

## Il documento è progettato per la visualizzazione a pagine affiancate.

Adobe Acrobat:

- Attivare la visualizzazione a pagine affiancate:  
*Vista > Visualizzazione pagina > Vista a due pagine (o Scorrimento vista a due pagine)*
- Verificare che questa pagina e la seguente siano visualizzate assieme:  
*Vista > Visualizzazione pagina > Mostra copertina nella vista a due pagine*  
**(deselezionato)**

Anteprima (*Preview*) per MacOS:

- Attivare la visualizzazione a pagine affiancate: ⌘3
- Aprire il pannello di anteprima delle pagine: ⌘2
- Nel pannello di anteprima, selezionare la prima pagina (questa)
- Eliminare la prima pagina pigiando il tasto *cancella* (←)



**Politecnico  
di Torino**

**ScuDo**  
Scuola di Dottorato - Doctoral School  
WHAT YOU ARE, TAKES YOU FAR

Dissertazione di Dottorato  
Dottorato di ricerca in "Architettura, Storia e Progetto" (XXXIII ciclo)

# **Gemelli di città. I modelli urbani digitali tra descrizione e astrazione.**

**Valerio Palma**

## **Tutor**

Prof.ssa Francesca Frassoldati

## **Commissione giudicatrice**

Prof. Andrea Giordano, Università degli Studi di Padova

Prof. Andrés Martínez-Medina, Universidad de Alicante

Prof. Matteo Robiglio, Politecnico di Torino

Prof. Michele Russo, Sapienza Università di Roma

Prof.ssa Chiara Tonelli, Università degli Studi Roma Tre

Politecnico di Torino

21 Luglio 2021



# Indice.

<b>Indice.</b>	<b>3</b>
<b>Abstract.</b>	<b>5</b>
<b>0. Introduzione.</b>	<b>9</b>
0.1. Conoscere la città, comprendere gli strumenti.	10
0.2. Impostazione della ricerca	23
<b>Parte I</b>	<b>35</b>
<b>Capitolo 1. I modelli spaziali di città come "sistemi operativi".</b>	<b>37</b>
1.1. Smart city e sistemi operativi urbani	38
1.2. La città digitale: da modello a copia.	43
<b>Capitolo 2. Gli strumenti digitali e il ruolo dell'astrazione nei modelli.</b>	<b>73</b>
2.1. L'architettura nell'epoca della sua riproducibilità tecnica.	74
2.2. Il modello urbano come interfaccia.	81
<b>Capitolo 3. La forma della città come strumento di interpretazione.</b>	<b>91</b>
3.1. Modelli numerici e morfologia.	92
3.2. La forma fisica come dimensione condivisa.	109
<b>Parte II</b>	<b>117</b>
<b>Capitolo 4. Studio dei modelli digitali dello spazio urbano.</b>	<b>119</b>
4.1. Studio di casi: metodologia.	120
4.2. Casi di urban twinning.	129
4.3. Studio critico degli urban digital twin.	148
<b>Capitolo 5. Studio delle unità spaziali.</b>	<b>161</b>
5.1. Studio dell'uso dei modelli: metodologia.	162
5.2. Casi d'uso dei modelli digitali dello spazio urbano.	167
5.3. Le unità spaziali nei modelli urbani digitali.	189
<b>Capitolo 6. Conclusioni.</b>	<b>203</b>
<b>Appendici</b>	<b>215</b>
<b>Appendice A1. Casi di urban twinning.</b>	<b>217</b>
<b>Appendice A2. Casi d'uso.</b>	<b>237</b>
<b>Glossario</b>	<b>259</b>



# Abstract.

La ricerca è incentrata sul rapporto tra forma urbana e strumenti digitali per l'analisi e la trasformazione della città. I principali oggetti di studio sono i modelli digitali dello spazio urbano impiegati per connettere strati di analisi diversi per disciplina di afferenza, scala, metodi di acquisizione ed elaborazione. In particolare, la tesi indaga le astrazioni dello spazio che rendono i modelli misurabili e adatti a condividere dati.

Il lavoro si basa sull'articolazione e la verifica di alcune ipotesi di partenza, entro un perimetro di studio che si delinea all'intersezione di tre temi principali.

## **Tema 1.** *I modelli spaziali di città come "sistemi operativi".*

Secondo una narrazione ottimistica dominante, l'uso dell'*information technology* per raccogliere e coordinare grandi quantità di dati abilita la conoscenza sempre più accurata dei fenomeni urbani e offre soluzioni alle sfide che presentano.

A questa fiducia nelle logiche computazionali, gli studi urbani oppongono decise critiche. Queste riconoscono nella connessione di infrastrutture digitali e fisiche (software e hardware) un *urban operating system*, ovvero un processo socio-tecnico che tende a replicare una lettura fissa e univoca dell'urbano, improntata a razionalità di mercato, e non capace di proporre un'interpretazione trasformativa della città.

*Ipotesi.* La crescente quantità di informazioni digitali non va criticata in quanto tale. È piuttosto la pervasività di modelli di città non soddisfacenti a limitare la comprensione dell'urbano e gli esiti operativi degli interventi.

## **Tema 2.** *Gli strumenti digitali e il ruolo dell'astrazione nei modelli.*

L'evoluzione delle tecnologie, favorendo il volume e l'immediatezza della trasmissione di dati, rende meno evidenti i processi teorici che precedono la produzione e l'accumulazione di informazioni. Tali processi corrispondono all'astrazione, dalla complessità del reale, di categorie e schemi, ovvero alla definizione stessa del modello di un fenomeno. Nonostante la manipolazione di simboli sia la principale capacità dei computer, con i *big data*, un approccio "di forza bruta" alla simulazione del reale (basato sulla quantità di dati) ha prevalso sulla produzione di semplificazioni funzionali.

*Ipotesi.* L'efficacia di un modello è connessa alla trasparenza delle astrazioni che lo costituiscono, e alla possibilità di adattare allo scopo per cui il modello è usato.

### **Tema 3.** *La forma della città come strumento di interpretazione.*

Gli approcci correnti alla morfologia urbana tendono a non incontrarsi in elementi o termini comuni per indicare i rapporti tra elementi, le classificazioni, le scale di analisi. In parte, questa è la conseguenza delle posizioni ideologiche che ha assunto il dibattito morfologico che, tra gli anni '50 e '70 del secolo scorso, ha coinvolto le scuole di pensiero italiane e un più ampio panorama europeo.

Tuttavia, tra gli aspetti studiati dalla morfologia urbana, la forma fisica è indicata come il punto di riferimento per coordinare i diversi approcci e, soprattutto, per correlare gli altri aspetti di cui la disciplina si occupa: un "*registration mark*" per l'allineamento di diversi strati conoscitivi.

*Ipotesi.* La morfologia urbana può essere uno strumento interpretativo per coordinare i molti livelli informativi che fanno riferimento allo spazio urbano.

La metodologia della ricerca comprende lo studio sistematico di un sottoinsieme dei modelli digitali di città. I cosiddetti *urban digital twin* integrano diverse fonti di informazione spaziale per consentire l'analisi e la gestione della città, e hanno la capacità di aggiornarsi rapidamente e produrre o indurre trasformazioni del *gemello* reale.

I modelli raccolti sono analizzati secondo i principi della morfologia urbana, individuando le *unità spaziali* sottese e studiandone le relazioni con gli scopi dichiarati dei *digital twin* e con l'obiettivo generale di una condivisione interdisciplinare delle informazioni.

L'obiettivo non è discutere gli aspetti ontologici della forma urbana, ma chiarire e rendere falsificabili i processi di astrazione, generalizzazione e previsione attraverso i quali i modelli sono costruiti e impiegati.

**Domande di ricerca.** L'uso di modelli spaziali digitali genera opportunità e criticità per la ridefinizione dell'idea di città e delle sue parti. Si può individuare una dimensione operabile della morfologia urbana per chiarire i caratteri e lo scopo dei modelli di città che adottiamo? Quali unità spaziali usate nei *sistemi operativi urbani* possono essere condivise tra tecniche e discipline per l'integrazione e l'uso operativo delle informazioni sulla città?







# 0. **Introduzione.**

---

## 0.1. Conoscere la città, comprendere gli strumenti.

La città *postdigitale*<sup>1</sup>, come oggetto di conoscenza, è un concetto polarizzante. La pervasività delle infrastrutture digitali e delle logiche computazionali sembra suggerire due scenari opposti. Da un lato c'è una città che possiamo descrivere, comprendere e controllare in ossessivo dettaglio. Questa è riprodotta accuratamente in *database*, *network* di *internet-of-things*, rilievi digitali, algoritmi di previsione. Dall'altro, questa stessa replica virtuale è interpretata come un *doppelgänger* oscuro, che nasconde una realtà polimorfica, stratificata, indicibile. In questo caso, la sovrabbondanza dei dati confermerebbe la difficoltà, o l'impossibilità, di definizioni nitide di "cityness"<sup>2</sup>, l'inadeguatezza di modelli univoci e rigidi. In termini metrologici potremmo dire che certamente la *precisione* delle rappresentazioni della città sta aumentando, ma sorgono diversi dubbi sull'*accuratezza* di queste rappresentazioni, ovvero sulla loro prossimità alla realtà.

La tesi sostiene che una posizione intermedia tra i due estremi — la fiducia incondizionata nel digitale e il rifiuto dei modelli come descrizioni del mondo fisico — sia auspicabile. Un'alta attenzione verso i *bias* della città dei *big data* è necessaria perché il modello di città non sia scambiato per la città, ovvero per la totalità di quel che possiamo conoscere del reame urbano. D'altra parte, il modello può essere lo strumento epistemologico su cui si basa un ruolo per l'architetto anche nella città controllata da algoritmi. In questa sezione introduttiva, è considerato dapprima l'aspetto duale della sovrapposizione di *city models* e città. Quindi, si sollevano delle domande che riguardano la costruzione dei modelli digitali di città: l'obiettivo è realizzare dei contenitori con innumerevoli scomparti per archiviare il flusso di dati prodotto dalla città, o piuttosto dovremmo trattare i modelli come strumenti per la soluzione di problemi? Il modello è per noi un oggetto opaco di cui accettiamo gli effetti senza troppe domande o sappiamo per

---

<sup>1</sup> "The term *postdigital* [is used] to indicate that we are in an age when "The Digital" has shifted from something novel and exceptional to something ordinary and ubiquitous" (Abrons, 2017, p.68).

<sup>2</sup> Con le parole di Neil Brenner e Christian Schmid, "the basic nature of urban realities — long understood under the singular, encompassing rubric of 'cityness' — has become more differentiated, polymorphic, variegated and multiscalar" (Brenner e Schmid, 2015, p.152).

quale scopo lo stiamo usando? Siamo in grado di intervenire sugli algoritmi, di ri-programmarli per nuove finalità o condizioni al contorno?

### *Città.*

Se vogliamo sapere qualcosa su un luogo che non conosciamo, per prima cosa, con tutta probabilità, apriamo una mappa in internet. Se cerchiamo informazioni su un'area urbana, non ci troviamo di fronte solo immagini satellitari, ma un organismo fatto di vari tessuti e funzioni in interazione, che comprende ad esempio sequenze di foto sferiche, modelli 3D fotogrammetrici, *database* di documenti e dati strutturati, previsioni basate sui dati dei dispositivi di milioni di persone... Questo è quello che succede nello strumento *general purpose*, ma anche i modelli di città con più mirate finalità analitiche e operative contano sulla stratificazione di livelli informativi e metriche sempre più dettagliate e aggiornate.

Le narrazioni ottimistiche sull'avanzamento tecnologico associano la collezione di dati capillari e precisi — sostenuta dall'automazione e dall'*information technology* — alla qualità della nostra comprensione dei fenomeni urbani. Come conseguenza, grande attenzione è prestata ai *big data* prodotti dalla città, nei quali si cerca la panacea alle sfide della vita associata. L'applicazione del concetto di *digital twin* alla città è l'ultimo stadio evolutivo dei *digital city model*, ed è un manifesto della fiducia nel flusso di *bit*. Questo atteggiamento incorpora un ideale di controllo completo sull'oggetto modellizzato — dalla pianificazione dello sviluppo alle dinamiche economiche e sociali. Il paradigma del *digital twin* è stato sviluppato in ambiti di ingegneria della produzione [v. [sezione 1.2](#)] per aggiungere informazioni di *life cycle assessment* ai modelli tridimensionali, ed è oggi adottato da un numero crescente di amministratori e servizi *corporate* nell'ambito delle tecnologie dell'informazione per la città. Con *urban digital twin* si intende una replica virtuale della città che cambia con l'oggetto reale. Idealmente, si tratta di una relazione a doppio senso, perché la replica è dotata di *percezione*, grazie ai sensori e alla velocità di trasmissione di dati, e anche di capacità di agire, grazie all'*internet delle cose* e alle interfacce che influenzano la vita urbana, tra le quali i nostri *smartphone*.

Allo stesso tempo, diverse riflessioni critiche si oppongono alle espressioni di *tecno-ottimismo*. Queste esprimono il timore che il pensiero computazionale e i processi di *digital twinnig* allontanino da una comprensione dell'intero quadro.

[Orit Halpern \(2015\)](#) sostiene che dovremmo stupirci di come sia accordato un valore epistemologico alla *quantità* dei dati, nonché un valore politico e addirittura morale ed estetico, mentre l'origine e il percorso dell'informazione e delle sue trasformazioni sono lasciati in secondo piano. L'avanzamento tecnico, afferma Halpern, contribuisce al ridimensionamento dell'interesse per la rappresentazione in sé come processo *mediato* in favore del volume e dell'*immediatezza* della trasmissione. Perdere contatto con la *mediatezza* significa anche trascurare gli inevitabili limiti e le semplificazioni del modello.

Con il proliferare dei *data set* alla scala urbana — esplosi con il *remote sensing* negli anni '90 e cresciuti con la potenza di calcolo — si è perfezionata la capacità degli strumenti digitali di rappresentare lo spazio urbano, ma è rimasto inalterato l'assunto epistemologico *tecno-positivistico* che vede nell'abbondanza dei quantità di dati la garanzia di una conoscenza oggettiva ([Witt, 2016](#); [Harley, 1989](#)).

Nel concetto di *digital twin*, la *non-mediata* rappresentazione della città diventa anche operatività *non-mediata*. Il modello dunque percepisce ed agisce in completa autonomia. Il calcolo si diffonde e radica attraverso le reti di telecomunicazioni, nei servizi urbani controllati digitalmente, in sensori e telecamere, nei *building management systems*. [Kitchin \(2014\)](#) chiama "*everyware*" questo sinolo di hardware e software — materia e schema. Sempre di più, la città è costituita da i suoi stessi modelli, anche perché non potrebbe funzionare senza. A noi quindi, basterebbe confrontarci col modello, mentre lo spazio fisico sfuma sullo sfondo. L'immediatezza è possibile proprio perché l'oggetto di studio e di intervento è il modello stesso, mentre la città reale (o il resto della città) è un corollario. Questa elevazione del virtuale a una forma di materialità è caratteristica di un approccio postdigitale — in cui il digitale è la normalità e non l'eccezione, come sostiene [Ellie Abrons \(2017\)](#) — e sancisce l'impossibilità di distinguere tra reale e digitale. Dunque la questione è quanto si sacrifichi del mondo al di fuori dello schema a cui è ridotto. Paradossalmente, le critiche al pensiero computazionale vedono nei tentativi di accedere alla conoscenza di fenomeni sempre più complessi un processo di *oversimplification*: deleghiamo ai modelli più di quanto dovremmo, e limitiamo i possibili interventi sul "reale" a quanto ammesso dai modelli. Per quanto questi possano essere complessi, non riusciamo a vedere oltre.

L'intelligenza artificiale (AI) è caso un paradigmatico di questa coesistenza di complessità e limiti epistemici. Da un primo punto di vista, la *densità* nello spazio e nel tempo dei dati scambiati dal *doppelgänger* non sarebbe probabilmente auspicabile senza filtri automatizzati estremamente efficienti come quelli dell'AI.

Queste tecnologie interagiscono con la città a diversi livelli. Ad esempio, interpretano lo spazio urbano nell'analisi delle immagini a livello stradale per le auto a guida autonoma. Altri strumenti di AI analizzano e indirizzano il traffico e lo spostamento di merci, calcolano la probabilità di crimini, stimano gli aspetti percettivi del costruito. Più in generale sono considerati un mezzo fondamentale per l'estrazione di *conoscenza* dalla quantità dei dati prodotta dalla città<sup>3</sup>. Dall'altra parte però, l'AI è la scatola nera per eccellenza: elabora e restituisce risultati, ma lascia poche possibilità di leggere come questo accada. Per gli stessi addetti ai lavori si tratta di un campo di avanzamento intrinsecamente euristico e parzialmente opaco<sup>4</sup>. Come conseguenza, l'adozione di questi algoritmi rischia di essere indifferente al processo di elaborazione dell'informazione, o "non mediata".

L'uso della computer vision in ambito urbano sembra confermare questa idea. In questo caso, per AI si intendono soprattutto i recenti sviluppi del *deep learning* (DL). Un *modello* di DL è un filtro specializzato le cui maglie sono collegamenti tra funzioni, tali che l'oggetto che lo attraversa può essere ricondotto a un concetto — o meglio, una "gerarchia di concetti" che a partire dai valori di input si fanno più complessi<sup>5</sup>. Ciò avviene velocemente e senza bisogno di un confronto con oggetti simili o tipizzati. I sistemi di DL, già usati in medicina, biologia, astronomia, hanno cominciato a osservare per noi la città. Ma nonostante questi strumenti siano basati sull'elaborazione e l'interpretazione della forma, sembra sia

---

<sup>3</sup> [Wan et al., \(2019\)](#) suggeriscono anche che lo sviluppo di *urban digital twin* e della conoscenza della città dovrebbero avanzare in parallelo, perché costruire modelli non confrontabili con la nostra comprensione dei fenomeni urbani rischia di produrre strumenti non utilizzabili o validabili.

<sup>4</sup> Chiaramente, dal punto di vista teorico come da quello tecnico, gli specialisti hanno un forte controllo di questi oggetti. Tuttavia, le procedure non sono ancora rigidamente definite e molta sperimentazione è possibile; ad esempio, [Ian Goodfellow, Yoshua Bengio, e Aaron Courville \(2016, p.301\)](#) descrivono le strategie per l'avvio delle fasi di ottimizzazione dei modelli di *deep learning* come "*simple and heuristic. Designing improved initialization strategies is a difficult task because neural network optimization is not yet well understood*".

<sup>5</sup> Un modello di DL ottiene questo risultato attraverso livelli di funzioni interconnesse (o *neuroni*). Ogni livello riceve valori dal precedente e restituisce al livello successivo un valore per ogni funzione. Il primo livello legge un'immagine di input come un insieme di *pixel*, quindi gli strati successivi di neuroni identificano dapprima segni semplici, come linee nei punti di contrasto tra *pixel* chiari e scuri, e di seguito caratteri sempre più complessi, come curve, forme, porzioni di oggetti. Infine, il *cervello* artificiale seleziona il concetto più plausibile per descrivere l'immagine visualizzata, scegliendo entro il set di concetti che è stato allenato a riconoscere ([Goodfellow et al., 2016](#)).

ancora molto limitato il discorso teorico da parte dell'architettura sulle categorie che dovremmo insegnare a riconoscere alle macchine<sup>6</sup>.

Perché questo disinteresse da parte di chi si occupa di spazio verso uno strumento che, per quanto ora *l'hype* ne governi la narrazione e le più note applicazioni, sta cambiando i processi di comprensione e trasformazione dello spazio? Anche in questo caso, la città reale sembra destinata ad essere modellata da strumenti (e procedure, standard, linguaggi) costruiti altrove.

### *Modelli.*

La città si rivela percorsa da connessioni via etere e cavi, popolata da sensori e oggetti a controllo remoto. I dati e le funzioni sono proiettati su *dashboard* onnicomprensivi. Noi usiamo queste interfacce per conoscere i fenomeni urbani e per monitorare le azioni sullo spazio reale — e sempre di più lasciamo l'intervento a mezzi automatici. Più la città fisica è ricostruita negli schemi di questi impianti, meno *spazio* sembra esserci per l'incertezza. L'idea è che rendere il modello una mappa in scala reale possa renderlo più efficace. Geografi e *urban scholars* argomentano come questa sia una fallacia, e che i modi tecnocratici di gestire la città "*create their very object of intervention*"<sup>7</sup>. Chi lavora con le mappe sa che la relazione biunivoca tra oggetto reale e modello è una chimera, e che anche le mappe hanno sempre mostrato un "*potere ontologico*" (Farinelli, 2003, p.198), ovvero la capacità di dare forma al reale mentre lo rappresentano. In questa tesi, propongo dunque che per affrontare le criticità della città postdigitale sia opportuno riconoscere che un modello è necessariamente altro rispetto a costruire una mappa 1:1 di una porzione di spazio. A questo scopo è utile osservare qualche modello urbano pre-digitale.

Presso le prime civiltà urbane, la definizione della forma dello spazio costruito ha interagito con rappresentazioni corrispondenti alla *summa* di conoscenze e cultura. Insediamenti circolari, quadripartiti erano la sintesi di una visione cosmologica, legata ad esempio a studi astronomici e credenze religiose. Spesso la città, nella realtà, non era nulla di tutto questo [figura 1]. Il suo

---

<sup>6</sup> Il riferimento è nello specifico ai processi di *supervised learning*, in cui immagini correttamente classificate (da un operatore umano) sono mostrate alla macchina per ottimizzare le sue capacità di riconoscimento. Per un esempio sui recenti avanzamenti del DL nel riconoscimento di oggetti per la ricostruzione tridimensionale, si veda Stathopoulou e Remondino (2019). Per una più ampia prospettiva sull'interazione tra AI e architettura, si veda Chaillou (2019).

<sup>7</sup> È quanto sostengono Marvin e Luque-Ayala (2017, p.95) a proposito delle città che si comportano come *urban operating systems*.



**Figura 1.** Lastra in pietra dal Palazzo di Nord-Ovest di Ashurnasirpal II (dettaglio), 865 BCE-860 BCE, gypsum, British Museum, London. Il bassorilievo mostra la vista schematica di un campo fortificato assiro, con mura circolari e le due strade principali che si incrociano ad angolo retto. Immagine: © The Trustees of the British Museum.



perimetro si scontrava con gli accidenti del terreno, probabilmente con preesistenze, con la mancanza di una vista dall'alto.

Anche il primo *pomerio* della città di Roma, tramandato come *Roma quadrata*, doveva essere molto diverso da una precisa forma geometrica. Inoltre gli antichi percorsi dei tempi della fondazione (il *vicus Tuscus* e la *via Sacra*) erano solo approssimativamente strade perpendicolari. Eppure, alcune tra le prime colonie romane costruite come città di fondazione erano quadrate e attraversate da una griglia regolare di strade [figura 2], ed erano considerate *effigies parvae simulacraque* della città di Roma<sup>8</sup>. L'idea schematica della città, sia o meno corrispondente al vero, è utile per la replicazione già molto prima dell'avvento del digitale. L'astrattezza del disegno accompagna motivazioni pratiche, ed è forse per questo che molte *città ideali* sono associate all'attività militare: le colonie romane — che sono tracciate con le tecniche già usate per costruire i *castra* —, le *bastides* medievali francesi — un'altra forma di controllo territoriale —, anche la *città ideale* del rinascimento, i cui principi sono diffusi con la produzione di trattati, spesso indirizzati all'aggiornamento delle tecniche difensive; e altri esempi potrebbero seguire.

Una definizione di modello è "*a thing used as an example to follow and to imitate*"<sup>9</sup>, un riferimento utile per realizzare una copia. Il modello digitale di una porzione di spazio è uno strumento che garantisce la riproducibilità attraverso una configurazione standardizzata. La replicabilità è insita nella trasparenza delle relazioni che tengono insieme la rappresentazione. I modelli di città sono mezzi socio-tecnici di replicazione delle forme urbane e il linguaggio che adottano è necessariamente semplice e razionale. I mezzi digitali esaltano — a volte esasperano — diversi aspetti della replicazione. La **diffusione**: la possibilità di copiare velocemente grazie all'automazione. Il **dettaglio**: la possibilità di trovare un posto noto e accurato ad ogni carattere rappresentabile — di qui la verosimiglianza. Il **valore d'uso**: il modello è sempre più integrato al funzionamento o alla comprensione dell'oggetto reale.

Negli esempi "molto analogici" citati, tra i molti che si potrebbero trovare, il modello presenta una caratteristica che oggi appare spesso trascurata: l'auto-evidenza del distacco dalla città reale. Le categorie di elementi spaziali scelte e le relazioni che li organizzano non hanno bisogno di riferirsi a un contesto già esistente, ma esprimono avanzamenti tecnici e della conoscenza da un lato, e

---

<sup>8</sup> "*Miniatures, as it were, and [...] copies*" Gellius, *Noctes Atticae* 16.13.9, trad. John Carew Rolfe, rev. [a cura di] (Cambridge, MA: Harvard University Press, 1978), 3:180-1. <https://catalog.hathitrust.org/Record/003924278> (consultato il 10/04/21).

<sup>9</sup> *New Oxford American Dictionary*, s.v. "Model".

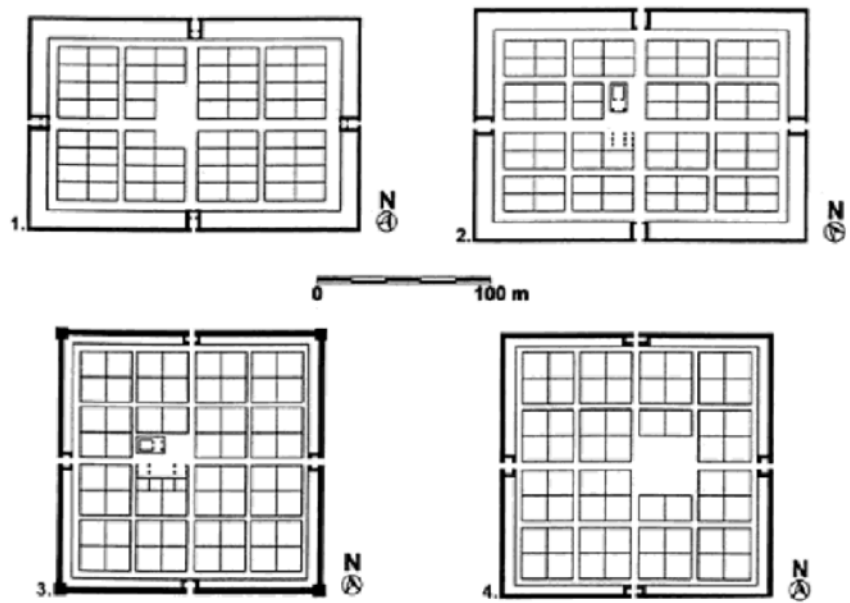


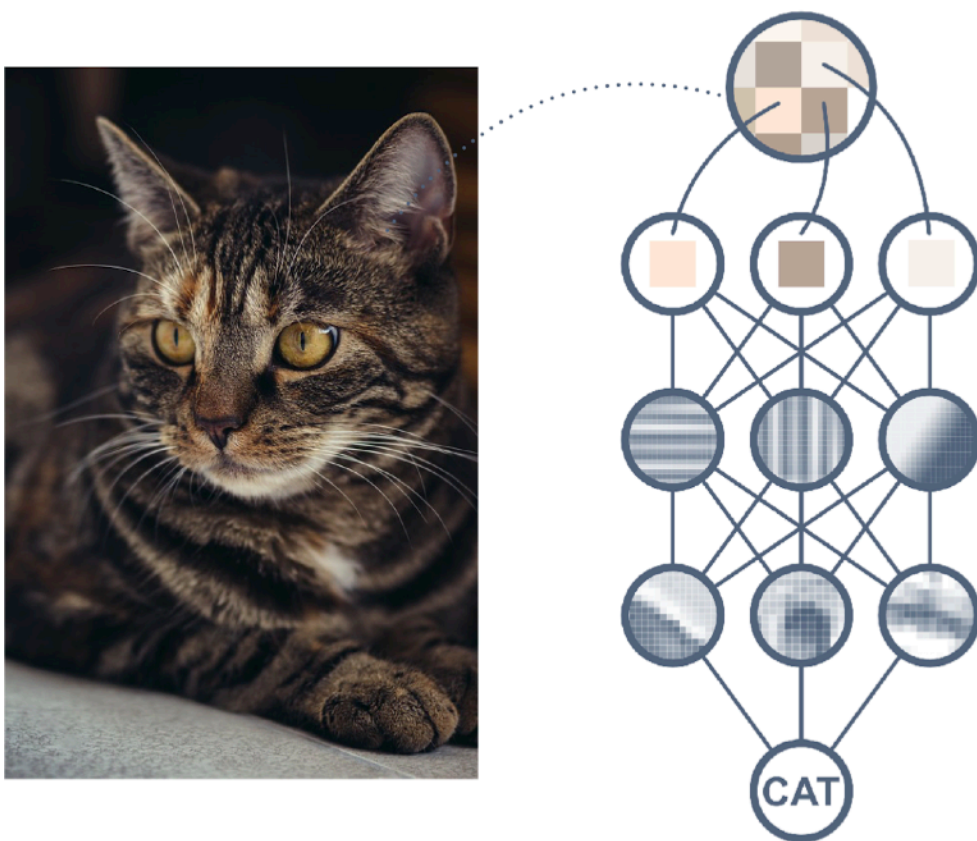
Figura 2. Le colonie romane di Ostia, Tarracina, Minturnae e Puteoli. Ricostruzione di H. von Hesberg, in Zanker (2013).

intento trasformativo dall'altro, in reciproca influenza. Diversamente dalla mappa, nel caso del modello, il nodo problematico non è la distanza tra oggetto e rappresentazione. Forse è vero il contrario: se si annulla la **distanza**, o un potenziale, tra la cosa e l'idea della cosa, l'azione trasformativa è inibita. Gli inevitabili limiti e le semplificazioni del modello potrebbero essere proprietà funzionali. Di contro, completezza (presunta), realismo e immediatezza, sono caratteri che minacciano l'auto-evidenza del modello digitale. Potremmo quindi intendere il modello digitale come una *metafora della città*, piuttosto che credere che sia letteralmente la città.

### *Strumenti.*

L'*hype* genera evidenti *bias* nell'uso della tecnologia. Ma anche le critiche, se sono principalmente rivolte alla fede sconsiderata nella tecnologia, rischiano spostare l'attenzione da un aspetto nodale dei modelli: lo *scopo* per cui li usiamo (lo stesso aspetto che permette a una matita ben appuntita di non essere, nella maggior parte delle occasioni, un'arma). Di certo, il ritmo serrato dell'innovazione e il rinnovarsi dell'eccitazione per il nuovo hanno accordato una fiducia eccessiva alla capacità dei modelli di catturare il reale in estensione e dettaglio — e proprio il realismo della rappresentazione, passando anche attraverso i *videogame*, ha dato un forte impulso alle tecnologie di calcolo coinvolte nel *city modeling*. Come possiamo allentare la sudditanza psicologica nei confronti della macchina? Proprio le più avanzate fra le macchine, quelle dotate di AI, possono offrire uno stimolo di riflessione.

È chiaro: se ci concentriamo sugli aspetti fantascientifici — è come il cervello umano! sarà dotata di libero arbitrio! — saremo divisi tra venerazione e avversione radicale. Ma iniziamo piuttosto dai *neuroni*, che sono le singole funzioni matematiche che compongono un "cervello" artificiale [figura 3]. Quando si insegna cosa fare ad un modello di AI (lo si *allena*) si combinano migliaia di neuroni e si esaminano milioni di variazioni delle funzioni. Si ottiene uno strumento che sarà molto diverso se si mischiano i neuroni o cambiandone il numero, se si cambia il contesto in cercare le variazioni (il materiale per l'*allenamento*), se si valutano più soluzioni (conduco più *iterazioni* nell'*allenamento*), se si sceglie un altro oggetto da analizzare. Quello che è rilevante è che la ricerca dell'assetto che funziona bene è un processo marcatamente euristico: se abbiamo un modello di AI che descrive la città, non siamo in possesso di un metodo per ottenere la migliore delle descrizioni possibili. Forse in un momento come questo, di crescita ed entusiasmo senza precedenti per



**Figura 3.** Schema di un modello di *deep learning*. Il modello riceve come primo input i pixel di un'immagine. La sequenza di livelli di *neuroni* (ogni cerchio rappresenta un *neurone*, ovvero una funzione connessa ai livelli precedenti, che forniscono gli argomenti e al livello successivo, che usa l'output. Adattamento del candidato basato su un'immagine di [Goodfellow et al. \(2016, p.6\)](#).

le macchine che pensano, proporre che il loro punto di forza siano i limiti non è facile. Ma credo che l'AI possa mantenere più alta l'attenzione sugli errori, sulla fallibilità dei modelli di città. Forme più meno trasparenti di automazione hanno preceduto l'AI, sistemi che hanno bisogno che qualcuno o qualcosa ricordi che non sono perfetti, che sono solo modelli e non la realtà, che non funzioneranno bene per sempre e in ogni contesto. L'AI, invece, ha un'*artificialità manifesta*. E l'AI va *istruita*. Questi modelli sono flessibili e incrementali: continuano a imparare dall'esperienza. Ciò vuol dire che gli errori iniziali degli *istruttori* potrebbero avere conseguenze importanti, ma anche che ragionare su questo comportamento può forse renderci più *responsabili*.

Ai fini dello studio degli strumenti digitali che trasformano la città, alcuni indirizzi di ricerca appaiono rilevanti.

- Si può indagare il rapporto tra architettura e *intelligenza artificiale* (in un senso ampio che comprende le automazioni che fanno funzionare i modelli digitali) e in particolare il percorso che porta a definire le categorie che organizzano i modelli, ovvero i concetti da *insegnare* all'AI. Si tratta di un modo per parlare di morfologia e tipologia su un piano pratico piuttosto che idealistico. Questa è una chiamata all'azione per l'architetto, ovvero per chi ha la conoscenza necessaria a chiarire i nessi tra forma, modello, progetto e trasformazione.
- Si può studiare, nei nuovi strumenti, l'eredità di quelli che li hanno preceduti, per individuare sia il ripresentarsi di vecchi errori sia le opportunità rimosse. Un approccio postdigitale agli avanzamenti tecnici dovrebbe superare derive *bulimiche* o *luddiste* e chiarire in ottica storica il nostro rapporto con gli strumenti. Questo compito può contribuire a ricostruire come l'esattezza e la rapidità della comunicazione tra idee e realtà fisica abbiano oscurato le tradizionali funzioni del modello di città.
- Nella realizzazione dei modelli, si può mantenere alta la distinzione del modello rispetto all'oggetto reale. Da gemello del mondo esterno — quindi definibile una volta per tutte, avendo il giusto livello di dettaglio — il modello digitale dovrebbe essere re-inquadrato come un processo che produce azione, l'intervento sulla città. Rinunciando all'idea che la quantità di dati debba necessariamente condurre al "reale", si può costruire un'ontologia della città basata sul modo di operarvi. L'errore in cui l'accumulazione di informazione induce è che l'archivio stesso sia più vicino alla città esistente che non al modo di pensare alla città. Il problema di eliminare dal modello le informazioni superflue è quindi parte nodale di questo esercizio.

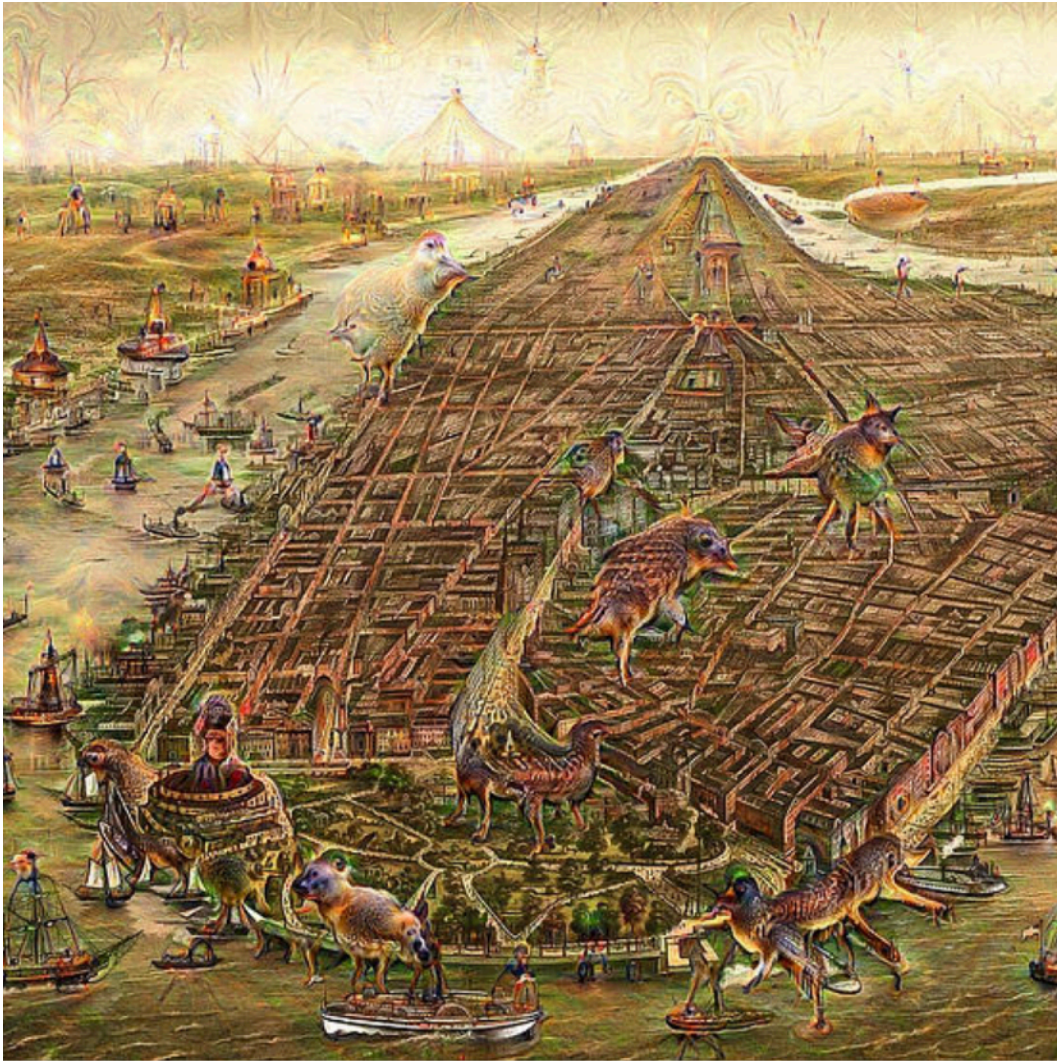


Figura 4. Veduta storica di New York City elaborata con l' algoritmo DeepDream sviluppato da Google. L'immagine esplicita i *concetti* riconosciuti da un algoritmo di *deep learning*: in questo caso, l'algoritmo, per via dei dati usati per il suo allenamento, riconosce, nei dettagli dell'immagine, delle figure zoomorfe. Immagine: Matthias Hauser / [Pixels.com](https://pixels.com).

Le note immagini elaborate dal progetto di intelligenza artificiale DeepDream di Google sono alterazioni di un'immagine di input generate secondo un meccanismo simile alla *pareidolia*<sup>10</sup> [figura 4]. Sebbene l'algoritmo sia stato sviluppato con l'esplicita intenzione di sperimentare in una direzione pseudo-artistica, gli output offrono un'utile rappresentazione del rischio connesso al mancato controllo dei modelli. I linguaggi algoritmici replicano quello che conoscono, e sta noi insegnare loro le categorie da usare, e cambiarle ogni volta che è utile. Se l'AI ha imparato a vedere animali, vedrà animali. Se adottiamo passivamente i modelli che leggono e alterano la città, la città si trasformerà in facce di cane. E non avrà senso neanche chiedersi a che serve un modello.

---

<sup>10</sup> Mordvintsev A., Olah C., Tyka (2015). "DeepDream - a code example for visualizing Neural Networks". Google AI Blog.  
<https://ai.googleblog.com/2015/07/deepdream-code-example-for-visualizing.html>  
(consultato il 10/04/21).

---

## 0.2. Impostazione della ricerca

### *Temi e obiettivi*

La ricerca affronta il problema della costruzione di modelli di città efficaci nell'età della riproduzione digitale del reale. Come introdotto dalla sezione precedente, la questione è più articolata di come le narrazioni sull'avanzamento tecnologico tendano a presentarla. Da una parte, gli automatismi e la potenza di calcolo si prendono carico di un lavoro di documentazione senza precedenti; dall'altra, la complessità che emerge solleva nuove domande su come la documentazione diventi conoscenza, sulla validità di metodi e tecniche, e sulla visione del mondo sottesa.

Lo studio si concentra sulla conoscenza dei fenomeni urbani che può essere veicolata dalla rappresentazione della forma urbana. I modelli spaziali digitali di città sono strumenti ai quali oggi si ricorre per raccogliere e mettere in relazione strati di analisi diversi per disciplina di appartenenza, scala, metodi di acquisizione ed elaborazione (Biljecki *et al.* 2015; Huffman *et al.*, 2017). Questi dispositivi sono il principale oggetto di studio della tesi, il cui campo di osservazione è circoscritto a una classe di modelli di recente definizione, gli *urban digital twin*, caratterizzata dall'immediatezza e dal grande volume delle trasmissioni di dati che città reale e rappresentazione digitale si scambiano. Le attuali definizioni di questa categoria di modelli tecnici, importata dall'industria manifatturiera, esprimono una comune tendenza all'uso di modelli tridimensionali su larga scala con il fine di coordinare dati sulla città che comprendono misurazioni, risultati di analisi, informazioni semantiche, metadati, input e output da e verso reti di dispositivi connessi. Sono quindi sistemi di rappresentazione che integrano diverse fonti di informazione spaziale per supportare il progetto e l'analisi urbana, e sono caratterizzati, almeno nelle intenzioni dichiarate, dalla capacità di aggiornarsi in tempo reale e produrre o indurre trasformazioni del gemello reale. In questo uso dei modelli spaziali di città si può riconoscere un processo socio-tecnico che connette logiche computazionali e infrastrutture fisiche, e che presenta alcune criticità nella concezione e nella trasformazione dell'urbano. Tuttavia, le definizioni correnti non risultano coerenti né completamente aderenti alle soluzioni effettivamente adottate, e sono quindi poco adatte ad individuare casi rilevanti per uno studio organico. In primo luogo, nelle diverse formulazioni del concetto di *twining* applicato alla città, varia molto l'interpretazione della velocità di scambio di informazioni con l'oggetto reale — che può andare da segnali quasi in tempo reale



a un orizzonte di interventi pianificati (Bolton *et al.*, 2018). In particolare, l'integrazione dei modelli spaziali con sistemi di sensori avviene solo in pochi casi e anche i *feedback* operativi sulla città sono raramente affidati alla sola automazione. Inoltre, rispetto all'obiettivo di ottenere "*a realistic digital representation of assets, processes or systems in the built or natural environment*" (Bolton *et al.*, 2018, p.10), l'integrazione dei livelli informativi necessari alla gestione della città è spesso parziale, e la replica virtuale risulta frammentata in più modelli con funzioni specifiche e astrazioni dello spazio differenti.

Lo studio è quindi impostato su un quadro articolato di tentativi di raccogliere in piattaforme integrate molti database e sistemi di dispositivi che alimentano il flusso di dati da e sull'ambiente urbano. Attraverso la ricostruzione di un *framework* teorico di riferimento, e in seguito la documentazione e l'analisi di queste forme di modellazione, la tesi si interroga sui processi che definiscono, e eventualmente alterano, le astrazioni dello spazio che rendono i modelli adatti a raccogliere, elaborare e condividere dati. Il lavoro è articolato in tre temi principali, che riguardano le criticità dei modelli di città contemporanei, il rapporto tra strumenti digitali e astrazioni, e il significato della forma urbana nella costruzione dei modelli.

Il tema dei modelli di città contemporanei indica i principali oggetti di studio. I *digital twin* sono stati promossi come strumenti per perseguire degli obiettivi della *smart city*, che promette il miglioramento diffuso della qualità della vita per mezzo di *information technology* (IT), infrastrutture senzienti e automazioni. La narrazione dominante connessa a questi scenari accorda ai modelli digitali di città una forte fiducia, sostenuta dalla possibilità di realizzare rappresentazioni estremamente dettagliate, di associare ad esse una grande varietà di informazioni, di aggiornarne i dati rapidamente, e di attivare gli automatismi che generano azioni sullo spazio reale. Il *gemello digitale* della città abilita una conoscenza sempre più accurata dei fenomeni urbani e offre soluzioni alle sfide della vita associata (Halpern, 2015). Tuttavia, osservando più da vicino questi modelli, emergono problemi quali la frammentazione dei processi tra molti software, le difficoltà nell'aggiornamento, i limiti dell'interoperabilità, il ruolo centrale di interessi privati nello sviluppo delle piattaforme. A questi aspetti si sommano le decise critiche che gli studi urbani muovono alla fiducia incondizionata nelle logiche computazionali. In questo ambito, con il termine *urban operating system* è stata indicata la connessione di infrastrutture digitali e fisiche (software e hardware) che caratterizza la gestione della città attraverso calcolatori, sensori e attuatori (Marvin e Luque-Ayala, 2017). Secondo gli autori più critici, questi

sistemi replicano una lettura fissa e univoca dell'urbano, spesso improntata a dinamiche di mercato, e non in grado di proporre un'interpretazione trasformativa della realtà.

**La prima ipotesi del lavoro è quindi che i modelli digitali di città, attraverso una gestione non efficace della crescente quantità di informazioni digitali, limitino la comprensione dell'urbano e gli interventi sulla città.**

Il secondo tema riguarda il rapporto tra strumenti digitali e astrazioni. L'evoluzione delle tecnologie, favorendo il volume e l'immediatezza della trasmissione di dati, è in grado di occultare agli utenti i processi teorici che precedono la produzione e l'accumulazione di informazioni. Tali processi corrispondono all'astrazione, dalla complessità del reale, di categorie e schemi, ovvero alla definizione della struttura stessa di un *modello* — entro la quale le informazioni particolari saranno inserite. Nonostante la manipolazione di simboli sia la principale capacità dei computer, i *big data* hanno distolto l'attenzione da questo aspetto e ridotto la capacità di riconoscere il ruolo di semplificazioni e astrazioni. Senza una riflessione su questi passaggi teorici, non siamo in grado di intervenire sui modelli e ridefinirli per gli usi che potremmo farne. Nel testo, queste osservazioni sono articolate a partire dalle tesi di [Herbert A. Simon \(1996 \[1968\]\)](#) sulle *scienze dell'artificiale*, e da una più ampia letteratura sui rapporti tra tecnologia e rappresentazione dello spazio, in parte basata sugli studi di Mario Carpo sulle *svolte digitali* che hanno trasformato le discipline connesse all'architettura negli ultimi decenni ([Carpo, 2013, 2017](#)).

**La seconda ipotesi del lavoro è che l'efficacia di un modello sia connessa alla trasparenza delle astrazioni che lo costituiscono, e alla possibilità di adattarle allo scopo per cui il modello è usato.**

Il terzo tema riguarda la forma fisica della città, intesa come strumento per supportare la formulazione delle astrazioni che compongono i modelli. I diversi approcci che articolano gli studi correnti di morfologia urbana tendono a non incontrarsi in categorie o termini comuni per indicare gli elementi, i loro reciproci rapporti, le scale di analisi. In parte, questa è la conseguenza delle posizioni ideologiche che, tra gli anni '50 e '70 del secolo scorso, ha assunto il dibattito morfologico, coinvolgendo le scuole di pensiero italiane e un più ampio panorama europeo ([Caja et al., 2010](#)). Tuttavia, tra gli aspetti studiati dalla morfologia urbana, la forma fisica è indicata come il punto di riferimento per coordinare i diversi approcci e, soprattutto, per correlare gli altri aspetti di cui la disciplina si occupa: un "*registration mark*" per l'allineamento di diversi strati conoscitivi ([Kropf, 2009, p.106](#)). Sebbene non sembri che la morfologia urbana abbia avuto

un ruolo diretto nella definizione dei modelli digitali di città correntemente usati, la tesi mette a confronto alcuni principi e risultati della disciplina con l'esigenza operativa di coordinare i molti livelli informativi che fanno riferimento allo spazio urbano.

**Dunque, una terza ipotesi assume che la morfologia possa essere uno strumento di interpretazione e calibrazione delle componenti spaziali dei modelli di città.**

L'obiettivo del lavoro non è individuare logiche strutturali che governano i fenomeni urbani, ma strumenti operativi, nella forma di interpretazioni della città con un ambito di validità limitato e consapevole. [Oliveira \(2016\)](#) sottolinea come sia tema di ricerca e discussione nello stesso ambito della morfologia lo spostamento dello studio della città dalle finalità descrittive a quelle operative. Portando l'attenzione — all'interno del più vasto insieme delle funzioni degli *urban operating system* — sulle componenti dei modelli di città direttamente riferibili allo spazio fisico, la tesi indaga una dimensione della città condivisa a cui è possibile riferire le diverse letture disciplinari e i densi strati di dati che oggi è possibile produrre. L'intento è individuare, nei modelli di città che adottiamo, le componenti morfologiche capaci di assecondare un ripensamento della gestione del "diluvio" di dati urbani — una gestione che comprende la visualizzazione, la correlazione, ma anche la semplificazione e la rimozione dei dati non necessari, la trasparenza delle generalizzazioni e dei processi di astrazione e aggregazione. Lontana dall'intento di definire idealtipi o caratteri intrinseci della città costruita, la ricerca può chiarire come alcune fondamentali unità spaziali concepite per rappresentare la città abilitino specifiche funzioni, e possano essere utili entro scopi definiti.

### *Domande di ricerca.*

L'uso di modelli spaziali digitali genera opportunità e criticità per la ridefinizione dell'idea di città e delle sue parti. **Si può individuare una dimensione operabile della morfologia urbana per chiarire i caratteri e lo scopo dei modelli di città che adottiamo? Quali unità spaziali usate nei sistemi operativi urbani possono essere condivise tra tecniche e discipline per l'integrazione e l'uso operativo delle informazioni sulla città?**

## Metodologia.

Nello studio della forma urbana "*comparative research is faced with a plethora of case studies that use different, or sometimes unspecified, definitions*" (Whitehand, 2012, p.60). In questo lavoro non si vuole proporre un'ulteriore interpretazione degli elementi fondamentali dello spazio urbano, e condurre un esteso lavoro comparativo tra terminologie e classificazioni morfologiche non fa parte degli obiettivi della ricerca. Nella tesi, alcuni concetti e metodi della morfologia urbana sono applicati a un campo di osservazione e analisi originale. I casi presi in esame non sono città fisiche, bensì dei modelli di città. La rilevanza di questo campo di studio si estende però alla città stessa, considerando l'impatto dei modelli sulla trasformazione del costruito, sostenuto dalla replicabilità che caratterizza i mezzi algoritmici e le automazioni veicolate dai modelli digitali presi in esame.

In particolare, la ricerca si occupa dello studio sistematico di un sottoinsieme dei modelli digitali di città. I cosiddetti *urban digital twin* integrano diverse fonti di informazione spaziale per consentire l'analisi e la gestione dell'ambiente costruito, e hanno la capacità di aggiornarsi rapidamente e produrre o indurre trasformazioni del "gemello" reale. La selezione e lo studio dei *digital twin* sono condotti elaborando metodi applicati in precedenti rassegne dei *3D city model*, di cui gli oggetti di studio sono considerati un sottoinsieme (Biljecki et al., 2015). I modelli raccolti sono analizzati a partire dalle applicazioni che consentono e attraverso l'isolamento di *case d'uso* delle loro caratteristiche spaziali. L'obiettivo dell'analisi dei casi d'uso è individuare dei *pattern* che riconducano le molteplici applicazioni a schematizzazioni analoghe della forma urbana. Il processo permette di individuare le unità spaziali sottese e studiarne le relazioni con gli scopi dichiarati dei *digital twin*. Gli obiettivi sono: approfondire i rapporti tra strumenti, applicazioni e attori coinvolti; verificare le sintesi proposte nelle *review*; stabilire possibili piani comparativi con altri casi già descritti in letteratura o studiati negli sviluppi del lavoro. Il metodo di analisi dei casi d'uso è basato su un apparato grafico per descrivere caratteristiche spaziali, unità e relazioni tra le parti. L'adozione di un linguaggio grafico schematico e di sintesi contribuisce inoltre ad affrontare criticamente il problema della perdita di astrazione — o di distanza tra rappresentazione e realtà — individuato per i modelli digitali in uso.

Lo studio dei casi ha carattere sincronico: l'interesse specifico del lavoro è negli approcci formali contemporanei allo studio dell'ambiente fisico<sup>11</sup>, mentre sono tenuti in secondo piano i processi evolutivi che riguardano la città.

---

<sup>11</sup> Per *ambiente fisico* si può intendere "*the spatial pattern of the large, inert, permanent physical objects in a city*" (Lynch, 1981, p.47).

Nonostante ci si possa riferire con il termine *morfografia* alla descrizione di "forms without reference to their origins and mode of development"<sup>12</sup>, l'approccio qui proposto è comunque inteso come *morfologico* in senso più ampio. Lo studio del modo in cui la forma è usata è il fulcro della componente analitica del lavoro [capitolo 5] e permette di discutere i concetti di *tipo* e *gerarchia* relativi agli elementi fondamentali nei modelli digitali. Sono invece esaminati in misura minore gli aspetti diacronici necessari a sviluppare il concetto di *processo*, che con i due precedenti compone l'insieme di nozioni fondamentali nell'approccio morfologico allo spazio costruito (Kropf, 2017). Tuttavia, la ricerca considera alcuni aspetti dell'evoluzione dei modelli digitali nell'individuazione dell'oggetto di studio [capitolo 1] — pur senza approfondimenti analitici.

La morfologia urbana può chiarire e reindirizzare l'uso dei modelli di spazio. Poiché le componenti fondamentali dei modelli di città sono interpretazioni della forma fisica del costruito, intersecare gli studi morfologici con la costruzione dei modelli significa ampliare la comprensione delle criticità connesse all'idea di città in via di costruzione, e una prospettiva progettuale sulla trasformazione della città reale che questi strumenti operano.

### *Struttura del lavoro.*

La prima parte della tesi [capitoli 1, 2, 3] definisce la cornice teorica di riferimento e introduce le criticità e le sfide legate agli oggetti di studio, attraverso la ricerca bibliografica relativa ai tre temi introdotti. La seconda parte [capitoli 4, 5, 6] analizza e discute il campione di modelli scelto.

Il primo capitolo riguarda i modelli oggi impiegati per descrivere, studiare e trasformare la città [capitolo 1]. L'attenzione è rivolta ai modelli digitali che impiegano la crescente potenza di calcolo disponibile per processare grandi quantità di dati e restituire *gemelli di città* dettagliati e dinamici. Il capitolo definisce i concetti di *urban operating system (urban OS)* e *urban digital twin*. Il concetto di *urban OS*, introdotto negli studi urbani come critica allo *smart urbanism*, esprime un processo socio-tecnico di fusione di infrastrutture digitali e fisiche. Questo processo comporta dei limiti per la comprensione dell'urbano e per gli esiti operativi dell'uso dei modelli. Un *digital urban twin* risponde al paradigma dell'*urban OS*, connettendo più strati di informazioni spaziali in un modello digitale di città che può indurre trasformazioni del *gemello* reale. Al fine

---

<sup>12</sup> Whitehand (1981) citato in Urban Morphology Research Group (1990). *ISUF: Glossary*. <http://www.urbanform.org/glossary.html> (consultato il 27/04/21).

di riconoscere una genealogia dei *digital urban twin* e individuare gli aspetti problematici da analizzare — anche attraverso il confronto con la letteratura critica — si delinea una storia delle applicazioni di *computer technology* alla modellazione della forma della città, dalle prime formalizzazioni digitali ai modelli dinamici contemporanei.

Nel secondo capitolo si discute il rapporto tra avanzamento tecnologico e visione del mondo, indagando le condizioni per una conoscenza organica dello scopo e dei limiti delle tecnologie cui rimettiamo l'analisi della città e delle sue parti [capitolo 2]. Il capitolo articola l'ipotesi che la digitalizzazione della città richieda processi di astrazione più trasparenti. Si definisce il problema del rapporto tra strumenti e modelli in particolare in riferimento alle trasformazioni tecnologiche che hanno influenzato l'architettura e la progettazione negli ultimi decenni. In particolare, si mette in evidenza come la narrazione positiva dello sviluppo tecnologico tenda a portare in secondo piano le proprietà astrattive dei modelli. Si propone quindi la rilettura dei modelli digitali come oggetto delle scienze del *design*, in modo da restituire all'astrazione nei modelli una condizione di auto-evidenza e un'accezione positiva, orientata alla trasformazione del reale.

Il terzo capitolo introduce gli approcci morfologici allo studio della città, con particolare attenzione a quelli che adottano strumenti matematici e informatici per la rappresentazione e l'elaborazione delle informazioni sullo spazio urbano [capitolo 3]. Il campo della morfologia presenta domande aperte sulla conoscenza dell'ambiente urbano sovrapponibili ai problemi riscontrati nell'evoluzione dei modelli digitali di città. L'obiettivo del capitolo è delineare uno stato dell'arte dell'intersezione tra concetti della morfologia urbana e metodi formali per lo studio dell'ambiente urbano. Alcune questioni aperte sulla ricerca di un *comune denominatore* nei diversi approcci morfologici sono poste in risalto. Pur non incontrandosi in terminologie comuni, i diversi rami della disciplina individuano nella forma fisica un punto di riferimento, un "*registration mark*" per l'allineamento di diversi strati conoscitivi. Ciò nonostante, la sovrapposizione di studi morfologici e definizioni / usi degli strumenti di modellazione spaziale è limitata. Dunque, il testo evidenzia le attenzioni interdisciplinari verso la forma della città, e la condivisa necessità di definizioni comuni delle unità spaziali. La morfologia può quindi essere interpretata come uno strumento per coordinare i molti strati di dati che fanno riferimento allo spazio urbano.

Il quarto capitolo osserva i modelli digitali di città correntemente usati attraverso una selezione di casi di *digital twin* [capitolo 4]. L'obiettivo è documentare le applicazioni dei modelli per predisporre il successivo studio morfologico. A partire da una definizione di *urban digital twin* riformulata, il

capitolo discute le fonti consultate, i criteri di selezione dei casi e gli aspetti di segmentazione e terminologia che riguardano l'analisi e il confronto con le precedenti rassegne di modelli (basate soprattutto su aspetti tecnici). I 9 casi di *digital twin* selezionati sono presentati nei loro aspetti generali, rimandando alle schede di approfondimento in appendice [\[appendice A1\]](#). Sono quindi discusse le principali criticità socio-tecniche che accomunano i modelli studiati.

Nel quinto capitolo, sulla base dell'analisi dei modelli, si studiano le relazioni delle componenti spaziali del modello con le funzioni abilitate, con gli scopi dichiarati dei *digital twin*, e con l'obiettivo generale della condivisione interdisciplinare delle informazioni [\[capitolo 5\]](#). La sezione individua e analizza 9 *casi d'uso* dei modelli digitali studiati. L'analisi è basata su rappresentazioni grafiche e schematiche che evidenziano gli attributi del modello — di geometria tridimensionale, topologici, scalari — e le relazioni — tra gli elementi stessi e tra elementi e usi, attuali o potenziali. La parte schematica di ogni caso è accompagnata da una discussione e rimanda a ulteriori approfondimenti presentati in appendice [\[appendice A2\]](#). Il capitolo include i criteri metodologici per la definizione di un caso d'uso. Si propone inoltre una sintesi del lavoro di analisi delle unità spaziali e si discutono possibili criteri di ordinamento e categorizzazione. La sezione mette a confronto le riduzioni individuate con le posizioni teoriche della morfologia urbana, ed esplicita scopo e limiti delle unità spaziali.

L'ultimo capitolo presenta i risultati della ricerca e le opportunità di applicazione e sviluppo aperte [\[capitolo 6\]](#).

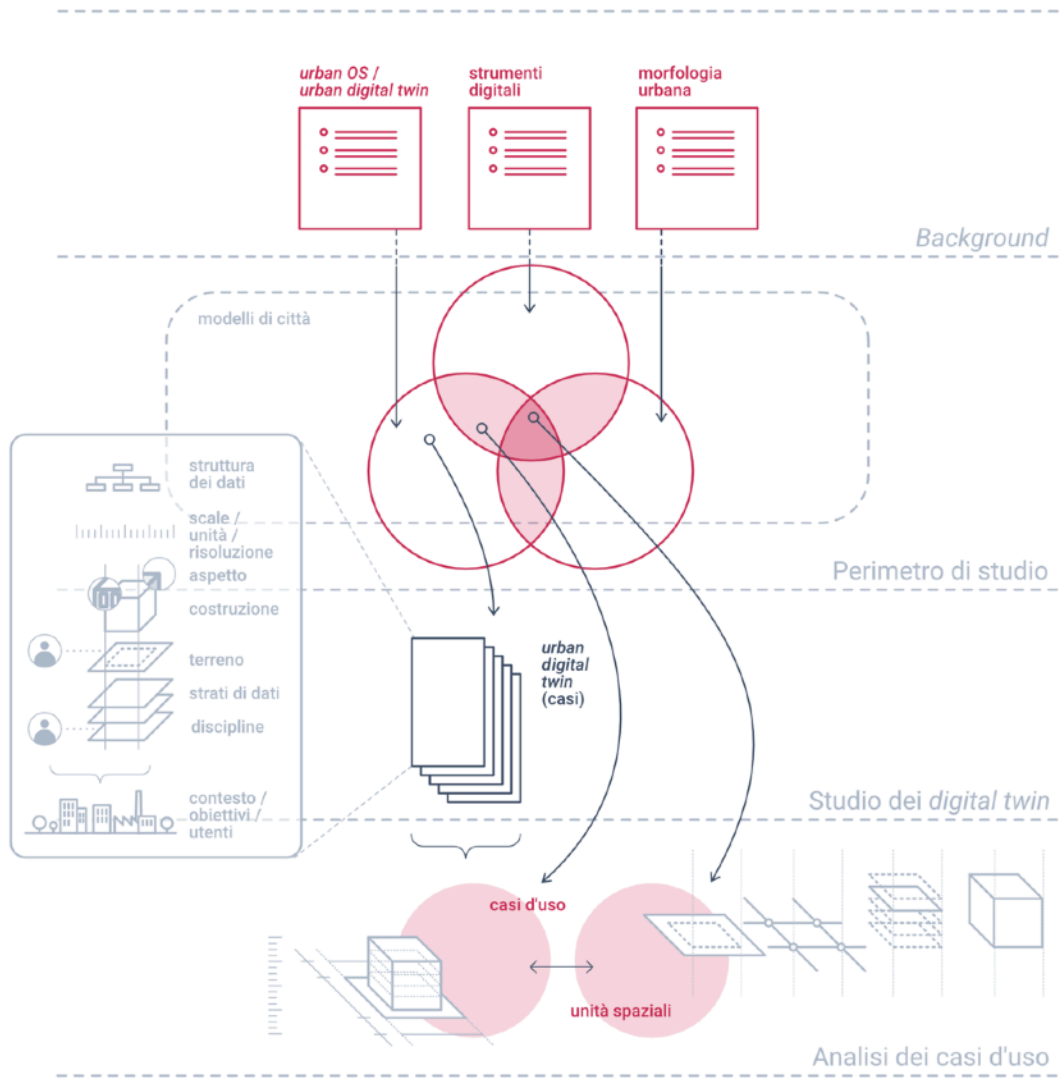


Figura 5. Schema della struttura della ricerca.



## Riferimenti bibliografici.

- Abrons E.** (2017). For Real. *Log*, 41(Fall 2017).
- Biljecki F., Stoter J., Ledoux H., Zlatanova S., Çöltekin A.** (2015). Applications of 3D City Models: State of the Art Review. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 4(4), 2842–2889.
- Bolton A., Butler L., Dabson, I., Enzer M., Evans M., Fenemore T., Harradence F., Keaney E., Kemp A., Luck A., Pawsey N., Saville S., Schooling J., Sharp M., Smith T., Tennison J., Whyte J., Wilson A., Makri C.** (2018). *Gemini Principles* [Report]. CDBB.
- Brenner N., Schmid C.** (2015). Towards a new epistemology of the urban? *City*, 19(2–3), 151–182.
- Caja M., Landsberger M., Malcovati, S.** (2010). Tipologia architettonica e morfologia urbana: Il dibattito italiano - Antologia 1960-1980. Libraccio.
- Chaillou S.** (2019, 24 febbraio). *AI & Architecture*. Towards Data Science. <https://towardsdatascience.com/ai-architecture-f9d78c6958e0> (consultato il 27/04/21).
- Farinelli F.** (2003). Geografia: Un'introduzione ai modelli del mondo. Einaudi.
- Goodfellow I., Bengio Y., Courville A.** (2016). *Deep Learning*. MIT Press.
- Halpern O.** (2015). *Beautiful Data: A History of Vision and Reason since 1945*. Duke University Press.
- Harley J.B.** (1989). Deconstructing the map. *Cartographica: The International Journal for Geographic Information and Geovisualization*, 26(2), 1–20.
- Huffman K.L., Giordano A., Bruzelius C.** (2017). *Visualizing Venice: Mapping and Modeling Time and Change in a City*. Routledge.
- Kitchin R.** (2014). The real-time city? Big data and smart urbanism. *GeoJournal*, 79(1), 1–14.
- Kropf K.** (2009). Aspects of urban form. *Urban Morphology*, 13(2), 105–120.
- Kropf K.** (2017). *The Handbook of Urban Morphology*. Wiley.
- Lynch K.** (1981). *Good city form*. MIT Press.
- Marvin S., Luque-Ayala A.** (2017). Urban Operating Systems: Diagramming the City: Urban Operating Systems. *International Journal of Urban and Regional Research*, 41(1), 84–103.
- Oliveira V.** (2016). *Urban Morphology: An Introduction to the Study of the Physical Form of Cities*. Springer International Publishing.
- Simon H.A.** (1996). *The sciences of the artificial*. MIT Press. [Prima pubblicazione 1968.]
- Stathopoulou E.-K., Remondino F.** (2019). Semantic photogrammetry – Boosting image-based 3d reconstruction with semantic labeling. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-2/W9, 685–690.
- Wan L., Nocht T., Schooling J.M.** (2019). Developing a City-Level Digital Twin – Propositions and a Case Study. *International Conference on Smart Infrastructure and Construction 2019 (ICSIC)*, 187–194.
- Whitehand J.W.R.** (2012). Issues in urban morphology. *Urban Morphology*, 16, 55–65.
- Witt A.J.** (2016). Cartographic Metamorphologies; or, Enter the RoweBot. *Log*, 36, *ROBOLOG*, 115–124.
- Zanker P.** (2013). *La città romana*. Laterza.





