

ANALISI DELLE RELAZIONI FRA LA LAND SURFACE TEMPERATURE E I PARAMETRI SKY VIEW FACTOR, NORMALIZED DIFFERENCE VEGETATION INDEX E VEGETATION FRACTION MEDIANTE IMMAGINI SATELLITARI LANDSAT 8 NELLA CITTÀ DI BARI

ON THE RELATIONSHIP BETWEEN THE URBAN PARAMETERS SKY VIEW FACTOR, NORMALIZED DIFFERENCE VEGETATION INDEX AND VEGETATION FRACTION AND THE LAND SURFACE TEMPERATURE DERIVED BY LANDSAT-8 IN BARI, ITALY

M. Scarano^a

^a Dipartimento di Scienze e Tecnologie, Università degli Studi di Napoli Parthenope, 80133 Napoli, Italia - mario.scarano@uniparthenope.it

PAROLE CHIAVE: Temperatura superficiale, Sky View Factor, Normalized Difference Vegetation Index, Vegetation Fraction, Isole di Calore

KEY WORDS: Land Surface Temperature, Sky View Factor, Normalized Difference Vegetation Index, Vegetation Fraction, Urban Heat Island

RIASSUNTO

Questo studio ha come oggetto la valutazione dell'impatto che la morfologia urbana e la vegetazione hanno sul fenomeno dell'isola di calore urbano - Urban Heat Island (UHI) - nella città di Bari. Per questo scopo sono state realizzate delle analisi di correlazione fra alcuni indici urbani, come lo Sky View Factor (SVF), il Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) e il Vegetation Fraction (Pv) e la Land Surface Temperature (LST). Questi tre parametri sono stati ricavati da immagini diurne Landsat 8 acquisite in diversi mesi dell'anno; in particolare per il calcolo della LST si è fatto ricorso alla radiative transfer equation (RTE). I risultati mostrano come, nelle ore diurne, fra LST e SVF ci sia una relazione con andamento positivo, che si accentua maggiormente nelle aree in cui l'edificato risulta più denso e compatto. Normalizzando la temperatura, si nota inoltre come questa relazione rimanga pressoché inalterata senza subire l'influenza delle variazioni climatiche stagionali. Le correlazioni fra NDVI e LST evidenziano come la presenza di vegetazione determini in modo inversamente proporzionale una variazione della temperatura, secondo un andamento lineare.

ABSTRACT

This study focuses on the impact of landscape composition and urban morphology on the Land Surface Temperature (LST) in the city of Bari, Italy. For this aim, correlations between the LST and Sky view factor (SVF), Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and Vegetation Fraction (Pv) have been done. To do this, several daytime Landsat 8 images acquired in different months of the year have been used to retrieve LST by using the radiative transfer equation (RTE). The results show a daytime positive relationship between LST and SVF and this trend is emphasized particularly in the more dense urban areas; normalizing the LST it appears clearly how these correlations are not affected by seasonal effects. The relationships between NDVI, Pv and LST highlight the role of vegetation, which is related to the temperature according to an inversely proportional linear function.

1. INTRODUZIONE

Una delle principali cause antropiche del cambiamento climatico è la progressiva urbanizzazione (Kalnay and Cai, 2003) che contribuisce sensibilmente allo svilupparsi del fenomeno dell'Urban Heat Island (UHI), che consiste nel rilevare valori di temperatura differenti fra area urbana e intorno rurale (Oke, 1973). Negli ultimi anni, le analisi di questo fenomeno sono divenute ormai prassi consolidata; nella fattispecie, è frequente il ricorso al telerilevamento per il calcolo della Land Surface Temperature (LST) (Voogt, 2002; Streutker, 2002; Weng et al., 2004; Weng and Quattrocchi, 2006; Cheval and Dumitrescu, 2009; Weng, Q. 2009; Caprioli et al., 2013, 2014; Ceppi and Scarano, 2014; Scarano and Sobrino, 2015). In

letteratura sono presenti numerosi studi su diversi parametri rappresentativi dell'ambiente urbano, che vengono analizzati per individuare gli effetti che gli stessi comportano sulle proprietà termiche dell'area e le modalità con le quali questi manifestano la propria influenza. Fra i parametri più frequentemente richiamati vi sono: la vegetazione (Weng et al., 2004; Yuan and Bauer, 2007; Xian and Crane, 2006; Li et al., 2011; Buyantuyev and Wu, 2009; Prihodko and Goward, 1997; Chen et al., 2006; Ho et al., 2014), l'impervious surface areas (ISA) (Lu and Weng, 2006; Yuan and Bauer, 2007; Xian and Crane, 2006; Wu, 2004; Li et al., 2011; Weng, 2012), il land-use land-cover (LULC) (Lo et al., 1997; Weng, 2001 and 2003; Weng et al., 2004; Dousset and Gourmelon, 2003; Xiao et al., 2008; Li et al., 2011; Weng et al., 2006), fattori biofisici e meteorologici

(Bottyán and Unger, 2003), influenze di origine antropologica come la distribuzione della popolazione (Fan and Sailor, 2005), attività umane (Elvidge et al., 1997), dati socioeconomici (Yuan et al., 1997), dati di censimento (Xiao et al., 2008) e materiali urbani (Lu and Weng, 2006; Sobrino et al., 2012; Weng and Lu, 2008).

Questo studio è focalizzato su due dei parametri elencati: la morfologia urbana e la vegetazione. Uno dei principali effetti mitigativi dell'UHI è infatti la traspirazione della vegetazione (Li et al., 2011); in letteratura sono presenti numerosi studi che mettono in relazione la LST e il Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) per valutarne gli effetti (Carlson et al., 1994; Gillies et al., 1997; Goward et al., 2002; Lo et al., 1997; Weng, 2001; Chen et al., 2006; Yuan and Bauer, 2007). Tuttavia l'NDVI è un parametro che soffre l'influenza di numerose variabili (Carlson et al., 1997), prima fra tutte l'abbondanza della vegetazione (Sandholt et al., 2002; Small, 2001). Weng et al., (2004) hanno dimostrato come la LST in ambito urbano è maggiormente in relazione con il Vegetation Fraction (Pv) piuttosto che l'NDVI. Anche la morfologia urbana riveste un ruolo rilevante nella determinazione dell'UHI (Eliasson, 1994); questa viene generalmente descritta mediante lo SVF (Nunez, Oke, 1976; Gál et al., 2008) che si definisce come il rapporto fra la radiazione ricevuta da una superficie piana e la radiazione emessa dall'intero ambiente emisferico (Watson and Johnson, 1987). Lo SVF è un parametro adimensionale compreso fra 0 e 1 che dunque esprime, in corrispondenza degli estremi dell'intervallo, rispettivamente aree totalmente ostruite e spazi aperti; più semplicemente si può dire che lo SVF esprime la percentuale di cielo visibile da una determinata posizione della superficie terrestre (Oke, 1988).

