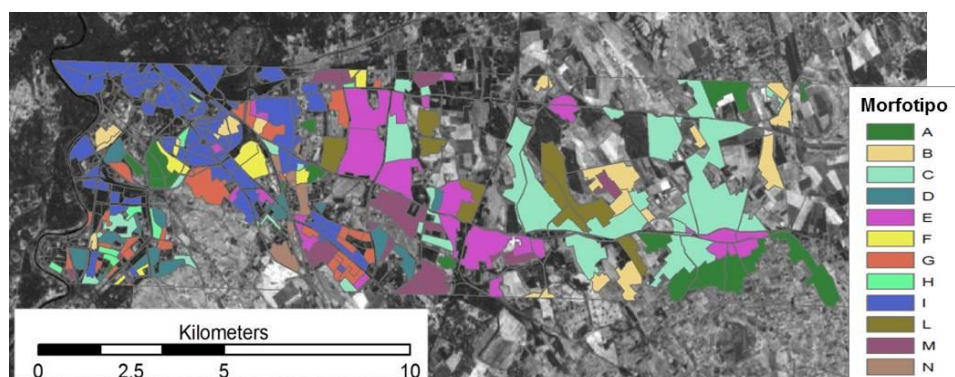


Figura 1. Distribuzione dei morfotipi (classi) individuati in tabella 1 lungo il transetto di test in sovrapposizione a NDVI restituito in tonalità di grigio.

Un primo tentativo per la stima di un indice numerico di vulnerabilità (INV) è stato effettuato assegnando diversi pesi alle tre componenti della vulnerabilità, sulla base di riscontri preliminarmente derivati da conoscenze specifiche del tessuto urbano in studio e dalla letteratura. In particolare, si è assegnato peso 45% alla permeabilità, 35% alla compattezza e 20% alla tipologia. Tali valori sono stati intesi come massimi raggiungibili dai singoli parametri, in modo da permettere di rappresentare tutta la variabilità presente a livello di ciascuna area mediante adeguata riscalatura a 100 dei relativi valori, utilizzando un modello lineare di somma pesata il cui risultato è visibile in Figura 2. Sulla mappa può essere fatta una prima valutazione osservando come una parte rilevante delle aree con indice di vulnerabilità più alto si collochi sul lato sinistro del transetto, corrispondente al centro urbano più compatto (con alcune eccezioni, corrispondenti alle aree verdi e parchi urbani). La distribuzione dell'indice mostra correttamente avere un gradiente negativo andando dal centro alla periferia.



Figura 2. Indice di vulnerabilità INV su transetto di riferimento riportato in semitrasparenza su aree del comune di Roma restituite in true color da dati multispettrali Landsat ETM+.

Applicazione delle tecniche di EO

In una prima fase i dati telerilevati sono stati utilizzati per mettere a punto una metodologia basata su algoritmi consolidati per arrivare alla classificazione di Tabella 1 utilizzando direttamente i rilievi satellitari Landsat ETM+ precedentemente descritti. Gli obiettivi generali di quest'attività prevedevano la progettazione e messa a punto di una metodologia semiautomatica, basata su tecniche di "data mining" e classificazione ad oggetti, per l'efficace discriminazione delle 12 classi di vulnerabilità precedentemente individuate, in modo tale da minimizzare la dipendenza dei risultati dalla soggettività dei metodi basati su fotointerpretazione ed essere agevolmente applicabile su larga scala (in primis all'intero Comune di Roma), standardizzabile ed esportabile ad altre realtà urbane.

Nella seconda fase del lavoro invece ci si è maggiormente focalizzati sugli aspetti di calibrazione e validazione su base fisica del modello per il calcolo numerico dell'INV partendo dagli effetti che i fenomeni d'interesse relativi alle ondate di calore ed al fenomeno di "heat island", hanno avuto sul tessuto urbano considerato. A tal fine, sono state utilizzate le distribuzioni di temperatura rilevate dai sensori satellitari in occasione di manifestazioni particolarmente rilevanti dei fenomeni, documentate dalle serie storiche disponibili dei dati meteo e satellitari. In tal modo, si è mirato da una parte a verificare l'effettivo contributo all'indice di vulnerabilità delle tre componenti e dall'altra a migliorare la stima dei relativi fattori di peso, inizialmente valutati empiricamente.

Data mining e classificazione

La metodologia per la classificazione semiautomatica delle unità territoriali (poligonali) omogenee fotointerpretate incluse nel transetto (Figura 1) sulla base delle loro caratteristiche derivabili dalle riprese satellitari, parte da un approccio "object oriented". In esso si tiene conto che - mediamente - le unità territoriali corrispondono nelle immagini Landsat ETM+ ad insiemi più o meno numerosi di pixel. Poiché in tale approccio sono prese in considerazione non le caratteristiche del singolo pixel ma quelle relative all'insieme considerato, è possibile rilevare ed elaborare parametri relativi alla tessitura o morfologici all'interno dell'area considerata che non sono applicabili al singolo pixel. Quest'ultimo aspetto risulta notevolmente importante per la presente applicazione, in quanto si ipotizza realisticamente che tali parametri di tessitura siano legati alla componente "compattezza" del tessuto urbano ed utilizzata per la stima dell'indice di vulnerabilità.

