

Ottimizzazione delle città intelligenti: l'utilizzo dei gemelli digitali e dell'intelligenza artificiale nei processi decisionali urbani

Optimising Smart Cities: The Use of Digital Twins and Artificial Intelligence in Urban Decision-Making Processes

Paolo Nesi

DISIT Lab, DINFO, Università degli Studi di Firenze

paolo.nesi@unifi.it

ORCID ID: 0000-0003-1044-3107

Chiara Garau

DICAAR, Università degli Studi di Cagliari

cgarau@unica.it

ORCID ID: 0000-0002-6239-5402

Paola Zamperlin

SAGAS, Università degli Studi di Firenze

paola.zamperlin@unifi.it

ORCID ID: 0000-0003-4763-2112

Received: April 2025 / Accepted: July 2025 | © 2025 Author(s).

This article is published with Creative Commons license CC BY-SA 4.0 Firenze University Press.

DOI: 10.36253/contest-16061

Abstract

The article examines the application of artificial intelligence (AI) in “Digital Twin” models to enhance urban decision-making processes. The authors consider the potential of digital twins, which are virtual replicas of physical systems, to optimise the planning and management of smart cities. AI, when integrated into digital twins, enables predictions, the simulation and real-time monitoring of complex functions such as traffic, energy consumption, and social behaviours, establishing the basis for more informed and timely decisions. The digital twin concept was originally applied to industrial manufacturing and has expanded to urban design. An effective digital twin must represent physical reality and related processes, incorporating up-to-date data and using advanced AI models for predictions and simulations. This approach allows for more efficient and resilient urban management, improving responsiveness to unexpected events and facilitating long-term strategic planning. The Snap4City platform is presented as an example of implementing digital twins for smart cities. It integrates data from different sources, supports real-time analysis and visualisation, and enables AI-based operational and strategic management. Snap4City shows significant benefits for public administrations, improving the efficiency of urban services and promoting sustainability and the well-being of citizens.

Keywords: Digital twin, Snap4City, smart cities, artificial intelligence, urban planning

1. Introduzione. Dall'idea di città intelligente al gemello digitale

Le frontiere della conoscenza sono state rivoluzionate dai recenti progressi scientifici e tecnologici, portando ad un'importante ondata di nuovi approcci, modelli, metodi e tecnologie di monitoraggio e rilevamento dirompenti, con impatti significativi sulla società urbana contemporanea (Bibri et al., 2024). In particolare, il gemello digitale (digital twin) è tra le maggiori innovazioni, e in ambito urbanistico si consolida con la nascita e lo sviluppo del concetto di smart city. Infatti, il termine smart city si riferisce ad una città che utilizza le risorse naturali ed economiche in modo sostenibile, interagisce con il capitale sociale ed umano e allo stesso tempo l'amministrazione e i cittadini lavorano insieme utilizzando le nuove tecnologie con l'obiettivo di rendere la città più efficiente, intelligente, sostenibile, sicura, inclusiva, democratica e felice (Garau et al., 2020; Zhao et al., 2021; Chan, 2023; Garau et al., 2023; Manfreda & Mijač, 2024; Pinna et al., 2025). Tuttavia, i modelli tradizionali di pianificazione e gestione del territorio difficilmente riescono a integrare la lettura dei dati provenienti dai diversi servizi che ruotano attorno alla città (Ferré-Bigorra et al., 2022) (De Benedicts et al., 2025). I gemelli digitali aiutano ad integrare queste informazioni, determinando gli impatti di queste informazioni aggregate quasi in tempo reale, consentendo quindi di poter prendere decisioni tempestive sia nei contesti di gestione operativa che per la pianificazione tattico strategica.

Ma andando con ordine, il termine gemello digitale è stato coniato per la prima volta all'inizio di questo millennio da Michael Grieves (2014), che vedeva nella replica della fabbrica virtuale una spinta verso l'eccellenza manifatturiera e ha così di fatto contribuito alla diffusione dell'uso di questa metafora nell'ingegneria della produzione. È facile intuire che, in questo ambito, per gemello digitale si intenda l'immagine speculare di un processo fisico con la capacità di riprodurre o simulare il suo funzionamento, mentre si va sviluppando parallelamente al processo fisico stesso.

È trascorso soltanto un decennio dalla sua introduzione e molto velocemente questo concetto si è adattato ad altri ambiti del design non strettamente manifatturiero fino ad estendersi, con notevole salto di scala, alla progettazione e gestione di più articolate porzioni di spazio, da singoli edifici a intere città. Il salto di scala ha comportato non solo un aumento dell'area considerata, ma soprattutto un incremento della complessità di fattori e variabili da prendere in esame, pena il decadere dell'attributo costitutivo del modello digitale e cioè quello di essere copia fedele della realtà e dei processi che in essa si verificano. Quindi, il concetto viene ora utilizzato per caratterizzare una varietà di modelli di simulazione digitale che si sviluppano paralleli a processi in tempo reale riguardanti sistemi fisici così come sistemi sociali ed economici.

L'idea alla base poggia sul principio secondo il quale un vero gemello digitale che funziona in tempo reale non sia diverso dal sistema stesso e pone, pertanto, la questione di come il gemello digitale possa essere utilizzato, in primis, per conoscere il sistema e, in secundis, per esplorare, simulare e testare nuovi progetti e nuove forme/comportamenti che il sistema può assumere.

Chiaramente, se la creazione di un gemello digitale di un progetto industriale o di un singolo edificio è tutto sommato facile da immaginare e realizzare, molto complessa è invece la sua gestione quando si deve adattare alla scala urbana, poiché oltre alla riproduzione di tutte gli equivalenti fisici di base che compongono la città si devono includere i processi che ne determinano il funzionamento, che è la risultante di componenti vitali immateriali che con consapevole riduzione chiamiamo funzioni culturali, sociali ed economiche.

Nel dibattito scientifico e politico attuale (Batty, 2018; Batty, 2024; Batty, 2024b) le principali questioni vertono su alcuni nodi principali. Per prima cosa che tipo di rappresentazione ci possiamo attendere da un gemello digitale, e cioè, in altri termini, qual è il livello minimo accettabile di accuratezza nella riproduzione della realtà, direttamente consegue dalla raffinatezza dei dati disponibili, e su quali copertura spaziale e frequenza di aggiornamento possiamo fare affidamento. Inoltre, quali siano i requisiti e i costi computazionali ed energetici che questo comporta, ma soprattutto in che cosa la disponibilità di un gemello digitale affidabile può facilitare o efficientare la gestione di sistemi complessi quali quelli urbani (Grieves & Vickers, 2017). I modelli virtuali 3D, anche se incorporano processi in tempo reale, come ad esempio il traffico o i consumi di energia o i comportamenti delle persone, rimangono rappresentazioni significative soltanto per brevi periodi di tempo e spesso in una sezione trasversale della città (Lei et al., 2023). In questo senso, essi sono molto più simili a un modello computerizzato convenzionale, in grado di astrarre solo un insieme limitato di variabili e processi, ma ancora limitato nella predisposizione di quadri conoscitivi, scenari di progettazione o di intervento. I modelli di intelligenza artificiale di grandi dimensioni e in particolare il deep learning permettono di mettere a punto modelli che possono tenere conto di enormi quantità di variabili abbattendo le limitazioni dei modelli computazionali tradizionali, sia per le predizioni che per le simulazioni con i modelli generativi.