Negli anni passati sono state condotte varie ricerche sulle relazioni fra LST e SVF. Una prima classificazione può essere fatta sulla base del tipo di temperatura considerata, superficiale o dell'aria. È stato dimostrato come la temperatura dell'aria presente nei canyon urbani non dipende esclusivamente dalla geometria delle strade e dell'edificato, ma è governata da fattori più complessi che variano in base al contesto (Bärring et al., 1985). Ciononostante, tenendo conto dell'influenza di questi elementi, sono state realizzate diverse ricerche (Eliasson, 1994; Chen et al., 2012). Una seconda classificazione può strutturarsi in funzione del metodo utilizzato per la stima della LST. La maggior parte degli studi, indipendentemente dal tipo di temperatura considerata, ricorre a misurazioni tramite dispositivi mobili (Johnson, 1985; Bärring et al., 1985; Yamashita, 1986; Park, 1987; Eliasson, 1990, 1992, 1996; Upmanis et al., 1998; Upmanis, 1999; Goh and Chang, 1999; Santos et al., 2003; Lindberg et al., 2003; Unger, 2004; Gál et al., 2008); altri ricorrono a dati provenienti dalle stazioni meteorologiche (Eliasson, 1994; Chen et al., 2012) e immagini aeree (Bärring et al., 1985; Eliasson, 1990, 1992). Solamente un numero molto limitato di lavori utilizza immagini satellitari, ed in particolare Landsat 5 e 7 (Vieira and Vasconcelos, 2003; Wong et al., 2011) e ASTER (Ho et al., 2014). In nessuno dei casi elencati la LST viene determinata mediante il ricorso alla formula inversa della radiative transfer equation (RTE) che risulta essere, ad oggi, l'approccio più corretto (Jiménez-Muñoz and Sobrino, 2003; Sobrino et al., 2004; Jiménez-Muñoz et al., 2009, 2010, 2014; Weng, 2009).

Sulla base di queste considerazioni, il presente lavoro presenta alcune novità sostanziali: 1) la LST è ottenuta con il metodo della RTE calcolando i parametri atmosferici dai radiosondaggi mediante l'utilizzo del codice di trasferimento radiativo MODTRAN 4.3 (Berk et al., 2003); 2) sono state utilizzate immagini satellitari Landsat 8, che hanno una risoluzione nel termico maggiore rispetto alle ASTER e alle Landsat 7; 3) l'emissività delle superfici è stata determinata accuratamente

mediante il ricorso a due differenti metodi di classificazione; 4) le analisi di correlazione non sono riferite in modo generico e dispersivo a tutta l'estensione dell'immagine, ma ristrette e calibrate esclusivamente sulle aree edificate, individuate tramite la classificazione Corine Land Cover (CLC) al 4° livello; 5) lo SVF è stato costruito mediante un database vettoriale 3D degli edifici, che ricopre tutta l'area analizzata e consta 105.208 fabbricati (Fig. 1).

In conclusione, questo lavoro mira a i) studiare le relazioni fra la morfologia urbana, così come descritta dallo SVF, e la LST diurna relativamente all'area urbana di Bari; ii) analizzare la correlazione SVF-LST al fine di valutare come le variazioni climatiche mensili e stagionali possano esercitare un'influenza sull'andamento della funzione; iii) analizzare la variazione della temperatura superficiale in funzione della presenza di verde, espressa da NDVI e Pv.

2. METODOLOGIA

2.1 Area di studio

La città di Bari (41°7' N, 16°51' E) è il capoluogo della Regione Puglia (Fig. 1). Si estende per una superficie di circa 116,20 km² e conta più di 320.000 abitanti, secondo i dati aggiornati al 2010. Il clima è di tipo continentale con inverni miti ed estati calde e secche. Il centro urbano si protende nel mare; il resto della struttura urbana si sviluppa attorno a questo polo seguendo un andamento semicircolare, scemando la densità dell'edificato man mano che ci si allontana verso le aree periferiche. La morfologia urbana e il contesto rurale sono facilmente riconoscibili e classificabili.

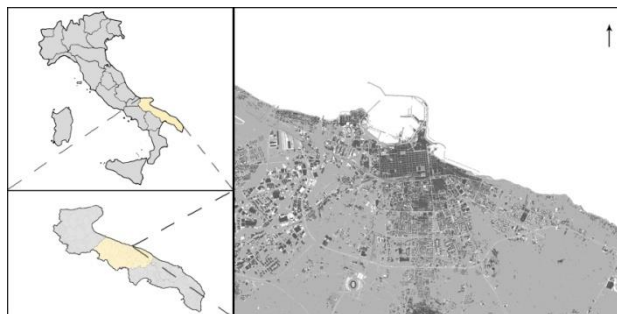


Figura 1. Localizzazione della città di Bari

2.2 Dataset

In questo studio sono state utilizzate quattro immagini diurne Landsat-8, con le seguenti date di acquisizione: 7 agosto 2013 alle 09:36 UTC, 24 Settembre 2013 alle 09:36 UTC, 10 Ottobre 2013 alle 09:36 UTC, 10 Agosto 2014 alle 09:34 UTC. Tutte le immagini sono riferite al sistema di proiezione Universal Transverse Mercator (datum WGS84, Zona UTM N33).

La mappa dello SVF è stata realizzata utilizzando un database tridimensionale in ambiente GIS fornito dalla Regione Puglia. Questi dati vettoriali sono stati fusi con il modello digitale del terreno (DTM) in modo da costruire il modello digitale delle altezze (DSM) dell'area urbana. Per ovvi motivi di compatibilità anche questi dati sono stati georiferiti secondo il sistema WGS84 - UTM.

2.3 Stima della Land Surface Temperature

Applicando la seguente espressione (Chander and Groeneveld, 2009) è possibile convertire i digital numbers (DN) nella radianza al sensore:

$$L_{\lambda} = \frac{(L_{MAX\lambda} - L_{MIN\lambda})}{(Q_{calmax} - Q_{calmin})} * (Q_{cal} - Q_{calmin}) + L_{MIN\lambda} \quad (1)$$

dove L_{λ} è la radianza spettrale espressa in $W/(m^2 \text{ sr } \mu\text{m})$, $L_{MAX\lambda}$ è la radianza spettrale al sensore scalata secondo Q_{calmax} in $W/(m^2 \text{ sr } \mu\text{m})$, $L_{MIN\lambda}$ è la radianza al sensore scalata secondo Q_{calmin} in $W/(m^2 \text{ sr } \mu\text{m})$, Q_{calmax} è il massimo valore quantificato e calibrato del pixel corrispondente a $L_{MAX\lambda}$ espresso in DN, Q_{calmin} è il minimo valore quantificato e calibrato del pixel corrispondente a $L_{MIN\lambda}$ espresso in DN ed infine Q_{cal} è il valore quantificato e calibrato del generico pixel in DN.

La LST (Fig. 2) si ottiene applicando la seguente espressione della RTE formulata secondo l'intervallo relativo all'infrarosso termico:

$$L_{\lambda} = [\varepsilon_{\lambda} B_{\lambda}(T_s) + (1 - \varepsilon_{\lambda}) L_{atm \downarrow}^{\lambda}] \tau_{\lambda} + L_{atm \uparrow}^{\lambda} \quad (2)$$

dove ε è la Land Surface Emissivity (LSE), $B(T_s)$ è la radianza di corpo nero ottenuta dalla legge di Planck, T_s è l'incognita LST, $L_{atm \downarrow}^{\lambda}$ è la downwelling atmospheric radiance, $L_{atm \uparrow}^{\lambda}$ è l'upwelling atmospheric radiance e τ_{λ} è la trasmittività atmosferica totale.