In questo contesto, data l'importanza della presenza della vegetazione ai fini della mitigazione degli effetti di concentrazione del calore (ondate di calore, heat islands, ecc...) si è scelto di utilizzare

l'indice NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) unitamente ad altri quattro indici riportati in letteratura (Jungtho et al., 2012; Hanqui, 2007) maggiormente sensibili alla riflettanza delle superfici artificiali dei materiali utilizzati in ambiente urbano. Costruendo un file con i quattro *layer* rappresentativi delle distribuzioni dei suddetti indici per ciascuna delle poligonali individuate nel transetto (Figura 1), sono stati calcolati i valori relativi alle variabili derivate connesse sia alle risposte spettrali delle aree d'interesse sia alle loro caratteristiche tessiturali. In particolare, le risposte spettrali derivate includono l'ampiezza (*max-min*), la media, la moda, la deviazione standard e la somma dei valori dei pixel interni. Per la caratterizzazione delle tessiture si è passati attraverso parametri ottenuti dalle GLCM (*Gray-Level Cooccurrence Matrix*), quali la dissimilarità (sensibile al contrasto locale), l'entropia (ordine locale) e l'omogeneità (differenze locali). In totale le variabili derivate dai suddetti quattro indici ammontano a 32.

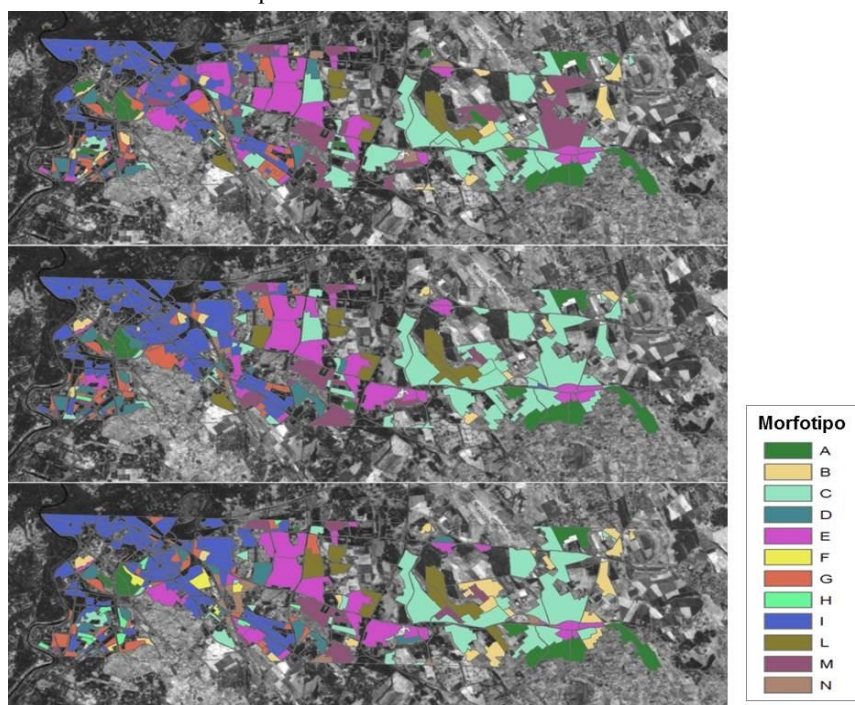


Figura 3. Classificazione supervised ottenuta da dati ETM+ utilizzando 3 diversi algoritmi: SLDA, BVM, C4.5. Le mappe riportate si riferiscono ai 3 algoritmi nell'ordine sopra citato.

Tali variabili spaziali sono state utilizzate per la classificazione *supervised* delle poligonali del transetto per mezzo di specifici algoritmi sviluppati nell'ambito delle tecniche di "data mining" per il trattamento e l'estrazione d'informazioni da grosse moli di dati in input.