# Parte I



Capitolo 1.  
**I modelli spaziali di città come  
"sistemi operativi".**

---

## 1.1. *Smart city* e sistemi operativi urbani

Nel 2000 uno studio sulle applicazioni della modellazione tridimensionale alla pianificazione e al progetto, condotto dal Centre for Advanced Spatial Analysis (CASA) allo UCL, contava circa 60 progetti rilevanti di modellazione di città virtuali (Batty *et al.*, 2000). Una rassegna aggiornata ad oggi dovrebbe confrontarsi con un terreno di studio molto più ampio, come dimostrano diversi lavori successivi che, piuttosto che enumerare i singoli casi di modelli digitali di città, ne classificano i molti *casi d'uso* (Biljecki *et al.*, 2015; Ross, 2010). Simili modelli si stanno infatti moltiplicando come componente essenziale dei progetti promossi con il nome di *smart city*<sup>13</sup>, che rappresentano una strategia di sviluppo urbano spesso considerata irrinunciabile e un fenomeno ancora in crescita (Nochta *et al.*, 2019).

Nel 2020 la spesa per lo sviluppo di *smart city* sarà più del doppio rispetto al 2015<sup>14</sup>. Nel 2016, l'Europa è stata la regione con più progetti in corso di città intelligenti, contandone 84<sup>15</sup>. Secondo i *media* cinesi e la società di consulenza Deloitte, solo in Cina sono in costruzione 500 *smart city*; il governo indiano ha invece avviato nel 2015 un programma per la realizzazione di 100 progetti urbani *smart*, sia attraverso lo sviluppo su *greenfield* che con interventi di *retrofitting* di città esistenti (Datta, 2015).

---

<sup>13</sup> Le strategie per l'integrazione delle tecnologie digitali nella gestione e nel tessuto stesso della città hanno assunto etichette diverse negli ultimi decenni — *wired, cyber, digital, future, intelligent, sentient cities...* — sia per indicare l'attenzione a specifici aspetti (Albino *et al.*, 2015; Neirotti *et al.*, 2014), sia per mancanza di precisione nelle definizioni (Kitchin, 2014; Hollands, 2008). Il termine *smart city*, apparso a partire dagli anni '90, dapprima accompagnando soluzioni di mercato e suscitando poi attenzioni in diversi ambienti della ricerca, si è affermato come categoria generale per indicare i progetti che presentano "a focus on the effects of ICT on urban form, processes and modes of living" (Kitchin, 2014, p.1; Nochta *et al.*, 2019). L'articolazione dei casi di *smart city* e la ricerca di definizioni più nitide non rientrano nello scopo della tesi.

<sup>14</sup> Consumer Technology Association (2017). *Spending on smart cities worldwide in 2015 and 2020 (in billion U.S. dollars)*. Statista.  
<https://www.statista.com/statistics/757638/spending-on-smart-cities-worldwide/> (consultato il 10/04/21).

<sup>15</sup> Siemens e Navigant Consulting (2017). *Number of smart city projects worldwide in 2016, by region*. Statista.  
<https://www.statista.com/statistics/801167/project-of-global-smart-cities-by-region/> (consultato il 10/04/21).

Secondo una dominante narrazione *tecono-ottimistica* (Minsky, 2020), la *smart city* impiega gli avanzamenti nelle *information and communication technologies* (ICT) per rendere più efficiente l'allocazione di risorse, incentivare imprenditoria e innovazione, favorire la sostenibilità dello sviluppo (Nochta *et al.*, 2019; Kitchin, 2014; Hollands, 2008). Questi obiettivi sono perseguiti attraverso dispositivi e infrastrutture che producono *big data*, consentono l'analisi in tempo reale della vita urbana e permettono di governarla e di progettare trasformazioni.

Di contro, una letteratura critica nell'ambito delle scienze sociali e degli studi urbani problematizza gli assunti di queste strategie di crescita e solleva dubbi riguardo alla capacità operativa della città digitale. Le riflessioni evidenziano il contrasto tra la larga adozione del lessico e degli strumenti della *smartness* e i pochi apporti critici sui limiti e le più ampie implicazioni, soprattutto politiche e sociali, di queste tendenze (Luque-Ayala e Marvin, 2015). Il favore, anche politico ed estetico, accordato al progresso nei suoi aspetti quantitativi — la velocità di trasmissione, la voluminosità dei dati — è denunciato come un aspetto retorico, "*technology-focused*" e "*supply-side-led*" (Nochta *et al.*, 2019, p.3; Kitchin, 2015). Di conseguenza, sono messi in discussione l'effettivo e consapevole consenso della collettività e il carattere egualitario e democratico degli effetti su spazio e società (Halpern, 2015; Hollands, 2008).

La *smart city*, come espressione di un più ampio "*technoscientific urbanism*", replica una lettura fissa e univoca dell'urbano, improntata a razionalità di mercato, e non in grado di proporre un'interpretazione trasformativa della città (Brenner e Schmid, 2014; 2015). I mezzi di controllo dei fenomeni urbani sono la pervasività dei processi algoritmici e la crescente capacità della città di *perceive* e agire in maniera non mediata: "*A conversation is being conducted exclusively between the billions of things in cities and is being endlessly reconfigured in ways which form a kind of sentience*" (Thrift, 2014, p.9). Entro questa cornice di riferimento, Marvin e Luque-Ayala (2017) propongono un approfondimento dei modi in cui città e *information technology* si interfacciano, attraverso l'analisi di alcune piattaforme che integrano infrastrutture urbane e strumenti digitali<sup>16</sup>. Simili "pacchetti" che uniscono hardware (sensori, attuatori, computer, strutture di controllo) e software (database, informazioni analitiche, sistemi predittivi e di simulazione) sono chiamati "*urban operating systems*" (*urban OS*)<sup>17</sup>, con un

---

<sup>16</sup> In particolare, Marvin e Luque-Ayala (2017) studiano l'importazione in ambito urbano di tecniche e strumenti dell'*enterprise resource planning*.

<sup>17</sup> Anche Mattern (2014) parla di *urban operating systems* come "*highly sophisticated technical and administrative networks that integrate urban services and infrastructures — water, power, police and fire services, snow removal, etc. — with computer operating systems*".



termine mutuato dal mercato delle ICT<sup>18</sup>. Lo scopo dichiarato dei progetti che aderiscono al paradigma dell'*urban OS* prevede l'aggregazione di dati per effettuare azioni a distanza<sup>19</sup>. Le concettualizzazioni della città associate a questi sistemi risultano però rigide alla variazione delle condizioni esterne, dipendenti dal linguaggio del software impiegato e non adatte a forme di conoscenza che valichino il perimetro autarchico del sistema. Gli autori concludono che le "*diagrammatic abstractions*" sottese ai particolari prodotti computazionali studiati mediano e riformulano i possibili interventi sullo spazio e sulla società, "*shaping the city in systemic ways whilst advancing a particular epistemology of the urban*" (Marvin e Luque-Ayala, 2017, p.101).

La tesi muove da questo *background* critico e propone una ulteriore delimitazione del campo di analisi. In particolare si studiano alcuni modelli tridimensionali dello spazio che rispondono alla definizione di *urban OS*, in quanto piattaforme che uniscono "*the digital and material domains of the city*" (Marvin e Luque-Ayala, 2017, p.84). Alcuni prodotti industriali altamente tecnologici sono oggi accompagnati dal loro *digital twin*, una riproduzione virtuale dettagliata dell'oggetto reale, in grado di interagire con l'originale attraverso sensori, attuatori e interfacce grafiche. Nell'intenzione di seguire questi esempi, molte amministrazioni e progetti di ricerca sulla città si stanno dotando di modelli per mettere in corrispondenza i diversi strati di informazioni urbane e fornire previsioni e supporto alle decisioni (Bolton *et al.*, 2018; Mohammadi e Taylor, 2017). Gli *urban digital twin* sono l'oggetto di studio qui indagato. L'ipotesi di lavoro è che anche in questi modelli si riflettano le criticità individuate e che queste possano essere analizzate con il contributo della morfologia urbana, in particolare per lo studio delle astrazioni che i modelli sottendono.

Molti dei servizi che i progetti di *smart city* promettono di mettere in atto — come quelli per la gestione di mobilità e trasporto e delle infrastrutture, previsti nella gran parte dei casi<sup>20</sup> — rappresentano singoli casi di applicazione di modelli dello spazio urbano. Dunque, **la corrispondenza tra casi di *smart city*, già numerosi, e modelli spaziali non è univoca**: in un solo progetto possono coesistere diverse rappresentazioni della città, ovvero *casi d'uso* di diversi

---

<sup>18</sup> In particolare, City Operating System® è un marchio di Urbotica e Urban Operating System™ è un marchio di Living PlanIT.

<sup>19</sup> "Written in software code and capable of sensing individual actions in real time, this [urban] operating system aggregates data to effect action at a distance" (Marvin e Luque-Ayala, 2017, p.85).

<sup>20</sup> IHS (2017). *Share of smart cities projects by type worldwide in 2017*. Statista. <https://www.statista.com/statistics/784331/internet-of-things-smart-cities-projects-by-type/> (consultato il 10/04/21).

modelli. [Batty et al. \(2000\)](#), quando l'integrazione degli strati informativi non poteva ancora contare sugli strumenti ora disponibili e su un più maturo dibattito sulla standardizzazione dell'informazione spaziale digitale, hanno contato anche 15 applicazioni rilevanti di *3D city model* in uno stesso contesto urbano (il caso di Tokyo). Anche oggi però, in più organici progetti di aggregazione delle informazioni, coesistono più modelli spaziali riconducibili in particolare al sovrapporsi di progetti preesistenti e alla disconnessione tra le soluzioni proposte dalle imprese del settore ICT ([Nochta et al., 2019](#); [Marvin e Luque-Ayala, 2017](#); [Mattern, 2014](#)). Questa frammentazione è mostrata ad esempio dal quartiere Kalasatama di Helsinki ([Ruohomäki et al., 2018](#)), area di *retrofitting* e nuovo sviluppo progettata insieme al suo *gemello* virtuale — uno dei casi che saranno approfonditi [sezione 4.2: DT.2]. Usando Kalasatama come caso pilota, alcuni progetti pubblici hanno incentivato l'integrazione di dati da parte di dipartimenti dell'amministrazione e gestori di servizi, producendo almeno due modelli che concettualizzano la città in modi diversi: un *digital surface model* (superficie tridimensionale continua arricchita con *texture* fotografiche) e un modello *a oggetti* (che identifica e organizza semanticamente vari elementi, come edifici e tetti, secondo lo standard CityGML). Inoltre alcuni servizi non sono a loro volta direttamente connessi a questi modelli, ma sono il risultato di complessi processi di esportazione dei dati verso piattaforme software specializzate — CityPlanner di Bentley Systems per il dialogo con il progetto architettonico, Cesium per la visualizzazione, Rhinoceros per la modellazione... — che producono nuovi modelli, secondo particolari astrazioni dello spazio. In questo, come in molti casi, "[e]ach layer is configured and sorted according to particular techniques and history" ([Marvin e Luque-Ayala, 2017, p.95](#)).

Al contrario, non si può far corrispondere a ogni funzione delle città virtuali un modello i cui elementi siano riconducibili alle parti della città fisica. Più in generale, l'idea *smart city* non richiede necessariamente un progetto integrato di rappresentazione dello spazio urbano, né tanto meno la sua visualizzazione. Lo stesso concetto, più circoscritto, di ***digital twin non implica la realizzazione di una replica geometrica***, sebbene ritenere nodali gli aspetti visivi della corrispondenza tra virtuale e reale sia una lettura comune — se non un fraintendimento ([Wan et al., 2019](#)). La tendenza è legata anche al dettaglio della grafica 3D e al fotorealismo su cui si basano molti prodotti per la modellazione informativa. Il *bias* è veicolato dallo sviluppo della potenza di calcolo e delle *graphics processing unit* (GPU), stimolato in gran parte dalle applicazioni grafiche stesse e in particolare per l'industria dei videogiochi.

Studiando la derivazione degli *urban OS* dai sistemi di *enterprise resource planning* (ERP), software integrati per la gestione delle imprese, [Marvin e Luque-Ayala \(2017\)](#) chiariscono come la digitalizzazione della città si basi su "*diagrammatic abstractions*" piuttosto che su modelli *iconici*, ma come questa distinzione tenda a svanire nella comune comprensione del nesso tra città e tecnologia. Ad esempio, la raccolta di dati e la produzione automatizzata di output possono appoggiarsi a una rete di dispositivi e dati la cui localizzazione — in termini di posizione e rapporto con lo spazio urbano — è trascurabile ai fini dei processi algoritmici, e produce quindi la schematizzazione dello spazio fisico in un grafo di connessioni senza distanze. Tuttavia, le semplificazioni e le astrazioni possono essere dissimulate dal realismo della resa grafica e dalla narrazione di una *completa* riproduzione dello spazio reale<sup>21</sup>. E nonostante questo mascheramento sia a volte dichiaratamente *falso* — è il caso della generazione *procedurale* di dettagli<sup>22</sup> — lo *skeuomorfismo*<sup>23</sup> è un soluzione cosmetica adottata di frequente per i modelli dello spazio costruito.

Alla quantità dei casi d'uso dei modelli digitali di città si aggiungono dunque problemi legati alla definizione non sempre chiara delle *città virtuali* realizzate, e all'ambiguo ruolo delle operazioni spaziali, della modellazione geometrica e della visualizzazione di input e risultati. Si incontra un panorama di strumenti, tecniche e loro applicazioni che è estremamente esteso e articolato e si presenta con contorni poco nitidi. Gli *urban digital twin*, così come il tropo della *smart city* e le altre etichette che amministratori e *developer* assegnano ai progetti di sviluppo digitale ([Hollands, 2008](#)), possono quindi essere fuorvianti rispetto allo studio degli strumenti e delle soluzioni effettivamente adottate. Una riflessione morfologica sulle componenti dei modelli adottati può contribuire a rendere più trasparenti i processi di astrazione dello spazio urbano e il loro scopo, e a ripensare il modo in cui raccogliamo, correliamo, rimuoviamo (quando non necessarie), semplifichiamo e visualizziamo le informazioni sulla città.

---

<sup>21</sup> "*Singapore wanted to develop a smart city environment to plan everything*": questa è una delle dichiarazioni che è possibile trovare sul progetto di *digital twin* chiamato Virtual Singapore, a cui ha lavorato l'azienda specializzata nella modellazione informativa Dassault Systèmes. <https://www.3ds.com/customer-stories/single/virtual-singapore/> (consultato il 10/04/21).

<sup>22</sup> Le tecniche di rappresentazione procedurale prevedono ad esempio la generazione algoritmica di *texture* da applicare a volumi semplici (e.g. parallelepipedi che rappresentano edifici) o la modellazione automatica di elementi tridimensionali ([Biljecki, 2017](#)).

<sup>23</sup> "[*The skeuomorph is*] a derivative object that retains ornamental design cues from structures that were necessary in the original" Basalla G. (1988), citato in Spiliotopoulos K., Rigou M., Sirmakessis S. (2018). *A comparative study of skeuomorphic and flat design from a UX perspective*. Multimodal Technologies and Interaction, 2(2), 31, p.1.

---

## 1.2. La città digitale: da modello a copia.

### *Il computer e la città: prime intersezioni.*

Fin dalla loro invenzione, i computer hanno sollecitato l'idea di simulare e studiare sistemi complessi e di grande scala, città comprese (Batty, 2013). A partire dalla fine degli anni '50, il calcolo digitale è stato terreno di applicazione di **approcci simbolici e analitici** alla costruzione di modelli urbani descrittivi, predittivi e di pianificazione (Lowry, 1965; Wan *et al.*, 2019). In queste formulazioni "[t]he model literally consists of «named» variables embedded in mathematical formulae (structural relations), numerical constants (parameters), and a computational method programmed for the computer (algorithm)" (Lowry, 1965, p.159). I primi modelli non erano accompagnati da metodi sistematici di rappresentazione della forma fisica. In alcuni casi, potevano essere associati ad una visualizzazione (bidimensionale) di caratteri spaziali: questa era prodotta a posteriori — non essendo funzionale agli scopi analitici del modello — ed era rivolta soprattutto alla comunicazione (Batty, 2013) [figura 6]. L'aspetto simbolico-matematico resta tutt'ora prevalente su quello della visualizzazione geometrica in molte rappresentazioni digitali di sistemi fisici e processi urbani, come in quelli derivati dall'applicazione di teorie economiche allo spazio urbano (Fujita *et al.*, 2001) ed ha continuato a costituire anche una componente fondamentale di alcune classi di modelli geometrici della forma urbana (Wan *et al.*, 2019).

Già dagli anni '60, **le nascenti geo-information sciences hanno avviato un più stretto dialogo tra l'informazione spaziale e il calcolo elettronico**, con esperimenti di introduzione di strumenti analitici nelle mappe (Day, 1994; Ross, 2010; Steinitz, 2016, in Nijhuis *et al.*, 2017) [figura 7]. I primi sistemi informativi geografici (*geographic information system*, GIS) prevedevano una riduzione strumentale delle informazioni e in particolare della terza dimensione — espressa in curve di livello o parametri di altezza assegnati a elementi piani. La rappresentazione computerizzata di *pattern* di posizioni, di interazioni e flussi nello spazio ha iniziato ad affermarsi come mezzo per far interagire i livelli di analisi di una materia stratificata, "*the glue that binds various economic, social, and land use activities together*" (Batty, 2013).

Con il GIS, le interpretazioni convenzionali dello spazio permettono a diverse discipline di contribuire con strati informativi alla ricerca di una conoscenza sempre più accurata della realtà. Harley (1989) riconosce nell'informatizzazione

della cartografia la tendenza alla *naturalizzazione* delle astrazioni impiegate nella rappresentazione<sup>24</sup>: "*As [cartographers] embrace computer-assisted methods and Geographical Information Systems, the scientific rhetoric of map makers is becoming more strident*" (*ibid.* p.2); inoltre va affermandosi "*the epistemological myth [...] of an objective science always producing better delineations of reality*" (*ibid.* p.15). Dunque, a partire dalle prime mappe digitali si fa progressivamente meno evidente come i modelli che descrivono la realtà siano "*multidisciplinary artifacts [...] that reveal social and political forces*" (Kurgan, 2013, p.31) .

Tuttavia, al di là della possibile complessità analitica, i primi modelli visivi applicati alla città erano piuttosto semplici e mantenevano una concettualizzazione dello spazio non dissimile da quella delle mappe già in uso (Day, 1994). Questo aspetto asseconda anche dei limiti puramente tecnici. Una grafica tridimensionale, più "iconica" e meno "simbolica", era proibitiva per le macchine come per gli operatori umani cui era deputata la raccolta di dati — anche attraverso misurazioni sul campo — ed era quindi limitata a pochi esperimenti di carattere empirico (Ennis *et al.*, 2000; Shiode, 2001). La visualizzazione 3D ha iniziato ad accompagnare la trasformazione della città solo quando **la potenza di calcolo ha permesso alla grafica digitale di produrre rapidamente output grafici complessi di grande scala** (Shiode, 2001; Delaney, 2000). Il *computer-aided design* (CAD) è stato introdotto nel campo dell'ingegneria con il prototipo del software PRONTO, realizzato nel 1959 da Patrick Hanratty, e si è poi affermato con i primi software commerciali negli anni '70 (Tornincasa e Di Monaco, 2010; Chaillou, 2019).

La possibilità di costruire oggetti virtuali esplorabili in tre dimensioni ha presto suscitando l'interesse del *design* architettonico e urbano e il bisogno di descrizioni della realtà più complesse e accurate. Nel 1967 l'Architecture Machine Group del MIT, diretto da Nicholas Negroponte, ha iniziato un'attività di ricerca che è ancora oggi un punto di riferimento nell'integrazione di computer e *urban planning* (Halpern, 2015; Chaillou, 2019). Alla fine degli anni '60 il gruppo ha lavorato al software URBAN5, che permetteva di memorizzare modelli dello spazio urbano, semplificati sulla base di moduli cubici di lato 10 piedi (circa tre metri) e restituiti in elaborazioni bidimensionali. Il software e la ricerca intorno al suo sviluppo puntavano a coadiuvare il processo di *design*, associando ad ogni modulo diversi attributi — esposizione e illuminazione naturale, accessibilità,

---

<sup>24</sup> Questo aspetto può essere approfondito attraverso una considerazione critica più ampia, e precedente alla modellazione digitale, del processo cartografico e dei *bias* che che accordano alla mappa "*an objective form of knowledge*" (Kurgan, 2013, p.1).



Figura 6. Prima illustrazione digitale (conosciuta) di uno studio di flussi urbani, realizzata con il dispositivo di rappresentazione chiamato Cartographatron per il *Chicago Area Transportation Study* nel 1959. Lo strumento era usato per avere una sintesi visiva dei risultati analitici, prodotta a posteriori e indirizzata alla comunicazione. Immagine tratta da [Batty \(2013, p.53\)](#).

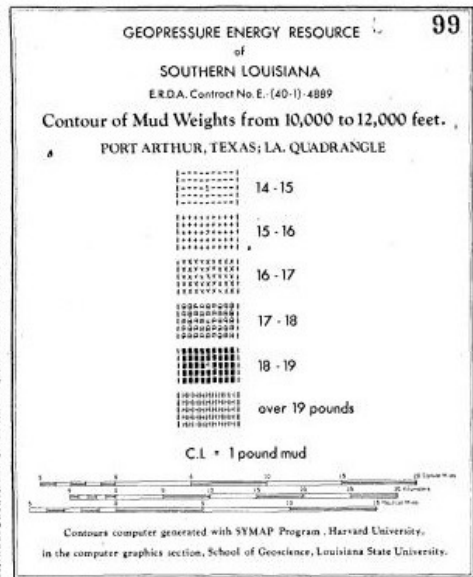
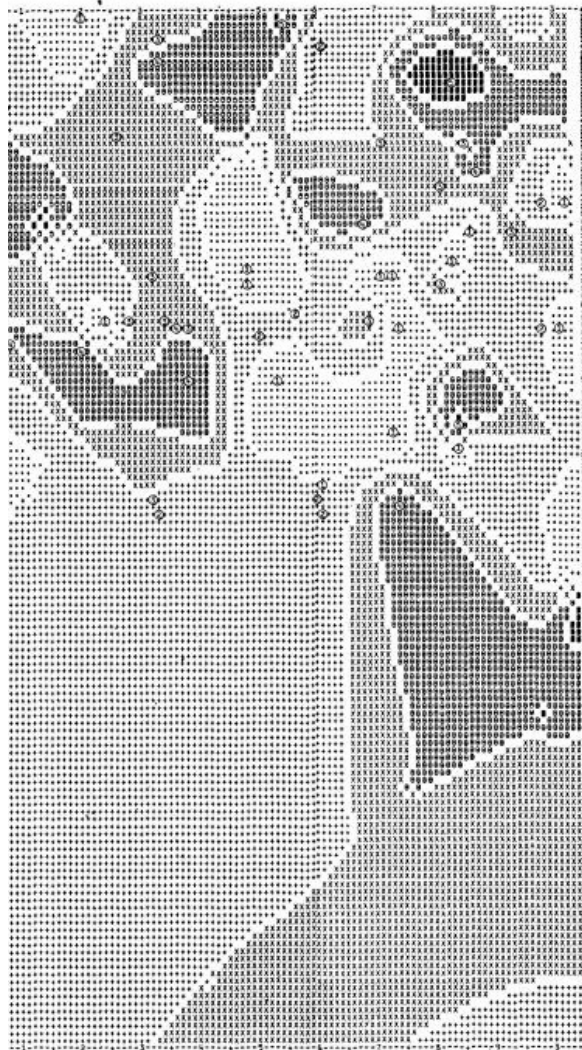
*privacy* visiva e acustica, usabilità, controllo climatico, fattibilità strutturale — e permettendo analisi delle composizioni prodotte (Negroponte, 1970) [figura 8]. Lo studio Skidmore, Owings & Merrill, tra la fine degli anni '60 e gli anni '70, ha costruito, attraverso più fasi incrementalì, un modello semplice ma esteso di Chicago, con l'obiettivo principale di contestualizzare i progetti di architettura sviluppati (Day *et al.*, 1996; Batty *et al.*, 2000; Sdegno, 2016)<sup>25</sup>. La Architecture and Building Aids Computer Unit (ABACUS) della Strathclyde University (Glasgow, GB), dalla fine degli anni '70, ha lavorato a progetti di software per rappresentare in 3D oggetti architettonici — geometrie e *texture* — e tra il 1986 e il 1987 ha realizzato un primo modello urbano di Glasgow basato su una grande mole di dati geometrici: elevazione del terreno, *network* stradale ed edifici (perlopiù prismatici) per la rappresentazione di un'area di 25 km<sup>2</sup> (Day, 1994; Ennis *et al.*, 2000). Anche la città di Helsinki sperimenta modelli tridimensionali dagli anni '80 (Ruohomäki *et al.*, 2018). Negli stessi anni, alla University of California di Los Angeles (UCLA), sotto la direzione di Bill Jepson si compivano i primi esperimenti di simulazione urbana che avrebbero portato allo sviluppo di uno dei più elaborati modelli di città di inizio millennio, tra quelli sviluppati come un'unica applicazione (Batty *et al.*, 2000; Delaney, 2000).

Tuttavia, al di là di applicazioni sperimentali e funzioni circoscritte<sup>26</sup>, i modelli 3D più diffusi fino ancora agli anni '90 si presentano come analoghi digitali — per sintesi delle informazioni e scopo — dei modelli fisici, come bene espresso dal termine francese *maquette numerique*. A testimonianza di un uso in larga parte "tradizionale" della tecnologia, ancora all'inizio del nuovo millennio, alcuni modelli di città costruiti con mezzi informatici erano affiancati dal modellino fisico in scala, o lo avevano come primo riferimento per la modellazione (Batty *et al.*, 2000; Shiode, 2001) [figura 9]. L'uso prevalente di queste rappresentazioni, del resto, è stato a lungo connesso alla visualizzazione ed è rimasto prerogativa della pianificazione. Come i predecessori in balsa, i modelli che prevedevano una visualizzazione geometrica realistica potevano servire per lo sviluppo del progetto, ad esempio attraverso la comparazione e la scelta di scenari alternativi, e costituivano un mezzo di dialogo tra le varie parti coinvolte (Day, 1994; Batty *et al.*, 2000; Ross, 2010). Anche l'interazione dinamica con il modello nelle tre dimensioni era limitata: la *navigazione* di grandi modelli di città richiedeva macchine potenti e costose o era subordinata alla produzione di filmati

---

<sup>25</sup> Il progetto già anticipava alcuni caratteri della modellazione informativa; era infatti associato a strumenti di elaborazione algoritmica dei dati, finalizzati all'analisi e all'ottimizzazione automatica dei costi di costruzione (Sdegno, 2016).

<sup>26</sup> Tra queste, oltre alla ricerca condotta da Negroponte e al modello dello UCLA, il modello dello studio Skidmore, Owings & Merrill (Sdegno, 2016).



- ① Data Point
- 5 Superimposed Data



Figura 7. Immagini prodotte con SYMAP (1963), il primo sistema per la produzione di mappe digitali con funzioni di analisi spaziale (Steinitz, 2016, in Nijhuis et al., 2017, p.11). Immagine: UNT Libraries Government Documents Department. Fonte: *Investigations on the geopressure energy resource of southern Louisiana*, report (1977). University of North Texas Libraries, UNT Digital Library. <https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc1195089/m1/106/> (consultato il 12/04/21).



con appositi *renderer*, composti da hardware e software specifici (Day, 1994; Delaney, 2000; Ennis *et al.*, 2000).

Già dall'inizio degli anni '90 però, la diffusione e la crescente potenza di calcolatori a basso costo hanno cominciato fornire i mezzi per gestire una quantità inedita di dati geo-spaziali e nuove fonti degli stessi (Kurgan, 2013). In quegli anni, il sistema di satelliti del *global positioning system* (GPS) diventava operativo per usi sia militari che civili (1991), il *world wide web* era reso pubblico (1991) e la produzione di immagini da *remote sensing* ad alta risoluzione passava ai formati digitali<sup>27</sup>. L'accesso alla nuova mole di informazioni spaziali ha comportato l'affermazione dei GIS e dell'analisi spaziale nella ricerca, nella progettazione e nelle funzioni amministrative, ma ha anche innescato un cambio di passo nel reperimento di dati metrici per i modelli urbani tridimensionali di grande estensione (Shiode, 2001; Day *et al.*, 1996). Verso la fine del millennio la tecnologia era matura per rendere la navigazione di geometrie complesse nelle tre dimensioni alla portata dell'*hardware* commerciale più diffuso, e per moltiplicare i casi di modellazione di intere città (Teicholz, 1999; Delaney, 2000; Shiode, 2001; Ross, 2010).

Rispetto ai primi *computer model* per la visualizzazione "[t]he new array of mapping possibilities that flow from such techniques are productively complicating the representation of planetary urbanization processes" (Brenner e Schmid, 2014). In questo insieme di trasformazioni socio-tecniche ancora in corso, il ruolo degli algoritmi nella conoscenza dello spazio è sempre meno quello di un processo di astrazione controllato per la selezione di informazioni rilevanti, e in misura crescente uno strumento di progressiva accumulazione di simboli che reclamano "the status of objective description of reality" (Kurgan, 2013, p.32).

*"[W]hat has become of truth in the era of the digital data stream [...] is intimately related to resolution, to measurability, to the construction of a reliable algorithm for translating between representation and reality." (Kurgan, 2013, p.13)*

### *Visualizing the city: la diffusione della città digitale all'inizio del millennio.*

Nel 2000, Michael Batty e un *team* dello UCL CASA (Batty *et al.*, 2000; Shiode, 2001) hanno prodotto **una delle prime rassegne di progetti di**

---

<sup>27</sup> Nel 1992 diventano digitali le immagini del Defense Meteorological Satellite Program's Operational Linescan System (DMSP OLS) (Sutton *et al.*, 2001).

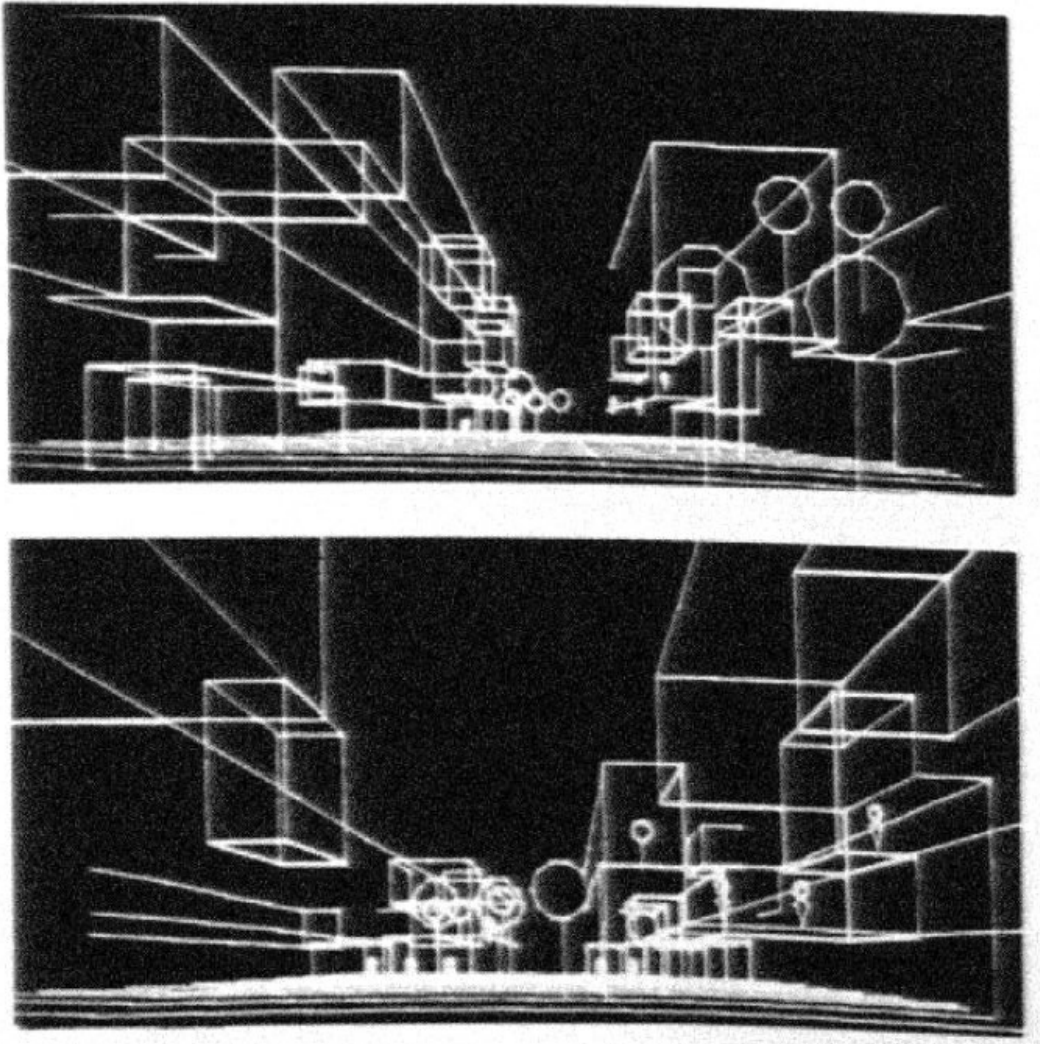


Figura 8. Rappresentazioni tridimensionali dell'ambiente urbano realizzate con il sistema URBAN 5, sviluppato dall'Architecture Machine Group di Nicholas Negroponte. Il software era progettato per supportare operazioni di *design* alla scala urbana producendo simulazioni sulla base di elementi architettonici rappresentati come semplici volumi cubici di 10 piedi di lato (circa tre metri). Il sistema è stato tra i primi a introdurre la terza dimensione nella rappresentazione e nelle componenti analitiche. Immagine tratta da [Negroponte \(1970, p.76\)](#).

**modellazione digitale della città** come strumento di supporto alla pianificazione, al progetto e alla gestione degli *asset* urbani. Il perimetro di questa analisi di strumenti e metodi è segnato dall'interesse per le funzioni di visualizzazione<sup>28</sup> e per lo specifico dominio dell'*urban planning*, campo che aveva visto, fino a quel momento, la maggiore attenzione per le applicazioni del digitale alla rappresentazione dello spazio urbano. Gli autori spiegano la scelta del *focus* anche con un riferimento allo stato di sviluppo degli strumenti informatici per la visualizzazione, i quali, con l'innovazione delle interfacce grafiche nel corso del decennio precedente, si era affermata sul *coding* come la principale modalità di accesso ai computer e alla rete. Anche Malcolm McCullough, che a metà degli anni '80 fu il primo *product manager* per l'architettura in Autodesk, afferma che "*the graphical user interface did so much to make computing accessible to nonspecialists that it quickly became the only form of computer use that most people had ever known*" (McCullough 2006, in Carpo, 2013, p.182) e riconosce negli strumenti di *direct manipulation* — per l'alterazione a schermo in tempo reale degli oggetti — un principio essenziale della modellazione digitale. La visualizzazione era "*perhaps the most significant of all activities in the design process to have been affected by the development of digital technologies*" (Batty et al., 2000, p.1). Oltre all'interesse disciplinare degli autori della rassegna, è stata probabilmente la minor maturità dei tentativi di integrazione degli strati informativi al confronto con l'avanzamento tecnico e la forza comunicativa del mezzo grafico a far sì che una rassegna delle città virtuali all'inizio del millennio potesse separare modelli che sono chiamati "iconici" e modelli "simbolici" (Shiode, 2001).

I modelli individuati già abilitavano molte funzioni che integrano — quando non lasciano in secondo piano — la visualizzazione: la geometria (digitale, tridimensionale) "*can be tagged with attributes*" (Batty et al., 2000, p.2) e poteva quindi essere connessa, come nei GIS bidimensionali, a *database* su cui condurre operazioni di interrogazione, analisi, elaborazione, con metodi e tecniche propri dei modelli matematici ed informatici (Teicholz, 1999). Erano però gli **aspetti iconici della rappresentazione tridimensionale** della città ad essere considerati il carattere del modello che abilita all'estensione in direzione multi-disciplinare della capacità di analisi del progettista [figura 10].

Lo studio conta 63 città dotate di solidi progetti di visualizzazione 3D e oltre 100 singole applicazioni di strumenti di modellazione spaziale, solamente nelle 39 città da più di un milione di abitanti. Tra i promotori dei progetti si identificano

---

<sup>28</sup> "[A] world-wide review of computer visualization projects for cities" (Batty et al., 2000, Acknowledgements).



**Figura 9.** Modello fisico di Tokio in polistirolo e *texture* stampate (ottenute da fotografie da elicottero e dal piano stradale), realizzato nel 2003 dalla società giapponese Mori, che si occupa di mercato immobiliare e *urban design*. Il modello, pensato per la promozione delle attività della società, è stato in seguito integrato con strumenti di realtà virtuale per la visualizzazione di scenari di trasformazione. Si veda MORI Building co., Ltd (2021), *Visual Communication in Urban Design*. <https://www.mori.co.jp/en/urbanlab/> (consultato il 12/04/21). Foto: Antony Tran / World Bank, CC BY-NC-ND 4.0, <https://flic.kr/p/o17wYW>.

diversi attori, come le autorità governative, fornitori di servizi urbani, società dei settori delle costruzioni e dell'ingegneria, università e centri di ricerca. In generale, le applicazioni mostravano *"the almost complete lack of any generalized approach to 3d city modeling"* (Batty et al., 2000, p.11). A diversi committenti e sviluppatori corrispondevano più progetti anche sulla stessa area, e un grande gamma di soluzioni visive, livelli di dettaglio, funzioni analitiche, tecniche di costruzione — a volte frutto della composizione di molti strumenti software. Approfondendo alcuni specifici casi, gli autori della rassegna (*ibid.* p.12) rilevano che *"where very extensive models have been developed such as in New York and Los Angeles for example, the software systems themselves [...] are composed of various more specialist proprietary products"*. Il lavoro del CASA comincia quindi a delineare un carattere dei modelli di città che sarà individuato con con più precisione nelle loro evoluzioni e in più ampie riflessioni critiche sulla città digitale. Benché inseriti anche in progetti pubblici, centralizzati e interessati alla convergenza degli strati informativi, molti avanzamenti risultano *"technology-focused"* e *"supply-side-driven"* (Nochta et al., 2019, p.3). Come Marvin e Luque-Ayala (2017, p.92) evidenziano per i sistemi ERP applicati alla città, *"techniques and capacities often sit outside direct municipal control"*. Tra i rischi della *"corporate path dependency"* (Kitchin, 2014, p.10) è l'affermarsi di una città concepita come strati disconnessi, che moltiplica gli standard e le classificazioni degli elementi e ne rende meno intelligibili i processi di astrazione.

Nella discussione della rassegna, la varietà dei domini di applicazione dei modelli è organizzata in 12 categorie: servizi d'emergenza (sicurezza, accesso di mezzi di soccorso); *urban planning* (analisi del sito, partecipazione pubblica, valutazioni estetico-percettive); telecomunicazioni (e.g., posizionamento di antenne); architettura (revisione del progetto e del rapporto con lo spazio urbano); gestione di servizi (manutenzione e sviluppo di sottoservizi e altre infrastrutture); *marketing* e sviluppo economico (studi di localizzazione); analisi delle proprietà (visualizzazione di valori immobiliari e costi di sviluppo); turismo e intrattenimento (visualizzazione interattiva); *e-commerce* (accesso ai portali *online*); ambiente (soprattutto per visualizzazione di dati); educazione e formazione (esperienze virtuali); *city portals* (accesso a servizi per il cittadino). Sebbene gli usi individuati siano per lo più veicolati dalla visualizzazione, l'elenco chiarisce come il valore del modello tridimensionale superasse gli aspetti "estetici" degli scenari rappresentabili e come la forma e i dati spaziali già potessero essere considerati *"the geometric structure or skeleton on which the more symbolic models can be built"* (Batty et al., 2000, p.2).



Figura 10. Virtual LA, modello sviluppato dallo Urban Simulation Team alla UCLA, integrante diverse funzioni analitiche e considerato, uno dei modelli più elaborati all'inizio del millennio (Batty *et al.*, 2000). La componente "iconica" del modello sfrutta la possibilità di simulare un'alta risoluzione dei dettagli attraverso l'uso di *texture* fotografiche e fotorealistiche applicate a volumi prismatici. Immagine tratta da Delaney (2000, p.10).

Lo studio dà conto della trasformazione delle tecniche di reperimento delle informazioni e costruzione che hanno consentito la proliferazione e nuovi ruoli dei modelli di città. Fino a quel momento, il CAD aveva richiesto tecniche per lo più manuali di misurazione e modellazione. Queste rimanevano le tecniche capaci di produrre il maggior dettaglio geometrico, ed erano rese più efficienti dai sistemi di fotogrammetria digitale. Tuttavia, restavano soluzioni troppo costose per la modellazione alla scala urbana.

I nuovi strumenti implicavano quindi l'integrazione di quelli del GIS o di analoghe funzioni analitiche per la generazione automatica di geometrie. Al di là dei casi in cui le informazioni sulla forma costruito erano più limitate — come applicazioni di GIS 2D convenzionali e soluzioni pseudo-tridimensionali come le serie di panorami sferici<sup>29</sup> — i ricercatori del CASA hanno delineato un panorama di soluzioni basate su metodi di *remote sensing* come rilievi LIDAR e immagini digitali ad alta risoluzione. In particolare le tecniche LIDAR erano usate per la costruzione di modelli tridimensionali in forma di *digital elevation model* (DEM) o per l'*estrusione* dell'impronta di isolati, edifici o parti di costruzione alla quota rilevata. Questi modelli erano spesso completati con la sovrapposizione di *texture* fotografiche: le immagini potevano essere immagini aeree o orto-foto terrestri per i piani verticali; i prodotti così ottenuti sopperivano allo scarso dettaglio geometrico risultando efficaci per i fini di visualizzazione della maggior parte delle applicazioni (Shiode, 2001).

Per quanto riguarda le funzioni analitiche, la maggior parte dei modelli rimaneva un'interfaccia di visualizzazione di calcoli svolti in GIS, consentendo ad esempio la colorazione condizionale degli edifici. Nei casi più avanzati<sup>30</sup>, attraverso la combinazione di più strumenti software, i *toolkit* dei GIS erano integrati con analisi dei dati tridimensionali, come la gestione dei dati delle proprietà su più livelli, analisi delle linee di vista e analisi delle ombre.

### *A common data model? L'affermazione dei sistemi integrati.*

All'inizio del nuovo millennio, lo scenario dell'analisi dei dati urbani si arricchisce attraverso la diffusione delle tecnologie *wireless* abilitate al GPS e

---

<sup>29</sup> Le tecniche di *panoramic image-based modeling* sono ad esempio impiegate nel servizio *Google Street View* (<https://www.google.com/streetview>, consultato il 10/04/21).

<sup>30</sup> Il modello sviluppato per New York dalla società Urban Data Solutions, fondata nel 1997 da ex modellatori CAD dello studio Skidmore, Owings and Merrill, è indicato come il più evoluto sistema di 3G GIS, al 2000, applicato alla modellazione della città (Batty *et al.*, 2000).

connesse alle reti telefoniche. I dispositivi poi evoluti negli *smartphone* hanno cominciato a generare, come sottoprodotto delle loro funzioni preordinate, un massiccio flusso di informazioni spazio-temporali. Lo studio dell'ambiente antropico poteva dunque contare su un'infrastruttura inedita e ubiqua di sensori per estrarre "*society-wide proxies for human mobile activities*" (Batty *et al.*, 2012, p.488). Inoltre, gli avanzamenti nei campi del *remote sensing* e della *computer vision* hanno reso i rilievi digitali più dettagliati, e più rapida, anche attraverso tecniche di estrazione automatica di proprietà, la costruzione di modelli urbani (Klette e Reulke, 2005, in Ross, 2010; Elberink e Vosselman, 2009, in Ross, 2010).

L'accesso a nuovi piani di analisi, l'aggiornamento degli strumenti e la diffusione dei modelli hanno contribuito all'affermazione di un approccio alla città digitale già preconizzato dal *team* di Negroponte (1970) ma espresso solo in sperimentazioni limitate fino a 20 anni fa (Day, 1994; Batty *et al.*, 2000). Sono nati sistemi capaci di incorporare molti livelli di attributi e di scambiare informazioni con le basi di dati, rendendo quindi possibili "*simulations of urban processes and structures*" (Batty *et al.*, 2000, p.2). All'originale interesse intorno alla visualizzazione è subentrata una varietà crescente di applicazioni: nuove funzioni — gestione delle infrastrutture, simulazione ambientale, risposta alle emergenze, navigazione personale...— hanno richiesto alle repliche digitali di città di presentare le informazioni spaziali, i metadati ed altri dati connessi, in forme condivisibili, o *standard* — "***a common data model***" per la **collaborazione tra vari stakeholder** (Ross, 2010).

Batty *et al.* (2000) avevano potuto analizzare i modelli di città in base ai caratteri della *geometria* e dell'*apparenza* — "*appearance*", ovvero i modi di restituzione grafica o *rendering*, spesso caratterizzati dalla resa fotorealistica. Dieci anni dopo, secondo Ross (2010), a questi caratteri andavano aggiunte altre considerazioni tipologiche sui *3D city model*. Le informazioni *tematiche* e *semantiche*<sup>31</sup> sono necessarie per operazioni analitiche su specifici sottoinsiemi di elementi — ad esempio, analisi di edifici con determinate funzioni, o di determinate componenti architettoniche, come i tetti. Le informazioni *topologiche* esprimono un rapporto geometrico tra le parti che non sempre è esplicito nei software di modellazione convenzionali e abilitano l'analisi di reti come strade o

---

<sup>31</sup> Il termine *semantico*, nella modellazione informativa, assume l'accezione informatica legata all'ambito della programmazione ad oggetti. Gli attributi semantici di un oggetto permettono ad un sistema informatico di inferire informazioni aggiuntive regole *domain-specific* (Belsky *et al.*, 2016). Ad esempio, in un sistema BIM un oggetto definito come *finestra* posizionato su un oggetto *muro* permette al software di calcolare le nuove condizioni statiche dell'insieme.



sottoservizi. Infine, le informazioni *temporali* possono documentare quale momento il modello descriva e consentire la simulazione di fenomeni dinamici. Parallelamente all'aggiornamento delle tecniche di acquisizione ed estrazione di dati, la complessità dei modelli è quindi cresciuta oltre la geometria.

In questo processo, **il disegno CAD e la rappresentazione basata su GIS hanno mantenuto uno sviluppo differenziato**, e, piuttosto, si è reso più specifico l'apporto dei diversi strumenti alla modellazione della città. Il GIS si è arricchito di codifiche per la rappresentazione e lo scambio di dati geometrici tridimensionali — per la condivisione delle quali si è affermato, alla fine degli anni 2000, lo standard internazionale CityGML (Kolbe, 2009) [figura 11]. Anche la modellazione dell'oggetto architettonico ha subito trasformazioni nella stessa direzione. I sistemi BIM — cui fa riferimento lo standard aperto IFC (Kolbe, 2009; Belsky *et al.*, 2016) — evolvono dai sistemi CAD/CAM<sup>32</sup> già usati per la modellazione tridimensionale "iconica", e consentono l'interazione di elementi geometrici con un *database* (Penttilä, 2006; Belsky *et al.*, 2016). BIM e GIS possono descrivere lo stesso genere di oggetti urbani, ma sono specializzati su diverse scale di dettaglio. Il BIM rappresenta nei dettagli costruttivi gli elementi architettonici, gestisce il dato in un sistema di riferimento locale e non è pensato per rappresentare il contesto urbano dell'edificio. Il GIS usa invece dati georiferiti, ha una più lunga storia di integrazione di strumenti analitici e non scende alla scala dei dettagli costruttivi. Ed è **il GIS che si è affermato come il sistema più vicino alla costruzione dei 3D city model**, al quale sono rimaste legate le tecniche di estrazione di dati e gli strumenti analitici. Nell'ambito, il BIM risulta in molti casi uno fra diversi mezzi di acquisizione di informazioni più che uno strumento integrato per la modellazione di città<sup>33</sup> (Biljecki, 2017).

Nonostante la specializzazione e la disponibilità delle tecnologie, ancora nel 2011 gli esiti di una ricerca per la normazione nazionale di modelli urbani e territoriali nei Paesi Bassi (Stoter *et al.*, 2011, Stoter *et al.*, 2013) mettevano in evidenza la **mancaza di un approccio condiviso alla modellazione**

---

<sup>32</sup> Anche in questo caso, come è stato in seguito per i modelli di città, lo sviluppo di strumenti che collegano la forma a un set di dati accompagna uno sforzo di condivisione dell'informazione. Il BIM nasce nell'ambito dell'architettura, dell'ingegneria e delle costruzioni (AEC) in corrispondenza della tendenza alla *mass customization* degli elementi costruttivi stimolata dal disegno parametrico con strumenti CAD (Carpo, 2017); l'obiettivo è scambiare informazioni sull'oggetto progettato tra diversi domini disciplinari e dunque ottimizzare il flusso di lavoro dal *design* alla produzione (Penttilä, 2006).

<sup>33</sup> I due sistemi sono inoltre caratterizzati da diverse definizioni matematico-informatiche delle geometrie. Negli ultimi 10 anni, una estesa letteratura, soprattutto nell'ambito delle *geo-information sciences*, sperimenta e ragiona sull'interoperabilità di questi modelli e sul *mapping* reciproco delle strutture di dati (Saygi *et al.*, 2013; Hor *et al.*, 2016; Liu *et al.*, 2017; Song *et al.*, 2017).

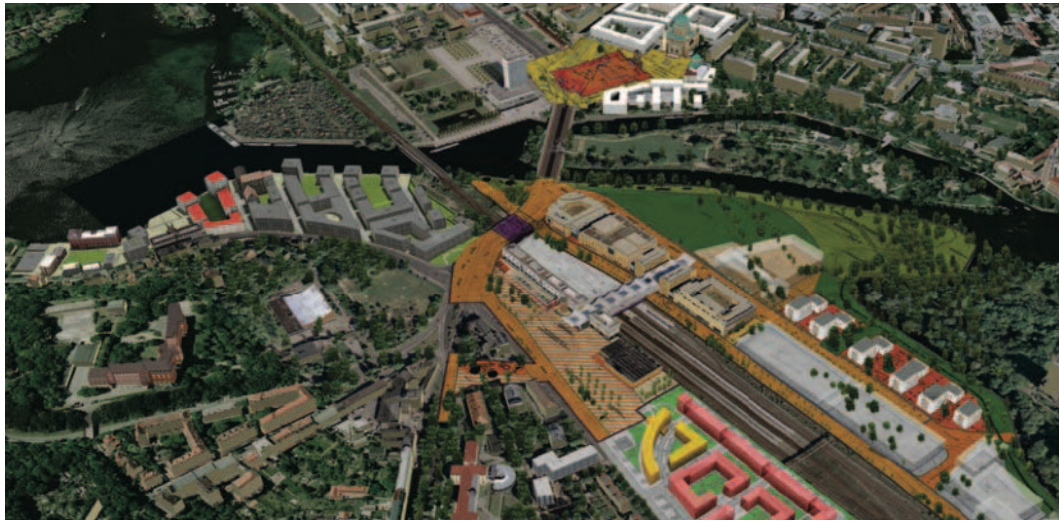


Figura 11. Modelli basati sullo standard geo-spaziale CityGML per la costruzione di modelli tridimensionali di città. Le immagini mostrano l'integrazione di *texture* del terreno (immagini da *remote sensing*), edifici definiti come volumi estrusi, edifici con dettagli dei tetti ed altri dettagli architettonici, dati geo-spaziali rappresentati come aree con colori o *texture* vettoriali, ed etichette. Immagini tratte da Ross (2010, pp.32-33).

**tridimensionale.** Tra le cause, si poteva individuare una conoscenza tecnica frammentata e distribuita soprattutto tra i fornitori di dati, software e servizi. Un ulteriore problema era la manutenzione dei modelli, che comprende l'aggiornamento delle informazioni in tempi adeguati agli usi previsti. Una delle conseguenze è stata la relativa resistenza all'adozione di tecnologie ormai di rapida ed economica applicazione da parte di governi e amministrazioni (Ross, 2010; Stoter *et al.*, 2011).

### *La specializzazione dei modelli geo-spaziali.*

Biljecki *et al.* (2015), realizzano **una delle rassegne più recenti ed estese sui 3D city model e sulla ricerca dedicata.** Lo studio conferma il rapido aumento del numero di applicazioni e sperimentazioni di questo genere di modelli e la tendenza già rilevata al loro impiego per scopi al di fuori della visualizzazione. La letteratura analizzata proviene principalmente dall'ambito delle *geo-information sciences*, ma contributi arrivano anche da campi non necessariamente legati agli strumenti GIS, come l'*urban planning* e l'ingegneria energetica. Le pubblicazioni permettono comunque di riconoscere l'uso diffuso e trasversale a molti domini di applicazione delle informazioni geo-spaziali in forma di modelli 3D. Le letture mostrano però inconsistenze e scarso accordo nell'organizzazione tassonomica della materia. Le liste preesistenti di casi tendono ad essere brevi, tematicamente circoscritte e poco supportate da fonti che consentano generalizzazioni.

Lo studio affronta il problema dell'estesa gamma di oggetti da studiare, e della terminologia poco chiara con cui sono stati descritti in precedenza, attraverso **la definizione di applicazioni e casi d'uso.** Un caso d'uso — termine derivato dall'ingegneria informatica — è definito come una serie di operazioni da compiere sui dati spaziali per raggiungere un obiettivo. Ogni caso può essere adottato in diverse *applicazioni* che fanno parte di contesti disciplinari specifici in cui l'uso del modello può risolvere un problema. Il caso d'uso è scelto come unità di analisi. Attraverso lo studio di oltre 100 applicazioni di *3D city model*, gli autori

individuano 29 casi d'uso<sup>34</sup>. Questi sono distinti in tre gruppi: i casi *non basati sulla visualizzazione*, in cui le operazioni sui dati spaziali sono elaborate senza che la visualizzazione sia essenziale alle analisi o alla valutazione dei risultati, come ad esempio nel calcolo del potenziale solare dei tetti; i casi *visualization-only*, per i quali l'obiettivo è la comunicazione, che consentono applicazioni consuete, come la verifica di scenari progettuali, e altre legate a nuove tecnologie, come le esperienze di realtà virtuale; infine i casi *basati sulla visualizzazione* che richiedono però di operazioni di calcolo, come ad esempio nelle funzioni di *routing* e navigazione.

Le recenti applicazioni dei modelli digitali di città **sfruttano sistematicamente schemi di informazioni semantiche**, o comunque attributi non geometrici connessi agli elementi, per consentire o dettagliare le analisi. Simili informazioni sono fondamentali per ottenere dati tematici — in casi d'uso come la pianificazione urbana o la stima dei fabbisogni energetici —, per analizzare gli aspetti topologici dei modelli — ad esempio nella risposta a emergenze, nella gestione delle infrastrutture, nel *routing* — o per rendere più precisa la simulazione di fenomeni — come la propagazione dei suoni [figura 12].

Emerge inoltre la varietà degli input, che comprendono dati già di uso frequente come DEM da *remote sensing* e fotogrammetria, o poligoni bidimensionali per produrre estrusioni e modelli architettonici, ma anche dati dai sensori presenti sui dispositivi mobili, *procedural modeling*, informazioni da *crowdsourcing*<sup>35</sup>.

Alla luce delle applicazioni interdisciplinari e delle funzioni che integrano la visualizzazione, le *texture*, sul cui contributo al dettaglio della rappresentazione si erano basati i primi metodi di modellazione estensiva (Batty *et al.*, 2000) e la resa fotorealistica dei modelli vedono ridimensionato il loro ruolo.

Pur non considerando gli studi basati sul BIM, la rassegna fa riferimento all'apporto al livello di dettaglio e all'arricchimento semantico che può derivare

---

<sup>34</sup> I 29 casi d'uso individuati sono: stima dell'irraggiamento solare, stima dei consumi energetici, supporto ai servizi di localizzazione, stima della superficie calpestabile, classificazione tipologica degli edifici, visualizzazione ottimizzata, analisi di visibilità, calcolo delle ombre, simulazioni della propagazione del suono, catasto digitale tridimensionale, visualizzazione per la navigazione, visualizzazione per l'amministrazione e le comunicazioni con i cittadini, stima della direzione della luce solare da fotografie, interpretazione di immagini SAR, gestione di infrastrutture, progettazione automatica di impalcature, risposta alle emergenze, simulazioni illuminotecniche, calcolo della propagazione di onde radio, simulazioni fluidodinamiche, stime demografiche, *routing*, previsione dei danni da sisma, simulazioni di inondazione, *change detection*, studio della densità volumetrica, gestione della vegetazione, archeologia (Biljecki *et al.*, 2015).

<sup>35</sup> È il caso, ad esempio, di OpenStreetMap, progetto collaborativo *free and open source* (FOSS) per la raccolta di dati geografici, fondato nel 2004. <https://www.openstreetmap.org/> (consultato il 10/04/21).

dei modelli dell'edificio, e sottolinea il potenziale della ricerca corrente sull'integrazione di BIM e GIS<sup>36</sup>.

Lo studio presenta quindi un quadro in cui i modelli digitali continuano a confrontarsi con l'acquisizione di grandi quantità di dati e con l'integrazione di funzioni analitiche. Tuttavia risalta ancora l'eterogeneità degli strumenti, delle tecniche e delle astrazioni dello spazio, ovvero la mancanza di approcci condivisi che ha caratterizzato la prima ondata di modelli di città all'inizio del millennio (Ross, 2010; Stoter *et al.*, 2011).

### *Gemelli digitali di città.*

Nel 1989 l'informatico e *game designer* Will Wright presentò SimCity<sup>37</sup>. Il videogioco simulava la costruzione di una città e varie conseguenze fisiche, economiche e sociali, basandosi su una esplicita componente spaziale (Devisch, 2008). SimCity ha ottenuto un enorme successo di pubblico e "*has probably introduced more people to urban planning than any book ever has*"<sup>38</sup>. Negli ultimi anni, molte città si sono dotate di **strumenti di simulazione centralizzata dei sistemi urbani**, curiosamente anticipati dal mondo del *gaming* — nonché debitori verso i videogiochi per diverse componenti della tecnologia utilizzata, soprattutto per la grafica<sup>39</sup>. Lo stesso autore di SimCity, nel 1994 quando la città non era cosparsa di sensori e il *web* non aveva fatto dei dati personali il bene virtuale per eccellenza, ha anche predetto l'uso di "*mass user-savable storage*"<sup>40</sup> che oggi caratterizza i videogiochi come la città digitale, ovvero la possibilità che i dati immessi dagli utenti siano il cuore del modello computerizzato.

Lo sviluppo di modelli digitali per la collaborazione e la condivisione di informazioni tra diversi agenti da un lato ha prodotto e ancora produce una proliferazione di applicazioni, basate sull'ampliata capacità di analisi. Ma gli utenti della città virtuale non sono più solo tecnici e professionisti che devono effettuare analisi specializzate. I dati sono raccolti da infrastrutture digitali che

---

<sup>36</sup> Cfr. Saygi *et al.* (2013), Hor *et al.* (2016), Liu *et al.* (2017), Song *et al.* (2017), v. nota 33.

<sup>37</sup> Wikipedia, s.v. "SimCity (1989 video game)". [https://en.wikipedia.org/wiki/SimCity\\_\(1989\\_video\\_game\)](https://en.wikipedia.org/wiki/SimCity_(1989_video_game)) (consultato il 10/04/21).

<sup>38</sup> Paul Starr (1994). *Seductions of Sim: Policy as a simulation game*. *American Prospect*, (17), p.1. Citato in Devisch (2008).

<sup>39</sup> Questo aspetto incrocia il tema dei tempi e delle modalità di adozione delle nuove tecnologie, affrontato più nel dettaglio nel secondo capitolo della tesi [capitolo 2].

<sup>40</sup> Kelly K. (1994). *Will Wright: The Mayor of SimCity*. *Wired*. <https://www.wired.com/1994/01/wright/> (consultato il 12/04/21).

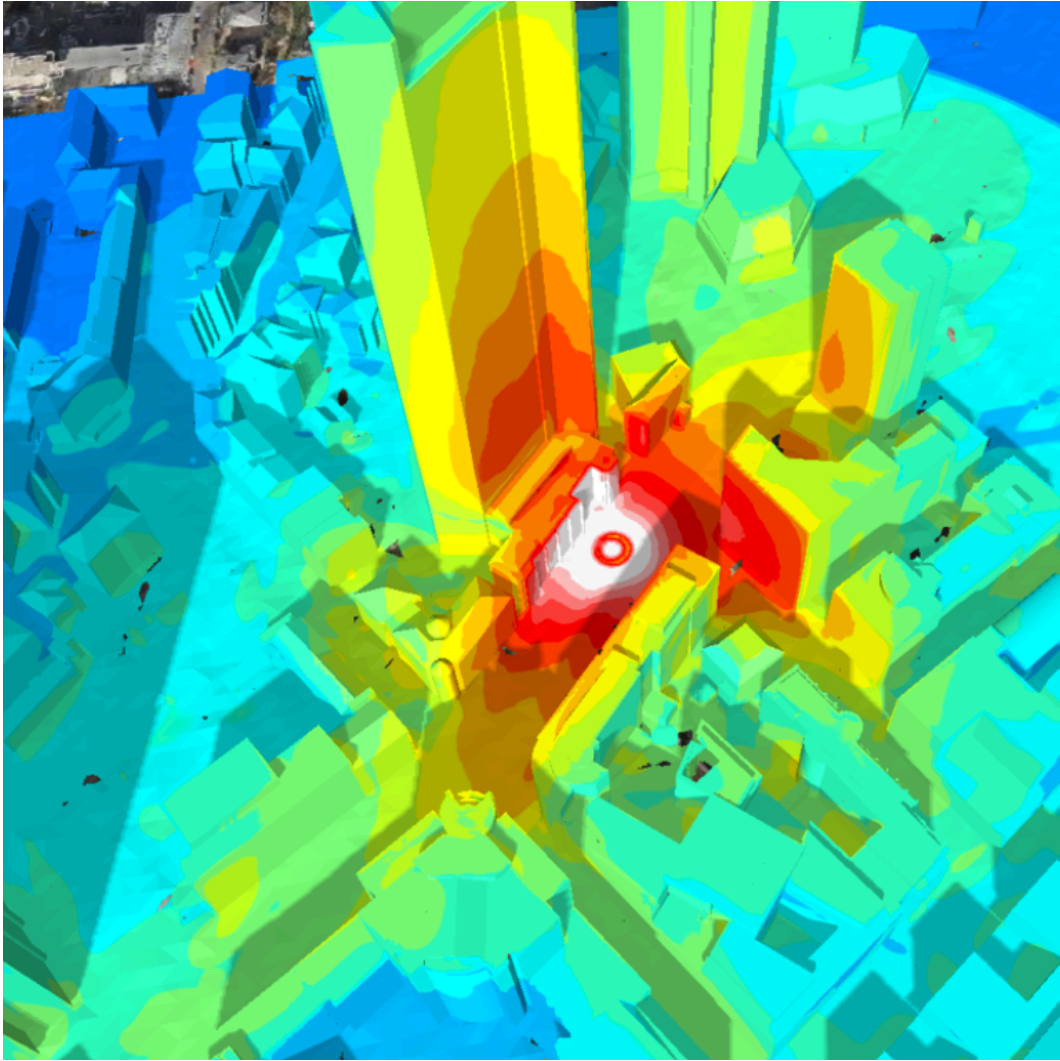


Figura 12. Le rassegne più recenti di applicazioni di *3D city model* dimostrano la possibilità di usare i modelli per riprodurre e simulare una grande quantità di fenomeni. Nell'immagine è mostrata un'applicazione alla simulazione degli effetti di un'esplosione (i colori rappresentano i valori della pressione dell'aria in corrispondenza delle superfici del modello). Immagine tratta da [Biljecki et al. \(2015\)](#).

influenzano la vita di ogni individuo; gli output dell'elaborazione dei dati tornano agli utenti attraverso le stesse infrastrutture, in forma di servizi. **Tra i 3D city model si incontrano quindi le piattaforme di raccolta di dati e le infrastrutture digitali messe in campo dalle autorità della smart city** (Singer, 2012) [figura 13]. Nella replica virtuale della città il flusso di dati *crowdsourced* e le molte simulazioni ormai praticabili possono diventare un organismo che si auto-regola e che supporta — e volte sostituisce — gli interventi umani (Halpern, 2015).

La realizzazione di un *urban digital twin* è diventata l'obiettivo dichiarato di molti progetti di *smart city* (Mohammadi e Taylor, 2017; Batty, 2018; Doyle, 2019). Questi sono costitutivamente orientati all'adozione di soluzioni tecnologiche e dell'interpretazione dei *big data* per migliorare la qualità della vita urbana, con enfasi sui temi ambientali e dell'efficienza energetica. Il *digital twin* è inteso come "*ultimate technological apparatus for «smartening» cities*" (Wan et al., 2019, p.187): è uno strumento per gestire risorse, sostenere lo sviluppo economico, mitigare gli impatti ambientali, migliorare i servizi (Doyle, 2019).

