

Life METRO ADAPT

Action C1

“Climate analysis and Vulnerability assessment at Metropolitan level”

Project Name:	METRO ADAPT: enhancing climate change adaptation strategies and measures in the Metropolitan City of Milan		
Contract Number:	LIFE 17 CCMTI000080 — CUP 143E17000230007		
Deliverable number:	Time series of Heat Maps, report and data access tools		
Due date of deliverable:	31/07/2019		
Actual submission date:	26/07/2019		
Deliverable leader:	e-GEOS		
Deliverable contributors :	Città Metropolitana di Milano		
Revision	1.0		
Nature of the deliverable			
R	Report		X
O	Other (maps)		X
Dissemination level			
PU	Public		X
PI	Proprietary Information, only for Partner and Team members and, NOT for public information.		

ISSUE	DATE	AUTHOR	VERIFIED	APPROVED	REASON OF THE MODIFICATION
1.0	26.07.19	Pierluigi Adami (EG) Achille Ciappa (EG) Maria Lucia Magliozzi (EG) Monica Palandri (EG) Cinzia Davoli (CMM)	A.Ciappa	M.Palandri	First Issue

TABLE OF CONTENTS

1. ABSTRACT	3
2. INTRODUZIONE	5
2.1. SCOPO DEL DOCUMENTO	5
2.2. ACRONIMI ED ABBREVIAZIONI	5
2.2.1. Elenco degli Acronimi ed Abberviazioni	5
2.3. DOCUMENTI APPLICABILI E DI RIFERIMENTO	6
2.3.1. Documenti Applicabili	6
2.3.2. Documenti di Riferimento e Bibliografia	6
3. ISOLA DI CALORE URBANO (Città Metropolitana di Milano)	8
3.1. Introduzione	8
3.2. Dati di input	9
Dati MODIS – descrizione e pre-processing	9
Landsat processing	12
3.3. Procedura di downscaling	14
3.4. Periodi di onde di calore nelle estati 2015 -2018	16
3.5. Mappe termiche diurne e notturne	18
3.6. Analisi dei dati notturni	19
Selezione dei dati MODIS	19
Selezione delle immagini Landsat	21
3.7. Calcolo delle anomalie termiche notturne	22
3.8. Discussione	23
3.9. Esempio di anomalia termica diurna	25
4. Tool di accesso ai dati	25
5. Bibliografia	27

1. ABSTRACT

Il prodotto “Time serie of Heat Maps report and data access tools” è stato sviluppato nell’ambito dell’Azione C1 del progetto LIFE METRO-ADAPT, dedicata all’analisi climatica a livello di area metropolitana.

Il prodotto è stato messo a punto con l’obiettivo di fornire uno strumento operativo, utile a livello della città metropolitana per migliorare i processi di governance e supportare l’attività conoscitiva del territorio e di pianificazione a vari livelli, con dati obiettivi.

L’obiettivo dell’Azione in oggetto è di giungere, per il territorio della Città Metropolitana di Milano, a un’analisi di rischio per le temperature estreme, rivolta alla popolazione più vulnerabile (anziani e bambini), durante le onde di calore estivo. In particolare, in alcune aree della città, a causa della conformazione urbana e all’effetto antropico, si riscontrano temperature molto elevate anche durante la notte e per diversi giorni consecutivi (Isole di Calore Urbano, UHI). Vari studi hanno accertato che, durante le onde di calore, la mortalità nelle aree urbane aumenta significativamente. È dunque di grande importanza per le pubbliche amministrazioni e per gli enti preposti alla prevenzione e al soccorso (Protezione Civile) poter conoscere in modo preciso le aree della città dove si verifica il fenomeno delle Isole di Calore, al fine di provvedere con interventi urgenti (ad es. la distribuzione di acqua o la delocalizzazione delle persone vulnerabili in zone più fresche) e con misure di pianificazione urbanistica volte all’adozione di strumenti di adattamento climatico, quali ad esempio l’installazione di infrastrutture verdi e blu.

La disponibilità di immagini termiche satellitari a varie risoluzioni e con frequenze di acquisizione quotidiane, consente di avere un quadro del comportamento termico dell’area metropolitana molto preciso. A differenza dei dati delle centraline meteorologiche installate a terra, che misurano la temperatura dell’aria in alcuni punti della città, il dato satellitare misura la temperatura della superficie terrestre in modo spazialmente continuo, permettendo di avere un’informazione termica in ogni punto dell’area metropolitana.

Le immagini termiche satellitari sono disponibili da varie missioni spaziali, tra le quali quelle dei satelliti geostazionari europei Meteosat, e quelli eliosincroni Aqua, Terra, Landsat-8 (USA) e Sentinel-3 (UE).

La metologia messa a punto nel progetto METRO-ADAPT prevede, per l’analisi di pericolosità termica, l’utilizzo di dati satellitari multi-piattaforma e su scala pluriennale, in modo da individuare le aree della città metropolitana dove si sono costantemente ripetuti fenomeni di isole di calore estremo. A tal fine, visto che i dati dei satelliti europei Sentinel-3 della serie Copernicus sono disponibili solo a partire dal 2017, si è optato per l’utilizzo delle immagini termiche inviate dal sensore Modis del satellite Aqua della NASA (1 Km risoluzione spaziale). In particolare, l’orario di acquisizione notturna (ogni notte tra l’1 e le 3) è stato ritenuto ottimale per l’analisi delle isole di calore. Per garantire una migliore risoluzione spaziale a terra e una maggiore precisione nell’individuazione delle aree soggette a isole di calore, la metodologia messa a punto nel progetto METRO-ADAPT ha previsto l’integrazione del dato Modis con quello fornito dal sensore termico TIRS del satellite LANDSAT-8, che ha una risoluzione spaziale di 100 m (pixel da 30 m) ma con frequenza di ritorno sulla stessa area ogni 16 giorni.

Combinando in modo opportuno la frequenza di acquisizione quotidiana del sensore Modis e la più elevata risoluzione spaziale del sensore TIRS a bordo del LANDSAT-8, si ottengono immagini termiche quotidiane notturne a risoluzione 100 m, in grado di individuare con precisione le aree soggette a UHI.

L’analisi è stata condotta analizzando le immagini disponibili, sgombre di nubi, durante i periodi più caldi negli anni tra il 2015 e il 2018. Durante tale periodo si sono verificate diverse e prolungate onde di calore nell’area della Città Metropolitana di Milano, in particolare negli anni 2015 e 2017. Sono state identificate le zone di anomalie termiche – tipicamente nelle aree urbane più densamente edificate – dove la temperatura notturna risulta di diversi gradi superiore a quella delle zone rurali circostanti. È stata pertanto prodotta una Mappa delle anomalie termiche che individua le zone più soggette a caldo estremo.

Tutti i dati possono essere visualizzabili, gestiti, analizzati mediante un tool specifico rivolto agli utenti del settore, esperti e non.

The deliverables “Time series of Heat Maps report and data access tools” was developed as part of Action C1 of the LIFE METRO-ADAPT project, dedicated to climate analysis at metropolitan area level.

The product was developed with the aim of providing an operational tool, useful at the metropolitan level to improve governance processes and support the cognitive activity of the territory and planning at various levels, with objective data.

The objective of the Action in question is to reach, for the territory of the Metropolitan City of Milan, a risk analysis for extreme temperatures, aimed at the most vulnerable population (elderly and children), during summer heat waves. In particular, in some areas of the city, due to the urban conformation and the anthropic effect, there are very high temperatures even during the night and for several consecutive days (Islands of Urban Heat, UHI). Various studies have shown that mortality in urban areas significantly increases during heat waves. It is therefore of great importance for public administrations and for the bodies responsible for prevention and rescue (Civil Protection) to be able to know precisely the areas of the city where the phenomenon of the Heat Islands occurs, in order to provide for urgent interventions (for example the distribution of water or the relocation of vulnerable people to cooler areas) and with urban planning measures aimed at adopting climate adaptation tools, such as the installation of green and blue infrastructures.

The availability of thermal satellite images at various resolutions and with daily acquisition frequencies allows a picture of the thermal behavior of the metropolitan area to be very precise. Unlike the data of the meteorological stations installed on the ground, which measure the air temperature in some points of the city, the satellite datum measures the temperature of the earth's surface in a spatially continuous way, allowing thermal information to be obtained at each point of the Metropolitan area.

Satellite thermal images are available from various space missions, including those of the European geostationary satellites Meteosat, and the heliosynchronous ones Aqua, Terra, Landsat-8 (USA) and Sentinel-3 (EU).

The methodology developed in the METRO-ADAPT project provides, for the analysis of thermal hazard, the use of multi-platform satellite data on a multi-year scale, in order to identify the areas of the metropolitan city where phenomena of repeated islands of extreme heat. To this end, given that the data of the European Sentinel-3 satellites of the Copernicus series are available only from 2017, it was decided to use thermal images sent by the Modis sensor of the NASA Aqua satellite (1 Km spatial resolution). In particular, the night acquisition time (every night between 1 and 3) was considered optimal for the analysis of heat islands. To ensure better spatial resolution on the ground and greater precision in identifying areas subject to heat islands, the methodology developed in the METRO-ADAPT project involved the integration of the Modis datum with that provided by the satellite's TIRS thermal sensor LANDSAT-8, which has a spatial resolution of 100 m (30 m pixels) but with a return frequency on the same area every 16 days.

By appropriately combining the daily acquisition frequency of the Modis sensor and the highest spatial resolution of the TIRS sensor on board the LANDSAT-8, daily night-time thermal images are obtained at 100 m resolution, able to accurately identify areas subject to UHI.

The analysis was carried out by analyzing the available images, free of clouds, during the hottest periods in the years between 2015 and 2018. During this period there were several and prolonged heat waves in the area of the Metropolitan City of Milan, in particular in the years 2015 and 2017. The zones of thermal anomalies have been identified - typically in the most densely built urban areas - where the night temperature is several degrees higher than that of the surrounding rural areas. A Map of thermal anomalies was therefore produced which identifies the areas most subjected to extreme heat.

All data can be viewed, managed, analyzed using a specific tool aimed at industry users, experts and non-experts.

2. INTRODUZIONE

2.1. SCOPO DEL DOCUMENTO

L'azione C1 su "Analisi del clima e valutazione della vulnerabilità a livello metropolitano" comprende la lo studio e la realizzazione delle serie di mappe di Calore Urbano e il tool per accedere a tali dati.

L'azione C1 in generale mira a facilitare i decisori della città metropolitana di Milano (CMM) nell'uso delle informazioni utili allo sviluppo di efficaci strumenti di governance a livello regionale e locale. Questa azione fornirà il framework di conoscenza per supportare le azioni C2 e C3 attraverso lo sviluppo di diversi strumenti:

- Valutazione di vulnerabilità;
- Linee guida;
- Strumenti di formazione.

Il presente Report descrive come sono state pensate, progettate, realizzate le mappe di calore urbano e come possono essere pubblicate ai vari possibili utilizzatori.

2.2. ACRONIMI ED ABBREVIAZIONI

2.2.1. Elenco degli Acronimi ed Abberviazioni

Acronimi	Significato
CMM	Città Metropolitana di Milano
UIH	Urban Heat Islands
IPPC	Intergovernmental Panel on Climate Change
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
AVHRR	Advanced Very High Resolution Radiometer
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
GIS	Geographic information system
ESA	European Space Agency
MODIS	Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer
LST	Land Surface Temperature
BLUE AP	Bologna Local Urban Environment Adaptation Plan
EIB	European Investment Bank
ARPA	Agenzia Regionale Protezione Ambientale
CNR	Consiglio Nazionale Ricerche
IBIMET	Istituto di BioMETeorologia
ASCCUE	Adaptation Strategies Climate Change in Urban Environment
TOA	Top Of Atmosphere
IUAV	Istituto Universitario di Architettura di Venezia
FOMD	Osservatorio Milano Duomo Foundation
ECMWF	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
EVI	Enhanced Vegetation Index
CLC	CORINE Land Cover

2.3. DOCUMENTI APPLICABILI E DI RIFERIMENTO

2.3.1. Documenti Applicabili

- [AD.01] Grant Agreement con l'Esecutive Agency for Small and Medium-sized Enterprises – EASME (di seguito Agenzia) relativo al progetto LIFE17 CCA/IT/000080 in data 5 giugno 2018
- [AD.02] Partnership Agreement
METRO ADAPT - LIFE17 CCA/IT/000080 - CUP I43E17000230007

2.3.2. Documenti di Riferimento e Bibliografia

- [RD.01] Richiesta di finanziamento da parte di Città metropolitana di Milano, in qualità di beneficiario coordinatore all'attuazione del progetto "METRO ADAPT: - enhancing climate change adaptation strategies and measures in the Metropolitan City of Milan" - LIFE17 CCA/IT/000080 - CUP I43E17000230007
- [RD.02] Minuta di KOM del 30 ottobre
- [RD.03] <https://landsat.usgs.gov/landsat-8>
- [RD.04] <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-3-slstr/product-types>
- [RD.05] <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-3-slstr/product-types/level-2-lst>
- [RD.06] <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-3-slstr/resolutions/radiometric>
- [RD.07] <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-3-slstr/coverage>
- [RD.08] Sentinel-3 User Handbook. Issue 1.1. GMES-S3OP-EOPG-TN-13-0001
- [RD.09] SENTINEL-3 OPTICAL PRODUCTS AND ALGORITHM DEFINITION. SLSTR ATBD LAND SURFACE TEMPERATURE. Issue 2.3. S3-L2-SD-03-T03-ULNILU-ATBD
- [RD.10] <https://modis.gsfc.nasa.gov/about/>
- [RD.11] <https://modis.gsfc.nasa.gov/about/specifications.php>
- [RD.12] ACTION C1 - DEL 01_Report on state of the art, user requirements, methodology, input data and products specifications

3. ISOLA DI CALORE URBANO (Città Metropolitana di Milano)

3.1. Introduzione

Lo scopo dello studio è il monitoraggio con dati satellitari delle zone più calde all'interno dell'area Città Metropolitana di Milano (CMM) durante i periodi di onde di calore estive. L'area della CMM include l'isola di calore urbana (Urban Heat Island, UHI) della città di Milano e dei centri urbani circostanti. L'importante premessa di questo studio è che il satellite cattura le temperature della superficie terrestre esposta all'atmosfera e non dell'aria, che è invece misurata tipicamente dalle centraline meteo. Le due temperature, quella del suolo e quella dell'aria sovrastante, sono evidentemente correlate in virtù di processi fisici di scambio di calore ma la loro differenza è influenzata da una molteplicità di altri fattori, quali umidità ed areazione del sito.