Nei paragrafi che seguono si darà spazio alla descrizione di una piattaforma, Snap4City, progettata per la gestione di città intelligenti (par. 2) soffermandosi sugli elementi di forza maturati nelle diverse esperienze di implementazione nel corso del tempo con attenzione ai casi di digital twin sperimentati (par. 3) e a questioni aperte riguardanti i vantaggi e le potenzialità dei gemelli digitali per le pubbliche amministrazioni e i cittadini (par. 4).

2. Un modello di architettura per la gestione di città intelligenti: Snap4City

Tra le diverse soluzioni che hanno visto la luce negli ultimi anni con lo scopo di risolvere i molteplici problemi connessi alla gestione di contesti urbani, si presenta il caso di Snap4City in virtù della pluriennale esperienza di sviluppo e implementazione in diverse aree geografiche e scale di utilizzo, fattori questi che consentono di formulare valutazioni significative su vari aspetti che il problema dell'infrastruttura di gestione pone ai decisori politici come ai pianificatori.

Nel 2013 viene rilasciata la prima versione di Snap4City, che raccoglie l'esperienza di sviluppo di Km4City, una base di conoscenza progettata inizialmente come ontologia per le smart city, alimentata da informazioni e modelli focalizzati sui dati (aperti e non) del Comune di Firenze e della Regione Toscana, poi cresciuta e migliorata grazie alla sua applicazione in progetti nazionali ed europei di più ampio respiro, incentrati sullo sviluppo di soluzioni in risposta a questioni derivanti dalla mobilità alla resilienza dei sistemi territoriali (i.e.: Sii-Mobility, RESOLUTE, REPLICATE, Smart3rFlits ed anche Select4Cities)¹. Km4City è una ontologia che integra un elevato numero di vocabolari semantici (e.g., DC, FOAF, WGS84, SAREF, GTFS, etc.) e li integra per fornire un motore di classificazione delle entità della città e delle loro relazioni che permette di unificare ogni tipo di dato che entra nel sistema e di collegarlo all'esistente.

La prima consapevolezza che emerge da questa iniziale esperienza è che, se si parte dall'assunto di base che le città possono essere considerate come infrastrutture critiche, sia necessaria un'infrastruttura molto articolata, scalabile e adattabile a diversi contesti. In altri termini, un'architettura digitale per la città deve essere disegnata su di un modello di città concepita come sistema di sistemi (mobilità di merci e persone, trasporti², energia, telecomunicazioni, scuola, sanità, consumi energetici, etc.), che in quanto tale soffre degli effetti a cascata tra i diversi sottosistemi, come si comprende facilmente quando si verificano eventi calamitosi che comportano la predisposizione di piani di gestione dell'emergenza integrati, nei quali si devono minimizzare i danni su tutte le componenti coinvolte. Snap4City è stata in seguito arricchita da una seconda ontologia UKM (unified knowledge model), che modella i processi e le loro relazioni con dati ed utenti (Bellini et al., 2024a). Questo modello insieme con Km4City permette di comprendere le interrelazioni fra processi e anche gli effetti a cascata che potrebbero svilupparsi.

Risulta chiaro che, in questa visione, una piattaforma che sia solo di aggregazione dei dati non è più sufficiente, ma è necessario disporre di un'architettura che funga da sistema di controllo per la gestione operativa, cioè attiva e tempestiva, nel momento in cui vengono registrate delle anomalie. In altre parole, il sistema deve permettere sia di attivare una risposta in tempo reale (che nel caso urbano si considera nell'ordine dei 15 minuti) nell'immediato post eventum anomalo, sia deve essere in grado di prevedere con affidabilità il verificarsi di eventi anomali e provvedere con sistemi di allerta coerenti (*early warning*). Snap4City fornisce processi di anomaly detection, che usualmente producono solo notifiche verso gli operatori ai quali spetta la decisione. In certi casi, la decisione viene presa in modo automatico, come, per esempio, per il cambio di illuminazione in caso di traffico intenso o di incidenti (si veda a riguardo il caso di Merano). Nell'ambito del turismo e della mobilità la piattaforma informa gli utenti notificando la presenza di situazioni critiche, via mobile app e/o digital signage in caso di traffico intenso, scarsità di parcheggi, affollamenti, come per esempio avviene nelle soluzioni TOURISMO ed OPTIFaaS basate su Snap4City.

Ancora più cruciale per la governance urbana è, tuttavia, la possibilità di disporre di strumenti per la pianificazione tattica e strategica, ovvero per la pianificazione di breve (per esempio di 6 mesi, o anni) o lungo periodo (oltre i dieci anni). Per raggiungere lo scopo, sono necessari dati storici, vanno definiti degli indicatori di performance ed eseguite delle valutazioni del rischio derivante dall'adozione di determinate misure, ovvero effettuare quella che viene definita *what-if analysis*, e cioè una simulazione basata su scenari.

¹ <https://www.km4city.org>, <https://www.snap4city.org/19>

² Pappalardo et al., 2023.

Una progettazione che segua questo principio richiede l'adozione di uno specifico approccio progettuale da un lato e il ricorso a strumenti decisionali e a dati che ne permettano l'applicazione. In un ambiente come Snap4City sono abilitate entrambe le condizioni, che si concretizzano nella possibilità di combinare living labs con strumenti di configurazione di scenari su sistemi differenti (mobilità, sanità, trasporti, meteo, lavori pubblici, energia, etc.), sui quali applicare modelli simulativi basati su una base informativa di dati storici e in grado di essere affidabili anche nel lungo termine. Quando la risposta ad eventi solitamente classificati come "unexpected unknown" è data tempestivamente ed efficacemente l'ecosistema dimostra un alto grado di resilienza. Per la gestione dei processi la piattaforma fornisce l'integrazione con sistemi di workflow management, mentre le interrelazioni fra applicazioni, dati, e persone viene modellata con istanze dati dell'ontologia UKM. È, pertanto, possibile interrogare il sistema per capire su quali applicazioni e processi possono influire certi dati e viceversa. A questo riguardo viene fornita un'interfaccia che permette il colloquio in linguaggio naturale.

Il gemello digitale viene ad occupare una posizione centrale e cruciale in questa architettura, nel momento in cui esso è capace di adattarsi alla realtà che rappresenta, aggiornando le modificazioni in tempi rapidi. Al nucleo dei progettisti e decisori spetta il compito di definire degli indicatori di performance ad hoc (KPI: SUMI, PUMS/SUMP, *15 minute city index*, come quelli a breve termine: tempi di percorrenza, misura delle code, etc.)³, utili sia per il monitoraggio delle condizioni di stato che per la misurazione di eventuali scostamenti e l'individuazione conseguente di anomalie, operata grazie a strumenti di intelligenza artificiale (IA), come modelli generativi o di *reinforced learning* (Feredooni et al., 2025).

Diverso è invece l'impiego dell'IA per la generazione stessa degli scenari che devono essere a loro volta testati sui KPI definiti per saggiarne la loro efficacia perché possano essere proposti come soluzioni nel contesto del sistema di supporto alle decisioni.

Perché l'intera architettura risponda agli obiettivi in termini di efficienza ed efficacia e porti a stime accurate, essa deve poggiarsi su una struttura dati completa e su modelli predittivi affidabili. Il gemello digitale, pertanto, deve modellare componenti funzionali, strutturali, visuali e informative, aggiornando in tempo reale (con frequenza di aggiornamento dipendente dal tipo di variabile considerata e dal tipo di dato che la esprime) e applicare analitiche conseguenti (predizioni, classificazioni, rilevamento di anomalie, generazione, tutte soluzioni di IA anche con il supporto di tecnologie di IA spiegabile) per la rappresentazione del comportamento funzionale della città.