Il concetto di *digital twin* non è nuovo. Nella più semplice delle accezioni, un *digital twin* è "[a] realistic digital representation of something physical" (Bolton et al., 2018, p.27). Il termine è stato coniato all'inizio degli anni 2000 da Michael Grieves per il campo dell'ingegneria della produzione (Kritzinger et al., 2018; Grieves e Vickers, 2017). Si attribuiscono al programma Apollo della NASA le prime significative applicazioni del concetto (Datta, 2017; Schleich et al., 2017; Bolton et al., 2018). Modelli complessi per interagire con i dispositivi fisici sono oggi parte di prodotti commerciali soprattutto in ambito ingegneristico<sup>41</sup>. I *digital twin* usano sensori e attuatori per rendere un modello virtuale corrispondente allo stato corrente dell'oggetto reale. L'intervento su uno dei due oggetti agisce sia sull'originale che sulla copia digitale in maniera quasi sincrona o con un ritardo trascurabile. Il *digital twin* si distingue dunque dal *digital model* propriamente detto, privo di scambio di dati automatico con il reale, e dai casi detti *digital shadow*, modelli collegati con un flusso di dati da sensori in entrata, ma che

---

<sup>41</sup> Applicazioni del paradigma del *digital twin* si trovano ad esempio nell'ambito dell'aeronautica — Rolls-Royce simula i motori dei Boeing 787 per la progettazione del prodotto e per pianificare la manutenzione dei singoli motori venduti (<https://customers.microsoft.com/en-us/story/rollsroycestory>, consultato il 12/04/21) —, nei processi di produzione industriale — Siemens offre modelli per le catene di produzione del settore *automotive* (<https://new.siemens.com/global/en/markets/automotive-manufacturing/digital-twin-production.html>, consultato il 12/04/21)—, nelle energie rinnovabili — il servizio *Digital Wind Farm* di GE raccoglie e analizza i dati operativi di impianti eolici (<https://www.ge.com/renewableenergy/wind-energy/onshore-wind/digital-wind-farm>, consultato il 12/04/21).



Figura 13. Le città si stanno dotando di strumenti centralizzati di controllo di funzioni e dati veicolati da dispositivi digitali. Il paradigma del *digital twin* prevede il continuo e rapido scambio di informazioni tra città e modello digitale, tramite sensori ed attuatori. *i.* L'immagine è parte del progetto fotografico *Futuristic-utopia* di Stephanie Buret (2016, <http://www.stephanieburet.com/> consultato il 12/04/21), che indaga le contraddizioni della *smart city* osservando la città iper-tecnologica di Songdo, Corea del Sud. La sala di controllo è pensata per analizzare il traffico e contrastare la criminalità. Foto: © Stephanie Buret. *ii.* Immagine promozionale relativa al *city dashboard* progettato da Geodan per la città di Amsterdam [v. sezione 4.2: DT.5], che raccoglie dati da sensori e li presenta in forma di infografica, elaborati geo-spaziali integrati al modello tridimensionale, e altra documentazione. Immagine: © Geodan.



richiedono un intervento manuale per un *feedback* sul gemello fisico<sup>42</sup> (Kritzinger *et al.*, 2018; Fuller *et al.*, 2020).

Il concetto è passato alla città solo attraverso i più recenti avanzamenti delle ICT. L'*internet delle cose* (*internet of things*, IoT), è una rete sempre più fitta di oggetti autonomi, o "intelligenti", capaci di raccogliere, elaborare e condividere informazioni (Datta, 2017; Fuller *et al.*, 2020). Piattaforme di sensori sono parte integrante di servizi e infrastrutture come la viabilità, la logistica, i servizi pubblici, i sottoservizi; interagiscono con gli edifici e con le persone stesse. Ma la sensoristica è legata ad altre tecnologie che rendono possibili i progetti di *twinning*. Il *cloud computing* ha permesso una maggiore interconnessione dei sistemi di informazioni e l'ampliamento della potenza di calcolo (Batty *et al.*, 2012; Holliman *et al.*, 2019). Si sono inoltre affermate le potenzialità nel campo del *data mining* offerte dal *machine learning*. In precedenza, l'automazione ha già abilitato la produzione di modelli tridimensionali di grande scala. Perché la nuova mole di dati possa essere usata in maniera efficiente, sono necessari algoritmi aggiornati, e l'avanzamento nel campo dell'*intelligenza artificiale* è connotato alla fiducia nei *big data* (Wan *et al.*, 2019; Fuller *et al.*, 2020). Questi strumenti permettono di individuare *pattern* nei dati di input, sviluppare modelli di previsione, semplificare l'interpretazione dei fenomeni attraverso funzioni di *clustering*.

Negli ultimi anni alcune grandi compagnie tecnologiche, come Microsoft, Cityzenith, Dassault Systèmes, Bentley, hanno iniziato ad offrire **prodotti di modellazione tridimensionale e informativa per la città**, e a condurre campagne di *marketing* che descrivono soluzioni decisive per gestire servizi, infrastrutture e politiche nelle *smart city* (Wildfire, 2018; Minsky, 2020). I gemelli virtuali proposti sono portali che raccolgono numerosi *database* e sensori di IoT. I modelli possono sondare la città e produrre output operativi quasi in tempo reale, ma anche di simulare scenari futuribili, integrando funzioni già radicate nella modellazione informativa (cfr. Tomko e Winter, 2019), permettendo il monitoraggio degli *asset* urbani, il controllo remoto dei sistemi, il *testbedding*<sup>43</sup> di progetti. Il *target* dei progetti è composto da *policy makers*, amministrazioni,

---

<sup>42</sup> Mancando ancora un completo accordo sulle definizioni, in alcuni casi si adotta un senso ampio del termine, ed anche un modello di pianificazione strategica di un sistema è considerato un *digital twin*. Il modello può dunque essere statico e la sua operatività, o il *feedback* sul *gemello* reale, è sul piano e sulla scala temporale degli investimenti di capitale (Bolton *et al.*, 2018; cfr. Wan *et al.*, 2019).

<sup>43</sup> Usato soprattutto negli ambiti informatici e industriali, il *testbedding* indica il passaggio dallo sviluppo teorico di un prodotto o un progetto alla sperimentazione in ambiente controllato e replicabile Cfr. Wikipedia, s.v. "Testbed". <https://en.wikipedia.org/wiki/Testbed> (consultato il 12/04/21).



**Figura 14.** Virtual Singapore, modello sviluppato da Dassault Systèmes attraverso la piattaforma proprietaria 3DEXPERIENCity, che integra diverse funzioni di simulazione e analisi [v. sezione 4.3: DT.5]. Il modello può importare dati da documenti BIM, e permette il *rendering* realistico degli elementi, attraverso *texture* e dettagli geometrici. Immagine: © Dassault Systèmes.

centri di ricerca, pianificatori. I diversi prodotti sfruttano diverso software, spesso proprietario. Si tratta principalmente di sistemi di GIS 3D, ma alcuni sono compatibili con formati BIM, per integrare informazioni dalla modellazione di singoli edifici o impianti. Le interfacce per gli utenti vanno dai *city dashboard* — sistemi di mappe e analisi grafiche prodotti a partire dai flussi di dati dalla città — a rappresentazioni grafiche di dettaglio fotorealistico [figura 14]. Lo stato di sviluppo delle applicazioni è molto vario, e va dall'aggiornamento di progetti di *management* e analisi urbana preesistenti, ad applicazioni di prodotti commerciali affermati, fino a progetti che prevedono lo sviluppo parallelo del costruito e del gemello digitale<sup>44</sup>. Alcuni progetti mettono a sistema archivi e dati geometrici già raccolti in precedenza, altri si basano su modellazione *ex-novo* e rilievo digitale.

Il *doppelgänger* virtuale sembra essere un requisito essenziale nell'avanzamento tecnologico della città. Questa è destinata a ulteriori balzi tecnici con effetti sul volume di dati, il più vicino dei quali è probabilmente l'aumento delle prestazioni e della velocità delle comunicazioni mobili. **Il digital twin unisce software e hardware, reperimento di dati e operatività, rappresentazione e organizzazione dello spazio reale.** Il *computer model* e il sistema fisico convergono, realizzando un *urban operating system* (Marvin e Luque-Ayala, 2017). Il ruolo del modello spaziale sta cambiando ed è forse meno chiaro. I vantaggi della rappresentazione spaziale, riconosciuti soprattutto nella visualizzazione, sono stati a lungo il principale incentivo alla produzione di modelli digitali di città. Oggi, lo scopo di questi modelli è interfacciare una quantità di informazione non gestibile dall'uomo, con il supporto dell'intelligenza artificiale, di reti di dispositivi automatici e di segnali in *linguaggio macchina*. Si aprono domande su come gli algoritmi rielaborino e integrino le informazioni dei modelli (Wan *et al.*, 2019; *cfr.* Bolton *et al.*, 2018) e sugli effetti che questi strumenti hanno sulla città reale.

Riprendendo Barthes, Halpern (2015) afferma che l'avanzamento tecnico contribuisce al ridimensionamento dell'interesse per la rappresentazione in sé come processo *mediato* — con limiti e riduzioni funzionali — in favore del volume e dell'*immediatezza* della trasmissione di dati. Dalla diffusione del *remote sensing* negli anni '90, agli ultimi avanzamenti dell'*intelligenza artificiale*, si è perfezionata la capacità degli strumenti di percepire, classificare e visualizzare lo spazio urbano, ma non è stato alterato l'assunto epistemologico *tecono-ottimistico* secondo cui la quantità di dati produca una conoscenza oggettiva (Witt, 2016; Harley, 1989).

---

<sup>44</sup> La rassegna di casi di *urban digital twin* è presentata nella seconda parte della tesi [sezione 4.2].

### *La prova dell'emergenza sanitaria: un commento.*

Gli scenari di sviluppo prefigurabili, anche con cautela o scetticismo, non sembrano ammettere una città fisica slegata da quella digitale. Quest'ultima rappresenta il tentativo più aggiornato e più o meno cosciente di mettere in ordine i fenomeni, di inserirli in schemi chiari e comunicabili. In questi termini, la costruzione di modelli riguarda la nostra conoscenza da ben prima dell'età digitale [v. [Introduzione](#)]. E come i modelli del passato (e piani, progetti, ed altre rappresentazioni dell'ambiente urbano o di un suo sottoinsieme) la città immateriale è a sua volta un *fatto urbano*, e plasma flussi, infrastrutture, tessuti. L'emergenza sanitaria globale iniziata nel 2020 ha messo alla prova diversi aspetti del problema generale della connessione tra digitale e spazio fisico. Un mondo racchiuso in una rete virtuale è anche un mondo di relazioni materiali, ovvero di flussi di beni e persone e di condizioni demografiche che determinano caratteri inediti anche per i fenomeni pandemici<sup>45</sup>. Al contempo, le reazioni alla crisi sono state immediatamente rivolte alla tecnologia, sia nel supporto ad attività specialistiche — la ricerca condivisa, il tracciamento dei contagi, la raccolta e l'analisi di dati — sia nel sopperire ai limiti imposti alle pratiche quotidiane — dai *meeting* in rete, alla gestione degli accessi a luoghi e servizi. Ma proprio questo scenario inatteso che ha, se possibile, esaltato ulteriormente gli stili di vita digitalizzati, al contempo ha confermato la fragilità della città replicata in forma di dati, e dell'idea che questa possa essere la chiave alla comprensione e alla gestione della complessità del nostro ambiente.

Già nel 2004 uno studio sulla diffusione delle malattie infettive in ambito urbano<sup>46</sup> aveva dimostrato come dati capillari sulla localizzazione delle persone e modelli spaziali (nel caso specifico una rappresentazione topologica degli spazi pubblici) permettano di gestire il contagio con misure localizzate. Lo studio concludeva ad esempio che, insieme alla rapida individuazione dei contagi, la vaccinazione mirata di determinati gruppi di persone (individuati attraverso parametri come la distanza degli spostamenti usuali e la frequentazione di potenziali *cluster* di contagio) può essere più efficiente delle strategie di immunizzazione di massa a cui è stato fatto ampio ricorso. Come chiarito dai ricercatori, lo specifico risultato può non essere immediatamente trasferibile a diversi virus e contesti, ma rimane un contributo alla descrizione delle potenzialità

---

<sup>45</sup> Si vedano, ad esempio: Watkins J. (2020). Preventing a covid-19 pandemic. *BMJ* 2020; 368:m810. Farzanegan M.R., Feizi M., Gholipour H.F. (2021). Globalization and the Outbreak of COVID-19: An Empirical Analysis. *Journal of Risk and Financial Management*, 14(3), 105.

<sup>46</sup> Eubank S., Guclu H., Kumar V.A., Marathe M.V., Srinivasan A., Toroczkai Z., Wang N. (2004). Modelling disease outbreaks in realistic urban social networks. *Nature*, 429(6988), 180-184.

della città digitale che oggi sembra particolarmente significativo. Le misure emergenziali adottate sono state accompagnate dalla raccolta ossessiva di dati e dunque anche a forme di riproduzione dell'ambiente urbano in dati e metadati geo-localizzati. Tuttavia, osservando i risultati — che comprendono il fallimento dei sistemi di *contact tracing*<sup>47</sup> e interventi generalizzati come *lockdown* e vaccinazioni di massa — si può ipotizzare che i modelli digitali che abbiamo avuto a disposizione non siano stati impiegati come soluzioni trasformative, forse perché non completi, comprensibili e duttili come il *marketing* dei sistemi di gestione della città tenda a sostenere.

---

<sup>47</sup> Si veda, a titolo d'esempio, Fetzer T., Graeber T. (2020). Does contact tracing work? Quasi-experimental evidence from an excel error in England. London, Centre for Economic Policy Research.

## Riferimenti bibliografici.

- Albino V., Berardi U., Dangelico R.M.** (2015). Smart Cities: Definitions, Dimensions, Performance, and Initiatives. *Journal of Urban Technology*, 22(1), 3–21.
- Batty M.** (2013). *The New Science of Cities*. MIT Press.
- Batty M., Axhausen, K.W., Giannotti, F., Pozdnoukhov, A., Bazzani, A., Wachowicz, M., Ouzounis, G., Portugali Y.** (2012). Smart cities of the future. *The European Physical Journal Special Topics*, 214(1), 481–518.
- Batty M., Chapman D., Evans S., Haklay M., Kueppers S., Shiode N., Smith A., Torrens P.M.** (2000). *Visualizing the city: Communicating urban design to planners and decision-makers*.
- Batty M., Evans S., Haklay M., Kueppers S., Shiode N., Smith A., Torrens P.M.** (2000). *Visualizing the city: Communicating urban design to planners and decision-makers*.
- Belsky M., Sacks R., Brilakis I.** (2016). Semantic Enrichment for Building Information Modeling: Semantic enrichment for building information modeling. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 31(4), 261–274.
- Biljecki F.** (2017). *Level of detail in 3D city models* [PhD thesis].
- Biljecki F., Stoter J., Ledoux H., Zlatanova S., Çöltekin A.** (2015). Applications of 3D City Models: State of the Art Review. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 4(4), 2842–2889.
- Bolton A., Butler L., Dabson I., Enzer M., Evans M., Fenemore T., Harradence F., Keaney E., Kemp A., Luck A., Pawsey N., Saville S., Schooling J., Sharp M., Smith T., Tennison J., Whyte J., Wilson A., Makri C.** (2018). *Gemini Principles* [Report]. CDBB.
- Brenner N., Schmid C.** (2014). The ‘urban age’ in question. *International Journal of Urban and Regional Research*, 38(3), 731–755.
- Brenner N., Schmid C.** (2015). Towards a new epistemology of the urban? *City*, 19(2–3), 151–182.
- Carpo M.** (2013). *The digital turn in architecture 1992-2012*. John Wiley & Sons.
- Carpo M.** (2017). *The second digital turn: Design beyond intelligence*. MIT press.
- Chaillou S.** (2019, 24 febbraio). *AI & Architecture*. Towards Data Science. <https://towardsdatascience.com/ai-architecture-f9d78c6958e0> (consultato il 27/04/21).
- Datta A.** (2015). A 100 smart cities, a 100 utopias. *Dialogues in Human Geography*, 5(1), 49–53.
- Datta S.P.A.** (2017). Emergence of Digital Twins—Is this the march of reason? *Journal of Innovation Management*, 5(3), 14–33.
- Day A.** (1994). From map to model: The development of an urban information system. *Design Studies*, 15(3), 366–384.
- Day A., Bourdakis V., Robson J.** (1996). Living with a virtual city. *Architectural Research Quarterly*, 2(1), 84–91.
- Delaney B.** (2000). Visualization in urban planning: They didn’t build LA in a day. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 20(3), 10–16.
- Devisch O.** (2008). Should Planners Start Playing Computer Games? Arguments from SimCity and Second Life. *Planning Theory & Practice*, 9(2), 209–226.
- Doyle S.** (2019). Siblings make sense of smart cities. *Engineering Technology*, 14(1), 42–45.
- Ennis G., Lindsay M., Grant M.** (2000). VRML Possibilities: The Evolution of the Glasgow Model. *IEEE MultiMedia*, 7(2), 48–51.
- Fujita M., Krugman P.R., Venables A.** (2001). *The spatial economy: Cities, regions, and international trade* (1. paperback ed). MIT Press.
- Fuller A., Fan Z., Day C., Barlow, C.** (2020). Digital Twin: Enabling Technology, Challenges and Open Research. *ArXiv:1911.01276 [Cs]*.
- Grieves M., Vickers J.** (2017). Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems. In Kahlen F.-J., Flumerfelt S., Alves A. (a cura di), *Transdisciplinary Perspectives on*

- Complex Systems* (pp. 85–113). Springer International Publishing.
- Halpern O.** (2015). *Beautiful Data: A History of Vision and Reason since 1945*. Duke University Press.
- Harley J.B.** (1989). Deconstructing the map. *Cartographica: The International Journal for Geographic Information and Geovisualization*, 26(2), 1–20.
- Hollands R.G.** (2008). Will the real smart city please stand up?: Intelligent, progressive or entrepreneurial? *City*, 12(3), 303–320.
- Holliman N.S., Antony M., Charlton J., Dowsland S., James P., Turner M.** (2019). Petascale Cloud Supercomputing for Terapixel Visualization of a Digital Twin. *IEEE Transactions on Cloud Computing*, 1–1.
- Hor A.-H., Jadidi A., Sohn G.** (2016). BIM-GIS Integrated Geospatial Information Model Using Semantic Web And RDF Graphs. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, III-4, 73–79.
- Kitchin R.** (2014). The real-time city? Big data and smart urbanism. *GeoJournal*, 79(1), 1–14.
- Kitchin R.** (2015). *Making sense of smart cities: addressing present shortcomings*. Cambridge Journal of Regions, Economy and Society, 8(1), 131–136.
- Kolbe T.H.** (2009). Representing and Exchanging 3D City Models with CityGML. In Lee J., Zlatanova S. (a cura di), *3D Geo-Information Sciences* (pp. 15–31). Springer Berlin Heidelberg.
- Kritzinger W., Karner M., Traar G., Henjes, J., Sihl W.** (2018). Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. *IFAC-PapersOnLine*, 51(11), 1016–1022.
- Kurgan L.** (2013). *Close up at a distance: Mapping, technology, and politics*. Zone Books.
- Liu X., Wang X., Wright G., Cheng J., Li X., Liu R.** (2017). A State-of-the-Art Review on the Integration of Building Information Modeling (BIM) and Geographic Information System (GIS). *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 6(2), 53.
- Lowry I.S.** (1965). A short course in model design. *Journal of the American Institute of Planners*, 31(2), 158–166.
- Luque-Ayala A., Marvin S.** (2015). Developing a critical understanding of smart urbanism? *Urban Studies*, 52(12), 2105–2116.
- Marvin S., Luque-Ayala A.** (2017). Urban Operating Systems: Diagramming the City: Urban Operating Systems. *International Journal of Urban and Regional Research*, 41(1), 84–103.
- Mattern S.** (2014). Interfacing Urban Intelligence. *Places Journal*, 2014.
- Minsky C.** (2020, 29 gennaio). *Digital twins give urban planners virtual edge*. Financial Times. <https://www.ft.com/content/15851b06-1b6f-11ea-81f0-0c253907d3e0> (consultato il 27/04/21).
- Mohammadi N., Taylor J.E.** (2017). Smart city digital twins. *2017 IEEE Symposium Series on Computational Intelligence (SSCI)*, 1–5.
- Negroponte N.** (1970). *The architecture machine*. M.I.T. Press.
- Neirotti P., De Marco A., Cagliano A.C., Mangano G., Scorrano F.** (2014). Current trends in Smart City initiatives: Some stylised facts. *Cities*, 38, 25–36.
- Nijhuis S., Zlatanova S., Dias E., van der Hoeven F., van der Spek S.** (a cura di). (2017). *Geo-Design: Advances in bridging geo-information technology, urban planning and landscape architecture*. TU, Faculty of Architecture and the Built Environment.
- Nochta T., Wan L., Schooling J.M., Lemanski C.L., Parlikad A.K., Jin, Y.** (2019). Digitalisation for Smarter Cities – Moving from a Static to a Dynamic View. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Smart Infrastructure and Construction*, 1–14.
- Penttilä H.** (2006). Describing the changes in architectural information technology to understand design complexity and free-form architectural expression. *Journal of Information Technology in Construction (ITcon)*, 11(29), 395–408.
- Ross L.** (2010). Virtual 3D City Models in Urban Land Management—Technologies and Applications. Technische Universität Berlin.

- Ruohomäki T., Airaksinen E., Huuska P., Kesaniemi O., Martikka M., Suomisto J.** (2018). Smart City Platform Enabling Digital Twin. *2018 International Conference on Intelligent Systems (IS)*, 155–161.
- Saygi G., Agugiaro G., Hamamcioğlu-Turan M., Remondino F.** (2013). Evaluation of GIS And BIM Roles for the Information Management of Historical Buildings. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, II-5/W1*, 283–288.
- Sleich B., Anwer N., Mathieu L., Wartzack S.** (2017). Shaping the digital twin for design and production engineering. *CIRP Annals*, 66(1), 141–144.
- Sdegno A.** (2016). Computer Aided Architecture: Origins and development. *DISEGNARECON*, 9(16), 4.1-4.6.
- Shiode N.** (2001). 3D urban models: Recent developments in the digital modelling of urban environments in three-dimensions. *GeoJournal*, 52(3), 263–269.
- Singer N.** (2012, 3 marzo). Mission Control, Built for Cities. *The New York Times*. <https://www.nytimes.com/2012/03/04/business/ibm-takes-smarter-cities-concept-to-rio-de-janeiro.html> (consultato il 27/04/21).
- Song Y., Wang X., Tan Y., Wu P., Sutrisna M., Cheng J., Hampson K.** (2017). Trends and Opportunities of BIM-GIS Integration in the Architecture, Engineering and Construction Industry: A Review from a Spatio-Temporal Statistical Perspective. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 6(12), 397.
- Stoter J., Beetz J., Ledoux H., Reuvers M., Klooster R., Janssen P., Penninga F., Zlatanova S., van den Brink L.** (2013). Implementation of a National 3D Standard: Case of the Netherlands. In Pouliot J., Daniel S., Hubert F., Zamyadi A. (a cura di), *Progress and New Trends in 3D Geoinformation Sciences* (pp. 277–298). Springer Berlin Heidelberg.
- Stoter J., Vosselman G., Goos J., Zlatanova S., Verbree E., Klooster R., Reuvers M.** (2011). Towards a National 3D Spatial Data Infrastructure: Case of The Netherlands. *Photogrammetrie - Fernerkundung - Geoinformation*, 2011(6), 405–420.
- Sutton P., Roberts D., Elvidge C., Baugh K.** (2001). Census from Heaven: An estimate of the global human population using night-time satellite imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 22(16), 3061–3076.
- Teicholz N.** (1999, 16 dicembre). Shaping Cities, Pixels to Bricks. *The New York Times*. <https://archive.nytimes.com/www.nytimes.com/library/tech/99/12/circuits/articles/16city.html> (consultato il 27/04/21).
- Thrift N.** (2014). The ‘sentient’ city and what it may portend. *Big Data & Society*, 1(1), 205395171453224.
- Tomko M., Winter S.** (2019). Beyond digital twins – A commentary. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, 46(2), 395–399.
- Tornincasa S., Di Monaco F.** (2010). The future and the evolution of CAD. *Proceedings of the 14th International Research/Expert Conference: Trends in the Development of Machinery and Associated Technology*, 1(1), 11–18.
- Wan L., Nocht T., Schooling J.M.** (2019). Developing a City-Level Digital Twin – Propositions and a Case Study. *International Conference on Smart Infrastructure and Construction 2019 (ICSIC)*, 187–194.
- Wildfire C.** (2018). How can we spearhead city-scale digital twins? *Infrastructure Intelligence*. <http://www.infrastructure-intelligence.com/article/may-2018/how-can-we-spearhead-city-scale-digital-twins> (consultato il 27/04/21).
- Witt A.J.** (2016). Cartographic Metamorphologies; or, Enter the RoweBot. *Log*, 36, *ROBOLOG*, 115–124.





Capitolo 2.

**Gli strumenti digitali e il ruolo  
dell'astrazione nei modelli.**

---

## 2.1. L'architettura nell'epoca della sua riproducibilità tecnica.

### *L'algoritmo e la replicazione.*

La città muta rapidamente, e stiamo affidando ai modelli digitali la descrizione di questo cambiamento, memorizzando, organizzando e analizzando i dati urbani. Tuttavia, attraverso le soluzioni tecniche alla gestione di un'inedita mole di input, il mondo digitale e gli strumenti che lo sostengono stanno influenzando la comprensione della città, non solo sottoponendoci una rappresentazione dettagliata, ma alterando significativamente il nostro punto di vista.

Usando un termine piuttosto comprensivo, potremmo chiamare *algoritmi* i dispositivi che veicolano la costruzione dei modelli del mondo basati su dati digitali. La reiterazione dell'identico è l'espedito che rende l'algoritmo utile a raccogliere e trasformare una enorme mole di dati. Possiamo quindi automatizzare e moltiplicare operazioni che in precedenza avremmo svolto manualmente. L'efficienza degli algoritmi si pesa con la potenza di calcolo e la velocità di connessione, che permettono un numero maggiore di operazioni.

Tuttavia, l'algoritmo è in primo luogo un procedimento comunicabile; un approccio a un problema che altri possono riutilizzare, perché formalizzato in una successione di passi comprensibile e, appunto, replicabile. Con la diffusione degli strumenti digitali, gli algoritmi si sono rivelati utili anche alla comunicazione con la macchina, e si può osservare, nel numero crescente di automatismi che ci circonda, come il dialogo possa anche avvenire tra le sole macchine. Ciò che emerge come la rischiosa confusione dei modelli digitali con l'effettiva comprensione e il controllo dei fenomeni, è la tendenza ad escludere l'intervento umano, in favore di operazioni ricorsive predefinite. Con *ricorsività* possiamo intendere quel corollario della replicabilità che consente meccanismi di *feedback* e autoregolazione, ovvero il meccanismo che può portare una macchina di imparare dalla sua esperienza — il cuore della cosiddetta *intelligenza artificiale*.

Con l'allontanamento dell'iniziativa umana, avviene un'inversione di ruoli, e la macchina passa ad influenzare la vita sociale. In questo contesto, la pervasività del calcolo arriva ad essere intesa come l'unica via alla risoluzione dei problemi urbani, nonché un ideale democratico ed estetico (Halpern, 2015). Il modo in cui gestiamo flussi di dati, sensori, attuatori, genera quei composti di elettronica e software chiamati *urban operating systems*. Questi considerano la città come un

diagramma e su questo agiscono (Marvin e Luque-Ayala, 2017). Il diagramma della città diventa la vita della città: "*Perception, understood as a capacity to consume bandwidth, come to reorganize life itself*" (Halpern, 2015, p.5). L'automazione offusca la distanza fra produzione e rappresentazione dello spazio urbano [v. capitolo 1].

Ma questo potrebbe non essere l'esito obbligato dell'adozione di un linguaggio algoritmico. Per comprendere le alternative, può essere utile introdurre una distinzione: chiamiamo qui *programma* una serie di comandi che servono a una macchina per svolgere un lavoro al posto dell'essere umano. A differenza del programma l'algoritmo è una serie di istruzioni *human readable*. L'algoritmo può quindi esistere a prescindere della sua traduzione in comandi per un computer. E non è necessariamente una forma di automazione — intesa come la riproduzione di ciò che è umano da parte di qualcosa che non lo è. In quanto schematizzazione di un processo, l'algoritmo è uno strumento di astrazione e semplificazione, e prevede la scelta del contesto di applicazione, l'adattamento attraverso la possibilità di alterare i passi, l'impiego dei risultati come riduzione funzionale.

La consapevolezza dell'uso strumentale (e non meccanico e passivo) dell'algoritmo e di tutte le forme di astrazione che gli strumenti digitali permettono di produrre, può supportare la riflessione sul nuovo punto di vista che la tecnologia ci porta ad adottare. Le rappresentazioni del mondo che con la nuova prospettiva possiamo dare saranno senz'altro inedite, dettagliate, trasversali alle categorie che impiegavamo prima. Ma dobbiamo essere in grado di riconoscere o di rendere evidente lo status di copie irrealistiche e diagrammatiche di queste rappresentazioni, e il fine specifico delle semplificazioni che incorporano. Dai diagrammi autoreferenziali della città digitalizzata come un'azienda<sup>48</sup>, possiamo riavvicinarci ai modelli come mezzi per risolvere problemi, come strumenti di progettazione.

### *Gli strumenti.*

Si possono distinguere almeno due diverse categorie di reazioni alle nuove opportunità tecnologiche. Una è la mancanza di fiducia o del pieno recepimento delle opportunità insite nei nuovi strumenti, che porta a limitarne le applicazioni e

---

<sup>48</sup> Il riferimento è ai sistemi ERP [v. sezione 1.1], individuati come i precursori della modalità di gestione digitale che è stata applicata all'amministrazione della città.

gli esiti formali agli usi precedenti<sup>49</sup>. Una seconda categoria di reazioni è *"lo stupore provocato dalla novitas"* (Gargano, 2006, p.11), in cui l'accoglienza di nuove tecniche passa per una fase "bulimica" in cui queste sono largamente applicate senza una scelta consapevole. In entrambi gli atteggiamenti, forse non consequenziali e forse in parte coincidenti, la nuova tecnologia non è subito al centro di una riflessione originale e non si può considerare equivalente all'*innovazione*. Sono casi in cui non si dà la possibilità di un intervento progettuale sul reale, o pleonasmii virtuali che possono dar vita ad avanguardie e mode, ma non determinare una rottura epistemologica (Gargano, 2006). Le ICT mostrano questa polarizzazione, essendo da un lato inserite in narrazioni che tendono a connotarle positivamente, dall'altro l'oggetto di interpretazioni critiche, come quelle che riguardano gli *urban OS*, che affermano l'impossibilità della concettualizzazione della città secondo schemi fissi e la limitata efficacia operativa di questi strumenti (Batty, 2019; Marvin e Luque-Ayala, 2017).

Mario Carpo (1998), ricostruendo la varia fortuna della standardizzazione nell'architettura europea, dimostra come il rapporto di culture diverse con uno stesso avanzamento tecnologico non sempre converge. Le teorie (i modelli del mondo) e le tecnologie, pur influenti le une sulle altre, non sono necessariamente sovrapponibili.

L'influenza degli strumenti sul pensiero e sull'interpretazione del reale in una certa epoca non deve necessariamente essere un rapporto causale diretto. E non è comunque un rapporto univoco, ma piuttosto una funzione *ricorsiva* che ammette variabili culturali<sup>50</sup>. Dunque, anche il modo in cui alcuni strumenti possono essere utilizzati cambia a seconda della rappresentazione del mondo che gli stessi contribuiscono a produrre. Comprendere e orientare i modelli — del mondo e della città — è quindi una strategia per reimpostare anche il nostro rapporto con i nuovi strumenti e per usarli consapevolmente, come e se possono esserci utili.

Carpo suggerisce un approccio per comprendere in che direzione una disciplina come l'architettura evolva al variare delle tecnologie, ovvero domandarsi: cosa scomparirà dai modelli se le tecnologie del passato sono

---

<sup>49</sup> Questa dinamica è rintracciata da Benjamin per le prime esperienze fotografiche e da Carpo per gli albori della silografia rinascimentale: in questi casi, il carattere della riproducibilità dell'opera non è stato subito riconosciuto come un aspetto di rottura rispetto alle opere precedenti (Benjamin, 2011 [1955]; Carpo, 1998).

<sup>50</sup> Nel caso della trattatistica rinascimentale ad esempio, Carpo (1988) constata come la standardizzazione della pratica architettonica sia stata recepita in maniera diversa in diversi paesi europei, a seconda di retaggi culturali in cui ha avuto minore o maggior peso la stampa. A partire da questa osservazione, si può provare a estendere il ragionamento nella direzione dei processi di aggiornamento dei modelli di città.

destinate a scomparire? E dunque, il modo di pensare al modello e di usarlo è effettivamente e ineluttabilmente condizionato dalle tecnologie attuali? Nello studio dei modelli digitali di città, va dunque considerata la possibilità che sia in atto uno "sfasamento" di tecnologia e visione del mondo.

### *Le svolte digitali in architettura: dall'astrazione alla replicazione.*

Le tecnologie digitali godono di una distintiva "*abstractive quality*" (Simon, 1996 [1968], p.18): osservando il modo in cui funzionano, poco rivelano, o nulla, delle caratteristiche dell'*hardware* — non le componenti elettroniche ad esempio, o altre caratteristiche fisiche. La possibilità di manipolare simboli con un alto livello di astrazione e generalità attraverso il computer permette imitare un gran numero di sistemi. Questa capacità è stata sfruttata anche per lo studio dei sistemi urbani, ed ha supportato lo sviluppo dei modelli digitali di città. Tuttavia, con l'avanzamento delle tecnologie e del rapporto con gli strumenti digitali, è cambiato l'interpretazione e l'uso dei modelli, nella direzione di rendere meno evidente e fondativo l'apporto dell'astrazione.

Negli anni '90, architetti e *designer* hanno avuto un ruolo pionieristico, sia teorico che pratico, per l'innovazione nel campo della modellazione digitale. Quella che Mario Carpo ha chiamato *first digital turn* (Carpo, 2013), pur caratterizzata dall'adozione di tecnologie già esistenti — dalle macchine a controllo numerico, già sviluppate già dagli anni '40, ai software CAD economici nati negli anni '80 — ha condotto a una nuova coscienza della capacità di adattamento degli strumenti digitali. All'uso del computer per emulare e ottimizzare la produzione meccanica di massa, è subentrato l'ideale — non solo estetico e progettuale, ma anche commerciale — della *mass customization*.

Secondo Patrik Schumacher "*if we look at the history of parametricism, in fact it's the history of the whole evolution of architecture*" (Schumacher, 2011, p.79). In effetti, si possono riconoscere al progetto di architettura in generale — nonché al *design* e alle *scienze dell'artificiale* allargando ulteriormente lo sguardo — dei caratteri che il progetto parametrico esalta con il supporto dell'automazione. Tra questi caratteri spiccano l'astrazione e l'adattabilità. Il primo è espresso negli aspetti matematico-analitici del progetto a controllo numerico; nel progetto, più in generale, l'astrazione abilita la costruzione dei modelli, l'uso della forma, la sintesi e la semplificazione della complessità del reale. L'adattabilità è invece deputata alla *customizzazione* dei parametri, e nel progetto è l'aspetto che determina la validità di una soluzione o la sua correzione e ottimizzazione.

*"Architectural concepts are expressed as generative rules so that their evolution and development can be accelerated and tested by the use of computer models. Concepts are described in a genetic language which produces a code script of instructions for form-generation. Computer models are used to simulate the development of prototypical forms which are then evaluated on the basis of their performance in a simulated environment. Very large numbers of evolutionary steps can be generated in a short space of time and the emergent forms are often unexpected."* (Frazer, 1995, in Carpo, 2013, p.53)

Tuttavia, le criticità degli *urban operating systems* chiamano in causa un nuovo approccio prevalente agli strumenti digitali, caratteristico di una stagione più recente che Carpo, osservando in particolare il mondo dell'architettura, ha chiamato *second digital turn* (Carpo, 2017).

La seconda svolta digitale, associata soprattutto all'ultimo decennio, corrisponde alla diffusione delle possibilità di calcolo e di archiviazione che oggi ci permettono di parlare di *big data*, ovvero informazioni grezze ed estese, che non richiedono a priori tassonomie, sintesi o riduzioni matematiche per essere registrate e consultate. Le operazioni di ricerca ed elaborazione possono essere eseguite con metodi "di forza bruta"<sup>51</sup>, ovvero usando il computer per scorrere attraverso ogni singolo dato, senza *pattern* precostituiti. Carpo riassume questo approccio attraverso lo slogan coniato da Google "*search don't sort*" (Carpo, 2017, p.23). La qualità astrattiva degli strumenti digitali è diventata secondaria rispetto alla capacità di replicazione del reale. Già nel 2008, il direttore della ricerca di Google Peter Norvig, parafrasando il celebre aforisma attribuito a George Box<sup>52</sup>, ha affermato: "*All models are wrong, and increasingly you can succeed without them*" (citato in Anderson, 2008).

L'ambiguità dei modelli digitali di città denunciata da geografi e *urban theorist* — la tendenza alla sostituzione del mondo con la sua rappresentazione — può essere ricondotta a questa capacità di replicare informazioni con grande velocità e precisione. L'utilità del modello, inteso come contenitore organizzato di ciò che sappiamo sull'oggetto riprodotto, sfuma. Il dettaglio della

---

<sup>51</sup> Il termine *brute-force* è comunemente usato in *computer science* per descrivere i metodi che prevedono l'analisi di ogni caso o combinazione possibile (o più in generale, una grande quantità di calcolo) per produrre il risultato (una dimostrazione, o la decrittazione di un messaggio). Gli avanzamenti delle tecniche connesse sono sostenuti dalle crescenti capacità del calcolo digitale. Si veda *Wikipedia*, s.v. "Brute force". [https://en.wikipedia.org/wiki/Brute\\_force](https://en.wikipedia.org/wiki/Brute_force) (consultato il 12/04/21).

<sup>52</sup> "Essentially, all models are wrong, but some are useful". Box G.E.P, Draper N.R. (1987). *Empirical model-building and response surfaces*. Wiley, p.424.

rappresentazione cresce, e con esso la possibilità di trovare un posto noto e preciso nella versione digitale ad ogni carattere misurabile. La fiducia nella tecnologia induce l'assunto della completa comunicabilità del mondo, che Halpern chiama "*communicative objectivity*" (Halpern, 2015, p.139).

La condizione descritta, che ad oggi perdura, è stata anche detta *postdigitale*<sup>53</sup>, a indicare non una rottura con ciò che è stato, ma lo spostamento del digitale dalla sfera della novità a quella dell'ordinario. In questo caso possiamo pensare all'ultima svolta digitale come all'inizio di un'assuefazione, per la quale "*the distinctions between real and virtual, original and copy, or abstract and concrete are degraded, confused, and ultimately erased*" (Abrons, 2017, p.69).

### *Note sulle svolte digitali fra modello architettonico e modello urbano.*

Alcuni aspetti nodali del racconto impostato da Carpo sulle *svolte digitali* in architettura sono considerati meno rilevanti in questa tesi. In particolare, Carpo evidenzia come la prima *digital turn*, proprio attraverso il parametricismo — legato al concetto di *objectile*<sup>54</sup> — abbia messo in discussione i principi di autorialità che l'architettura moderna si è attribuita a partire dal Rinascimento (cfr. Gargano, 2006). La definizione dell'oggetto parametrico e la sua successiva *customizzazione* generano un processo di "*layered authorship, or «split agency»*", in cui all'autore primario si sovrappongono tutti coloro che modificano l'oggetto o ne specificano i parametri (Carpo, 2017, p.140). Nonostante l'architettura sembri aver limitato gli esiti pratici di queste premesse di avanguardia — per conservare invece la figura accentratrice del *designer* — il concetto ha avuto ripercussioni ampie, che ad esempio coinvolgono lo sviluppo *open source* nell'informatica, ovvero la progettazione collaborativa di software<sup>55</sup>. Anche un'evoluzione stilistica ha segnato le due fasi, con il passaggio dalla predilezione per i segni fluidi, prodotti dalla definizione analitica delle curve nello spazio, alla frammentazione

---

<sup>53</sup> Abrons chiarisce che "*the post in postdigital does not imply a time after or beyond the digital, but rather is understood as both a continuation and interrogation of what we have known as the digital to date*" (Abrons, 2017, p.68). Invero, Abrons esprime un punto di vista in parte provocatorio in parte ottimistico rispetto alle potenzialità, soprattutto artistiche, dell'interpretazione del digitale come nuova forma di materialità.

<sup>54</sup> Teorizzato da Gilles Deleuze e Bernard Cache, il concetto di *objectile* esprime "*a class or family of object, but no object in particular*", ovvero un oggetto generico (Carpo, in Lorenzo-Eiroa e Sprecher, 2013; cfr. Perrella, 1998, in Carpo, 2013, p.149).

<sup>55</sup> Inoltre, come riconoscono Bruzelius et al. (2018, p.102), la possibilità di un'autorialità stratificata influenza gli stessi aspetti di condivisione della conoscenza basati sulla modellazione dello spazio individuati nel percorso evolutivo dei modelli di città: "*Technology and its benefits drive us to work together, and this will in time change notions of authorship and individual research*".



in *voxel*<sup>56</sup> attraverso la ricerca della forma con "*process[es] of heuristic (not mathematical) optimization*", ovvero sequenze di prove ed errori ripetute con straordinaria frequenza grazie all'accresciuta efficienza dei computer (Carpo, 2017, p.40).

Gli aspetti citati possono senz'altro essere estesi dal *focus* sull'architettura di Carpo alla modellazione digitale di scala urbana. Ad esempio, il progetto collaborativo e il *crowdsourcing* hanno un ruolo chiave nell'ampliamento e nell'accrescimento dei modelli urbani, e sono una componente abilitante di molte applicazioni degli *urban digital twin* [v. sezione 4.2: DT.6]. Anche i caratteri stilistici, nella profonda connessione con le tecniche usate per produrre il modello, sono rilevanti per la città digitale: il passaggio dall'astrazione controllata (la curva analitica) all'approssimazione infinitesimale (l'accumulazione di dati di precisione crescente) è parallelo al prevalere di un "*iconic and empirical approach*" sul "*symbolic and analytical approach*" nella modellazione della città, una tendenza evidenziata all'inizio del millennio e agli albori degli attuali modelli informativi urbani (Shiode, 2001, p.264; cfr. Batty *et al.*, 2000).

Questi temi, qui solo accennati, sono sicuramente rilevanti per sviluppi futuri del lavoro. Entro lo scopo della tesi, resta invece nodale il discorso sviluppato da Carpo sul modo di riferirsi al reale e di intervenire attraverso gli strumenti digitali evoluti negli ultimi trent'anni, e quindi, in particolare, il processo che vede ridursi l'importanza dell'astrazione come riduzione necessaria.

---

<sup>56</sup> Il termine *voxel* contrae *volume* e *pixel*, e indica le unità volumetriche minime in sistemi basati su una griglia ortogonale. Si veda *Wikipedia*, s.v. "Voxel". <https://en.wikipedia.org/wiki/Voxel> (consultato il 12/04/21).

---

## 2.2. Il modello urbano come interfaccia.

### *La città digitale e i nuovi strumenti.*

Gli inediti mezzi di rappresentazione della città, contesi tra entusiasmi incontrollati e timore della *scatola nera*, richiedono di alterare consapevolmente il punto di vista sull'oggetto e sullo scopo del loro impiego. Come suggerisce [Batty \(2016b\)](#), lo stesso concetto di *big data*, oltre a indicare caratteri dimensionali quali volume, velocità e varietà, dovrebbe essere improntato alla rilevanza dei dati, che può riguardare "*a wider context involving other data*" e dunque i possibili usi che si possono fare di strumenti e informazioni. Secondo [Carpo \(1998\)](#), il pieno e immediato recepimento delle opportunità insite nei nuovi strumenti non è prevedibile con certezza e ciò può portare a derive incontrollate, o al contrario ad arenare le interpretazioni, le pratiche e gli esiti formali su usi consolidati. Anche l'adozione diffusa può non corrispondere alla definizione di criteri d'uso coerenti con le caratteristiche degli strumenti.

Gli strumenti che si stanno diffondendo grazie alla miniaturizzazione delle componenti dei computer e allo sviluppo della potenza di calcolo — in particolare dei motori grafici ([Goodfellow et al., 2016](#)) — stanno cominciando a interagire strettamente con la forma dello spazio urbano. I dispositivi mobili sono in grado di catturare e registrare caratteri spaziali di grande dettaglio. Elementi e forme possono essere riconosciuti automaticamente e tracciati in tempo reale nelle immagini di una telecamera. Le informazioni digitali possono essere sovrapposte a mappe, a modelli o al mondo reale, permettendo a un utente di localizzarsi con precisione in uno spazio di dati e servizi.

La retorica del controllo completo riguarda da vicino la raccolta e la gestione dei dati fino alla scala architettonica. I modelli esaltano il realismo della resa grafica, come nella Singapore digitale costruita da Dassault [[sezione 4.2: DT.3](#)]; sono dettagliati oltre il visibile, come nel caso in cui si producono modelli di rilievo con le tecniche di *laser scanning*; sono sostitutivi dell'intervento del progettista, come promettono i sistemi di *clash detection* dei sistemi di impianti; sono multidimensionali, tanto che per il BIM si parla anche di 8 dimensioni (BIM 8D) — con misure dell'oggetto architettonico che vanno dallo spazio al tempo, ai costi, al rischio e oltre ([Kamardeen, 2010](#)).

Sono queste le rappresentazioni che si sostituiscono al mondo nel lavoro di architetti e progettisti urbani (*cf.* [Farinelli, 2003](#)). Bisogna dunque indagare quale

sia il significato che attribuiamo ai modelli e alle loro parti, e verificare quale sia e quale possa essere la loro connessione con quelle cose che si intende trasformare — e non solo riprodurre.

Alcune aree tecnologiche coinvolte nella generazione dei modelli urbani sono particolarmente rilevanti per indirizzare una riflessione: i modelli informativi e l'*intelligenza artificiale* (AI). Per modelli informativi si intendono in un senso ampio *building information modeling* (BIM) (Volk *et al.*, 2014; Apollonio *et al.*, 2012) e *geographic information system* (GIS) (Soler *et al.*, 2017; Cerutti *et al.*, 2015; Apollonio *et al.*, 2012). In entrambi i casi gli strumenti producono modelli spaziali ai quali è possibile associare informazioni (e documenti) attraverso una base di dati connessa ai singoli elementi che li compongono. Tuttavia, i modelli generati dai due sistemi si riferiscono scale e a livelli di dettaglio molto diversi per l'organizzazione dei dati, limitando attualmente le possibilità di scambio di informazioni secondo linguaggi comuni (Tobiáš, 2015; Hor *et al.*, 2016).

Gli avanzamenti nel campo dell'AI, e più nello specifico il *deep learning* hanno visto negli ultimi anni un rapidissimo sviluppo. L'efficacia di questi algoritmi per i compiti della *computer vision*, ovvero l'interpretazione di immagini e oggetti tridimensionali, insieme con la diffusione di sistemi di AI per i dispositivi mobili, stanno alimentando una crescente interazione con lo spazio urbano, sebbene gli studi specifici siano ancora limitati (Cordts *et al.*, 2016; Stathopoulou e Remondino, 2019; Ma *et al.*, 2019).

Comune a questi strumenti è il problema della classificazione degli elementi architettonici e urbani. Infatti, in molti casi, non è chiaro come le categorie usate siano scelte e se e come possano essere modificate per adattare il modello a variazioni del contesto o a nuovi scopi<sup>57</sup>. Cosa rappresentano dunque gli standard di organizzazione dei dati nella modellazione informativa (attraverso le quali associamo alle rappresentazioni spaziali altre metriche e documenti)? Cosa vuol dire insegnare all'intelligenza artificiale a classificare l'architettura? Quale comprensione abbiamo dei limiti e delle potenzialità delle astrazioni incorporate in questi modelli di gestione dell'informazione spaziale?

---

<sup>57</sup> Ad esempio, una posizione su come l'architettura vada classificata è assunta implicitamente dalle rappresentazioni che hanno aggiornato il *computer-aided design* (CAD), ovvero i modelli BIM. Questi strumenti, egemoni nella pratica professionale, stanno diffondendo una struttura semantica nata nel mondo delle costruzioni per far lavorare assieme i progettisti, i produttori di elementi costruttivi e il cantiere. La stessa struttura è spesso usata, senza sostanziali alterazioni, in contesti estremamente diversi come nella digitalizzare la città costruita o nello studio dei beni architettonici storici. È utile indagare come questi schemi siano assunti in ambiti diversi da quello di origine e se la consapevolezza dei limiti imposti dallo strumento sia in grado di generare interventi su di esso, o come piuttosto vincoli gli esiti della sua applicazione.

### *Il modello come interfaccia.*

Farinelli (2006) associa la sostituzione della riproduzione all'originale — piuttosto che la confusione dei due — alla violenza del *mapping*, all'uccisione della *physis* e della sua dinamicità da parte di chi abbia ri-prodotto lo spazio, da Anassimandro<sup>58</sup> in poi. La difficoltà nell'individuare la separazione tra ciò che è naturale e ciò che è artificiale è incrementata da una contemporaneità in cui l'artificiale è decisamente prevalente<sup>59</sup>: "*la zona creata artificialmente — noi diciamo oggi: la zona climatizzata — offre una situazione atmosferica privilegiata*" (Sloterdijk, 2006 [2002], p.26). Non sembra così improbabile che la città digitale, la quale è un modo di rappresentare e comprendere il fenomeno urbano, possa essere fraintesa per una riproduzione con carattere puramente descrittivo e analitico, o per una parte del fenomeno stesso. Nel 1976 Michael Batty affermava che un modello di simulazione è un esperimento basato su una teoria ed è dunque nulla più che ricerca (Devisch, 2008). La situazione è cambiata: "*If [...] the model is a complete mirror image, which is the assumed definition of a digital twin, then it might be argued that the digital twin is no longer separate from the system, but in fact is the system itself*" (Batty, 2018, p.818).

L'intento del lavoro non è distinguere i fenomeni antropici da quelli naturali — i primi dei quali possono ben essere intesi come un sottoinsieme dei secondi, un principio esplicitato dalla *science of cities* e dagli approcci analitici allo studio della forma urbana. Piuttosto, si vuole comprendere che tipo di conoscenza sia veicolata dalla componente *virtuale* della città contemporanea.

Una scienza della città digitale può essere considerata una *scienza dell'artificiale* secondo la definizione di Herbert A. Simon (1996 [1968]). Diversamente dalla scienza naturale, che studia i caratteri materiali dell'oggetto e il contesto in cui esso agisce, la scienza dell'artificiale si occupa prevalentemente di un terzo aspetto: lo scopo. Dovrebbe dunque avere a che fare con *come* gli oggetti artificiali si adattino in funzione di una necessità stabilita dall'uomo. Seguendo questa impostazione, la tesi prende in analisi i modelli digitali che, oltre a rappresentare lo spazio costruito, sono capaci, direttamente o indirettamente, di modificarlo. Questi oggetti, dal punto di vista delle scienze naturali, sarebbero

---

<sup>58</sup> La figura di Anassimandro è presentata da Farinelli come simbolo delle origini della cartografia, perché primo, per tradizione, ad aver voluto (*osato*) rappresentare l'intero mondo abitato, o *ecumene* (Farinelli, 2003, p.31).

<sup>59</sup> E non solo nell'ambiente urbano. Ad esempio, anche il paesaggio agrario mostra "*quella forma che l'uomo, nel corso ed ai fini delle sue attività produttive agricole, coscientemente e sistematicamente imprime al paesaggio naturale*". Sereni E. (2003). *Storia del paesaggio agrario italiano*. Laterza, p.29. [Prima pubblicazione 1961.]

composti da elettronica, infrastrutture di supporto ed elementi della stessa città materiale. Dal punto di vista delle *scienze dell'artificiale*, gli stessi sono invece considerati "interfacce", o punti di incontro tra la struttura degli strumenti (il loro contenuto materiale e tecnico: i dispositivi, le reti, i codici, l'organizzazione delle parti) e il contesto in cui sono applicati e su cui operano<sup>60</sup>. Le tecnologie digitali si prestano particolarmente alla realizzazione di interfacce, e i modelli digitali di città assumono questo ruolo. L'intento della tesi è studiare la forma, non considerata come aspetto sostanziale del modello o della stessa città fisica, ma in quanto caratteristica dell'interfaccia, legata alla capacità del modello di essere riconfigurato e *adattarsi* al variare del contesto e dello scopo per cui è usato.

Nell'approccio delle scienze naturali, l'interesse verso l'oggetto ruoterebbe attorno le possibilità di *analisi* che consente. Diversamente, qui si vuole indagare il modello come prodotto e veicolo di *sintesi*, o di astrazione e semplificazione funzionale. E questo interesse appartiene propriamente al *designer*, il quale "*is concerned with how things ought to be — how they ought to be in order to attain goals, and to function*" (Simon, 1996 [1968], p.5), ed è quindi orientato alla comprensione degli aspetti prescrittivi e operativi dello strumento.

### *Simulazioni.*

"*How can a simulation tell us anything that we do not already know?*" (Simon, 1996 [1968], p.14). Simon si pone questa domanda indagando il rapporto tra la conoscenza di un fenomeno che un uomo può ottenere e la possibilità di affidare a un computer la generazione automatica di implicazioni e previsioni. Nel contesto del *post-digitale*, la domanda sembra particolarmente appropriata a riflettere sugli *urban operating systems*: se la replica digitale è eccezionalmente fedele al reale, come si produce nuova conoscenza? Se pure l'ampliamento dell'archivio di conoscenze particolari è un *task* su cui possiamo mettere a lavorare una macchina elettronica per un tempo indefinito, come possiamo usare questi risultati?

La sintesi è davvero un passaggio che ha smesso di essere necessario? Diverse osservazioni suggeriscono che una semplificazione debba comunque avvenire, almeno per il passaggio dalla totalità dei dati alla nostra comprensione. I limiti della capacità umana di immagazzinare informazioni sono stati oggetto di riflessione fin dalle prime esperienze della cibernetica. Quel che può essere memorizzato e conosciuto non può corrispondere alla totalità dei singoli stimoli

---

<sup>60</sup> Gli uni e l'altro sono chiamati *inner* e *outer environment* da Simon (1996 [1968], p.6).

che siamo in grado di ricevere, e ne è un chiaro esempio il senso della vista: nonostante l'occhio risponda alla luce attraverso milioni di fotorecettori<sup>61</sup>, possiamo memorizzare solo concetti più semplici, mentre ignoriamo ciò che non ci serve (Halpern, 2015).

Ma anche entro le operazioni che intendiamo affidare alla tecnologia, il bisogno di sintesi non sembra superato. O almeno, questo è quanto emerge dalla considerazione di una classe di tecnologie, quella dell'*intelligenza artificiale*, cui si rimette, o si pianifica di delegare al più presto, la collezione e l'accesso ai *big data* — per quanto ampi/dettagliati siano — anche nello studio dello spazio costruito (Wan *et al.*, 2019; Chaillou, 2019). Da una parte i più recenti avanzamenti nel campo si presentano come la *black box* per antonomasia — che assume come input moltissime informazioni e restituisce un risultato senza rivelare molto del processo che lo produce — e per questo gli algoritmi sono ottimizzati con approcci prevalentemente empirici<sup>62</sup>. Dall'altro lato, il *deep learning* (la classe di modelli di AI intorno a cui ruotano i principali avanzamenti nel campo) è fondato sulla capacità della macchina di imparare "*complicated concepts by building them out of simpler ones*" (Goodfellow *et al.*, 2016, p.1).

Gli ultimi tre secoli di avanzamenti delle scienze naturali ci hanno insegnato che la simulazione di un fenomeno è tanto più semplice quanto più ci permettiamo di astrarre (Simon, 1996 [1968]). Ciò ha permesso di comprendere molto dei comportamenti meccanici e chimici della materia prima di conoscere le molecole, delle molecole prima degli atomi, e di questi prima di ogni teoria sulle particelle elementari. L'importanza di questa modalità di apprendimento si rivela ad esempio nell'usare ponti e aeroplani anche senza aver verificato la correttezza delle teorie sulle particelle subatomiche.

Anche le macchine, allo stato attuale di tecnologie e teorie, non possono fare a meno di questa sistemazione gerarchica della conoscenza. Molti strumenti di AI hanno bisogno che l'operatore umano fornisca direttamente le categorie da utilizzare, ovvero il modo di semplificare e schematizzare le informazioni — in questi casi si parla di *supervised learning*. Altri strumenti sanno inferire

---

<sup>61</sup> Nature (2020). *Nanoscience: Mimicking the human eye*. Nature Asia. <https://www.natureasia.com/en/research/highlight/13328> (consultato il 12/04/21).

<sup>62</sup> In molti casi, ciò avviene ereditando strumenti che hanno ottenuto buoni risultati nello stesso ambito di applicazione o in uno con alcune caratteristiche analoghe. Ad esempio, le cosiddette tecniche di *transfer learning* consentono di usare delle *reti neurali* per il riconoscimento di immagine già allenate con dei *data set* diversi dall'applicazione che si sta sviluppando; la tecnica richiede comunque che l'AI sia addestrata a riconoscere il nuovo insieme di oggetti, ma l'ottimizzazione del modello sarà già rapida in termini di tempo e sforzo computazionale (Goodfellow *et al.*, 2016; Ma *et al.*, 2019; Andrianaivo *et al.*, 2019).

autonomamente la divisione in categorie dei materiali che analizzano — *unsupervised learning* (Goodfellow *et al.*, 2016). Ma trattandosi di una semplificazione, il risultato non potrà essere sempre adeguato: spetta ancora a un essere umano scegliere quale strumento adottare, o adattare gli strumenti al contesto.

Come noi, ad oggi anche la macchina non è in grado di affrontare ogni problema complesso come somma del completo insieme delle sue componenti elementari. Quella che, in un sistema computerizzato in azione, appare come complessità, è in realtà il riflesso della complessità di un ambiente esterno, a cui il software può essere adattato, utilizzando, di solito, poche elementari istruzioni, regole e categorie. Dunque, le capacità astrattive dei computer non sono mai state un compromesso basato su limiti tecnologici, e sono tutt'ora il fulcro del loro funzionamento. Tuttavia, i *big data* hanno distolto l'attenzione da questo aspetto e ridotto la nostra capacità di riconoscere il ruolo della semplificazione, e quindi di calibrare gli strumenti per gli usi che potremmo farne.

### *Il modello e la scienza del design.*

*"Everyone designs who devises courses of action aimed at changing existing situations into preferred ones."* (Simon, 1996 [1968], p.111)

Nel processo di minuziosa duplicazione della città, risulta sempre meno chiaro quali informazioni siano rilevanti, in quali situazioni lo siano, e perché. Marvin e Luque-Ayala (2017) ad esempio, discutono come i servizi digitali nati per la gestione d'impresa siano passati a controllare la città senza che il cambio di contesto sia stato adeguatamente discusso. La *communicative objectivity* non cancella schemi e categorie per mostrare qualcosa di più *vero*<sup>63</sup>. Le astrazioni — limiti, semplificazioni, categorizzazioni, approssimazioni — sono inevitabili, ma non sono manifeste: la pervasività dei mezzi tecnici, l'automazione, la distanza tra l'utenza e l'artefice (nella complessità crescente degli strumenti, esploso in una molteplicità di figure), la persuasività di rappresentazioni precise (ma non necessariamente accurate) contribuiscono alla diffusione non controllata di interpretazioni della realtà comunque parziali e temporanee.

---

<sup>63</sup> Laura Kurgan pone il problema della rappresentazione digitale contemporanea proprio nei termini di un alterato concetto di verità: "[truth] is intimately related to resolution, to measurability, to the construction of a reliable algorithm for translating between representation and reality" (Kurgan, 2013, p.12).

Se l'obiettivo della digitalizzazione è la corrispondenza univoca tra originale e copia, la varietà non è ammissibile (*cf.* Simon, 1996 [1968], p.130). Quando invece il modello ammette l'incertezza, diventa un mezzo di simulazione di scenari plausibili, permette di creare varianti, confrontarle, adattarle a diversi contesti ipotizzati o previsti. Il modello la cui parzialità è dichiarata è uno strumento di *design* ed è in grado aggiungere conoscenza alla puntuale documentazione del reale.

L'approccio alle *scienze dell'artificiale* proposto da Simon permette di reimpostare il problema dell'AI come *black box*. L'approccio del *designer*, rispetto a quello delle scienze naturali, non richiede una conoscenza dettagliata dell'"*inner environment*" dell'oggetto di studio (Simon, 1996 [1968], p.8). La conoscenza dello scopo per cui l'oggetto è costruito permette di predirne il comportamento al variare delle condizioni dell'ambiente esterno — e quindi di suggerire alterazioni, nuovi interventi di progettazione. Da qui, l'interesse per tecnologie avanzate — i cui processi di elaborazione sono a volte inintelligibili agli stessi specialisti — non porta la ricerca verso un approfondimento tecnico-informatico, ma verso lo studio dell'obiettivo per cui gli oggetti digitali sono costruiti, del loro rapporto con i contesti di applicazione.

Il cambio di prospettiva sul ruolo della città digitale permette di considerare la forma della città "digitale" non come il riferimento a un mondo esterno, definibile una volta per tutte, ma come un processo che produca azione — la trasformazione, l'intervento sulla città. Rinunciando all'idea che la crescita del dettaglio e la quantità di dati possa avvicinare all'oggetto "reale", si può costruire un'epistemologia della città basata sul modo di operarvi. L'errore in cui l'archivio induce è che l'archivio stesso sia più vicino alla città esistente che non al modo di pensare alla città (*cf.* Halpern, 2015, p.56).

Richiamando il modello digitale alla dimensione del *design* — nell'ampio senso del *design thinking*, oltre che in quello di progetto architettonico-urbano — lo si vuole allontanare dall'idea di uno strumento (a) analitico nel modo di riprodurre e descrivere la città; (b) autonomo nel suo sviluppo, in particolare con l'acquisizione di nuovi dati e nuovo dettaglio; (c) deterministico nei suoi effetti sul costruito. Inoltre, si intende indicare un indirizzo metodologico per la comprensione e il controllo di questo strumento, un indirizzo che coinvolge direttamente l'architetto. Il modello, come soluzione di *design*, interpreta il reale, è *man-made*, e va valutato empiricamente nella sua adattabilità a degli obiettivi e a un contesto (*cf.* Cross, 1982; Simon, 1996 [1968]). Con questo approccio epistemologico si può specificare lo scopo del modello e la sua sensibilità agli errori.



## Riferimenti bibliografici.

- Abrons E.** (2017). For Real. *Log*, 41(Fall 2017).
- Anderson C.** (2008, 23 giugno). The End of Theory: The Data Deluge Makes the Scientific Method Obsolete. *Wired*. <https://www.wired.com/2008/06/pb-theory/> (consultato il 10/04/21).
- Andrianaivo L.N., D'Autilia R., Palma V.** (2019). Architecture recognition by means of convolutional neural networks. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-2-W15, 77–84.
- Apollonio F.I., Gaiani M., Benedetti B.** (2012). 3D reality-based artefact models for the management of archaeological sites using 3D GIS: a framework starting from the case study of the Pompeii Archaeological area. *Journal of Archaeological Science*, 39(5), 1271–1287.
- Batty M.** (2016). Big Data and the City. *Built Environment*, 42(3), 321–337.
- Batty M.** (2018). Digital twins. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, 45(5), 817–820.
- Batty M.** (2019). A map is not the territory, or is it? *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, 46(4), 599–602.
- Batty M., Chapman D., Evans S., Haklay M., Kueppers S., Shiode N., Smith A., Torrens P.M.** (2000). *Visualizing the city: communicating urban design to planners and decision-makers*.
- Benjamin W.** (2011). *L'opera d'arte nell'epoca della sua riproducibilità tecnica*. Einaudi. [Das Kunstwerk im Zeitalter seiner technischen Reproduzierbarkeit. Prima pubblicazione 1955.]
- Bruzelius C., Giordano A., Giles L., Repola L., De Feo E., Basso A., Castagna E.** (2018). L'eco delle pietre: history, modeling, and GPR as tools in reconstructing the choir screen at Sta. Chiara in Naples. *Archeologia e Calcolatori*, Supplemento 10, 2018, 81–103.
- Carpo M.** (1998). *L'architettura dell'età della stampa*. Jaca Book.
- Carpo M.** (2013). *The digital turn in architecture 1992-2012*. John Wiley & Sons.
- Carpo M.** (2017). *The second digital turn: design beyond intelligence*. MIT press.
- Cerutti E., Noardo F., Spanò A.** (2015). Architectural Heritage Semantic Data Managing and Sharing in GIS. *Proceedings of the 1st International Conference on Geographical Information Systems Theory, Applications and Management*, 121–128.
- Chaillou S.** (2019, 24 febbraio). AI & Architecture. *Towards Data Science*. <https://towardsdatascience.com/ai-architecture-f9d78c6958e0> (consultato il 27/04/21).
- Cordts M., Omran M., Ramos S., Rehfeld T., Enzweiler M., Benenson R., Franke U., Roth S., Schiele B.** (2016). The Cityscapes Dataset for Semantic Urban Scene Understanding. *2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 3213–3223.
- Cross N.** (1982). Designerly ways of knowing. *Design Studies*, 3(4), 221–227.
- Devisch O.** (2008). Should Planners Start Playing Computer Games? Arguments from SimCity and Second Life. *Planning Theory & Practice*, 9(2), 209–226.
- Farinelli F.** (2003). *Geografia: un'introduzione ai modelli del mondo*. Einaudi.
- Gargano M.** (2006). *Forma e materia: ratiocinatio e fabrica nell'architettura dell'età moderna*. Officina.
- Goodfellow I., Bengio Y., Courville A.** (2016). *Deep Learning*. MIT Press.
- Halpern O.** (2015). *Beautiful Data: A History of Vision and Reason since 1945*. Duke University Press.
- Hor A.-H., Jadidi A., Sohn G.** (2016). BIM-GIS Integrated Geospatial Information Model Using Semantic Web And RDF Graphs. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, III-4, 73–79.
- Kamardeen I.** (2010). 8D BIM modelling tool for accident prevention through design. In Egbu C. (a cura di), *Procs 26th Annual ARCOM Conference* (pp. 281–289).