Figura 1 - Immagine di luci notturne sull'Italia Settentrionale (satellite SUOMI, 30 Marzo 2019).

Il monitoraggio dell'area della CMM è stato effettuato tramite il prodotto satellitare Land Surface Temperature (LST), derivato da dati acquisiti dal sensore MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) operativo sui satelliti NASA Aqua e Terra, e tramite i canali termici del sensore OLI (Operational Land Imager) a bordo del satellite LANDSAT-8, operato da NASA e USGS. Mentre i dati MODIS LST sono disponibili 4 volte al giorno (2 di giorno, 2 di notte) ad una risoluzione spaziale di 1km per pixel, i dati LANDSAT-8 sono disponibili circa ogni 16 gg ad una risoluzione spaziale (nominale) di 30m per pixel. In realtà, i dati termici Landsat sono acquisiti ad una effettiva risoluzione di 100m circa, ma sono rimappati su una griglia a 30m per mantenere la conformità con le altre bande del Landsat a 30m. Ambedue tipologie di dati non sono disponibili in caso di copertura nuvolosa totale o parziale.

In breve, la procedura seguita per il monitoraggio della UHI all'interno della CMM consiste nei seguenti tre passi, dettagliati nelle seguenti sezioni:

- calcolo della LST media da MODIS durante i periodi di onde di calore identificati nelle estati 2015-2018;
- rimappatura (downscaling) della LST media su pixel di 1km ad una risoluzione di 30m per pixel, utilizzando l'informazione estratta dai dati termici LANDSAT;

- conversione della mappa termica media a 30m in una mappa di anomalia termica dove il livello-0 è assunto nelle aree rurali (esterne alla UHI) ed i valori positivi, tipicamente tra 0 a +5°C, all'interno della UHI dell'area CMM.

I satelliti europei Sentinel-3, che consistono nel Sentinel-3A lanciato il 16 febbraio 2016 e nel Sentinel-3B lanciato il 25 Aprile 2018, alloggiavano il sensore "Sea and Land Surface Temperature Radiometer" (SLSTR) che acquisisce dati equivalenti a MODIS nelle stesse finestre orarie giornaliere. La costellazione Sentinel-3 è al momento ancora in fase di test; le procedure qui illustrate sono completamente applicabili ai dati Sentinel-3 quando questi saranno disponibili.

3.2. Dati di input

Dati MODIS – descrizione e pre-processing

In questo studio sono stati utilizzati prodotti MODIS LST nelle estati 2015-2018. I prodotti MODIS LST (MOD11 per Terra e MYD11 per Aqua) sono disponibili ogni giorno sia di notte che di giorno.

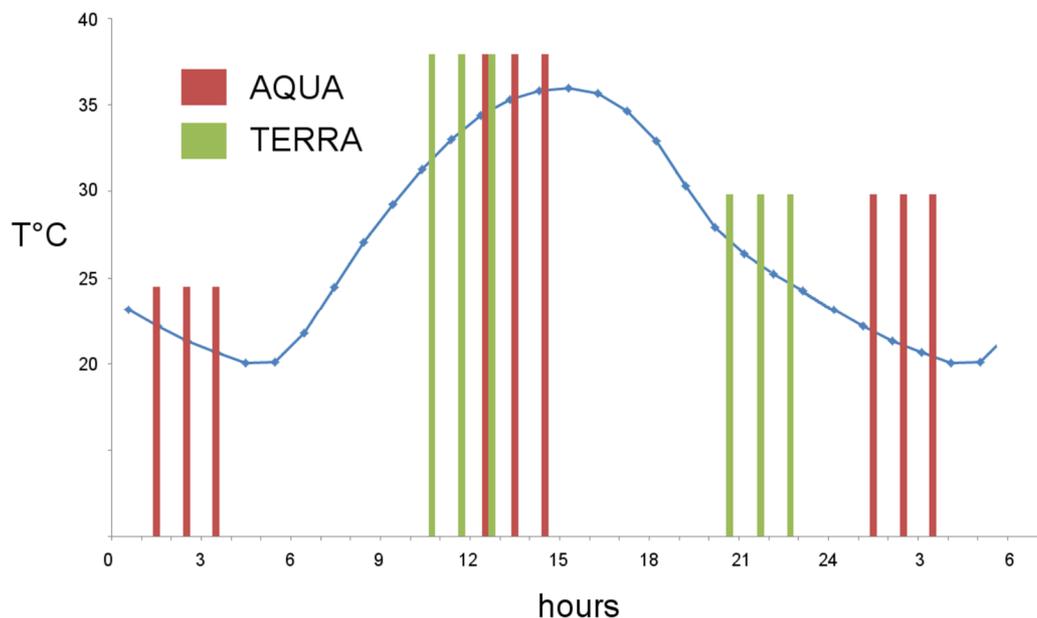


Figura 2 - Orari dei passaggi giornalieri diurni e notturni di MODIS Aqua e Terra e curva della temperatura media registrata dalle 12 centraline ARPA nell'area urbana di Milano nell'estate 2016 (Giugno - Settembre). I passaggi Landsat cadono all'interno delle due finestre giornaliere di MODIS Terra.

I tempi dei passaggi MODIS Aqua e Terra sono illustrati in Figura 2. L'oscillazione giornaliera della temperatura dell'aria nell'aria urbana di Milano (media delle 12 stazioni ARPA nell'estate del 2016) indica che i passaggi diurni e notturni di MODIS Aqua sono più vicini alla massima e minima temperatura giornaliera registrata dalle centraline, rispettivamente attorno alle 15:00 ed alle 5:00. MODIS Terra invece acquisisce attorno alle 12:00 and 21:00 e Landsat acquisisce nella stessa finestra di MODIS Terra.

I prodotti LST (MOD11 per Terra e MYD11 per Aqua) consistono di diversi campi memorizzati in ciascun file giornaliero. Di questi, quelli utilizzati in questo studio sono la LST diurna, con tempi di acquisizione e livello di qualità (pixel per pixel) associati, e la LST notturna con i rispettivi due campi associati. Infatti, la LST è un prodotto standard corretto atmosfericamente a cui sono associati dei quality flags che pixel per pixel dipendono dall'efficacia della correzione atmosferica applicata alla stima della LST. Inoltre, in caso di totale copertura nuvolosa, i pixel mancanti possono essere sostituiti dai dati acquisiti in un successivo passaggio del satellite sull'area che avviene all'incirca 90 minuti dopo, per cui i tempi di acquisizione di ciascun pixel sono anch'essi memorizzati. Una tipica acquisizione MODIS LST è indicata in Figura 3.

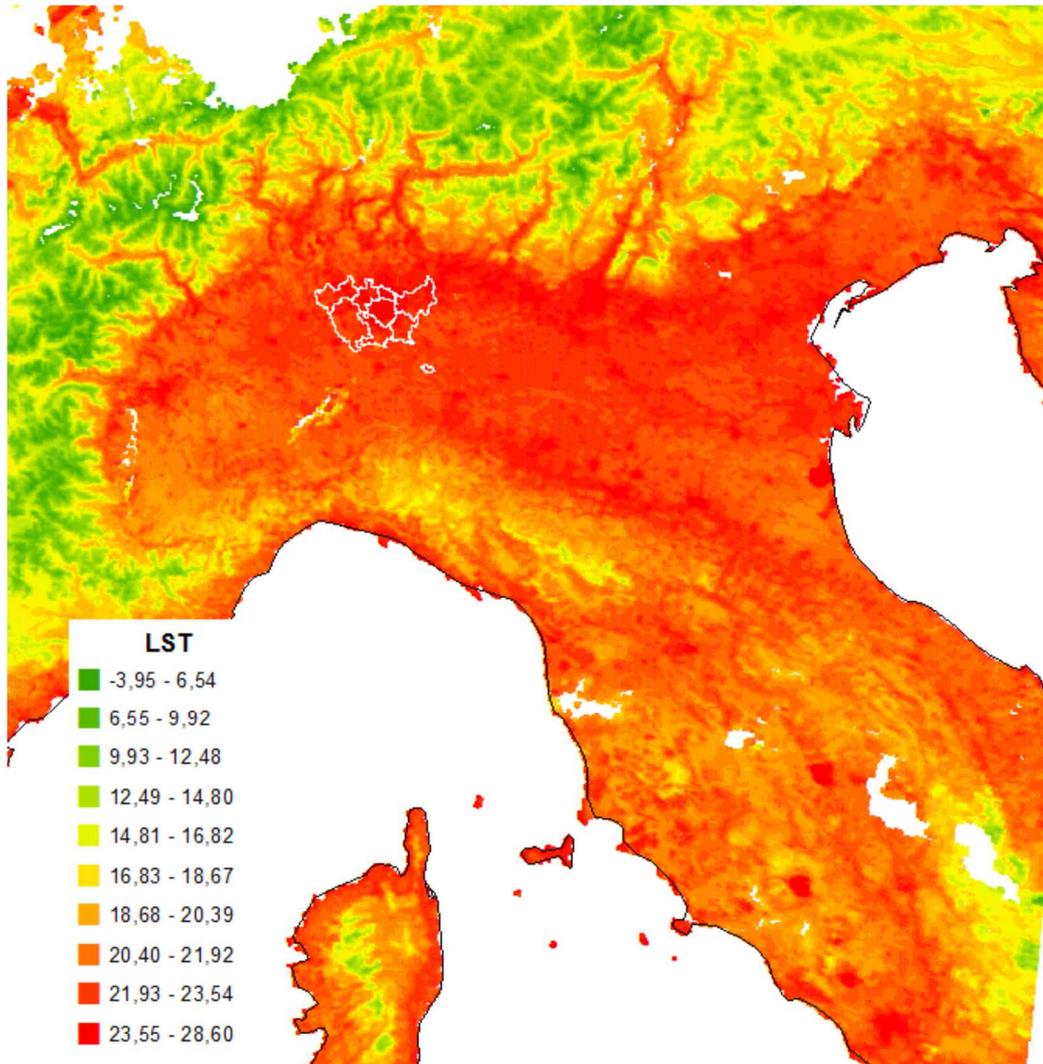


Figura 3 - Esempio di LST MODIS diurna sull'Italia Centrale e Settentrionale in condizioni di clear sky. L'area della CMM è evidenziata in bianco.

Le quality flags utilizzate in questo studio sono quelle che assicurano la migliore qualità del dato LST. Le quality flags presenti nei dati (a destra, in Figura 4) sono prevalentemente 0, 2, 3, 17, 65, 81 dove i valori 2 e 3 indicano assenza di LST e 65 ed 81 errori di LST >1°C (Figura 4, a sinistra). I dati utilizzati sono stati quelli con flag QC=0 e QC=17 corrispondenti alla QA_word1 = LST GOOD ed errore di stima della LST <1°C.

Integer	BH7	BH6	BH5	BH4	BH3	BH2	BH1	BH0	QA_word1	QA_word2	QA_word3	QA_word4
0	0	0	0	0	0	0	0	0	LST GOOD	Good Data	Emiss Error <= .01	LST Err <= 1
1	0	0	0	0	0	0	0	1	LST Produced,other Quality	Good Data	Emiss Error <= .01	LST Err <= 1
2	0	0	0	0	0	0	1	0	No Pixel,clouds	Good Data	Emiss Error <= .01	LST Err <= 1
3	0	0	0	0	0	0	1	1	No Pixel, other QA	Good Data	Emiss Error <= .01	LST Err <= 1
4	0	0	0	0	0	1	0	0	LST GOOD	Other Quality	Emiss Error <= .01	LST Err <= 1
5	0	0	0	0	0	1	0	1	LST Produced,other Quality	Other Quality	Emiss Error <= .01	LST Err <= 1
6	0	0	0	0	0	1	1	0	No Pixel,clouds	Other Quality	Emiss Error <= .01	LST Err <= 1
7	0	0	0	0	0	1	1	1	No Pixel, other QA	Other Quality	Emiss Error <= .01	LST Err <= 1
8	0	0	0	0	1	0	0	0	LST GOOD	TBD	Emiss Error <= .01	LST Err <= 1
9	0	0	0	0	1	0	0	1	LST Produced,other Quality	TBD	Emiss Error <= .01	LST Err <= 1
10	0	0	0	0	1	0	1	0	No Pixel,clouds	TBD	Emiss Error <= .01	LST Err <= 1
11	0	0	0	0	1	0	1	1	No Pixel, other QA	TBD	Emiss Error <= .01	LST Err <= 1

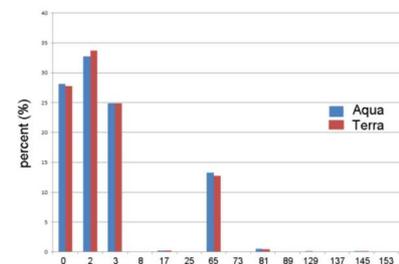


Figura 4 - Quality flags del prodotto MODIS LST e loro ricorrenza in una tipica MODIS LST.

