Mappatura delle Local Climate Zones e downscaling della temperatura superficiale per lo studio multitemporale della Surface Urban Heat Island

Sveva Annamaria Ellenia Giovannetti[1][0009-0002-3444-741X], Marco Ventura[1][0009-0009-3173-3438], Gabriele Lo Grasso[0009-0004-7206-3235] Emanuele Mandanici[1][0000-0003-4822-1577], Gabriele Bitelli[1][0000-0002-6118-6000]

[1] DICAM - Università degli studi di Bologna, (sveva.giovannetti2, marco.ventura9, gabriele.lograsso2, emanuele.mandanici, gabriele.bitelli)@unibo.it

Abstract. Il contributo presenta un approccio basato sulla classificazione ad oggetti per la mappatura delle Local Climate Zones nella città di Bologna. Il workflow integra immagini Sentinel-2 e WorldView-3 con Urban Canopy Parameters, segmentazione multi-livello e classificazioni rule-based e Random Forest, valutando il contributo delle diverse informazioni alla caratterizzazione della struttura urbana. In modo complementare alla mappatura delle LCZ, il contributo affronta inoltre il downscaling delle osservazioni giornaliere di Land Surface Temperature (LST) del sensore MODIS, con l'obiettivo di ottenere prodotti a una risoluzione spaziale di 100 m sull'area di Bologna. Questa componente metodologica mira a generare un dataset multitemporale utilizzabile per lo studio dei pattern termici superficiali a una scala spaziale più dettagliata. Nel loro insieme, i due approcci costituiscono una base metodologica preliminare per future analisi statistiche della variabilità della LST nelle diverse classi LCZ. In questa fase, il lavoro si concentra sullo sviluppo delle due metodologie e sulla preparazione dei rispettivi dataset, mentre la validazione rigorosa e l'interpretazione statistica delle differenze di tempoeratura tra le diverse classi LCZ rappresenterà uno sviluppo successivo.

Parole chiave: Local Climate Zones, Object-Based Image Analysis, Earth Observation, Machine Learning, Urban Remote Sensing, Land Surface Temperature, Downscaling.

1 Introduzione

La crescente urbanizzazione e gli effetti associati ai cambiamenti climatici rendono sempre più importante la caratterizzazione della struttura fisica e del comportamento termico delle città. La distribuzione degli edifici, la geometria degli spazi urbani, la presenza di vegetazione e le caratteristiche dei materiali superficiali influenzano infatti il bilancio energetico della superficie e contribuiscono a determinare la variabilità spaziale e temporale della temperatura urbana. Per comprendere tali dinamiche, risulta

quindi fondamentale integrare la caratterizzazione morfologica degli ambienti urbani con l'analisi dei loro pattern termici.

In questo contesto, il sistema delle *Local Climate Zones* (LCZ), proposto da Stewart e Oke [2], rappresenta uno standard per la classificazione degli ambienti urbani e naturali sulla base delle loro caratteristiche morfologiche, radiative e di copertura del suolo. L'integrazione di immagini satellitari a diversa risoluzione spaziale con approcci *Object-Based Image Analysis* (OBIA) consente di descrivere la complessità della struttura urbana attraverso l'analisi congiunta delle informazioni spettrali e delle caratteristiche geometriche degli oggetti [3,4]. Nel presente lavoro, le LCZ della città di Bologna sono mappate mediante un workflow gerarchico OBIA, implementato nel software eCognition (v. 10.5) e applicato a dati Sentinel-2 e WorldView-3 integrati con *Urban Canopy Parameters*.

La classificazione LCZ fornisce pertanto una rappresentazione spaziale degli ambienti urbani che può essere messa in relazione con la distribuzione della temperatura superficiale, contribuendo a interpretare le differenze termiche tra contesti caratterizzati da differenti configurazioni morfologiche e coperture del suolo. Per indagare tali relazioni non è tuttavia sufficiente disporre di una classificazione spaziale dettagliata: è necessario anche un prodotto termico che garantisca un adeguato dettaglio spaziale e una sufficiente copertura temporale. In questo senso, i prodotti MODIS forniscono osservazioni giornaliere della *Land Surface Temperature* (LST), ma la loro risoluzione spaziale di circa 1 km limita la capacità di rappresentare i gradienti termici all'interno del tessuto urbano e di distinguere le differenze associate alle singole classi LCZ.