Nella messa in opera di un *digital twin*, la fase di progettazione è delicata e, in base all'esperienza maturata, si articola in momenti distinti e in parte sequenziali, che definiamo: Data discovery, Data processing, Data analytics e User interface/interaction. Come si può notare il processo implementativo ruota intorno ai dati. Dalla loro disponibilità (accessibilità, copertura e aggiornamento), selezione, acquisizione, omogeneizzazione, aggregazione e modellizzazione, dipendono tutte le operazioni successive di processamento, analisi e visualizzazione che rendono un gemello digitale più o meno aderente alla realtà che emula, e più o meno performante in una dimensione di monitoraggio e di pianificazione tattica e strategica.

3. Lettura di un'esperienza decennale: punti di forza e sfide aperte

Le città sono sistemi complessi per definizione (Bettencourt, 2021) e per conseguenza soltanto un'architettura progettata come infrastruttura critica può segnare un salto di qualità negli approcci tradizionali di pianificazione e gestione degli spazi urbani. L'esperienza di oltre un decennio di progettazione e ingegnerizzazione di processi e di sviluppo di soluzioni hardware e software in settori critici della vita nelle città, e tra le città, fa da sfondo alle valutazioni che seguono sulla loro efficacia.

La piattaforma Digital Twin Snap4City (Adreani et al., 2024), integralmente conforme ai requisiti imposti dalla normativa europea in materia di protezione dei dati (GDPR), è rilasciata e distribuita con licenza open source Affero GPL senza obbligo di registrazione e di sottoscrizione. Pertanto, sebbene si possa avere soltanto una stima parziale del numero e del tipo degli utilizzatori nel mondo, che comprende aree di diversa estensione (da sito industriale a intera regione), la lista degli utenti registrati, che comprende soltanto le installazioni *on cloud* e non *on premise*⁴, localizzati in diversi paesi europei ed extraeuropei autorizza iniziali positive considerazioni. Snap4City è una piattaforma flagship del CN MOST (Centro nazionale per la mobilità e i trasporti), adottata per la gestione dell'illuminazione stradale Merano SmartLight, adottata per la gestione e il controllo ICT della città di Cuneo, piattaforma della sala controllo per l'isola di Rodi, ed fra le tante installazioni anche come due piloti sul

³ Wefering et al., 2019; https://transport.ec.europa.eu/system/files/2020-09/sumi_wp1_harmonisation_guidelines.pdf

⁴ Snap4City & Snap4Industry Registered Instances Installations: <https://www.snap4city.org/661>

Digital Twin del centro nazionale HPC, ecc. In generale, la piattaforma è presente in oltre quaranta aree distribuite principalmente tra Europa, Australia, Brasile e Cina⁵ e attualmente sono migliaia gli operatori e sviluppatori coinvolti nelle diverse installazioni urbane e regionali (Italia: Firenze, Merano, Cuneo, Lonato del Garda, Cagliari; Spagna: Valencia; Grecia: isole Rhodes e Patra e regioni della Grecia occidentale; Cipro: Limassol; Croazia: Dubrovnik, Bisevo; Malta; Bosnia-Erzegovina: Mostar; Bulgaria: Varna; Finlandia: Helsinki, Australia, Brasile, Cina, Romania, Belgio, etc.). Inoltre, è utilizzata da ISPRA JRC della Commissione europea. Il successo è legato alle caratteristiche della piattaforma che, in aggiunta alla facilità di installazione, soddisfa tutti i requisiti previsti dall'Azione europea CitiVerse, anche in comparazione con soluzioni analoghe⁶.

Va chiarito che nella maggior parte dei casi, l'adozione di questa architettura non si limita alla semplice installazione di un software, ma richiede un esame del contesto specifico su cui esso va a operare, in virtù del principio secondo il quale ogni luogo ha caratteristiche fisiche e una dotazione infrastrutturale proprie così come un milieu socio-culturale ed economico distintivo di cui si deve tener conto. Diverse sono, quindi, le esigenze di partenza e i requisiti o le condizioni di fatto che ciascuna realtà espone, muovendo in alcuni casi verso lo studio di soluzioni orizzontali (infrastruttura generica) o di specifici verticali (asset specifici da gestire, che vanno dall'illuminazione pubblica, ai parcheggi, telecamere, flotte, distributori, ottimizzazione del traffico, matching tra domanda e offerta di trasporto pubblico, raccolta dei rifiuti, gestione dell'energia, sensori per il traffico o per la qualità dell'aria, etc.).

Una volta identificati i dati, essi entrano nel sistema dove possono essere visualizzati, secondo un design grafico personalizzabile, dopo pochissimi istanti per entrare a regime.

La facilità di uso, garantita da componenti software predisposti per semplificare al massimo lo sviluppo e l'evoluzione, si è dimostrata nel tempo un requisito importante e un vantaggio notevole nella scelta di adottare la piattaforma poiché sposta in maniera naturale lo sforzo degli utilizzatori sullo studio delle possibilità di impiego del software e diminuisce i tempi di apprendimento del sistema (Bellini et al., 2024b).

Un'altra caratteristica rilevante è quella di essere ad un tempo adattabile a contesti di dimensioni diverse e performante per ogni livello di attivazione dei processi finalizzati alla messa a punto di una città intelligente, schematizzati nella Fig. 1, e che riguardano in estrema sintesi le fasi di acquisizione dei dati, di analitica e di visualizzazione.

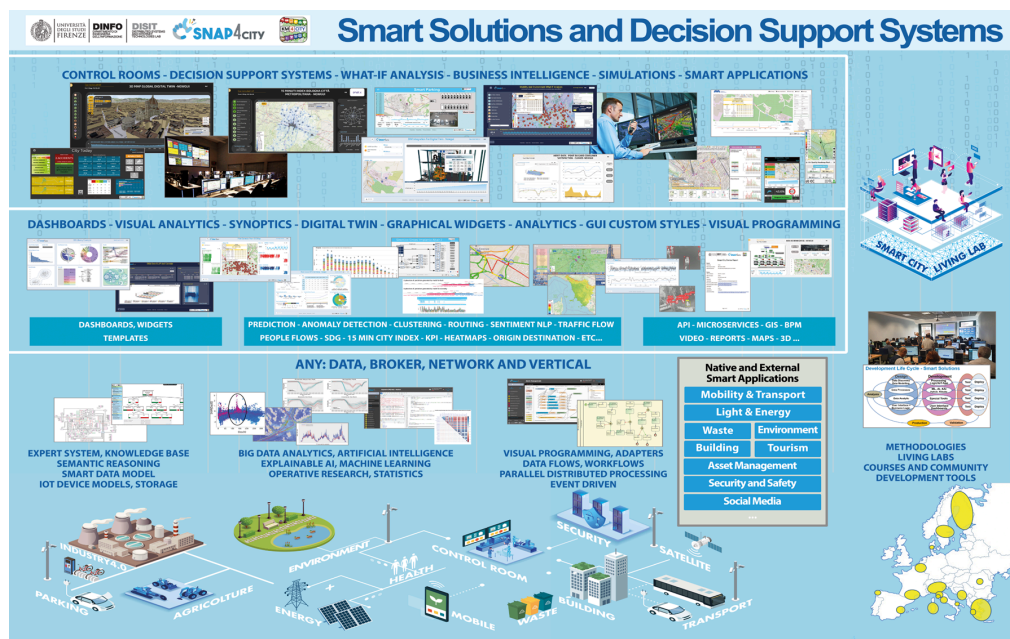


Fig.1. Schema dell'architettura di Snap4City.