I tempi di acquisizione hanno importanza in quanto i dati di LST possono essere un mosaico di dati acquisiti ad ore considerevolmente diverse. Infatti, in condizioni non nuvolose, i prodotti MYD11 e MOD11 sono ottenuti da un unico passaggio del satellite ed il tempo di acquisizione varia con continuità (Figura 5). Tuttavia, in presenza di nuvole, i dati mancanti possono essere sostituiti da dati di miglior qualità acquisiti in un successivo passaggio del satellite più favorevole dopo circa 1.5 h (il periodo orbitale MODIS è di circa 90

min.). Il risultato è che dati adiacenti possono essere stati acquisiti a più di un'ora di distanza, come indicato nelle zone evidenziate da cerchi bianchi in Figura 5.

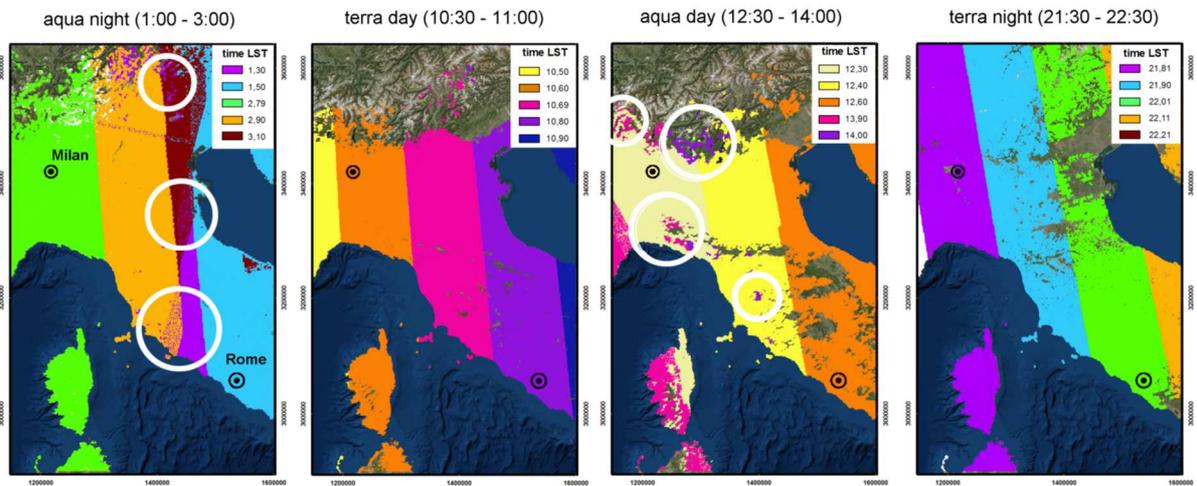


Figura 5 - Tempi di acquisizione diurni e notturni di MODIS LST estratti dai prodotti MOD11 e MYD11.

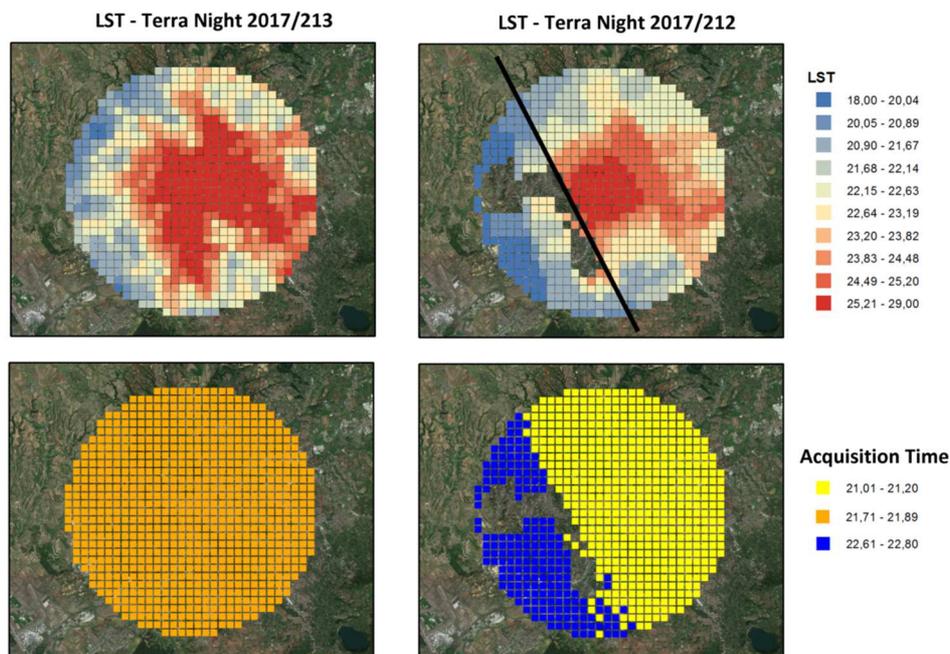


Figura 6 - Effetti dei tempi di acquisizione della LST sull'area di Milano. La LST notturna acquisita più di un'ora dopo (in blu) risulta notevolmente più fredda.

Sull'area di studio della CMM, può così accadere che dati adiacenti di LST diurna o notturna siano stati acquisiti a più di un'ora di intervallo causando fittizie discontinuità del campo termico. Il caso è illustrato in **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** su Milano, dove il tempo di acquisizione è continuo nel giorno 213 e discontinuo nel giorno 212. In particolare, i dati del giorno 212 acquisiti oltre le 22:30 sono notevolmente più freddi di quelli acquisiti intorno alle 21:00 a causa del progressivo raffreddamento della superficie durante la notte. I dati adiacenti acquisiti a più di un'ora di intervallo causano delle discontinuità nel campo di LST non accettabili. Considerando che la variazione oraria di temperatura dell'aria (Figura 2) è di circa 1°C, il filtraggio dei tempi di acquisizione è stato effettuato calcolando il tempo medio della maggioranza dei pixel di LST all'interno dell'area CMM ed scludendo i pixel di LST acquisiti 30m prima o dopo il tempo medio. Un esempio di LST notturna in condizioni di clear sky sull'area CMM è illustrato in Figura 7.

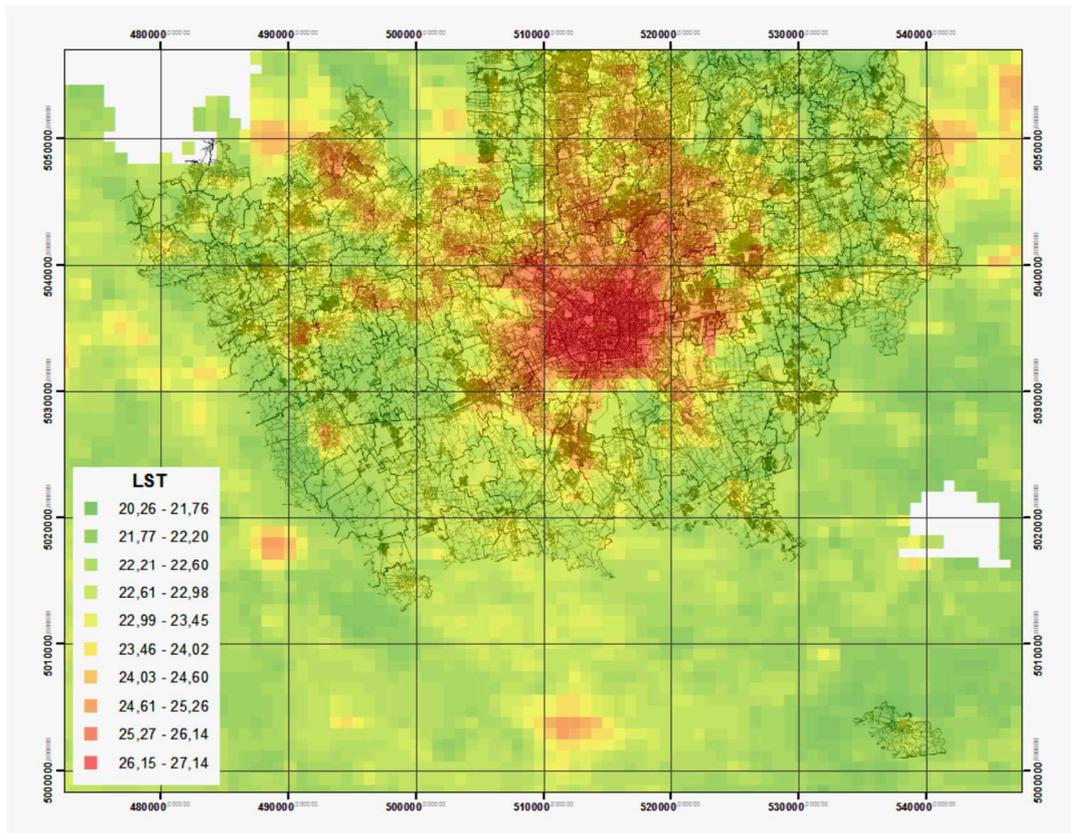


Figura 7 - MODIS LST notturna da Aqua su CMM il 1 Agosto 2018 (giorno 213 dell'anno).

Landsat processing

La LST da Landsat può essere calcolata a partire dai digital numbers (DN) della banda termica 10 o 11, la prima preferita alla seconda perché meno rumorosa. Dal momento che le bande Landsat non permettono di effettuare la correzione atmosferica come per MODIS, la LST ricavata dalla banda termica del Landsat è una LST stimata al Top of Atmosphere (TOA). I dati Landsat diurni e notturni sono acquisiti circa ogni 15 gg. ed hanno una risoluzione di 30m, tranne che le bande termiche, comunque rimappate alla stessa risoluzione delle altre bande Landsat, hanno una effettiva risoluzione spaziale intorno ai 100m. Mentre i Landsat diurni sono regolarmente pubblicati sul sito web USGS (United States Geological Survey) i dati notturni, oscuri in tutte le bande tranne che nei due canali termici, sono raramente pubblicati sul sito USGS.

In questo studio le TOA LST calcolate da Landsat alla risoluzione nominale di 30m sono state utilizzate per migliorare la risoluzione spaziale dei dati termici MODIS ad 1km. Questa procedura (di incremento della risoluzione spaziale) è comunemente indicata come 'downscaling'.

I dati Landsat-8 diurni e notturni disponibili nelle estati (Giugno-Settembre) 2015-2018 sull'area CMM sono stati scaricati dal sito USGS. I passaggi diurni avvengono attorno alle 10:00 (path/row 194/28), quelli notturni attorno alle 22:00 (path/row 54/216, in Figura 8).

I passi per produrre le TOA LST, identici sia per i dati notturni che per quelli diurni, consistono:

- nel calcolo dei DN della banda 10, utilizzando scale factor ed offset riportato nel file MTL associato ai GEOTIFF;
- nel calcolo della temperatura di brillantezza (BT) ottenuta da DN10 con:

$$BT = (K2 / (\ln (K1 / DN10) + 1)) - 273.15$$

con le costanti (lette dal file MTL):

$$K1 = 774.8853$$

$$K2 = 1321.0789;$$

- nel calcolo della TOA-LST, ottenuta dalla BT:

$$LST = BT / \{1 + [(\lambda/\rho)] \ln \epsilon\}$$

con λ = lunghezza d'onda della radianza emessa, $\rho = 1.4E-2$ mK (prodotto delle costanti di Planck e Boltzmann) ed ϵ = emissività.