Secondo Sobrino et al. (2006) l'equazione precedente della RTE può essere espressa in funzione di T_s come segue:

$$T_s = T_b + \frac{1 - \varepsilon_{\lambda}}{\varepsilon_{\lambda}} \{ M_{\lambda}(T_b) - [1 - \tau_{\lambda}(53^{\circ})] [T_a + M_{\lambda}(T_b) - T_b] \} + \frac{1 - \tau_{\lambda}(\theta)}{\varepsilon_{\lambda} \tau_{\lambda}(\theta)} (T_b - T_a) \quad (3)$$

dove T_b è la temperatura di brillantezza, ε_{λ} è la LSE, $M_{\lambda}(T_b)$ è definita come $M_{\lambda}(T_b) = \frac{B_{\lambda}(T)}{\frac{\partial B_{\lambda}(T)}{\partial T}}$, $\tau_{\lambda}(53)$ è la trasmittività atmosferica ottenuta secondo un angolo di osservazione di 53° , T_a è la temperatura atmosferica. I parametri atmosferici τ_{λ} , $L_{atm \downarrow}^{\lambda}$ e $L_{atm \uparrow}^{\lambda}$ sono stati calcolati con dei radiosondaggi utilizzando il codice di trasferimento radiativo MODTRAN 4.3 (Berk et al., 2003). L'emissività è stata ricavata tramite classificazione, come descritto nella sezione successiva.

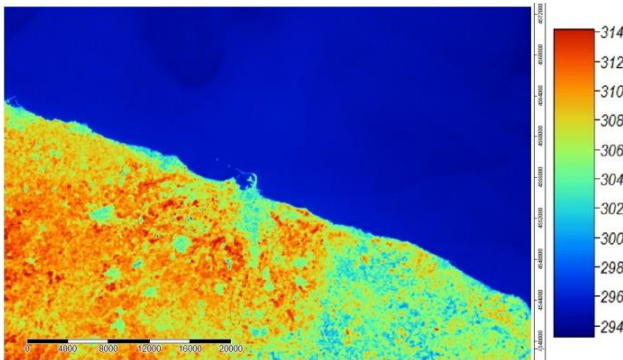


Figura 2. Esempio di LST ottenuta tramite l'algoritmo RTE applicato ad un'immagine diurna Landsat-8 del 24 settembre 2013.

Data la mancata disponibilità di misurazioni *in-situ*, la LST ottenuta è stata messa a confronto con due ulteriori LSTs calcolate mediante gli algoritmi di Qin et al.'s (2001) e Jiménez-Muñoz et al.'s (2009), che sono stati sviluppati dai rispettivi autori al fine di ottenere la mappa della temperatura con un procedimento alternativo che non necessiti della conoscenza *a priori* dei parametri atmosferici. Dal confronto, evidenziato dall'istogramma dei residui (Fig. 3), si può notare come la differenza dei valori sia prossima allo zero e, quindi, l'algoritmo

RTE utilizzato seppur senza misurazioni *in loco* ha un'accuratezza prossima a quella degli altri due.

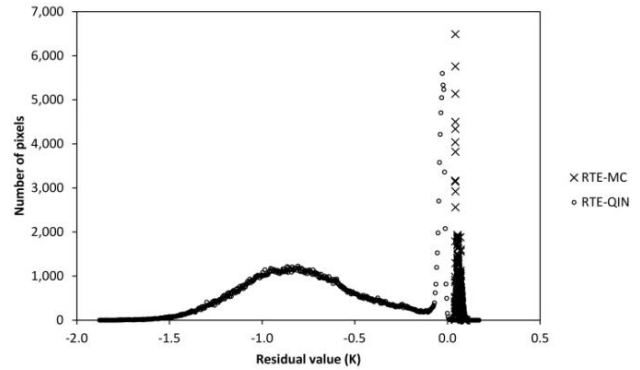


Figura 3. Iistogramma delle differenze fra RTE e gli altri due algoritmi utilizzati; l'asse X rappresenta il bias fra le LSTs mentre l'asse Y il numero di pixel; RTE-QIN si riferisce alla differenza fra la LST calcolata con il metodo RTE e quella con il metodo di Qin et al. (2001), RTE-MC è la differenza fra il metodo RTE e quello Jiménez-Muñoz et al. (2009).

2.4 Stima dell'emissività

Valori accurati della LST possono essere ottenuti solo se l'emissività superficiale è stata determinata accuratamente (Sobrino et al., 2012); una variazione dell'emissività pari a 0,01 unità implica un errore della temperatura di circa $0,5^{\circ}$. Di conseguenza la stima dell'emissività è un punto cruciale, specie in contesti come le aree urbane, che constano numerose superfici eterogenee. In letteratura è possibile trovare vari metodi per la determinazione image-based dell'emissività, come ad esempio: Temperature and Emissivity Separation method (TES) (Gillespie et al., 1998) e l'NDVI threshold method (Sobrino et al., 2004); ciononostante l'approccio migliore per la stima dell'emissività nelle aree urbane è quello derivante dalla classificazione (Sobrino et al., 2012). A tale scopo, per il presente lavoro si è utilizzata la mappa Corine Land Cover (CLC) di 4° livello ottenuta dal Sistema Informativo Territoriale della Regione Puglia, rettificata nel sistema WGS84 UTM e ricampionata secondo l'algoritmo nearest-neighbor a 30 m (Fig. 4).

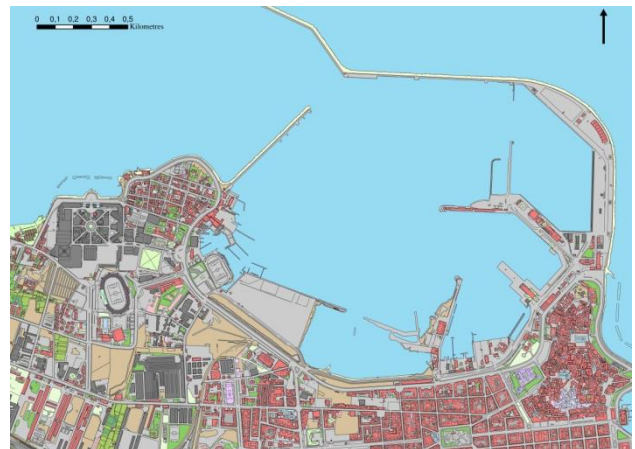


Figura 4. Particolare della mappa Corine Land Cover al quarto livello di classificazione.

Sulla base della classificazione CLC, ad ogni tipologia di superficie è stato assegnato il corrispettivo valore di emissività determinato tramite le ASTER spectral libraries applicando le funzioni filtro relative alle bande 10 e 11 delle immagini

Landsat-8. I risultati sono stati confrontati con quelli ottenuti tramite due ulteriori metodi di classificazione: ciascuna immagine è stata classificata con gli algoritmi Maximum Likelihood e K-means, rispettivamente supervised e unsupervised. Dal confronto effettuato con verità a terra su aree campione, il risultato più veritiero è risultato il metodo basato sulla CLC, giustificabile dal fatto che il dato di partenza ha una risoluzione di 5 m e che quindi, nonostante il ricampionamento, ha permesso di ottenere valori più accurati rispetto agli altri due approcci image-based con risoluzione di 30 m.