Association of Researchers in Construction Management.

**Kurgan L.** (2013). *Close up at a distance: mapping, technology, and politics*. Zone Books.

**Lorenzo-Eiroa P., Sprecher A.** (2013). *Architecture in Formation: On the Nature of Information in Digital Architecture*. Routledge.

**Ma L., Liu Y., Zhang X., Ye Y., Yin G., Johnson B.A.** (2019). Deep learning in remote sensing applications: A meta-analysis and review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 152, 166–177.

**Marvin S., Luque-Ayala A.** (2017). Urban Operating Systems: Diagramming the City: Urban Operating Systems. *International Journal of Urban and Regional Research*, 41(1), 84–103.

**Shiode N.** (2001). 3D urban models: Recent developments in the digital modelling of urban environments in three-dimensions. *GeoJournal*, 52(3), 263–269.

**Simon H.A.** (1996). *The sciences of the artificial*. MIT Press. [Prima pubblicazione 1968.]

**Schumacher P.** (2011). Parametricism And the Autopoiesis Of Architecture. *Log*, 21(Winter 2011), 19.

**Sloterdijk P.** (2006). *Terrore nell'aria*. Meltemi. [*Luftbeben. An dei Quellen des Terrors*. Prima pubblicazione 2002.]

**Soler F., Melero F.J., Luzón M.V.** (2017). A complete 3D information system for cultural heritage documentation. *Journal of Cultural Heritage*, 23, 49–57.

**Stathopoulou E.-K., Remondino F.** (2019). Semantic photogrammetry – Boosting image-based 3d reconstruction with semantic labeling. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-2/W9, 685–690.

**Tobiáš P.** (2015). An Investigation into the Possibilities of BIM and GIS Cooperation and Utilization of GIS in the BIM Process. *Geoinformatics FCE CTU*, 14(1), 65.

**Volk R., Stengel J., Schultmann F.** (2014). Building Information Modeling (BIM) for existing buildings — Literature review and future needs. *Automation in Construction*, 38, 109–127.

**Wan L., Nochta T., Schooling, J. M.** (2019). Developing a City-Level Digital Twin – Propositions and a Case Study. *International Conference on Smart Infrastructure and Construction 2019 (ICSIC)*, 187–194.



Capitolo 3.  
**La forma della città come  
strumento di interpretazione.**

---

### 3.1. Modelli numerici e morfologia.

#### *Archivi e magazzini.*

Negli ultimi due decenni, i modelli digitali di città hanno accolto e intrecciato una grande varietà di dati e funzioni. La *maquette numerique* [v. sezione 1.2] ha trovato fruitori oltre l'ambito della visualizzazione, dello studio e del progetto della forma urbana, ed è diventata uno strumento che intercetta la complessità di informazioni che documentano processi di urbanizzazione inediti e in rapida evoluzione (Biljecki *et al.*, 2015; Fleischmann *et al.*, 2020).

I modelli di città sono parte delle *magnifiche sorti e progressive* promesse dall'accumulazione di *big data*. L'idea del *digital twin* presuppone che la stessa esistenza dei dati sia sufficiente a produrre conoscenza e soluzioni, e che la loro efficacia aumenti con la quantità, la velocità di trasmissione e la varietà delle fonti — cioè con la verosimiglianza del modello.

Più in generale, le espressioni dell'ottimismo verso le possibilità offerte dai dati hanno pronosticato — non senza intenti di provocazione — un futuro in cui è radicalmente ridimensionato il ruolo della teoria, o di una interpretazione dei fenomeni che ne produca una comprensione generale condivisibile. È il caso di Chris Anderson (2008), che in un celebre articolo della rivista Wired, che allora dirigeva, ha messo in corrispondenza il "diluvio di dati" con la fine della teoria e del metodo scientifico, e dunque anche della necessità di un *modello* a precedere il momento sperimentale. Il concetto è ribadito da Carpo (2017)<sup>64</sup> che spiegare come l'avanzamento della potenza di calcolo renda trascurabile lo sforzo di percorrere (automaticamente) l'intero archivio di informazioni disponibili, senza il bisogno di sistemare i contenuti in scomparti riconoscibili dall'utente. Diventa desueta ogni tassonomia — inutilmente legata a un modo *umano* di concepire e ordinare gli oggetti, che non produrrebbe vantaggi per le tecnologie automatiche di archiviazione e reperimento delle informazioni.

*"[...] in our houses we could keep potatoes and socks and books and fish in the same drawers, or indeed anywhere. We would not need to remember where we put things, or where things are, because whenever we need them we could simply Google them in physical space — and see the result on a screen, on a wristwatch, or through augmented reality eyewear." (Carpo, 2017, p.33)*

---

<sup>64</sup> Con il riferimento al *claim* di Google "search don't sort" [v. sezione 2.1].



**Figura 15.** Magazzino Amazon. Lo scenario è costruito su logiche di organizzazione dei materiali che non permettono immediatamente di leggere le categorie e gli schemi sottesi. Il risultato è comunque il prodotto di un modello, o di un insieme di regole, che in questo caso considerano le possibilità tecniche legate ai sistemi di calcolo (per stabilire la collocazione degli oggetti e per reperirli secondo criteri di efficienza) e ai dispositivi digitali mobili (per supportare la ricerca da parte di addetti e addette). Foto: Álvaro Ibáñez, [CC BY 4.0](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Amazon_Espa%C3%B1a_por_dentro_(San_Fernando_de_Henares).JPG), [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Amazon España por dentro \(San Fernando de Henares\).JPG](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Amazon_Espa%C3%B1a_por_dentro_(San_Fernando_de_Henares).JPG).

Adottando le stesse capacità tecniche Amazon gestisce i suoi magazzini (Baraniuk, 2015; O'Connor, 2013). Tramite l'interfaccia dei dispositivi mobili, gli algoritmi indirizzano gli addetti agli oggetti sul più breve percorso per raggiungerli. I prodotti non sono organizzati per categorie, ma vengono disposti sugli scaffali con una logica che allo sguardo umano può apparire casuale. Eppure, la stessa indifferenza alle comuni classificazioni supporta l'efficienza del sistema: l'addetto può individuare più facilmente uno specifico tipo di cavo elettrico tra oggetti molto diversi — libri, scarpe, giocattoli... — piuttosto che tra innumerevoli varianti di prodotti simili [figura 15].

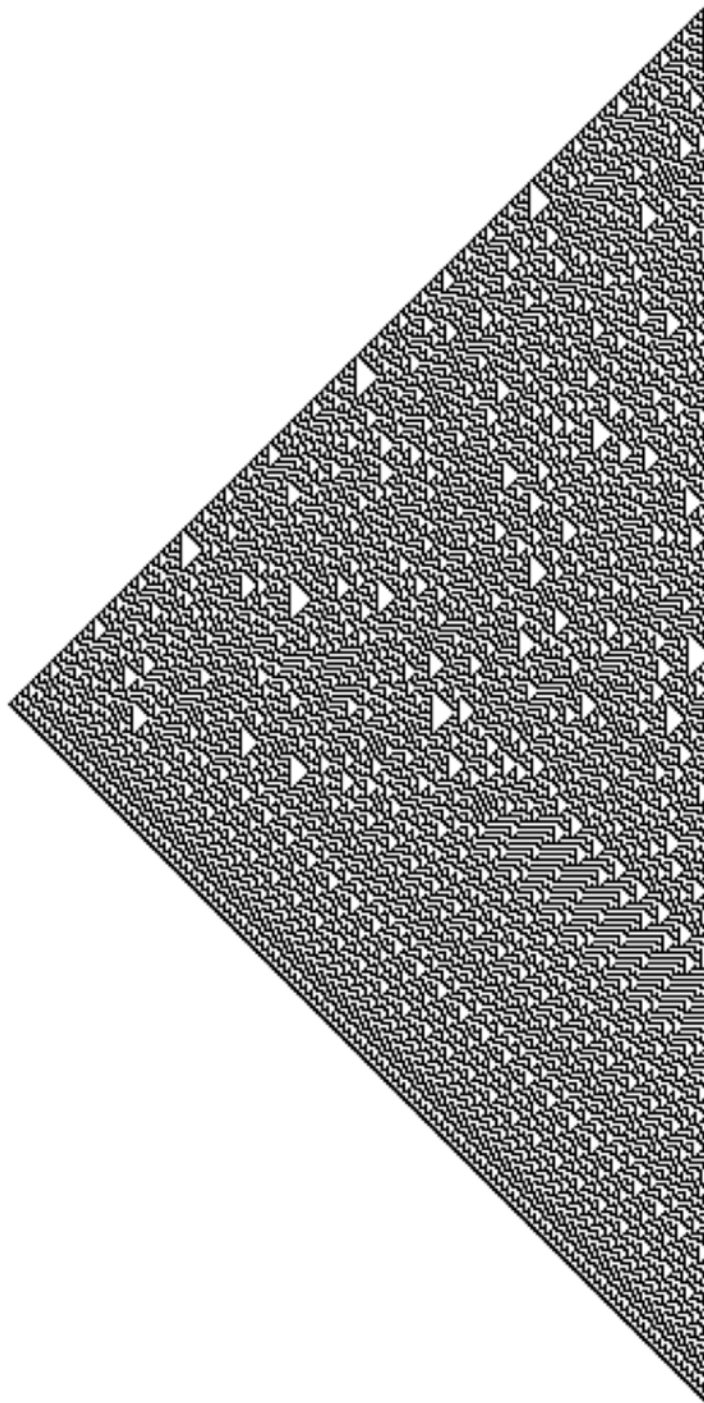
Seppure gli algoritmi della seconda società al mondo per fatturato<sup>65</sup> trascurano molti degli attributi degli oggetti che avremmo considerato rilevanti, l'efficacia degli stessi algoritmi è tutt'altro che basata sulla mancanza di un modello. Da una parte, il paesaggio di una *warehouse* di Amazon può apparire illogico, ma è il risultato di una radicale sintesi nell'interpretazione degli elementi che lo costituiscono. La sintesi è l'aspetto essenziale di un modello ispirato a uno scopo preciso: ottimizzare tempi e costi (Baraniuk, 2015). Il parametro che governa la disposizione degli oggetti è la frequenza di acquisto (Carpo, 2017). Lo scenario risultante, caotico ma estremamente efficiente, emana da una definizione piuttosto astratta e funzionale degli elementi fondamentali — i prodotti da spedire, in questo caso [figura 16].

Allo stesso modo, *googlare* un documento in internet non dimostra necessariamente che un approccio "di forza bruta" sia più valido di una teoria ordinatrice. Anche il motore di ricerca adotta un modello dei contenuti del *web*, ed è un modello topologico in cui gli elementi sono descritti e ordinati in base al sistema di *link* che rimandano da un sito all'altro<sup>66</sup>. La potenza di calcolo ha senso solo entro un perimetro di bisogni ben definito, e dipende da una interpretazione schematica del caos dell'internet.

---

<sup>65</sup> Wolfram Alpha LLC (2021). *Wolfram|Alpha: Computational Intelligence*. <https://www.wolframalpha.com> (consultato il 03/10/20).

<sup>66</sup> PageRank è l'algoritmo di ordinamento alla base di Google. L'algoritmo analizza, come aspetto fondamentale dei contenuti del web, il numero di *hyperlink*, ovvero di citazioni, che rimandano a una pagina, una metrica "*that corresponds well with people's subjective idea of importance*" (Brin e Page, 2012, p.3827, riferimento a fine nota). Oggi il motore di ricerca è basato su un più ampio set di algoritmi che permettono ricerche più raffinate e basate sulle esigenze dell'utente. Si vedano: Brin S., Page L. (2012). *Reprint of: The anatomy of a large-scale hypertextual web search engine*. Computer networks, 56(18), 3825-3833. Bianchini M., Gori M., Scarselli F. (2005). *Inside pagerank*. ACM Transactions on Internet Technology (TOIT), 5(1), 92-128. Google (n.d.). *Google's Search Algorithm and Ranking System - Google Search*. <https://www.google.com/search/howsearchworks/algorithms/> (consultato il 12/04/21).



**Figura 16.** Uno scenario apparentemente caotico può essere il risultato di poche semplici regole. Un automa cellulare è un modello matematico costituito da una griglia quadrata in cui ogni cella può assumere un numero finito di stati (nell'esempio, due stati rappresentati con i colori bianco e nero). Lo stato di ogni cella cambia ad intervalli di tempo prestabiliti, sulla base dello stato delle celle circostanti. Poche regole di evoluzione possono produrre *pattern* complessi. In maniera analoga a questi modelli, altri strumenti digitali possono nascondere, dietro a risultati non facilmente interpretabili, una teoria elementare e *human readable*. Gli automi cellulari sono impiegato anche nella morfologia urbana quantitativa con l'intento di simulare la dinamica di fenomeni complessi (Batty, 2007). Immagine prodotta dal candidato tramite il software Wolfram Mathematica.



Come i pacchi in un magazzino di *e-commerce*, le informazioni che costruiscono una città digitale possono essere trovate rapidamente con l'aiuto della tecnologia. La disposizione apparentemente confusa degli oggetti è ancora un vantaggio: proprio nella sovrapposizione inattesa di informazioni di varia provenienza, si cercano soluzioni inedite e strategie di analisi della complessità urbana che tengano in considerazione un numero più grande di variabili.

Ma, come per la ricerca in internet o l'*e-commerce*, l'efficacia della potenza di calcolo non è indifferente allo scopo per cui i dati sono usati, e dunque all'interpretazione scelta — o al *modello*. L'eterogeneità e l'incompatibilità reciproca delle applicazioni spesso riscontrate nello studio delle città digitali [sezione 1.2] denunciano l'inadeguatezza dei modelli correnti rispetto all'obiettivo generale di incrociare dati collezionati in diversi contesti. Questi limiti si riscontrano anche nei ritardi nell'adozione di soluzioni unitarie di raccolta di informazioni geo-spaziali, soprattutto da parte degli enti pubblici (Ross, 2010; Stoter *et al.*, 2011).

Nella pratica, dunque, *"[i]t is exceptionally hard to link different data sets generated for different purposes to one another, for invariably there are no common keys for doing this"* (Batty, 2016a). La natura non-strutturata dei *big data* urbani non dovrebbe però suggerire un tramonto della teoria quanto il bisogno di teorie più avanzate. Quando l'automazione si sostituisce agli approcci tradizionali, i modelli non scompaiono, ma cambiano.

### *Forma e ambiguità.*

Qual è la conoscenza dello spazio costruito incorporata nei modelli digitali? Una delle ipotesi della ricerca è che la morfologia urbana possa avere un ruolo nello studio, e potenzialmente nella riformulazione, degli elementi fondamentali che costituiscono le repliche digitali di città, ovvero di quelle astrazioni su cui basiamo l'uso dei modelli — anche quando quest'uso prevede le forme di automazione oggi disponibili [v. sezione 0.2]. La morfologia urbana è lo specifico campo di studi che si occupa della forma fisica e dei processi di trasformazione

degli insediamenti umani<sup>67</sup>, e prevede l'identificazione di "*minimum elements that constitute the phenomena, expressed as generalised abstract entities*" (Kropf, 2017, p.30).

I concetti e i metodi della morfologia sono usati in ambiti professionali e di ricerca come la geografia, l'*urban design*, la pianificazione, l'architettura, la progettazione paesaggistica, la conservazione del patrimonio, l'archeologia, l'antropologia, la storia della città (Kropf, 2017). L'individuazione e lo studio degli elementi spaziali della città incontra un interesse anche più ampio nei modelli digitali orientati alla replicazione fedele e dinamica del reale — poiché l'uso dei modelli è legato alla necessità di collegare informazioni specializzate agli elementi rappresentati. I modelli di città permettono di pubblicare portali con cui le amministrazioni offrono servizi al cittadino<sup>68</sup>, di condurre studi multivariati di econometria spaziale<sup>69</sup>, di simulare il comportamento termico e fluidodinamico dello spazio costruito<sup>70</sup>, di realizzare applicazioni di realtà virtuale e aumentata<sup>71</sup>... Molte discipline richiedono quindi definizioni chiare della forma della città e dei suoi elementi fondamentali, per usarne le metriche, i dati già associati in altri ambiti, le rappresentazioni sintetiche e matematiche.

---

<sup>67</sup> Nella definizione più sintetica, per *morfologia urbana* si può intendere "*the study of urban form*" (Cowan, 2005, citato in Marshall e Çalişkan, 2011, p.412). Diverse definizioni evidenziano l'interesse della disciplina per l'aspetto evolutivo dell'organismo urbano; ad esempio, per Moudon (1997, p.3) "[*morphologists*] analyse a city's evolution from its formative years to its subsequent transformations" (cfr. Lynch, 1981; Fleischmann et al., 2020). Sono inoltre studiate le forze che agiscono sulla trasformazione della città, e in particolare "*the interrelations between humans and physical features*" (Kropf, 2014, p.42; cfr. Lynch, 1981; Oliveira, 2016). La morfologia è anche considerata un campo di studio da cui derivare principi normativi e di progettazione dello spazio urbano (cfr. Lynch, 1981; Marshall e Çalişkan, 2011). Per una discussione più approfondita sulle definizioni della disciplina, si vedano Marshall e Çalişkan (2011) e Kropf (2017).

<sup>68</sup> Molti dei *digital twin* analizzati nella tesi presentano questo tipo di applicazioni. Il caso di Zurigo ad esempio, usa modelli 3D per condividere basi di dati spaziali aperte, per rendere pubblici piani e progetti e per la consultazione di un catasto dei sottoservizi [sezione 4.2: DT.1].

<sup>69</sup> Ad esempio, un modello di città permette di condurre analisi di visibilità, di calcolare il percorso minimo tra punti di interesse, di stimare dati demografici o caratteristiche degli edifici come il numero di livelli. Simili informazioni, con altri dati geo-localizzati, possono alimentare lo studio statistico dei caratteri territoriali che permettono di stimare il prezzo di una proprietà immobiliare (Walls et al., 2015; Vanslebrouck e Van Huylenbroeck, 2005; Hidano, 2002).

<sup>70</sup> L'interesse per la forma della città si estende agli ambiti della fisica e dell'ingegneria. Tra gli esempi, alcune applicazioni di modelli 3D consentono di integrare dati da sensori e dati simulati per il monitoraggio del microclima urbano [sezione 4.2: DT.4, DT.8]; altri modelli permettono di simulare il vento [sezione 4.2: DT.2, DT.3]; si attestano inoltre modelli per lo studio degli effetti di inondazioni (Biljecki et al., 2015).

<sup>71</sup> Tra i casi analizzati, il modello Amaravati include strumenti per la VR e il modello di Los Angeles è stato presentato attraverso un'installazione con AR [sezione 4.2: DT.4, DT.8].

Tuttavia, in ambito morfologico, gli elementi e i principi su cui fondare una conoscenza analitica della forma urbana non sono chiari e condivisi tra i diversi approcci di ricerca correntemente adottati. Né lo sono stati durante il dibattito su tipologia e morfologia che, tra gli anni '50 e '70 del secolo scorso, si è animato fra le scuole di pensiero degli architetti italiani, coinvolgendo il più ampio panorama europeo (Caja *et al.*, 2010; Lobsinger, 2006). Gli studi di analisi urbana sono stati largamente orientati all'operatività progettuale e in quanto tali hanno coinvolto principalmente architetti, urbanisti e progettisti urbani (ma anche geografi e storici dell'arte). Gli approcci, spesso associati a distanti e singolari modalità progettuali, hanno comportato polarizzazioni, a volte marchiate come derive ideologiche, che hanno inaridito la discussione.

*"Urban planning has seen a succession of clashing ideologies and fashions swinging in and out of favour over the last century, which are intimately tied up with both urban morphology and urban design." (Çalişkan e Marshall, 2011, p.381)*

Il dibattito ha comunque cercato di trovare dei principi per lo studio delle trasformazioni della città, e a tal fine ha fatto spesso ricorso al concetto di tipo, variamente declinato. Attraverso le diverse voci partecipi, il tipo è stato di volta in volta associato agli elementi che consentono una classificazione dell'architettura (Aymonino, 1977) alla necessità tettonica presupposta dalla costruzione (Brandi, 1956), a un'entità *processuale* connessa alla storia della vita civile (Caniggia *et al.*, 1997), alla struttura comune a più varianti formali (Argan, 1958).

Parte del discorso morfo-tipologico di quegli anni è storicizzato e alcuni passaggi e posizioni, senza un'appropriata contestualizzazione, appaiono incerti e di difficile attualizzazione (Caja *et al.*, 2010). Resta comunque animato un articolato fronte di ricerca che indaga la morfologia urbana soprattutto dal punto di vista dei processi storici di trasformazione. Questi studi si radicano nelle principali scuole di analisi urbana (Moudon, 1997), fondate sui lavori dell'architetto romano Saverio Muratori (1960; Caniggia e Maffei, 1982; Marzot, 2002; Castex, 2014) e del geografo anglo-tedesco Michael Robert Günter Conzen (2012 [1960]; Larkham, 2006).

In particolare, l'*International Seminar on Urban Form* (ISUF), nato dall'incontro di studiosi delle scuole di morfologia francese, italiana e inglese, da oltre vent'anni promuove convegni e pubblicazioni con l'obiettivo di discutere le basi teoriche della disciplina — che coinvolge architetti e urbanisti, ma anche geografi e *spatial analysts* — e il suo ruolo in un orizzonte interdisciplinare (Moudon, 1997; Whitehand, 2018; Larkham, 2002). Da un lato, l'approccio

promosso dall'ISUF si dichiara ancora fondato sulla reazione al modernismo, attraverso la considerazione del contesto preesistente, l'attenzione alle unità tradizionali della progetto urbano — edifici, strade, lotti, *pattern* di strade — e la ricerca delle caratteristiche del progetto tradizionale che lo rendono più efficace di quello moderno (Çalışkan e Marshall, 2011). Sono però parte del dibattito non solo le tecniche qualitative di analisi, come quelle impostate da Conzen e Muratori, ma anche sistemi di tecniche quantitative. Fra questi si distinguono diversi approcci matematico-analitici, considerati "*not as a 'separate' school [but] an extension of the morphological research*" (Berghauser Pont e Haupt, 2007). Kropf (2009, 2014) articola dunque gli approcci correnti alla morfologia urbana in quattro categorie principali: (1) ***process typological approach***, radicato nel lavoro di Muratori e formalizzato dai suoi allievi e in particolare da Caniggia; (2) ***historico-geographical approach***, basato sul lavoro di Conzen; (3) ***spatial analytical approach***, con esponenti presso il *Centre for Advanced Spatial Analysis* (CASA) dell'*University College* di Londra (UCL); (4) ***configurational approach***, che comprende le teorie della *Space Syntax*, sviluppate ancora presso lo UCL.

Sebbene i diversi approcci che alimentano il più compatto dibattito attuale tendano a convergere su determinati aspetti della forma urbana, i rapporti tra le parti, le classificazioni, le scale di analisi ancora non si incontrano in elementi o termini comuni.

Le componenti elementari della struttura della città più ampiamente condivise si possono sintetizzare nella triade **strada**, **plot** e **edificio**. È inoltre piuttosto accettata la composizione di questi tasselli fondamentali in uno **schema gerarchico** basato su rapporti tra parti e tutto. Questa struttura è stata investigata soprattutto dalle scuole di pensiero storico-geografica e tipologico-processuale (Conzen, 2012 [1960]; Caniggia *et al.*, 1997), ma ricorre anche nell'entroterra teorico dei metodi quantitativi (Berghauser Pont e Haupt, 2007; *cfr.* Kropf, 2014).

Tuttavia, sovrapposizioni e corrispondenze non univoche sono spesso riscontrabili tra definizioni basate sull'uso, su caratteri fisici, e in alcuni casi su criteri di proprietà — come per il *plot*, uno tra gli elementi largamente riconosciuti come fondamentali per la disciplina (Kropf, 2014; Bobkova *et al.*, 2017).

Tra gli altri, già Rossi (1966) e Lynch (1981) hanno individuato negli scostamenti tra forme ed usi una comune causa di ambiguità, che emerge al confronto tra diverse definizioni e classificazioni tipologiche del costruito. Come già Alexander (1965) ha sostenuto che le componenti della città risultino spesso insieme che si sovrappongono, piuttosto che elementi distinti connessi in una struttura gerarchica.

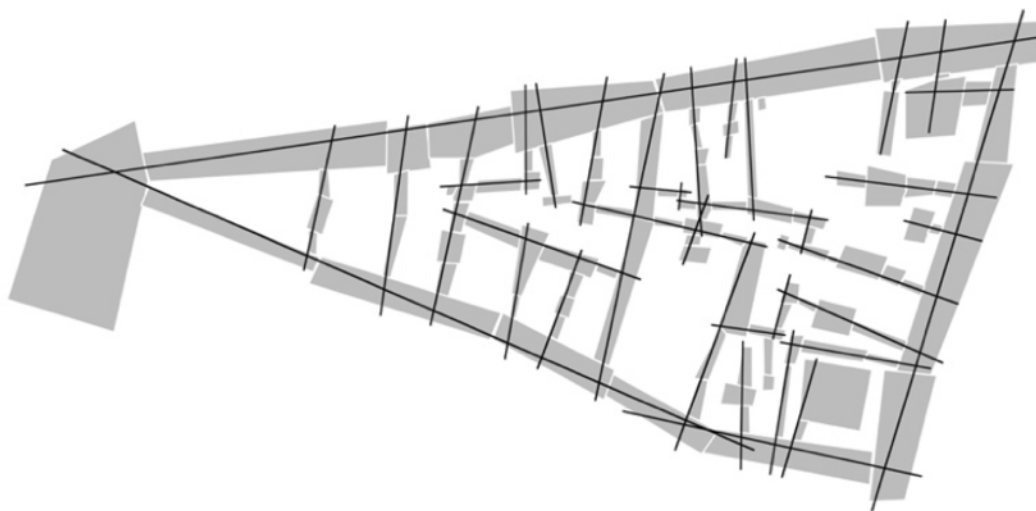
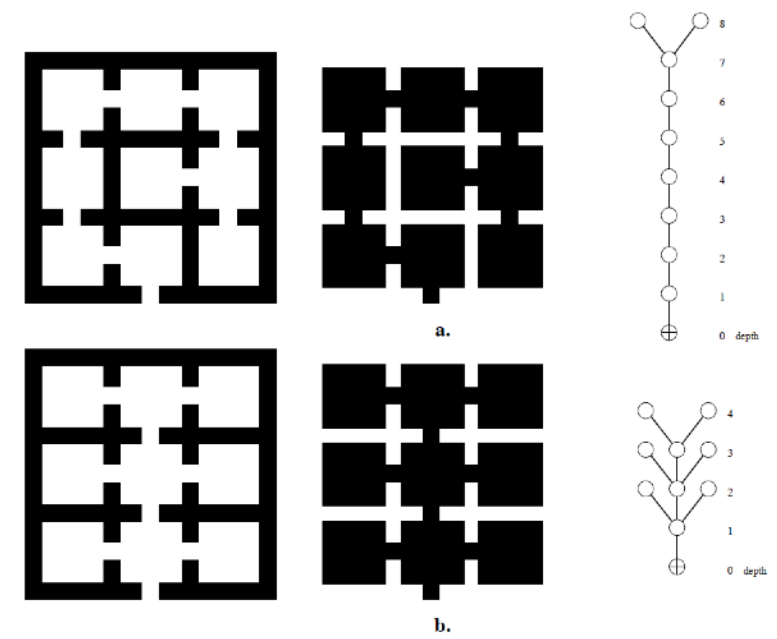
Nonostante i tentativi di incontro su termini condivisi, e le prese di coscienza sull'intrinseca ambiguità dei fenomeni urbani e la conseguente parzialità delle possibili definizioni, la morfologia urbana ha incontrato difficoltà nella costruzione una κοινή — non solo un linguaggio per i morfologi, ma una comprensione dello spazio più ampiamente condivisa. Negli ultimi decenni, questo limite si è sovrapposto alla trasformazione del modello di città nel supporto per molteplici funzioni, apparentemente lontane dallo studio della forma del costruito, lasciando la forma aperta a diverse interpretazioni non armonizzate.

### *Approcci quantitativi alla morfologia.*

La rapida evoluzione dell'ambiente urbano richiede di aggiornare frequentemente la nostra idea di città, sottoponendo l'oggetto di studio all'attenzione di molteplici punti di vista e discipline, nella consapevolezza che la città si presenta come un sistema "*whose infrastructural, economic and social components are strongly interrelated and therefore difficult to understand in isolation*" (Bettencourt e West, 2010). "*Big data [...] is changing our focus on what is important in cities*" (Batty, 2016b) e dunque i modelli digitali — che filtrano, organizzano e consentono di manipolare l'inedito flusso di informazioni — assumono un ruolo nodale nella comprensione dello spazio urbano.

La confluenza di dati spaziali in tre dimensioni e delle capacità analitiche dei GIS ha cambiato gli scenari della pianificazione e dello studio dei fenomeni urbani (FULL, 2019). Gli attuali domini d'uso dei modelli 3D di città — come Batty *et al.* (2000) già rilevano — sono un'estensione rispetto all'originario interesse per gli analoghi "analogici" e per le prime rappresentazioni digitali (il CAD), che erano prerogativa della sfera del *design* [v. sezione 1.2]. Professionisti, ricercatori e amministrazioni si sono interessati all'analisi integrata della città, per la gestione di servizi e sistemi di dispositivi, come supporto alle decisioni e alla formulazione di politiche. I modelli e le informazioni connesse, permettono inoltre di simulare fenomeni e produrre previsioni e il dettaglio crescente e i ritmi di aggiornamento delle metriche stanno raffinando la predittività di questi strumenti.

Lo sviluppo dei modelli digitali condivide l'interesse nella misurabilità degli oggetti rappresentati con un ramo della ricerca sulla morfologia urbana che si occupa di metodi quantitativi di descrizione e analisi, e che impiega, e a sua volta sviluppa, i modelli digitali come strumenti di ricerca (Moudon, 1997; Sevtsuk e Amindarbari, 2012; Batty, 2013). Questo ambito disciplinare presenta inoltre



**Figura 17.** L'approccio configurazionale alla morfologia urbana analizza il rapporto tra metriche euclidee e topologiche per studiare l'uso dello spazio, e in particolare il movimento umano nella città. *i.* L'immagine superiore mostra una definizione formale della *configurazione*, come rapporto topologico tra gli spazi vuoti. *ii.* L'immagine inferiore, composta secondo i principi della *Space Syntax*, mostra sovrapposte una rappresentazione bidimensionale degli spazi aperti convessi di un brano del centro di Londra e le *linee assiali* da cui può essere generato un modello topologico del tessuto. Immagini tratte da Hillier (2007 [1996], p.21, p.130).

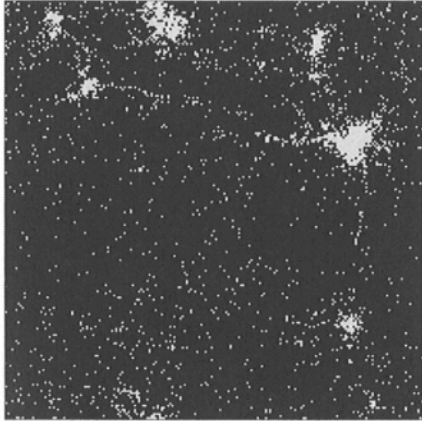
domande aperte sulla conoscenza dell'ambiente urbano sovrapponibili alle critiche introdotte riguardo all'aggiornamento dei modelli.

Un primo paradigmatico approccio quantitativo alla conoscenza delle forme del costruito può essere considerato il lavoro di classificazione di Jean-Nicolas-Louis Durand (Witt, 2016). Tra i precursori degli approcci matematico-analitici contemporanei si cita Cerdà, pioniere della formalizzazione delle relazioni tra le componenti della città. In generale, l'uso del ragionamento matematico per misurare le proprietà dello spazio urbano è stato anche parte del lavoro del CIAM e dei suoi membri, tra i quali in particolare Unwin, che parla di "*balance between area of plot, area of floor space and area of street*" (Unwin in Berghauser Pont e Haupt, 2007, p.57; Berghauser Pont in Oliveira, 2018). Con il *Centre for Land Use and Built Form Studies* dell'Università di Cambridge, Martin e March (1972) hanno per primi strutturato un campo di studi orientato all'individuazione delle componenti della forma urbana — come proprio della morfologia, prendendo in esame ad esempio il rapporto tra superficie utile, spazio aperto, e altezza degli edifici —, ma basato sulla descrizione matematica degli elementi (Berghauser Pont in Oliveira, 2018).

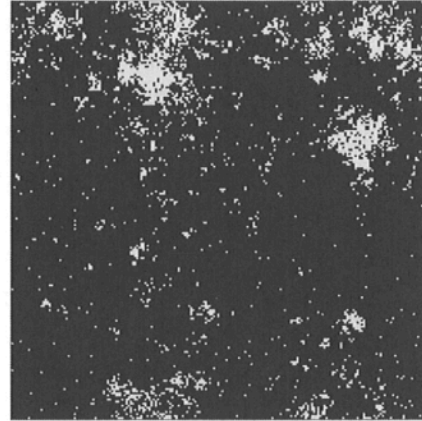
Gli attuali contributi alla morfologia matematico-analitica arrivano in parte dalle correnti che si riconoscono in scuole morfo-tipologiche interne alla comunità dell'ISUF. Queste comprendono le ricerche sulle metodologie quantitative (approccio configurazionale e approccio analitico-spaziale) e quelle interessate più nello specifico al rapporto tra metodi quantitativi e principi della morfologia "qualitativa" tradizionale — ricerche che adottano il nome di *space-morphology*. Un secondo apporto qui individuato è un approccio caratterizzato dall'analisi delle tendenze di sviluppo urbano alla scala territoriale. Questo approccio, in alcuni casi chiamato *science of cities* (West, 2017) non richiama direttamente i rami consolidati della morfologia urbana ma si mostra comunque connesso nei metodi e in alcuni principi agli approcci morfologici analitico-spaziali che usano modelli informatici e di grande scala, come quelli proposti dal centro CASA (Batty, 2013).

Entro i filoni storici della morfologia quantitativa, l'**approccio configurazionale**, nato in Gran Bretagna negli anni '80, ha riportato l'attenzione sui metodi analitico-descrittivi dopo il lavoro di Martin e March. Gli aspetti topologici, le metriche connesse e le tecniche combinatorie sono il fulcro analitico della morfologia configurazionale [figura 17]. L'obiettivo è comprendere il rapporto tra metriche euclidee e topologiche, e il rapporto che la forma (in termini di configurazione) instaura con l'uso dello spazio — in particolare l'interazione tra lo spazio e la funzione generica del *movimento* umano (Hillier, 2007 [1996]). Il concetto di *configurazione* si riferisce al carattere degli elementi spaziali che ne

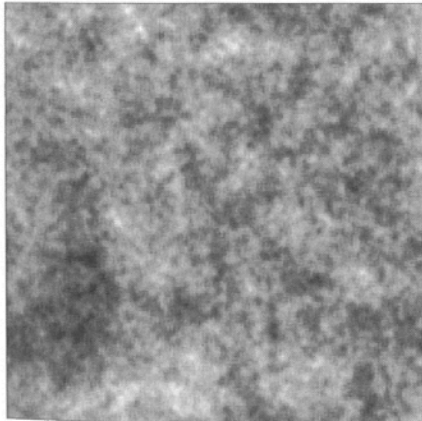
agents



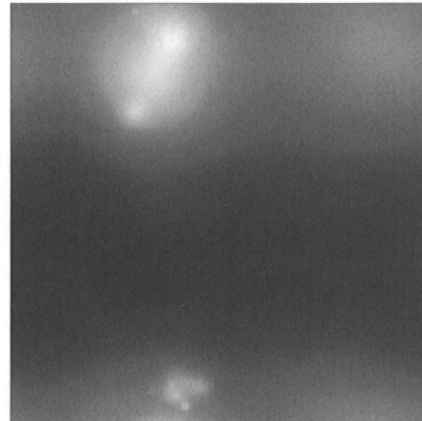
land use/activities



population potential



service and industrial potential



**Figura 18.** L'approccio analitico spaziale alla morfologia urbana interpreta la città come "complessità organizzata" e si occupa della ricerca di *pattern* e regole elementari esprimibili in linguaggi formali. L'approccio prevede l'uso di strumenti matematici e informatici, tra cui modelli frattali, automi cellulari, modelli ad agenti, sistemi informativi geografici, e strumenti della teoria dei grafi. L'immagine rappresenta l'output grafico di un modello ad agenti di un sistema urbano. Immagine tratta da [Batty \(2007, in Kropf, 2009, p.110\)](#).



indica la posizione relativa ad altre componenti di un intero organico di ordine superiore<sup>72</sup>, ed è espresso formalmente tramite la topologia. Questo tipo di approccio è rappresentato prevalentemente dalle teorie della Space Syntax, nate dal lavoro della *Unit for Architectural Studies* allo University College di Londra (Hillier e Hanson, 1984; Hillier, 2007 [1996]).

L'analisi dei *network* e l'obiettivo di definire gli elementi della forma urbana secondo la loro posizione in una struttura più grande, sono condivisi anche dall'**approccio analitico spaziale**. L'approccio è orientato allo studio delle attività umane intese come interazioni spaziali, e può essere considerato un terreno di sviluppo di temi analitici già introdotti da von Thunen, padre della geografia economica, e della *central place theory* di Christaller (Hillier e Hanson, 1984; Kropf, 2014; Berghauser Pont e Marcus, 2015). L'analisi spaziale impiega un ampio set di strumenti matematici e informatici, tra cui modelli frattali, automi cellulari, modelli ad agenti, sistemi informativi geografici, oltre agli strumenti della teoria dei grafi [figura 18]. Il punto di vista che caratterizza l'approccio e i suoi scopi interpreta la città come "*organized complexity*" (Jacobs, 1961, in Kropf, 2014, p.41): i fenomeni globali sono l'esito di un processo generativo che si sviluppa da dinamiche locali indagabili in principi e relazioni elementari (Kropf, 2009) — che in quanto tali, sono ben rappresentati dallo stesso funzionamento degli automi cellulari [v. figura 16].

Oltre a questi due filoni riconosciuti come i contributi fondamentali alla morfologia quantitativa contemporanea (Kropf, 2009, 2017), una specifica direttrice di ricerca si pone direttamente in continuità con la *space-morphology* di Martin e March e approfondisce i metodi quantitativi come parte integrante della morfologia tradizionale. La *space-morphology* affida alla descrizione formale delle caratteristiche urbane un ruolo nell'armonizzazione dei diversi punti di vista nel dibattito morfologico (Berghauser Pont e Haupt, 2007) [figura 19].

Si può infine considerare un più ampio campo di analisi che sta applicando soluzioni matematiche e informatiche alla comprensione della forma della città. Si tratta di ricerche che basano sulla gestione dei *big data* alla scala urbana al miglioramento della predittività dei modelli spaziali. L'ambito può essere

---

<sup>72</sup> O una *Gestalt*, concepita come un insieme organico (Kropf, 2014). Da questo punto di vista, il rapporto tra caratteri quantitativi e effetti nelle funzioni e negli usi delle configurazioni può essere confrontato con il concetto di modello parametrico espresso da Patrik Schumacher nel suo *Parametricist Manifesto*: "*the parametric model might be set up so that the variables are extremely Gestalt-sensitive. Parametric variations trigger Gestalt-catastrophes, i.e. the quantitative modification of these parameters trigger qualitative shifts in the perceived order of the configuration*" (Schumacher, 2008, citato in Mehaffy, 2011, p.484).

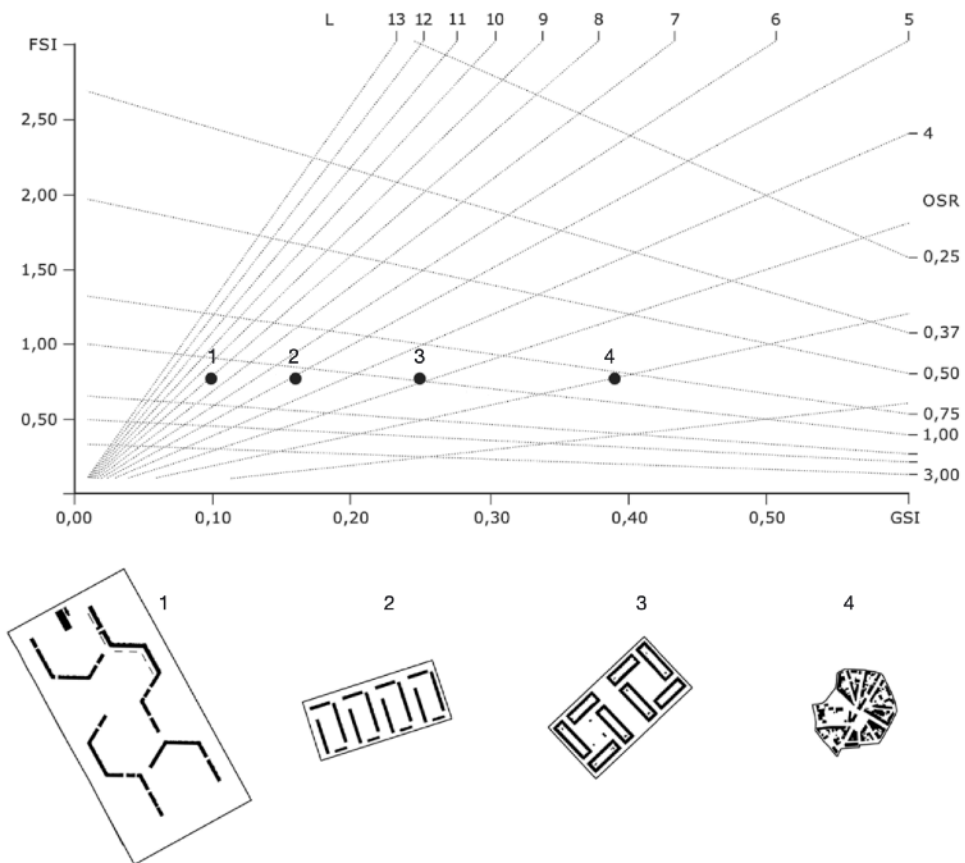


Figura 19. La *space-morphology* riflette su principi ed elementi della morfologia tradizionale studiando i caratteri quantificabili della città fisica. Nell'immagine è mostrato il grafico dello strumento analitico *Spacemate*, che studia il rapporto tra densità e forma del tessuto urbano attraverso la combinazione di metriche di *intensità*, *compattezza*, *altezza*, e *rapporto tra spazio aperto e spazio chiuso* (*open space ratio*). Immagine tratta da [Berghauser Pont e Haupt \(2007, p.58\)](#).

chiamato "*science of cities*"<sup>73</sup>, secondo la definizione data da Geoffrey West, fisico teorico ed ex presidente del Santa Fe Institute (New Mexico, US), che insieme a Luis Bettencourt ha condotto studi pionieristici sulle leggi di scala osservabili nell'ambiente urbano. West dichiara l'intento di ricercare "*commonalities, regularities, principles, and universalities that transcend and underlie the structure and behavior of any particular individual constituent*" (West, 2017). L'approccio condivide con gli studi morfologici analitico-spaziali l'idea che le dinamiche locali possano contribuire ad una comprensione globale in forma di leggi espresse matematicamente.

Si può considerare incluso in questa categoria anche il lavoro del *City Form Lab* di Harvard, che adotta strumenti statistici, informatici e di analisi spaziale per lo studio di indicatori legati alla forma della città — in questo caso con particolare attenzione all'interazione delle analisi con le politiche urbane e l'*urban design*<sup>74</sup>. Sevtuk e Amindarbari (2012), proponendo una serie di metriche per descrivere la città contemporanea, sostengono l'adozione di nuove opportunità tecniche (immagini satellitari, GIS, analisi spaziale) con l'obiettivo di prevedere *trend* globali, di mettere in relazione i dati in maniera inedita, di indirizzare politiche e investimenti [figura 20]. Gli stessi sottolineano però le criticità delle classificazioni, la necessità di distinguere i caratteri spaziali più pregnanti e utili, e l'importanza di un *background* nella letteratura sugli aspetti qualitativi della forma urbana, come punto di riferimento per la scelta delle dimensioni da misurare e dello scopo dell'analisi.

I quattro approcci citati — quello configurazionale e quello analitico-spaziale riconosciuti nel "canone" della morfologia urbana, gli sviluppi della *space-morphology* e la *science of cities* — condividono un'idea della configurazione urbana "*as emergent, with global structure arising out of local processes*"<sup>75</sup> (Kropf, 2009, p.111).

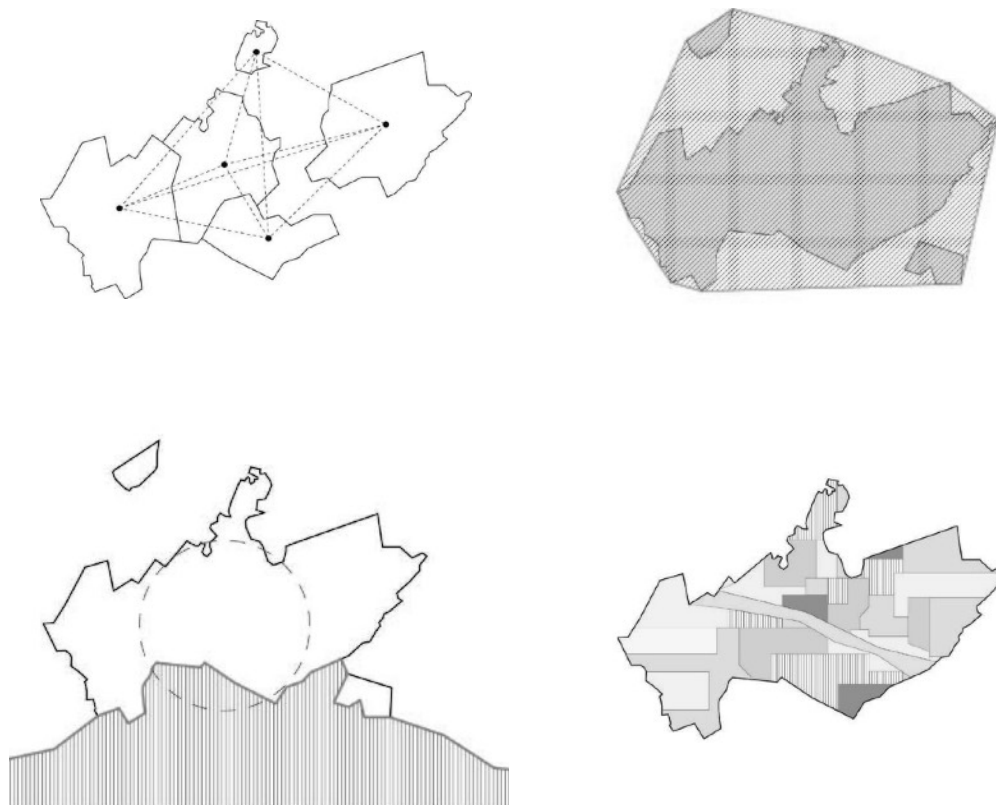
Attraverso una rassegna dell'ampio panorama degli studi morfologici quantitativi, Fleischmann *et al.* (2020) ne individuano i tre principali obiettivi. Il

---

<sup>73</sup> Il termine è usato anche da Michael Batty, che pubblica anche un libro dal titolo *The new science of cities* (Batty, 2013). Qui si è ritenuto comunque di poter separare i due filoni, soprattutto per il legame stretto del lavoro di Batty alla letteratura morfologica più tradizionale, sottolineato anche da West, il quale nota che l'approccio del CASA "*emphasizes the more phenomenological traditions of the social sciences, geography, and urban planning*" in contrasto con un pensiero basato su "*more analytic, mathematical traditions of physics*" (West, 2017).

<sup>74</sup> <http://cityform.mit.edu> (consultato il 09/10/20).

<sup>75</sup> Nel testo citato, la frase si riferisce agli approcci di Batty (analitico-spaziale) e Hillier (configurazionale), ma è qui interpretata come il tratto distintivo delle metodologie che condividono l'interesse per una rappresentazione numerica della città.



**Figura 20.** Alcuni approcci contemporanei all'interpretazione e all'analisi della forma urbana, a cui si può fare riferimento come *science of cities*, impiegano strumenti statistici, informatici e di analisi spaziale per prevedere tendenze di sviluppo urbano su larga scala e indirizzare politiche, investimenti e progetti. Le immagini sono tratte da [Sevtsuk e Amindarbari \(2012, p.25, p.35, p.49\)](#) e rappresentano alcuni passaggi dello studio di un set di metriche spaziali fondamentali per la descrizione della forma urbana (le immagini a sinistra sono relative a metriche di *compactness*, le immagini sulla destra a *coverage* e *land-use mix*).

primo e più ricorrente è la comparazione degli aspetti misurabili, condotta in maniera prevalentemente sincronica tra diverse città. Un secondo obiettivo è la valutazione della *performance*, ancora sincronica, che può considerare aspetti che sono il risultato di diverse variabili, come ad esempio la sostenibilità, l'accessibilità o la resilienza. L'analisi della crescita delle città, terzo obiettivo rilevante, è condotta in studi diacronici, ed è spesso orientata alla misura dei fenomeni di *sprawl* attraverso la categorizzazione binaria del suolo in edificato e non edificato.

---

### 3.2. La forma fisica come dimensione condivisa.

#### *Rappresentazioni dello spazio antropico: alcune criticità.*

La tensione tra la città intesa come nodo fondamentale di criticità e opportunità e i dubbi su come vada teorizzata e analizzata è evidenziata da [Allen J. Scott e Michael Storper \(2015\)](#) in riferimento al dibattito degli ultimi decenni sull'*urban theory*. Diversi approcci, *claim*, termini per riferirsi alle aree metropolitane danno idea del nuovo passo che l'urbanizzazione ha assunto negli ultimi decenni — *world cities, global cities, city-regions...* ([Soja e Kanai, 2007](#)). I fenomeni di globalizzazione sembrano non aver condotto alla disgregazione delle città, ma piuttosto a nuove conferme delle forze di agglomerazione, processi di ricentralizzazione, più estese policentricità, nuovi "pattern di differenziazione" ([Soja e Kanai, 2007](#)). La diversificazione dei *framework* metodologici adottati per lo studio di queste trasformazioni condivide e riflette un "senso di frammentazione" nella natura dell'urbano ([Scott e Storper, 2015](#)), anche oltre il perimetro della morfologia urbana.

I primi problemi possono emergere già con la collezione di dati omogenei per tema, se i metodi di raccolta e aggregazione e le unità non sono condivisi e conciliabili. Secondo [Neil Brenner e Christian Schmid \(2014\)](#) è quel che si rileva nelle descrizioni della dimensione urbana su cui appoggiano le tesi dell'*urban age* — quell'insieme di discorsi politici, accademici e divulgativi che insistono sul superamento della popolazione rurale globale da parte della popolazione che vive in città, e che presentano il dato come epocale.

La critica di Brenner e Schmid si inserisce in un più ampio dibattito sulle *urban population thresholds* e sottolinea come la quantificazione demografica della dimensione urbana presupponga soluzioni al problema "*fundamentally spatial*" della delimitazione della città che oggi appaiono inaccettabili (*ibid.*, p.735). I dati demografici riflettono il lavoro di diverse agenzie statistiche nazionali, definizioni dei perimetri urbani arbitrarie e molte diverse definizioni di città rispetto al dato stesso del numero di abitanti. Si tratta in sintesi di "*purely empirical and territorial definitions of the urban*" (*ibid.*, p.739).

Altri studi osservano come la "*pervasiveness of administrative and statistical subdivisions as data containers*" riscontrata alla scala globale derivi dalle unità selezionate a scale di dettaglio molto maggiore, a partire dalle sezioni di censimento ([Katsikis, 2018, p.17](#)). I dati censuari, basati su unità spaziali

disomogenee per superficie, per forma, per proprietà sociali e politiche e per sistemi di raccolta delle informazioni, costituiscono ancora la struttura entro cui molti dati urbani di dettaglio sono organizzati.

Osservando la quantificazione della città fondata su unità amministrative, gli studi sulla *planetary urbanization* affermano che la ricerca sulle unità di misura dello spazio urbano deve chiedersi cosa vada misurato, a quale scala spaziale e con quale scopo, e colgono il bisogno di sviluppare metriche e visualizzazioni che descrivano fenomeni inediti. Lo studio di unità spaziali alla scala degli elementi che compongono la città può intervenire sul problema della definizione dell'urbano e fornire nuovi strumenti per l'analisi dell'urbanizzazione globale — con conseguenze operative che coinvolgono pianificazione e politiche.

### *La mancanza di definizioni condivise.*

Nelle definizioni correnti di *morfologia urbana* sono espresse "la comprensione e la spiegazione del cambiamento urbano in senso ampio" (Marshall e Çalışkan, 2011). Questa comprensione tuttavia, all'aumentare della complessità dell'ambiente urbano e dei fenomeni socio-spaziali, appare dispersa tra molti diversi saperi.

Fleischmann *et al.* (2020) hanno sottolineato come la mancanza di definizioni condivise e rigorose degli elementi fondamentali dello spazio urbano ostacoli gli approcci quantitativi alla forma urbana. Due questioni sono particolarmente rilevanti: (1) il problema della qualità dei dati, non omogenea e limitata per disponibilità e coerenza attraverso diverse aree geografiche; (2) il problema della condivisione di definizioni, terminologia e fonti. Come evidenziato, il primo problema, in parte tecnico, è rilevato anche dalla *urban theory*, e riguarda l'adozione acritica di modelli dalla validità limitata. La seconda questione eredita la scarsa coerenza che studi e approcci morfologici diversi hanno mostrato negli ordinamenti e nelle definizioni della materia: "The descriptions and measurements of urban form used in these studies are highly inconsistent" (Berghauser Pont e Marcus, 2015).

Non è mancata, almeno nell'ambito dell'ISUF, una certa attenzione al riconoscimento e alla sollecitazione di contributi della morfologia verso altre discipline (Moudon, 1997). Per converso, si può riscontrare un interesse nella materia da parte di ricercatori di altri settori, compreso il significativo contributo dei fisici nella *science of cities*. Tuttavia, risulta che in rare occasioni i principi, le

unità, le tassonomie introdotte nella morfologia abbiano trovato larga affermazione (Whitehand, 2018), ad esempio presso istituzioni, istruzione universitaria o enti di standardizzazione. Queste considerazioni trovano conferma anche nello sviluppo dei modelli tridimensionali di città, in cui l'influenza del discorso morfologico è difficilmente riscontrabile, nonostante si possa accordare alla rappresentazione dello spazio un ruolo strutturale nella gestione dell'informazione digitale.

Il dibattito sulle teorie della Space Syntax apparso sulle pagine di *Environment and Planning B* nel 2004 (Ratti, 2004a; Hillier e Penn, 2004; Ratti, 2004b) è un'ulteriore conferma della mancanza di un piano comune di comprensione delle dimensioni misurabili della città. Alcune differenze di metodologia e di linguaggio negli approcci messi a confronto da questi ricercatori e progettisti sottolineano la mancata comprensione delle reciproche aspettative su applicabilità e finalità degli strumenti.

Il carattere normativo-prescrittivo di una parte degli studi morfologici (Berghauser Pont e Marcus, 2015) è una possibile causa della rigidità dei punti di vista sviluppati rispetto alle esigenze di altre discipline.

*"Urban Design is a discipline where almost without exception its major proponents have failed to engage with any substantial theory in the cognate disciplines of economics, social and political science, psychology, geography, or the humanities." (Cuthbert, 2007, p.177)*

Ad esempio, alcuni approcci interni all'ISUF si dichiarano tutt'ora fondati sulla reazione al modernismo, attraverso la considerazione del contesto preesistente, l'attenzione agli elementi tradizionali del progetto urbano (strade, lotti, isolati) e la ricerca delle caratteristiche del progetto tradizionale che lo renderebbero più efficace di quello moderno (Çalışkan e Marshall, 2011). Gli approcci neo-tradizionalisti, basandosi su un'interpretazione tipologica delle forme urbane storiche (cfr. Çalışkan e Marshall, 2011) adottano degli assunti che determinano un modo di progettare (ideologicamente connotato), ma che non sono necessariamente compatibili con le finalità di una lettura scientifica interdisciplinare dello spazio costruito. Se anche la "qualità" espressa da impianti tradizionali possa incontrare un ampio favore (ma cosa esclude *bias* come tendenze temporanee e altri effetti del mercato immobiliare?) resta la possibilità che anche altri schemi siano adatti a produrre un ambiente che risponde a criteri di efficacia sociale, estetica, funzionale. Emerge inoltre il bisogno di confrontarsi con nuovi elementi e tipi, in aree urbane che si stanno sviluppando secondo logiche che sfuggono a un diretto controllo formale.



Nel caso dei modelli di città dunque, i limiti conoscitivi e operativi che soffrono "*a dogmatic faith in technology*" (Datta, 2015, p.50) [v. capitoli 1, 2] si sommano a dei "dogmi" ideal-tipologici che hanno frenato il dialogo interdisciplinare nell'ambito della morfologia. Lo studio del modo in cui altre discipline interagiscono con la forma della città può mettere in luce un ruolo della morfologia urbana nella definizione di principi e unità fondamentali a cui la diffusa e trasversale attenzione verso il modello digitale possa far riferimento.

### *La morfologia come "registration mark".*

Se la forma fisica della città non è l'unico aspetto da trattare quando si parla di morfologia (cfr. Lynch, 1981), la stessa può tuttavia essere "*the aspect that provides the most effective reference key for correlating information about the other aspects and comparing different cases in a consistent way [...]*" (Kropf, 2014, p.42). Secondo Kropf (*ibidem*) la forma fisica è infatti l'aspetto che presenta **persistenza** nel tempo, per via delle esigenze di *firmitas* che informano la materia osservata. È inoltre un aspetto che risalta per **evidenza** e condivisibilità, per via del rapporto diretto, sensibile, con la nostra conoscenza. La forma fisica si dota anche di **comprensività**: è un dato necessario alla lettura degli altri aspetti.

Pur tra le incompatibilità terminologiche e teoriche che attraversano la disciplina, la morfologia urbana riconosce quindi la forma fisica come **il punto di riferimento per il coordinamento e — soprattutto — per la comparazione** degli altri aspetti di cui disciplina si occupa. Un'ipotesi di lavoro è che la morfologia possa essere uno strumento per interpretare e coordinare non solo i diversi approcci morfologici, ma i molti livelli informativi che fanno riferimento allo spazio urbano.

L'idea che la dimensione morfologica della città, espressa numericamente, possa supportare lo scambio di informazioni digitali non è nuova: "*Computer models of [city] form and structure as patterns of location and of interactions or flows providing the glue that binds various economic, social, and land use activities together were first proposed in the 1950s*" (Batty, 2013).

Scopo consolidato della morfologia urbana è l'identificazione di *pattern*, ovvero di schemi ripetibili nella struttura, nella formazione e nella trasformazione dell'ambiente costruito (Kropf, 2014). L'identificazione di schemi, o modelli, a partire dalla varietà degli oggetti analizzabili, ovvero le componenti della città reale e le fonti che ne documentano la storia, è un processo di scelta consapevole,

di selezione delle informazioni, interpretazione, astrazione. Una riformulazione del discorso sulle unità spaziali può rifarsi al "fatto urbano" di Rossi (1966; *cf.* Lobsinger, 2006) nel considerare la natura al contempo fisica e progettuale della forma urbana. Coerentemente con l'appartenenza a una *scienza dell'artificiale* (Simon, 1996 [1968]) [v. capitolo 2], **i modelli urbani non sono dunque una componente sostanziale della materia studiata, bensì strumenti**: di descrizione, analisi, comparazione da un lato — quello speculativo — e di interpretazione, replicazione, alterazione da un altro — operativo. Lontano dal poter fornire indicazioni su una idea universale delle componenti della città — tendenza che ha incontrato limiti più volte denunciati — il fatto urbano può essere la chiave di una definizione puramente operativa di città, corroborata dall'uso che ne può essere fatto anche all'interno di diversi campi disciplinari, e soprattutto nel loro reciproco incontro e confronto. In questa prospettiva, lo studio dei modelli digitali attraverso l'approfondimento degli aspetti morfologici sottesi, può contribuire da un lato alla costruzione di un piano condiviso per l'archiviazione e l'uso di dati, dall'altro a una riflessione epistemologica sulla morfologia urbana.

L'obiettivo dell'approccio proposto non è scoprire una intrinseca "*logic of space*" (*cf.* Berghauser Pont, in Oliveira, 2018, p.105), ma piuttosto identificare un'interpretazione dello spazio che segua una logica operativa condivisa e orientata a uno scopo noto. Le criticità legate alla parzialità delle definizioni e ai limiti applicativi non sono quindi rimosse, ma sono riconosciute e analizzate per rendere trasparenti e falsificabili i processi di astrazione necessari alla costruzione dei modelli. Se l'architetto<sup>76</sup> ha un ruolo nella definizione dei modelli di città, va ripensato ed esteso il suo contributo allo sviluppo dei modelli, degli standard e degli strumenti che stanno plasmando la città digitale.

---

<sup>76</sup> Intendendo in senso lato colui che studia la forma dello spazio costruito ( il morfologo, appunto) senza escludere ricercatori che si occupano di studi urbani e *planning*.

## Riferimenti bibliografici.

- Alexander C.** (1965). A city is not a tree. *Architectural Forum*, 122(1), 58–62.
- Anderson C.** (2008, 23 giugno). The End of Theory: The Data Deluge Makes the Scientific Method Obsolete. *Wired*. <https://www.wired.com/2008/06/pb-theory/> (consultato il 10/04/21).
- Argan G.C.** (1958). Tipologia. In *Enciclopedia universale dell'Arte: Vol. Tipologia-Zurbaran*. Istituto per la collaborazione culturale Sansoni.
- Aymonino C.** (1977). *Lo studio dei fenomeni urbani*. Officina.
- Baraniuk C.** (2015, 18 agosto). How algorithms run Amazon's warehouses. *BBC Future*. <https://www.bbc.com/future/article/20150818-how-algorithms-run-amazons-warehouses> (consultato il 27/04/21).
- Batty M.** (2007). *Cities and Complexity: Understanding Cities with Cellular Automata, Agent-Based Models, and Fractals*. MIT Press.
- Batty M.** (2013). *The New Science of Cities*. MIT Press.
- Batty M.** (2016a). Big Data and the City. *Built Environment*, 42(3), 321–337.
- Batty M.** (2016b). Editorial: Big Data, Cities and Herodotus. *Built Environment*, 42(3), 317–320.
- Berghauer Pont M., Haupt P.** (2007). The Spacemate: Density and the Typomorphology of the Urban Fabric. *Urbanism Laboratory for Cities and Regions: Progress of Research Issues in Urbanism*.
- Berghauer Pont M., Marcus L.** (2015). Connectivity, density and built form: integrating Spacemate with space syntax. *ISUF 2015 XXII International Conference: City as Organism. New Visions for Urban Life*.
- Bettencourt L., West G.** (2010). A unified theory of urban living. *Nature*, 467(7318), 912–913.
- Biljecki F., Stoter J., Ledoux H., Zlatanova S., Çöltekin A.** (2015). Applications of 3D City Models: State of the Art Review. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 4(4), 2842–2889.
- Bobkova E., Marcus L., Berghauer Pont M.** (2017). Plot systems and property rights: morphological, juridical and economic aspects. *ISUF 2017 XXIV international conference: City and territory in the globalization age*.
- Brandi C.** (1956). *Eliante o dell'architettura: Vol. Elicona*. Einaudi.
- Brenner N., Schmid C.** (2014). The 'urban age' in question. *International Journal of Urban and Regional Research*, 38(3), 731–755.
- Caja M., Landsberger M., Malcovati S.** (2010). *Tipologia architettonica e morfologia urbana: il dibattito italiano - Antologia 1960-1980*. Libraccio.
- Çalışkan O., Marshall S.** (2011). Urban Morphology and Design: Introduction. *Built Environment*, 37(4), 381–392.
- Caniggia G., Maffei G.L.** (1982). *Composizione architettonica e tipologia edilizia: lettura dell'edilizia di base*. Marsilio.
- Caniggia G., Maffei G., Marzot N.** (1997). *Ragionamenti di tipologia: operatività della tipologia processuale in architettura*. Alinea.
- Carpo M.** (2017). *The second digital turn: design beyond intelligence*. MIT press.
- Castex J.** (2014). Saverio Muratori (1910–1973): The city as the only model. A critical study, a century after Muratori's birth. In Cavallo R., Komossa S., Marzot N., Berghauer Pont M., Kuijper J. (a cura di), *New Urban Configurations*. IOS Press.
- Conzen M.R.G.** (2012). *L'analisi della forma urbana: Alnwick, Northumberland*. Angeli. [Alnwick, Northumberland: A Study in Town-Plan Analysis. Prima pubblicazione 1960.]
- Cuthbert A.R.** (2007). Urban design: requiem for an era – review and critique of the last 50 years. *URBAN DESIGN International*, 12(4), 177–223.
- Datta A.** (2015). A 100 smart cities, a 100 utopias. *Dialogues in Human Geography*, 5(1), 49–53.
- Fleischmann M., Romice O., Porta S.** (2020). Measuring urban form: Overcoming terminological inconsistencies for a quantitative and comprehensive morphologic analysis of cities. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, 03/2020.