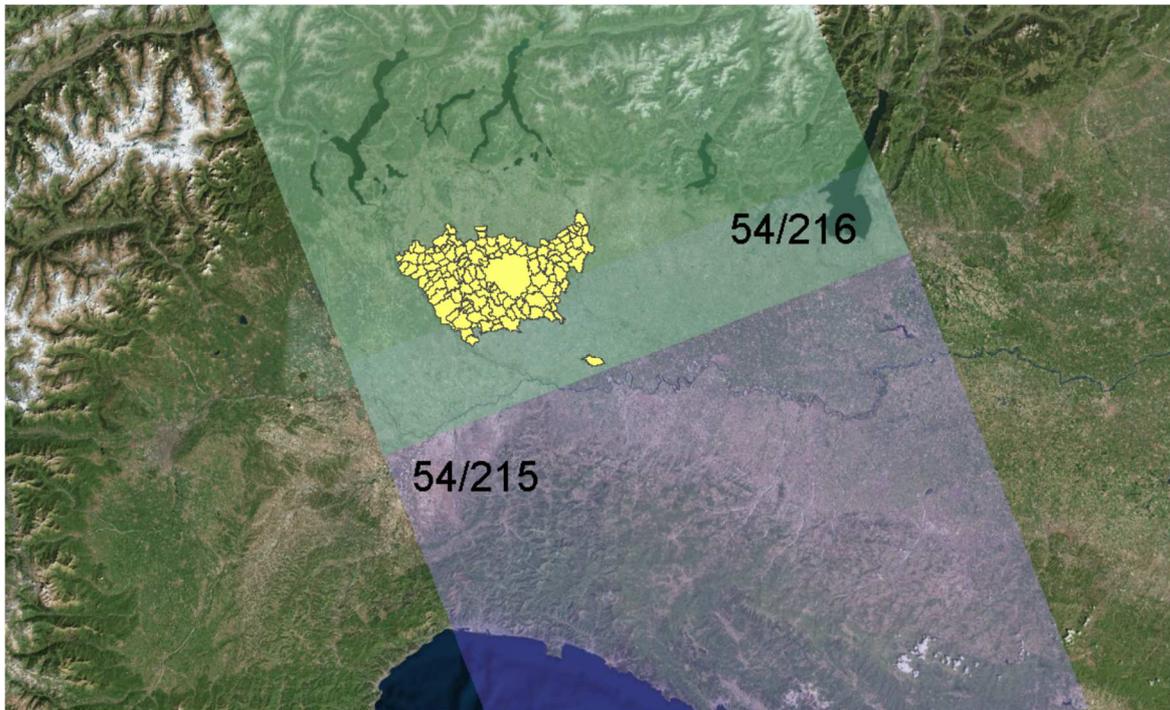


Figura 8 - Path and row dei dati Landsat-8 notturni sull'area della CMM (in giallo).

L'emissività può essere stimata dalle bande visibili (bande 4 e 5) che sono disponibili solo nelle immagini diurne. Di conseguenza, per il processing delle Landsat notturne l'emissività è stata stimata in una Landsat diurna di una data vicina. La procedura adottata per il calcolo dell'emissività (Avdan and Jovanovska, 2016; Sobrino et al., 2004; Stathopoulou and Cartalis, 2007) è illustrata nel diagramma in Figura 9:

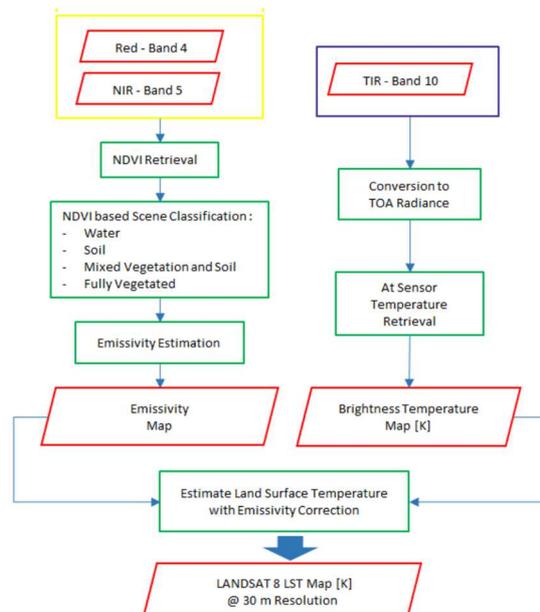


Figura 9 - Processing di dati Landsat per il calcolo della LST al Top of Atmosphere (TOA). Le bande 4, 5 e sono acquisite nella stessa immagine se la LST è diurna, provengono da una Landsat diurna vicina per le LST notturne.

Mentre le immagini Landsat diurne sono regolarmente pubblicate ogni 15 gg. sul sito USGS, le immagini notturne sono raramente pubblicate. Le poche immagini notturne disponibili nelle estati 2015-2018 sull'area

CMM sono elencate in Tab. 1 e sono state acquisite nelle sole estati 2015 e 2018. Di queste 11, 4 sono state immediatamente scartate a causa della copertura nuvolosa. Le rimanenti 7 (3 del 2015 e 4 del 2018) sono state processate per LST usando i dati di emissività estratti da vicine immagini diurne nelle date indicate in Tab. 1.

Tab. 1 – Night-time Landsat images processed in summers 2015-2018.

Night-time Landsat	by visual inspection	emissivity	final
2015 - 06 – 15	clouds/discarded	-----	
2015 – 07 – 01	clear sky	2015-07-06	LST produced
2015 - 07 – 17	clouds/discarded	-----	
2015 – 08 – 02	clear sky	2015-07-06	LST produced
2015 – 08 – 18	clouds/discarded	-----	
2015 – 09 – 03	clear sky 50%	2015-09-24	Clouded
2015 – 09 – 19	clouds/discarded	-----	
2018 – 08 – 10	clear sky 80%	2018-08-15	Partially clouded
2018 – 08 – 26	clear sky	2018-08-15	LST produced
2018 – 09 – 11	clear sky 60%	2018-08-15	LST produced
2018 – 09 – 27	clear sky	2018-08-15	LST produced

Come già evidenziato precedentemente, le LST da Landsat non sono corrette atmosfericamente e per questa ragione sono indicate come LST al Top of Atmosphere (TOA). In questo studio, l'uso fatto delle LST da Landsat consiste nel riportare la distribuzione termica a larga scala (1km, derivata da MODIS) alla scala più fine delle Landsat.

Per questo uso, la mancanza della correzione atmosferica delle Landsat LST non è un fattore critico per le seguenti ragioni. Infatti, in caso di totale copertura nuvolosa la LST intercetta la temperatura dello strato superiore delle nubi (qualche grado sotto lo zero) e le immagini contaminate da questo tipo di disturbo atmosferico sono immediatamente individuabili e scartate. Un leggero disturbo atmosferico fa sì che i valori di LST potrebbero essere leggermente più bassi (frazioni di grado) che nella realtà ma il disturbo, causato da nubi sottili o leggere nebbie, ha un'estensione spaziale molto maggiore di una UHI e può essere considerato uniforme sulla UHI. Pertanto, la leggera contaminazione atmosferica nelle TOA LST da Landsat, se presente, incide scarsamente sulle differenze termiche esistenti tra quartiere e quartiere all'interno della UHI. Le LST da Landsat usate in questo studio sono state selezionate dopo un'accurata ispezione visuale e l'assenza di contaminazione da disturbi atmosferici è stata ulteriormente verificata nel corso di test effettuati per verificare la robustezza della procedura di 'downscaling'.

3.3. Procedura di downscaling

Il downscaling è un processo di ricampionamento che converte un dato da remote sensing a bassa risoluzione spaziale (come il MODIS) in un dato ad alta risoluzione spaziale attraverso le informazioni estratte da un dato satellitare ad alta risoluzione spaziale (come il Landsat). Diverse metodologie di downscaling sono state sviluppate nel passato, ad esempio sfruttando la distribuzione spaziale di variabili geofisiche quali il vegetation index (NDVI) o l'albedo. Il metodo Pixel Block Intensity Modulation (PBIM), basato sulle bande riflettive Landsat (Liu and Moore, 1998), è poco efficace in aree urbane dove la topografia è perlopiù piatta (Nichol, 2009) e lo stesso autore (Nichol, 2009) suggerì un metodo basato sulla emissività. Stathopoulou and Cartalis (2009) applicarono il metodo PBIM ad immagini AVHRR utilizzando l'emissività ed un dataset di immagini Landsat acquisite nella stessa stagione. Metodi più recenti, come lo "Spatial and Temporal Adaptive Reflectance Fusion Model" (STARFM) sviluppato da Gao et al. (2006) in grado di monitorare cambi stagionali di copertura di aree vegetate e di land use, o lo "Spatio-temporal Adaptive Data Fusion Algorithm for Temperature mapping" (SADFAT) più focalizzato sulle LST (Weng et al., 2014), tendono a sfruttare la ripetitività temporale di dati acquisiti dallo stesso sensore. Il metodo usato in questo studio, anch'esso focalizzato sulla LST, si basa sulla stessa assunzione del metodo SADFAT, ovvero l'assunzione della stabilità del rapporto tra il valore del pixel di LST da MODIS ed i pixel LST TOA da Landsat. Tuttavia, la connessione tra i pixel termici Landsat e MODIS, anziché sfruttare un elevato numero di contemporanee immagini MODIS e

Landsat come in SADFAT, è stabilita utilizzando i soli dati Landsat, in particolare sotto-campionando i pixel Landsat alla stessa risoluzione del MODIS. La ragione di questa scelta è essenzialmente legata alla scarsa disponibilità di dati contemporanei LST acquisiti in condizioni di 'clear sky' sia MODIS che Landsat a causa della frequente copertura nuvolosa dell'area di studio.

La procedura di downscaling è illustrata partendo dalla sovrapposizione delle griglie MODIS e Landsat, in Figura 10.

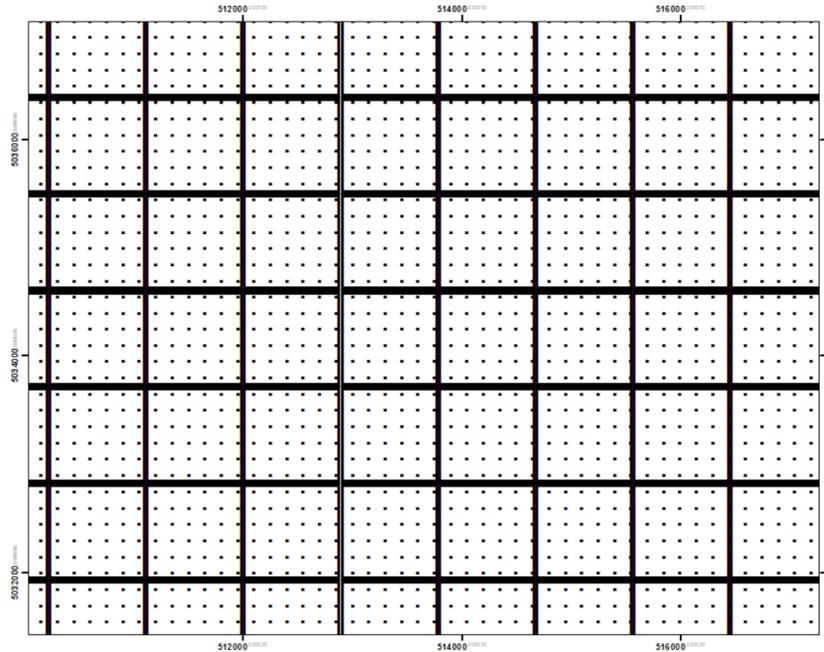


Figura 10 - Griglia MODIS ad 1km (più spessa) e pixel Landsat (ogni 30m) , questi ultimi plottati 1 su 5.

La sovrapposizione delle due griglie permette di individuare i pixel Landsat che ricadono in ciascuna cella MODIS. Mediando i valori di LST Landsat su ogni cella MODIS, si ottiene dalla immagine Landsat una immagine termica ad 1km come se venisse osservata dal MODIS, ovvero ad 1km (Figura 11).

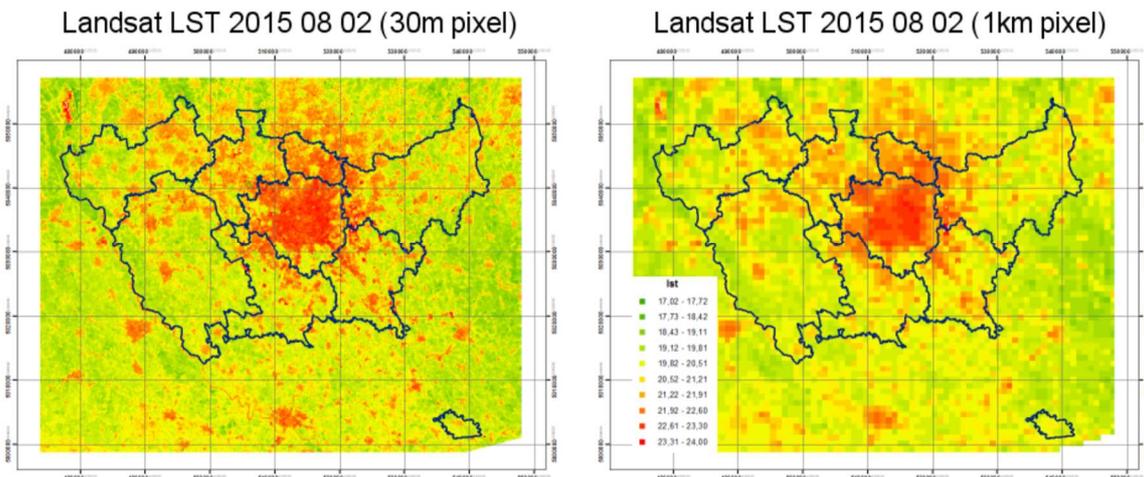


Figura 11- Landsat LST alla risoluzione spaziale originale di 30m (a sinistra) e mediata su celle di 1km (a destra) .