Il *downscaling* della LST rappresenta una possibile soluzione a questo limite, consentendo di ricostruire la variabilità termica a scale spaziali più fini mediante l'integrazione delle osservazioni satellitari con informazioni descrittive della superficie [5]. In particolare, gli approcci di *machine learning*, tra cui la regressione *Random Forest*, permettono di modellare relazioni non lineari tra le caratteristiche della superficie e la distribuzione della temperatura [6]. L'integrazione tra mappatura LCZ e downscaling della LST consente così di combinare una descrizione dettagliata della struttura urbana con una rappresentazione della dinamica termica caratterizzata da una maggiore risoluzione spaziale e da una frequenza temporale giornaliera.

In questa prospettiva, il presente studio affianca alla mappatura delle LCZ di Bologna un contributo metodologico complementare, basato sul downscaling delle osservazioni giornaliere di LST MODIS fino a una risoluzione spaziale di 100 m, mantenendo il dato MODIS come riferimento termico. I prodotti ricostruiti sono destinati a supportare successive analisi statistiche della variabilità della temperatura superficiale nelle diverse classi LCZ, con l'obiettivo di mettere in relazione la configurazione spaziale degli ambienti urbani con l'evoluzione temporale dei pattern termici superficiali.

2 Area di studio e dati

L'area di studio comprende la città di Bologna, caratterizzata da una struttura urbana eterogenea nella quale coesistono il centro storico compatto, aree residenziali con differenti densità edilizie, zone produttive, infrastrutture, aree verdi e superfici naturali.

2.1 Dati per la mappatura delle Local Climate Zones

Per lo sviluppo della classificazione delle LCZ sono state utilizzate due immagini multispettrali acquisite da differenti sistemi satellitari: un'immagine Sentinel-2 Level-2A (2019) e un'immagine WorldView-3 OR2A (2017). La diversa risoluzione spaziale dei due sensori consente di analizzare la metodologia OBIA a differenti livelli di dettaglio.

Alle informazioni spettrali sono stati associati diversi parametri rappresentativi delle caratteristiche fisiche della superficie urbana. Gli Urban Canopy Parameters considerati comprendono informazioni relative alla morfologia degli edifici, alla presenza di superfici impermeabili e vegetate e alle proprietà radiative e termiche delle superfici.

Nel caso dei dati WorldView-3 è stato inoltre utilizzato un Digital Surface Model (DSM) della città di Bologna ottenuto attraverso un approccio Structure from Motion. L'integrazione del DSM con un Digital Terrain Model (DTM) [7] e con le informazioni disponibili nella Carta Tecnica Comunale (1:2000) della città di Bologna [8] ha permesso di derivare informazioni relative all'altezza degli edifici con elevato livello di dettaglio.

2.2 Dati per il downscaling della LST

La componente relativa al downscaling della LST si basa sulle osservazioni giornaliere del sensore MODIS, caratterizzate da una risoluzione spaziale originaria di circa 1 km. Questi dati forniscono la copertura temporale necessaria per studiare l'evoluzione dei pattern termici superficiali nell'area di studio. All'interno del modello vengono utilizzati dati ausiliari di tipo spaziale e ambientale, finalizzati a descrivere la variabilità delle superfici e a stimare la temperatura a una risoluzione spaziale più dettagliata, pari a 100 m.

Il dataset risultante è concepito per fornire stime giornaliere di LST a 100 m sull'area di Bologna, integrando la mappa LCZ con una dimensione temporale. I due dataset potranno essere utilizzati nelle successive analisi della variabilità termica superficiale nelle diverse tipologie urbane. La copertura temporale effettiva dei prodotti dipende dalla disponibilità e dalla qualità delle osservazioni in ingresso.

3 Metodologia

3.1 Workflow gerarchico OBIA per la mappatura delle LCZ

La classificazione delle Local Climate Zones è stata sviluppata in ambiente eCognition mediante un approccio gerarchico di Object-Based Image Analysis articolato su due livelli di segmentazione. In una prima fase, una MultiResolution Segmentation a scala fine ha definito il Level-0, sul quale è stata applicata una classificazione rule-based per individuare le principali componenti di copertura del suolo, tra cui vegetazione, alberi, edifici, superfici impermeabili e corpi idrici.

Successivamente, una seconda MultiResolution Segmentation ha aggregato gli oggetti del Level-0 in unità spaziali più ampie, formando il Level-1, maggiormente coerente con la scala delle LCZ e in grado di mantenere le informazioni derivate dal livello inferiore.

La struttura gerarchica dei due livelli di segmentazione è mostrata in Fig. 1, dove è possibile osservare il maggiore livello di dettaglio degli oggetti del Level-0 rispetto alle unità spaziali individuate al Level-1.