- FULL** (2019). *Which digital tools for the creation of a Digital Open Urban Twin?* Technical Report 1/2019.
- Hidano N.** (2002). *The Economic Valuation of the Environment and Public Policy*. Edward Elgar Publishing.
- Hillier B.** (2007). *Space is the machine: a configurational theory of architecture*. Space Syntax. [Prima pubblicazione 1996.]
- Hillier B., Hanson J.** (1984). *The social logic of space*. Cambridge university press.
- Hillier B., Penn A.** (2004). Rejoinder to Carlo Ratti. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 31(4), 501–511.
- Katsikis N.** (2018). *Visualizing the planetary urban*. Doing Global Urban Research.
- Kropf K.** (2009). Aspects of urban form. *Urban Morphology*, 13(2), 105–120.
- Kropf K.** (2014). Ambiguity in the definition of built form. *Urban Morphology*, 18(1), 41–57.
- Kropf K.** (2017). *The Handbook of Urban Morphology*. Wiley.
- Larkham P.J.** (2002). *Bibliography: Consolidated Urban Morphology reading list*. <http://urbanform.org/bibliography.html#1> (consultato il 10/04/21).
- Larkham P.J.** (2006). The study of urban form in Great Britain. *Urban Morphology*, 10(2), 117–141.
- Lobsinger M.L.** (2006). The New Urban Scale in Italy: On Aldo Rossi's "L'architettura della città". *Journal of Architectural Education*, 59(3), 28–38.
- Lynch K.** (1981). *Good city form*. MIT Press.
- Marshall S., Çalışkan O.** (2011). A Joint Framework for Urban Morphology and Design. *Built Environment*, 37(4), 409–426.
- Martin L., March L.** (1972). *Urban space and structures*. Cambridge University Press.
- Marzot N.** (2002). The study of urban form in Italy. *Urban Morphology*, 6(2), 59–73.
- Mehaffy M.W.** (2011). A City is Not a Rhinoceros: On the Aims and Opportunities of Morphogenetic Urban Design. *Built Environment*, 37(4), 479–496.
- Moudon A.V.** (1997). Urban morphology as an emerging interdisciplinary field. *Urban Morphology*, 3–10.
- Muratori S.** (1960). *Studi per una operante storia urbana di Venezia*. Istituto poligrafico.
- O'Connor S.** (2013, 8 febbraio). Amazon unpacked. *Financial Times*, 8, 2013. <https://www.ft.com/content/ed6a985c-70bd-11e2-85d0-00144feab49a> (consultato il 10/04/21).
- Oliveira V.** (2016). *Urban Morphology: An Introduction to the Study of the Physical Form of Cities*. Springer International Publishing.
- Oliveira V.** (a cura di) (2018). *Teaching urban morphology*. Springer Berlin Heidelberg.
- Ratti C.** (2004a). Rejoinder to Hillier and Penn. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 31(4), 513–516.
- Ratti C.** (2004b). Space Syntax: Some Inconsistencies. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 31(4), 487–499.
- Ross L.** (2010). *Virtual 3D City Models in Urban Land Management - Technologies and Applications*. Technischen Universität Berlin.
- Rossi A.** (1966). *L'architettura della città*. Marsilio.
- Sevtsuk A., Amindarbari R.** (2012). *Measuring growth and change in metropolitan form: Progress report on urban form and land use measures*. City Form Lab.
- Soja E., Kanai M.** (2007). The urbanization of the world. *The Endless City*, 54–69.
- Stoter J., Vosselman G., Goos J., Zlatanova S., Verbree E., Klooster R., Reuvers M.** (2011). Towards a National 3D Spatial Data Infrastructure: Case of The Netherlands. *Photogrammetrie - Fernerkundung - Geoinformation*, 2011(6), 405–420.
- Vanslebrouck I., Van Huylenbroeck G.** (2005). *Landscape amenities: economic assessment of agricultural landscapes*. Springer.
- Walls M., Kousky C., Chu Z.** (2015). Is What You See What You Get? The Value of Natural Landscape Views. *Land Economics*, 91(1), 1–19.
- West G.** (2017). *Scale: The Universal Laws of Growth, Innovation, Sustainability, and the Pace of Life in Organisms, Cities, Economies, and Companies*. Penguin Press.
- Whitehand J.W.R.** (2018). Urban morphology: how interdisciplinary? how international? (Editorial comment). *Urban Morphology*, 22.1.
- Witt A.J.** (2016). Cartographic Metamorphologies; or, Enter the RoweBot. *Log*, 36, ROBOLOG, 115–124.



## **Parte II**



Capitolo 4.  
**Studio dei modelli digitali  
dello spazio urbano.**



---

## 4.1. Studio di casi: metodologia.

### *Obiettivi.*

L'analisi dei modelli tecnici correntemente adottati mira ad individuare le unità spaziali che li compongono per permettere una lettura morfologica e studiarne l'uso. Il reperimento e l'organizzazione dei materiali incontrano però un oggetto di studio frammentato, in rapida evoluzione e raramente inserito in indagini sistematiche. L'aggiornamento di una rassegna per casi applicativi come quella dello UCL, che — solo 20 anni fa — contava meno di 100 modelli di città (Batty *et al.*, 2000), dovrebbe oggi confrontarsi con un numero enorme di casi, date la pervasività e la varietà degli strumenti, dei metodi e dei domini disciplinari che realizzano la città digitale.

Il metodo di ricerca adottato si concentra quindi sullo studio delle piattaforme che possono essere catalogate come *digital twin*, ovvero aggregatori di diversi modelli e applicazioni. L'evoluzione dei modelli di città è accompagnata dalla crescente necessità di condividere informazioni tra discipline e piani di analisi diversi. Tuttavia, dai primi esperimenti alle rassegne più recenti, gli studi sulla digitalizzazione dello spazio urbano, insieme al gran numero degli esiti applicativi, mettono a fuoco l'eterogeneità dei dati, delle funzioni, dei metodi di rappresentazione impiegati. Solo negli ultimi anni è invece emerso il potenziale commerciale della raccolta di informazioni in un unico modello, nella forma degli *urban digital twin*. La scelta di questi oggetti come materiale d'analisi è legata all'intento di dare rilievo a come i modelli siano sempre più terreno di convivenza di diversi strati conoscitivi, e di portare l'attenzione su aspetti complementari alle precedenti rassegne, basate su avanzamenti disciplinari e soluzioni tecniche in campi specifici.

La letteratura sui *3D city model* resta però la griglia di riferimento metodologico e tassonomico per questa fase della ricerca. Almeno due tendenze mettono in continuità i *digital twin* con lo sviluppo dei modelli tecnici di città. La prima è ***l'integrazione dei dati***, che ha allargato l'interesse per i modelli oltre il dominio della progettazione e che avanza verso la trasmissione in tempo reale di informazioni tramite l'internet delle cose. La seconda tendenza è ***la generazione automatica*** di elementi e dati analitici, che ha reso sostenibile la costruzione di modelli estesi e che oggi fa ricorso all'intelligenza artificiale per estrapolare senso dai *big data*.

Lo studio di questi caratteri dei modelli è centrale per riflettere sul ruolo della morfologia urbana e verificare le ipotesi del lavoro. Alla morfologia è infatti attribuita la capacità di allineare diverse letture disciplinari dei fenomeni urbani (Kropf, 2009). Individuando un piano di confronto tra lo studio della forma urbana e l'uso degli strumenti digitali, si vogliono chiarire i limiti dei modelli adottati e tracciare alcune direttrici per il loro sviluppo ed impiego.

L'approfondimento presenta quindi un quadro dei gemelli digitali di città che le amministrazioni e i produttori di servizi informatici per la *smart city* stanno oggi costruendo o promuovendo. Questo permette di comprendere meglio come la genealogia delle applicazioni di *computer technology* porti alle forme correnti della città digitale, delineando uno stato dell'arte sulla modellazione digitale dello spazio urbano. Inoltre, si identificano le categorie di attori coinvolti nello sviluppo degli strumenti e si svolgono nodi di ragionamento sulle fonti di informazione che li raccontano e sul tipo di soggetti che li producono; questi passaggi fanno emergere alcune criticità nello studio della materia. Si evidenziano infine alcuni fattori di inefficienza nel rapporto tra produzione dei modelli e trasformazione / conoscenza della città, come i rapidi tempi del "decadimento" degli apparati tecnici e narrativi e l'iper-realismo grafico delle rappresentazioni.

### *Fonti principali.*

Dalla prima ricognizione dei gemelli digitali di città emergono due principali gruppi di informazioni. Da una parte la letteratura scientifica documenta lo sviluppo dei singoli metodi e strumenti, o ne elenca i possibili usi entro domini molto specifici. Come già considerato da Biljecki *et al.* (2015), avviare una sistematizzazione da queste informazioni richiede un confronto con tecniche a volte molto distanti e approcci analitici poco generalizzabili.

Il coordinamento degli strumenti in piattaforme integrate per la città virtuale è invece trattato in fonti per lo più di altro genere. Lo sviluppo delle piattaforme è in molti casi prerogativa e capacità di servizi commerciali, come già è stato per la diffusione dei modelli informativi dall'inizio del millennio (Ross, 2010; Stoter *et al.*, 2011, Stoter *et al.*, 2013). Al di là degli standard di interscambio, non sono molti gli strumenti aperti per la realizzazione di modelli 3D di città, il che moltiplica la varietà degli approcci e alimenta una conoscenza frammentata.

Lo studio esamina le rassegne sui *3D city model* già redatte, soprattutto nell'ambito delle *geo-information sciences* e del GIS 3D, tra le quali il lavoro di Biljecki *et al.* (2015) è uno dei più recenti e comprensivi. Sulla base di questa

letteratura, sono discussi i principi di classificazione dei modelli. Le *review* esistenti sono aggiornate e integrate attraverso la raccolta delle informazioni sui *digital twin*, nei quali si possono riconoscere i più recenti sviluppi dei *3D city model* e il *focus* sulla condivisione di livelli informativi eterogenei. L'indagine raccoglie alcune piattaforme che sono effettivamente promosse con l'etichetta di *digital twin*, ma anche progetti analoghi che mettono assieme più applicazioni dei modelli digitali.

Molti sistemi di *twinning* hanno una forte presenza mediatica, procurata dalle aziende che producono software e offrono servizi per la *smart city* e l'*information modeling*. Per questi casi sono reperibili risorse, soprattutto *online*, che comprendono documenti informativi dei produttori e dei committenti, video promozionali, articoli di cronaca e resoconti di *convention*. Altre informazioni sono raccolte dai resoconti del progetto o di progetti satellite, principalmente in relazione alle parti dello sviluppo svolte in contesto pubblico o accademico. In un ridotto numero di casi — e, ancora, per contributi non privati — alcune informazioni di maggior dettaglio tecnico e operativo sono documentate nella letteratura scientifica.

Il lavoro sul campo svolto nelle attività di laboratorio ha contribuito alla valutazione e all'orientamento degli approfondimenti, richiedendo anche la considerazione delle fonti più specialistiche e parziali<sup>77</sup>. Lo sviluppo di prototipi ha consentito un dialogo con la dimensione tecnica, attraverso la costruzione e la calibrazione di modelli digitali dello spazio architettonico e urbano, e attraverso il confronto diretto con gli standard per l'organizzazione dei dati spaziali.

### *Materiali e criteri di selezione.*

La ricerca studia diversi casi di città che impiegano i modelli spaziali come piattaforme di servizi e dati urbani. L'obiettivo non è un elenco esaustivo ma la raccolta di materiale sufficiente a comprendere la varietà di progetti che possono essere detti *urban digital twin*. Vogliamo inoltre isolare in questi una serie di usi dei modelli confrontabile con i precedenti studi. Una criticità è il riconoscimento dei casi rilevanti in un panorama in cui il termine *digital twin* è esploso come "*buzzword*", ed è quindi associato anche a progetti che cavalcano l'attenzione diffusa senza un riscontro consistente nei contenuti. D'altra parte si rilevano casi

---

<sup>77</sup> Un primo elenco di casi è stato prodotto durante la ricerca preliminare per il progetto *DOUT - Digital Open Urban Twin* del centro *FULL*, coordinato da Antonio Vetrotto ([FULL, 2019](#)).

che, pur non facendo ricorso a questa etichetta, contribuiscono allo stato dell'arte dei modelli tecnici.

Alcuni criteri hanno quindi guidato la ricerca e la selezione dei casi.

**L'integrazione di diversi livelli conoscitivi e operativi è un primo carattere richiesto.** Alla base dell'ottimismo che accompagna l'abbondanza di dati, si trova la possibilità di mettere a reagire le descrizioni di diversi fenomeni urbani, individuando associazioni, correlazioni, *pattern* (Batty *et al.*, 2012). Molti strumenti e metodi agevolano il coordinamento delle informazioni, in particolare attraverso l'interazione delle rappresentazioni geometriche con basi di dati. I modelli alla scala urbana includono sistemi di BIM e GIS, che offrono da tempo queste funzioni e sottostanno a standard internazionali per l'organizzazione logica dei contenuti. La connessione a un archivio strutturato è anche un requisito necessario dei sistemi di internet delle cose, per automatizzare la lettura e l'elaborazione dei dati.

Lo studio di questi aspetti dei modelli considera come l'integrazione sia raggiunta e quali risultati siano ottenuti in relazione agli scopi conoscitivi; si pongono inoltre le premesse per uno snodo di ragionamento critico sulla capacità della morfologia urbana di coordinare diversi sguardi disciplinari.

**Un secondo criterio per l'identificazione di casi rilevanti è l'immediatezza dello scambio di segnali tra oggetto fisico e riproduzione digitale.** La corrispondenza *seamless* delle due realtà è l'ideale che ha condotto alla definizione stessa di *digital twin* nella produzione industriale. Tuttavia, nell'ambito urbano, la velocità di trasmissione necessaria al modello è soggetta a interpretazioni anche molto diverse, che vanno dalla comunicazione in tempo reale all'intervallo della pianificazione strategica. Il Center for Digital Built Britain (Bolton *et al.*, 2018) divide le possibili scale temporali su cui il gemello lavora in *operational scale*, *reactive maintenance scale*, *planned maintenance scale* e *capital investment scale*. Diversamente, Batty (2018, p.818) distingue una "*high-frequency city*", con cui i modelli interagiscono nel breve periodo, e una "*low-frequency city*", che opera nel lungo termine, attribuendo solo alla prima gli strumenti di *twinning*. Questa suddivisione ricalca due categorie di funzioni dei modelli riconosciute da Wildfire (2018): quelle "*reactive*", quasi in tempo reale, per la gestione della città allo stato di fatto, e le funzioni "*predictive*", che includono simulazioni e il *test-bedding* di scenari di trasformazione, per il supporto alle decisioni.

In termini generali, per i casi selezionati parliamo di modelli "reattivi". Non sono quindi considerati i modelli esclusivamente previsionali, il cui ruolo nella progettazione e nelle applicazioni di visualizzazione è già ampiamente discusso in letteratura. Con "reattività" ci riferiamo all'interazione con la città non mediata da operatori umani, in un senso ampio: non si tratta solo della capacità dei modelli agire, ma anche della documentazione e dell'interpretazione dei fenomeni urbani. Da un lato, la componente computazionale è oggi in grado di intervenire direttamente sullo spazio fisico attraverso attuatori. Ma più spesso, allo stato attuale di sviluppo, agli algoritmi è deputata la raccolta e l'elaborazione dei dati — attraverso sensori e la comunicazione con molti *database*. Pur intesa entro questi limiti, la reattività permette di distinguere i casi di *digital twin* dai modelli detti *digital shadow*, per i quali non è prevista l'alterazione dell'oggetto reale. I modelli rilevanti non si limitano quindi alla descrizione dei fenomeni ma sono inseriti in processi trasformativi<sup>78</sup>.

Gli *urban digital twin* studiati prevedono quindi un'elaborazione digitale non mediata nella lettura della città o nella sua trasformazione, e prevedono un *feedback* sulla città. Questo carattere dei modelli consente di indagare le criticità legate alla capacità degli *urban operating system* di aggregare dati "*to effect action at a distance*" (Marvin e Luque-Ayala, 2017).

**Un terzo criterio è il focus sulla forma.** Già l'analisi del CASA (Batty *et al.*, 2000) ha evidenziato un processo di fusione delle rappresentazioni 3D alle mappe bidimensionali nelle applicazioni di modelli di città. Nella pratica, l'uso di funzioni analitiche è rimasto in molti casi legato al GIS 2D, mentre la terza dimensione è stata spesso privilegiata per i vantaggi di una visualizzazione meno astratta (Wong, 2015; Biljecki *et al.*, 2015). Le derive dette *naïve realism* o *naïve cartography*<sup>79</sup>, ovvero la preferenza della restituzione realistica senza chiari benefici operativi, sono riscontrabili anche nei *digital twin*.

Qui si ricercano le rappresentazioni tridimensionali che incorporano capacità analitiche, in primo luogo per portare l'attenzione sulla forma del costruito e su come è usata per mettere a sistema i diversi strati informativi. Inoltre si studiano

---

<sup>78</sup> Il *feedback* sulla città non è necessariamente automatizzato, come prevede ad esempio la definizione di *urban digital twin* di Bolton *et al.* (2018) e a differenza di ciò che risulta per i *digital twin* in ambito industriale (Kritzinger *et al.*, 2018; Fuller *et al.*, 2020).

<sup>79</sup> Si vedano le seguenti pubblicazioni, citate in Biljecki *et al.* (2015): Smallman H.S., Cook M.B., Manes D.I., Cowen M.B. (2007). *Naïve realism in terrain appreciation*. In *Proceedings of the human factors and ergonomics society annual meeting* (Vol. 51, No. 19), 1317–1321. SAGE Publications. Hegarty M., Smallman H.S., Stull A.T., Canham M.S. (2009). *Naïve cartography: How intuitions about display configuration can hurt performance*. *Cartographica: The International Journal for Geographic Information and Geovisualization*, 44(3), 171–186.

le scelte di astrazione connaturate ai modelli e si valuta come l'anelito, opportuno e meno, verso una maggiore verosimiglianza possa contribuire alla confusione di reale e virtuale che limita il potenziale operativo degli strumenti. Sono dunque esclusi dall'analisi casi come i *city dashboard* che raccolgono dati urbani, anche in tempo reale, in varie forme — statistiche, video, mappe, dati da sistemi di sensori e attuatori — senza usare modelli tridimensionali per la connessione e l'elaborazione di dati.

In sintesi, sono selezionati esempi di *digital twin* le cui componenti prevedono l'interazione fra strati diversi di informazioni urbane — anche impiegando più di un modello —, velocità e automazione nella trasmissione di dati con la città reale, e la descrizione tridimensionale dello spazio fisico.

### *Segmentazione e terminologia.*

Dalla letteratura sui modelli tecnici di città e sulle loro applicazioni, emerge una terminologia poco coerente e spesso ambigua<sup>80</sup>. La proposta di Biljecki *et al.* (2015) per l'analisi dei *3D city model* cerca di chiarire le categorizzazioni usate e i rapporti che le legano. Il lavoro classifica i modelli di città secondo i *casì d'uso* che consentono di realizzare ("*use cases*"). Inoltre, si definiscono le *applicazioni* ("*applications*") che forniscono dati di approfondimento sui casi d'uso, facendo un riferimento più puntuale ai campi di impiego [figura 21].

La definizione di *use case* adottata da Biljecki *et al.* (2015) è basata sull'uso del termine nell'ingegneria dei sistemi<sup>81</sup>. Un *caso d'uso* è una sequenza di azioni svolte dal modello digitale di città. I casi d'uso rilevanti comprendono azioni svolte sulla base di un set di dati spaziali e operazioni spaziali. La definizione di un *caso* prevede un utente e un obiettivo dell'utente: la sequenza di azioni permette di raggiungere il determinato obiettivo e produce un valore per l'utente. Inoltre, il *caso* è connesso a una disciplina o settore per cui può produrre un effettivo beneficio. Lo stesso studio definisce una *applicazione* come l'impiego dei casi d'uso nel contesto di uno specifico dominio disciplinare o professionale. Per esempio, il *calcolo del volume degli edifici* è un'operazione spaziale che abilita diversi casi d'uso, come la stima del fabbisogno energetico, o la stima del numero di abitanti. Quest'ultimo uso dei modelli trova diverse *applicazioni*: nel

---

<sup>80</sup> Tra le classi usate si trovano: "*categories of use*" (Batty *et al.*, 2000), "*applications*" (Batty *et al.*, 2000; Ross, 2010; Biljecki *et al.*, 2015), "*use cases*" (Biljecki *et al.*, 2015), "*functions of use*" (Ross, 2010), "*use case studies*" (Stoter *et al.*, 2011).

<sup>81</sup> Uno *use-case* è definito come "[a] sequence of actions a system performs that yields an observable result of value to a particular user" (Jacobson *et al.*, 2016).

dominio della risposta alle emergenze può permettere il calcolo delle persone da evacuare; nella modellazione ambientale può servire a misurare il numero di persone interessate da un disturbo sonoro, ad esempio.

La classificazione in *casi d'uso* e *applicazioni* è qui considerata anche per i *digital twin*. L'obiettivo è individuare i molti modelli spaziali inclusi in quel "sistema di sistemi" che è il gemello virtuale (Datta, 2017) e analizzare più nel dettaglio gli stessi. La scelta permette un confronto con le precedenti rassegne di *3D city model* e l'uso delle categorie già individuate come schema di partenza, anche critico. Inoltre, la classificazione proposta risponde alla necessità, in questa prima fase di analisi, di riconoscere nelle narrazioni sul concetto di *digital twin* i caratteri comuni derivati dagli strumenti digitali che impiegano, rimandando ad una letteratura anche tecnica. Lo studio dei *digital twin* è quindi teso a individuare i casi d'uso, e attraverso questi i *dati spaziali* e le *operazioni spaziali* impiegate dai modelli che oggi adottiamo per governare e conoscere la città. L'ipotesi è che questi requisiti *tecnici* dei modelli, legati agli strumenti digitali, alle pratiche e agli standard relativi possano essere letti criticamente e confrontati con un approccio morfologico. Attraverso l'interpretazione dei materiali raccolti, si vogliono infine individuare le *unità spaziali* sottese, e studiare le relazioni di queste con gli scopi dichiarati dei *digital twin* e con lo scopo generale di una condivisione interdisciplinare delle informazioni.

I *digital twin*, spesso presentati come soluzioni unitarie e *hub* di ogni visione digitale dello spazio costruito, sono nei fatti *patchwork* di metodi e strumenti, simili alle applicazioni di modelli geo-spaziali che li hanno preceduti (Ross, 2010; Stoter *et al.*, 2011; Biljecki *et al.*, 2015). Le informazioni sulla composizione di questi modelli provengono principalmente da materiale promozionale e dai *report* sui progetti avviati e solo limitatamente da una letteratura scientifica che confronta i nuovi modelli integrati con i precedenti. Le *applicazioni* dei modelli risultano quindi il dato più facilmente reperibile. Sono invece indiretti i riferimenti all'effettivo funzionamento degli strumenti e delle piattaforme.

Rispetto al lavoro di Biljecki *et al.* (2015), ci sembra necessario rendere più specifica la definizione di *applicazione*. Parliamo di una *applicazione* per indicare l'adozione di un modello come soluzione a un problema determinato. Nell'analisi dei singoli casi di *digital twin* selezionati, poniamo quindi particolare attenzione all'individuazione delle applicazioni di modelli digitali. Se parliamo di caso applicativo per il singolo sistema sviluppato o adottato in una città / *digital twin* — ad esempio una piattaforma di visualizzazione per rendere pubblici i piani di sviluppo urbano —, cerchiamo invece di definire *applicazione* un più generale approccio a un problema, potenzialmente replicabile in altri contesti. Ad esempio,

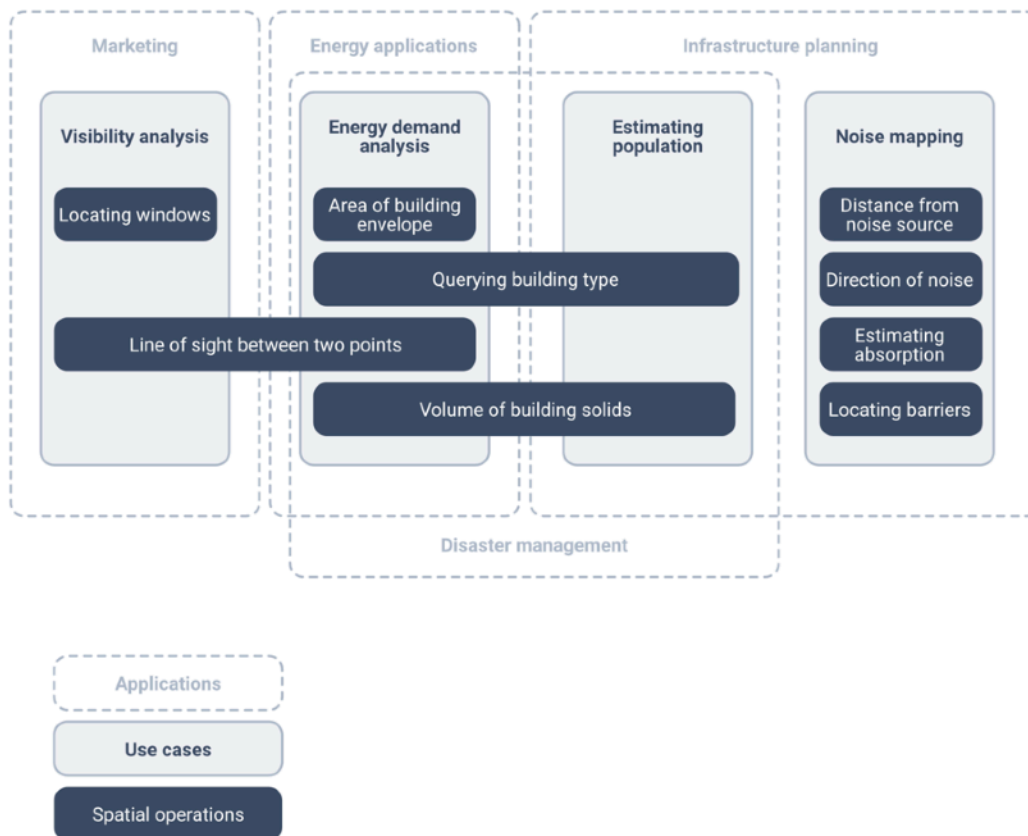


Figura 21. Schema delle interazioni tra *operazioni spaziali*, *casi d'uso* e *applicazioni* nella tassonomia proposta da Biljecki *et al.* (2015). Immagine tratta da Biljecki *et al.* (2015, p.2847) e rielaborata dal candidato.



lo strumento Virtual Zurich è uno dei *casì applicativi* che fanno parte del *digital twin* della città di Zurigo [sezione 4.2: DT.1] ed è interpretato come una classe di *applicazioni* per la visualizzazione online per la cittadinanza.

Un'altro aspetto da approfondire è il rapporto delle applicazioni e dei casi d'uso con gli specifici domini disciplinari. Ipotizziamo, in coerenza con Biljecki *et al.* (2015), che il problema per cui si adotta un'applicazione del modello sia associato ad un dominio disciplinare. Tuttavia, nella loro definizione, anche il caso d'uso è connesso a una specifica disciplina o settore per cui può produrre un effettivo beneficio. In questo caso assumiamo che il dominio disciplinare di interesse dell'utente non sia determinante per la distinzione dei casi d'uso, ma possa esserlo per le applicazioni. Per chiarire il diverso ruolo dell'utente nelle due classificazioni introduciamo una distinzione tra *obiettivo* e *scopo*. L'impiego della sequenza di azioni che compone un caso d'uso consente il raggiungimento di un *obiettivo*, inteso come un output oggettivo e quantificabile. Lo *scopo* indica il *perché* della scelta di quelle azioni in una determinata applicazione. Dunque, i diversi domini di interesse degli utenti che trovano utile una determinata sequenza di azioni non distinguono due casi d'uso, ma possono portare a due diverse applicazioni che fanno lo stesso uso del modello. Questo principio trova riscontro nella stessa descrizione dei casi d'uso di Biljecki *et al.* (2015), nonostante l'ambiguità evidenziata [v. figura 21].

In questa ricerca, i due ordinamenti — casi d'uso e applicazioni— sono usati come passaggi successivi. Il primo è l'enumerazione delle possibili applicazioni associate ai *digital twin*. Si procede poi con l'individuazione del *toolkit* che rende possibili le applicazioni, dove il *toolkit* è l'insieme di modalità d'impiego delle tecnologie e dei dati, ovvero l'insieme dei casi d'uso. A partire dai casi d'uso, gli ulteriori passaggi dell'analisi sono orientati a riconoscere le *unità spaziali* su cui dati e operazioni spaziali si fondano [sezione 5.3]. Le classificazioni proposte non possono tendere ad elenchi esaustivi, né sono ritenute le uniche possibili per ordinare i modelli tecnici. La discussione sui metodi di classificazione è prima di tutto funzionale a rendere il più possibile coerenti le classi individuate. L'altro requisito, già sottolineato, è rendere confrontabili i risultati con lavori esistenti. Il fulcro di questa parte del lavoro è il tentativo di rendere più facilmente leggibile la materia vasta e poco ordinata dei gemelli digitali di città.

Nel prossimo capitolo [sezione 5.1] saranno analizzati più nel dettaglio i caratteri descrittivi e i criteri di suddivisione dei casi d'uso.

---

## 4.2. Casi di *urban twinning*.

La sezione presenta un'analisi dei casi riconosciuti come *urban digital twin* entro la definizione riformulata nella sezione precedente. L'analisi è condotta su 9 casi, di cui 5 relativi a città europee o loro parti [DT.1, DT.2, DT.5 DT.7, DT.9] e i restanti 4 relativi a città extraeuropee [DT.3, DT.4, DT.6 DT.8]. L'analisi comprende esempi più noti alla letteratura sul tema — comunque limitata — e altri casi significativi identificati con approccio empirico nel corso delle attività di ricerca sul campo. Un numero maggiore di progetti di digitalizzazione degli *asset* urbani è stato considerato e filtrato secondo i parametri definiti nella sezione precedente e secondo la possibilità di reperire sufficienti informazioni entro lo scopo della tesi. La selezione è dunque parziale e allargabile attraverso successive ricerche. L'obiettivo è raccogliere e ordinare materiali sufficienti a un primo studio morfologico orientato all'individuazione di unità spaziali dei molti modelli digitali di città realizzati nei progetti di *twinning* [capitolo 5].

### *DT.1. Zurigo.*

Coordinando diverse agenzie pubbliche e centri di ricerca, la città di Zurigo (CH) ha lavorato alla costruzione di un inventario delle informazioni digitali sulla città basato su un modello tridimensionale dinamico. Questo è stato costruito attraverso diverse integrazioni e applicazioni di un primo modello geometrico, realizzato nel 2011, e sulla base dei programmi strategici della municipalità per la digitalizzazione dei servizi. L'esigenza di un modello dinamico per sostituire i tradizionali approcci dell'amministrazione scaturisce dalla prospettiva di una città in forte crescita demografica — è previsto un aumento della popolazione del 25% in 20 anni — e dalla volontà di innescare un processo di sviluppo partecipato. Inoltre, la digitalizzazione della città supporta il programma Smart City Zürich, varato nel 2018 e pensato per coordinare lo sviluppo tecnologico nell'amministrazione e nello sviluppo urbano [a]. La città, piuttosto che affidarsi a servizi commerciali centralizzati, ha prodotto il modello principale a partire dal lavoro di agenzie e uffici specializzati in modellazione geo-spaziale — Department of Building and Planning, GIS Centre for Geomatics + Surveying — e partner accademici.

Le applicazioni del modello si appoggiano a estensioni basate su diverso software (principalmente servizi web) [b, c]. Nonostante l'interazione con sistemi di sensori sia programmata, le forme di aggiornamento in tempo reale non sono ben documentate e risultano principalmente legate a un aggiornamento manuale, pur rapido e agevolato dai mezzi digitali — ad esempio le aziende di servizi aggiornano i dati sulle infrastrutture con cadenza settimanale. Anche l'operatività del modello dipende dalle azioni dei decisori, basate sui dati aggiornati con diversa frequenza. L'adozione del termine *digital twin* è comunque spiegata con riferimenti alle capacità di aggiornamento in brevi intervalli di tempo e per analogia con ai progetti di digitalizzazione di dati e servizi come quelli di Helsinki e Singapore. I principali usi del modello sono legati alla comunicazione e alle simulazioni.

*L'elenco delle fonti e altri approfondimenti sono consultabili in [appendice \[A1: DT.1\]](#).*

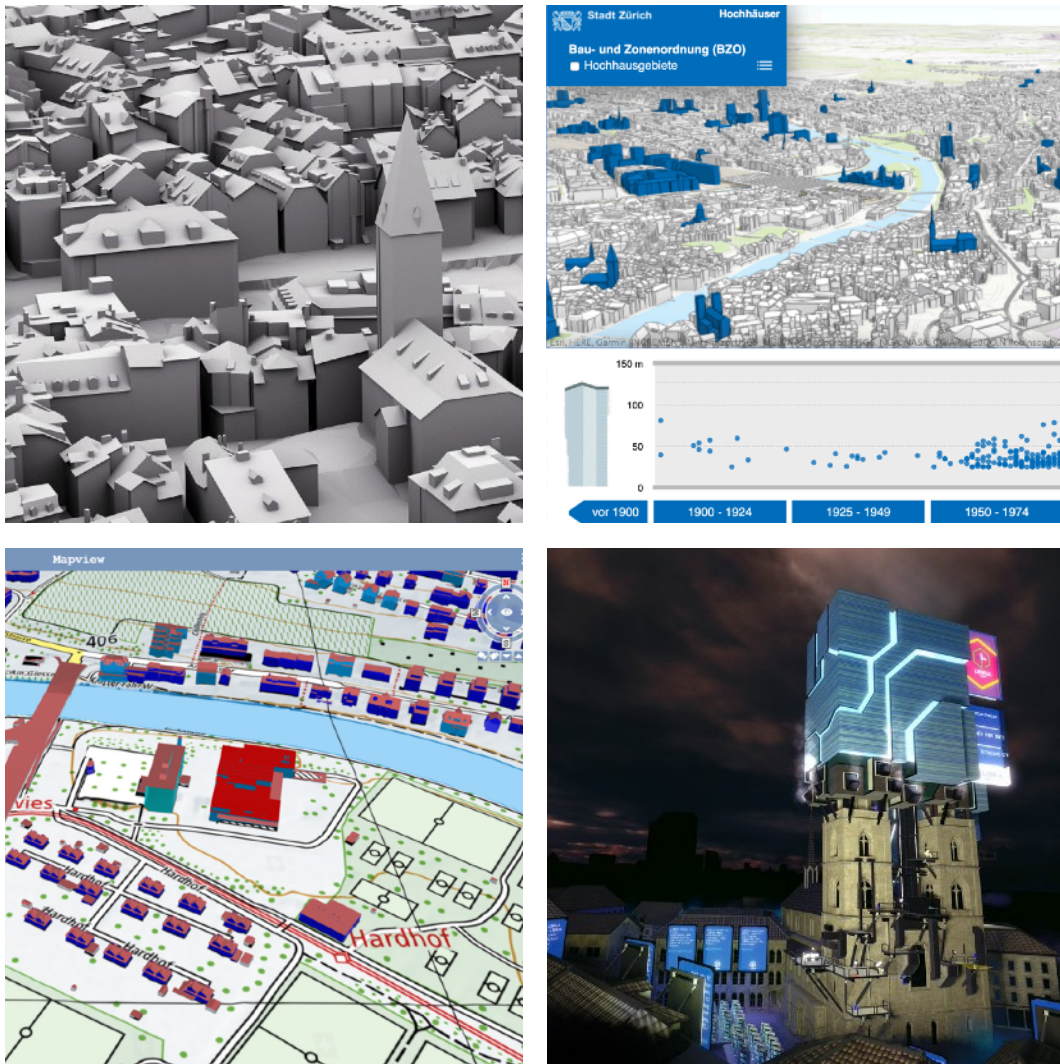


Figura 22. Applicazioni del *digital twin* di Zurigo. *i.* Render del modello 3D di Zurigo con dettaglio della geometria dei tetti (LoD2) [e]. *ii.* Servizio pubblico *online* Hochhaus-Viewer per la visualizzazione e l'interrogazione degli edifici più alti della città, esistenti e progettati [b]. *iii.* Strumento di visualizzazione *online* che sfrutta i *dataset* aperti per mostrare in contemporanea mappe GIS e modelli 3D con colorazioni condizionali [d]. *iv.* Immagine dal videogioco *Reformat Z*, che sfrutta i dati CAD del modello [a].

## *DT.2. Helsinki – Kalasatama.*

Nel 2014, la città di Helsinki (FI) ha scelto il distretto di Kalasatama, interessato da un piano di nuova costruzione e retrofitting, come caso pilota per la costruzione di una urban platform che raccolga e coordini le informazioni digitali, comprese quelle inviate da sensori [b]. Il *digital twin* fa parte del progetto Smart Kalasatama ed è sviluppato con i contributi di diversi progetti europei, tra cui un progetto Horizon 2020 orientato alla sostenibilità ambientale tramite ICT<sup>82</sup>, e di un progetto governativo per la digitalizzazione dell'ambiente costruito e del settore delle costruzioni (KIRA-digi project) [e]. L'obiettivo principale è rendere più efficienti gli edifici dal punto di vista energetico, per contribuire alle strategie della città per il controllo climatico.

Le principali applicazioni connesse direttamente al modello riguardano la disponibilità di dati aperti e la visualizzazione. Il modello è predisposto per la gestione di dati da sensori, ma non risultano ancora applicazioni significative. L'infrastruttura informatica che ospita le informazioni del modello è un database SQL (PostgreSQL con estensione spaziale PostGIS). A questa si appoggiano le applicazioni web, i servizi di visualizzazione e gli strumenti di analisi. Alcuni di questi servizi non sono ancora connessi direttamente al modello, ma sono il risultato di complessi processi di esportazione. Il servizio di visualizzazione basato sul software CityPlanner, ad esempio, interagisce solo con le informazioni geometriche del database in forma di *mesh* (il DSM ad esempio), passando per il software di modellazione SketchUp e attraverso una conversione delle coordinate.

*L'elenco delle fonti e altri approfondimenti sono consultabili in [appendice \[A1: DT.2\]](#).*

---

<sup>82</sup> MySMARTLife Horizon 2020, grant agreement n. 731297.

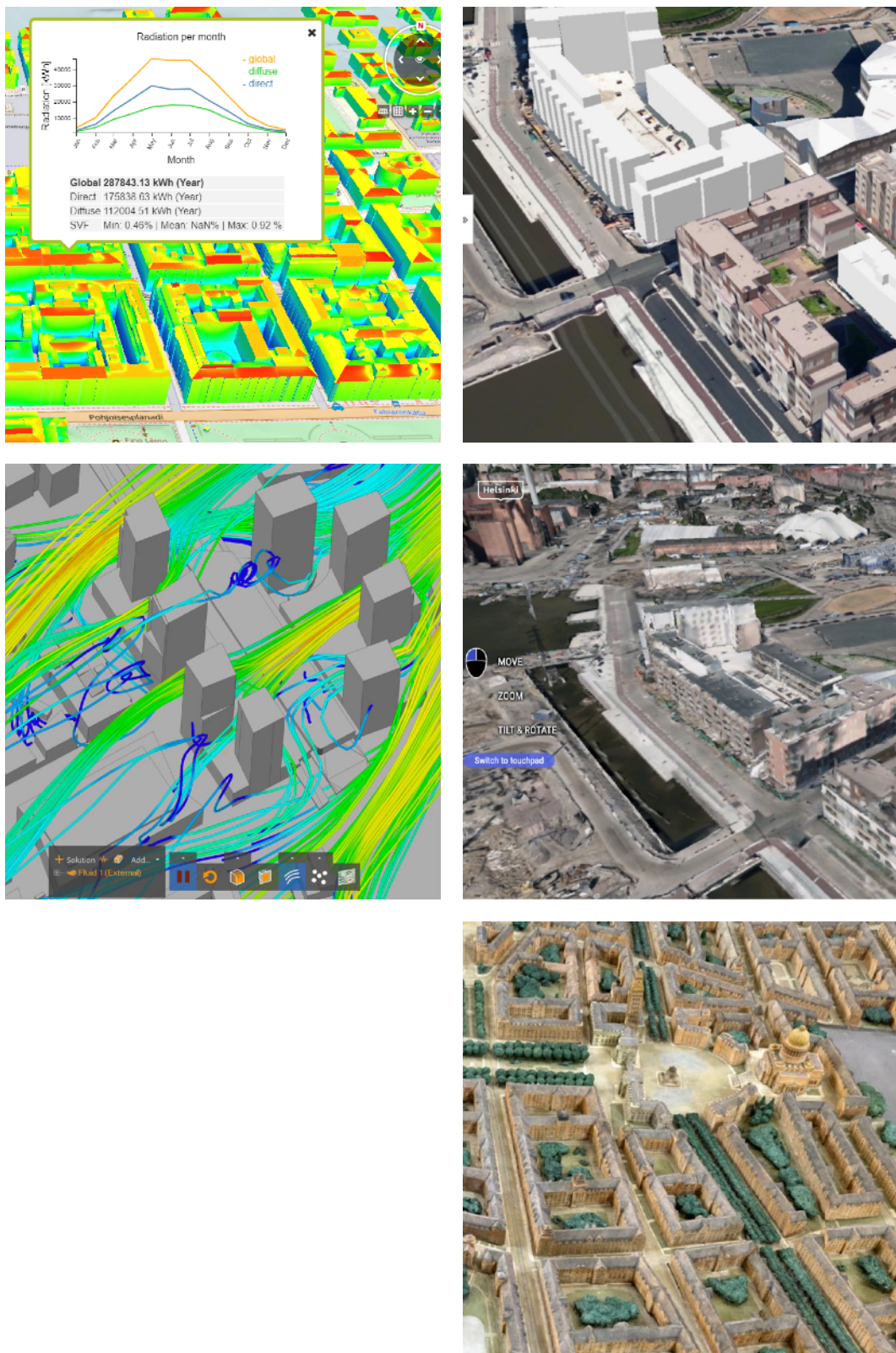


Figura 23. Applicazioni dei modelli realizzati per Kalasatama e Helsinki. *i.* *Energy and Climate Atlas* [i]. Il servizio, consultabile *online*, permette di accedere a dati come consumi energetici, riscaldamento e potenziale solare dei tetti, alla scala dell'edificio e in forma di mappe bidimensionali. *ii.* Modello 3D (LoD2) *online* con *texture* fotografiche [e]. *iii.* Output degli strumenti di simulazione del vento applicati al modello [a]. *iv.* DSM interattivo di Helsinki disponibile tra i servizi *web* pubblici della città [k]. *v.* Modello *mesh* ottenuto dal modello fisico del progetto urbano del 1915 di Eiel Saarinen, non realizzato [a].

### *DT.3. Singapore.*

Virtual Singapore è un modello di città dalla grafica realistica sviluppato con un programma da 73 M\$ di durata quinquennale, iniziato nel 2016, ma introdotto con una sperimentazione a partire dal 2013. Il gemello virtuale di Singapore è stato costruito con il servizio 3DEXPERIENCity di Dassault Systèmes, basato sulla piattaforma 3DEXPERIENCE. La città-stato di Singapore ha portato avanti uno tra i primi tentativi di realizzare la cosiddetta *smart city* [h]. Già dal 1981, Singapore ha avviato iniziative per affermarsi come una *"Intelligent Island"* [i]. Dopo un decennio di investimenti in ICT e alfabetizzazione digitale, nel 1991 il governo ha predisposto un piano destinato a rendere ogni aspetto della vita sociale il più possibile sostenuto da infrastrutture informatiche [k]. Il progetto del *digital twin* è parte di un'iniziativa del governo che dichiara di voler realizzare la prima *"Smart Nation"* al mondo.

Il sistema prodotto da Dassault Systèmes è programmato per interagire con una degli ambienti più densamente popolati di sensori al mondo [g], per realizzare e visualizzare simulazioni e scenari di trasformazione e per organizzare semanticamente le informazioni sullo spazio urbano. L'obiettivo è fornire strumenti per l'amministrazione, i privati e i centri di ricerca.

La piattaforma 3DEXPERIENCE è basata su strumenti di modellazione BIM, ma può gestire dati in formati geo-spaziali (CityGML, nuvole di punti, *shapefile*...). La piattaforma comprende strumenti di visualizzazione ed esplorazione del modello che permettono *query* e colorazioni condizionali in funzione degli attributi degli elementi. Molta della comunicazione legata al progetto Virtual Singapore presenta i modelli con una resa fotorealistica di grande dettaglio, realizzata con *texture* applicate alle geometrie. Gli strumenti di simulazione possono produrre analisi della propagazione del rumore, dell'irraggiamento e dell'efficienza energetica degli edifici, del microclima urbano e dell'inquinamento dell'aria. Le diverse informazioni, dagli elementi geometrici e i relativi metadati ai risultati delle elaborazioni, sono memorizzate in un unico database.

*L'elenco delle fonti e altri approfondimenti sono consultabili in [appendice \[A1: DT.3\]](#).*

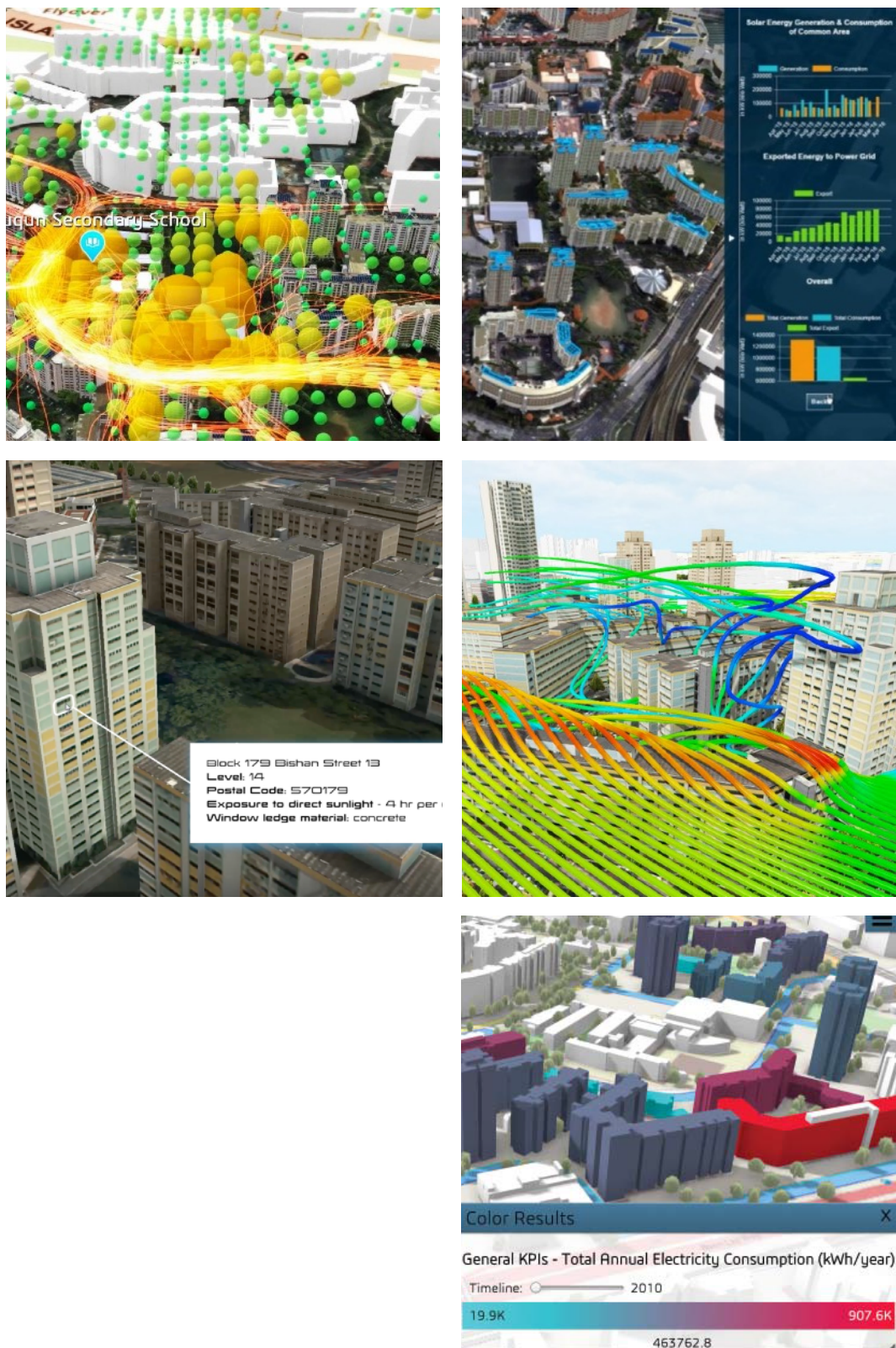


Figura 25. Applicazioni realizzate nell'ambito del progetto Virtual Singapore. *i.* Visualizzazione di flussi tracciati con GPS in sovrapposizione al modello 3D [g]. *ii.* Analisi del potenziale solare dei tetti [a]. *iii.* Vista del modello 3D con *texture* fotografiche e rappresentazione degli strumenti di estrazione di informazioni alla scala del BIM e dati analitici [a]. *iv.* Rappresentazione di output dei sistemi di simulazione del vento [g]. *v.* Visualizzazione di informazioni sui consumi energetici con colorazione condizionale degli edifici [n].



#### *DT.4. Amaravati.*

Amaravati è una città di fondazione progettata per essere la capitale dello stato indiano dell'Andhra Pradesh. La città è pianificata già dal 2015, ma nel 2017 un nuovo progetto è affidato allo studio Foster + Partners e alla società di consulenza Surbana Jurong. La costruzione della città e del suo *digital twin* sono pensate come processi paralleli, che prevedono la graduale interrelazione di modello e reale attraverso sistemi di sensori e il monitoraggio dell'avanzamento dei cantieri integrato nella piattaforma digitale. Il *digital twin* è realizzato attraverso il software Smart World Pro prodotto da Cityzenith. Il prototipo è stato presentato all'inizio del 2019, tuttavia la costruzione della città è bloccata a causa della riduzione drastica degli investimenti da parte del nuovo governo dello stato [e].

Il sistema offerto dalla piattaforma di Cityzenith è basato sull'importazione di dati spaziali in una grande varietà di formati, sia geografici che di modellazione informativa alla scala architettonica e degli impianti. Il sistema può anche integrare documenti non spaziali, come immagini e documenti, connessi a posizioni specifiche ("*spatial tags*") nello spazio del modello digitale. Sulla base di queste funzioni, è previsto che il modello sia usato come servizio per l'interazione dei cittadini con l'amministrazione. Inoltre, la piattaforma permette alcune simulazioni fisiche, come analisi del microclima urbano basate su scenari progettuali alternativi.

Le informazioni sullo stato di avanzamento del modello digitale — prevalentemente reperite in internet — mostrano un'estensione ridotta e poca elaborazione nella modellazione geometrica, permettendo di ipotizzare che l'operatività del sistema sia ancora limitata.

*L'elenco delle fonti e altri approfondimenti sono consultabili in [appendice \[A1: DT.4\]](#).*

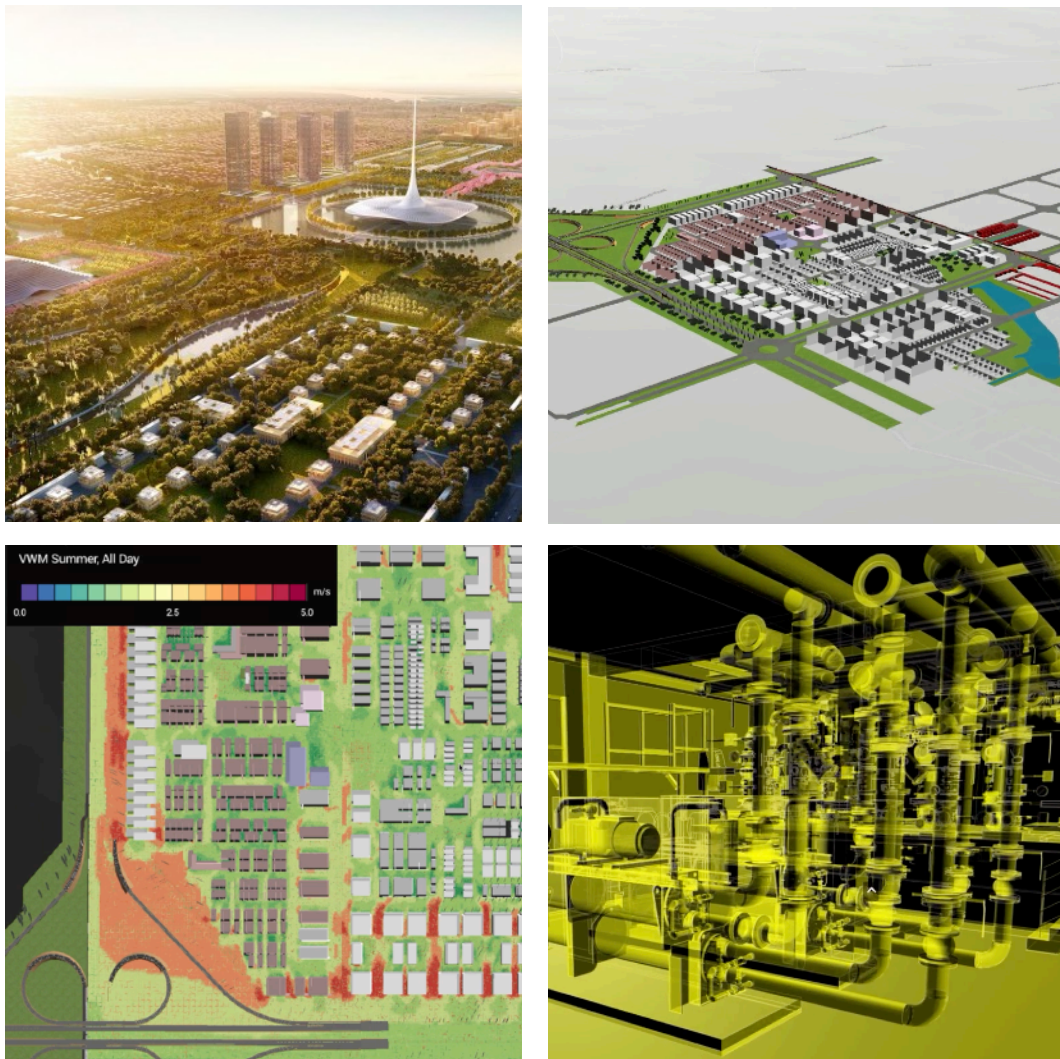


Figura 26. Applicazioni del *digital twin* di Amaravati. *i.* Render del *masterplan* di Amaravati realizzato da Foster + Partners [c]. *ii.* Vista a volo d'uccello del prototipo presentato nel 2019 [b]. *iii.* Strumenti di simulazione del microclima urbano, con output in forma di mappa bidimensionale [b]. *iv.* Vista della componente geometrica di un modello BIM integrato al *digital twin* attraverso gli strumenti della piattaforma Cityzenith [b].

### *DT.5. Amsterdam – Amsterdam Zuidooost.*

La città di Amsterdam, attraverso una partnership con l'Amsterdam Innovation ArenA, Geodan (società olandese specializzata in servizi geografici) e Huawei Technologies (ICT), ha costruito un prototipo di *digital twin* urbano relativo allo stadio Johan Crujff ArenA e all'area cittadina circostante. Il progetto è basato sulla gestione dell'ArenA, dei servizi e degli eventi connessi, e dell'impatto sull'area in cui si trova, il quartiere Amsterdam Zuidooost [c, d] nel quale è prevista la costruzione di 50 000 nuove unità abitative nei prossimi 10-20 anni. Al contempo, il progetto è inteso come un pilota per la futura applicazione ad altre zone di Amsterdam [d]. Il progetto è stato avviato nel 2018 [f] e il *digital twin* di Amsterdam Zuidooost è stato presentato ad Amsterdam nel corso della conferenza *Inclusive Smart Cities by Design 2019*, organizzata dai partner del progetto presso lo stadio [e].

Geodan riferisce i principali obiettivi alle logiche della *smart city* e in particolare ai tre campi di "*energy transition, living environment and transport*" [d]. Il principale prodotto del progetto è un "*city dashboard*" destinato agli *stakeholder* e a sostenere i processi decisionali. Il *dashboard* è basato sulla raccolta di dati in tempo reale (da sensori, telecamere, dispositivi di IoT) e dati ricavati su base statistica. Sebbene Geodan citi la possibilità di usare i dati secondo "*models and analyses*" non sono chiare le modalità di integrazione di strumenti previsionali nella piattaforma. Gli sviluppatori dichiarano l'adozione di standard aperti per i dati spaziali impiegati dalla piattaforma, compatibili con i principali formati di modellazione geografica e dell'edificio.

Il progetto è ancora in via di sviluppo. Le informazioni al riguardo sono principalmente quelle di carattere promozionale presenti sul sito *web* di Geodan e il materiale divulgativo messo a disposizione da enti legati alla città di Amsterdam e allo stadio. Nel corso della conferenza di presentazione, nel 2019, risulta che sia stato mostrato il funzionamento *dashbord* [e], di cui sono reperibili alcune immagini dimostrative. Da alcuni video del modello di Amsterdam Zuidooost pubblicati dall'Amsterdam Innovation ArenA, si può vedere un dettaglio del costruito non uniforme, che va da volumi prismatici a una modellazione più dettagliata dell'esterno degli edifici e di alcuni elementi di arredo urbano [g].

*L'elenco delle fonti e altri approfondimenti sono consultabili in [appendice \[A1: DT.5\]](#).*

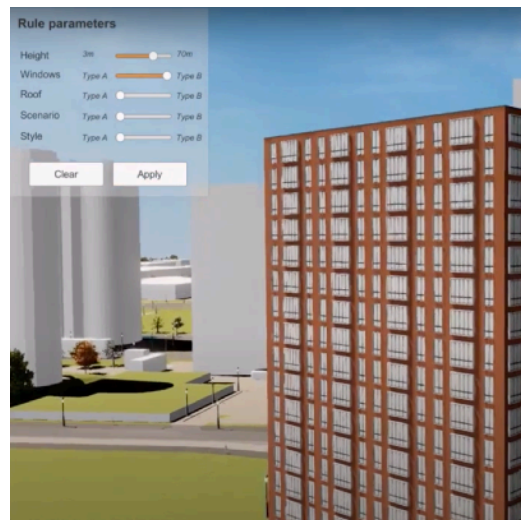
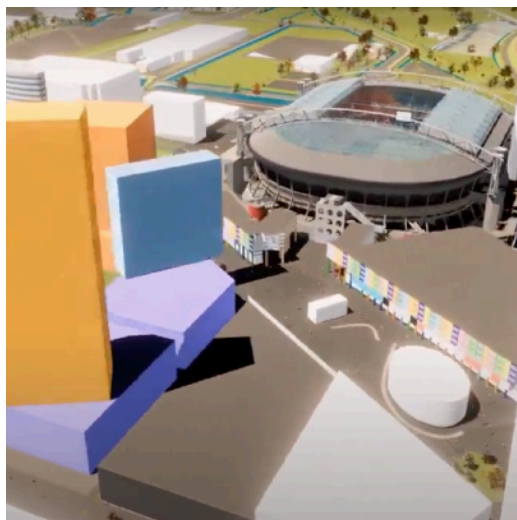
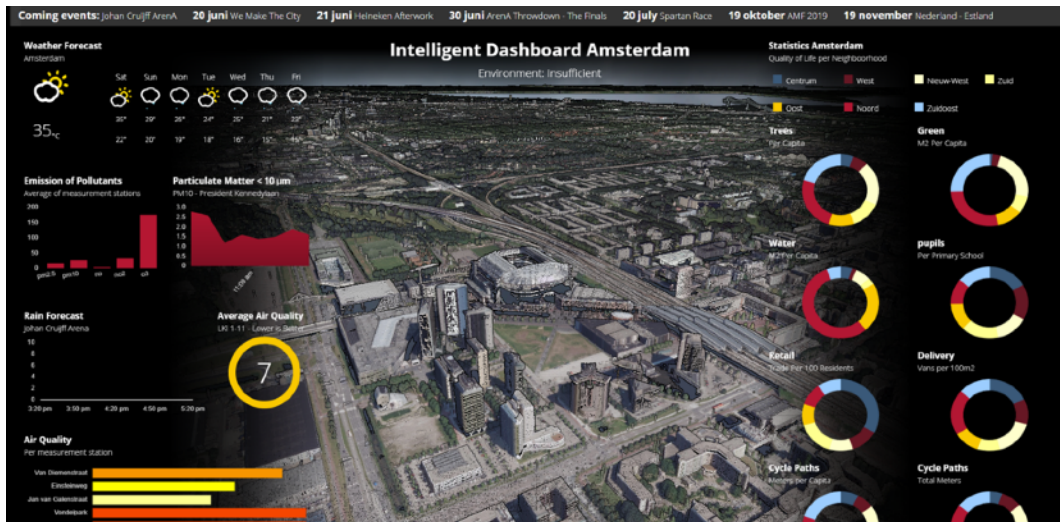


Figura 24. Immagini dai progetti Amsterdam Zuidoost e Amsterdam Smart City Dashboard. *i. ii.* Immagini dimostrative del *city dashboard* progettato da Geodan. Le viste sul modello mostrano rappresentazioni fotorealistiche e *network* stradali; i grafici mostrano dati relativi a parametri ambientali e traffico (altre immagini presentate da Geodan mostrano dati sui consumi energetici) [d]. *iii.* Screenshot della navigazione del modello 3D, da un video della Amsterdam Innovation Arena pubblicato nel 2019. Gli edifici sono rappresentati con livelli di dettaglio molto diversi, che vanno da semplici volumi prismatici a modelli dettagliati con materiali accurati [g]. *iv.* Screenshot del modello 3D che mostra strumenti di modellazione parametrica e procedurale [d].

## DT.6. Toronto – Quayside.

*"A networked urban development project where physical and digital infrastructures will be optimized to support a "people-centered" neighborhood. What that means, exactly, is still being worked out."* (Mattern, 2020 [f])

Waterfront Toronto è un ente pubblico istituito per la riqualificazione del *waterfront* orientale della città. Nel 2017, Sidewalk Labs, una società di Alphabet che si occupa di innovazione in campo urbano, ha vinto un bando per la realizzazione del *master plan* del sito pilota di Quayside, un'area non edificata del *waterfront*. Il progetto ha preso il nome di Sidewalk Toronto. Nel 2019, Sidewalk Labs ha pubblicato un corposo *Master Innovation and development plan* in cui sviluppa un prototipo di *smart city* incentrato sugli gli aspetti dell'accessibilità, della sostenibilità, e dell'uso di dati. I molti aspetti approfonditi dal progetto — nelle circa 1500 pagine del *master plan* — vanno dalle tecniche costruttive all'impatto economico, e non sono riconducibili alla sola realizzazione di un modello digitale del sito.

Il progetto di Sidewalk Labs non prevede l'uso di uno strumento unitario per la rappresentazione tridimensionale della città. Sidewalk Labs ha però descritto lo strato digitale pensato per raccogliere e coordinare i dati del sito sperimentale come *"a single unified source of information about what is going on"* [k], e il termine *digital twin*, pur non usato direttamente da sviluppatori e promotori, è stato associato al progetto anche in pubblicazioni di approfondimento teorico e scientifico [a, g]. Inoltre, l'idea di un riproduzione fedele e dinamica della città è esplicita in più di uno strumento sviluppato da Sidewalk Labs, a partire dal software *Replica*, che promette una rappresentazione fedele della rete di trasporti e degli spostamenti nella città, e strumenti di pianificazione basati su dati costantemente aggiornati e simulazioni. Secondo il *master plan*, il progetto prevede anche la realizzazione di un modello 3D ad alta risoluzione dello spazio e dei servizi pubblici, compresi spazi aperti, reti infrastrutturali, elementi di arredo urbano. Altri servizi di Sidewalk Labs sono in grado di interagire con un simile modello, come l'app *CommonSpace* per la raccolta in *crowdsourcing* di informazioni sui modi d'uso dello spazio pubblico.

Già dalla sua nascita, e con rinnovati argomenti dopo la pubblicazione del *master plan*, il progetto è stato oggetto di dure critiche da popolazione ed esperti, in particolare riguardo alla gestione inizialmente opaca dell'accordo tra pubblico e privato, ai pervasivi sistemi di sorveglianza previsti per generare la città digitale, e ai relativi aspetti di gestione dei dati personali [k, m, n]. Nella primavera del 2020,

Sidewalk Labs ha annunciato l'abbandono del progetto Quayside, a seguito dell'opposizione incontrata sulla gestione del progetto e (secondo quanto dichiarato dalla società) per gli effetti dell'emergenza sanitaria internazionale sul mercato immobiliare [e, n].

L'elenco delle fonti e altri approfondimenti sono consultabili in appendice [A1: DT.6].