Ora è possibile esprimere il rapporto tra la LST a piccola e larga scala attraverso i rapporti tra la LST di ciascun pixel Landsat e quello della LST mediata sulla griglia MODIS ad 1km:

$$R_{i,j} = LST_{i,j}^{30m} / LST^{1km} \quad (1)$$

dove $LST_{i,j}^{30m}$ è il valore del pixel Landsat ed LST^{1km} è il corrispondente valore mediato sulla griglia MODIS. Gli elementi $R_{i,j}$ costituiscono una matrice denominata come 'matrice di trasformazione R', mostrata in Figura 12. I valori R_{ij} sono in genere compresi tra 0.5 e 1.5:

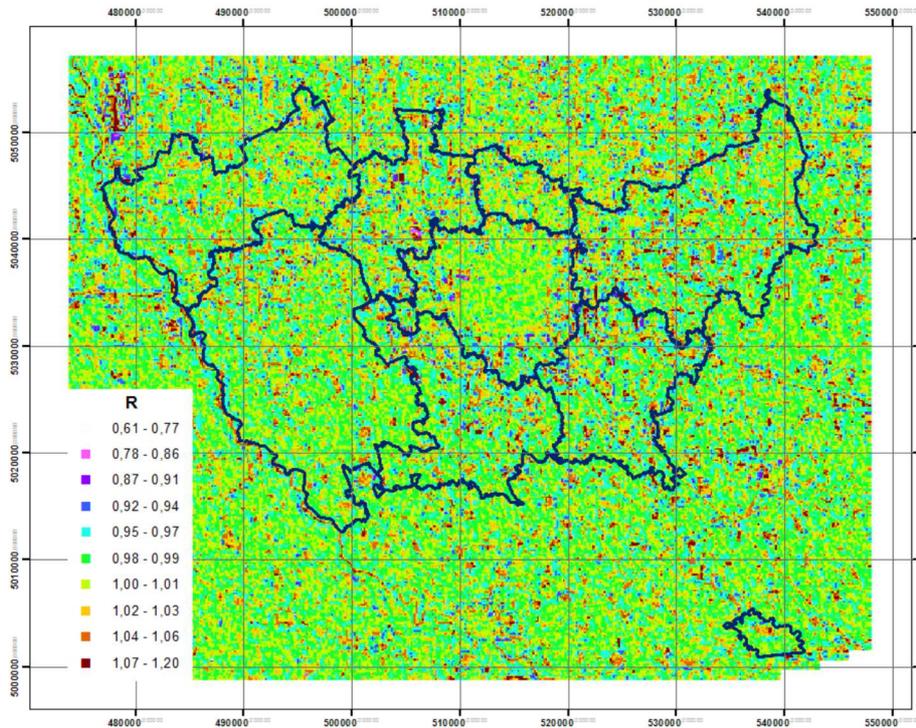


Figura 12 - Matrice di trasformazione R per la Landsat notturna del 2015/08/02.

I rapporti (1) legano il dato termico a piccola scala (a 30m) con il dato termico a larga scala (1km). Se questo legame è invariante nel tempo, è possibile convertire una qualunque immagine MODIS LST ad 1km in un'immagine a piccola scala (30m) invertendo l'equazione (1), i.e. usando la trasformazione:

$$LST_{i,j}^{30m} = LST^{1km} \cdot R_{i,j} \quad (2)$$

dove ora i valori LST ad 1km vengono dal MODIS. Questo metodo rispetto al SADFAT (Weng et al., 2014) non necessita di un dataset di immagini contemporanee MODIS e Landsat in condizioni di clear-sky, che è un vantaggio in un'area frequentemente coperta da nubi come la CMM. Tuttavia, dal momento che la matrice di trasformazione R può essere ottenuta da qualsiasi immagine Landsat, è importante verificare che la matrice R sia invariante nel tempo. Questa verificata è stata effettuata (vedi Figura 23) e verrà discussa nella sezione 4.7.

Un altro problema di questo metodo, purtroppo insolito, è che le immagini Landsat sono acquisite ad orari coincidenti con quelli di MODIS Terra ma non di MODIS Aqua, i cui passaggi avvengono qualche ora dopo. L'applicabilità della matrice R di trasformazione anche alle LST di MODIS Aqua è tuttavia auspicabile, considerando l'invarianza dei rapporti tra dati termici a bassa ed ad alta risoluzione.

3.4. Periodi di onde di calore nelle estati 2015 -2018

I periodi di onde di calore sono stati individuati in base alle registrazioni orarie della temperatura dell'aria della centralina meteo Brera, nel centro di Milano, e alle registrazioni delle massime temperature negli aeroporti di Linate e Malpensa (dati METAR, METeoroological Aerodrome Report) durante le estati (Giugno-Settembre) 2015-2018, ambedue riportate in Figura 13. Le temperature massime nei due aeroporti sono in accordo con le massime in Brera. I maggiori picchi si riscontrano nel 2015 e 2017, mentre nelle estati 2016 e 2018 i picchi appaiono uniformemente distribuiti.

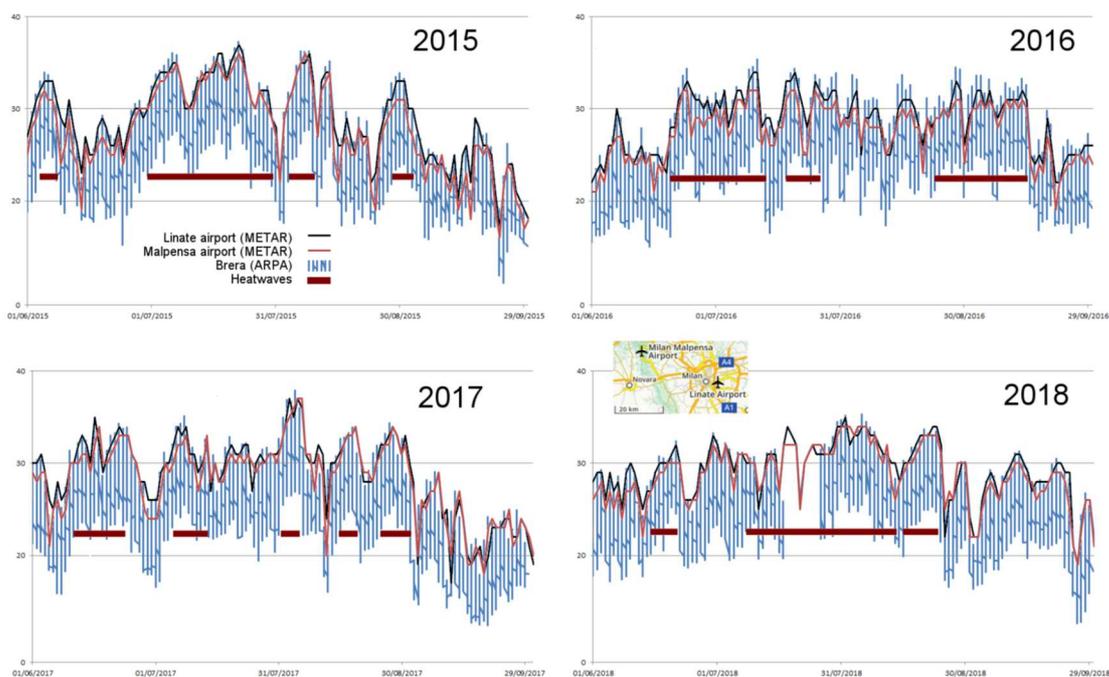


Figura 13 - Temperature dell'aria nelle estati 2015-2018 (Giugno-Settembre) negli aeroporti di Milano Malpensa e Linate e nel centro città (Brera, stazione ARPA).

I periodi di onde di calore estive sono stati individuati basandosi sui tre seguenti criteri:

- massima giornaliera sopra 30°C,
- minima giornaliera sopra 23°C,
- minima durata superiore a 3-4 giorni.

I periodi selezionati sono indicati in Fig. 13 ed elencati in Tab. 2. Su un totale di 488 giorni estivi, il numero totale di giorni di onde di calore risulta 193 (39.5%).

Tab. 2 – Periodi di onde di calore nelle estati 2015 - 2018.

Anno	Periodi	Numero di giorni
2015	4-8/6; 30/6-30/7; 3-9/8; 28/8-2/9	49
2016	20/6 – 13/7; 18-26/7; 23/8 – 14/9	56
2017	11-24/6; 5-13/7; 31/7 – 4/8; 24-31/8	35
2018	15-21/6; 8/7 – 13/8; 15-23/8	54

Un possibile effetto perturbativo nella distribuzione del calore osservato al suolo all'interno della UHI può essere prodotto dall'azione del vento, che potrebbe erodere e spostare sottovento la posizione dell'isola urbana di calore. I dati MODIS acquisiti in queste condizioni meteorologiche andrebbero esclusi in quanto outliers perturbati da un evento occasionale. I dati di vento sull'area in esame, misurati negli aeroporti ed estratti dal METAR dataset, sono stati analizzati (intensità, direzione) nelle estati 2015-2018 (Figura 14). Esclusi scarsi episodi di vento moderato esterni ai periodi di onde di calore, il vento è risultato inferiore a 15 km/h e nessuna immagine MODIS è stata scartata a causa dell'influenza del vento.

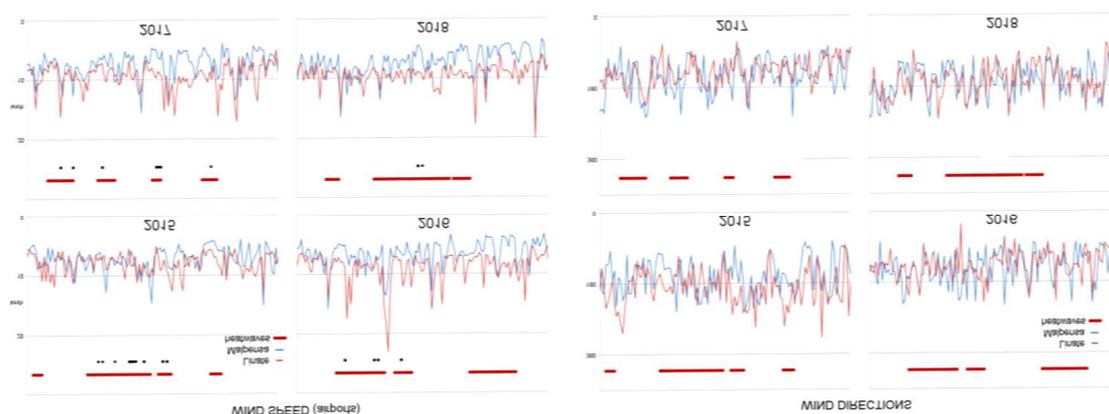


Figura 14 - Intensità e direzione del vento negli aeroporti di Linate e Malpensa (dati METAR) nelle estati 2015-2018 (Giugno-Settembre). I periodi di onde di calore sono indicati dalla linea continua rossa, le date delle immagini MODIS selezionate dai punti in nero.

3.5. Mappe termiche diurne e notturne

Negli studi di mappatura termica delle UHI, particolare risalto è dato alla distribuzione termica notturna per due principali ragioni. La prima è la considerazione che in estate, il verificarsi di prolungati periodi di continue alte temperature notturne presenta aspetti di criticità per la salute. Infatti, la persistente mancanza di ore di ristoro durante la notte (quando di giorno le temperature sono comunque alte) rappresenta una condizione di disagio per le fasce di popolazione più vulnerabili, quali anziani, bambini ed ammalati. Queste condizioni in particolare risultano critiche per casi soggetti a problemi di salute cronici come asma e malattie cardiovascolari, dove l'inquinamento dell'aria contribuisce ad accentuare lo stress dell'attività respiratoria (Basu and Samet, 2002). Nell'estate 2003, un'intensa onda di calore colpì l'Europa occidentale e centrale con letali conseguenze specialmente in Francia, con un incremento di mortalità del 40% nei piccoli centri sino a 80% a Lione e 141% a Parigi (Vandentorren et al., 2004). Un'analoga onda di calore sulla costa occidentale degli U.S. causò l'incremento di mortalità del 150% in New York City (Kalkstein et al., 2008).

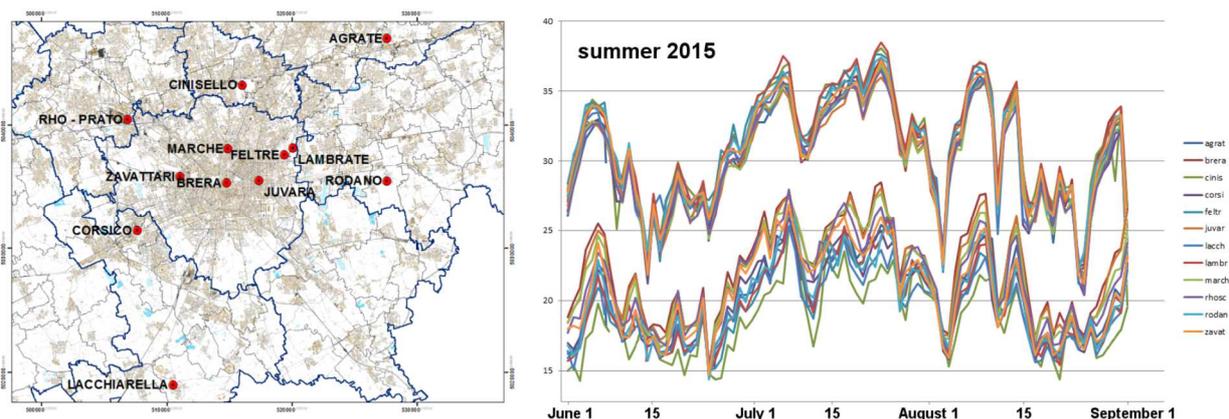


Figura 15 - Minima e massima temperatura giornaliera rilevata durante l'estate 2015 nelle stazioni Arpa nell'area attorno Milano.