2.5 Calcolo dello Sky view factor, del Normalized Difference Vegetation Index e del Vegetation fraction

Lo SVF è un indice adimensionale che va da 0 ad 1 e si definisce come il rapporto fra la radiazione ricevuta da una superficie piana e quella dell'intero ambiente radiativo emisferico (Watson and Johnson., 1987). Diversi studi evidenziano la sua capacità nel descrivere il fenomeno dei canyon urbani. La presenza di edifici e altri elementi che intercettano la radiazione uscente provocano l'ostruzione della vista del cielo generando bassi valori dello SVF; al contrario, in superfici piate e prive di ostacoli presentano alti valori dello stesso. Lo SVF è stato calcolato per ogni pixel mediante la seguente equazione (Boehner and Antonic, 2008):

$$SVF = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} [\cos\beta \cos^2\varphi + \sin\beta \cos(\phi - \alpha)(90 - \varphi - \sin\varphi \cos\varphi)] d\phi \quad (4)$$

dove β e α sono rispettivamente l'angolo di inclinazione della superficie e il surface aspect calcolato dal DSM, φ è l'angolo dell'orizzonte e ϕ è la direzione dell'azimut. Ulteriori dettagli sono presenti in Boehner and Antonic (2008), Hantzschel et al. (2005) e Oke, (2000).

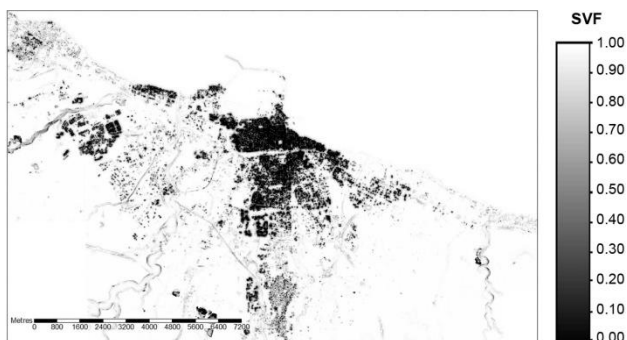


Figura 5. Distribuzione spaziale dello SVF

Il DEM è stato costruito tramite la somma del DTM e la mappa delle altezze degli edifici, entrambi ottenuti dal Sistema Informativo Territoriale della Regione Puglia. Lo SVF è stato calcolato con una risoluzione di 1 m e successivamente ricampionato a 30 m (Fig. 5) mediante l'algoritmo B-Spline interpolation (Lee et al., 1997). Nella tabella seguente sono riportate le varie categorie di morfologia urbana in relazione ai valori ottenuti di SVF:

Valori di SVF	Morfologia Urbana
1 - 0.9	spazi aperti
0.9 - 0.8	bassa densità/zona industriale
0.8 - 0.7	tessuto compatto a densità media
0.7 - 0.6	centro urbano compatto
< 0.6	nuclei sparsi ad alta densità

Tabella 1 - valori dello SVF in relazione alle varie tipologie di morfologia urbana nelle immagini analizzate.

L'NDVI è definito come:

$$NDVI = \frac{\rho_{nir} - \rho_{red}}{\rho_{nir} + \rho_{red}} \quad (5)$$

dove ρ_{nir} e ρ_{red} sono i valori di riflettanza relativi alle bande del vicino infrarosso e del rosso.

Il Pv può essere calcolato dall'NDVI utilizzando la seguente equazione (Carlson and Ripley., 1997):

$$Pv = \frac{(NDVI - NDVI_{min})^2}{(NDVI_{max} - NDVI_{min})^2} \quad (6)$$

dove $NDVI_{min}$ e $NDVI_{max}$ corrispondono rispettivamente ai valori di NDVI per suolo nudo e densa vegetazione (Fig. 6).



Figura 6. Mappa dello Pv; le aree più chiare sono quelle con maggior presenza di verde, le più scure hanno quantitativi prossimi allo zero.

3. ANALISI DEI RISULTATI

3.1 Relazione fra LST e SVF

Per analizzare le relazioni fra la morfologia urbana, così come descritta dallo SVF, e la LST relativa all'area urbana di Bari si è proceduto nel seguente modo (Scarano and Sobrino, 2015).

Per ogni pixel di ciascuna immagine satellitare sono stati determinati i valori di SVF e LST. Attraverso la classificazione CLC, sono stati selezionati solo i pixel relativi all'edificato, escludendo dall'analisi quelli ricadenti nelle restanti tipologie di superficie. Nella 7-i sono riproposti gli scatter-plot in cui la suddetta relazione viene descritta tramite una nuvola di punti.

Per valutare più approfonditamente il comportamento della funzione, la variabile SVF è stata suddivisa in intervalli regolari di 0,1 unità. Per ciascuno di questi è stato calcolato il valore medio della temperatura (Fig. 7-ii). Un approccio simile è stato seguito anche in Li et al., 2011, Chen et al., 2006, Yuan and Bauer, 2007, Gillies and Carlson, 1995. In questo modo l'andamento della correlazione appare più evidente, ma ciononostante non rappresenta adeguatamente lo scattering della nuvola di punti di partenza; ogni intervallo di SVF infatti presenta una quantità di punti variabile, non sempre significativa. Per questo motivo il numero di punti di ciascun intervallo è stato aggiunto come terza variabile ed espressa nel grafico dalla dimensione dei punti della funzione (Fig. 7-iii).

Questo procedimento è stato ripetuto per tutte le immagini Landsat-8 considerate al fine di confrontarne i risultati.