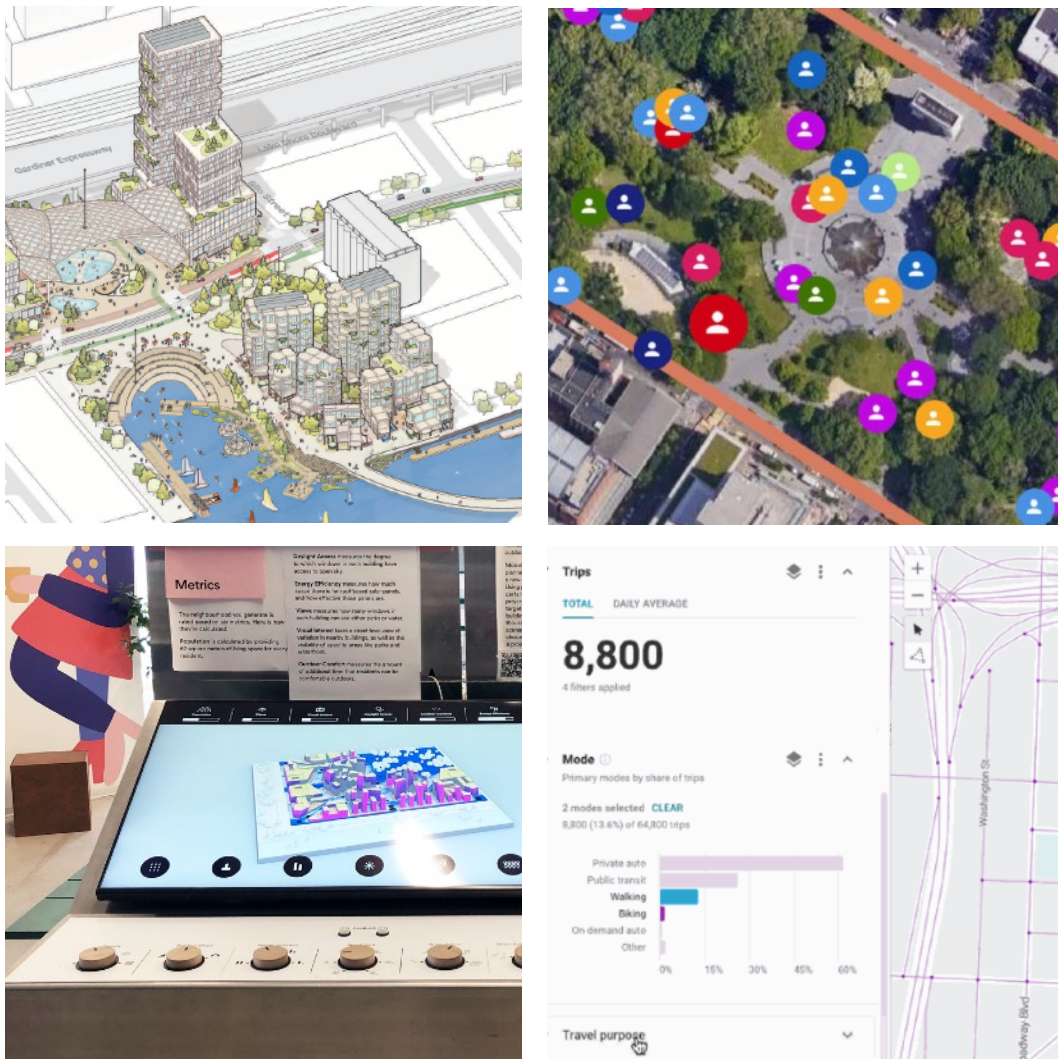


Figura 27. Immagini del progetto Sidewalk Toronto e degli strumenti software previsti per lo sviluppo. *i.* Rappresentazione artistica dello sviluppo urbano di Quayside proposto nella *masterplan* pubblicata da Sidewalk Labs [h]. *ii.* Schermata dall'app CommonSpace per la mappatura degli usi dello spazio pubblico, sviluppata da Sidewalk Labs [f]. *iii.* Installazione per la generazione parametrica di scenari di trasformazione per Quayside presentata nel 307 Workspace, spazio aperto al pubblico da Sidewalk Labs per il coinvolgimento della cittadinanza [f]. *iv.* Schermata dallo strumento di simulazione dei flussi su *network* stradale Replica, sviluppato da Sidewalk Labs [c].

### *DT.7. Rennes.*

Come Virtual Singapore, il modello tridimensionale di Rennes è uno dei campi di sperimentazione del servizio 3DEXPERIENCity di Dassault Systèmes. La città di Rennes è uno dei principali poli francesi per presenza di aziende di servizi digitali e telecomunicazioni, e un centro urbano in forte crescita [d]. Nel 2017, con l'unione di Rennes e di 42 centri circostanti, è stato costituito l'ente intercomunale Rennes Metropole, chiamato a coordinare lo sviluppo della conurbazione. Per gestire la nuova scala territoriale, l'amministrazione ha commissionato un modello 3D realistico dell'area metropolitana capace di integrare molte fonti di informazione geo-spaziale. Il progetto Virtual Rennes è stato avviato nell'estate del 2017, prevedendo una durata triennale entro la quale sviluppare alcuni casi di uso sperimentale del gemello digitale [b, k]. Il progetto è finanziato per 2.5 milioni di euro, di cui quasi il 60% è investito da Dassault Systèmes, che vede l'opportunità di testare tecnologie da offrire come prodotti e servizi ad altre amministrazioni. La proprietà dei dati del progetto rimane però completamente della parte governativa [i].

Il modello è pensato per sostenere la progettazione delle trasformazioni urbane ed essere pubblicamente accessibile in rete. Le prime fasi del progetto sono state incentrate sulla raccolta dei dati a disposizione dell'amministrazione e dei gestori dei servizi urbani, in particolare per quanto riguarda energia e ambiente, demografia e mobilità [k]. Lo sviluppo del progetto ha portato l'attenzione sugli aspetti collaborativi, in particolare a supporto della pianificazione e della gestione delle infrastrutture, e sulla comunicazione con la collettività [k].

Una precedente collaborazione di Dassault Systèmes con la città di Rennes, iniziata nel 2014, ha portato a uno strumento di visualizzazione già online. Il modello è però aggiornato al 2016 e il caricamento dei dati risulta piuttosto lento se confrontato con strumenti "generalisti" come *Google Maps* [f]. L'esito pubblico del progetto è quindi ancora atteso. Nel giugno 2020, il blog di Dassault Systèmes descrive Virtual Rennes come uno strumento correntemente in uso presso l'amministrazione, con vantaggi rilevati nella risposta all'emergenza sanitaria legata al COVID-19 [m].

*L'elenco delle fonti e altri approfondimenti sono consultabili in [appendice \[A1: DT.7\]](#).*



Figura 28. Applicazioni del servizio 3DEXPERIENCity di Dassault Systèmes alla città di Rennes. *i.* Vista dell'interfaccia del *digital twin* che mostra l'inserimento di elementi di progetto nel modello dello stato di fatto (quest'ultimo rappresentato con *texture* fotografiche) [d]. *ii.* Mappa dei consumi energetici con colorazione condizionale dei volumi degli edifici [c]. *iii.* Vista con modelli e *texture* di dettaglio architettonico [d].



### *DT.8. Los Angeles – Lincoln Heights.*

La tecnologia Azure Digital Twins è stata sviluppata da Microsoft per produrre modelli digitali di edifici. A inizio 2019, al CES (evento internazionale di tecnologia) di Las Vegas, Microsoft e il partner Itron (società tecnologica che si occupa di forniture energetiche e di acqua), hanno presentato un'applicazione della tecnologia di *digital twinning* per simulare una porzione del quartiere Lincoln Heights di Los Angeles.

Il prototipo ha usato dati simulati basati sulle infrastrutture gestite da Itron, in particolare illuminazione stradale, sensori della qualità dell'aria e dati sulla domanda di energia elettrica [d]. La piattaforma Azure permette di gestire i dati secondo una struttura gerarchica che può essere visualizzata in forma di grafo. La possibilità di definire arbitrariamente il modello (in termini informatici, ovvero gli elementi e i rapporti tra elementi) permette di adattarne le componenti a diverse scale che vanno da quella architettonica (per cui Microsoft promuove soprattutto applicazioni nella gestione di siti industriali) alla scala urbana. Nel semplice prototipo presentato nel 2019, la piattaforma è stata connessa ad un modello 3D per permettere ai visitatori di interagire (per esempio cambiando tinta ai tetti degli edifici) e verificare l'impatto simulato (ad esempio, sulla temperatura e sulla richiesta di energia) delle trasformazioni apportate al modello. Il modello 3D interattivo è stato presentato attraverso una applicazione di realtà aumentata sviluppata dalla società Vectorform.

Le informazioni disponibili sul modello realizzato per Lincoln Heights sono per lo più limitate alla cronaca dell'evento di presentazione e all'attività promozionale degli sviluppatori. Sebbene il sito web di Vectorform riporti che un'integrazione del prototipo sia stata prevista, non sono documentati ulteriori stati di avanzamento del progetto.

*L'elenco delle fonti e altri approfondimenti sono consultabili in [appendice \[A1: DT.8\]](#).*

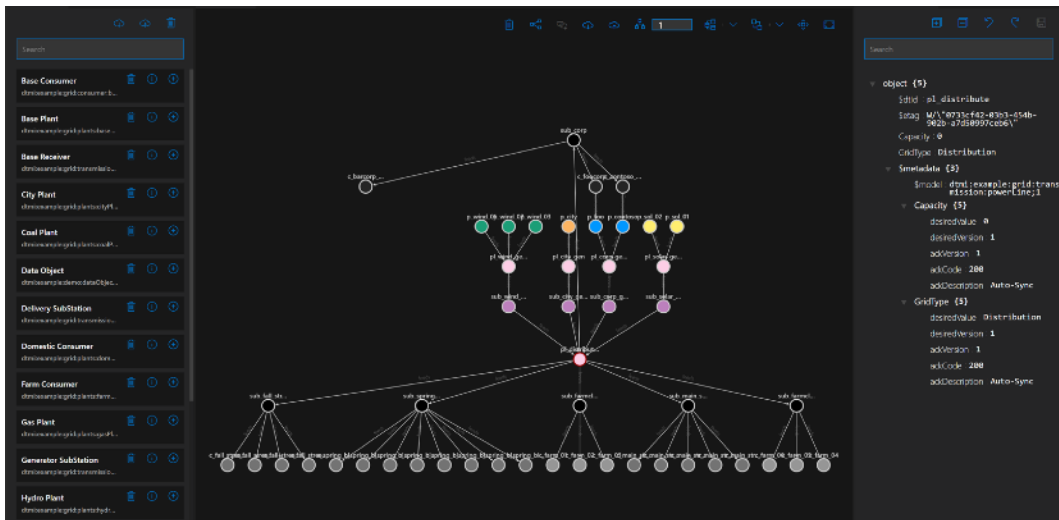


Figura 29. *i*. Schema delle componenti dell'installazione presentato al CES di Las Vegas del 2019 da Microsoft e Itron [d]. L'applicazione prevede un modello fisico e diverse informazioni digitali sovrapposti in realtà aumentata, che comprendono edifici (LoD2, livello di dettaglio stimato), segni grafici della posizione di dispositivi di IoT, e strati di interfaccia utente. *ii*. Schermata della modalità di visualizzazione a grafo della struttura di un modello informativo realizzato con la piattaforma Azure di Microsoft [c].

### *DT.9. Antwerp.*

Una replica tridimensionale di Antwerp, promossa come *digital twin*, è stata realizzata su iniziativa di IMEC (centro di ricerca internazionale con quartier generale in Belgio che si occupa di tecnologie digitali) e dell'istituto olandese di ricerca applicata TNO. Il progetto è ancora allo stato di prototipo ed è stato presentato nel settembre 2018 [d]. Oltre a IMEC e TNO, diversi partner sono coinvolti: il modello 3D è stato costruito in collaborazione con Tom Tom; il modello di traffico è sviluppato in collaborazione con PTV (gruppo che si occupa di soluzioni e strumenti digitali per la mobilità) sulla base di dati del governo delle Fiandre; la gestione della piattaforma è basata sul servizio Azure Digital Twins, fornito da Microsoft [d].

Il prototipo prevede tre campi tematici principali, che riguardano il monitoraggio e la simulazione di qualità dell'aria, rumore, e traffico [d]. Gli strumenti di simulazione sono basati sulla piattaforma Urban Strategy, sviluppata da TNO già dal 2007, attraverso diversi casi e avanzamenti [f]. Date le funzionalità limitate del prototipo e le fonti che documentano gli avanzamenti rispetto alla piattaforma di simulazione precedente, il *digital twin* di Antwerp appare come un'operazione volta a dare una migliore accessibilità e nuova visibilità a soluzioni già esistenti.

*L'elenco delle fonti e altri approfondimenti sono consultabili in [appendice \[A1: DT.9\]](#).*

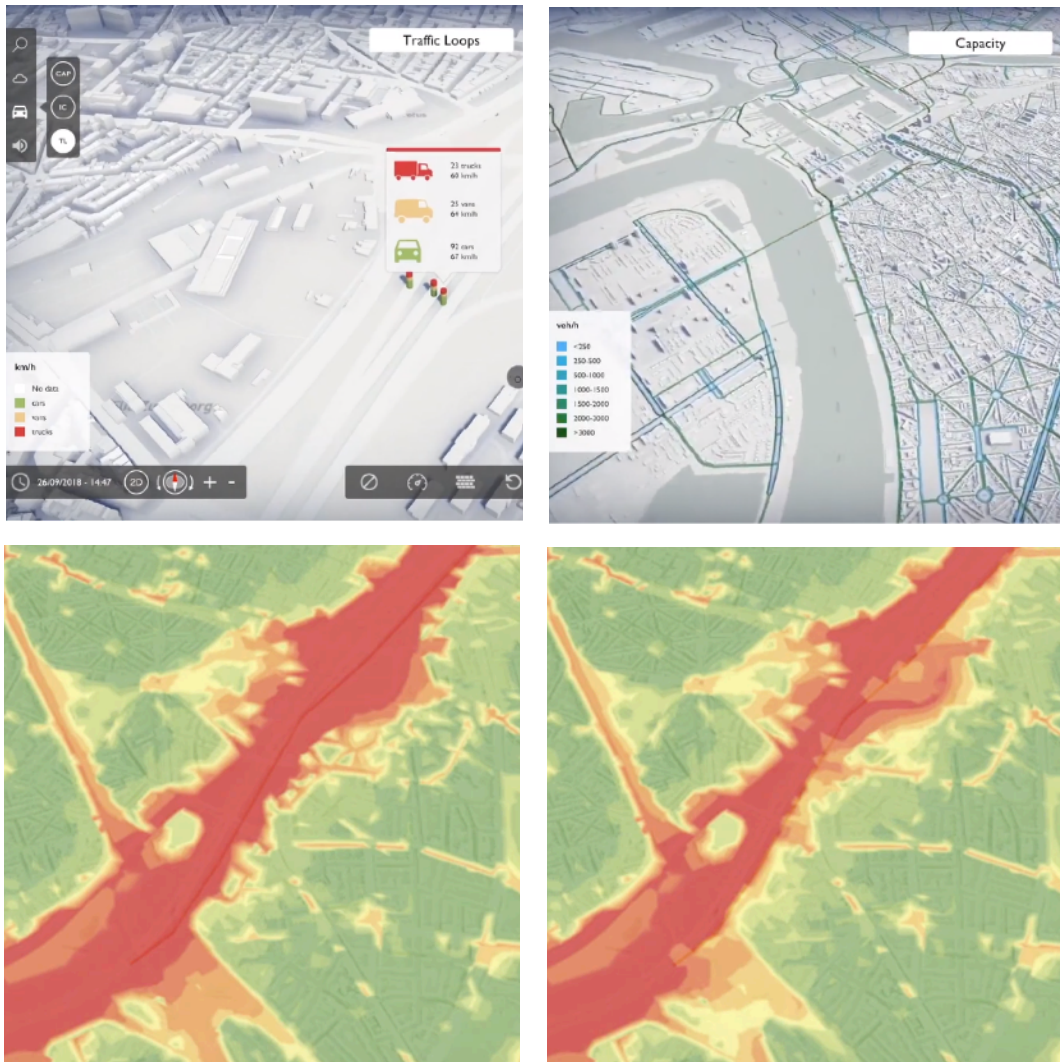


Figura 30. Applicazioni del *digital twin* di Antwerp. *i.* Consultazione dei dati da sensori (nell'immagine: contatori automatici del traffico) [c]. *ii.* Rappresentazione di valori sulla rete stradale (nell'immagine: capacità) [c]. *iii.* *iv.* Visualizzazione di mappe di dati ambientali [c]. Il modello permette di produrre sia stime in tempo reale basate su dati da sensori che simulazioni di scenari di trasformazione (nelle due immagini sono mostrate la stima dai dati rilevati e la simulazione dell'inserimento di una barriera su un lato della strada che costituisce la principale sorgente di rumore).

---

### 4.3. Studio critico degli *urban digital twin*.

I casi selezionati, introdotti nella sezione precedente, evidenziano come la pluralità di applicazioni che già ha caratterizzato l'evoluzione dei modelli digitali di città dagli anni 90 sia indirizzata verso l'adozione di piattaforme centralizzate per la raccolta e l'interazione tra informazioni. Crescendo la quantità di dati che possiamo estrarre, questi collettori promettono di trasformare la comprensione delle città, e da questa la loro gestione e la qualità della vita di chi le abita. Una trasformazione marcatamente positiva, secondo i *claim* e gli slogan che accompagnano i progetti di *twinning* — e.g., "[City models] have a role to play in solving universal urban problems" [Smart Kalasatama project, DT.2], "A smart city environment to plan everything" [Virtual Singapore, DT.3], "Reimagining cities to improve quality of life" [the Replica tool, DT.6]. Al di là delle dichiarazioni di sviluppatori e committenti, sulle quali si basa molta della narrazione sui *digital twin*, la ricerca condotta fa emergere alcune incongruenze e fattori di inefficienza nel rapporto tra produzione dei modelli e conoscenza / trasformazione della città. La comprensione schematica del reale veicolata dai modelli risulta in alcuni casi influenzata da logiche aziendali, dagli aspetti visivi del risultato, da altri elementi condizionanti o loro combinazioni. In queste circostanze, i *digital twin* si presentano come "*computational ecosystems that embody important presumptions about what constitutes appropriate knowledge and forms of decision making*" (Marvin e Luque-Ayala, 2017, p.100). Le fallacie che caratterizzano la rappresentazione della città attraverso questi sistemi contribuiscono a rendere rigidi gli strumenti al variare dello scopo e del contesto, e a limitare la nostra capacità di progettare trasformazioni.

In questa sezione sono discussi i principali aspetti che evidenziano, nei casi studiati, il rischio di uno scollamento tra la configurazione dei modelli e la loro disposizione ad incamerare una conoscenza operativa della città. I temi individuati sembrano confermare la persistenza, nell'ambito degli *urban digital twin*, delle criticità che accompagnano l'entusiasmo per i *big data* e l'affermazione degli *urban operating systems* [v. capitolo 1].

### *Soggetti produttori e fonti.*

I risultati della raccolta dei materiali sollevano il tema dello sviluppo dei modelli da parte di società di *information technology* (IT) e dei possibili limiti nel controllo delle forme di conoscenza veicolate da questi modelli. Le narrazioni sullo *smart urbanism* sono il contesto, commercialmente favorevole, in cui il settore IT sta sviluppando nuovi prodotti per il mercato della gestione di *asset* e dati urbani<sup>83</sup> (Brenner e Schmid, 2015). L'occupazione di questo segmento di mercato avviene anche attraverso l'adattamento di tecnologie esistenti con rischi analoghi a quelli che il trasferimento delle tecnologie di *enterprise resource planning* (ERP) hanno già introdotto nella gestione di informazioni e servizi per la città (Marvin e Luque-Ayala, 2017).

Come per altre fasi di sviluppo del concetto di *smart city*, l'implementazione di *digital twin* è un processo "*technology-driven*" e "*supply-side-driven*" (Nochta et al., 2019, p.1) nonostante vari *claim* intendano legittimare le proposte sulla base di logiche largamente condivise — come la sostenibilità, gli obiettivi di sviluppo, o le sfide dell'urbanizzazione. Nei fatti però, la letteratura critica riconosce a queste modalità di produzione dei modelli digitali una "*corporate rationality of control*" (Marvin e Luque-Ayala, 2017, p.84) capace di determinare *bias* nell'interpretazione dei problemi dell'ambiente urbano. Nel caso degli ERP, ad esempio, problemi e soluzioni sarebbero ridotti a quelli già noti nell'ambiente di gestione aziendale da cui alcuni degli strumenti applicati negli *urban OS* sono stati aggiornati<sup>84</sup>. Già Hollands (2008) denuncia le possibili difficoltà nel conciliare strumenti per ottimizzare i profitti e gli obiettivi di sostenibilità presentati dalla *smart city*. Lo sviluppo tecnologico *market-driven* è legato

---

<sup>83</sup> Tra le società che sviluppano le piattaforme usate nei casi studiati si trovano: CityZenith, che sviluppa una piattaforma per il *city twinning* applicata per il modello di Amaravati [appendice A1: DT.4]; Microsoft, il cui software Azure è stato applicato a Los Angeles (nel prototipo del quartiere Lincoln Heights) e ad Antwerp [appendice A1: DT.8, DT.9]; Bentley, specializzata in soluzioni digitali per l'architettura, l'edilizia e le costruzioni, che nel 2018 ha acquisito la società Agency9 e i suoi servizi per la modellazione di *digital twin*, applicati nel caso di Helsinki [appendice A1: DT.2]; Dassault Systèmes, che produce il servizio 3DEXPERIENCE, su cui sono costruite le versioni digitali di Singapore e Rennes [appendice A1: DT.3, DT.7]; Sidewalk Labs, società di Alphabet che sviluppa diversi software per l'analisi e la gestione della città e che ha realizzato il *masterplan* per il quartiere Quayside di Toronto [appendice A1: DT.6]. Altre società forniscono servizi integrati alla scala urbana vicini al paradigma del *digital twin*, come Cisco (Mattern, 2014; Marvin e Luque-Ayala, 2017), Siemens (<https://www.siemens.com/>, consultato il 10/04/21), NTT Data Corporation (<https://it.nttdata.com/>), DENSO MaaS (specializzata in trasporti, <https://www.denso.com/>, consultato il 10/04/21).

<sup>84</sup> "IBM [...], for example, identifies fragmentation and dispersal of control, lack of real-time updates, system isolation and inability to generate insights from existing data as the key problems of the city" (Marvin e Luque-Ayala, 2017, p.92).

all'assunto di un consenso collettivo difficilmente ottenibile o verificabile. [Kitchin \(2014, p.10\)](#) parla di "*creation of a corporate path dependency*", una processo riscontrabile nella storia recente dei modelli di città, che risulta in ostacoli alla comunicazione tra diverse soluzioni e contribuisce alla resistenza all'adozione di questi strumenti in contesti pubblici ([Ross, 2010](#); [Stoter et al., 2011](#)) [v. [sezione 1.2](#)], poiché "*techniques and capacities often sit outside direct municipal control*" ([Marvin e Luque-Ayala, 2017, p.92](#)).

Nei *digital twin* studiati, diversi casi rimandano a queste criticità. Gli strumenti impiegati nel prototipo di Toronto [[appendice A1: DT.6](#)], ad esempio, sono sviluppati da Sidewalk Labs, sussidiaria di Alphabet (di cui è parte anche Google). [Shannon Mattern \(2020\)](#) sottolinea come molte proposte nel *masterplan* per il sito sperimentale di Quayside offrano un potenziale di monetizzazione per lo sviluppatore privato, soprattutto attraverso la raccolta e l'elaborazione di dati, nonché tramite la promozione e il coinvolgimento di società e prodotti del gruppo. Inoltre, il progetto è stato accompagnato da forti critiche sulle procedure di assegnazione e negoziazione con la parte pubblica e sulla trasparenza dell'uso di informazioni sui cittadini.

La forte presenza dei prodotti commerciali ha in oltre conseguenze sul fronte, più pratico, della facilità di condivisione di informazioni al variare di usi, standard, protocolli. Lo studio dei casi mostra che le società di IT sono più lontane dall'offrire una "*one-stop-shop city twin solution*" (un modello comprensivo di tutte le funzioni che può richiedere, ad esempio, un'amministrazione) di quanto comunichino attraverso l'immagine commerciale dei loro prodotti e prototipi ([Wildfire, 2018](#)). Modelli come quelli realizzati per Zurigo, Helsinki e Toronto appaiono ancora come tentativi di far comunicare fra loro molti strumenti, più come soluzioni integrate [[appendice A1: DT.1, DT.2, DT.6](#)].

### *Iper-realismo e astrazione.*

Come già notato da [Batty et al. \(2000\)](#) per le applicazioni dei *3D city model*, i *digital twin* sono spesso presentati con forte enfasi sulla componente visiva, in particolare attraverso le fonti *online* e le immagini promozionali. La resa grafica tende ad essere messa in risalto rispetto agli attributi funzionali e ai principi di organizzazione dell'informazione. Ciò può essere legato, oltre che alle finalità commerciali di chi produce software e offre servizi, a scelte di comunicazione anche da parte degli attori pubblici, nonché all'eredità degli usi precedenti dei modelli, profondamente incentrati sulla visualizzazione [v. [sezione 1.2](#)]. Inoltre, lo

sviluppo realistico dei modelli tridimensionali è sostenuto dalla potenza di calcolo dedicata alla grafica, cresciuta con la grande spinta del mondo dei videogiochi e sfruttata da molto software per la visualizzazione di dati geo-spaziali — quello che è stato chiamato *Google Earth effect*, ovvero la larga adozione, per numero utenti e *service provider*, di globi virtuali di grande dettaglio, e di facile accesso e navigazione (Ross, 2010).

L'iperrealismo che è possibile ottenere con soluzioni digitali molto diffuse accentua la tendenza tecno-ottimistica ad anteporre la *precisione* della rappresentazione all'*accuratezza* della conoscenza convogliata<sup>85</sup>: "*The epistemological position associated with much of the conventional Big Data research leads directly to a particular ontological position about what the city actually is*" (Shelton, 2017, p.5). In altre parole, le mappe che oggi usiamo (i modelli digitali di città) "*claim the status of objective description of reality*" (Kurgan, 2013, p.32).

Tuttavia, le informazioni visuali presenti nelle immagini dei *digital twin* studiati sono spesso incomplete, con dettagli alla scala architettonica che convivono con edifici rappresentati come volumi prismatici [sezione 4.2: DT.5]. In altri casi, il dettaglio veicolato dalla grafica risulta approssimativo, o puramente *scheumorfico*<sup>86</sup>, come in alcuni strumenti di generazione procedurale che riproducono l'effetto di una città modellata nei minimi particolari [ibid.]. Sono inoltre frequenti le immagini di modelli urbani che mostrano le *texture* fotografiche degli edifici anche in casi di applicazioni in cui il ruolo della visualizzazione è limitato — ne sono esempi molti dei prodotti della piattaforma 3DEXPERIENCity di Dassault Systèmes [sezione 4.2: DT.3, DT.7]. Simili forme di ridondanza non possono essere interpretate solo come la promessa che i modelli, a pieno regime, saranno in grado di riprodurre la città ad altissima risoluzione. La presenza di dati non necessari, da valutare sulla base di uno scopo, può infatti limitare l'efficienza del sistema.

Secondo Halpern (2015) l'enfasi sulla quantità di informazioni negli archivi e nella trasmissione ha contribuito alla creazione di un enorme spazio di dati residuale, che può anche minacciare — come interferenza nel segnale — la trasmissione stessa. La rimozione di informazioni inutili è fondamentale, così come l'*astrazione*, e su questi principi ha lavorato anche la cibernetica ai suoi

---

<sup>85</sup> Una tendenza che si può anche confrontare con la critica di matrice geografica alla produzione di modelli del mondo (Farinelli, 2003), secondo cui le rappresentazioni dello spazio portano ad offuscare la distanza tra lo spazio antropico fisicamente inteso e la sua replica [v. capitolo 2].

<sup>86</sup> V. nota 23.



esordi. Al contrario, all'eccesso di dettaglio nella visualizzazione può corrispondere una forma di passività nei confronti delle logiche computazionali, e favorire l'effetto *black box* (Brenner e Schmid, 2014; Harley, 1989) [v. sezione 2.2]. Nel concetto di copia completa e realistica, il rapporto con la città è immediato — non-mediato [v. sezione 1.2], o meglio: è inteso tale — e le astrazioni, sempre necessarie, restano non indagate e mai messe in discussione.

Anche sul fronte tecnico, diverse ricerche suggeriscono cautela nel perseguire l'accrescimento del dettaglio. Ross (2010, p.59), ad esempio, afferma che "*a middle-level degree of specificity or 'geographical dirtiness' will be sufficient to enable effective communication across a wide range of stakeholders*", mentre i *Gemini principles* sviluppati in UK su iniziativa governativa (Bolton et al., 2018) sostengono che i *digital twin* debbano rappresentare la realtà fisica con un'accuratezza da adeguare allo scopo. Nell'ambito dell'informazione geo-spaziale il concetto di *level of detail* e gli standard che ne indicano i principi di applicazione sono stati sviluppati proprio per ottimizzare la raccolta, la produzione e la consultazione delle informazioni, prima ancora che per supportare gli esiti visuali<sup>87</sup>.

### *Coerenza / incoerenza e tempi di decadimento.*

Gli esempi raccolti presentano una grande varietà tecnica. Sono impiegati tipi diversi di software: commerciale e non commerciale, di alto e basso livello, in piattaforme integrate o basato su più strumenti in interazione. Come precedentemente discusso, variano i livelli di dettaglio: dall'ingombro prismatico degli edifici ai particolari architettonici. Diverse tecniche di raccolta dei dati interagiscono anche negli stessi modelli, e includono l'accesso ad archivi esistenti, il rilievo digitale, l'uso di sensori e *internet delle cose*. I metodi di visualizzazione estendono la gamma delle opzioni disponibili oltre la sola navigazione in realtà virtuale dell'oggetto tridimensionale, con *city dashboard* per le amministrazioni, servizi per dispositivi mobili e per il *web*, strumenti di analisi dello schema gerarchico delle componenti [v. Microsoft Azure, sezione 4.2: DT.8]. Le applicazioni sono più o meno sperimentali: a volte si limitano ad aggiornare le

---

<sup>87</sup> "3D city models are an approximation of the real world: features are modelled at a particular grade and certain elements are simplified or omitted. The quantity and mixture of content is driven by the intended use of the 3D city model, provenance of the base data, acquisition technique, invested funds, and spatial scale" (Biljecki, 2017, p.3).

esperienze di ricerca o di amministrazione precedenti<sup>88</sup> [sezione 4.2: DT.1, DT.9], in altri casi si tratta di progetti ancora allo stato di prototipi [sezione 4.2: DT.6, DT.8].

A soluzioni ed approcci molto diversi corrisponde una molteplicità di standard di riferimento e formati. Anche se nella maggior parte dei casi è ricercata la compatibilità degli strumenti con sistemi BIM e GIS, i modelli si confrontano anche con dati in input meno strutturati e con i problemi di comunicazione tra parti e funzioni diverse. Nel caso di Zurigo, ad esempio, è discussa la difficoltà di rendere uniformi le informazioni provenienti dai diversi fornitori di servizi urbani [sezione 4.2: DT.1]. Inoltre, la stessa possibilità di acquisire modelli 3D di città ed edifici già completi suggerisce ulteriori fattori di incoerenza [sezione 4.2: DT.3, DT.4]. In questi casi, il prodotto finale passa infatti attraverso più fasi di modellazione, gestite con metodi, protocolli e tecnologie diverse.

Il paradigma del *digital twin*, ancora in continuità con i sistemi ERP, è orientato a rendere più integrati i rapporti tra le funzioni della città, e tra le relative fonti di informazione. Tuttavia, a questa spinta centralizzante si oppone un'organizzazione delle infrastrutture e dei servizi urbani caratterizzata da sistemi separati o solo debolmente interconnessi. Mattern (2014) descrive questa "widgetization" come caratteristica della città digitale<sup>89</sup>, frammentata "into atomized projects, services and flows" proprio in conseguenza della gestione iper-razionale delle parti e dell'enfasi sulla possibilità di collezionare dati. Gli *urban OS* si presentano quindi come "a novel bricolage of hybrid informational ecologies" e "chaotic bundles of hybrid techniques, tools, products and operating systems — rather than simply as a standardized unified product" (Marvin e Luque-Ayala, 2017, p.86). I progetti studiati confermano queste letture, mostrando ad esempio come l'etichetta *digital twin* sia spesso attribuita alla combinazione o all'aggiornamento di strumenti già esistenti, o alla giustapposizione di vari servizi e prodotti commerciali di raccolta e elaborazione di dati spaziali. In forte contrasto con l'ideale di una rappresentazione onnicomprensiva, i *digital twin* presentano problemi nella trasmissione di informazioni sia tra le parti che li compongono, sia verso i diversi professionisti che devono usarli.

---

<sup>88</sup> Non è raro che i progetti di sviluppo digitale siano ri-etichettati al variare dei paradigmi con maggiore attenzione mediatica e più adatti a forme di *marketing* della città. Ad esempio, in India, dopo l'iniziativa lanciata nel 2015 dal governo per la realizzazione di 100 *smart city*, anche città che prima si erano promosse come *eco-city*, *new town* o *tech-city* hanno adottato l'etichetta di *smart city* (Datta, 2015). Il fenomeno, che può essere chiamato *urban labelling*, è analizzato criticamente in Hollands (2008).

<sup>89</sup> In particolare quando il modello si presenta come un *dashboard* operativo, che offre diverse funzioni di monitoraggio e controllo dei servizi urbani.

*"The notion of a panopticon (an all-seeing vantage point) has remained open to vertical (within an activity) and horizontal (across activities) fragmentation due to agencies communicating imperfectly or being unable or unwilling to exchange or compare information." (Kitchin, 2014, p.11)*

Un altro aspetto della stessa frammentazione è osservabile nella dimensione temporale. Sia che impieghino strumenti da tempo esistenti, sia nel caso si tratti di esperimenti, molti progetti di *twinning* dimostrano una validità limitata nel tempo. Alcuni esperimenti sono abbandonati rapidamente [v. Toronto, sezione 4.2: DT.6], alcuni modelli risultano obsoleti nonostante il recente completamento [v. Rennes, sezione 4.2: DT.7], altri prima ancora di uscire dall'ambiente sperimentale [v. Amaravati, sezione 4.2: DT.4]. In generale, i meccanismi di aggiornamento, la cui fluidità dovrebbe essere una caratteristica distintiva del *digital twin*, sono compromessi dall'invecchiamento dell'intero sistema informatico (più che dei dati) — o questo appare, almeno, nella parti di modello accessibili al pubblico attraverso i servizi in rete. Anche questo aspetto è noto sia alla letteratura più tecnica — che sottolinea il rapido avvicinarsi delle soluzioni [v. sezione 1.2] — sia a quella teorico-critica — come è possibile leggere nell'esortazione di Brenner e Schmid (2015, p.159) a comprendere i processi di "*destabilization or obsolescence*" nella riflessione sui metodi e le categorie dell'analisi urbana.

### *Utilizzatori e effetti sulla società.*

Il tecno-ottimismo che percorre la modellazione della città ha incontrato alcune ferme critiche nell'ambito delle scienze sociali. Queste individuano nelle narrazioni *mainstream* della città dei *big data* la tendenza a relegare **i cittadini a un ruolo di utenti passivi**, a cui è richiesto di adattarsi alla rivoluzione degli strumenti (e.g. Datta, 2015; Halpern, 2015; Kitchin e Dodge, 2011; Luque-Ayala e Marvin, 2015; Marvin e Luque-Ayala, 2017; Rabari e Storper, 2015). La città digitale dimostrerebbe una certa capacità di rendersi immune all'alterazione delle logiche algoritmiche che la costruiscono: "*One of the chief preoccupations of the smart city is reflecting its own data consumption and hyper-efficient activity back to itself*" (Mattern, 2014).

Alcuni caratteri dei modelli analizzati permettono di riflettere su queste criticità. In primo luogo, la grande capacità delle piattaforme software di mettere insieme informazioni lascia in secondo piano i processi di aggiornamento delle stesse. Per alcune categorie di informazioni, come quelle registrate da sensori,

l'aggiornamento in tempo reale (o quasi) è un carattere spesso sottolineato, nonché utile a sostenere l'aderenza al paradigma del *twinning*. Con la parziale eccezione del caso di Amaravati — che prevede l'evoluzione del modello con la costruzione della città reale, una dinamica che tuttavia non è stata ancora validata sul campo [sezione 4.2: DT.4] — le funzioni per la revisione ricorrente dei dati non sono messe in evidenza o discusse nei dettagli. Per alcuni modelli, è esplicitata la definizione degli elementi spaziali sulla base di modelli già esistenti, acquisiti e processati *una tantum* [sezione 4.2: DT.1, DT.2, DT.9]. I processi che prevedono di accedere *di nuovo* a informazioni già consultate sembrano essere meno funzionali a rimarcare l'efficienza del modello, rispetto alla *quantità* delle sorgenti. Ne consegue che la comprensione di come la città sia fatta e funzioni sia data dalla quantità di reale che può essere tradotta in modello, e non sia piuttosto legata a nuove interpretazioni. E la quantità non è in estensione ma nel dettaglio — nella *granularità* — che caratterizza la digitalizzazione.

Un altro aspetto tralasciato dalla documentazione reperita è la gestione dei livelli di attendibilità delle informazioni introdotte. Nei *digital twin* si incontrano strati informativi con differenze nella frequenza di aggiornamento, nelle unità spaziali di riferimento, nell'accuratezza del rilevamento. Si può dunque prevedere che una documentazione trasparente, che consideri l'obsolescenza dei dati, le approssimazioni e le generalizzazioni, gli errori attesi, sia fondamentale, prima di tutto nei processi analitici. Ma la mancata considerazione dell'errore nei dati accorpatisi può anche incidere sulla comprensione dei limiti del modello, e rafforzare la percezione della riproduzione digitale come fonte incondizionata di verità (*cf.* Kurgan, 2013).

Inoltre, se una grande attenzione nella promozione dei *digital twin* è rivolta alla possibilità di far convivere applicazioni prima consentite solo da distinti modelli specializzati, appare limitata l'innovazione effettiva sulle possibili applicazioni del *3D city model*. In particolare, sembrano mancare, o non appartenere alla principale narrazione sulla digitalizzazione della città, strumenti che permettano interazioni inedite tra dati, che supportino ad esempio analisi calibrate sulla specificità di contesti locali e dinamiche sociali. Wan *et al.* (2019, p.191) arrivano a escludere l'adeguatezza delle soluzioni digitali nei confronti di alcune sfide poste dall'ambiente urbano "*such as social inequality and housing crisis, [for which] the digital twin tends to be less effective. This is because the digital twin, as a digital representation of the physical world, does not directly address the underlying socio-political causes*". Al contrario, affermano Brenner e Schmid (2015, p.157), "*technoscientific aspirations [...] often serve to naturalize the forms of socio-spatial disorder*".

Il rapporto fra oggetto (analizzato, rappresentato), *media* e utenti è cambiato. La diffusione degli strumenti digitali e dei loro prodotti, con la replicazione automatica di procedure e schemi, mette in dubbio la capacità di comprendere l'oggetto originale. Il livello di dettaglio dei modelli generati aumenta (l'iperrealismo sopra discusso) e rende meno chiaro quali informazioni siano davvero rilevanti o funzionali agli scopi di chi usa il modello. La molteplicità degli strumenti e degli approfondimenti "verticali" che i *digital twin* cercano di coordinare contribuisce alla diffusione di interpretazioni della realtà parziali, accettate per definitive.

## Riferimenti bibliografici. Capitolo 5

- Batty M.** (2018). Digital twins. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, 45(5), 817–820.
- Batty M., Axhausen K.W., Giannotti F., Pozdnoukhov A., Bazzani A., Wachowicz M., Ouzounis G., Portugali Y.** (2012). Smart cities of the future. *The European Physical Journal Special Topics*, 214(1), 481–518.
- Batty M., Chapman D., Evans S., Haklay M., Kueppers S., Shiode N., Smith A., Torrens P.M.** (2000). *Visualizing the city: Communicating urban design to planners and decision-makers.*
- Biljecki F., Stoter J., Ledoux H., Zlatanova S., Çöltekin A.** (2015). Applications of 3D City Models: State of the Art Review. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 4(4), 2842–2889.
- Bolton A., Butler L., Dabson I., Enzer M., Evans M., Fenemore T., Harradence F., Keaney E., Kemp A., Luck A., Pawsey N., Saville S., Schooling J., Sharp M., Smith T., Tennison J., Whyte J., Wilson A., Makri C.** (2018). *Gemini Principles* [Report]. CDBB.
- Brenner N., Schmid C.** (2014). The ‘urban age’ in question. *International Journal of Urban and Regional Research*, 38(3), 731–755.
- Brenner N., Schmid C.** (2015). Towards a new epistemology of the urban? *City*, 19(2–3), 151–182.
- Datta A.** (2015). A 100 smart cities, a 100 utopias. *Dialogues in Human Geography*, 5(1), 49–53.
- Datta, S.P.A.** (2017). Emergence of Digital Twins—Is this the march of reason? *Journal of Innovation Management*, 5(3), 14–33.
- Farinelli F.** (2003). *Geografia: un'introduzione ai modelli del mondo.* Einaudi.
- FULL** (2019). *Which digital tools for the creation of a Digital Open Urban Twin?* Technical Report 1/2019.
- Fuller A., Fan Z., Day C., Barlow C.** (2020). Digital Twin: Enabling Technology, Challenges and Open Research. *ArXiv:1911.01276 [Cs]*.
- Halpern O.** (2015). *Beautiful Data: A History of Vision and Reason since 1945.* Duke University Press.
- Harley J.B.** (1989). Deconstructing the map. *Cartographica: The International Journal for Geographic Information and Geovisualization*, 26(2), 1–20.
- Hollands R.G.** (2008). Will the real smart city please stand up?: Intelligent, progressive or entrepreneurial? *City*, 12(3), 303–320.
- Jacobson I., Spence I., Kerr B.** (2016). Use-Case 2.0. *Queue*, 14(1), 94–123.
- Kitchin R.** (2014). The real-time city? Big data and smart urbanism. *GeoJournal*, 79(1), 1–14.
- Kitchin R., Dodge M.** (2011). *Code/space: Software and everyday life.* MIT Press.
- Kritzinger W., Karner M., Traar G., Henjes J., Sihm W.** (2018). Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. *IFAC-PapersOnLine*, 51(11), 1016–1022.
- Kropf K.** (2009). Aspects of urban form. *Urban Morphology*, 13(2), 105–120.
- Kurgan L.** (2013). *Close up at a distance: Mapping, technology, and politics.* Zone Books.
- Luque-Ayala A., Marvin S.** (2015). Developing a critical understanding of smart urbanism? *Urban Studies*, 52(12), 2105–2116.
- Marvin S., Luque-Ayala A.** (2017). Urban Operating Systems: Diagramming the City: Urban Operating Systems. *International Journal of Urban and Regional Research*, 41(1), 84–103.
- Mattern S.** (2014). Interfacing Urban Intelligence. *Places Journal*. <https://placesjournal.org/article/interfacing-urban-intelligence/> (consultato il 27/04/21).
- Mattern S.** (2020). Post-It Note City. *Places Journal*, 2020. <https://placesjournal.org/article/post-it-note-city/> (consultato il 27/04/21).
- Nochta T., Wan L., Schooling J. M., Lemanski C.L., Parlikad A.K., Jin Y.** (2019). Digitalisation for Smarter Cities – Moving from a Static to a Dynamic View. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Smart Infrastructure and Construction*, 1–14.

- Rabari C., Storper M.** (2015). The digital skin of cities: Urban theory and research in the age of the sensed and metered city, ubiquitous computing and big data. *Cambridge Journal of Regions, Economy and Society*, 8(1), 27–42.
- Ross L.** (2010). Virtual 3D City Models in Urban Land Management—Technologies and Applications. Technische Universität Berlin.
- Shelton T.** (2017). The urban geographical imagination in the age of Big Data. *Big Data & Society*, 4(1), 205395171666512.
- Stoter J., Beetz J., Ledoux H., Reuvers M., Klooster R., Janssen P., Penninga F., Zlatanova S., van den Brink L.** (2013). Implementation of a National 3D Standard: Case of the Netherlands. In Pouliot J., Daniel S., Hubert F., Zamyadi A. (a cura di), *Progress and New Trends in 3D Geoinformation Sciences* (pp. 277–298). Springer Berlin Heidelberg.
- Stoter J., Vosselman G., Goos J., Zlatanova S., Verbree E., Klooster R., Reuvers M.** (2011). Towards a National 3D Spatial Data Infrastructure: Case of The Netherlands. *Photogrammetrie - Fernerkundung - Geoinformation*, 2011(6), 405–420.
- Wan L., Nochta T., Schooling J.M.** (2019). Developing a City-Level Digital Twin – Propositions and a Case Study. *International Conference on Smart Infrastructure and Construction 2019 (ICSIC)*, 187–194.
- Wildfire C.** (2018). How can we spearhead city-scale digital twins? *Infrastructure Intelligence*. <http://www.infrastructure-intelligence.com/article/may-2018/how-can-we-spearhead-city-scale-digital-twins> (consultato il 27/04/21).
- Wong K.K.Y.** (2015). Economic Value of 3D Geographic Information (EuroSDR Report v1.0; p. 23).







# Capitolo 5.

## **Studio delle unità spaziali.**

---

## 5.1. Studio dell'uso dei modelli: metodologia.

### *Casi d'uso: tassonomia.*

Nel capitolo precedente sono analizzati alcuni casi di città digitali, ossia una selezione di modelli che possono essere detti *digital twin*. Questi aggregano diversi strati di dati e funzioni analitiche per ottenere una replica fedele e dinamica dei fenomeni urbani, e a volte integrano funzioni predittive e di gestione remota di apparecchiature e servizi. Per ogni caso studiato, l'analisi ha cercato di isolare le *applicazioni* del modello che si dimostrano efficaci in specifici campi operativi (*cf.* Biljecki *et al.*, 2015). Sono esempi di queste applicazioni: portali *web* per visualizzare un modello tridimensionale e accedere alle informazioni connesse, strumenti di raccolta e analisi di dati provenienti da sensori, l'uso di un modello condiviso tra diversi professionisti per la progettazione architettonica e urbana, l'uso di modelli per analisi e simulazioni ambientali, strumenti interattivi per l'aggiornamento dei modelli stessi (gli esempi elencati sono tratti dal caso di Helsinki [sezione 4.2: DT.2]).

Questo capitolo completa il processo analitico prendendo in esame i casi d'uso dei modelli digitali sottesi dalle applicazioni emerse nello studio dei *digital twin* [figura 31]. Come introdotto nel capitolo precedente [sezione 4.1] per *caso d'uso* si intende un insieme di azioni che consente ad un utente di raggiungere un obiettivo, ovvero ottenere un risultato oggettivo e quantificabile<sup>90</sup>. L'obiettivo dell'analisi è risalire agli elementi fondamentali della rappresentazione dello spazio che abilitano i diversi usi del modello attualmente adottati. L'individuazione di questi elementi, o *unità spaziali*, è orientata a sostenere la discussione su quali letture dello spazio urbano siano condivise attraverso i diversi modelli e come queste letture si incontrino (o meno) con gli scopi dichiarati della replicazione digitale della città [sezione 5.3].

Data la definizione di *caso d'uso* come insieme di azioni — o interazioni con il modello — sono qui introdotte due categorie di azioni.

---

<sup>90</sup> La definizione è basata su quella adottata da Biljecki *et al.* (2015, p.2846) che intendono per caso d'uso "a meaningful set of spatial operations that accomplish a goal a user wants to achieve with a spatial data set". Il concetto è mutuata dal campo dell'ingegneria informatica e si riferisce in particolare alla programmazione orientata agli oggetti. Lo *use case* è stato introdotto nell'ingegneria del software da Ivar Jacobson (Jacobson, 1987). Gli *use cases* costituiscono una tecnica di descrizione formale di un sistema basata su "how the system will be used to achieve a specific goal for a particular user" (Jacobson *et al.*, 2016).

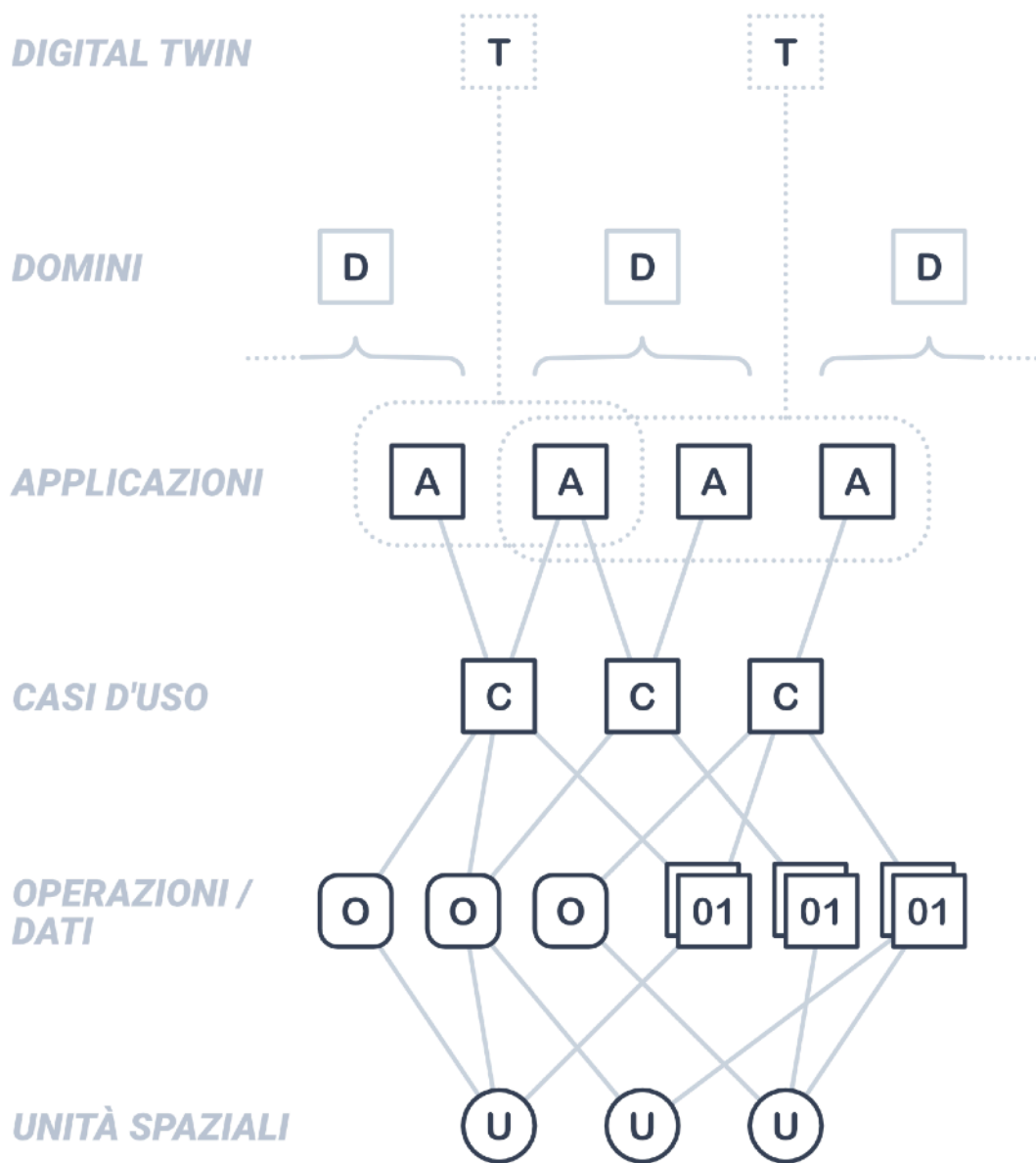


Figura 31. Lo schema rappresenta il processo analitico adottato nella tesi, che conduce dai *digital twin*, studiati attraverso una selezione di casi, alle *unità spaziali*, passando per l'individuazione di *applicazioni* e *casi d'uso* dei modelli digitali di città.

(a) La prima categoria comprende le *azioni per la registrazione di dati*. Lo scopo generale di modelli di città sempre più dettagliati e vicini al reale è stratificare e considerare congiuntamente molti livelli di dati, per svolgere analisi che tengano conto di un numero crescente di variabili. Tra le azioni di registrazione, sono rilevanti per l'analisi quelle che associano i dati a degli elementi spaziali. Sono esempi di queste azioni la registrazione di dati demografici associati ad aree geografiche, la localizzazione di dati provenienti da sensori nello spazio tridimensionale del modello, o il collegamento di documenti di dettaglio (modelli BIM, planimetrie...) a un elemento che rappresenta un edificio, come un volume. Più sinteticamente, saranno elencati e discussi i diversi tipi di dato spaziale previsti dall'uso del modello; si farà quindi riferimento alla categoria semplicemente come ***dati***.

(b) La seconda categoria comprende le *azioni per la trasformazione di dati*. Le informazioni spaziali contenute nel modello possono essere elaborate per eseguire operazioni di calcolo (ad esempio la misurazione di distanze, superfici, o di grandezze più complesse), per ricavare nuovi elementi da quelli dati (ad esempio stimare il numero di livelli a partire dall'ingombro di un edificio), per trasferire dati da un elemento ad un altro (per interpolazione, per aggregazione...). Si farà riferimento a questa categoria con il nome di ***operazioni***.

L'individuazione dell'insieme di *dati* e *operazioni* necessario ad un determinato uso del modello è il procedimento adottato per determinare il caso d'uso in maniera univoca e rendere coerente la lista di casi.

Il lavoro di [Biljecki et al. \(2015\)](#) ha costituito un punto di partenza nella costruzione della lista di casi d'uso. Gli autori individuano 29 casi d'uso attraverso un lavoro di sintesi basato su una rassegna di applicazioni di *3D city model*, sia affermate che sperimentali. Questo nucleo iniziale di casi documentati ha facilitato l'accesso al *corpus* di letteratura anche tecnica che comprova il ruolo delle componenti spaziali dei modelli. Diversamente, nelle fonti qui raccolte per lo studio dei *digital twin*, questo ruolo è a volte poco approfondito, e spesso le funzioni dichiarate sono accompagnate da pochi dettagli su come gli output richiesti siano ottenuti. La connessione fra i *digital twin* e i casi d'uso è quindi basata sulle informazioni raccolte dalle diverse *applicazioni* riconducibili a uno stesso caso d'uso, e dalla letteratura scientifica, se disponibile, che può supportare la comprensione delle azioni di registrazione e trasformazione di dati sul modello spaziale. Il livello di documentazione delle *applicazioni* e l'ulteriore letteratura rilevante sono in seguito discussi per i singoli casi d'uso.

La **disponibilità di informazioni** sull'uso dei caratteri spaziali del *digital twin* è dunque un primo criterio valutato per l'inclusione dei casi d'uso nella lista proposta. Alcuni usi sono prospettati fra le potenzialità dei *digital twin*, o sono attestati nella lettura sui modelli 3D di città ma non trovano riscontro in *applicazioni* realizzate nei *digital twin*. Questi sono esclusi dalla lista di casi d'uso prodotta. Altri modelli propongono funzioni la cui implementazione è a uno stadio sperimentale, come ad esempio quelli di Toronto e Los Angeles [sezione 4.2: DT.6, DT.8]. Le informazioni su queste *applicazioni* progettate sono state considerate rilevanti solo se contribuiscono alla definizione di un caso d'uso con altre *applicazioni* ad uno stato di sviluppo più avanzato, o se supportate da letteratura scientifica che ne confermi l'efficacia.

Un secondo criterio di selezione riguarda la **granularità dei dati**. Sono stati presi in esame solo gli aspetti del modello che risultano disponibili in maniera omogenea, o facilmente estensibili, ad una scala confrontabile con quella della città. Alcuni modelli (ad esempio quelli basati sulla piattaforma 3DEXPERIENCE di Dassault Systèmes) integrano in maniera fluida dati di dettaglio architettonico (in particolare modelli BIM), i quali consentono molte elaborazioni accurate che possono interagire con la scala urbana delle analisi<sup>91</sup>. Dallo studio dei *digital twin*, non risulta che simili dati siano oggi disponibili per porzioni di modello più estese di singoli edifici o aree di sviluppo recente e unitario. Inoltre, molti degli aspetti di queste applicazioni fanno riferimento a una letteratura specifica e vanno oltre i fini di questa ricerca. Come chiarito nella descrizione di diversi casi d'uso (ad esempio la *valutazione energetica*) i dati di dettaglio architettonico possono comunque essere impiegati come campioni per ricavare valori da attribuire a elementi a una granularità meno fine.

La lista di casi d'uso proposta consta di 9 casi. Questi sono una riformulazione dei casi derivati dalle rassegne esistenti, sulla base dall'individuazione di casi ulteriori, analoghi e complementari, emersi nell'analisi dei *digital twin* e delle tecnologie di modellazione connesse<sup>92</sup>.

In diversi casi, gli usi del modello digitale sono stati raggruppati in un singolo caso d'uso. Per i casi accorpati, non è stato possibile — entro lo studio dei *digital*

---

<sup>91</sup> Nella ricerca sulle *spatial information sciences* come nelle applicazioni industriali, l'integrazione di BIM e GIS è un tema in forte sviluppo negli ultimi anni; si vedano ad esempio Hor *et al.* (2016), Song *et al.* (2017) e Tobiáš (2015).

<sup>92</sup> L'integrazione di casi che ha portato al set finale è stata portata avanti, oltre che attraverso lo studio dei *digital twin*, attraverso attività di laboratorio condotte parallelamente alla realizzazione della tesi, che hanno permesso affondi verticali su specifiche tecnologie emergenti connesse alla modellazione (in particolare nei campi dell'intelligenza artificiale e della realtà aumentata).

*twin* qui condotto — evidenziare interazioni sostanzialmente diverse con i caratteri spaziali del modello. Più correttamente, quelli che sono chiamati *casi d'uso* potrebbero dunque essere detti **famiglie di casi d'uso**, entro le quali, le possibili varianti degli usi hanno in comune il set di *operazioni e dati* relativi alla rappresentazione dello spazio.

La lista **non può essere considerata esaustiva**, né riguardo agli usi invalsi dei modelli di città — considerando che un più ampio panorama di usi diffusi e sperimentali è attestato<sup>93</sup> — né riguardo al particolare ambito dei *digital twin*. Questo limite è legato all'estensione del campione osservato e al carattere parziale delle fonti, già discusso nel capitolo precedente. In particolare, è rilevante la carenza di relazioni e studi che valutino *ex post* l'efficacia dei modelli, data dall'applicazione recente e dai forti interessi commerciali. Fonti come *white paper* sui prodotti di *city twinning*, altri materiali realizzati dalle aziende con fini promozionali, e progetti di ricerca e implementazione, sono incentrate principalmente sulla compresenza di funzionalità consolidate dei modelli digitali, come emerge dal confronto con precedenti rassegne (*cf.* [Ross, 2010](#); [Stoter et al., 2011](#); [Biljecki et al., 2015](#)). Risulta invece più difficile individuare applicazioni più innovative — al di là di quelle delle tecnologie emergenti più note, come ad esempio la realtà aumentata. È però possibile ipotizzare che l'adozione di piattaforme di modellazione molto flessibili (come i già citati prodotti di Dassault Systèmes) possano supportare soluzioni inedite adattate alla specificità dei contesti di applicazione. Il lavoro è però considerato funzionale all'individuazione delle unità spaziali fondamentali per lo scopo generale della condivisione di dati, e può inoltre apportare un contributo incrementale alla descrizione di come i modelli di città sono oggi impiegati.

---

<sup>93</sup> Ad esempio, in [Liu et al. \(2015, citato in Biljecki et al., 2015\)](#) è attestato un uso dei modelli tridimensionali di città per la stima della posizione del sole sulla base di immagini fotografiche. Le applicazioni potenziali sono diverse e comprendono il miglioramento di funzioni di riconoscimento di immagine, o l'aggiunta di dettaglio all'illuminazione di oggetti virtuali in progetti di realtà aumentata. Nessun uso simile sembra previsto nel campione di modelli osservato.

---

## 5.2. Casi d'uso dei modelli digitali dello spazio urbano.

In questa sezione sono analizzati i **9 casi d'uso individuati**<sup>94</sup>. Ogni caso è ricondotto alle sue *applicazioni*, rilevate nei *digital twin*, delle quali sono discussi gli aspetti rilevanti per l'analisi. La definizione del caso è argomentata isolando le *operazioni* spaziali e i *dati* spaziali necessari allo specifico modo d'uso del modello.

Nonostante la formalizzazione proposta per i casi d'uso (basata su *operazioni* e *dati*) li definisca come mutuamente esclusivi, nelle applicazioni i diversi usi del modello possono interagire — ad esempio in una sequenza che preveda la produzione di dati utili ad un successivo uso del modello. Le interazioni individuate nello studio dei casi sono evidenziate, contribuendo alla comprensione dei caratteri spaziali coinvolti e dell'autonomia dei casi d'uso.

Un **grafo di sintesi** rappresenta ogni caso d'uso, riportando da una parte la connessione alle applicazioni in cui è stato individuato, e dall'altra le *operazioni* e i *dati* che definiscono l'uso in maniera univoca. Questi stessi elementi consentono inoltre l'individuazione delle *unità spaziali* sottese all'uso del modello, proposte nel grafo e discusse nella sezione successiva [sezione 5.3]. Ogni caso d'uso è sintetizzato in uno schema assonometrico che evidenzia il rapporto tra le componenti spaziali coinvolte (rappresentate in colore scuro) e le azioni svolte su di esse (rappresentate in rosso).

---

<sup>94</sup> Per la lettura delle descrizioni dei casi d'uso e delle schede di approfondimento in [appendice \[A2\]](#) può risultare utile far riferimento al glossario inserito in coda all'appendice.



### *CU.1. Valutazione energetica.*

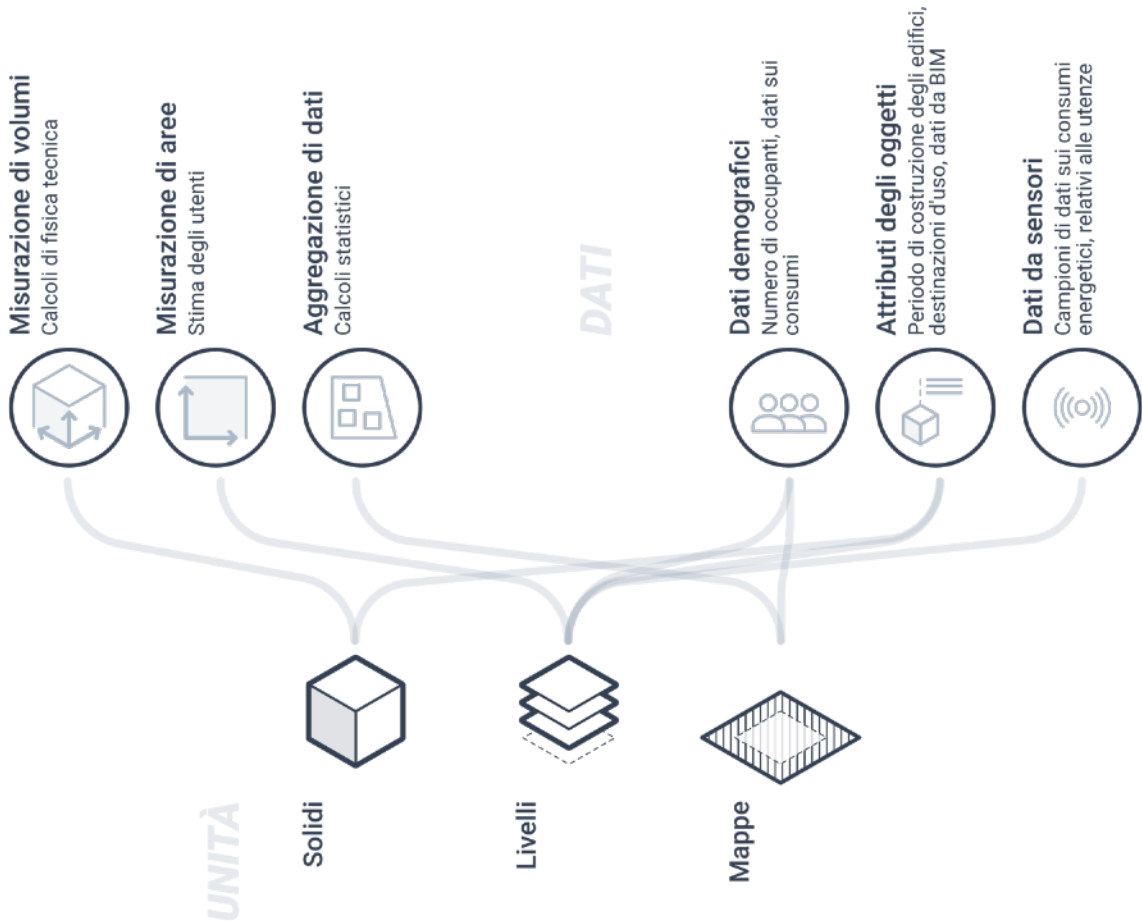
Il caso d'uso è inteso come una stima della domanda energetica alla scala urbana, fondata su dati statistici con un livello omogeneo di dettaglio, anche aggregato (ad esempio per isolato), benché le stime possano essere calibrate su un campione di misurazioni, come i consumi rilevati o flussi di dati da sensori.

L'uso dei modelli di città per la valutazione energetica è previsto per molti dei casi di *digital twin* studiati. L'integrazione delle funzioni di valutazione energetica nei DT segue un fertile filone di ricerca sulla diagnosi e la simulazione del comportamento energetico degli edifici alla scala urbana, percorso sin dagli anni 2000 con l'affermazione dei modelli semantici (Biljecki *et al.*, 2015). Queste funzioni sono nodali nella definizione di politiche di riduzione dell'impatto ambientale, e incontrano l'ampia domanda di soluzioni per la sostenibilità dello sviluppo propria delle narrazioni della *smart city*.

Mentre la stima dei consumi può essere ottenuta con metodi statistici attraverso le serie storiche (o dati da sensori) di un campione di utenze e informazioni associate all'edificio (ad esempio il periodo di costruzione), il ruolo del modello 3D è essenziale nelle simulazioni, ad esempio per nuove costruzioni e interventi di riqualificazione energetica (Nouvel *et al.*, 2015). Le applicazioni prevedono metodi ingegneristici di calcolo basati su parametri fisici e sulle caratteristiche geometriche degli edifici o dei livelli degli edifici.

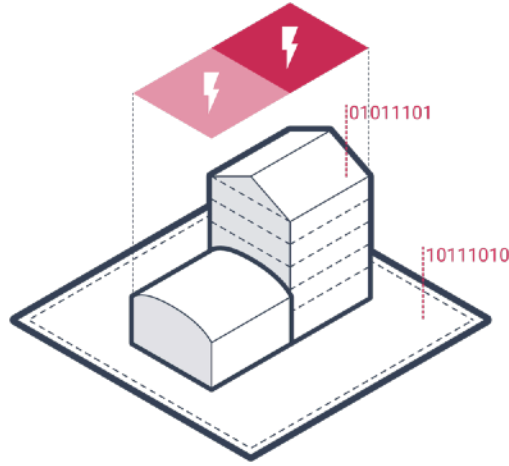
*Altri approfondimenti sulle applicazioni, sulla definizione del caso d'uso, e sull'interazione con altri casi sono consultabili in [appendice \[A2: CU.1\]](#).*

# OPERAZIONI



## CASO D'USO

### 1. Valutazione energetica



## APPLICAZIONI

### Rennes

Mapa del consumo energetico  
Dati alla scala del quartiere  
Risultati alla scala dell'edificio

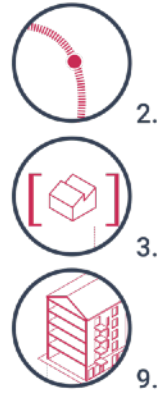
### L.A. – Lincoln Heights

Monitoraggio energetico e simulazioni  
Dati da sensori  
Risultati alla scala dell'isolato

### Toronto – Quayside

Sistema automatico di gestione energetica  
Dati da sensori  
Risultati alla scala dell'edificio

## INTERAZIONI



## *CU.2. Calcolo dell'irraggiamento solare.*

Il caso riguarda l'uso del modello per funzioni che richiedono di confrontare degli elementi geometrici con la posizione del sole, come la proiezione di ombre o la valutazione dell'esposizione di superfici.