La seconda ragione è illustrata in Dousset et al. (2011), dove gli autori investigarono gli effetti dell'onda di calore dell'agosto 2003 nell'area metropolitana di Parigi con l'ausilio di dati termici satellitari. Dousset et al. (2011) riportano che la correlazione tra i maggiori incrementi di mortalità e la distribuzione spaziale delle massime temperature era più significativa per le temperature notturne che non per le diurne. In particolare, fu riscontrato che un incremento delle minime notturne di solo 0.5 °C aveva causato il raddoppio dell'incremento della percentuale di decessi.

Questi argomenti si applicano al caso della UHI di Milano e motivano l'analisi in primo luogo delle temperature notturne. Infatti, analizzando i dati di temperatura dell'aria nell'estate 2015 raccolti nelle stazioni dell'ARPA distribuite sul territorio (**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**), si nota che l'intervallo di valori delle minime (notturne), di circa 5°C, è ben più ampio dell'intervallo di circa 2° delle massime (diurne). Questo aspetto suggerisce che la temperatura del suolo presenti una maggiore variabilità spaziale durante la notte che durante il giorno. Durante il giorno, in condizioni di irraggiamento solare, sarà mostrato in coda a questo studio che le aree urbanizzate tendono a riscaldarsi in maniera uniforme escluse le aree verdi. Di notte, quando il calore immagazzinato durante il giorno viene rilasciato, il rilascio di energia è più efficace in alcune aree della città rispetto ad altre e le differenze tra le minime notturne appaiono più accentuate.

3.6. Analisi dei dati notturni

Selezione dei dati MODIS

La disponibilità di dati MODIS sull'area di studio è stata valutata calcolando la percentuale di pixel LST utilizzabili (selezionati con i criteri specificati in sezione 4.1) sul totale di 488 giorni (122 per anno) delle estati dal 2015 al 2018. Le percentuali visualizzate in Figura 16 separatamente per Terra (acquisiti tra le 21.00 e 23:00) ed Aqua (tra 1:00 e 3:00) sono molto basse nelle aree urbane, con minimi attorno al 4% nell'area urbana di Milano. Incidentalmente, queste percentuali rivelano un altro interessante aspetto. Le percentuali di opacità atmosferica sono dovute sia alla copertura nuvolosa (naturale) che in qualche misura alla presenza di inquinanti atmosferici. Le basse percentuali su aree urbane quali Vigevano, Pavia, Lodi (all'esterno della CMM), o Milano all'interno della CMM, chiaramente indicano che non si tratta solo di nuvole o nebbie ma di problemi sulla locale qualità dell'aria in estate.

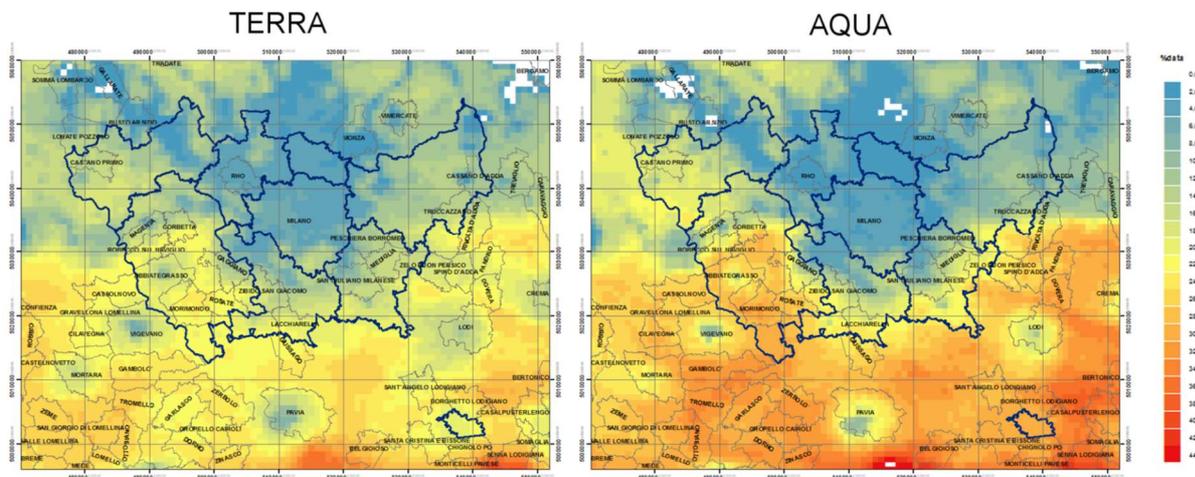


Figura 16 - Percentuali di disponibilità di dati LST MODIS in condizioni di clear sky nelle estati 2015-2018.

Lo scopo di questo studio è quello di individuare le anomalie termiche all'interno della UHI di Milano e delle circostanti aree urbane. Le anomalie saranno stimate da dati notturni, come media delle LST ottenute durante i periodi di onde di calore estive tra il 2015 e 2018. Pertanto è necessario selezionare immagini LST MODIS che coprano gran parte della CMM, in particolare le aree urbane (i.e. non rurali) dove ci si aspetta di trovare le temperature più alte. Le percentuali giornaliere di copertura notturna dell'area sottesa in Figura 16 sono riportate in Figura 17 e risulta evidente che, nelle quattro estati dal 2015 al 2018, ben poche immagini arrivano a coprire almeno il 90% della superficie.

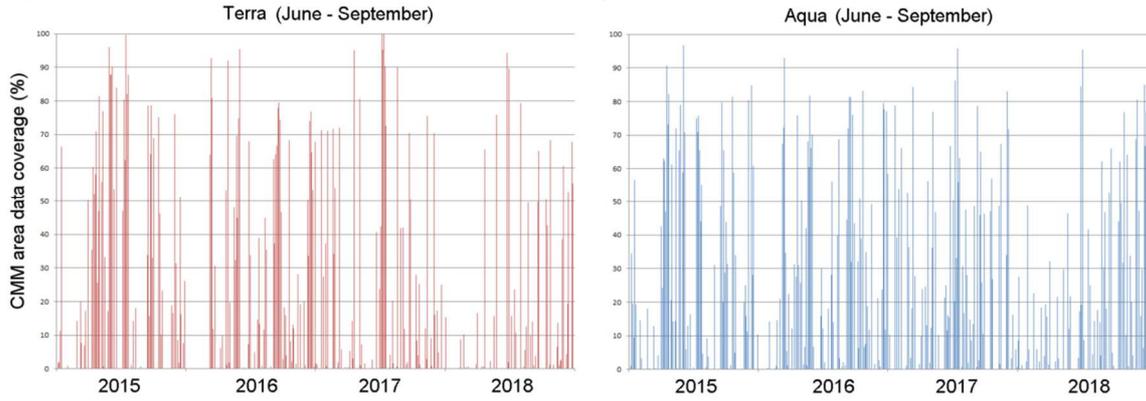


Figura 17 - Percentuale di copertura dell'area di Fig. 15 dei dati MODIS LST notturni nelle estati 2015-2018.

Per questa ragione, al fine di aumentare il numero di immagini sfruttabili, sono state considerate 5 sub-aree (in Figura 18) su cui selezionare separatamente le immagini senza nuvole. Alla fine, le medie ottenute su ciascuno dei 5 quadranti saranno mosaicate.

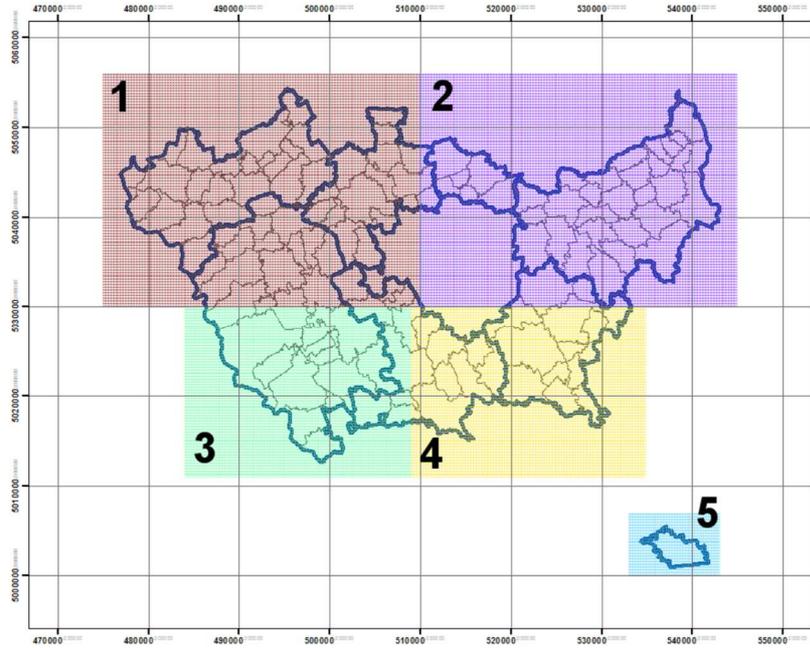


Figura 18 - Le 5 sub-aree che coprono l'area della CMM di Milano su cui sono state selezionate le immagini MODIS.

Tab. 3 – Date (in giorni giuliani) delle immagini notturne MODIS selezionate sulle principali 4 sub-aree in cui è stata suddivisa l'area di studio.

AQUA				TERRA			
Area 1	Area 2	Area 3	Area 4	Area 1	Area 2	Area 3	Area 4
A2015203	A2015187	A2015187	A2015184	T2015188	T2015186	T2015201	T2015186
A2016176	A2015188	A2015188	A2015187	T2015202	T2015217	T2015202	T2015201
A2017215	A2015202	A2015189	A2015188	T2015204	T2016175	T2015208	T2015202
A2018211	A2017175	A2015200	A2015199	T2015217	T2017214	T2015217	T2015203
A2018213	A2018213	A2015203	A2015202	T2016191	T2017215	T2015219	T2015204
		A2016174	A2015203	T2016202	T2018210	T2016189	T2015208
		A2017175	A2015218	T2017188		T2016191	T2015217
		A2017215	A2016174	T2017214		T2017168	T2015219
		A2018211	A2017175	T2017215		T2017174	T2016175
		A2018213	A2017213	T2018210		T2017188	T2016191
			A2017215			T2017214	T2016202
			A2018211			T2017216	T2017188
						T2018210	T2017214
							T2017215
							T2017216
							T2017240
							T2018210
							T2018212

Le immagini selezionate sulle prime 4 aree sono indicate in Tab. 3. Sull'area 5, notevolmente più piccola, le immagini selezionate sono in numero molto maggiore e non sono state riportate. Alcune date sono risultate utilizzabili per più di una sub-area. In totale, risultano 32 date per Terra e 28 per Aqua. Di queste, circa il 59% per Terra ed il 75% per Aqua sono state acquisite nell'estate del 2015.

Selezione delle immagini Landsat

Le 7 immagini notturne Landsat elencate in Tab. 1 sono state processate per ottenere la TOA LST, e sono riportate in Figura 19.

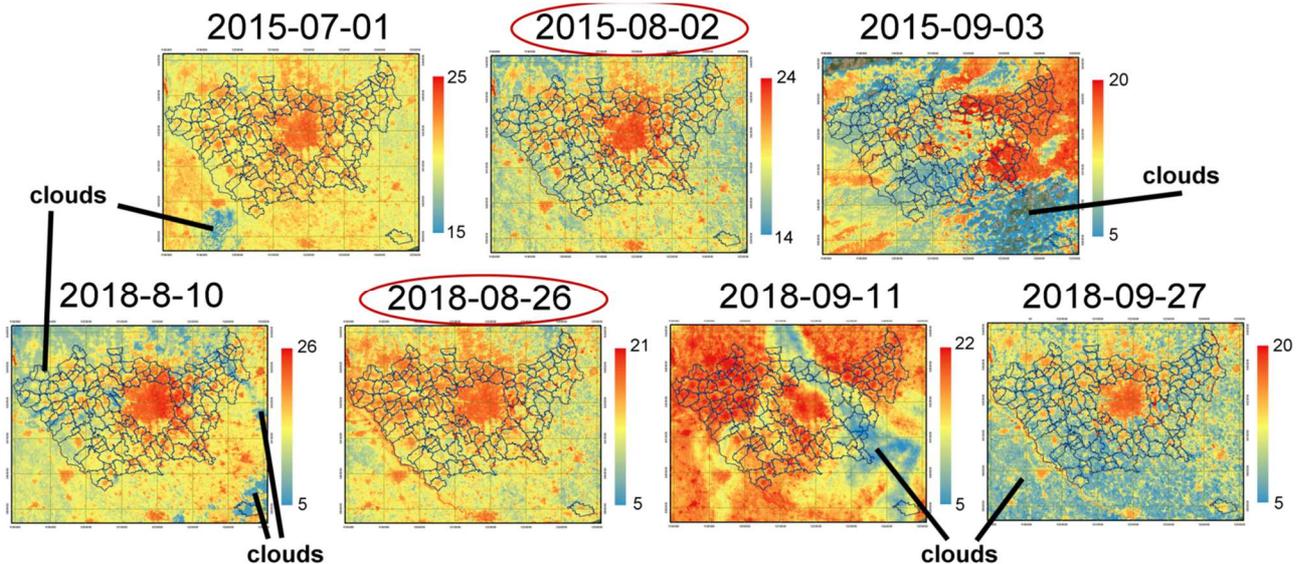


Figura 19 - Landsat LST notturne disponibili nelle estati 2015-2018.

Di queste, 5 sono state scartate in quanto più o meno parzialmente sono contaminate da nubi. Le restanti due, quella del 2 Agosto 2015 e del 26 Agosto 2018 sono state utilizzate per il downscaling delle immagini MODIS.