Source: www.snap4city.org

⁵ Per un aggiornamento sullo stato degli scenari applicativi e casi noti si rimanda alla pagina: <https://www.snap4city.org/4>

⁶ Per un più esaustiva valutazione comparativa si rimanda a (Bellini et al., 2025; Adreani et al., 2024).

In un unico sistema, quindi, è possibile aggregare dati di qualsiasi origine e specie (GIS, BIM, Social Media, satellite, servizi esterni, web, sensori, video e termo camere, matrici origine-destinazione, flussi del traffico, heatmap, etc.) attraverso molteplici protocolli di trasmissione e standard, che confluiscono a seconda della tipologia nello storage o direttamente o dopo un processamento. In estrema sintesi, Snap4City adotta un approccio end-to-end sicuro basato su processi di ingestione ed interoperabilità basati su Node-RED che possono essere allocati su cloud e edge, per lo sviluppo e la gestione di processi per dati multi-protocollo e multi-formato⁷, con una fase di uniformazione semantica sulla base dell'ontologia Km4City⁸, indicizzazione avanzata⁹ ed erogazione intelligente mediante l'attivazione di servizi smart e riuso dei dati interrogabili da dashboard interattive, sistemi di allerta, previsioni etc. Questa condizione è imprescindibile e derivante dall'essere le città infrastrutture critiche con specificità proprie. All'interno dello storage vengono ricreate le relazioni tra gli oggetti reali che costituiscono di fatto il modello sul quale si realizza il gemello digitale. È chiaro, quindi, che dalla qualità, quantità e correttezza delle relazioni, che permettono di operare interrogazioni semantiche, dipende l'accuratezza di quest'ultimo¹⁰.

Tutti i processi di analisi, anche previsionale, simulazioni, what-if, etc. e di business intelligence o di business logic utilizzano tutti i dati presenti nello storage congiuntamente con dati in tempo reale che continuano ad alimentare il sistema (sfruttando algoritmi di IA, ricerca operativa e modelli ad agenti), ed allo stesso tempo il gemello digitale può mandare comandi al sistema fisico. In Snap4City, gli attuatori operano esattamente come i sensori, ma con flusso inverso, poiché ricevono comandi dal sistema per intervenire fisicamente o logicamente su dispositivi distribuiti in città. Ogni attuttore è una Entity, registrato in una Entity Directory con proprio modello, modello di protezione, e posizione su mappa, accessibile con protocolli standard o custom sia push che pull (oltre 190 su Snap4city). L'interazione con l'utente avviene mediante widgets grafici inseriti nelle dashboard di visualizzazione o con mobile App, che permettono di agire sul sistema con modelli a microservizi sincroni e/o asincroni anche verso l'interfaccia utente tramite protocollo WebSocket sicuro (WSS).

La parte di visualizzazione, che costituisce il livello più alto e quindi più vicino agli utenti finali, dispone di varie componenti modulabili e altamente personalizzabili adatte alla restituzione sintetica e grafica del dato analizzato, l'interazione e la comunicazione. È importante sottolineare che sia per i diversi livelli ogni utente può creare direttamente i propri strumenti di analisi dati (programmabili in Python, R-Studio a seconda del tipo di strumento o di interfaccia considerata, per i modelli predittivi, simulazioni, classificazioni, etc.), oppure per le trasformazioni dati, per l'interoperabilità tramite una ricchissima gamma di librerie e blocchi/microservizi Node-Red e JavaScript predisposti, che agevolano l'adattamento del sistema ai problemi effettivi e alle specificità del contesto, secondo un approccio fortemente *place-based*.

Il gemello digitale che ne deriva non è quindi una semplice rappresentazione tridimensionale della realtà fisica, ma un sistema articolato di modellizzazione, analisi, simulazione e visualizzazione di essa, in grado anche di sviluppare algoritmi di intelligenza artificiale che soddisfano principi etici (p.e., anche tramite XAI) e formulare previsioni su svariate questioni che vanno dalla predizione dei flussi di pedoni, alle disponibilità di parcheggi (con effetti sulla riduzione dei tempi di ricerca e produzione di scarichi inquinanti, Bilotta et al., 2023), stima dei fattori di inquinamento (Bilotta et al., 2025), o la predizione di eventi di frana (Collini et al., 2022; Collini et al., 2024), come anche produrre suggerimenti per la pianificazione tattico/strategica o per fare fronte a situazioni di emergenza, rendendo gli strumenti di What-If analysis uno strumento di conferma più che uno strumento di lavoro. Numerosi sono gli esempi a riguardo. Citando il caso della Città Metropolitana di Firenze, Snap4City ricevendo dati in tempo reale da sensori su flussi di traffico, meteo, eventi e cantieri, permette agli operatori di

⁷ IoT Applications e Micro services: Snap4City supporta MQTT, AMQP, OneM2M, SigFOX, LoRaWAN, broker NGSI Orion, REST/FTP, scraping e file upload locale o remote; Data Table Loader: per importare excel o CSV trasformandoli in modelli IoT e KPI; ETL e Scraping visuale: per estrarre dati da Open Data portal, servizi REST. (per la lista dei protocolli e formati supportati in <https://www.snap4city.org/65>)

⁸ L'uso esplicito di ontologie segue principi di ontology based data integration, garantendo un modello globale coerente, si veda ad esempio: Km4City Urban Graph Representation, <https://www.snap4city.org/397>. Km4City Knowledge Base si caratterizza per essere un'ontologia multisettoriale (trasporti, ambiente, edilizia, etc.) in grado di modellare eterogeneità sintattiche/strutturali e disambiguare la semantica.

⁹ L'aggregazione flessibile dei dati avviene sulla base del modello ontologico locato in RDF store NoSQL come Virtuoso, e OpenSearch per i dati temporali e tabellari e documentali, supportano sia per flussi real-time (tramite broker e protocolli WS) sia batch, con indicizzazione semantica e geografica; Knowledge graphs e KPIs trasformano i dati integrati in entità/relazioni interrogabili via API o query semantiche.

¹⁰ Si veda pagina Snap4City Digital Twin: <https://digitaltwin.snap4city.org/>

simulare scenari alternativi in caso di congestione o chiusura strade (Fereidooni et al. 2025). Gli operatori testano virtualmente questi scenari con modelli predittivi/simulazione e sulla base delle risultanze intraprendono azioni reali (p. es. reindirizzamento semaforico o apertura varchi ZTL). Riguardo il problema delle emergenze ambientali, alluvioni e rischio idrogeologico, Snap4City raccoglie ed elabora i dati da pluviometri, radar meteo, immagini da droni e le allerte dalla Protezione Civile e predispone dei modelli di What-If che permettono agli operatori di valutare cosa potrebbe succedere a fronte di veri eventi naturali o provocati impostando conseguenti azioni di risposta, come la chiusura selettiva di ponti e tunnel, deviazioni del traffico ed evacuazioni mirate. In contesti di emergenza per pubblica sicurezza, è possibile monitorare anche i flussi pedonali attraverso termocamere e algoritmi previsionali sia in fase di pianificazione che di gestione degli eventi. Uno dei settori in cui la pianificazione urbana assume valore strategico è quello conseguente all'ottimizzazione del trasporto pubblico, che può essere gestito attraverso opportunamente allestite Smart City Control Rooms, attraverso le quali ipotizzare scenari What-If conseguenti allo spostamento di linee di TPL (quanto aumentano i tempi di percorrenza? Come cambia l'accessibilità per le fasce deboli?) e sfruttando la possibilità di un confronto visuale tra scenari, KPI calcolati (inquinamento, tempi, costi). A questo riguardo Snap4City è stato adottato come piattaforma di riferimento per il Centro Nazionale MOST, per fornire servizi di ottimizzazione della mobilità a piccole e medie città con la flagship OPTIFaaS¹¹.