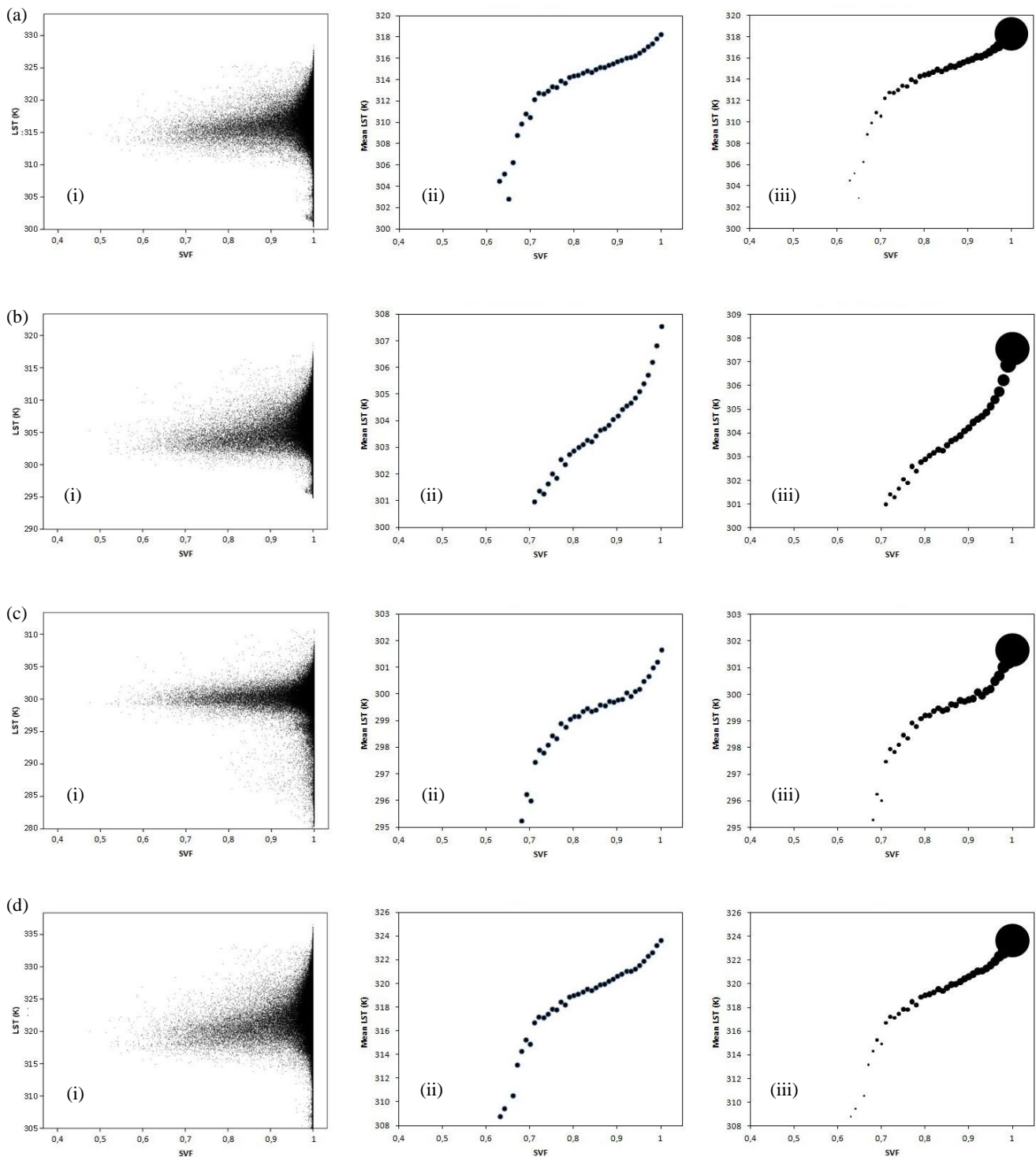


Figura 7. Scatter plot di LST vs. SVF relative all'area di studio nelle seguenti date: (a) Aug. 07, 2013; (b) Sep. 24, 2013; (c) Oct. 10, 2013; (d) Aug. 10, 2014. La prima colonna (i) mostra la nuvola di punti pixel-by-pixel risultante dalla correlazione fra LST e SVF; nella seconda colonna (ii) sono mostrati i grafici con asse X la LST_{mean} e asse Y lo SVF suddiviso in intervalli; nella terza colonna (iii) sono raffigurati i grafici tenendo in considerazione il numero totale di punti che determinano la LST_{mean} in ogni intervallo di SVF.

Per poter effettuare delle valutazioni sull'andamento delle funzioni è necessario inserire i vari scatter plot in un unico grafico; per fare ciò, occorre preliminarmente normalizzare la LST in modo da rimuovere dall'analisi gli effetti stagionali (McVicar and Lupp, 1998):

$$NDTI = \frac{T_{max} - T_s}{T_{max} - T_{min}} \quad (7)$$

dove l'acronimo NDTI è definito come Normalized Difference Temperature Index, T_{max} è il valore massimo della LST, T_{min} è il valore minimo della LST, T_s è il generico valore della LST riferito al pixel. Nella figura 8 sono mostrati gli scatter plot che illustrano graficamente il nuovo andamento della funzione NDTI-SVF per ciascuna delle quattro immagini diurne analizzate.

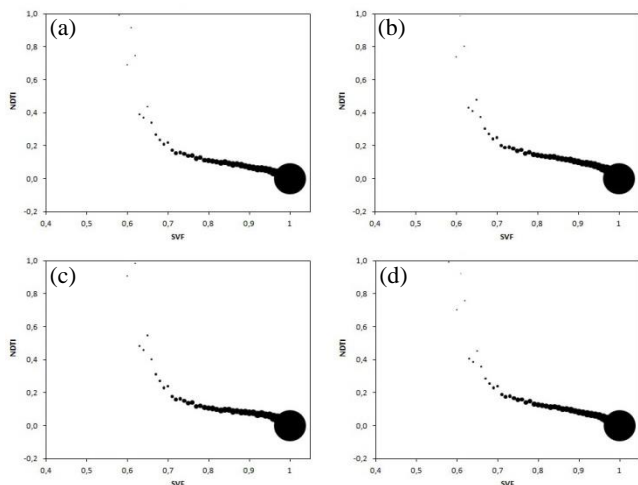


Figura 8. grafici NDTI vs. SVF relativi alle seguenti date: (a) 07-08-2013; (b) 24-09-2013; (c) 10-10-2013; (d) 10-08-2014.

3.2 Relazione fra LST-NDVI e LST-Pv

L'analisi segue l'impostazione già descritta nel paragrafo precedente. Occorre specificare come anche in questo caso lo studio si focalizza esclusivamente sui pixel relativi all'area

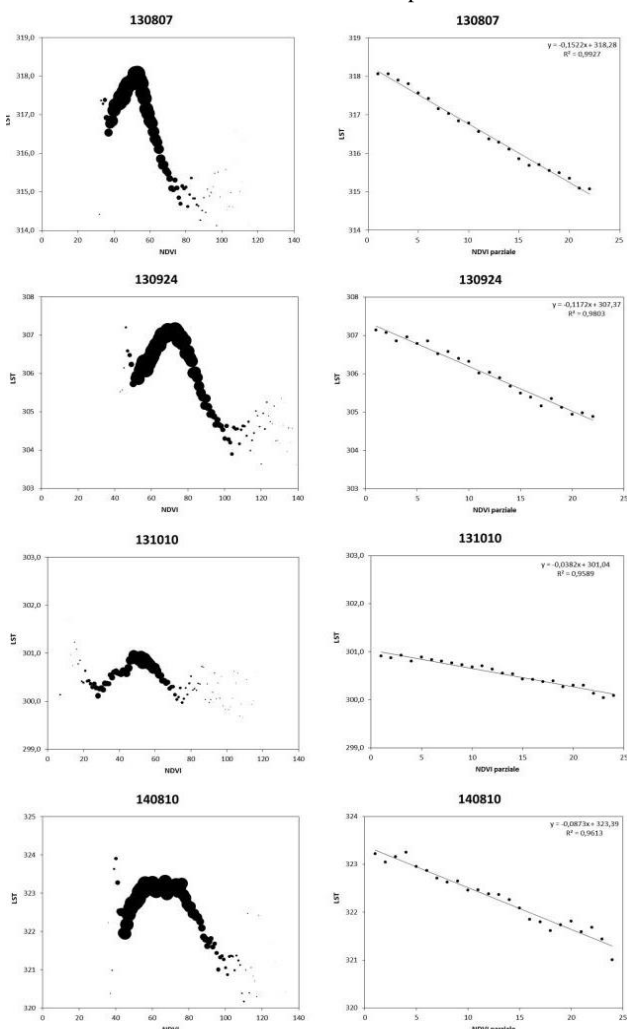


Figura 9 – nella colonna a sinistra è rappresentato il grafico NDVI vs. LST; nella colonna a destra, per ciascuna immagine è stato ingrandita la porzione relativa agli intervalli di NDVI direttamente relativi alla vegetazione.

urbana, escludendo le aree scoperte e vegetate esterne all'edificato urbano.