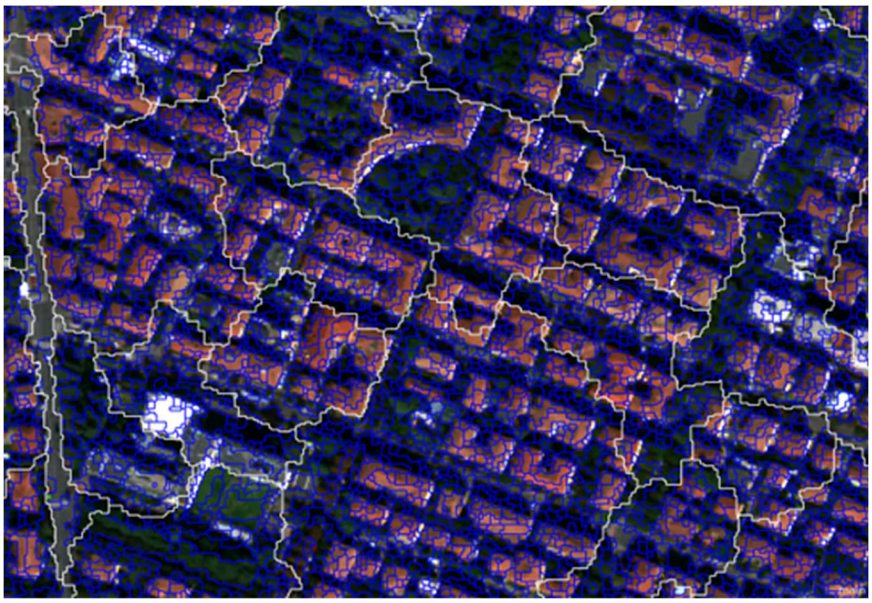

Fig. 1. Esempio della segmentazione gerarchica utilizzata nel workflow OBIA. In blu sono rappresentati gli oggetti del Level-0, mentre i contorni chiari identificano gli oggetti di dimensioni maggiori appartenenti al Level-1.

La classificazione finale delle LCZ è stata eseguita sul Level-1 mediante Random Forest, utilizzando caratteristiche spettrali e geometriche, Urban Canopy Parameters e

informazioni derivate dalla classificazione del Level-0. La stessa metodologia è stata applicata ai dati Sentinel-2 e WorldView-3 per confrontare i risultati ottenuti a differenti risoluzioni spaziali.

3.2 Downscaling della LST MODIS a 100 m

Il workflow di downscaling è finalizzato alla generazione di stime giornaliere di LST a una risoluzione spaziale di 100 m a partire dalle osservazioni MODIS a risoluzione più grossolana. A tale scopo viene utilizzato un approccio di regressione basato su Random Forest, che modella la relazione tra la LST MODIS e un insieme di variabili ausiliarie rappresentative delle caratteristiche spaziali delle superfici e delle condizioni ambientali.

Il framework modellistico prevede modelli distinti per differenti regimi termici, consentendo di variare la configurazione delle variabili predittive in funzione delle condizioni rappresentate dai dati in ingresso. I modelli addestrati vengono quindi applicati per generare stime di LST a maggiore dettaglio spaziale, mantenendo la dimensione temporale delle osservazioni MODIS.

I prodotti ottenuti sono destinati a fornire un dataset coerente per le successive analisi dei pattern termici superficiali urbani. La loro futura integrazione con la mappa LCZ consentirà di studiare la distribuzione delle temperature e la loro variabilità temporale nelle diverse tipologie urbane. Tale integrazione costituisce una fase analitica successiva e non una componente già completata del workflow attuale.

4 Valutazione della classificazione e risultati preliminari

4.1 Prestazioni e risultati della classificazione LCZ

La valutazione della classificazione è stata effettuata mediante campioni indipendenti di validazione e matrici di confusione, considerando Overall Accuracy, coefficiente Kappa, User’s Accuracy, Producer’s Accuracy e F1-score.

I risultati preliminari mostrano come la struttura gerarchica del workflow permetta di utilizzare le informazioni relative alle componenti di copertura individuate al Level-0 nella successiva classificazione delle LCZ al Level-1. Dal punto di vista quantitativo, la classificazione basata su WorldView-3 ha raggiunto un’Overall Accuracy pari all’84%, mentre quella basata su Sentinel-2 ha ottenuto un valore di circa il 73%. Tale differenza può essere ricondotta anche alla diversa risoluzione spaziale dei due dataset, che influenza il livello di dettaglio con cui vengono rappresentate le strutture urbane e definiti gli oggetti.

Le principali confusioni si osservano tra classi con caratteristiche morfologiche simili, in particolare tra Open Mid-rise e Open Low-rise. Questo evidenzia come la

separazione tra tipologie urbane vicine rimanga una delle principali criticità della classificazione.