4. Vantaggi e potenzialità per i diversi stakeholder (governo, settore privato, cittadini) attraverso la piattaforma Digital Twin Snap4City

La completezza e la precisione delle informazioni che i gemelli digitali offrono alle città acquisiscono notevole importanza tanto più quando l'affidabilità dei dati (in termini di qualità, copertura, aggiornamento, etc.) aiutano le pubbliche amministrazioni non solo a limitare, contrastare eventi esterni catastrofici, ma anche a migliorare il processo decisionale, l'allocazione delle risorse, la gestione di tutte le infrastrutture sotto analisi (mobilità, energia, risorse idriche, turismo, etc.). Per massimizzare i vantaggi, i gemelli digitali devono comprendere e operare su interi processi e contesti, considerando il fragile equilibrio tra obiettivi di sostenibilità, comunità, tecnologia e profitto (Chen, 2023; De Benedictis et al. 2025).

Come accennato in precedenza, Snap4City grazie alla sua esperienza decennale, aiuta le città a migliorarsi significativamente sfruttando le loro capacità avanzate di integrazione dei dati, monitoraggio in tempo reale, simulazione e visualizzazione. Ma da un punto di vista pratico, in che modo Snap4City aiuta i diversi stakeholders (governo, settore privato e cittadini). Quali sono i benefici per la comunità? La Fig. 2 mostra un collage di alcuni dei numerosi esempi di applicazioni specifiche, tra cui la gestione delle cabine di illuminazione a Stockholm, la gestione del sito del JRC dell'Unione Europea di ISPRA (VA), l'uso di telecamere termiche poste in piazza signoria Firenze, la gestione dell'illuminazione pubblica a Merano, il modello predittivo della produzione di NOx basato sul traffico a Firenze, mappe di calore in Helsinki.

¹¹ <https://www.snap4city.org/drupal/node/1008>

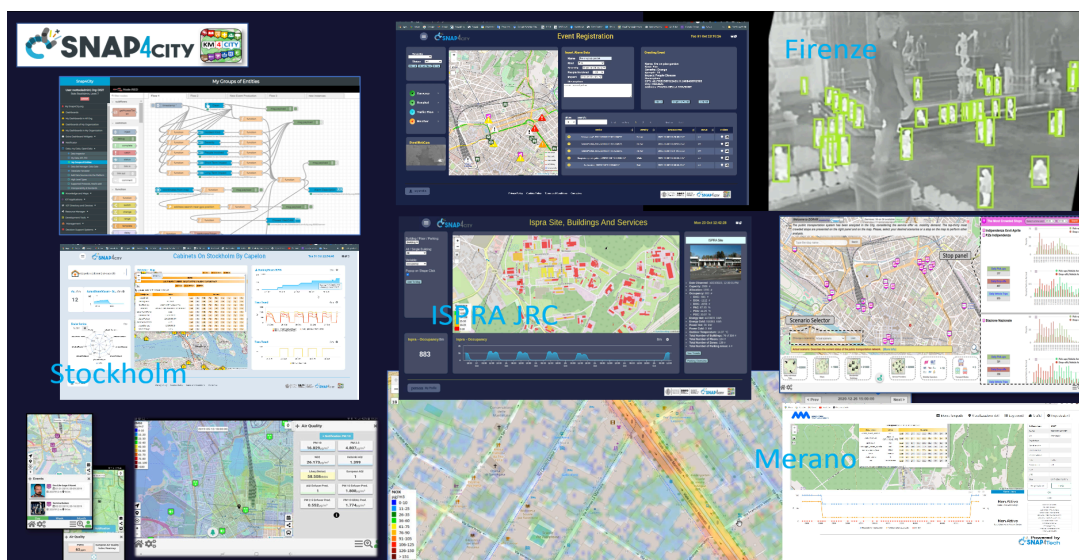


Fig. 2. Alcuni esempi di applicazione della soluzione Snap4City.

Source: www.snap4city.org

Di seguito si descrivono brevemente alcuni dei punti di forza della piattaforma.

4.1 Integrazione dei dati e monitoraggio in tempo reale:

- **Data Hub centralizzato:** Snap4City è una piattaforma integrata in cui i dati provenienti da sensori, dispositivi IoT, servizi di broker (MQTT, AMQP, OneM2M, Sigfox, LoraWAN, FIWARE Orion Broker), social media, satelliti, Open Data, sistemi legacy, immagini da droni e telecamere che vengono raccolti e integrati e resi accessibili per l'analisi e il processo decisionale. Questo repository di dati completo consente il monitoraggio e l'analisi in tempo reale delle operazioni cittadine, fornendo una visione olistica delle dinamiche urbane (<https://digitaltwin.snap4city.org/>). Snap4City effettua l'aggiornamento dei dati in tempo reale (e quasi real-time) attraverso un'architettura di flusso continuo "event-driven", secondo un flusso di ingestion (sia push che pull), indicizzazione semantica automatica, streaming, dashboard, alerting e produzione di simulazioni what-if e KPI come descritto nei paragrafi precedenti.
- **Analisi predittiva:** utilizzando l'apprendimento automatico e l'intelligenza artificiale, Snap4City è in grado di analizzare i dati storici e in tempo reale per prevedere le tendenze, identificare potenziali problemi e ottimizzare i servizi urbani. Ad esempio, la capacità predittiva aiuta ad anticipare la congestione del traffico, pianificare la raccolta della nettezza, a gestire il consumo energetico e a reagire prontamente alle emergenze, migliorando così l'efficienza e la reattività della città (in <https://www.snap4city.org/997> è proposto un catalogo delle funzioni offerte dagli strumenti Digital Twin di Snap4City). Grazie al continuo flusso di dati aggiornati, il Digital Twin urbano mantiene una visione sincronizzata con la realtà fisica riguardo alle reti stradali, all'edificato in 3D e a diversi flussi ambientali rilevabili da sensore. Ogni elemento è aggiornato "live" nella vista 2D/3D.

4.2 Ottimizzazione dei servizi urbani:

- **Smart Transportation:** Snap4City simula il traffico e l'utilizzo dei trasporti pubblici per identificare i colli di bottiglia e proporre miglioramenti. È in grado di gestire e ottimizzare i percorsi, gli orari e l'invio dei veicoli del trasporto pubblico in base alle condizioni del traffico, portando a servizi più efficienti e affidabili, grazie al progetto SASUAM "Solutions for Safe, Sustainable and Accessible Urban Mobility" del Centro Nazionale per la Mobilità sostenibile, MOST (<https://www.snap4city.org/999>).
- **Gestione dell'energia:** monitorando e gestendo il consumo energetico in tempo reale, Snap4City può migliorare l'efficienza energetica negli edifici, nell'illuminazione stradale e nelle strutture pubbliche. Si possono anche integrare le fonti di energia rinnovabile in modo più efficace (si veda per esempio Snap4Merano, <https://www.snap4city.org/968>).

4.3 Gestione dell'infrastruttura:

- **Gestione delle risorse:** Snap4City controlla le condizioni e le prestazioni delle infrastrutture urbane, come strade, ponti, servizi pubblici, reti di approvvigionamento idrico e reti elettriche in tempo reale.

Snap4City aiuta nella manutenzione predittiva e nella riduzione dei tempi di inattività e prolunga la vita delle infrastrutture, garantendo servizi urbani efficienti e affidabili (si veda Snap4Cuneo, <https://www.snap4city.org/975> e Snap4ISPRA, <https://www.snap4city.org/970>).