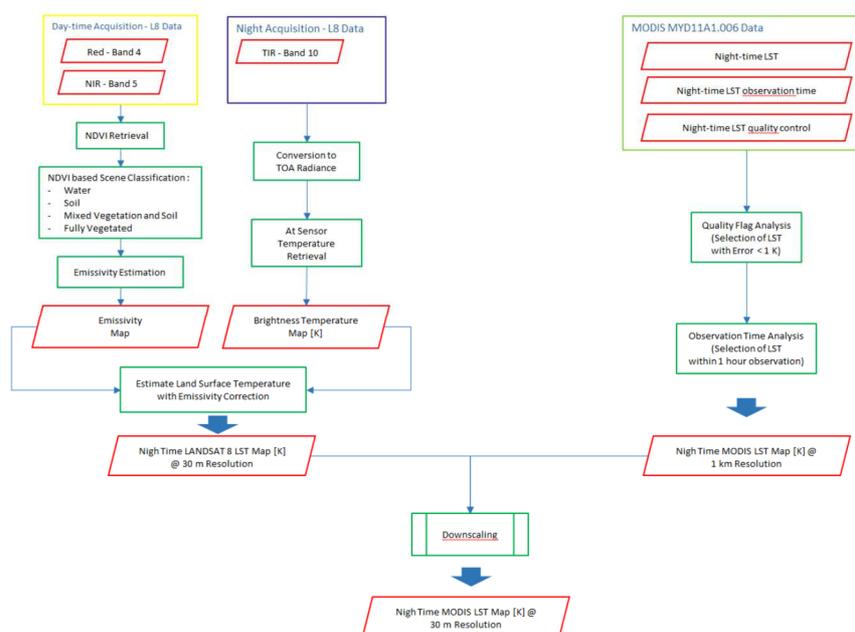


Figura 20 - Schema della procedura di downscaling MODIS LST (a destra) basato sul Landsat LST (a sinistra).

Riassumendo, la procedura di downscaling è schematizzata in Figura 20. Sul lato sinistro è rappresentato il processing dei dati Landsat notturni, dove l'ottenimento della LST notturna a 30m di risoluzione passa per l'estrazione della banda 10 termica notturna, e necessita della stima dell'emissività necessariamente calcolata da una Landsat diurna, ma vicina nel tempo. Sul lato destro è illustrato il pre-processing del dato LST notturno MODIS, dove è evidenziato il filtraggio dei dati in base al tempo di acquisizione ed al livello di qualità del dato. Al termine, il downscaling dei dati MODIS viene effettuato con la matrice di trasformazione R dettagliata in sezione 4.2 di questo documento.

I dati a disposizione sono 2 Landsat per il downscaling, una del 2015 ed una del 2018, ed una serie di immagini MODIS da mediare area per area. Operativamente si è proceduto ad effettuare le medie dei dati MODIS sulle 5 diverse aree, a mosaicarle in maniera da avere un unico campo medio di LST ad 1km, ed infine di effettuare il downscaling della immagine media di LST, sia per MODIS Terra che per MODIS Aqua notturne.

3.7. Calcolo delle anomalie termiche notturne

Le MODIS LST elencate in Tab. 3 sono state mediate ciascuna sulla corrispondente area e le prime 4 mappe medie sono state mosaicate in maniera da avere un campo continuo di LST su tutta la CMM. La mosaicatura è stata effettuato sommando un offset per le aree 2, 3 e 4, calcolato in maniera da minimizzare le differenze di LST sui bordi adiacenti. L'area 5 non è stata mosaicata in quanto disgiunta dal resto della CMM; pertanto non è stato necessario calcolare un offset.

La mappa media, sia per Aqua che per Terra, è stata ricampionata alla risoluzione di 30m secondo la procedura di downscaling, utilizzando la Landsat più recente, ovvero quella di Agosto 2018. Come precedentemente notato, due Landsat notturne erano disponibili per il downscaling, una del 2015 ed una del 2018. Il confronto tra l'uso dell'una o dell'altra verrà discusso nella prossima sezione ed è anticipabile qui che sono equivalenti. Infine, dalla LST media ricampionata a 30m è stata ottenuta la distribuzione della anomalia termica. Per anomalia termica della UHI, si intende l'incremento di temperatura che si incontra muovendosi da un'area rurale all'esterno della UHI verso il centro. Si assume quindi che l'anomalia termica sia zero all'esterno della UHI ed aumenti man mano che ci si inoltri nella area urbana.

Pertanto, dalle mappe finali ottenute dai dati mediati di LST di Terra ed Aqua è stato sottratto un valore, rispettivamente -24°C per Terra e -23°C per Aqua, scelto in maniera che le aree rurali coincidano rendendo le mappe più facilmente confrontabili. Il risultato dell'operazione è illustrato nelle mappe finali di anomalia termica in Figura 21.

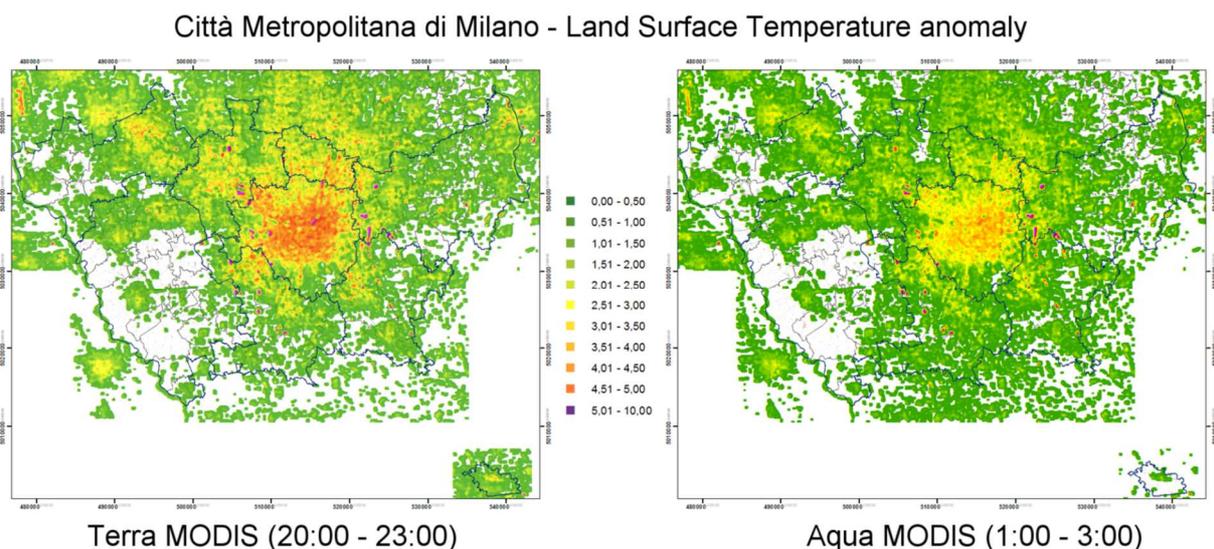


Figura 21 - Anomalie termiche notturne sull'area della CMM osservate da satellite (MODIS/Landsat) durante le onde di calore nelle estati dal 2015 al 2018.

La Figura 21 evidenzia come le temperature al suolo siano più alte per Terra che per Aqua, in accordo al progressivo raffreddamento della superficie durante la notte. I risultati ottenuti per Terra ed Aqua sono alquanto simili, nel senso che confermano che le aree più calde, nella fascia oraria in cui è acquisito il dato

Terra, continuano ad essere le più calde anche qualche ora dopo. La somiglianza dei due risultati è ancora più evidente osservando in dettaglio le mappe sulla UHI di Milano, in Figura 22. Muovendosi dalla periferie verso il centro durante un periodo di onda di calore estiva, la mappa indica un incremento di temperature sino a 4-5°C dalle 20:00 alle 23:00 (Terra) ed un incremento di 3.0-3.5°C tra 1:00 e 3:00 (Aqua).

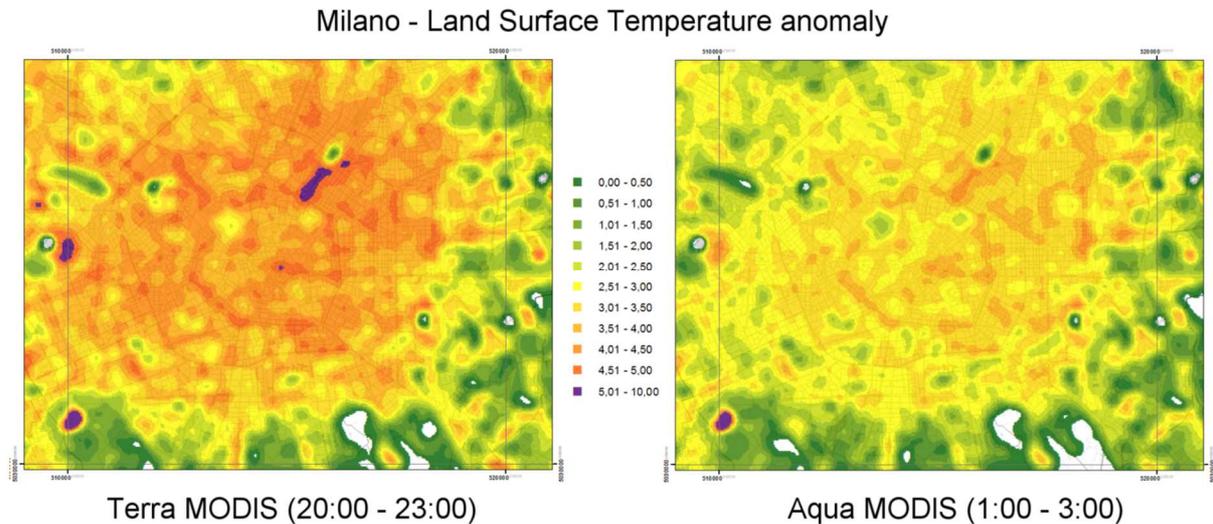


Figura 22 - Anomalie termiche notturne sulla UHI di Milano osservate da satellite (MODIS/Landsat) durante le onde di calore nelle estati dal 2015 al 2018.

3.8. Discussione

- a) La procedura di downscaling del dato MODIS si basa sull'utilizzo della matrice di trasformazione R (eq. (1)) i cui elementi sono i rapporti della LST Landsat a 30m e della LST del MODIS ad 1km. A meno di consistenti variazioni del land-use (quali sostituzione di aree verdi con aree cementate o viceversa), c'è da aspettarsi che questi rapporti non cambino nel tempo. La verifica è stata effettuata confrontando le 2 matrici di trasformazione relative alle due immagini Landsat notturne disponibili sull'area CMM nelle estati 2015 e 2018. Considerando che, per un valore di LST MODIS di 20°C, una differenza dell'elemento R_{ij} di 0.05 comporta una variazione nella LST ricampionata a 30m di 1°C (eq. (2)), differenze maggiori di 0.05 delle due matrici di trasformazione sulla UHI di Milano sono evidenziate in Figura 23. Dove queste differenze sussistano, l'uso dell'una o dell'altra Landsat per il downscaling comporterebbe una variazione nelle LST riscalata superiore ad 1°C, che è considerato il limite massimo di errore auspicabile. Fig. 22 mostra che le differenze sono molto piccole (inferiori a 0.05) sulla totalità dell'area centrale della UHI, mentre differenze di poco superiori si riscontrano nelle zone periferiche, in particolare su aree non edificate dove è comprensibile che dati termici acquisiti in Agosto, ma a tre anni di distanza, catturino variazioni dell'uso del suolo. Questa verifica suggerisce due considerazioni. La prima è che il downscaling dei MODIS tramite le due Landsat notturne è sostanzialmente equivalente, ovvero produce gli stessi risultati sull'area urbanizzata dove è situata la UHI. Il secondo aspetto è che la risposta termica del suolo, quando non ne siano sopravvenuti sostanziali cambiamenti di uso, è sostanzialmente stabile ed invariante nel tempo.



Figura 23 - Differenze superiori a 0.05 nelle matrici di trasformazione estratte da due Landsat notturne (2 Agosto 2015 e 26 Agosto 2018) utilizzabili per il downscaling delle immagini LST MODIS

- b) Una prova della robustezza delle stime delle mappe di anomalia termica in Figura 21 e Figura 22 è la somiglianza delle due mappe ottenute per dati di Terra ed Aqua. Infatti, le due mappe sono state generate da 2 dataset diversi, sia perché acquisiti da due sensori identici (MODIS) ma su due diversi satelliti, sia perché alcune delle date selezionate per le due medie sono diverse (indicate in Tab. 3). Si tratta quindi nel complesso di un risultato coerente (LST di Terra è maggiore della LST di Aqua a causa del raffreddamento notturno) ottenuto con due diversi ed indipendenti dataset.