Gli scatter plot fra la LST e le due variabili relative alla vegetazione sono ottenuti secondo lo stesso procedimento sopra esposto; nella figura 9 è riportato quello corrispondente alla relazione NDVI-LST.

La relazione che lega l'NDVI - e il Pv - alla LST è fortemente irregolare per diverse ragioni. Innanzitutto, come è noto, la vegetazione varia in funzione delle stagioni; inoltre, a seconda dei valori assunti dagli indici, si fa riferimento a superfici diverse (per es. acqua per valori di NDVI prossimi a -1; suolo arido e rocce per valori compresi fra -0,1 e 0,1; eccetera). Partendo da questa premessa è possibile evidenziare una forte relazione lineare fra la LST-NDVI e LST-Pv, se si considerano solo quei valori appartenenti al range relativo alla presenza di vegetazione. Nella figura 9 sono riproposte nella colonna di sinistra le relazioni NDVI-LST_{mean} e in quella di destra gli ingrandimenti delle stesse funzioni negli intervalli di NDVI che corrispondono a vegetazione di tipo urbano (parchi, aiuole, campi da gioco, giardini, cortili).

4. DISCUSSIONE

4.1 Influenza della morfologia urbana sulla LST

Dall'analisi dei risultati si evince (Fig. 7) una relazione positiva fra la LST e lo SVF; appare evidente come la temperatura diminuisce proporzionalmente allo SVF. Poiché entrambe le variabili sono state determinate da dati di partenza diversi, si può escludere l'influenza dovuta ad un'eventuale reciproca dipendenza lineare, fenomeno che spesso si propone quando si considerano variabili calcolate con approcci image-based. Dai risultati emerge che nelle aree urbane più dense, con valori di SVF pari a 0.65, la LST diminuisce in media di circa 4 K nel periodo invernale e 7 K nel periodo estivo; per valori fra 0.75 e 1 la funzione segue con buona approssimazione un andamento lineare, mentre per valori più bassi, rappresentativi del centro storico molto compatto, il trend incrementa significativamente. Questo comportamento è perfettamente in linea con gli studi presenti in letteratura. Di giorno infatti la LST è fortemente dipendente dalla maggiore o minore possibilità di accesso alla superficie da parte della radiazione. A causa della presenza di ostacoli e della presenza di ombre le superfici delle aree maggiormente dense si riscaldano più lentamente; di notte invece, le superfici con alti valori di SVF si raffreddano rapidamente e diventano più fredde rispetto alle zone con valori inferiori. Analizzando il fenomeno al livello della strada, dove le distanze fra gli edifici sono ridotte e quindi i valori di SVF sono molto bassi, il raffreddamento subisce un rallentamento a causa dell'effetto canyon, per il quale le radiazioni ad onda lunga impattano e rimbalzano ripetutamente sulle facciate degli edifici, rallentandone la dispersione nell'ambiente.

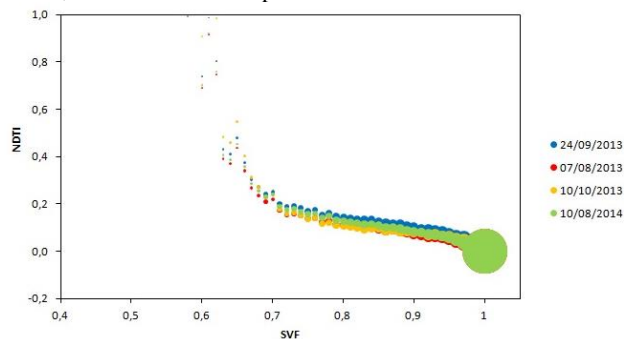


Figura 10 – il grafico mostra tutte insieme le correlazioni fra NDTI e SVF; appare evidente come queste seguano lo stesso trend, essendo pressoché sovrapposte.

Ulteriori considerazioni possono essere fatte in merito alla figura 10 che aggrega in se le relazioni NDTI-SVF delle varie immagini oggetto di studio. Poiché tutte le funzioni ripropongono in modo quasi perfettamente sovrapponibile lo stesso andamento, si può desumere come, durante le ore diurne, trascurati gli effetti stagionali mediante la normalizzazione della temperatura, la legge che regola tale relazione sia univocamente definibile.

4.2 Influenza della vegetazione sulla LST

La variazione non lineare e stagionale della relazione fra NDVI-LST di fatto esclude la possibilità di predire la temperatura sulla base di questa variabile (Gillies and Carlson, 1995; Owen et al., 1998; Weng et al., 2004; Yuan and Bauer, 2007). Anche la proposta di Weng et al., (2004) di utilizzare il Pv al posto dell'NDVI non ha prodotto, in questo caso di studio, significativi benefici dovuti al fatto che anche questo parametro risente degli stessi limiti dell'NDVI (Yuan and Bauer, 2007). Dai risultati emerge chiaramente che quando l'NDVI assume valori che corrispondono a superfici non vegetate, come acqua, nuvole, sabbia, asfalto, perde significatività e l'andamento della funzione è irregolare. Restringendo l'analisi a quei valori corrispondenti a superfici vegetate, questa presenta una forte relazione lineare con valori di R^2 fra 0.96 e 0.99. Il Pv, al contrario delle aspettative, presenta, per ciascuna immagine, valori leggermente inferiori.

5. CONCLUSIONI

Sulla base di questi elementi è possibile affermare con certezza che la LST è quindi fortemente influenzata dalla presenza di verde essendone dipendente linearmente in modo inversamente proporzionale. Questa conclusione conferma gli effetti mitigativi che la vegetazione esercita nelle aree urbane, riducendo il fenomeno dell'UHI. Le considerazioni fatte sullo SVF dimostrano come la presenza di verde possa massimizzare i propri effetti benefici se collocato nelle aree in cui avviene la maggior escursione termica, come i centri urbani e le aree edificate ad alta densità.

BIBLIOGRAFIA

Bärring, L., J.O. Mattsson and S. Lindqvist. 1985. Canyon geometry, street temperatures and urban heat island in Malmii, Sweden. *Journal of Climatology*. 5, 433-444.

Berk, A., G. P. Anderson, P. K. Acharya, M. L. Hoke, J. H. Chetwynd, L. S. Bernstein, et al. 2003. *MODTRAN4 version 3 revision 1 user's manual*. Hanscom Air Force Base. Mass: Air Force Res. Lab.

Boehner, J., and O. Antonic. 2008. Land-surface parameters specific to topo-climatology. in: Hengl, T. and H. Reuter, (Eds.) *Geomorphometry - Concepts, Software, Applications*.

Bottyán, Z., and J. Unger. 2003. A multiple linear statistical model for estimating the mean maximum urban heat island. *Theoretical and Applied Climatology*. 75:233-243.