- *Gestione dell'acqua*: Snap4City può ottimizzare le reti di distribuzione dell'acqua, monitorare la qualità dell'acqua e rilevare le perdite, garantendo una gestione efficiente e sostenibile dell'acqua.

4.4 Risposta alle emergenze e sicurezza pubblica:

- *Gestione dei disastri*: Snap4City è in grado di simulare scenari di emergenza, o predire eventi naturali, si veda il modello di predizione delle frane naturali, e quindi sviluppare strategie di risposta. La produzione di allarmi in tempo reale permette di migliorare la reattività, contenere i danni, migliorare il coordinamento dei servizi di emergenza durante gli eventi. Ciò migliora la preparazione e la capacità della città di rispondere alle crisi, riducendo i potenziali danni e salvando vite umane.
- *Sicurezza pubblica*: l'integrazione dei sistemi di sorveglianza e degli strumenti predittivi all'interno di Snap4City aiutano a monitorare gli spazi pubblici e a prevenire il crimine, migliorando così la sicurezza pubblica. Ciò migliora la prevenzione del crimine, migliorando le capacità di risposta alle emergenze e aumentando la sicurezza generale degli ambienti urbani (si veda Snap4Cuneo, <https://www.snap4city.org/975>).

L'integrazione di queste analisi alle diverse simulazioni in 3D consente a Snap4City, con il gemello digitale, di fornire modelli avanzati di comprensione dei contesti urbani, permettendo ai pianificatori e agli amministratori pubblici una pianificazione più accurata e completa, visualizzando e facendo visualizzare a tutte le parti interessate l'impatto dei nuovi sviluppi e dei progetti infrastrutturali prima che questi vengano realmente costruiti, minimizzando gli errori di progettazione (si veda Fig. 3).

Queste modalità operative aprono inevitabilmente il dialogo tra tutte le parti interessate, tanto più se si creano i presupposti per fornire servizi personalizzati ai residenti, ma anche a tutti i cittadini, come, ad esempio opzioni di trasporto pubblico su misura, servizi sanitari e attività ricreative.

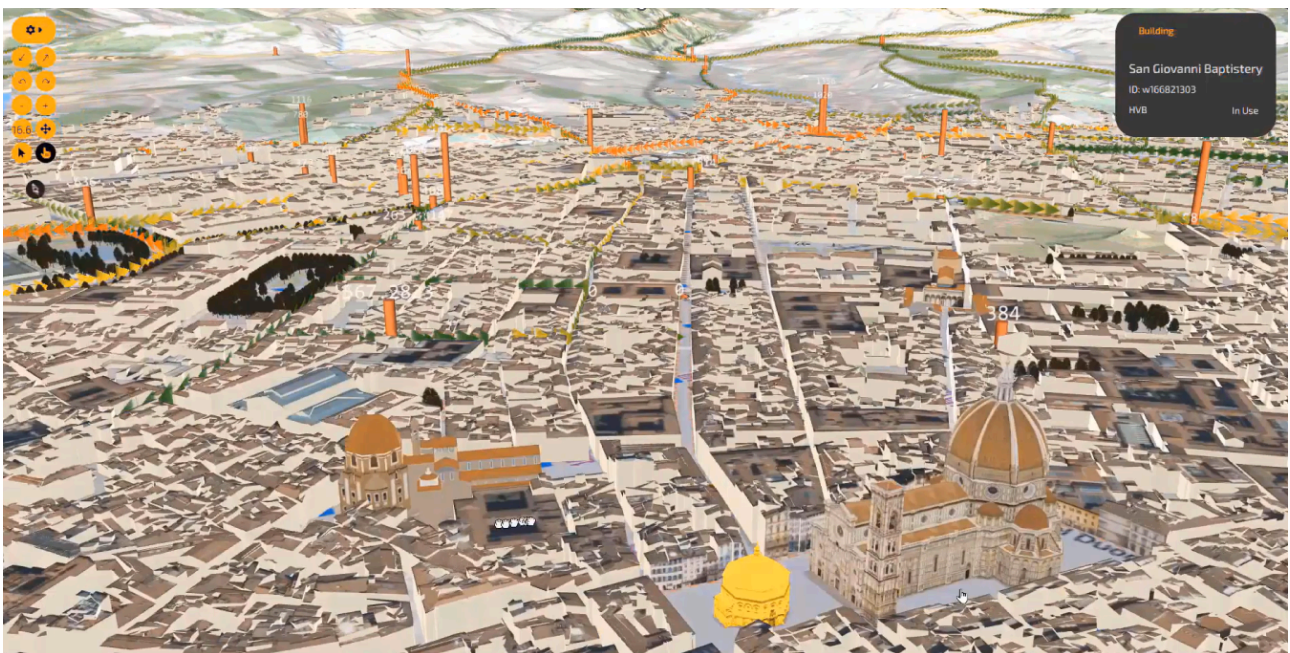


Fig. 3. Digital Twin globale su Firenze da Snap4City. Nell'immagine, lo schermo della visualizzazione del Digital Twin con alcuni edifici di valore ad alta risoluzione, altri edifici ottenuti per estrusione ma con le falde dei tetti orientate come da dati LIDAR. Ogni edificio ha il suo gemello digitale, il battistero è stato selezionato in alto il suo ID (da dove si accede ai dati interni). Sullo sfondo si vedono dei cilindri che rappresentano dati ambientali, e il flusso del traffico come frecce in movimento sui viali di circonvallazione. Molte altre informazioni possono essere visualizzate come: mappe di calore, matrici origine destinazione, percorsi dinamici sulla base delle scelte dell'utente, etc.

Source: www.snap4city.org

Snap4City è progettato per gestire processi complessi in ambito urbano, ambientale, logistico e industriale, coprendo interi flussi operativi, dalla raccolta dati alla decisione tattica/strategica e all'attuazione. Ciò è reso possibile grazie a una struttura modulare e semantica che consente di modellare contesti (trasporto urbano, rischio ambientale, salute pubblica), attori (operatori, cittadini, sensori, attuatori, autorità), eventi e condizioni (pioggia, congestione, blackout, alluvioni, smottamenti e frane, eventi di traffico, etc.) e azioni automatiche o umane (chiusura tunnel, allerta, ricalcolo percorsi). I processi sono gestiti tramite una knowledge base semantica (Km4City), Node-RED e Microservizi Snap4City che includono predizioni, anomaly detection, simulazioni, calcolo di indicatori di varia natura, KPI (15 Min City Index, mean time to travel, lunghezza delle code, eventi di emergenza, SUMI/PUMS, etc.), etc. Un esempio potrebbe essere: "Se il PM10 supera 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ e il traffico in Viale Europa è elevato, allora invia allerta al centro operativo del Comune ed ad ARPAT, attiva il messaggio su pannelli stradali, chiudi lo scudo verde ai mezzi inquinanti, riduci la frequenza dei bus". L'interazione con gli utenti avviene tramite widget grafici inseriti nella dashboard di visualizzazione o con app mobile, che consentono di agire sul sistema con modelli con microservizi asincroni e/o sincroni anche verso l'interfaccia utente tramite protocollo websocket sicuro (WSS), e protocolli event driven in push come MQTT, NGSI, ecc. I flussi di lavoro specifici possono essere impostati in Node-RED e/o tramite processi definiti in BPMN (Business Process Model and Notation).