Tramite diversi algoritmi di *data mining* testati sono state, quindi, prodotte per il transetto in analisi mappe tematiche di distribuzione delle classi di vulnerabilità, che sono state confrontate con quella prodotta tramite fotointerpretazione utilizzando le relative matrici di contingenza. I risultati più significativi sono stati ottenuti con algoritmi SLDA (*Supervised Linear Discriminant Analysis*), CS-MC4 (*Cost Sensitive Decision Tree*), C4.5 (*Decision Tree*), BVM (*Ball Vector Machine*), ottenendo valori di "Overall Accuracy" rispettivamente di 0,67, 0,65, 0,68, 0,80. Considerando l'accuratezza globale dell'80% ottenuta con l'algoritmo BVM, può essere espressa una preliminare valutazione di buon accordo tra la procedura semi-automatica basata su dati telerilevati ETM+ e quella manuale di fotointerpretazione, nonostante tale metodo risulti poco adeguato col morfotipo F. Altre accuratèzze più basse, ma comunque maggiori di 0,6 e significative, risultano in corrispondenza dei

codici SLDA, CS-MC4, C4.5, le cui mappe tematiche sono riportate nella Figura 3. La prima figura in alto si riferisce al risultato ottenuto con l'algoritmo SLDA: sebbene in termini di accuratezza globale sia inferiore a BVM e C4.5 (a cui rispettivamente si riferiscono le mappe in centro ed in basso), esso presenta un'efficacia significativa per tutte le classi di vulnerabilità individuate. Alcuni algoritmi, pur avendo riportato valori rilevanti di accuratezza percentuale globale, sono risultati del tutto inefficaci per la discriminazione di alcune classi (F, H). Invece, l'SLDA ha dimostrato una performance accettabile su ognuna delle 12 classi.

Come si può osservare, le mappe ottenute dalle procedure di *data mining* riportano le caratteristiche prevalenti di quella prodotta manualmente in Figura 1, con eccezioni relative ad alcune classi in specifiche aree. Ovviamente questo può costituire un'indicazione per affinare maggiormente il processo di fotointerpretazione finalizzato principalmente a fornire delle aree di *training* valide, sia dal punto di vista della rappresentatività sia dell'omogeneità. Dall'analisi dei risultati parziali si ottiene, inoltre, anche un'individuazione delle classi più difficili da discriminare dalle informazioni derivate dai dati telerilevati. In particolare, a questo gruppo appartengono i morfotipi H ed F, per i quali si ottengono risultati apprezzabili solo utilizzando l'algoritmo SLDA.

Calibrazione e validazione

Per la calibrazione del modello di calcolo dell'indice INV, si è partiti da una situazione in cui verosimilmente i fenomeni connessi all'aumento di temperatura superficiale terrestre fossero maggiormente accentuati. In quest'ottica, le analisi delle serie storiche di dati meteo e satellitari indicano nelle estati del 2003 e del 2012 alcuni tra i periodi recenti maggiormente rappresentativi. In Figura 4 sono riportate le mappe di temperatura superficiale ottenute dai rilievi MODIS del luglio 2003 con la mappa dell'INV in sovrapposizione. L'immagine a sinistra si riferisce alla situazione mattiniera, mentre l'altra è relativa alla condizione notturna (ore 21:15 locali). In mattinata i massimi di temperatura coincidono con i minimi di INV ed in questa situazione non si evidenzia la conformazione tipica delle UHI (*Urban Heat Islands*). Viceversa l'altra immagine documenta visivamente la presenza delle UHI notturne su Roma, considerate di maggiore impatto nella situazione specifica (Fabrizi et al., 2010). Tenendo conto di ciò, nell'ottica di pervenire ad un'espressione e calibrazione dell'INV maggiormente basata sugli effetti fisici rilevati dalle UHI in termini di distribuzione di temperature, è stata considerata la mappa di temperature notturne del 12-7-2013 per implementare un modello regressivo lineare multivariato, utilizzando i valori delle 3 variabili relative alle tipologie, di compattezza e permeabilità derivate dalla fotointerpretazione, unitamente all'altimetria locale. Quest'ultima, come è noto, costituisce il fattore predominante nello scambio radiativo locale e nella conseguente distribuzione di temperatura. In tal modo, assumendo la temperatura T come variabile dipendente, si ha:

$$T(alt,tip,comp,perm) = a \cdot alt + b \cdot tip + c \cdot comp + d \cdot perm + e \quad (1)$$

dove: *alt* è l'altimetria (m); *tip* la tipologia (valori 1-4); *comp* la compattezza (valori 1-4); *perm* la permeabilità (valori 1-3); *a*, *b*, *c*, *d*, *e* sono i coefficienti (pesi relativi) da determinare.

Per la determinazione dei coefficienti, sono state stimate per ciascuna delle 290 poligonali d'interesse del transetto le altimetrie e le temperature medie, rispettivamente da una mappa delle altimetrie disponibile a 20 m di risoluzione e da quella delle temperature MODIS di Figura 4, arrivando tramite metodo OLS (*Ordinary Least Squares*) ad un modello sufficientemente robusto (Figura 4b) con correlazione significativa ($R^2=0,606$) e livello di significatività adeguato ($P\text{-value}(F) < 10^{-10}$). Dai coefficienti stimati si evidenzia correttamente la dipendenza inversa dalla quota; inoltre, nella determinazione della distribuzione di temperatura a terra, l'importanza maggiore è rivestita dall'altimetria, seguita nell'ordine dalle 3 variabili di compattezza, tipologia e permeabilità dell'urbanizzato, derivate da fotointerpretazione (comunque significative).