Brown, M., and S. Grimmond. 2001. Sky view factor measurements in downtown Salt Lake City. Data Report for the *DOE CBNP URBAN Field Experiment*. October 2000. LA-UR-01-1424.

Buyantuyev, A., and J. Wu. 2010. Urban heat islands and landscape heterogeneity: Linking spatiotemporal variations in

surface temperatures to land-cover and socioeconomic patterns. *Landscape Ecology* 25 (1): 17-33.

Caprioli, M., C. Ceppi, U. Falchi, F. Mancini, M. Scarano. 2013. Assessing the relationship between urban parameters and the LST derived by satellite and aerial imageries in a GIS environment: the case of Bari (Italy). *EGU General Assembly 2014*. Vol. 16, EGU2014-12203, 2014.

Caprioli, M., U. Falchi, M. Scarano, M. Zicarelli. 2013. Valutazione della dispersione termica urbana con metodi satellitari. *17 Conferenza Nazionale ASIT, Riva del Garda, 5 - 7 Novembre 2013*. DOI: 10.13140/RG.2.1.1610.0009

Ceppi, C., and M. Scarano. 2014. Investigating, by means of the spatial analysis, the relationship between urban parameters and the LST derived by satellite imageries in a GIS environment: the case of Bari (Italy). *1st Workshop on the State of art and Challenges Of Research Efforts @POLIBA (SCORE@POLIBA)*.

Chander, G., and D. P. Groeneveld. 2009. Intra-annual NDVI validation of the Landsat 5 TM radiometric calibration. *International Journal of Remote Sensing* 30 (6): 1621-1628.

Chen, L., E. Ng, X. An, C. Ren, M. Lee, U. Wang, Z. He. 2012. Sky view factor analysis of street canyons and its implications for daytime intra-urban air temperature differentials in high-rise, high-density urban areas of Hong Kong: a GIS-based simulation approach. *International Journal of Climatology* 32: 121-36.

Chen, X. L., H. M. Zhao, P. X. Li, Z. Y. Yin. 2006. Remote sensing image-based analysis of the relationship between urban heat island and land use/cover changes. *Remote Sensing of Environment* 104: 133-46.

Cheval, S., and A. Dumitrescu. 2009. The July urban heat island of Bucharest as derived from modis images. *Theoretical and Applied Climatology* 96 (1): 145-153.

Chudnovsky, A., E. Ben-Dor, and H. Saaroni. 2004. Diurnal thermal behavior of selected urban objects using remote sensing measurements. *Energy and Buildings*. 36 (11): 1063-74.

Dousset, B., F. Gourmelon. 2003. Satellite multi-sensor data analysis of urban surface temperature and land cover. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 58 (1-2), 43-54.

Eliasson, I. 1990. Urban geometry, surface temperature and air temperature. *Energy Buildings*. 15-16: 141-145

Eliasson, I. 1992. Infrared thermography and urban temperature patterns. *International Journal of Remote Sensing*. 13: 869-879

Eliasson, I. 1996. Urban nocturnal temperatures, street geometry temperatures and land use. *Atmospheric Environment* 30 (3): 379-92.

Elvidge, C.D., K.E. Baugh, E.A. Kihn, H.W. Kroehl, E.R. Davis, and C.W. Davis. 1997. Relation between satellite observed visible- near infrared emissions, population, economic activity and electric power consumption. *International Journal of Remote Sensing*. 18:1373-1379.

Fan, H., and D.J. Sailor. 2005. Modeling the impacts of anthropogenic heating on the urban climate of Philadelphia: a comparison of implementations in two PBL schemes. *Atmospheric Environment*. 39:73-84.

- Gál, T., F. Lindberg, and J. Unger. 2009. Computing continuous sky view factors using 3D urban raster and vector databases: comparison and application to urban climate. *Theoretical and Applied Climatology* 95: 111–23.
- Gillespie, A. R., S. Rokugawa, S. Hook, T. Matsunaga, A. B. Kahle. 1998. A temperature and emissivity separation algorithm for Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 36: 1113–1126.
- Gillies, R. R., and T. N. Carlson. 1995. Thermal remote sensing of surface soil water content with partial vegetation cover for incorporation into climate models. *Journal of Applied Meteorology*. 34: 745–56.
- Goh, K.C., C. H. Chang. 1999. The relationship between height to width ratios and the heat island intensity at 22:00 h for Singapore. *International Journal of Climatology*. 19: 1011–1023
- Hantzschel, J., V. Goldberg, C. Bernhofer. 2005. GIS-based regionalization of radiation, temperature and coupling measures in complex terrain for low mountain ranges. *Meteorological Applications* 12 (01): 33–42.
- Ho, Hung Chak, Anders Knudby, Paul Sirovyak, Yongming Xu, Matus Hodul, and Sarah B. Henderson. 2014. Mapping maximum urban air temperature on hot summer days. *Remote Sensing of Environment* 154. Elsevier Inc.: 38–45.
- Jiménez-Muñoz, J. C., and J. A. Sobrino. 2003. A generalized single-channel method for retrieving land surface temperature from remote sensing data. *Journal of Geophysical Research*. 108 (D22): 4688.
- Jiménez-Muñoz, J.C., J. Cristóbal, J. A. Sobrino, G. Sòria, M. Ninyerola, X. Pons. 2009. Revision of the single-channel algorithm for land surface temperature retrieval from landsat thermal-infrared data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 47 (1): 339–349.
- Johnson, D. B. 1985. Urban modification of diurnal temperature cycles in Birmingham. *Journal of Climatology*. 5:221–225.
- Kalnay, E., and M.Cai. 2003. Impact of urbanization and land-use change on climate. *Nature* 423: 528–531.
- Landsberg, H. E., 1981. *The urban climate*. Academic Press, New York
- Lee, S., G. Wolberg, S. Y. Shin. 1997. Scattered data interpolation with multilevel B-Splines. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*. Vol. 3, No. 3
- Li, J., C. Song, L. Cao, F. Zhu, X. Meng, J. Wu. 2011. Impacts of landscape structure on surface urban heat islands: A case study of Shanghai, China. *Remote Sensing of Environment* 115 (12): 3249–3263.
- Lindberg, F., I. Eliasson, B. Holmer. 2003. Urban geometry and temperature variations. In: Klyzik K, Oke TR, Fortuniak K, Grimmond CSB, Wibig J (eds) Proc 5th *International Conference on Urban Climate*, Vol 1. University of Lodz, Lodz, p 205–208.
- Lindberg, F., and C. S. B. Grimmond. 2011. Nature of vegetation and building morphology characteristics across a city: influence on shadow patterns and mean radiant temperatures in London. *Urban Ecosystems*. 14: 617–34.
- Lo, C. P., D. A. Quattrochi, J. C. Luvall. 1997. Application of high-resolution thermal infrared remote sensing and GIS to assess the urban heat island effect. *International Journal of Remote Sensing* 18 (2), 287–304.
- Lu, Dengsheng, and Qihao Weng. 2006. Use of impervious surface in urban land-use classification. *Remote Sensing of Environment* 102 (1-2): 146–60.
- McVicar, T. R., and D. L. B. Jupp. 1998. The current and potential operational uses of remote sensing to aid decisions on drought exceptional circumstances in Australia: a review. *Agricultural Systems* 57 (3): 399–468.
- Nunez, M., and T. R. Oke. 1977. The energy balance of an urban canyon. *Journal of Applied Meteorology* 16: 11–19.
- Oke, T. R. 1987. *Boundary layer climates*. Routledge, London, New York.
- Oke, T. R. 1988. Street design and urban canopy layer climate. *Energy Buildings* 11:103–113.
- Oke, T.R. 2000. *Boundary Layer Climates*. New York: Taylor & Francis.
- Park, H. S. 1987. Variations in the urban heat island intensity affected by geographical environments. *Environmental Research Center Papers*. 11, The University of Tsukuba, Ibaraki.
- Prihodko, L. and S.N. Goward. 1997. Estimation of air temperature from remotely sensed surface observations. *Remote Sensing of Environment* 60, 335–346.
- Qin, Z., A. Karnieli, P. Berliner. 2001. A mono-window algorithm for retrieving land surface temperature from Landsat TM data and its application to the Israel–Egypt border region. *International Journal of Remote Sensing* 22 (18): 3719–3746.
- Santos, I. G., H. G. Lima, E. S. Assis. 2003. A comprehensive approach of the sky view factor and building mass in an urban area of the city of Belo Horizonte, Brazil. In: Klyzik K., Oke T. R., Fortuniak K., Grimmond C. S. B., Wibig J. (eds) Proc. 5th *International Conference on Urban Climate*, Vol 2. University of Lodz, Lodz, p 367–370.
- Scarano, M., & Sobrino, J. A. (2015). On the relationship between the sky view factor and the land surface temperature derived by Landsat-8 images in Bari, Italy. *International Journal of Remote Sensing*, 36(19-20), 4820–4835. DOI: 10.1080/01431161.2015.1070325
- Sobrino, J. A., N. Raissouni, Y. Kerr, A. Olioso, M. Lopez-Garcia, A. Belaid, M. H. El Kharraz, J.Cuenca, and L. Dempere. 2006. *Teledetección*. Valencia: Servicio de Publicaciones Universidad de Valencia.
- Sobrino, J. A., J. C. Jiménez-Muñoz, L. Paolini. 2004. Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5. *Remote Sensing of Environment* 90 (4): 434–440.
- Sobrino, J. A., R. Oltra-Carrió, J. C. Jiménez-Muñoz, Y. Julien, G. Sòria, B. Franch, C. Mattar. 2012. Emissivity mapping over urban areas using a classification-based approach: Application to the Dual-use European Security IR Experiment (DESIREX).