In particolare, alcune azioni pratiche di coinvolgimento tra le parti interessate e messe in atto da Snap4City possono essere così elencate:

4.5 Collaborazione con le diverse parti interessate:

Collaborazione multi-stakeholder: Snap4City Cityverse può fungere da piattaforma collaborativa in cui funzionari comunali, urbanisti, architetti e cittadini possono lavorare insieme in un ambiente virtuale. Ciò può snellire i processi decisionali e garantire che gli obiettivi di sostenibilità siano integrati nei piani di sviluppo urbano.

4.6 Collaborazione e innovazione:

Urban Innovation Labs: Snap4City può essere utilizzato per allestire e ospitare laboratori virtuali in cui vengono sviluppate e testate nuove tecnologie e soluzioni per le sfide urbane, promuovendo l'innovazione continua nella gestione urbana.

Ecosistema Smart City: Snap4City.org è un ecosistema digitale che attrae startup, aziende tecnologiche e investitori focalizzati sullo sviluppo di soluzioni urbane innovative. Ciò stimola le economie locali, genera posti di lavoro e favorisce l'innovazione continua nelle tecnologie delle smart city.

4.7 Educazione, gamification e consapevolezza:

Tour e simulazioni virtuali: Snap4City può ospitare tour e simulazioni virtuali per educare i cittadini sulle pratiche sostenibili, sugli impatti del cambiamento climatico e sui vantaggi delle infrastrutture verdi. Allo stesso tempo Snap4City Cityverse può utilizzare tecniche di gamification per aumentare il coinvolgimento dei cittadini. In questo modo è possibile non solo aumentare la consapevolezza e guidare il sostegno della comunità alle iniziative di sostenibilità, ma anche sviluppare giochi o sfide legate all'urbanistica, in cui i partecipanti possono guadagnare punti o ricompense per i loro contributi.

4.8 Promozione di uno stile di vita sostenibile:

Servizi per città intelligenti: Snap4City può mostrare servizi di città intelligenti che promuovono uno stile di vita sostenibile, come la gestione intelligente dei rifiuti, le stazioni di ricarica per veicoli elettrici e le opzioni di trasporto pubblico verde. Questo può incoraggiare i residenti ad adottare abitudini ecologiche.

Dunque, in sintesi, la sfida per le pubbliche amministrazioni non è solo avere dei modelli informatici urbani in 3D visivamente più accattivanti, ma è soprattutto consentire ai pianificatori e alle parti interessate di gestire diversi sistemi dei dati in una modalità integrata, per poi visualizzare l'impatto sull'ambiente e sulla comunità dei progetti proposti. Una gestione attenta di questi sistemi fornisce agli amministratori pubblici la possibilità di integrare dati provenienti da fonti pubbliche e private, abilitando in questo modo una serie di partenariati pubblico - privati, anche a beneficio del privato e dei cittadini.

5. Conclusioni: verso una pianificazione urbanistica più strategica, computazionale e immersiva

L'implementazione dei gemelli digitali rappresenta una rivoluzione nel modo in cui le città vengono pianificate e gestite e pone nuove opportunità sul modo di pensare alla complessità urbana attraverso una gestione urbana,

intesa come disciplina in grado di cogliere, descrivere, modellare, prevedere, simulare anche con modalità immersive gli scenari presenti e futuri in tempo reale (Barresi, 2023; Fistola et al., 2024; Boccardo et al., 2024, Peldo et al., 2024). I gemelli digitali, quali strumenti avanzati, combinati con l'intelligenza artificiale, consentono quindi un monitoraggio in tempo reale e una simulazione dettagliata dei processi urbani, facilitando decisioni più informate e tempestive. Snap4City emerge come un esempio di successo in questo campo, integrando dati da diverse fonti e utilizzandoli per ottimizzare la gestione delle città intelligenti. Uno dei principali vantaggi dei gemelli digitali è la capacità di simulare scenari complessi e prevedere l'impatto di varie decisioni sulla città. Questo permette di migliorare la resilienza urbana, rendendo le città più preparate a gestire eventi imprevisti e a rispondere rapidamente alle emergenze. Inoltre, l'uso dell'intelligenza artificiale e del *machine learning* consente di identificare tendenze e ottimizzare i servizi urbani in modo più efficiente. A tutto ciò si aggiunge anche la possibilità di far comprendere meglio a tutte le parti interessate i contesti urbani e l'impatto di nuovi progetti prima ancora della loro costruzione, minimizzando i costi.

La piattaforma Snap4City si distingue per la sua capacità di aggregare dati da molteplici fonti, offrendo una visione olistica delle dinamiche urbane. Questo approccio integrato permette una gestione coordinata delle risorse e dei servizi, migliorando la qualità della vita dei cittadini e riducendo i costi di gestione. Ad esempio, la capacità di monitorare in tempo reale il traffico, il consumo energetico e l'illuminazione stradale, la gestione della raccolta rifiuti, e la qualità dell'aria consente di intervenire prontamente per migliorare l'efficienza e la sostenibilità della città.

Tuttavia, l'implementazione dei gemelli digitali presenta anche alcune sfide. La qualità e la quantità dei dati disponibili sono cruciali per la precisione dei modelli digitali. È necessario un impegno costante per aggiornare e mantenere i dati, nonché per garantire che le infrastrutture digitali siano scalabili e adattabili a diverse esigenze. Inoltre, l'adozione di questi strumenti richiede una formazione adeguata per i pianificatori urbani e i decisori politici, al fine di sfruttare appieno le potenzialità. In conclusione, i gemelli digitali rappresentano un passo avanti significativo nella pianificazione urbana strategica e computazionale. La loro capacità di integrare dati, simulare scenari complessi e ottimizzare i processi decisionali offre enormi vantaggi per le città del futuro. La piattaforma Snap4City, con la sua esperienza più che decennale e il suo approccio integrato, dimostra come queste tecnologie possano essere applicate con successo per migliorare la gestione urbana e promuovere la sostenibilità. È essenziale continuare a investire in queste tecnologie e sviluppare competenze adeguate per affrontare le sfide future, assicurando che le città siano in grado di beneficiare appieno delle opportunità offerte dai gemelli digitali e dall'intelligenza artificiale.

Acknowledgements / Riconoscimenti

Il presente studio è stato supportato dall'accordo di collaborazione tecnico-scientifica "PON METRO 2014–2020 ASSE 6 - Azione CA6.1.1.b - Cagliari smart city: Integrazione della governance urbana con la mitigazione delle isole di calore urbane (CA_UHI)" siglato tra il Comune di Cagliari e dell'Università degli Studi di Cagliari (DICAAR - Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e Architettura). Questo studio è stato sostenuto anche dal MUR attraverso il progetto SMART3R-FLITS: SMART Transport for Travellers and Freight Logistics Integration Towards Sustainability" (Protocollo di progetto: 2022J38SR9; Codice CUP: F53D23005630006), finanziato con il PRIN 2022. Questo studio è stato sostenuto dal Centro Nazionale Mobilità Sostenibile CN00000023, Decreto Ministero dell'Università e della Ricerca n. 1033—17/06/2022, Raggio 9) Unione Europea—NextGenerationEU. Un ringraziamento speciale ai tanti utenti e sviluppatori che lavorano sulle piattaforme Snap4City (<https://www.snap4city.org>) e Km4City sono tecnologie aperte di DISIT Lab (<https://www.disit.org>), UNIFI. Autorizziamo il MIUR a riprodurre e distribuire ristampe per scopi governativi, fatte salve le eventuali indicazioni di copyright ivi contenute. Eventuali opinioni, risultati e conclusioni o raccomandazioni espresse in questo materiale sono quelle degli autori e non riflettono necessariamente le opinioni del MIUR.