4.2 Risultati preliminari del downscaling della LST

I risultati preliminari relativi alla componente di downscaling riguardano l'implementazione del workflow modellistico e la generazione di prodotti giornalieri di LST a una risoluzione spaziale di 100 m. Il dataset risultante è finalizzato ad aumentare il dettaglio spaziale disponibile per lo studio dei pattern termici superficiali urbani, mantenendo la copertura temporale offerta dalle osservazioni MODIS.

In questa fase, il lavoro si concentra sulla preparazione e sulla generazione dei prodotti a risoluzione spaziale più elevata. È necessaria un'ulteriore valutazione quantitativa per caratterizzare l'accuratezza e i limiti delle stime ottenute. In particolare, la verifica delle prestazioni dei prodotti di downscaling e della loro coerenza con osservazioni termiche indipendenti rappresenterà un passaggio importante prima di procedere con le analisi statistiche comparative tra le classi LCZ.

La caratterizzazione statistica della distribuzione della LST e della sua variabilità temporale nelle diverse classi LCZ mappate non è stata ancora effettuata. Tale analisi costituirà il successivo sviluppo della ricerca, dopo la valutazione dei prodotti di downscaling e la predisposizione di un riferimento spaziale e temporale coerente per il confronto con la mappa LCZ.

5 Conclusioni

Il lavoro ha permesso di sviluppare un workflow gerarchico di Object-Based Image Analysis per la mappatura delle Local Climate Zones nella città di Bologna, integrando informazioni spettrali e morfologiche a differenti scale spaziali. L’applicazione ai dati Sentinel-2 e WorldView-3 ha evidenziato l’influenza della risoluzione spaziale sulla classificazione e l’importanza dei parametri morfologici nella distinzione tra classi LCZ simili.

Gli sviluppi futuri riguarderanno l’analisi del contributo delle diverse feature, l’ottimizzazione dei parametri di segmentazione e l’approfondimento delle classi maggiormente soggette a confusione.

Parallelamente, lo sviluppo del workflow di downscaling della LST rappresenta un contributo complementare allo studio multitemporale dei pattern termici urbani. La generazione di prodotti giornalieri di LST a una risoluzione spaziale di 100 m costituisce una base preliminare per indagare la relazione tra le tipologie urbane e la temperatura superficiale. Gli sviluppi futuri riguarderanno la valutazione quantitativa dei prodotti ottenuti e la successiva analisi statistica della variabilità della LST nelle

diverse classi LCZ. Queste analisi permetteranno di valutare le potenzialità dell'integrazione tra informazioni sulla struttura urbana e dati satellitari multitemporali di temperatura superficiale nell'ambito degli studi sulla Surface Urban Heat Island a Bologna.

Questo lavoro è stato svolto nell'ambito dello Spoke 7, "Space for the Sustainable Development of the Planet," attività 7.4, "Zero Emission Society," e sottosezione 7.4.2, "Monitoring Urban and Suburban Environments," del progetto Space It Up, finanziato dall'Agenzia Spaziale Italiana, ASI, e il Ministero dell'Università e della Ricerca, MUR, sotto il contratto n. 2024-5-E.0 - CUP n. I53D24000060005.

Riferimenti bibliografici

[1] Oke, T.R.: *Boundary Layer Climates*. Routledge, London (1987).

[2] Stewart, I.D., Oke, T.R.: Local Climate Zones for urban temperature studies. *Bulletin of the American Meteorological Society* 93(12), 1879–1900 (2012).

[3] Weng, Q.: Remote sensing of impervious surfaces in the urban areas: Requirements, methods, and trends. *Remote Sensing of Environment* 117, 34–49 (2012).

[4] Bechtel, B., Demuzere, M., Stewart, I.D., et al.: LCZ Generator: A framework for the global mapping of local climate zones. *ISPRS International Journal of Geo-Information* 8(1), 19 (2019).

[5] C. Yoo, J. Im, S. Park, and D. Cho: Spatial downscaling of MODIS land surface temperature: Recent research trends, challenges, and future directions. *Korean Journal of Remote Sensing*, vol. 36, no. 4, pp. 609–626 (2020).

[6] C. Hutengs and M. Vohland: Downscaling land surface temperatures at regional scales with random forest regression. *Remote Sensing of Environment*, vol. 178, pp. 127–141 (2016).

[7] Geoportale Regione Emilia-Romagna, dati altimetrici.

[8] Open Data Emilia-Romagna, Carta Tecnica Comunale – edifici volumetrici.