La visualizzazione delle ombre è una funzione di base degli strumenti di modellazione anche all'infuori della modellazione informativa, e pertanto possiamo assumere che questa applicazione sia adottata in ogni modello di città corrente. Pertanto, lo studio delle ombre non è stato considerato nell'analisi dei casi di *digital twin*. Il caso d'uso è stato quindi approfondito come requisito per funzioni più complesse del modello digitale, che prevedono ad esempio l'interazione con altri strati di dati.

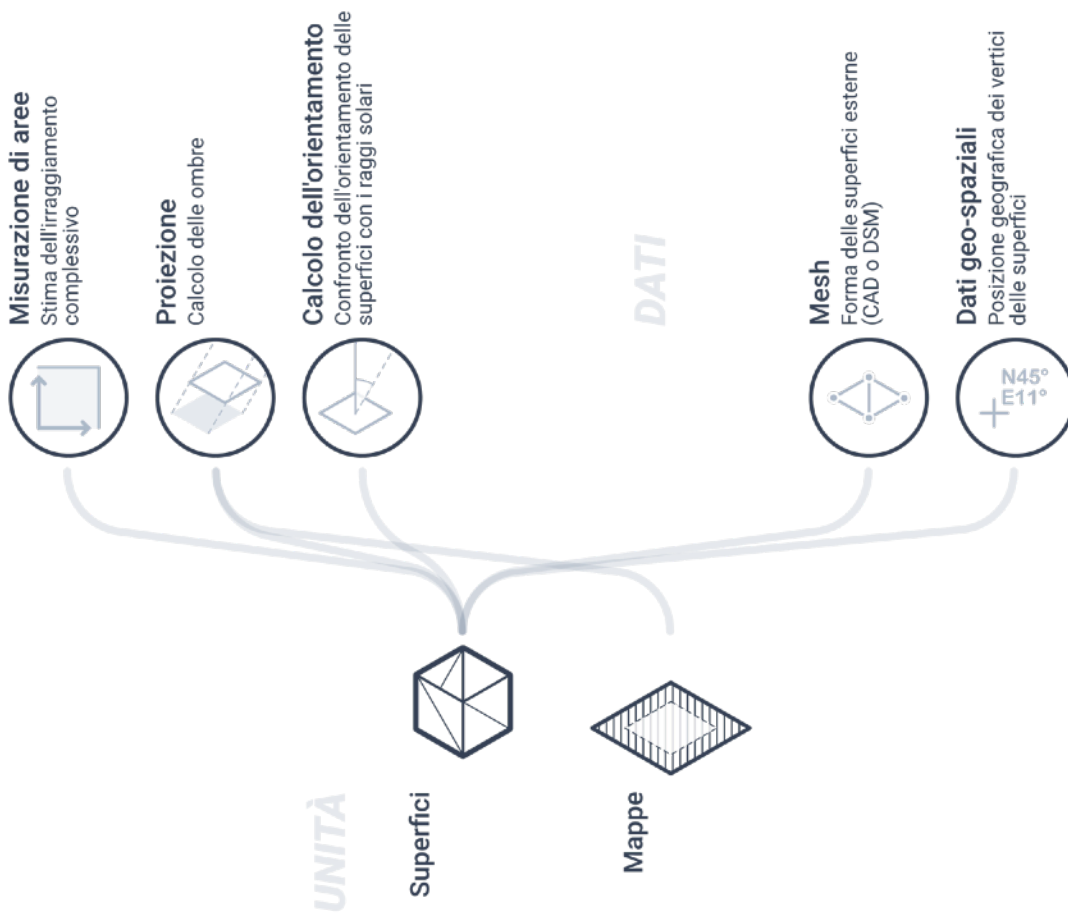
Un modello 3D a una scala di dettaglio che includa la geometria delle coperture e la posizione geografica del sito permette infatti di stimare irraggiamento della superficie in diversi intervalli temporali ed ottenere, ad esempio, dei valori per il calcolo del microclima urbano, o una valutazione di efficienza per l'installazione di pannelli solari. L'analisi del potenziale solare è una funzione che fa parte di comuni strumenti BIM e GIS<sup>95</sup>.

*Altri approfondimenti sulle applicazioni, sulla definizione del caso d'uso, e sull'interazione con altri casi sono consultabili in [appendice \[A2: CU.2\]](#).*

---

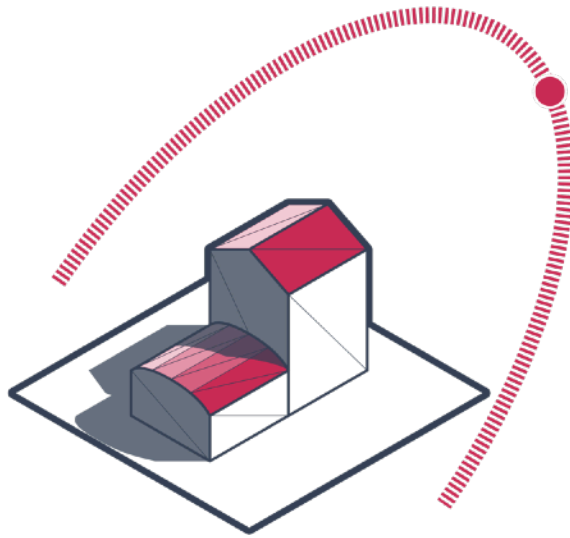
<sup>95</sup> Autodesk Revit include strumenti di analisi solare che permettono di stimare la resa di un impianto fotovoltaico e di gestire parametricamente la visualizzazione dei valori di esposizione calcolati sul modello. Per gli strumenti GIS, si veda [Ronzino et al. \(2015\)](#).

# OPERAZIONI

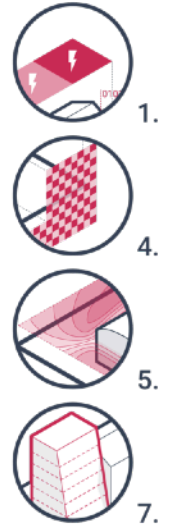


# CASO D'USO

2. Calcolo dell'irraggiamento solare



# INTERAZIONI



# APPLICAZIONI

## Zurich

Valutazione energetica e simulazioni  
Dati da modello geospaziale  
Risultati alla scala delle parti dell'edificio

## Amaravati

Monitoraggio del microclima e simulazioni  
Dati da modello geometrico  
Risultati in forma di mappe

## L.A. – Lincoln Heights

Monitoraggio del microclima e simulazioni  
Dati da modello geometrico  
Risultati alla scala dell'isolato

## Helsinki – Kalasatama

Valutazione ambientale  
Dati da modello geometrico  
Risultati alla scala dell'edificio

### *CU.3. Classificazione della forma.*

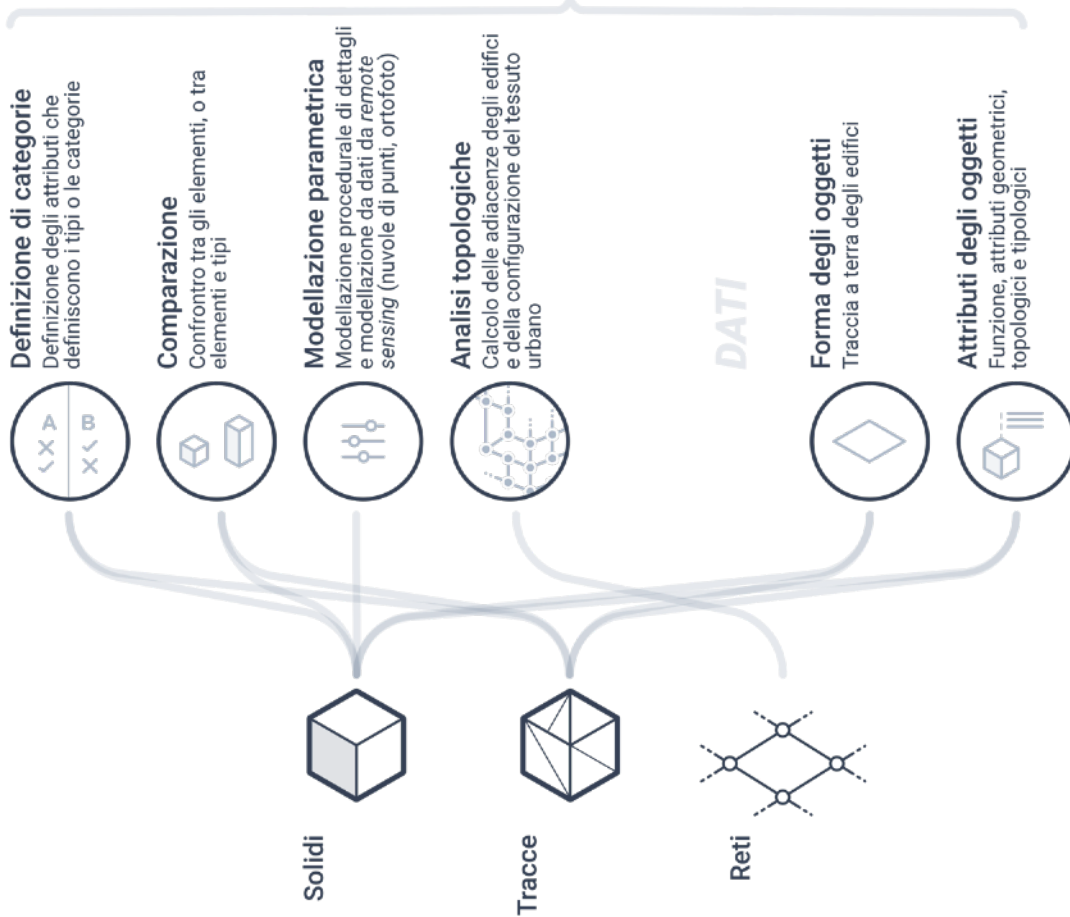
L'uso di tecniche di classificazione automatica legato alla generazione di elementi e attributi dei modelli di città digitali non appare ancora frequente, ma negli ultimi anni è stato oggetto di alcune ricerche (Henn *et al.*, 2012). Il *clustering* automatico basato sulla forma, ovvero la divisione di una serie di elementi in gruppi o classi sulla base di parametri morfologici, fa inoltre parte dei metodi analitici adottati negli approcci quantitativi alla morfologia urbana (Berghauser Pont e Olsson, 2017).

Qui intendiamo come parte delle operazioni di classificazione della forma anche la modellazione procedurale (Müller *et al.*, 2006; Nishida *et al.*, 2018), che supporta la costruzione e l'aggiornamento del modello di città sulla base dell'associazione automatica e semi-automatica di informazioni semantiche ai dati geometrici.

Sebbene l'uso della classificazione della forma sia poco documentato nel campione di modelli studiato, si può prevedere un aumento di simili applicazioni nel futuro prossimo, connesso allo sviluppo delle tecniche di intelligenza artificiale e all'aumento dei dati da rilievo digitale (Nishida *et al.*, 2018; Wan *et al.*, 2019).

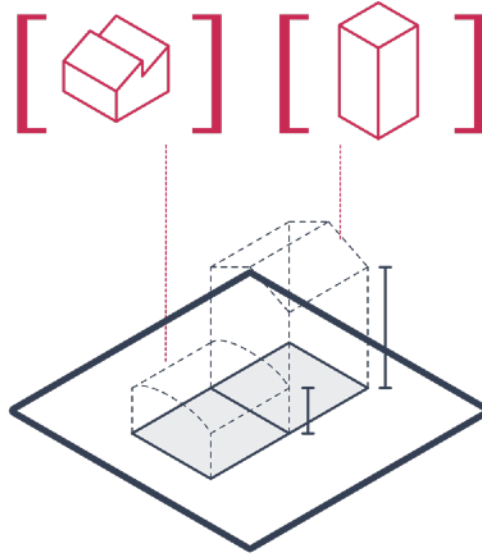
*Altri approfondimenti sulle applicazioni, sulla definizione del caso d'uso, e sull'interazione con altri casi sono consultabili in [appendice \[A2: CU.3\]](#).*

# OPERAZIONI



## CASO D'USO

### 3. Classificazione della forma



## APPLICAZIONI

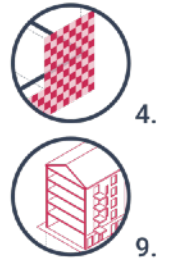
### Helsinki – Kalasatama

Generazione e aggiornamento del modello  
Dati da DSM, DTM e tracce degli edifici  
Risultati alla scala delle parti dell'edificio

### Singapore

Generazione e aggiornamento del modello  
Dati da DSM, immagini aeree e LOD2  
Risultati alla scala delle parti dell'edificio

## INTERAZIONI



#### CU.4. Visualizzazione.

La visualizzazione è alla base di un ampio e vario catalogo di applicazioni del modello della città, come è stata sin dall'affermazione della modellazione digitale (Batty *et al.*, 2000), anche in quanto funzione principale del modello inteso in un senso più generale e tradizionale. Per la definizione del caso d'uso sono considerata principalmente la categoria delle applicazioni relative alla comunicazione di informazioni<sup>96</sup>. Tuttavia, anche nei *digital twin* studiati, la visualizzazione ha un ruolo essenziale nella maggior parte delle funzioni del modello.

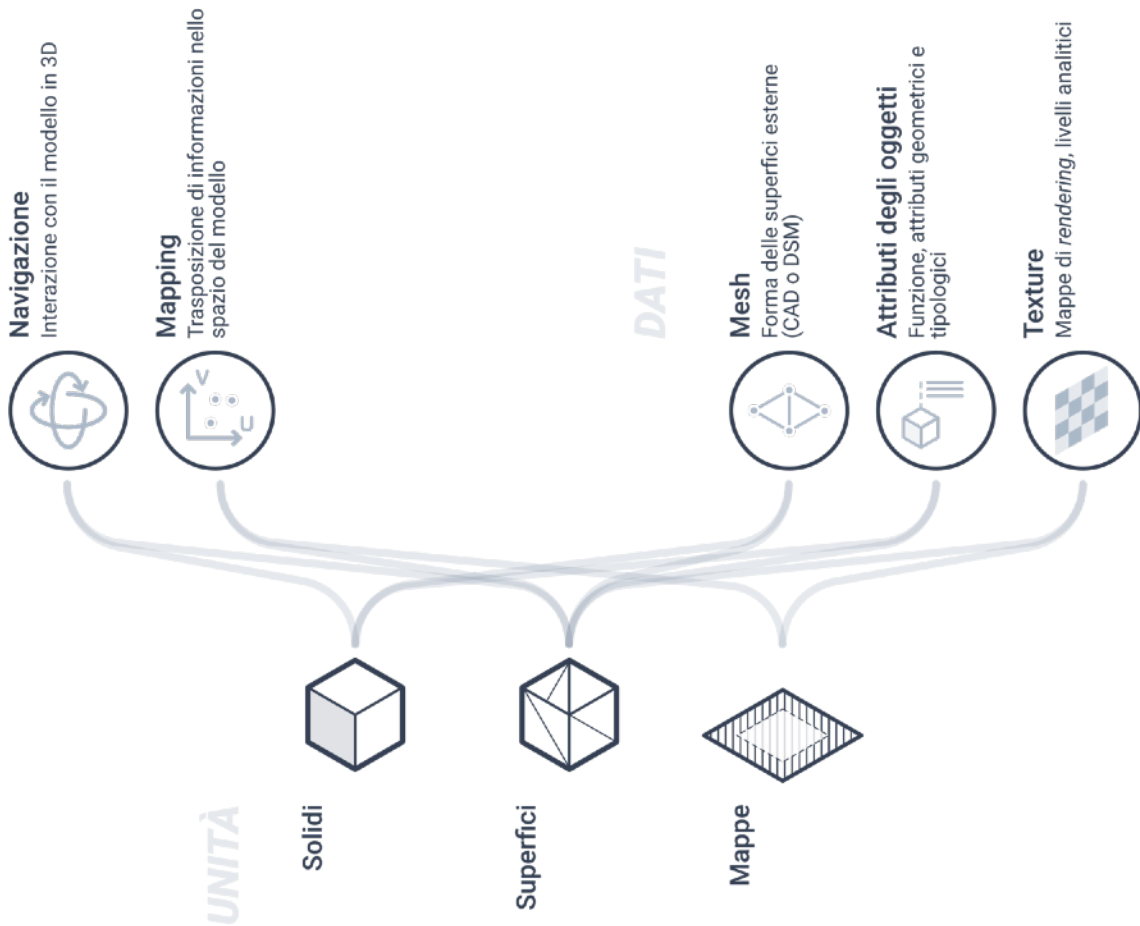
Le modalità di visualizzazione del modello e delle informazioni connesse sono molte e conducono a risultati eterogenei. Informazioni e rese grafiche anche molto differenti (*e.g.*, mappe bidimensionali e volumi di edifici) possono coesistere in una stessa applicazione, contribuendo al confronto di molti dati e interpretazioni — obiettivo nodale della rappresentazione digitale della città. Le informazioni possono essere presentate in forma di mappe, ovvero strati grafici di dati omogenei, variabili nel continuo, bidimensionali o applicati a superfici nello spazio. Ne sono esempi le mappe che presentano i risultati di simulazioni fisiche alla scala urbana (mappe del rumore, della qualità dell'aria, del microclima urbano). La visualizzazione della componente geometrica può andare da modelli molto semplici, a modelli che ereditano il dettaglio dal BIM, e in alcuni casi integra la resa fotorealistica delle superfici esterne attraverso la sovrapposizione di *texture*. Agli elementi del modello possono essere associate altre informazioni, visualizzate come schede di dati, infografica, o come grafici nello spazio del modello. Un esempio di quest'ultimo caso è la visualizzazione delle condizioni di traffico in corrispondenza delle strade, o, più in generale, la colorazione condizionale di un insieme di elementi.

*Altri approfondimenti sulle applicazioni, sulla definizione del caso d'uso, e sull'interazione con altri casi sono consultabili in [appendice \[A2: CU.4\]](#).*

---

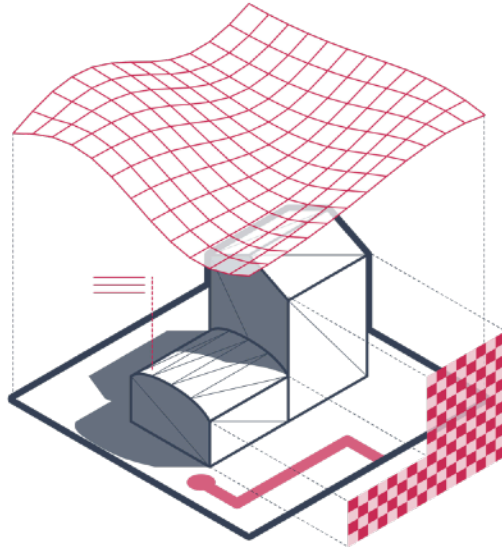
<sup>96</sup> Sono ad esempio considerati i servizi per i cittadini (portali informativi in rete) e per l'amministrazione stessa (i *city dashboard*), ma non sono riportate puntualmente tutte le applicazioni, tra quelle rilevate nei *digital twin*, che richiedono una componente di visualizzazione per altre finalità (*e.g.*, monitoraggio del traffico o progettazione). La scelta è funzionale a una descrizione più sintetica dell'uso, ed è basata sull'assunto che le funzioni descritte siano sufficienti ad individuare le unità spaziali richieste. Il criterio può essere confrontato con la distinzione di casi d'uso "*visualization-only*" proposta da Biljecki *et al.* (2015, p.2849).

# OPERAZIONI



# CASO D'USO

## 4. Visualizzazione



# APPLICAZIONI

## Zurich

Comunicazione online (partecipazione)  
Videogames, serious games, VR  
Dati alla scala delle parti dell'edificio  
Risultati in forma di mesh, mappe e dati

## Helsinki – Kalasatama

Comunicazione online (accesso ai dati)  
Dati alla scala delle parti dell'edificio  
Risultati in forma di mesh, mappe e dati

## Singapore

Comunicazione online (accesso ai dati)  
Dati alla scala del BIM  
Risultati in forma di mesh, mappe e dati (resa fotorealistica)

## Amaravati

Comunicazione online (servizi)  
Dati alla scala del BIM  
Risultati in forma di mesh, mappe e dati

## Amsterdam – A. Zuidoost

City Dashboard  
Dati da sensori e dataset tematici  
Risultate in forma di mappe, dati e grafici (aggiornati in tempo reale)

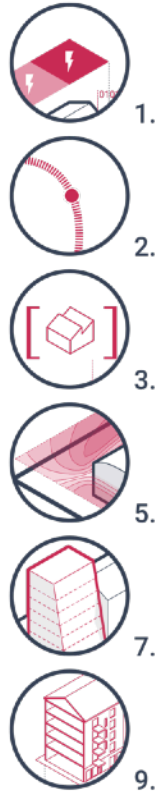
## Toronto – Quayside

Showcase  
Dati alla scala del BIM  
Risultati in forma di mesh, mappe e dati

## Los Angeles – Lincoln Heights

Showcase  
Dati alla scala del BIM  
Risultati in forma di mesh, mappe e dati

# INTERAZIONI





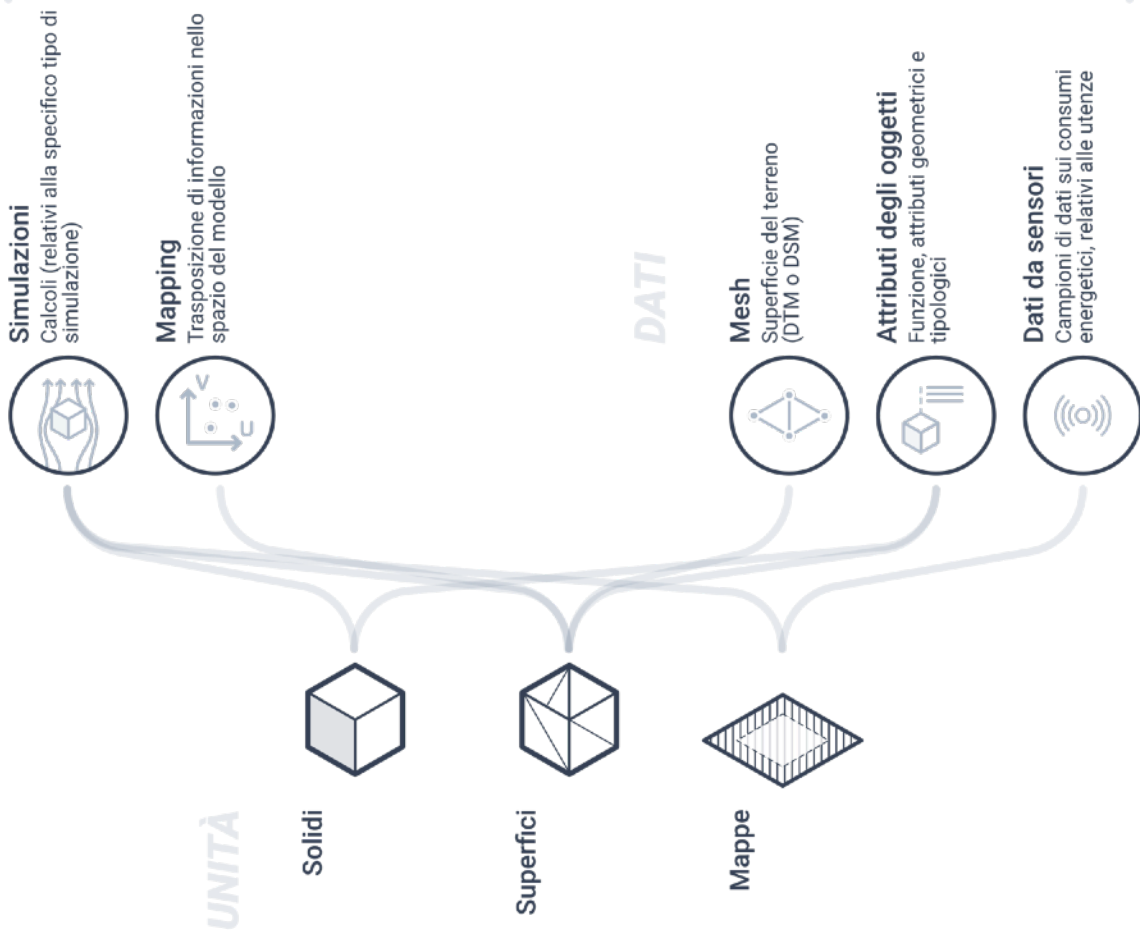
### *CU.5. Simulazioni fisiche.*

La maggior parte dei *digital twin* studiati permette di eseguire diverse simulazioni fisiche che elaborano dati ambientali come vento, temperatura, o rumore, in base agli ostacoli fisici costituiti dagli edifici e alle eventuali sorgenti. La grande flessibilità degli strumenti di modellazione della città in questo ambito è già evidenziata nella rassegna di [Biljecki et al. \(2015\)](#), che rileva in letteratura simulazioni acustiche, illuminotecniche, fluidodinamiche, e di propagazione delle onde radio. Nei casi analizzati, le funzioni sono a volte parte integrante dei software di gestione dei dati. In altri casi, l'intervento di più software — per la raccolta dei dati, la produzione di simulazioni, la visualizzazione — suggerisce il bisogno di molte operazioni di traduzione e trasferimento di dati per portare in applicazione il concetto di *digital twin* come modello integrato.

In alcuni casi, l'uso del modello per le simulazioni già esalta la rapida trasmissione delle informazioni tra città reale e copia virtuale, sfruttando i dati provenienti da sensori, quasi in tempo reale. Le simulazioni fisiche sono dunque alla base sia di funzioni *reactive*, ovvero per la gestione della città allo stato di fatto, sia di funzioni *predictive*, impiegate nella costruzione di scenari previsionali e nel supporto alle decisioni — con riferimento alle due categorie di funzioni dei modelli digitali definite da [Wildfire \(2018\)](#).

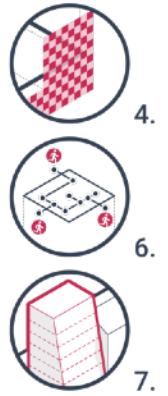
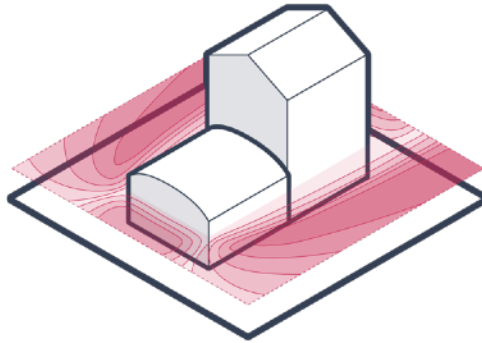
*Altri approfondimenti sulle applicazioni, sulla definizione del caso d'uso, e sull'interazione con altri casi sono consultabili in [appendice \[A2: CU.5\]](#).*

# OPERAZIONI



# CASO D'USO

## 5. Simulazioni fisiche



# INTERAZIONI

# APPLICAZIONI

- Zurich**  
Valutazioni ambientali e simulazioni (rumore, qualità dell'aria, onde radio)  
Dati da sensori, dataset tematici, e modello geometrico  
Risultati in forma di mappe
- Helsinki – Kalasatama**  
Valutazioni ambientali e simulazioni (vento)  
Dati da sensori e modello geometrico  
Risultati in forma di mappe
- Singapore**  
Valutazioni ambientali e simulazioni (rumori, qualità dell'aria, onde radio, vento)  
Risposta alle emergenze  
Dati alla scala del BIM e dataset tematici  
Risultati in forma di mappe
- Amaravati**  
Monitoraggio del microclima e simulazioni  
Dati da modello geometrico  
Risultati in forma di mappe
- Amsterdam – A. Zuidoost**  
Simulazioni per la pianificazione (ambientali, non specificate)  
Dati da sensori, dataset tematici, e modello geometrico  
Risultati in forma di mappe e grafici
- Rennes**  
Valutazioni ambientali e simulazioni (rumori, qualità dell'aria, onde radio, vento)  
Dati da sensori e modello geometrico  
Risultati in forma di mappe
- Antwerp**  
Valutazioni ambientali e simulazioni (rumori, qualità dell'aria)  
Dati da sensori e modello geometrico  
Risultati in forma di mappe

## *CU.6. Routing.*

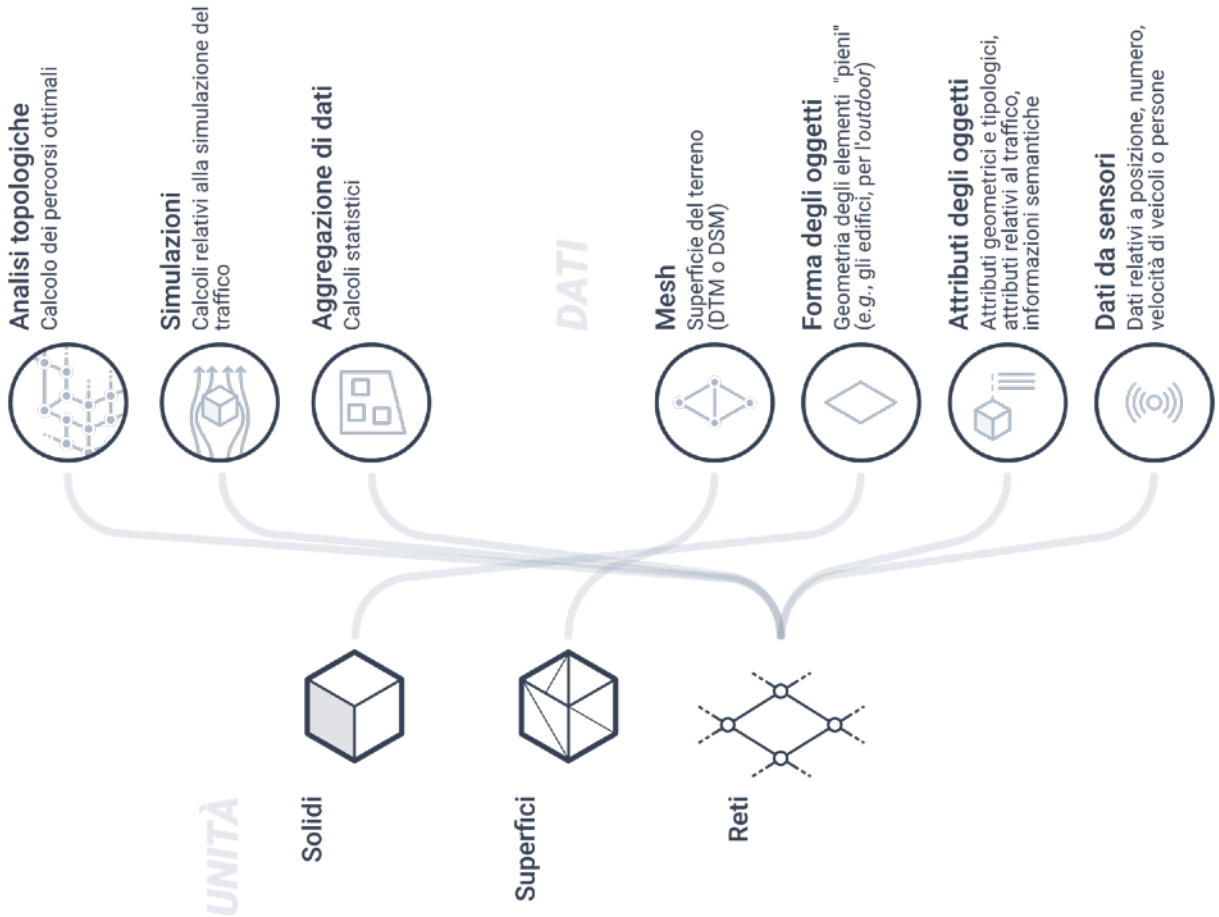
Il *routing*, ovvero la ricerca di un percorso ottimale, è una famiglia di usi del modello che tradizionalmente sfrutta sistemi bidimensionali ma che può trovare nuove applicazioni grazie ai modelli tridimensionali — ad esempio per considerare la mobilità pedonale *indoor* o sulla base delle barriere architettoniche, oppure considerando le caratteristiche altimetriche di una strada per minimizzare i consumi (Biljecki *et al.*, 2015; Chen *et al.*, 2012; Tashakkori, *et al.*, 2015; Schröder e Cabral, 2019).

Nei casi più semplici, il *routing* è alla base delle funzioni di monitoraggio e simulazione del traffico. L'uso consente la navigazione (qui considerata un'applicazione della visualizzazione), ma anche la simulazione di scenari di traffico (attraverso la generazione di percorsi sintetici nella simulazione degli spostamenti).

Il *routing*, per calcoli che considerano la posizione degli utenti o stime dei tempi di percorrenza, può basarsi su dati provenienti da diversi sistemi di sensori per il monitoraggio degli spostamenti o dei transiti in determinati punti della rete, che comprendono contatori automatici e le informazioni GPS dei dispositivi mobili dei cittadini.

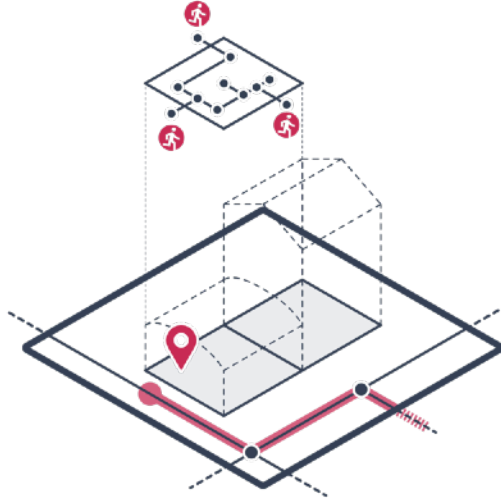
*Altri approfondimenti sulle applicazioni, sulla definizione del caso d'uso, e sull'interazione con altri casi sono consultabili in [appendice \[A2: CU.6\]](#).*

# OPERAZIONI



## CASO D'USO

### 6. Routing



## APPLICAZIONI

- Singapore**  
Navigazione  
Risposta alle emergenze  
Dati in tempo reale (non specificati)
- Amsterdam – A. Zuidooost**  
Monitoraggio del traffico  
Dati da sensori  
Risultati in forma di GIS (network stradale)
- Toronto – Quayside**  
Monitoraggio del traffico e simulazioni  
Dati da sensori (dispositivi mobili)  
Risultati in forma di GIS (network stradale)
- Antwerp**  
Monitoraggio del traffico e simulazioni  
Dati da sensori (contatori automatici)

## INTERAZIONI



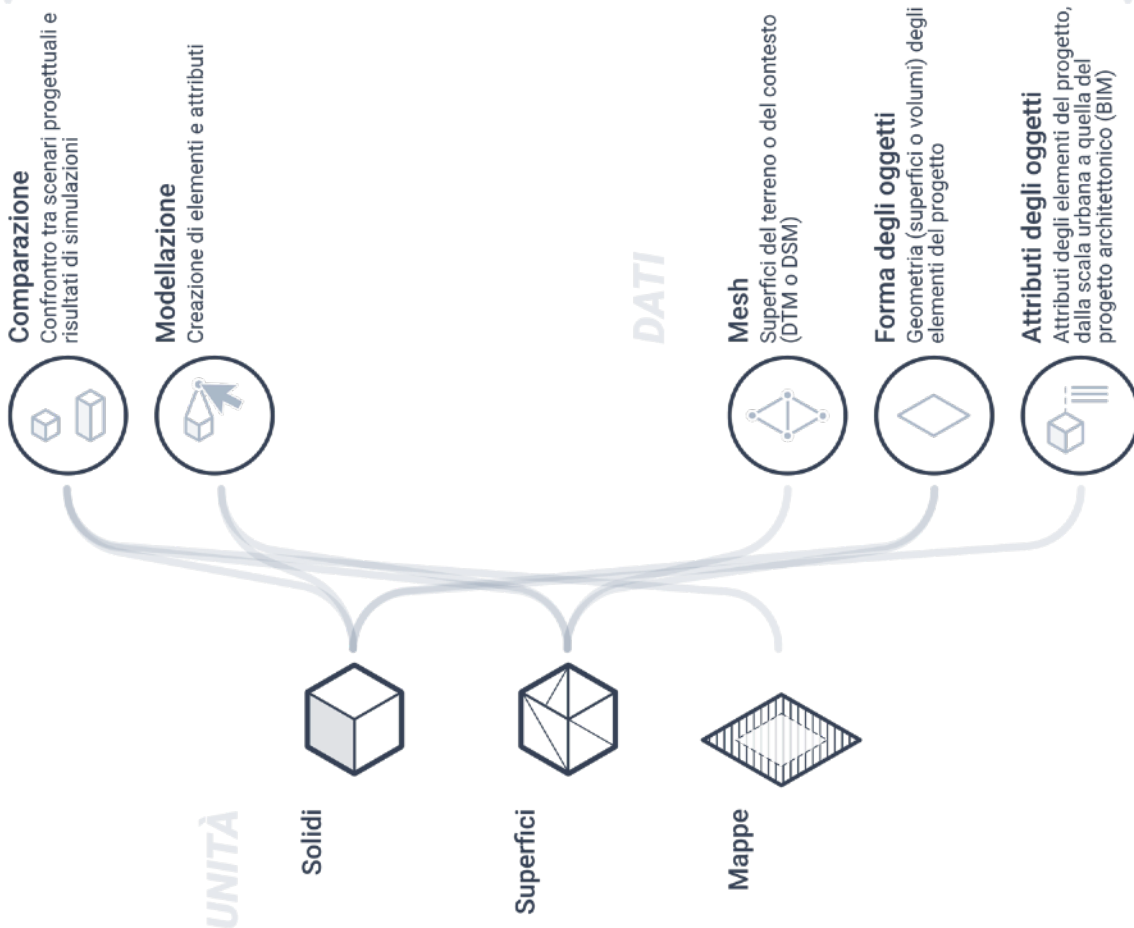
4.

### *CU.7. Progettazione.*

L'uso del modello per la *progettazione* è inteso prevalentemente come l'integrazione di elementi esistenti e elementi di progetto, soprattutto attraverso la rappresentazione dei volumi. Ulteriori elementi possono essere inclusi, come livelli degli edifici, vegetazione, dettagli alla scala architettonica, attributi delle superfici (e.g., *texture* e materiali). L'uso è normalmente associato alla visualizzazione, che permette anche forme di progettazione collaborativa o di condivisione degli scenari progettuali con gli altri portatori di interesse. L'uso può interagire con diverse altre funzioni del modello per replicare le analisi e le elaborazioni dello stato di fatto anche sugli scenari di trasformazione. Per esempio, la visualizzazione e il calcolo delle ombre possono consentire una migliore valutazione del contesto e dell'inserimento di nuovi elementi; simulazioni di traffico o di fluido-dinamica possono aiutare a valutare l'impatto della trasformazione. Gli obiettivi principali sono dunque il confronto tra diversi aspetti delle alternative progettuali e la valutazione dell'impatto della trasformazione all'incontro di più punti di vista e discipline.

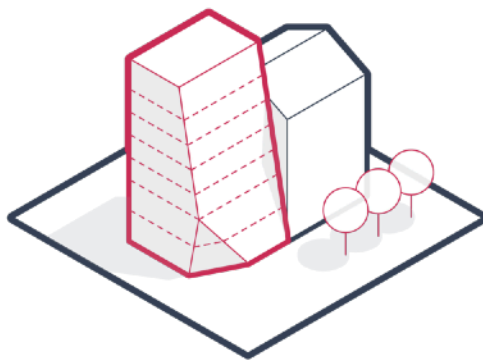
*Altri approfondimenti sulle applicazioni, sulla definizione del caso d'uso, e sull'interazione con altri casi sono consultabili in [appendice \[A2: CU.7\]](#).*

# OPERAZIONI



# CASO D'USO

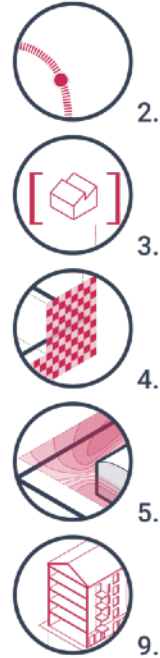
## 7. Progettazione



# APPLICAZIONI

- Zurich**  
Progettazione urbano e pianificazione (comunicazione, confronto con le norme)  
Progetti alla scala architettonica e urbana
- Helsinki – Kalasatama**  
Progettazione partecipata (inserimento nel contesto, VR)  
Progetti alla scala architettonica e urbana
- Singapore**  
Progettazione urbana (simulazioni, progetto semi-automatico)  
Progetti alla scala architettonica e urbana
- Amaravati**  
Monitoraggio del cantiere  
Progetti alla scala architettonica
- Rennes**  
Progettazione urbana (simulazioni, comunicazione)  
Progetti alla scala architettonica e urbana
- Los Angeles – Lincoln Heights**  
Progettazione urbana (simulazioni)  
Progetti alla scala architettonica e urbana
- Antwerp**  
Progettazione urbana e pianificazione (simulazioni)  
Progetti alla scala urbana

# INTERAZIONI

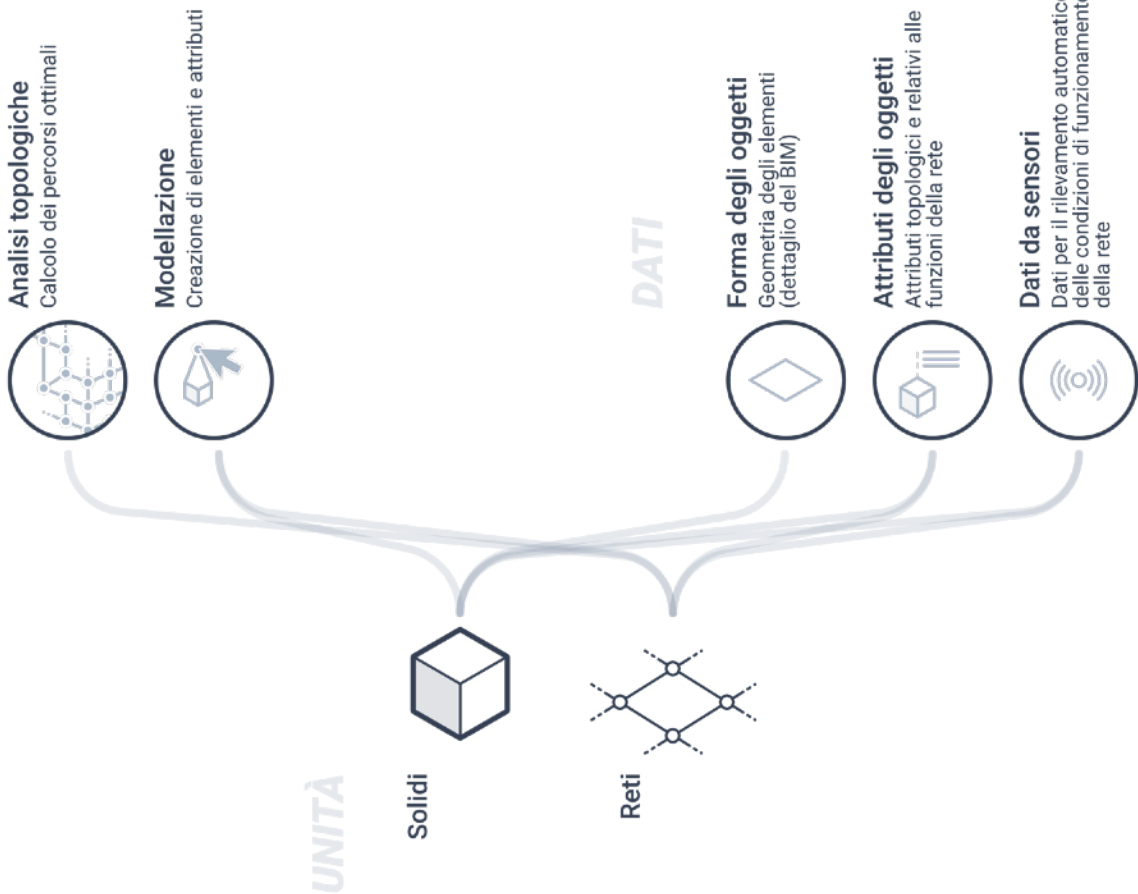


### *CU.8. Gestione di reti infrastrutturali.*

La rappresentazione delle reti infrastrutturali è un uso consolidato di modelli geo-spaziali modello che aggiunge ai principali elementi della morfologia urbana (strade, lotti, edifici) geometrie e dati per descrivere servizi come le reti di energia elettrica, gas, fognature e telecomunicazioni. L'uso è presente in letteratura da diversi anni, con casi significativi nelle applicazioni per grandi infrastrutture come porti e aeroporti (Biljecki *et al.*, 2015; Zlatanova *et al.*, 2014; Hu *et al.*, 2016). Le applicazioni sono strettamente legate ai caratteri semantici dei modelli, ad esempio per l'aggiornamento di dati o la differenziazione delle diverse reti. Molti modelli, infatti, integrano (o prevedono di integrare) standard e formati compatibili con il BIM. I sistemi di raccolta dei dati possono essere basati su sensori per garantire l'aggiornamento continuo del modello urbano.

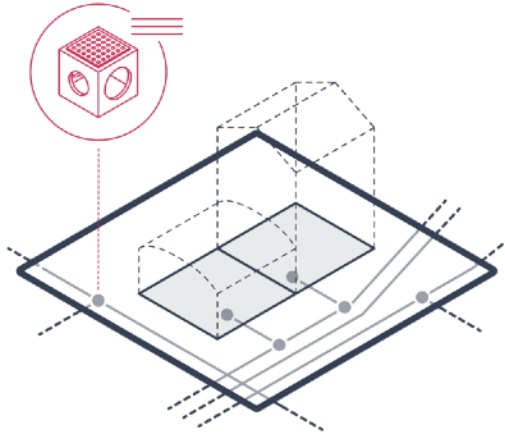
*Altri approfondimenti sulle applicazioni, sulla definizione del caso d'uso, e sull'interazione con altri casi sono consultabili in [appendice \[A2: CU.8\]](#).*

# OPERAZIONI



# CASO D'USO

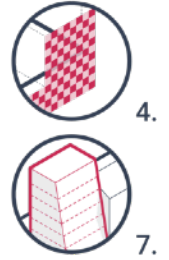
## 8. Gestione di reti infrastrutturali



# APPLICAZIONI

- Zurich**  
Catasto dei sottoservizi  
Dati alla scala del BIM
- Amaravati**  
Interfaccia per l'integrazione di asset spaziali  
Dati alla scala del BIM
- Toronto – Quayside**  
Gestione degli asset pubblici  
Dati alla scala del BIM
- Rennes**  
Progettazione urbana

# INTERAZIONI





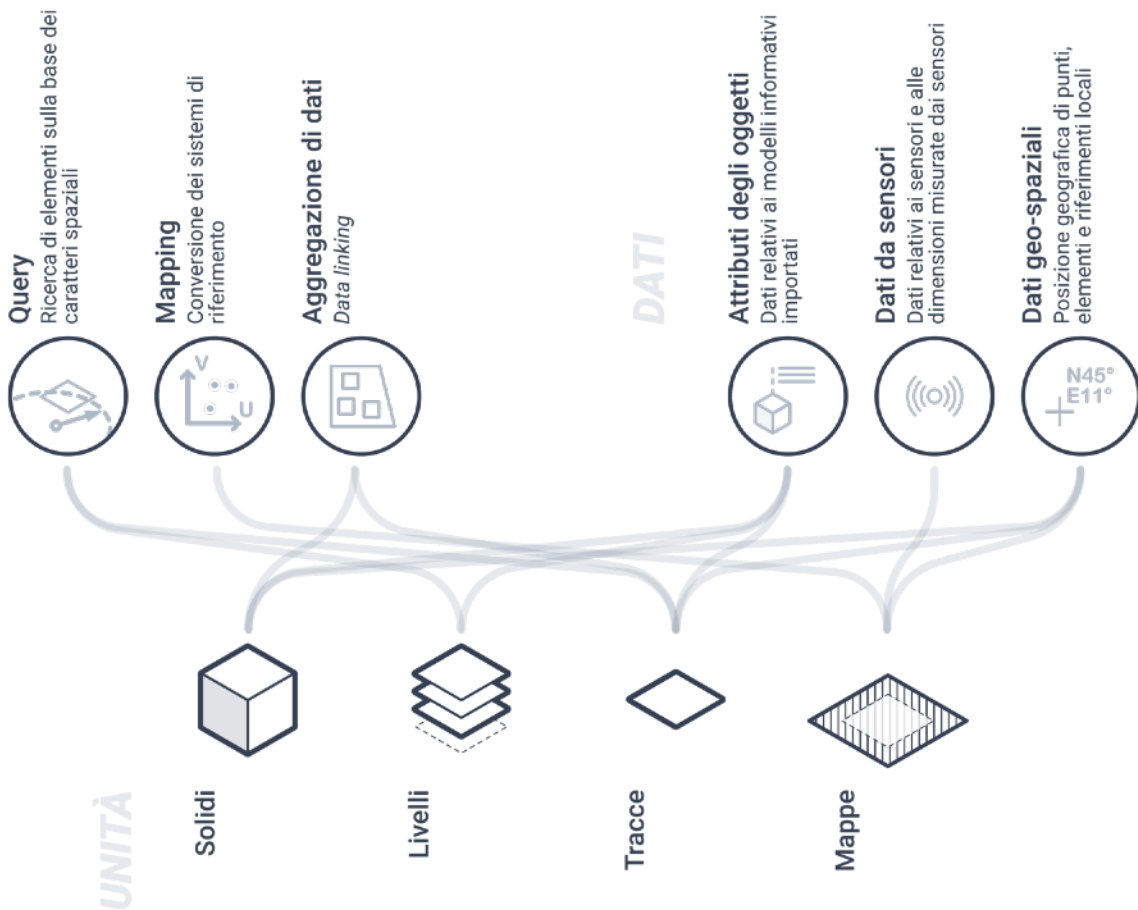
### *CU.9. Integrazione di dati spazializzati.*

La famiglia di usi si riferisce ai processi di integrazione di dati o di interi modelli spaziali sulla base di sistemi di riferimento comuni. In letteratura, è messa in evidenza la possibilità delle rappresentazioni spaziali di città di mettere in relazione e rendere accessibili, anche attraverso applicazioni *web*, diversi tipi di documento, modelli tridimensionali (anche funzionali ad applicazioni di VR e AR), cartografia storica e contemporanea di diverso formato (Huffman *et al.*, 2017; Giordano *et al.*, 2018; Cecchini *et al.*, 2019). I *digital twin* possono dunque permettere la sovrapposizione e la visualizzazione di geometrie provenienti da altri modelli e l'importazione di dati in forma di attributi degli elementi geo-spaziali da integrare (come ad esempio le informazioni di un database GIS). Applicazioni dell'integrazione di dati spaziali possono essere individuate in quasi ogni *digital twin*, essendo la possibilità di raccogliere informazioni da fonti diverse uno dei principi su cui si basa il paradigma del *digital twin*. Alcune applicazioni comuni alla maggior parte dei modelli urbani studiati sono la raccolta di dati da sensori e la collezione di informazioni provenienti da diversi database spaziali con finalità di consultazione, comparazione, e analisi.

Il caso d'uso non è stato individuato come tale negli studi citati sulle funzioni dei modelli digitali, ma piuttosto come singola operazione comune a molte applicazioni. In questa rilettura degli usi dei modelli, si ritiene di poter isolare un caso d'uso autonomo che richiede la registrazione di diversi tipi di dati (singoli punti, oggetti geo-spaziali più complessi, attributi non-spaziali) e diverse operazioni spaziali (conversioni dei sistemi di riferimento, *query* spaziali, *data linking*). Sulla base delle applicazioni rilevate nei *digital twin*, queste azioni risultano coesistenti e coadiuvano la raccolta di informazioni diverse in un'unica piattaforma.

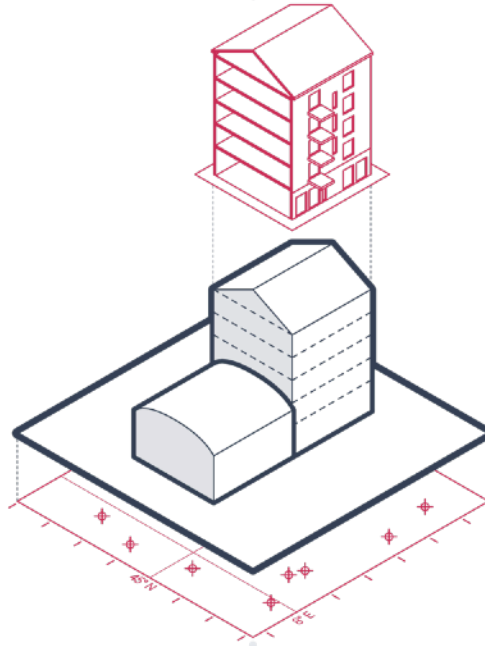
*Altri approfondimenti sulle applicazioni, sulla definizione del caso d'uso, e sull'interazione con altri casi sono consultabili in [appendice \[A2: CU.9\]](#).*

# OPERAZIONI



# CASO D'USO

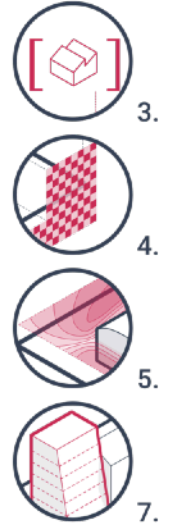
## 9. Integrazione di dati spazializzati



# APPLICAZIONI

- Zurich**  
Portale degli open data  
Dati spaziali in formati GIS
- Helsinki – Kalasatama**  
Portale degli open data  
Dati spaziali in formati GIS
- Amaravati**  
Interfaccia per l'integrazione di modelli spaziali  
Dati spaziali in formati BIM
- Amsterdam – A. Zuideroost**  
Raccolta di dati da dispositivi mobili  
Dati spaziali in forma di punti
- Antwerp**  
Raccolta di dati da sensori (qualità dell'aria, rumori)  
Dati spaziali in forma di punti

# INTERAZIONI



### *Altri usi.*

Le 9 famiglie di usi approfondiscono alcune caratteristiche dei *digital twin* isolate attraverso il confronto delle applicazioni documentate. L'elenco dei possibili usi dei modelli digitali è però più ampio, come riferisce la letteratura scientifica [v. [sezione 5.1](#)] e come gli stessi casi studiati confermano. Il lavoro di analisi è stato quindi avviato con la stesura di un più lungo elenco di casi d'uso, basato sia sullo studio dello stato dell'arte nel campo dei *3D city model*, sia sulla raccolta preliminare di documentazione sui *digital twin*. La riduzione ai nove casi presentati è determinata da un lato alla mancanza di informazioni sufficienti a definire alcuni degli usi inizialmente delineati, dall'altro alla riformulazione delle ipotesi di partenza in una serie coerente di casi. Laddove la possibilità di definire i casi d'uso come insiemi di operazioni e dati spaziali non è risultata soddisfatta, alcuni casi previsti sono stati accorpati o tralasciati. Il quadro fin qui delineato riflette dunque la parzialità del campione scelto e della documentazione reperita, ma persegue la definizione di un metodo per schematizzare e analizzare le ricadute operative dei modelli, e produce risultati che possono essere verificati e integrati sulla base di ulteriori dati. Sembra perciò utile discutere brevemente alcune delle famiglie di usi escluse dalle precedenti sezioni, per chiarire gli aspetti metodologici, discutere alcuni nessi con la letteratura di riferimento, e offrire altri spunti per futuri approfondimenti.

#### **Localizzazione avanzata.**

L'impiego dei modelli digitali per supportare funzioni di localizzazione è stato individuato in ambiti di ricerca. [Biljecki et al. \(2015\)](#) descrivono questa categoria di usi come la possibilità di sopperire alle lacune dei sistemi di posizionamento (come può avvenire in "canyon" urbani che ostacolano il posizionamento satellitare) confrontando fotografie dello spazio urbano con un modello dettagliato del costruito. L'avanzamento delle tecniche di localizzazione basate sul rilievo in tempo reale dello spazio<sup>97</sup> e alcune ricerche più recenti sulla micro-localizzazione *indoor* ([Acharya et al., 2019](#)) e sui sistemi di posizionamento per le auto a guida autonoma ([Bao et al., 2017](#)) confermano questo potenziale dei modelli 3D. Tuttavia, non è stato possibile individuare applicazioni analoghe nei *digital twin* studiati.

---

<sup>97</sup> Le tecniche di *simultaneous localization and mapping* permettono di usare dispositivi mobili per rilevare lo spazio in forma di nuvola di punti e inferire la posizione dell'utente nello spazio rilevato ([Mur-Artal et al., 2015](#); [Younes et al., 2017](#)). Lo sviluppo di simili tecniche è sostenuto dall'attenzione crescente per le applicazioni di realtà aumentata ([Egodagamage e Tuceryan, 2018](#); [Fraga-Lamas et al., 2018](#)).

### **Analisi di visibilità.**

Diversi strumenti di analisi della visibilità sono da tempo disponibili per i modelli tridimensionali, in particolare come funzioni dei GIS (Nijhuis *et al.*, 2017; Biljecki *et al.*, 2015; Ross, 2010). Le tecniche di analisi della visibilità interagiscono con applicazioni del modello individuate anche nei casi analizzati, come la valutazione economica sulla base di proprietà geo-spaziali — il *viewshed*, o la porzione di territorio visibile da un luogo può influenzarne il valore sul mercato (Cavailhès *et al.*, 2007; Wong, 2015) [v. CU.9] — o il calcolo di proprietà topologiche dello spazio — la Space Syntax produce grafi urbani sulla base di isoviste, ovvero linee visive che attraversano più spazi (Hillier, 2007 [1996]; Nijhuis *et al.*, 2017) [v. CU.6]. Nei casi di Zurigo e Helsinki [appendice A1: DT.1, DT.2] si rilevano diretti riferimenti alla possibilità di studiare la visibilità come analisi di supporto alla progettazione. Questo tipo di analisi è prodotto dalle sole operazioni di proiezione (già individuate come componenti di altri usi) e pertanto non si è ritenuto rappresentasse un insieme di operazioni e dati rispondente alla definizione di *uso* adottata, e dunque capace di condizionare le caratteristiche formali del modello.

### **Valutazioni e stime da superfici e volumi.**

La possibilità di identificare una famiglia di usi del modello per i calcoli dipendenti da superfici e volumi degli elementi (superficie dei livelli, volumi degli edifici, superficie coperta...) è stata dapprima considerata. La categoria avrebbe dovuto raccogliere diversi usi identificati in rassegne precedenti entro una singola definizione basata su operazioni e dati — come gli studi di densità volumetrica, o la stima delle superfici calpestabili (*cf.* Biljecki *et al.*, 2015). Inoltre, gli aspetti legati alle misurazioni della componente geometrica del modello sono significativi per alcuni studi quantitativi di morfologia urbana (Berghauser Pont e Haupt, 2007), e possono quindi guidare approfondimenti sulla definizione delle unità spaziali trasversali agli approcci teorici e operativi. Tuttavia, in fase di analisi delle applicazioni, anche le stime da superfici e volumi sono risultate assimilabili a una classe di operazioni (di misurazione, in sintesi) piuttosto che a un più complesso caso d'uso.

### **Definizione di regole.**

La famiglia è una generalizzazione dell'uso del modello come estensione tridimensionale e digitale del catasto (Biljecki *et al.*, 2015). Nei *digital twin*, questa possibilità è sfruttata dalla città di Zurigo, che già redige un catasto digitale delle reti di servizi, progettato per una futura compatibilità con il BIM [appendice

[A1: DT.1](#)]. Altre applicazioni, con il fine analogo di definire norme e indirizzare gli usi e le trasformazioni della città, mostrano un impiego più vario del modello. Lo stesso modello di Zurigo e il *masterplan* di Toronto [\[appendice A1: DT.6\]](#) prevedono di supportare il confronto di scenari progettuali con i piani di sviluppo municipali e con i regolamenti edilizi. Il *digital twin* di *Amaravati* propone invece l'uso del modello come piattaforma dell'amministrazione per i servizi rivolti ai cittadini — *e.g.*, la richiesta del permesso di costruire [\[appendice A1: DT.4\]](#). Il modello può quindi essere inteso come un raccoglitore di regole relative allo spazio urbano, e può supportare il confronto tra componenti del corpus normativo, piani e progetti, rendendo regole e procedure più coerenti, accessibili e trasparenti [\(Barioglio et al., 2019\)](#). Nell'analisi dei modelli di città non è però stato possibile distinguere la definizione di regole, in termini di operazioni e dati, dal più generale caso dell'integrazione di dati spazializzati [\[v. CU.9\]](#).

### **Interpretazione di dati da *remote sensing*.**

Anche la famiglia di usi relativi all'interpretazione di dati da *remote sensing* (dati quali nuvole di punti o immagini satellitari e aeree) è stata valutata come raccolta di altri usi già individuati in letteratura e emersi dallo studio dei *digital twin*. Tra questi, [Biljecki et al. \(2015\)](#) segnalano il rilevamento di alterazioni, o *change detection* [\(Calantropio et al., 2018\)](#), l'applicazione del *remote sensing* alla gestione della vegetazione, e l'interpretazione di altri dati di rilievo digitale (immagini da *synthetic aperture radar*, o SAR). L'importazione, la condivisione e la comparazione di dati da *remote sensing* sono passaggi fondamentali dei processi di costruzione e funzionamento dei modelli in tutti i casi di *digital twin* considerati [\[v. CU.3\]](#). Tuttavia, le operazioni e i dati coinvolti sono stati considerati come componenti degli usi già descritti, piuttosto che come insieme autonomo di azioni.

### **Simulazioni ad agenti.**

Le simulazioni ad agenti sono strumenti di analisi e predizione di fenomeni complessi basati sull'interazione tra gli individui (o agenti) di una popolazione sintetica. Questo tipo di simulazioni può appoggiarsi su dati e vincoli rappresentati da un modello di città, e inoltre appartiene al set di strumenti impiegato negli approcci quantitativi alla morfologia urbana [\(Batty, 2007\)](#) [\[v. sezione 3.1\]](#). Le simulazioni ad agenti sono rilevanti nei processi di simulazione del traffico [\[v. CU.6\]](#), e nel caso di Singapore è possibile ipotizzare [\[appendice A1: DT.3\]](#) un'applicazione allo studio della dispersione di folle. Tuttavia, i dati raccolti non sono sufficienti a descrivere un caso d'uso autonomo.

---

### 5.3. Le unità spaziali nei modelli urbani digitali.

#### *Definizioni.*

Attraverso l'analisi delle applicazioni della modellazione digitale che permettono di costruire delle repliche virtuali delle città [sezione 4.2] sono stati classificati i diversi casi d'uso dei modelli che rendono operative queste piattaforme di raccolta ed elaborazione dei dati spaziali [sezione 5.2]. La tassonomia dei casi d'uso è basata sull'individuazione di un insieme di azioni che l'utente deve compiere usando il modello per ottenere uno specifico risultato. Ogni caso d'uso è quindi definito da un set univoco di *operazioni* di trasformazione e di tipi di *dati* da registrare. Nonostante gli usi del modello possano coinvolgere informazioni e calcoli di carattere molto diverso, ai fini di questo studio le *operazioni* e i *dati* rilevanti sono quelli che richiedono al modello di rappresentare dei caratteri spaziali. Ad esempio, un modello può essere usato per eseguire simulazioni fisiche, come il calcolo dei rischi in caso di inondazione, degli effetti del vento o della propagazione del rumore. In questi casi, per la classificazione proposta, sono rilevanti i volumi del costruito, necessari per distinguere spazi chiusi e aperti. Diversamente, altri parametri fisici che caratterizzano le varie simulazioni non influenzano i criteri di rappresentazione dello spazio nel modello — e quindi non sono usati per distinguere i casi d'uso proposti [v. sezione 5.2: CU.5].

Ogni insieme di *operazioni* e *dati* basati sullo spazio riconosciuto — attraverso lo studio delle *applicazioni* rilevate nei *digital twin* — come set di elementi costitutivi di un caso d'uso, permette di distinguere quali **componenti fondamentali della forma urbana** debbano essere rappresentate dal modello perché questo sia abilitato a una specifica funzione.

In questo caso, un'*unità spaziale* è intesa dunque come il più piccolo elemento (1) sulla cui base possono essere eseguite delle operazioni di calcolo e (2) a cui possono essere riferiti dei dati.

La classificazione delle unità è basata sul tipo di aspetti misurabili (superfici, volumi, caratteristiche topologiche...) piuttosto che sulle dimensioni metriche di queste. Il principio è coerente con lo studio sugli oggetti elementari nella morfologia urbana condotto da Fleischmann *et al.* (2020), i quali considerano "*the basic spatial unit as the smallest element being measured*" (*ibid.*, p.13) e

chiariscono che la misura di per sé mostra una estrema variabilità all'interno di categorie di elementi comunemente riconosciute, come edifici o isolati<sup>98</sup>.

Le *unità spaziali* sono quindi degli elementi geometrici caratterizzati da **misurabilità**. Ad esempio, un modello può utilizzare rappresentazioni con le caratteristiche di *solidi*, che hanno quindi tra gli aspetti misurabili il volume, l'altezza complessiva, il perimetro della base o di una proiezione orizzontale. Nei casi d'uso si osserva che le unità di questo tipo possono essere riferite sia a *block* (isolati) che a edifici. Tuttavia, gli elementi della forma urbana tradizionalmente riconosciuti dalla letteratura morfologica — come l'edificio, il *plot*, la strada [v. capitolo 3] — sono intenzionalmente trascurati nella definizione dei principi di classificazione delle unità qui proposta. Questa scelta risponde alla volontà di non calare nell'analisi dei modelli digitali categorie precostituite per gli oggetti rappresentati, con l'obiettivo di evidenziare i legami funzionali tra gli elementi costitutivi e gli usi invalsi dei modelli. Gli elementi così emersi potranno quindi essere confrontati con quelle interpretazioni esistenti dello spazio costruito, come proposto più avanti nella sezione. A questo fine, nella loro individuazione a partire dai casi d'uso le unità sono comunque descritte anche secondo la granularità a cui si presentano nelle applicazioni studiate.