Contributo degli autori

Questo articolo è il risultato del lavoro congiunto degli autori. Paolo Nesi ha scritto il par. 3 "Lettura di un'esperienza decennale: punti di forza e sfide aperte"; Chiara Garau ha scritto il par. 2 "Un modello di architettura per la gestione di città intelligenti: Snap4City" e Paola Zamperlin ha scritto il par. 1 "Introduzione. Dall'idea di Città intelligente al Gemello digitale". Il par. 4 "Vantaggi e potenzialità per i diversi stakeholder (governo, settore privato, cittadini) attraverso la piattaforma Digital Twin Snap4City" (con i sottoparagrafi) e il par.

5 “Conclusioni: verso una pianificazione urbanistica più strategica, computazionale e immersiva” è stato scritto congiuntamente dagli autori.

Riferimenti bibliografici

- Adreani L., Bellini P., Fanfani M., Nesi P., Pantaleo G. 2024, Smart City Digital Twin Framework for Real-Time Multi-Data Integration and Wide Public Distribution, «IEEE Access», pp. 1-27, ISSN: 2169-3536, DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3406795
- Barresi, A. 2023, Urban Digital Twin and urban planning for sustainable cities. *TECHNE-Journal of Technology for Architecture and Environment*, (25), 78-83.
- Batty M. 2018, Digital twins, «Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science» Vol. 45, pp. 817-993, <https://doi.org/10.1177/2399808318796416>
- Batty M. 2024b, *The Computable City, Histories, Technologies, Stories, Predictions*, MIT Press.
- Batty M. 2024a, Digital twins in city planning, «Nature Computational Science», Vol. 4, pp. 192-199. <https://doi.org/10.1038/s43588-024-00606-7>
- Bellini P., Bologna D., Nesi P., Pantaleo G. 2024a, A Unified Knowledge Model for Managing Smart City / IoT Platform Entities for Multitenant Scenarios, «Smart Cities», 7(5), 2339-2365. <https://doi.org/10.3390/smartcities7050092>
- Bellini P., Fanfani M., Nesi P., Pantaleo G. 2024b, Snap4City Dashboard Manager: a tool for creating and distributing complex and interactive dashboards with no or low coding, «SoftwareX», Elsevier, <https://doi.org/10.1016/j.softx.2024.101729>
- Bellini P., Collini E., Fanfani M., Ipsaro Palesi L.A., Pantaleo G., Nesi P., and Zamperlin P. 2025, Snap4City Digital Twin meeting European CityVerse Action, In E. Borgogno-Mondino, P. Zamperlin (Eds), *Geomatics for Green and Digital Transition. 27th Italian Conference, ASITA 2024, Padua, Italy, December 9-13, 2024, Proceedings, Part I and II*
- Bibri S. E., Krogstie J., Kaboli A., & Alahi A. 2024, Smarter eco-cities and their leading-edge artificial intelligence of things solutions for environmental sustainability: A comprehensive systematic review, «Environmental Science and Ecotechnology», 19, 100330.
- Bilotta S., Ipsaro Palesi L. A., Nesi, P. 2023, Predicting free parking slots via deep learning in short-mid terms explaining temporal impact of features. *IEEE Access*, 11, 101678-101693.
- Bilotta S., Ipsaro Palesi L. A., Nesi P. 2025, Exploiting open data for CO2 estimation via artificial intelligence and eXplainable AI. *Expert Systems With Applications*, 291, 0-0.
- Bettencourt L. 2021, *Introduction to Urban Science*, MIT Press.
- Boccardo P., La Riccia L., Yadav Y. 2024, Urban echoes: exploring the dynamic realities of cities through digital twins. *Land*, 13(5), 635.
- Chen C. W. 2023, Can smart cities bring happiness to promote sustainable development? Contexts and clues of subjective well-being and urban liveability, «Developments in the Built Environment», Vol. 13, p. 100108.
- Collini E., Ipsaro Palesi L.A., Nesi P., Pantaleo G., Zhao W. 2024, Flexible thermal camera solution for Smart city people detection and counting, «Multimedia Tools and Applications» 83 (7), pp. 20457-20485.
- Collini E., Ipsaro Palesi L.A., Nesi P., Pantaleo G., Nocentini N., Rosi A. 2022, Predicting and understanding landslide events with explainable AI, «IEEE Access 10, pp. 31175-31189
- De Benedictis R., Cesta A., Pellegrini R. et al. 2025, Digital twins for intelligent cities: the case study of Matera, «J Reliable Intell Environ» 11, 6. <https://doi.org/10.1007/s40860-025-00245-3>
- Fereidooni Z., Ipsaro Palesi L. A., Nesi P. 2025, Multi Agent Optimizing Traffic Light Signals Using Deep Reinforcement Learning, «IEEE Access».
- Ferré-Bigorra J., Casals M., Gangoells M. 2022, The adoption of urban digital twins, «Cities», 131, 103905.
- Fistola R., Zingariello I. 2024, Beyond the Smart City. The Urban Digital Twin for the Augmented City: The Vox Hortus Project. In: Marucci, A., Zullo, F., Fiorini, L., Saganeiti, L. (eds) *Innovation in Urban and Regional Planning. INPUT 2023. Lecture Notes in Civil Engineering*, vol 467. Springer, Cham.

- Garau C., Annunziata A., Desogus G., Rossetti S. 2023, Spatial Smartness and (In) Justice in Urban Contexts? The Case Studies of Cagliari and Parma, Italy. In the International Conference on Innovation in Urban and Regional Planning (pp. 484-495). Cham: Springer Nature Switzerland.
- Garau C., Nesi P., Paoli I., Paolucci M., Zamperlin P. 2020, A big data platform for smart and sustainable cities: environmental monitoring case studies in Europe. In the International Conference on Computational Science and Its Applications (pp. 393-406). Cham: Springer International Publishing.
- Grieves M. 2014, Digital Twin: manufacturing excellence through virtual factory replication: A whitepaper.
- Grieves M., Vickers J. 2017, Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems, in Kahlen J., Flumerfelt S., Alves A. (eds.) Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems, Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-38756-7_4
- Lei B., Stouffs R., Biljecki F. 2023, Assessing and benchmarking 3D city models, «International Journal of Geographical Information Science» 37, 788-809.
- Manfreda A., Mijač T. 2024, Smart City as a Mix of Technology, Sustainability and Well-Being: A Myth or Reality? in Sharma S.K., Dwivedi Y.K., Metri B., Lal B., Elbanna A. (eds.) Transfer, Diffusion and Adoption of Next-Generation Digital Technologies. TDIT 2023. IFIP Advances in Information and Communication Technology, vol 699. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-50204-0_5
- Pappalardo L., Manley E., Sekara V. Alessandretti L. 2023, Future directions in human mobility science, «Nature Computational Science» 3, pp. 588-600.
- Peldo D., Banihashemi S., LeNguyen K., Derrible S. 2024. Navigating Urban Complexity: The Transformative Role of Digital Twins in Smart City Development, «Sustainable Cities and Society», 105583.
- Pinna C., Torlini A., Poplin A., Garau C. 2025, Smart and Happy Cities: Towards a Definition and a Methodology for Evaluating the Emotional Perception of Happiness. In *International Conference on Computational Science and Its Applications* (pp. 141-159). Cham: Springer Nature Switzerland.
- Zhao F., Fashola O. I., Olarewaju, T. I., Onwumere I. 2021, Smart city research: A holistic and state-of-the-art literature review, «Cities», 119, 103406.
- Wefering F., et al. 2019, Guidelines. Developing and implementing a sustainable urban mobility plan. Rupprecht Consult (editor), Second Edition.