- International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 18 (1): 141–147.
- Streutker, D. R. 2002. A remote sensing study of the urban heat island of Houston, Texas. *International Journal of Remote Sensing* 23 (13): 2595–2608.
- Svensson, M. K., 2004. Sky view factor analysis – implications for urban air temperature differences. *Meteorological Applications* 11 (3): 201–211.
- Unger, J., 2004. Intra-urban relationship between surface geometry and urban heat island: review and new approach. *Climate Research*. 27: 253–64.
- Upmanis, H., I. Eliasson, S. Lindquist. 1998. The influence of green areas on nocturnal temperatures in a high latitude city (Göteborg, Sweden). *International Journal of Climatology*. 18:681–700.
- Upmanis, H., 1999. The influence of sky view factor and land-use on city temperatures. In: Upmanis H (ed) *Influence of parks on local climate*. A 43: paper 3, Earth Sciences Centre, Göteborg University.
- Vieira, H., J. Vasconcelos. 2003. Urban morphology characterization to include in a GIS for climatic purposes in Lisbon. Discussion of two different methods. In: Klyzik K., Oke T. R., Fortuniak K., Grimmond C. S. B., Wibig J. (eds) *Proc 5th International Conference on Urban Climate*. Vol 2. University of Lodz, Lodz, p 417–420
- Voogt, J. A. 2002. Urban heat island. Vol. 3: 660–666, in *Causes and consequences of global environmental change of Douglas*, I. Chichester: John Wiley & Sons, Ltd.
- Watson, I.D., and G.T. Johnson. 1987. Graphical estimation of sky view-factors in urban environments. *Journal of Climatology* 7: 193-197.
- Weng, Q. 2001. A remote sensing–GIS evaluation of urban expansion and its impact on surface temperature in the Zhujiang delta, China. *International Journal of Remote Sensing* 22 (10): 1999–2014.
- Weng, Q., 2003. Fractal analysis of satellite-detected urban heat island effect. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 69 (5), 555–566.
- Weng, Q., D. Lu, J. Schubring. 2004. Estimation of land surface temperature–vegetation abundance relationship for urban heat island studies. *Remote Sensing of Environment* 89 (4): 467–483.
- Weng, Q., and D. A. Quattrochi. 2006. Thermal remote sensing of urban areas: An introduction to the special issue. *Remote Sensing of Environment* 104 (2): 119–122.
- Weng, Q., D. Lu, B. Liang. 2006. Urban Surface Biophysical Descriptors and Land Surface Temperature Variations. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 72 (11): 1275–86.
- Weng, Q. 2009. Thermal infrared remote sensing for urban climate and environmental studies: Methods, applications, and trends. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* 64: 335-344.
- Weng, Q. 2012. Remote sensing of impervious surfaces in the urban areas: requirements, methods, and trends. *Remote Sensing of Environment* 117 (February). Elsevier Inc.: 34–49.
- Wong, M. S., J. Nichol, and E. Ng. 2011. A study of the ‘wall effect’ caused by proliferation of high-rise buildings using GIS techniques. *Landscape and Urban Planning*. 102: 245–53.
- Wu, C. 2004. Normalized spectral mixture analysis for monitoring urban composition using ETM+ imagery. *Remote Sensing of Environment*, 93(4), 480–492.
- Wu, J., G. D. Jenerette, A. Buyantuyev, C. L. Redman. 2011. Quantifying spatiotemporal patterns of urbanization: The case of the two fastest growing metropolitan regions in the United States. *Ecological Complexity* 8 (1): 1–8.
- Xian, George, and Mike Crane. 2006. An analysis of urban thermal characteristics and associated land cover in tampa bay and las vegas using landsat satellite data. *Remote Sensing of Environment* 104 (2): 147–56.
- Xiao, Rongbo, Qihao Weng, Zhiyun Ouyang, Weifeng Li, Erich W. Schienke, and Zhaoming Zhang. 2008. Land surface temperature variation and major factors in Beijing, China. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 74 (4): 451–61.
- Yamashita, S., K. Sekine, M. Shoda, K. Yamashita, Y. Hara. 1986. On the relationships between heat island and sky view factor in the cities of Tama River Basin, Japan. *Atmospheric Environment* 20:681–686.
- Yuan, Fei, and Marvin E. Bauer. 2007. Comparison of impervious surface area and normalized difference vegetation index as indicators of surface urban heat island effects in landsat imagery. *Remote Sensing of Environment* 106: 375–86.
- Yuan, Y., R.M. Smith, and W.F. Limp. 1997. Remodeling census population with spatial information from Landsat TM imagery. *Computers, Environment and Urban Systems*. 21:245–258.