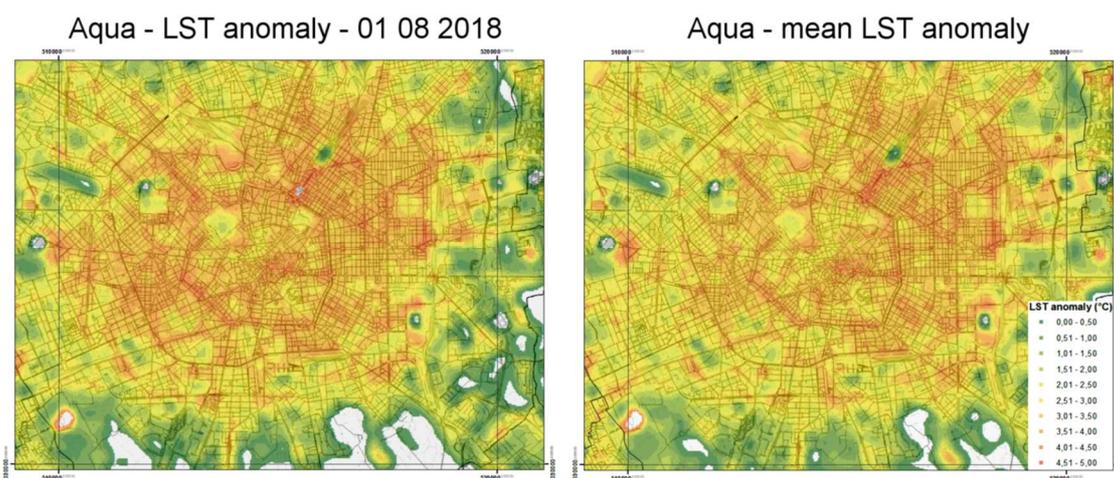


Figura 24 - Confronto dell'anomalia termica estratta dal dato Aqua, 1 Agosto 2018 (sinistra) con la mappa media di anomalie termiche nelle estati 2015-2018 su Milano

- c) Dal momento che parecchi dei dati MODIS utilizzati sono stati acquisiti nell'estate del 2015, si è ritenuto opportuno confrontare le medie con un dato acquisito durante l'ondata di calore più recente dell'estate 2018. Il confronto in Figura 24 della mappa media con il dato MODIS AQUA del 1 Agosto 2018, rimappato a 30m e convertito in anomalia termica, mostra che anche nell'estate 2018 la distribuzione termica al suolo è consistente e ricalca le mappe delle anomalie termiche medie.

3.9. Esempio di anomalia termica diurna

Allo scopo di illustrare la distribuzione termica diurna della UHI è stata analizzata un'immagine LST Landsat diurna acquisita alle 10:10 UTC del 25 Agosto 2016 durante un periodo di onda di calore. E' da ricordare che le immagini diurne Landsat sono largamente pubblicate sul sito web dell'USGS, per cui la disponibilità di dati termici diurni Landsat è ampia. Come nei precedenti casi, anche da questa immagine sono state estratte le anomalie termiche. Figura 25 indica che durante il giorno l'incremento di temperatura, passando dalla periferie al centro, è notevolmente più alto che di notte e raggiunge in alcune aree i 7-8 gradi. Tuttavia, i gradienti di temperatura del suolo tra le diverse aree edificate sono relativamente piccoli (1-2°C) e sono molto più alti, nell'ordine di 5-6°C, tra aree edificate ed aree verdi. Infatti, la distribuzione del NDVI (a destra nella figura) indica la forte correlazione tra aree verdi e zone a bassa anomalia termica all'interno del tessuto urbano. Questo aspetto indica una considerevole differenza tra il comportamento termico diurno e notturno della UHI. Mentre durante il giorno (quando l'energia solare provvede a riscaldare la superficie) le temperature al suolo sono alte nelle zone edificate e notevolmente minori nelle aree verdi, nelle ore notturne (ovvero in fase di raffreddamento) le differenze tra aree verdi ed edificate diminuiscono ed emergono con più evidenza le differenze termiche tra le diverse aree edificate.

Day-time Landsat 2016-08-25

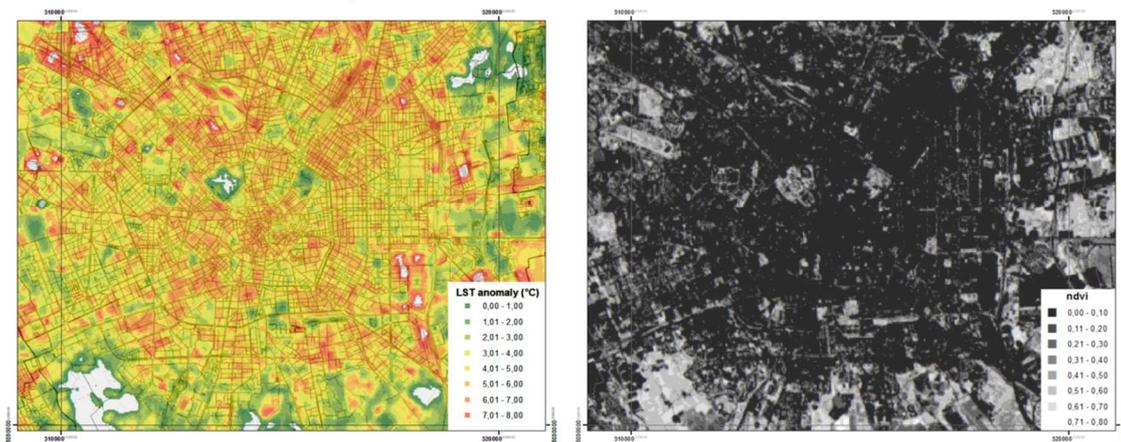


Figura 25 - Anomalia termica diurna ed NDVI sulla UHI di Milano durante un onda di calore dell'estate 2016 (Landsat del 25 Agosto 2016).

4. Tool di accesso ai dati

La pubblicazione dei dati è stata pensata tenendo in considerazione due fattori fondamentali rispetto al target di riferimento del progetto e rispetto alle politiche nazionali dell'Agenda Digitale.

Innanzitutto è stato sviluppato un tool open accessibile da tutti gli utenti mediante web che non necessita di installazioni di alcun applicativo o plug-in particolare, questa pagina (dashboard):

<http://93.34.11.228:8088/superset/dashboard/anomalietermiche/>

Permette a chiunque di visualizzare i dati, di interagirci mediante query guidate e di poter salvare e scaricare i dati stessi anche mediante device mobili.

Questa dashboard consente quindi a qualsiasi cittadino o decisore pubblico non specializzato, di comprendere il fenomeno UHI e di monitorarlo nel territorio di propria competenza.

Le informazioni sono sia cartografiche, che tabellare che a grafico.

Le anomalie termiche sono definite quale delta espresso in gradi, rispetto alla temperatura minima media riscontrata nelle notti più calde dal 2014 al 2018.



La popolazione sensibile corrisponde al numero di persone al di sotto dei 9 anni e al di sopra dei 70 che, secondo l'organizzazione mondiale della sanità sono le fasce demografiche maggiormente sensibili dal punto di vista sanitario.



Figura 26 – rappresentazione cartografica tool anomalie termiche e popolazione sensibile

Popolazione sensibile per Comune		Popolazione Sensibile per classe di età			
Comune	Popolazione Sensibile	0 - 5 anni	5 - 9 anni	70 - 74 anni	oltre i 74 anni
MILANO	348.000	144.036	151.450	117.236	135.344
SESTO SAN GIOVANNI	17.174	155.453	153.488	178.442	158.456
CINISELLO BALSARÒ	14.224	13.380	13.382	15.147	16.006
LEGNANO	12.461	13.199	13.207	14.432	16.316
INVERIGO	11.224	12.089	12.093	13.032	15.874
ROZZANO	10.119	12.210	12.112	12.867	15.189
COSENZA	9.088	12.089	12.192	12.459	14.201
SEGLATE	8.914	12.094	11.970	12.679	14.289
CORSICO	8.869	11.498	11.467	12.409	14.703
SEGLATE	8.879	11.483	11.572	12.940	13.971
SEGRATE	8.879	12.141	12.229	12.999	13.426
SAN DONATO MILANESE	8.228	11.167	11.252	11.938	13.201
ASSORI EGHARSO	8.194	11.388	11.358	12.028	13.190
CERNUSCO SUL NAVIGLIO	8.144	11.099	11.140	11.837	13.133
PROSECCO	7.874	11.014	11.001	12.783	13.014
BRESSO	7.294	11.708	11.820	11.938	12.978
PARABICO	6.534	12.048	11.976	11.983	12.972
GARABATE MILANESE	6.034	10.84	11.008	11.425	12.997
MADENIA	6.024	11.320	11.219	11.478	12.548
CARATE	5.984	11.348	11.303	11.576	12.452
BUCCHIGRADO	5.474	7.701	7.461	11.343	12.317
CUSANO OSSONA	5.474	11.130	11.204	11.494	12.106
CORMANO	5.174	8.861	8.925	11.299	12.117
CUSANO MILANESE	5.144	11.218	11.229	11.336	12.001
NOVATE MILANESE	4.734	7.994	7.970	11.174	12.087

Totale della Popolazione Sensibile per classe di anomalie

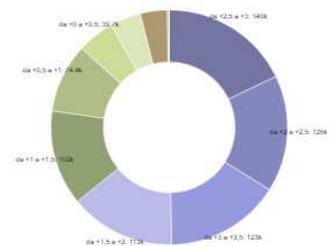


Figura 27 – rappresentazione tabellare e grafica tool anomalie termiche e popolazione sensibile

Oltre a questo, per gli utenti più esperti, come ad esempio i tecnici comunali, verranno resi disponibili servizi WMS e WFS, compliance con gli standard definiti dall'Open Gis Consortium, che consentano l'operatività dei dati in relazione con gli altri sistemi informativi territoriali che sono già a disposizione dell'ente o dello studio che debbe utilizzarne il dato.

L'Open Geospatial Consortium (OGC) è un'organizzazione internazionale non-profit di standard a consenso volontario, leader nello sviluppo di standard per servizi geospaziali e basati sulla localizzazione geografica.

Gli Standard OGC sono dei documenti tecnici che definiscono interfacce e codifiche. Gli sviluppatori usano questi documenti per costruire interfacce aperte e codifiche all'interno dei loro prodotti o servizi. Questi

standard sono i "prodotti" principali dell'Open Geospatial Consortium e sono stati sviluppati dai suoi membri per realizzare specifici scenari di interoperabilità.

Lo Standard **Web Map Service (WMS)** fornisce una semplice interfaccia HTTP per richiedere immagini di mappe da uno o più server distribuiti in Internet. Una richiesta WMS definisce quali sono i layer geografici e l'area di interesse da processare. La risposta alla richiesta è una o più immagini di mappa (nel formato JPEG, PNG, ...) che può essere mostrata in un browser Internet. Lo Standard supporta inoltre la possibilità di specificare se l'immagine restituita debba essere trasparente, in modo da poter combinare tra loro layer provenienti da server differenti.

Lo Standard **Web Feature Service (WFS)** fornisce, similmente al WMS, una semplice interfaccia HTTP per richiedere direttamente oggetti geografici (e non immagini di mappe) da uno o più server distribuiti in Internet. I meccanismi di richiesta e risposta sono simili al WMS, con la differenza che non vengono restituite immagini, bensì le descrizioni dei singoli oggetti spaziali contenuti all'interno dell'area di interesse da processare (coordinate spaziali ed eventuali attributi alfanumerici).

Con questi tool, erogati direttamente dal sito istituzionale di Città Metropolitana, e linkati dal sito di progetto, si riesce a fornire dei servizi alle due principali categorie di utenti (tecnici specializzati e non tecnici) senza prevedere costi e licenze, garantendo quindi il più ampio accesso possibile all'informazione.

5. Bibliografia

- Avdan, U., and G. Jovanovska, 2006. Algorithm for Automated Mapping of Land Surface Temperature Using LANDSAT 8 Satellite Data. *Journal of Sensors*, Volume 2016, Article ID 1480307, 8 pages, <http://dx.doi.org/10.1155/2016/1480307>
- Basu R, Samet JM., 2002. Relation between elevated ambient temperature and mortality: a review of the epidemiologic evidence. *Epidemiologic Reviews* 24: 190–202.
- Dousset, B., Gourmelon, F., et al. (2011). Satellite monitoring of summer heat waves in the Paris metropolitan area. *International Journal of Climatology*, 31(2), 313–323.
- Gao, F., Masek, J., Schwaller, M., & Hall, F. (2006). On the blending of the Landsat and MODIS surface reflectance: Predicting daily Landsat surface reflectance. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44(8), 2207–2218.
- Liu, J. G., & Moore, J. M. (1998). Pixel block intensity modulation: Adding spatial detail to TM band 6 thermal imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 19(13), 2477–2491.
- Nichol, J. (2009). An emissivity modulation method for spatial enhancement of thermal satellite images in urban heat island analysis. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 75(5), 547–556.
- Sobrino, J.A., Jiménez-Muñoz, J.C., Paolini, L., 2004. Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM5. *Remote Sensing of Environment*, 90(4), 434–440.
- Stathopoulou, M., & Cartalis, C. (2009). Downscaling AVHRR land surface temperatures for improved surface urban heat island intensity estimation. *Remote Sensing of Environment*, 113 (12), 2592–2605.
- Stathopoulou, M., & Cartalis, C. (2007). Daytime urban heat islands from Landsat ETM+ and Corinelandcover data: An application to major cities in Greece, *Solar Energy* 81 (2007) 358–368.
- Vandentorren S, Suzan F, Medina S, Pascal S, Maulpoix A, Cohen JC, Ledrans M., 2004. Mortality in 13 French Cities during the August 2003 heat wave. *American Journal of Public Health* 94: 1518–1520.
- Weng, Q.; Fu, P.; Gao, F. Generating daily land surface temperature at Landsat resolution by fusing Landsat and MODIS data. *Remote Sens. Environ.* 2014, 145, 55–67.