Conclusioni

Il presente lavoro illustra i risultati di un'attività di ricerca finalizzata all'implementazione ed alla messa a punto di metodologie per la stima della sensibilità/vulnerabilità del tessuto urbano

all'innalzamento delle temperature, in relazione ai sempre più frequenti fenomeni climatici relativi alle ondate/isole di calore (*Heat Waves/Islands*) tramite l'utilizzo integrato di tecniche di fotointerpretazione e di metodi basati su GIS ed EO. In particolare, uno degli obiettivi ha riguardato lo sviluppo di una procedura di classificazione dei dati telerilevati ad alta risoluzione spaziale dal sensore Landsat ETM+ basata su tecniche di *data mining* per la più efficace caratterizzazione del tessuto urbano finalizzata alla valutazione della sua risposta termica ed a supporto dei metodi fotointerpretativi. La capacità di rilievo termico del sensore MODIS è stata inoltre utilizzata per la messa a punto di una metodologia di calibrazione e validazione dell'indice di vulnerabilità termica (INV) introdotto empiricamente nella fase di fotointerpretazione, sulla base delle distribuzioni effettive di temperature relative ad una situazione di UHI notturne, tipiche dell'area romana. Va rilevato, infine, che questi risultati preliminari, sebbene d'interesse, risentono di alcuni limiti intrinseci alle metodologie fotointerpretative qui utilizzate: l'obiettivo degli sviluppi futuri sarà quello di rendere l'approccio maggiormente efficace, mediante una maggiore integrazione tra le metodologie utilizzate e - soprattutto - tramite l'individuazione preventiva delle poligoni da fotointerpretare, sulla base di una propedeutica segmentazione automatica basata su algoritmi consolidati (Baatz & Schäpe, 1999) e non sulla base della rete viaria riportata in cartografia.

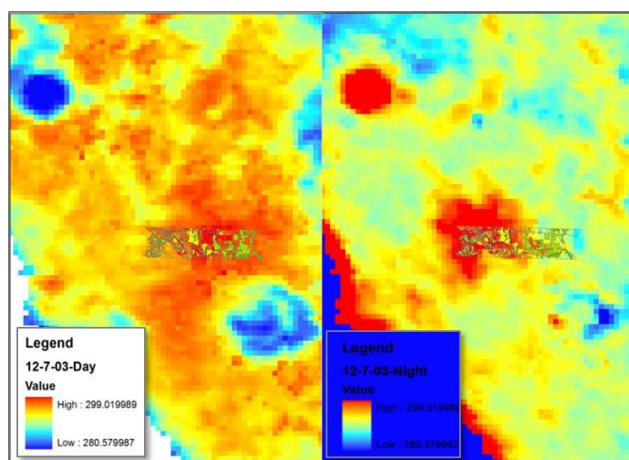


Figura 4°. Mappe di temperatura superficiale diurna (sinistra) e notturna (destra) stimate dai dati rilevati dal sensore MODIS il 12-7-2003. In sovrapposizione mappa di INV da fotointerpretazione su transetto.

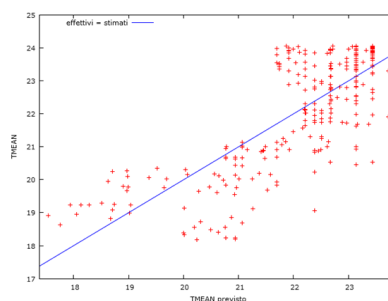


Figura 4b. Risultati Modello OLS in termini di temperature medie previste vs misurate dal sensore MODIS per le poligoni del transetto.

Bibliografia

- Jungho Im, Zhenyu Lu, Jinyoung Rhee, Lindi J. Quackenbush. Impervious surface quantification using a synthesis of artificial immune networks and decision/regression trees from multi-sensor data. *Remote Sensing of Environment* 117 (2012), 102–113
- Hanqiu Xu. Extraction of Urban Built-up Land Features from Landsat Imagery Using a Thematic oriented Index Combination Technique. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* Vol. 73, No. 12, December 2007, pp. 1381–1391.
- R. Fabrizi, S. Bonafoni, R. Biondi (2010), Satellite and Ground-Based Sensors for the Urban Heat Island. Analysis in the City of Rome, *Remote Sensing*, 2:1400-1415.
- Baatz M. & A. Schäpe (1999), Object-Oriented and Multi-Scale Image Analysis in Semantic Networks. In: Proc. of the 2nd International Symposium on Operationalization of Remote Sensing August 16th – 20th 1999. Enschede. ITC.