Un altro principio secondo cui le *unità spaziali* sono individuate e definite è l'**autonomia**. Ciò non significa che debba esistere un uso del modello basato su un solo tipo di elementi fondamentali — caso che non è emerso nei *digital twin* studiati, ma che non può essere escluso. Si intende piuttosto che gli elementi non siano derivabili gli uni dagli altri, né che siano stabiliti rapporti gerarchici tra le parti. Come corollario, le unità, per abilitare i diversi usi del modello, possono essere combinate senza vincoli a unità di un altro tipo specifico.

Un terzo principio per cui le unità sono considerate rilevanti è l'**omogeneità**, o la distribuzione uniforme all'interno dei modelli in cui sono studiate (i *digital twin*). Le unità devono quindi essere replicate, o facilmente replicabili, per un'estensione confrontabile con la scala della città (o un'area rilevante per le applicazioni alla scala urbana, che, convenzionalmente, può essere considerata più ampia di un singolo isolato). Un controesempio significativo è dato dagli elementi di dettaglio come quelli che possono essere ottenuti attraverso modelli BIM: poiché non risultano casi applicativi basati su una copertura delle aree modellate omogenea per dati a una simile granularità, le informazioni di dettaglio devono

---

<sup>98</sup> Fleischmann et al. (2020, p.13) sottolineano il prevalere dell'aspetto "concettuale" della gerarchia sull'estensione degli elementi: "*The building scale is smaller than the plot scale, in that the former is conceptually contained in the latter, even though in terms of sheer size some buildings may be larger than some plots*".

essere semplificate, usate come campioni per interpolazioni e stime, e comunque ricondotte ad altre *unità spaziali* disponibili — o ricavabili — a una granularità meno fine e uniforme sull'area rappresentata.

### *Tipi di unità spaziali.*

Il lavoro svolto, e in particolare i grafi che identificano i casi d'uso, può essere inteso come uno schema astratto per la definizione di un modello di città. Lo schema presenta un set minimo di caratteri spaziali necessari per memorizzare e elaborare le informazioni sulla città che al momento, rilevate nel campione di *urban digital twin* analizzato, caratterizzano l'uso dei modelli digitali alla scala urbana.

Sulla base delle operazioni e dei dati che rendono possibili gli usi del modello, sono stati individuati 6 *tipi* di unità spaziali:

- (1) **Solidi.** Usati per la descrizione di edifici.
- (2) **Superfici.** Usate per la descrizione di edifici, isolati, terreno. Per *superfici* si intendono porzioni limitate di piano nello spazio tridimensionale.
- (3) **Livelli.** Usati per la descrizione di edifici. I *livelli* sono definiti da superfici orizzontali limitate, e dalla quota di ogni superficie.
- (4) **Tracce.** Usate per la descrizione di edifici, isolati, ed altre porzioni territorio. Le *tracce* sono definite da superfici orizzontali limitate.
- (5) **Mappe.** Usate per la descrizione di porzioni di territorio. Una *mappa* è definita come un insieme continuo di punti su una superficie orizzontale.
- (6) **Reti.** Usate per la descrizione di strade, infrastrutture, edifici. Le *reti* sono definite come grafi, ovvero come insiemi di nodi e archi.

#### **Solidi.**

La rappresentazione di elementi urbani come *solidi* risulta necessaria per la maggior parte dei casi d'uso considerati, e riguarda in particolare gli edifici, e in alcuni casi l'isolato [v. [Los Angeles, sezione 4.2: DT.8](#)] o componenti delle reti infrastrutturali [v. [sezione 5.2: CU.8](#)]. I solidi permettono operazioni che richiedono la misurazione del volume degli elementi (ad esempio edifici, o la stima del volume di ambienti al loro interno), ma anche dell'altezza e delle superfici (ad esempio l'impronta a terra). Gli usi di queste metriche includono operazioni come le stime per i consumi energetici degli edifici e la modellazione parametrica [e.g., [sezione 5.2: CU.1, CU.3](#)]. La complessità degli elementi va da volumi prismatici a rappresentazioni della geometria dei tetti e di elementi di



altezza diversa. La geometria dei volumi supporta la realizzazione delle simulazioni fisiche, e può essere usata nell'*urban design* e nella pianificazione. Ai solidi possono inoltre essere associati dati e attributi, anche aggregati sulla base di informazioni di maggior dettaglio, come quelle derivate dal BIM. Anche la posizione degli elementi può essere misurata, in uno spazio cartesiano o in un sistema di riferimento geo-spaziale (a seconda dell'applicazione o delle caratteristiche dell'ambiente di modellazione).

Le caratteristiche di questo tipo di unità sono desunte da operazioni che richiedono soprattutto la rappresentazione degli edifici, in base al principio di omogeneità adottato per l'individuazione delle unità. Benché la compatibilità con documenti BIM permetta a più di un un *digital twin* di manipolare anche solidi che rappresentano elementi più piccoli, le applicazioni non sembrano produrre risultati rilevanti a scale di maggior dettaglio rispetto all'edificio. Infatti, solo modelli sperimentali e di estensione ridotta prevedono la rappresentazione omogenea di particolari alla scala architettonica [e.g., Toronto, sezione 4.2: DT.6]. Da una parte, questo aspetto descrive lo stato corrente — mentre l'avanzamento tecnico e i processi di gestione degli *asset* urbani potrebbero in futuro rendere altri livelli di dettaglio disponibili in maniera uniforme su porzioni estese di città. Tuttavia, perseguendo l'obiettivo di verificare il rapporto tra rappresentazione e scopo, l'analisi evidenzia proprio come siano i modi d'uso del modello a non richiedere unità più specifiche, anche in contrasto con l'esaltazione della quantità e della granularità dell'informazione raccolta nel *marketing* delle piattaforme.

### **Superfici.**

Le *superfici* sono impiegate principalmente per la descrizione di edifici, pareti o terreno, e sono definite come porzioni di piano limitate, posizionate nello spazio tridimensionale. In diversi casi, le superfici sono usate per la rappresentazione di dati da rilievi digitali, attraverso la trasformazione di nuvole di punti in *mesh* e l'eventuale sovrapposizione di *texture*. Nel caso dei *digital surface model* (DSM), anche l'edificato è rappresentato da una *mesh* continua che copre l'intera superficie rilevata [v. sezione 4.2, figura 23, iv]. La proiezione di *texture* sulle superfici del modello permette sia di ottenere effetti puramente visivi, come il fotorealismo dei *render*, sia di visualizzare dati, come in alcune applicazioni connesse alle simulazioni fisiche che permettono di mostrare i valori calcolati al livello del suolo o sulle facciate degli edifici [v. sezione 1.2, figura 12]. Anche le superfici, come i solidi, possono essere oggetto di modellazione nella pianificazione e nel progetto, e possono essere caratterizzate da attributi e dati semantici (e.g., per la distinzione dei tetti). Altre operazioni basate sulle superfici sono la proiezione di ombre e il calcolo dell'orientamento (usate ad esempio nel calcolo

dell'irraggiamento solare [sezione 5.2: CU.2]), nonché operazioni che richiedono la misura di aree o la posizione geo-spaziale degli elementi.

Superfici e solidi sono considerati tipi di unità autonomi in quanto non necessariamente un modello basato su superfici (ad esempio un modello per il calcolo dell'irraggiamento solare [ibid.]) richiede informazioni su quali porzioni di spazio siano chiuse o aperte. Di converso, la separazione dei due tipi di unità sottolinea che i solidi non sono necessariamente legati ad alcune specifiche operazioni (come la proiezione di *texture*) che prevedono la distinzione delle superfici. Infatti, benché queste possano essere intese come un sottoinsieme del volume, dal punto di vista numerico e concettuale, l'isolamento delle superfici prevede almeno il raddoppio di alcuni segmenti che le perimetrano. Inoltre, alcune applicazioni descritte in letteratura non prevedono l'uso di tutte le superfici necessarie a comporre il volume di un edificio<sup>99</sup>.

### **Livelli.**

I *livelli* sono definiti da superfici orizzontali limitate, e dalla quota di ogni superficie. Nei *digital twin* questi elementi permettono di operare calcoli che riguardano gli edifici (ad esempio stime demografiche), attraverso la misura delle superfici o anche con il più semplice dato del numero dei livelli. I livelli possono inoltre essere connessi a dati di dettaglio come quelli relativi a modelli BIM (come suggerito dal caso di Singapore, nella cui documentazione è mostrato l'accesso a informazioni sugli alloggi [sezione 4.2: DT.3]).

Alcune applicazioni presenti nella letteratura sui *3D city model*, come la realizzazione di catasti tridimensionali (pur non inserito tra i casi approfonditi [v. sezione 5.2]), prevedono esplicitamente la rappresentazione di più piani orizzontali sovrapposti (Biljecki *et al.*, 2015). Dal punto di vista tecnico, i sistemi GIS basati su rappresentazioni 2.5D sono adatti alla rappresentazione di questo tipo di elementi, poiché permettono di associare a forme piane orizzontali un parametro relativo alla quota (Biljecki, 2017). I livelli aggiungono dettaglio sull'interno degli edifici rispetto ai solidi e alle superfici esterne, ma non necessariamente un modello basato sui livelli richiede altri dati sulla forma degli edifici per supportare le operazioni.

### **Tracce.**

---

<sup>99</sup> Ad esempio, alcuni studi per la geo-localizzazione di auto a guida autonoma hanno proposto l'uso delle sole superfici verticali del modello (Bao *et al.*, 2017). Casi d'uso del modello per il supporto alla localizzazione sono citati anche in Biljecki *et al.* (2015). Un altro esempio è il calcolo dell'irraggiamento solare, che può essere limitato ai soli tetti.

Le *tracce* sono definite come elementi piani limitati e possono costituire una rappresentazione essenziale degli edifici, ma anche perimetri che distinguono porzioni di suolo, come gli isolati, o alcuni elementi della viabilità (strade, piazze, parcheggi...).

Nei casi d'uso studiati, le tracce sono desunte da diverse operazioni e insiemi di dati. Nei casi in cui i dati sono aggregati a una scala di minor dettaglio rispetto all'edificio (gli isolati ad esempio), la traccia può diventare l'elemento che li raccoglie. La traccia dell'impronta a terra dell'edificio o di insiemi di edifici è inoltre utile nelle analisi morfologiche per la classificazione del costruito [sezione 5.2: CU.2]. Altre applicazioni che richiedono questo tipo di unità riguardano l'importazione di dati geo-spaziali, in particolare nel caso in cui siano acquisiti dati da sistemi GIS bidimensionali. Inoltre, le tracce possono essere usate per la produzione di mappe e infografica (con colorazioni o altre rappresentazioni condizionali).

Le tracce non sono ritenute assimilabili a sottoinsiemi dei tipi di unità già elencati, poiché permettono di rappresentare porzioni dell'ambiente urbano che non necessariamente hanno sviluppo tridimensionale, e di mettere in relazione con queste anche i dati relativi a edifici, elementi infrastrutturali e altre componenti del modello.

### **Mappe.**

Una *mappa* è una parte del modello che descrive una porzione di territorio, ed è definita come un insieme continuo di punti su una superficie orizzontale, non necessariamente limitato. Benché molti elementi del modello siano riconducibili a elementi discreti (edifici, isolati, strade...), un ruolo nodale per lo svolgimento di operazioni spaziali è ricoperto da mappe che connettono valori a posizioni nello spazio geografico (inteso come superficie bidimensionale, o eventualmente in interazione con parametri relativi alla quota). Con *mappa*, si intende dunque qualsiasi tipo di input o output del modello composto da valori connessi a singoli punti piuttosto che a elementi con un'autonomia semantica. La mappa può essere un campo (una porzione di spazio in ogni punto della quale è misurabile una data grandezza), una sua approssimazione (ad esempio, valori posizionati su una griglia, o i *pixel* di un'immagine *raster*), o un insieme di punti definito dalle loro coordinate. Il più frequente esempio di quest'ultimo caso è rappresentato dai dati provenienti da sensori, mappati nei punti di rilevamento.

Le mappe permettono l'importazione di dati geografici [sezione 5.2: CU.9], e la geo-localizzazione e la visualizzazione dei risultati di simulazioni e analisi

[sezione 5.2: CU.1, CU.5]. Inoltre, permettono di importare immagini *raster*, come rilievi satellitari e foto aeree. Questi materiali consentono anche il funzionamento di alcune tecnologie di classificazione e modellazione automatica (strumenti di *deep learning* per *object detection* e *image segmentation* [v. appendice A2: CU.3]).

## Reti.

Le *reti* sono definite come strutture a grafo, ovvero come insiemi di nodi e archi, e permettono di rappresentare sistemi di strade, infrastrutture, e altre relazioni tra componenti della città.

Le componenti delle reti sono descritte sia secondo caratteri di geometria cartesiana (posizioni nello spazio) sia dal punto di vista topologico. Infatti, nei casi studiati, le *reti* emergono come elementi di supporto all'esecuzione di analisi topologiche (usate ad esempio nel *routing* [sezione 5.2: CU.6]). Inoltre, anche gli elementi delle reti possono avere un valore semantico ed essere caratterizzati da attributi. In corrispondenza degli elementi della rete, possono essere registrati dati di diverso genere, compresi dati da sensori (come contatori automatici per il traffico, strumenti di rilevamento delle condizioni di reti di servizi). Queste informazioni supportano l'esecuzione di analisi e la visualizzazione dei risultati. Un esempio è la simulazione traffico sui *network* stradali, i cui risultati possono essere visualizzati con la colorazione delle strade [sezione 5.2: CU.6]. Agli elementi della rete possono inoltre essere connesse anche descrizioni geometriche più complesse (*e.g.*, ottenute da modelli BIM).

## *Unità e morfologia tradizionale.*

Rispetto all'**ipotesi che la morfologia urbana possa avere un ruolo nella definizione dei modelli digitali di città**, i risultati dell'analisi dimostrano la possibilità di scomporre i possibili usi del modello in un sistema di relazioni con un set di *unità* morfologiche fondamentali, e confermano dunque il contributo della forma urbana nell'allineamento di strati informativi multidisciplinari.

Al fine di verificarne la coerenza ed aprire a successive riflessioni, le 6 unità spaziali individuate possono essere messe a confronto con alcuni principi ed elementi fondamentali della morfologia urbana. Tuttavia, la ricerca non ha cercato di rifondare o correggere questi elementi sul piano teorico, bensì di studiare le astrazioni adottate più o meno spontaneamente nella pratica della costruzione di modelli digitali: come affermato da Kropf (2014, p.41), "*finding order in the built*

*environment involves abstraction*". I risultati non sono perciò da considerare una nuova lettura delle proprietà intrinseche dello spazio costruito, né un'alternativa alle tassonomie esistenti. Le unità spaziali sono piuttosto categorie utili a confrontare le interpretazioni tradizionali dello spazio urbano con le rappresentazioni schematiche che permettono alle repliche digitali della città di funzionare.

Gli approcci morfologici concordano nell'individuazione di tre componenti elementari della struttura della città: strada, *plot* ed edificio. È inoltre condivisa la composizione di tali tasselli fondamentali in uno schema gerarchico basato su rapporti parti-tutto. Questa struttura è stata investigata soprattutto dalle scuole di pensiero storico-geografica e tipologico-processuale (Conzen, 2012 [1960]; Caniggia *et al.*, 1997; cfr. Kropf, 2014). Analizzando gli elementi impiegati in diversi approcci morfologici, Kropf estende il sistema gerarchico che genera la complessità urbana in un "*multi-level diagram of generic structure*" che va dai materiali costruttivi al tessuto urbano (Kropf, 2017, p.158).

Diversamente da altre classificazioni dello spazio costruito, il metodo proposto per l'individuazione delle unità spaziali nei modelli digitali non muove dal principio di superare le ambiguità tra un elemento e l'altro, in continuità con l'idea, sostenuta anche da Christopher Alexander che "*the built environment is more accurately characterized by overlapping sets rather than strictly nested sets*" (Kropf, 2014, p.43). Questo si riflette nelle applicazioni dei modelli e — attraverso l'assunto che le interpretazioni del reame urbano possano variare al variare degli scopi — nelle unità spaziali che rendono praticabili le applicazioni. A titolo d'esempio, un edificio può essere inteso al contempo come insieme di superfici, come somma di livelli e come elemento in un grafo di oggetti costruiti, a seconda che lo scopo della sua rappresentazione sia la visualizzazione, la stima degli abitanti o la classificazione della forma dell'isolato [v. sezione 5.2: CU.4, CU.1, CU.3].

Come conseguenza, al concetto di gerarchia, ritenuto fondamentale nell'approccio morfologico allo spazio costruito (Kropf, 2017) è qui attribuita una minore rilevanza. Le unità individuate sono intese come gli elementi di base per il funzionamento dei *digital twin*. Queste unità sono prive di un rapporto gerarchico in quanto sono autonome nel rispondere allo scopo del modello nelle specifiche applicazioni. Lo stesso principio è suggerito dalle diverse combinazioni di unità che caratterizzano i casi d'uso. Dunque l'edificio può essere rappresentato dalla composizione di diverse unità, che comprendono i *solidi* nella maggior parte dei casi, ma anche *superfici*, o porzioni di una *rete*. Il *plot*, che ha un ruolo nodale negli studi di morfologia, può essere assimilato alle *tracce*, di cui costituisce un

caso particolare, ma può essere anche desunto dalle caratteristiche topologiche degli edifici, o delle strade circostanti. Anche le strade possono essere rappresentate come *tracce*, ovvero porzioni di piano perimetrato, ma anche come *network*, nonché come entrambe le unità allo stesso momento — una configurazione utile, ad esempio, a costruire applicazioni come quelle della Space Syntax, che mettono in relazione la geometria piana con quella topologica ([Hillier, 2007 \[1996\]](#)).

## Riferimenti bibliografici.

- Acharya D., Singha Roy S., Khoshelham K., Winter S.** (2019). Modelling uncertainty of single image indoor localisation using a 3D model and deep learning. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, IV-2-W5, 247–254.
- Bao J., Gu Y., Kamijo S.** (2017). Vehicle positioning with the integration of scene understanding and 3D map in urban environment. *2017 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, 68–73.
- Barioglio C., Campobenedetto D., Frassoldati F., Nigra M., Barale M.F., Robiglio M.** (2019). *Re-coding. Ripensare le regole della città*. Dipartimento di Architettura e Design - Politecnico di Torino.
- Batty M.** (2007). *Cities and Complexity: Understanding Cities with Cellular Automata, Agent-Based Models, and Fractals*. MIT Press.
- Batty M., Chapman D., Evans S., Haklay M., Kueppers S., Shiode N., Smith A., Torrens P.M.** (2000). *Visualizing the city: communicating urban design to planners and decision-makers*.
- Berghauer Pont M., Haupt P.** (2007). The Spacemate: Density and the Typomorphology of the Urban Fabric. *Urbanism Laboratory for Cities and Regions: Progress of Research Issues in Urbanism*.
- Berghauer Pont M., Olsson J.** (2017, September 27). Typology based on three density variables central to Spacematrix using cluster analysis. *Proceedings 24th ISUF 2017 - City and Territory in the Globalization Age*. 24th ISUF 2017 - City and Territory in the Globalization Age.
- Biljecki F.** (2017). *Level of detail in 3D city models* [PhD thesis].
- Biljecki F., Stoter J., Ledoux H., Zlatanova S., Çöltekin A.** (2015). Applications of 3D City Models: State of the Art Review. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 4(4), 2842–2889.
- Calantropio A., Chiabrando F., Sammartano G., Spanò A., Teppati Losè L.** (2018). UAV strategies validation and remote sensing data for damage assessment in post-disaster scenarios. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-3/W4, 121–128.
- Cavailhès J., Brossard T., Foltête J.-C., Hilal M., Joly D., Tourneux F.-P., Tritz C., Wavresky P.** (2007). The landscape from home: a GIS-based hedonic price valuation. *International Symposium "Hedonic Methods in Real Estate"*.
- Cecchini C., Cundari M.R., Palma V., Panarotto F.** (2019). Data, Models and Visualization: Connected Tools to Enhance the Fruition of the Architectural Heritage in the City of Padova. In Marcos C.L. (a cura di), *Graphic Imprints* (pp. 633–646). Springer International Publishing.
- Chen L.-C., Wu C.-H., Shen T.-S., Chou C.-C.** (2014). The application of geometric network models and building information models in geospatial environments for fire-fighting simulations. *Computers, Environment and Urban Systems*, 45, 1–12.
- Conzen M.R.G.** (2012). *L'analisi della forma urbana: Alnwick, Northumberland*. Angeli. [*Alnwick, Northumberland: A Study in Town-Plan Analysis*. Prima pubblicazione 1960.]
- Egodagamage R., Tuceryan M.** (2018). Distributed monocular visual SLAM as a basis for a collaborative augmented reality framework. *Computers Graphics*, 71, 113–123.
- Fleischmann M., Romice O., Porta S.** (2020). Measuring urban form: Overcoming terminological inconsistencies for a quantitative and comprehensive morphologic analysis of cities. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, 239980832091044.
- Fraga-Lamas P., Fernández-Caramés T.M., Blanco-Novoa O., Vilar-Montesinos M.A.** (2018). A Review on Industrial Augmented Reality Systems for the Industry 4.0 Shipyard. *IEEE Access*, 6, 13358–13375.

- Giordano A., Bernardello R., Borin P., Friso I., Monteleone C., Panarotto F.** (2018). Le opportunità fornite dai nuovi strumenti digitali / The opportunities of the new digital tools. *Paesaggio Urbano*, 4, 2018, 50–73.
- Henn A., Römer C., Gröger G., Plümer L.** (2012). Automatic classification of building types in 3D city models: Using SVMs for semantic enrichment of low resolution building data. *GeoInformatica*, 16(2), 281–306.
- Hillier B.** (2007). *Space is the machine: a configurational theory of architecture*. Space Syntax. [Prima pubblicazione 1996.]
- Hor A.-H., Jadidi A., Sohn G.** (2016). BIM-GIS Integrated Geospatial Information Model Using Semantic Web And RDF Graphs. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, III-4, 73–79.
- Hu Z.-Z., Zhang J.-P., Yu F.-Q., Tian P.-L., Xiang X.-S.** (2016). Construction and facility management of large MEP projects using a multi-Scale building information model. *Advances in Engineering Software*, 100, 215–230.
- Huffman K.L., Giordano A., Bruzelius C.** (2017). *Visualizing Venice: Mapping and Modeling Time and Change in a City*. Routledge.
- Jacobson I.** (1987). Object-oriented development in an industrial environment. *ACM SIGPLAN Notices*, 22(12), 183–191.
- Jacobson I., Spence I., Kerr B.** (2016). Use-Case 2.0. *Queue*, 14(1), 94–123.
- Kropf K.** (2014). Ambiguity in the definition of built form. *Urban Morphology*, 18(1), 41–57.
- Kropf K.** (2017). *The Handbook of Urban Morphology*. Wiley.
- Müller P., Wonka P., Haegler S., Ulmer A., Gool L.V.** (2006). Procedural Modeling of Buildings. *ACM SIGGRAPH 2006 Papers*, 614–623.
- Mur-Artal R., Montiel J.M.M., Tardos J. D.** (2015). ORB-SLAM: A Versatile and Accurate Monocular SLAM System. *IEEE Transactions on Robotics*, 31(5), 1147–1163.
- Nijhuis S., Zlatanova S., Dias E., van der Hoeven F., van der Spek S.** (a cura di) (2017). *Geo-Design: advances in bridging geo-information technology, urban planning and landscape architecture*. TU, Faculty of Architecture and the Built Environment.
- Nishida G., Bousseau A., Aliaga D.G.** (2018). Procedural Modeling of a Building from a Single Image. *Computer Graphics Forum*, 37(2), 415–429.
- Nouvel R., Mastrucci A., Leopold U., Baume O., Coors V., Eicker U.** (2015). Combining GIS-based statistical and engineering urban heat consumption models: Towards a new framework for multi-scale policy support. *Energy and Buildings*, 107, 204–212.
- Ronzino A., Osello A., Patti E., Bottaccioli L., Danna C., Lingua A., Acquaviva A., Macii E., Grosso M., Messina G., Rasconà G.** (2015). The Energy Efficiency Management at Urban Scale by Means of Integrated Modelling. *Energy Procedia*, 83, 258–268.
- Ross L.** (2010). *Virtual 3D City Models in Urban Land Management - Technologies and Applications*. Technischen Universität Berlin.
- Schröder M., Cabral P.** (2019). Eco-friendly 3D-Routing: A GIS based 3D-Routing-Model to estimate and reduce CO2-emissions of distribution transports. *Computers, Environment and Urban Systems*, 73, 40–55.
- Song Y., Wang X., Tan Y., Wu P., Sutrisna M., Cheng J., Hampson K.** (2017). Trends and Opportunities of BIM-GIS Integration in the Architecture, Engineering and Construction Industry: A Review from a Spatio-Temporal Statistical Perspective. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 6(12), 397.
- Stoter J., Vosselman G., Goos J., Zlatanova S., Verbree E., Klooster R., Reuvers M.** (2011). Towards a National 3D Spatial Data Infrastructure: Case of The Netherlands. *Photogrammetrie - Fernerkundung - Geoinformation*, 2011(6), 405–420.
- Tashakkori H., Rajabifard A., Kalantari M.** (2015). A new 3D indoor/outdoor spatial model for indoor emergency response facilitation. *Building and Environment*, 89, 170–182.
- Tobiáš P.** (2015). An Investigation into the Possibilities of BIM and GIS Cooperation and Utilization of GIS in the BIM Process. *Geoinformatics FCE CTU*, 14(1), 65.



- Wan L., Nochta T., Schooling J.M.** (2019). Developing a City-Level Digital Twin – Propositions and a Case Study. *International Conference on Smart Infrastructure and Construction 2019 (ICSIC)*, 187–194.
- Wildfire C.** (2018). How can we spearhead city-scale digital twins? *Infrastructure Intelligence*. <http://www.infrastructure-intelligence.com/article/may-2018/how-can-we-spearhead-city-scale-digital-twins> (consultato il 27/04/21).
- Wong K.K.Y.** (2015). *Economic Value of 3D Geographic Information* (EuroSDR Report v1.0; p. 23).
- Younes G., Kahil R., Jallad M., Asmar D., Elhadj I., Turkiyyah G., Al-Harithy H.** (2017). Virtual and augmented reality for rich interaction with cultural heritage sites: A case study from the Roman Theater at Byblos. *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, 5, 1–9.
- Zlatanova S., Beetz J., Goos J., Mulder A., Boersma A.-J., Schevers H., de Vries M., Ghawana T.** (2014). *3D Spatial Infrastructure for the Port of Rotterdam* (GISt Report No. 67; p. 48). TU Delft.





# Capitolo 6.

## **Conclusioni.**

*"I've been looking for something real. This fake stuff might just be it." (Abrons, 2017, p.73)*

### *Sintesi dei risultati della ricerca e sviluppi futuri.*

La tesi ha studiato i modelli digitali di città come chiave per riflettere sulla conoscenza dello spazio costruito e sui suoi esiti operativi. Questa conoscenza ha una natura schematica e evolutiva, perché connessa al bisogno di interpretare e operare riduzioni della complessità del reame urbano, e di adattare a cambiamenti dell'ambiente e delle esigenze di chi usa i modelli.

Alcuni caratteri della città contemporanea esaltano l'importanza di una comprensione del reale astratta e funzionale. La crescita fisica delle città e la dilatazione del concetto di *urbano* — in cui oggi riconosciamo una molteplicità di fenomeni non più riconducibili a forme note e distinte (Brenner e Schmid, 2015) — richiedono definizioni contestuali e flessibili. Alla percezione dell'articolazione della città contribuisce l'avanzamento tecnologico, che incrementa la quantità di dati a nostra disposizione oltre ogni possibilità di immediata comprensione. Tuttavia, è questa stessa esuberanza di informazioni a condizionare la nostra capacità di maneggiare consapevolmente le rappresentazioni dell'urbano. La pervasività delle infrastrutture digitali impone — al funzionamento della città come al suo studio — algoritmi e automazioni, che sono schemi con un campo di efficacia limitato, ma astratti e adattabili. L'immediatezza e l'abbondanza delle informazioni possono tuttavia nascondere i limiti di validità delle astrazioni, come sostengono gli studi critici della stretta interazione tra computer e ambiente costruito — il connubio chiamato *urban operating system* (Marvin e Luque-Ayala, 2017). Questo *bias* rende i modelli rigidi — essendo questi assunti come *veri* — e presto inadatti a rappresentare il reale con attendibilità ed effetti controllati.

La ricerca ha studiato i modelli digitali di città che rappresentano caratteristiche spaziali dell'ambiente urbano, intesi come specifici casi di *urban OS*. Il rapporto che lega la concezione dell'urbano sottesa da questi modelli alla città fisica e alle sue trasformazioni è particolarmente rilevante per le figure che storicamente si sono occupate della comprensione schematica della forma del costruito, come l'architetto e il morfologo urbano. La tesi ha approfondito, anche nelle reciproche interazioni, tre temi fondamentali. Il primo [capitolo 1] è l'interpretazione dei modelli spaziali di città come "sistemi operativi", ovvero

piattaforme che condividono con altre rappresentazioni dei fenomeni urbani i limiti epistemologici connessi alla confusione tra schemi e realtà fisica. La ricerca è iniziata ricostruendo l'evoluzione dei modelli digitali di città, dalle prime rappresentazioni simboliche alle piattaforme integrate e multi-disciplinari attualmente adottate, considerando sia gli avanzamenti tecnici, sia la conservazione di limiti teorici e operativi connessi alla comprensione dei fenomeni urbani. Il secondo tema affrontato [capitolo 2] è il rapporto tra gli strumenti digitali e le astrazioni nella costruzione dei modelli. In particolare, sono stati individuati alcuni aspetti dell'avanzamento tecnologico che contrastano con la necessità di interpretare fenomeni urbani complessi attraverso semplificazioni funzionali. La fiducia nei *big data* e nella potenza dei calcolatori sembra piuttosto favorire l'ideale di una riproduzione fedele e completa della città, come suggerisce la letteratura consultata, e come conferma lo studio dello sviluppo dei modelli digitali nella rappresentazione della città e dell'architettura. Il terzo tema introdotto [capitolo 3] riguarda il rapporto tra la morfologia urbana e la città digitale. Da un lato, la tesi ha delineato il contributo che un punto di vista apportato dagli approcci morfologici allo studio dei modelli urbani contemporanei, sottolineando come la forma fisica del costruito possa essere un punto di riferimento per la condivisione di informazioni prodotte e elaborate entro domini disciplinari molto diversi. Dall'altro lato, è emerso come questo campo di applicazione della morfologia valorizzi il potenziale operativo della disciplina, rispetto agli aspetti descrittivi di cui più spesso si occupa.

Una volta introdotti i temi e le ipotesi portanti, è stata condotta un'analisi basata su un campione di "città digitali" contemporanee [capitolo 4]. I modelli e *urban OS* studiati appartengono a una categoria che comprende i più recenti aggiornamenti dei sistemi di simulazione urbana. I cosiddetti *urban digital twin* sono modelli che esaltano la rapidità e il volume della trasmissione di dati tra database, sensori, e strumenti di automazione. Lo studio dei *digital twin* ha permesso di verificare, entro un campo perimetrato, le tesi che individuano negli *urban OS* rappresentazioni problematiche per la comprensione e la trasformazione cosciente della città. Inoltre, sono stati raccolti e ordinati i materiali per il successivo studio morfologico, nella forma di documentazione sulle *applicazioni* dei modelli digitali [appendice A1].

Questa parte del lavoro costituisce una prima rassegna di modelli "*multipurpose*" di città orientata a evidenziare e sistematizzare i caratteri spaziali. Lo studio si è concentrato sulle applicazioni dei modelli realizzati da amministrazioni cittadine sviluppatori privati, ma può costituire il punto di partenza per ulteriore ricerca che estenda l'analisi delle astrazioni dello spazio

anche oltre il perimetro degli *urban digital twin*. Le considerazioni sulla parzialità delle fonti suggeriscono tuttavia la necessità di aggiornare le rassegne delle applicazioni di *3D city model* su cui il lavoro si è basato, attingendo a una letteratura tecnica più estesa [sezione 4.1]. Inoltre, il campione di *digital twin* analizzato potrà essere riconsiderato alla luce di ulteriore documentazione e degli esiti dei progetti in corso. Lavori futuri potranno integrare agli sviluppi analitici anche i modelli costruiti nella ricerca morfologica (soprattutto quantitativa), i quali, anche quando sono progettati a fini specialistici, implicano una trasversalità disciplinare e operativa che la tesi ha cercato di mettere in risalto.

Sulla base della rassegna di *digital twin*, è stata condotta un'analisi per *casi d'uso* dei modelli digitali studiati [capitolo 5]. Un caso d'uso è un insieme univoco di azioni che produce un risultato oggettivo per l'utente. Attraverso i casi d'uso, sono emersi dei caratteri comuni ai diversi modelli, in forma di *operazioni spaziali* e *dati spaziali* necessari al loro funzionamento. Come conclusione della fase analitica [sezioni 5.2 e 5.3], la tesi ha identificato un numero ridotto di *unità spaziali* (o *tipi* di unità spaziali) su cui la descrizione di spazio e forma nei *digital twin* si può ritenere fondata. Le unità spaziali sono classi di elementi dalla definizione chiara e condivisa tra i diversi modelli e i diversi ambiti disciplinari.

Nella valorizzazione delle astrazioni e della rappresentazione diagrammatica è stato riconosciuto un principio per la costruzione di modelli di città più controllabili ed efficaci. Studi futuri potranno prendere in esame una storia più estesa di quella qui esaminata, che confronti *bias* e criticità dell'uso dei modelli con l'avanzamento tecnologico connesso. Lo studio dei modelli pre-digitali potrebbe supportare la costruzione di modelli che non prevedano *scheumorfismi*, *onnicomprensività* e *immediatezza* (o l'illusione di un rapporto non-mediato con l'oggetto). Inoltre, è necessario chiarire in quale misura i problemi attuali siano imputabili all'introduzione dei computer e quanto, piuttosto, reiterino un rapporto di modellazione e tecnologia già osservabile anche in epoche precedenti.

La prospettiva del tentativo operato è certamente più limitata rispetto agli studi tradizionali sugli elementi fondamentali della forma urbana. Non è inclusa infatti la classificazione di ogni possibile morfema, bensì una rassegna di categorie ricorrenti nell'insieme di modelli considerato. Comunque, i risultati della ricerca forniscono strumenti per il controllo delle componenti spaziali del modello, intese come una struttura per la condivisione delle informazioni. Il lavoro può avere un impatto e trovare ulteriori avanzamenti nell'osservazione sul campo dei processi produzione calibrazione degli strumenti digitali per la soluzione di problemi perimetrati. I metodi proposti e i risultati ottenuti possono

essere impiegati nell'individuazione punti critici e in potenziali interventi di ridefinizione degli strumenti.

Di seguito, sono discussi alcuni risultati del lavoro relativi, nello specifico, (1) all'approfondimento delle criticità nella rappresentazione digitale dello spazio costruito, e (2) alla proposta di un'interazione più stretta fra lo studio della forma urbana e la costruzione di modelli.

### *La tecnologia e la rappresentazione del dettaglio.*

La città digitale tende a sovrapporsi, con crescente aderenza, alla città reale. Questa criticità della rappresentazione, già nota alla geografia e agli studi urbani, è stata verificata e approfondita per una classe specifica di modelli di città. La tesi ha contribuito a evidenziare come gli *urban digital twin* accentuino l'annullamento della distanza tra originale e replica — e la possibilità di confrontare la replica con l'originale, al fine di validare e correggere i modelli. Non sempre i dati registrati nei "gemelli" digitali sono realmente capillari e accurati, ma nella maggior parte dei casi la resa grafica rivela l'ideale di una copia esatta, in grado di sostituirsi all'originale. Nei *digital twin* studiati, diverse tecniche contribuiscono a questa aspirazione, tra cui l'integrazione di dati alla scala architettonica, l'uso di *texture* fotorealistiche, la visualizzazione di dati e elaborati grafici in *dashboard* onnicomprensivi. Di contro, la parte analitica del lavoro ha dimostrato come la maggior parte degli elementi di grande dettaglio non sia nei fatti funzionale all'uso del modello. Ciò non implica che informazioni dense e precise (come quelle derivanti da un modello BIM) non possano contribuire a risultato più realistico ed efficace. Tuttavia, nell'economia delle operazioni — anche computazionali, nonostante la potenza di calcolo oggi disponibile — i dati di questo genere sono spesso convertiti (aggregati, semplificati, trasformati) in elementi ascrivibili ai tipi di unità spaziali individuati, o ai loro attributi.

Lo studio morfologico condotto permette di riconsiderare alcuni usi invalsi nella costruzione dei modelli digitali. Ad esempio, rispetto alla definizione standard dei *level of detail* (LoD), basata sulle esigenze della visualizzazione (Biljecki, 2017), gli aspetti emersi possono suggerire un diverso ordine delle priorità [figura 32]. In particolare, per molti degli usi del modello individuati, le bucatore dell'edificio non appaiono necessarie, mentre la definizione dei livelli sostiene diverse funzioni, anche nel caso di modelli con una definizione grafico-visiva limitata. Inoltre, a conferma di una maggiore autonomia del dettaglio relativo ai livelli, nel caso esista il dato sulle bucatore il numero dei livelli e alcuni



caratteri geometrici possono essere efficacemente stimati<sup>100</sup> (al contrario, non è possibile inferire le aperture dai livelli).

Anche altre forme di **iperrealismo** grafico, che comprendono la generazione procedurale di dettagli e l'uso di *texture* fotografiche o fotorealistiche, apportano un contributo secondario all'uso dei modelli di città. Queste tecniche, pur avvicinando i caratteri esteriori a quelli dell'oggetto reale, rischiano di inficiare la funzionalità complessiva, comportando difficoltà nella copertura omogenea del modello con dati ad alta risoluzione, nell'aggiornamento dei dati, nella correzione di errori — più in generale, si tratta di problemi di rimozione dell'informazione in eccesso che producono interferenze, fenomeni noti fin dagli studi della cibernetica (Halpern, 2015).

La qualità di una rappresentazione della città dipende in larga parte dai dati. Tuttavia, la mancanza e la sottrazione di dati, non minano i caratteri fondamentali dei modelli. È invece di centrale importanza che i dati, quando ci sono, siano descritti secondo il loro *range* di affidabilità e completezza: "*it does remind us [...] how much trust to place in them*" (Simon, 1996 [1968], p.147). La città virtuale richiede che i processi di acquisizione di dati, di valutazione della loro qualità, e di interpretazione e rappresentazione restino distinti<sup>101</sup>, e questo obiettivo può essere raggiunto solo qualora lo *status* di copia irrealistica del modello sia manifesto. La tesi ha argomentato come la confusione dei dati con la totalità del modello esprima un problema di *media awareness*<sup>102</sup> che nasconde le lacune e limita gli esiti operativi dei modelli. Anche il ruolo proposto per la morfologia nella produzione dei modelli è inteso come un contributo alla "tracciabilità" di astrazioni e automatismi: l'associazione delle informazioni agli elementi spaziali fornisce un piano tangibile e condiviso per la validazione delle informazioni e della loro organizzazione; la definizione delle unità fondamentali in funzione dell'uso dei modelli permette di esplicitare il carattere arbitrario e temporaneo delle definizioni stesse. Questi principi supportano una lettura fluida

---

<sup>100</sup> Ai fini della modellazione urbana, le aperture possono anche contribuire alla definizione dei caratteri topologici, ad esempio permettendo l'individuazione della topologia delle superfici calpestabili (cfr. Kropf, 2017, p.98). Nei risultati ottenuti, questi caratteri spaziali sono tuttavia considerati nella classe di unità spaziali delle *reti*. Inoltre, il contributo delle aperture in calcoli come quelli relativi all'irraggiamento solare negli ambienti interni può essere semplificato in attributi di altre unità individuate (i solidi ad esempio), derivando i valori da modelli di dettaglio architettonico o da stime basate sulla tipologia dell'edificio.

<sup>101</sup> "*In an era in which the digital has blurred the distinctions between the real (physical) and the virtual (imaginative) worlds, it has become essential to differentiate between acts of perception, the quality of information (data), and methods of interpretation and representation*" (Bruzelius et al., 2018, p.88).

<sup>102</sup> *Cambridge Business English Dictionary*, s.v. "Media awareness".  
[dictionary.cambridge.org/dictionary/english/media-awareness](https://dictionary.cambridge.org/dictionary/english/media-awareness) (consultato il 07/04/21).

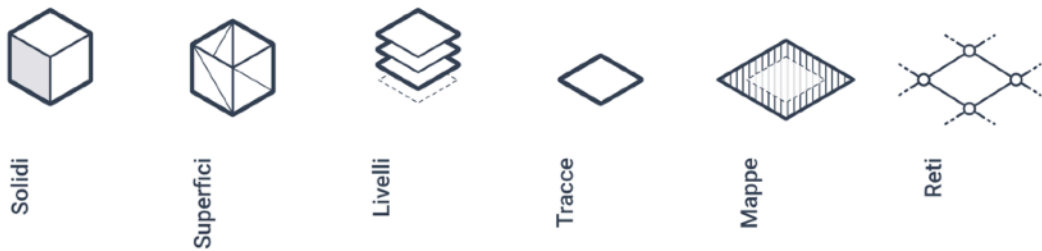
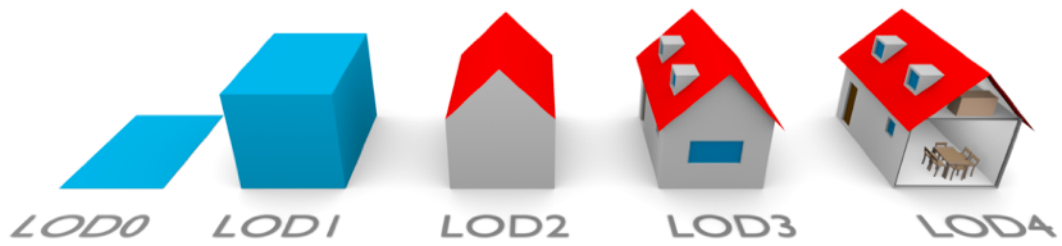


Figura 32. *i.* L'immagine mostra i *level of detail* definiti nello standard CityGML (Biljecki, 2017). I risultati della tesi sono un punto di partenza per ridiscutere il ruolo dello spazio nelle convenzioni della modellazione tridimensionale, in funzione dello scopo per cui i modelli sono usati. In particolare, le *unità spaziali* individuate suggeriscono che i livelli possano essere una forma di astrazione significativa anche in modelli che non raggiungono un dettaglio tale da rappresentare le bucatore degli edifici. Immagine tratta da Biljecki (2017). *ii.* Rappresentazione schematica delle *unità spaziali* individuate a valle del processo di analisi dei casi d'uso [sezioni 5.2, 5.3]. A differenza dello schema dei *level of detail*, le diverse rappresentazioni consentite dalle unità spaziali e dalle loro combinazioni non sono state ordinate per priorità o gerarchia.

dell'urbano, soggetta a verifiche costanti e adattamenti.

### *La morfologia e la ricerca di un linguaggio condiviso.*

Questo primo tentativo di analisi dei *digital twin* ha evidenziato la diffusione dell'uso della forma della città come supporto alla raccolta e alla trasmissione di dati molto diversi per dominio di origine. Lo studio ha però ribadito e documentato la **mancanza di un approccio condiviso** alla modellazione tridimensionale che già più di un decennio fa caratterizzava i modelli di città (Ross, 2010). I modelli più recenti, che nella teoria e nelle narrazioni crescono per capacità di assorbire e manipolare conoscenza sullo spazio urbano, risultano nei fatti ancora frammentati. L'analisi dei casi ha mostrato i *digital twin* come raccoglitori di numerose applicazioni tra le quali l'interazione è limitata e non è lineare lo scambio di dati. Questo aspetto è riscontrabile anche nei modelli che integrano con più efficacia strumenti e processi tesi a realizzare copie dinamiche della città, aggiornate in tempo reale e in reciproca interazione con lo spazio fisico.

La forma della città può assumere un ruolo più centrale nell'assemblaggio e nella calibrazione dei *digital twin*, con l'obiettivo di mettere a reagire strati informativi diversi per far emergere soluzioni a problemi complessi e in contesti locali e contingenti. Tuttavia, anche i contributi teorici della **morfologia urbana sono ancora lontani dalla costituzione di una κοινή**, un insieme di usi o una lingua comune per permettere alle diverse applicazioni di modelli di alimentare una conoscenza condivisa della città. La tesi ha dunque esplorato un piano di incontro tra l'interpretazione della città fisica e la capacità di usare gli strumenti digitali. Un approccio critico allo studio degli strumenti può mettere i ricercatori e i professionisti che si occupano di forma della città e dell'architettura nelle condizioni di adottare una soluzione tecnica con maggiore consapevolezza, e potenzialmente di assumere un ruolo più attivo nello sviluppo delle tecnologie.

La riflessione sugli elementi fondamentali della forma urbana ha già alimentato molta ricerca. La tesi si è confrontata con alcuni aspetti della classificazione dello spazio costruito prendendo in esame un tipo specifico di città virtuali, piuttosto che attraverso l'osservazione di città reali. Il confronto tra morfologia e studio tecnico degli strumenti digitali — un'intersezione finora poco esplorata — permette non solo di esaminare come i modelli siano costruiti ed impiegati, ma di rileggere in chiave funzionale l'interpretazione della città data dalla morfologia, e non come costruzione ideale o come riflesso di una logica

intrinseca dello spazio (Berghauser Pont, in Oliveira, 2018). Il fronte di ricerca proposto evidenzia quindi dei possibili fini operativi per gli approfondimenti morfologici (piuttosto che i fini descrittivi più spesso contemplati), un obiettivo già auspicato nella riflessione morfologica stessa (cfr. Oliveira, 2016).

Coerentemente con la necessità, evidenziata dalla letteratura morfologica, di distinguere le spinte normativo-prescrittive e quelle analitico-descrittive in base a cui interpretiamo la città (Berghauser Pont e Marcus, 2015; Kropf, 2017) la scelta di osservare e ricondurre a concetti morfologici i modelli digitali di città contribuisce a riconoscere e controllare *"a normative impulse in our perceptions and interpretations of buildings and cities"* (Kropf, 2017, p.2). La gestione dei dati ha infatti degli effetti trasformativi sul reale, poiché altera l'infrastrutturazione dello spazio costruito e l'organizzazione della città (cfr. Hill, 2020; Marvin e Luque-Ayala, 2017). Ma gli schemi più spesso adottati — per uso invalso o per prevalenza di logiche commerciali — potrebbero non essere i più efficienti, in relazione agli obiettivi. L'approccio proposto riconduce i modelli al ruolo di astrazioni auto-evidenti e alterabili, più che a un rigido e articolato sistema di contenitori per la raccolta di enormi quantità di dati.

Il lavoro riconosce dunque alla morfologia urbana un possibile contributo alla costruzione e alla calibrazione dei modelli — un aspetto ancora poco valorizzato, come mostrano strumenti, standard, e casi applicativi, spesso astratti da esigenze e principi condivisi da pianificatori, architetti, e altri esperti di forma urbana. Inoltre, la riflessione sulla forma della città come piano condiviso per lo scambio di informazioni ha supportato l'analisi di alcuni aspetti operativi legati alla rappresentazione dello spazio. La tesi ha quindi esaminato i limiti della digitalizzazione della città e delle sue funzioni già emersi in letteratura, riconsiderandoli e integrandoli entro il perimetro dei modelli spaziali.

## Riferimenti bibliografici.

- Berghauer Pont M., Marcus L.** (2015). Connectivity, density and built form: integrating Spacemate with space syntax. *ISUF 2015 XXII International Conference: City as Organism. New Visions for Urban Life.*
- Biljecki F.** (2017). *Level of detail in 3D city models* [PhD thesis].
- Brenner N., Schmid C.** (2015). Towards a new epistemology of the urban? *City*, 19(2–3), 151–182.
- Bruzelius C., Giordano A., Giles L., Repola L., De Feo E., Basso A., Castagna E.** (2018). L'eco delle pietre: history, modeling, and GPR as tools in reconstructing the choir screen at Sta. Chiara in Naples. *Archeologia e Calcolatori*, Supplemento 10, 2018, 81–103.
- Halpern O.** (2015). *Beautiful Data: A History of Vision and Reason since 1945*. Duke University Press.
- Hill D.** (2020). 'Small Pieces Loosely Joined': Practices for Super-local Participative Urbanism. *Architectural Design*, 90(3), 66–71.
- Kropf K.** (2017). *The Handbook of Urban Morphology*. Wiley.
- Marvin S., Luque-Ayala A.** (2017). Urban Operating Systems: Diagramming the City: Urban Operating Systems. *International Journal of Urban and Regional Research*, 41(1), 84–103.
- Oliveira V.** (2016). *Urban Morphology: An Introduction to the Study of the Physical Form of Cities*. Springer International Publishing.
- Oliveira V.** (a cura di) (2018). *Teaching urban morphology*. Springer Berlin Heidelberg.
- Ross L.** (2010). *Virtual 3D City Models in Urban Land Management—Technologies and Applications*. PhD thesis. Technischen Universität Berlin.
- Simon H.A.** (1996). *The sciences of the artificial*. MIT Press. [Prima pubblicazione 1968.]





# Appendici





Appendice A1.  
**Casi di *urban twinning*.**

## DT.1. Zurigo.

### Overview.

<b>Progetto.</b>	Digital twin della città di Zurigo, parte del programma <i>Strategies Zurich 2035</i> (2015).
<b>Parole chiave.</b>	<i>Smart city, urban planning</i> , densificazione, partecipazione.
<b>Clienti.</b>	Città di Zurigo.
<b>Sviluppatori.</b>	Città di Zurigo (GIS Stat Zürich e 25 dipartimenti dei servizi), ETH Zurich, Fachhochschule Nordwestschweiz, TU Munich.
<b>Framework.</b>	3D GIS.
<b>Stato.</b>	Il <i>3D city model</i> è attualmente usato dall'amministrazione e come archivio di dati <i>open source</i> . Altre estensioni sono progetti in corso.
<b>Note.</b>	La raccolta di <i>dataset</i> è in forma di <i>open data</i> .

### Specifiche tecniche.

<b>Estensione.</b>	Municipalità / 92 km <sup>2</sup> / 50 000 edifici.
<b>Input.</b>	Rilievi ufficiali del catasto (strade e impronte degli edifici), DTM (LIDAR).
<b>Output.</b>	Modello 3D, analisi basate sulla forma ( <i>line-of-sight</i> , ombre, microclima), <i>query</i> semantiche.
<b>Risoluzione.</b>	LoD0-2 / DTM, isolati, modelli dei tetti.
<b>Software.</b>	CityEngine (Esri), Cesium.
<b>Standard.</b>	CityGML, Federal Act on Geoinformation (Switzerland), direttiva INSPIRE (EU).

### Applicazioni.

- Comunicazione online per il coinvolgimento della popolazione.** Lo strumento di visualizzazione *online* Virtual Zurich (pubblicazione pianificata per il 2020, attualmente non disponibile) permette a diversi utenti la navigazione del modello tridimensionale [a]. Il modello permette inoltre la creazione di "stanze" private, e.g. per mostrare progetti a *stakeholder* selezionati. La piattaforma include alcuni strumenti di analisi spaziale (e.g. strumenti di misurazione). Il servizio Hochhaus-Viewer è un servizio *web* già pubblicato, basato su un sottoinsieme dei dati del *digital twin*, che mostra lo scenario di sviluppo della *skyline* della città e fornisce dati su progetti ed edifici esistenti [b].
- Portale degli open data.** Il servizio *web* Geoportal raccoglie dati spaziali e li rende pubblicamente disponibili per il *download* e la visualizzazione. Lo stesso modello geometrico tridimensionale fa parte di un vasto archivio pubblico di dati aperti [a].
- Catasto dei sottoservizi.** Il modello include dati sulle reti di servizi (come acqua, elettricità e telecomunicazioni), basati su aggiornamenti settimanali da parte delle compagnie operatrici. Gli attuali sistemi di misurazione e modellazione saranno aggiornati a standard e approcci completamente compatibili con il BIM [a].
- Serious games per la partecipazione.** Un modello in *voxel* (unità volumetriche cubiche) della città è stato costruito come estensione del celebre videogioco *Minecraft*, al fine di stimolare la partecipazione di giovani cittadini attraverso l'invio di proposte e segnalazioni.
- Video games.** Il modello ha permesso lo sviluppo di *Re(format) Z.*, un videogioco a tema fantascientifico ispirato agli eventi della riforma protestante a Zurigo [a].
- Valutazione energetica e simulazioni.** Il potenziale solare degli edifici può essere calcolato [a].
- Valutazioni ambientali e simulazioni.** Il modello supporta la simulazione della propagazione del rumore, dell'inquinamento dell'aria e della propagazione delle onde radio [a].
- VR per l'archeologia.** Sono pianificate applicazioni in VR per l'archeologia (è in corso la produzione di ricostruzioni storiche in 3D) [a].
- Progetto urbano e pianificazione.** Il modello è impiegato per visualizzare e confrontare progetti nei concorsi pubblici. Analisi delle ombre e della visibilità possono essere eseguite. Inoltre grazie a funzioni di controllo parametrico abilitate dal software impiegato (Esri City Engine) i progetti importati come modelli 3D

possono essere confrontati con i requisiti richiesti dal Municipal Development Plan [a].

*Fonti.*

- [a] Schrotter G., Hürzeler C. (2020). *The Digital Twin of the City of Zurich for Urban Planning*. PFG – Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science.  
<https://doi.org/10.1007/s41064-020-00092-2>
- [b] ESRI (2019). *3D Hochhaus-Viewer web service*.  
<https://hochhaeuser.stadt-zuerich.ch> (consultato il 23/03/21).
- [c] Stadt Zürich (2015). *Strategies Zurich 2035*.  
[https://www.stadt-zuerich.ch/portal/de/index/politik\\_u\\_recht/stadtrat/strategien2035/broschuere.html](https://www.stadt-zuerich.ch/portal/de/index/politik_u_recht/stadtrat/strategien2035/broschuere.html) (consultato il 23/03/21).
- [d] Dall'Acqua S. (2019). *Mapview*.  
<https://zuerich.mapview.ch/> (consultato il 23/03/21).
- [e] Stadt Zürich (2021). *3D-Stadtmodell Stadt Zürich*.  
<https://www.stadt-zuerich.ch/> (consultato il 26/03/21).

## DT.2. Helsinki - Kalasatama.

### Overview.

<b>Progetto.</b>	<i>Smart Kalasatama project.</i> Altri contributi: progetto KIRA-digi (progetto di digitalizzazione del governo finlandese); <i>mySMARTLife</i> , progetto Horizon 2020 (grant agreement n. 731297);
<b>Claim.</b>	"[City models] have a role to play in solving universal urban problems" Jarmo Suomisto, Città di Helsinki. "The carbon-neutral future of energy services is being built in Kalasatama." Smart Kalasatama. "The vision [...] is for everyone to gain an extra hour of free time every day." Smart Kalasatama.
<b>Parole chiave.</b>	<i>Digital twin, IoT, smart living.</i>
<b>Clienti.</b>	Progetto <i>mySMARTLife</i> Horizon 2020.
<b>Sviluppatori.</b>	Città di Helsinki, Forum Virium Helsinki (società pubblica), in collaborazione con i partner dei progetti <i>mySMARTLife</i> e KIRA-digi.
<b>Framework.</b>	3D GIS.
<b>Stato.</b>	Progetto pilota in corso di sviluppo (termine previsto nel 2021).
<b>Budget.</b>	21.7 M€ (finanziamento complessivo del progetto <i>mySMARTLife</i> ).
<b>Note.</b>	<i>Open data.</i>

### Specifiche tecniche.

<b>Estensione.</b>	Distretto di Kalasatama (DSM: 1 275 ha, di cui circa la metà è mare).
<b>Input.</b>	Cartografia digitale, DSM, DTM, <i>texture</i> dei materiali, dati municipali, dati da sensori.
<b>Output.</b>	Modello 3D, visualizzazione di dati, mappa del potenziale solare, mappa dei tetti verdi potenziali, mappa della dispersione termica delle coperture, simulazioni fisiche.
<b>Risoluzione.</b>	LoD0-2 / DTM, isolati, modelli dei tetti.
<b>Software.</b>	CityPlanner (Bentley Systems), Cesium, REMA, PostgreSQL + PostGIS, BRec, Rhinoceros, Ansys Discovery Live.
<b>Standard.</b>	CityGML, SensorThings.

### Applicazioni

- Generazione e aggiornamento del modello.** Il modello geometrico (LoD2) è creato a partire da nuvole di punti usando Rhinoceros (modellazione dei tetti) e BRec (modellazione semantica per CityGML). Il processo è semi-automatico, ma la modellazione di 250 edifici richiede circa 10 ore [e].
- Portale degli open data.** Il progetto ha permesso alla Helsinki Region Environmental Services Authority HSY di rendere disponibili come *open data* diversi dataset relativi agli aspetti energetici, le *mesh* del DSM e del DTM, e il modello CityGML [b].
- Comunicazione online per l'efficienza energetica.** Lo strumento di visualizzazione *online* Kattohukka mostra i dati di dispersione del calore degli edifici in forma di immagini da termocamera (disponibili come *open data*), per supportare la valutazione della qualità dell'isolamento termico delle coperture; lo strumento è indirizzato ai cittadini e agli investitori [b,h]. Il modello abilita inoltre le funzioni del servizio Energy and Climate Atlas, i cui dati, prodotti con lo strumento software REMA, presentano l'efficienza energetica corrente e possono simulare scenari di rinnovamento edilizio [i].
- Accessibilità e gestione dei dati da sensori.** Il *digital twin* può essere usato per raccogliere e coordinare dati da sensori geo-localizzati (e.g., sistemi di illuminazione pubblica) per rendere accessibili le informazioni e favorire le automazioni. Il progetto ha impostato un server *standard-compliant* e ha prodotto dei casi pilota, con l'obiettivo principale di risolvere problemi di interoperabilità tra gli standard relativi ai sensori e quelli del *3D city model* [b].
- Progettazione partecipata.** Il modello implementa il software CityPlanner software di Agency 9 (Bentley Systems). Il software è compatibile con standard IFC, può quindi essere usato per inserire progetti architettonici, e supporta sistemi di visualizzazione in VR. Gli utenti possono esaminare i progetti inseriti in un contesto dettagliato (i.e. il DSM), usare strumenti di misurazione e cambiare impostazioni come l'illuminazione [b, k].

**Valutazioni ambientali.** Analisi e simulazioni (simulazione dei venti, analisi dell'irraggiamento solare, analisi delle ombre) sono eseguite con software specifico (Ansys Discovery Live, Rhinoceros + Grasshopper, CityPlanner) [a, b, e].

**Accesso a dati da archivi storici.** La Città di Helsinki ha prodotto un modello *mesh* del progetto urbano del 1915 di Eliel Saarinen, non realizzato [a]. Il progetto non fa parte del *digital twin*, ma ne condivide lo strumento di visualizzazione (Cesium) [g].

*Fonti.*

- [a] Heiskanen A. (2019). *Helsinki is Building a Digital Twin of the City*. AEC Business. <https://aec-business.com/helsinki-is-building-a-digital-twin-of-the-city/> (consultato il 23/03/21).
- [b] Ruohomäki T., Airaksinen E., Huuska P., Kesaniemi O., Martikka M., Suomisto J. (2018). *Smart City Platform Enabling Digital Twin*. 2018 International Conference on Intelligent Systems (IS), 155–161. <https://doi.org/10.1109/IS.2018.8710517>
- [c] Smart Kalasatama (2020). *Smart Kalasatama*. <https://fiksukalasatama.fi/en/> (consultato il 23/03/21).
- [d] City of Helsinki (2019). *Helsinki's 3D city models*. <https://www.hel.fi/helsinki/en/administration/information/general/3d/> (consultato il 23/03/21).
- [e] KIRA-digi (2019). *The Kalasatama Digital Twins Project*, Report. <https://www.hel.fi/>
- [f] City of Helsinki Environment Sector (2017). Helsinki - *MySMARTLife*. <https://www.mysmartlife.eu/cities/helsinki/> (consultato il 23/03/21).
- [g] Helsinki Map Service (2021). *Helsingin 3D-mallit*. <https://kartta.hel.fi/3d/mesh/Kalasatama> (consultato il 23/03/21).
- [h] HSY (2018). *Kattohukka* [Helsinki thermal loss map]. <https://www.kattohukka.fi/> (consultato il 23/03/21).
- [i] City of Helsinki (2017). *Energy and Climate Atlas*. <https://kartta.hel.fi/3d/atlas/> (consultato il 23/03/21).
- [k] City of Helsinki (2019). *FIKSU KALASATAMA – Bentley® OpenCities™ Planner*. <https://cityplanneronline.com/helsinki/kalasatama> (consultato il 23/03/21).

### DT.3. Singapore.

#### Overview.

<b>Progetto.</b>	Virtual Singapore.
<b>Claim.</b>	"[A]ny type of information and knowledge that is available for a location in space and time" Dassault Systèmes. "Singapore wanted to develop a smart city environment to plan everything" Dassault Systèmes.
<b>Parole chiave.</b>	Smart nation, BLM, 3D city model.
<b>Clienti.</b>	Governo di Singapore.
<b>Sviluppatori.</b>	Dassault Systèmes, National Research Foundation Singapore, Singapore Land Authority, Infocomm Development Authority of Singapore, Government Technology Agency of Singapore, altri partner privati e accademici.
<b>Framework.</b>	BIM/CIM (compatibile con GIS).
<b>Stato.</b>	In corso di realizzazione (termine del progetto nel 2021).
<b>Budget.</b>	73 M\$.

#### Specifiche tecniche.

<b>Estensione.</b>	725.7 km <sup>2</sup> (Repubblica di Singapore).
<b>Input.</b>	Cartografia del progetto, DTM, <i>texture</i> dei materiali, dati da sensori.
<b>Output.</b>	Modello 3D fotorealistico, visualizzazione di dati, simulazioni fisiche.
<b>Risoluzione.</b>	LoD3, livelli di dettaglio del BIM.
<b>Software.</b>	3DEXPERIENCity (Dassault Systèmes).
<b>Standard.</b>	INSPIRE, CityGML, IFC.

#### Applicazioni.

- Generazione e aggiornamento del modello.** Un *research grant* per la ricerca sulla generazione automatica di modelli (LoD3) da sorgenti di dati multiple è stato assegnato al Future Cities Laboratory dell'ETH (Singapore-ETH Centre) [e].
- Navigazione.** Il modello supporta il *routing* (per percorsi carrabili, ciclabili, pedonali e adatti a disabili e anziani) ed è caratterizzato da funzioni per l'accessibilità e i trasporti [c].
- Comunicazione online per l'accesso dei cittadini all'informazione.** Dei servizi *online* permettono la navigazione del modello e la visualizzazione dei contenuti semantici connessi e dei risultati di analisi. Sono disponibili funzioni di filtro basate sui parametri degli elementi rappresentati [a].
- Business analytics.** Le aziende possono accedere a servizi analitici specializzati [a].
- Supporto alla collaborazione nei processi decisionali.** La visualizzazione di analisi, di dati in tempo reale e di scenari progettuali può supportare la collaborazione tra agenti e portatori di interesse nei processi decisionali [a, c].
- Progettazione urbana.** I processi di *urban planning* e progettazione urbana possono beneficiare di analisi e valutazioni di impatto relative agli scenari progettati (e.g., mappe del calore, della luminosità o del rumore). La possibilità di filtrare gli *asset* sulla base di parametri supporta strumenti di progettazione semi-automatica [a].
- Accessibilità e gestione dei dati da sensori.** Il *digital twin* è considerato un campo di prova fondamentale per la realizzazione di un *network* nazionale di sensori (Smart Nation Sensor Platform) [a, c, f].
- Risposta alle emergenze.** La piattaforma permette di simulare la dispersione di folle e l'esecuzione di procedure di evacuazione [a].
- Valutazioni ambientali.** Il sistema 3DEXPERIENCity permette simulazioni e stime che riguardano i livelli di esposizione alle onde radio, l'intensità del rumore, la dispersione degli inquinanti e il comportamento dei venti [c].

#### Fonti.

- [a] Singapore National Research Foundation (2018). *Virtual Singapore*.  
<https://www.nrf.gov.sg/programmes/virtual-singapore/> (consultato il 23/03/21).
- [b] Laurent B., Pontille D. (2018). *Towards a study of city experiments*. In Coletta C., Evans L., Heaphy L., Kitchin R. (editori). *Creating Smart Cities* (Vol. 131, pp. 90–103). Routledge.

- [c] Doyle S. (2019). *Siblings make sense of smart cities*. *Engineering Technology*, 14(1), 42–45.  
<https://doi.org/10.1049/et.2019.0103>
- [d] FULL, *Which digital tools for the creation of a Digital Open Urban Twin?* Technical Report 1/2019 (2019).
- [e] Gruen A., Schubiger S., Qin R., Schrotter G., Xiong B., Li J., Ling X., Xiao C., Yao S., Nuesch F. (2019). *Semantically enriched high resolution LoD 3 model generation*. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-4/W15, 11–18.  
<https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-4-W15-11-2019>
- [f] Government Technology Agency (2021). *Smart Nation Sensor Platform*.  
<https://www.tech.gov.sg/products-and-services/smart-nation-sensor-platform/> (consultato il 23/03/21).
- [g] Lubell S. (2017). *Virtual Singapore Looks Just Like Singapore IRL—But With More Data*. *Wired*.  
<https://www.wired.com/2017/02/virtual-singapore-looks-just-like-singapore-irl-data/> (consultato il 23/03/21).
- [h] Hollands R.G. (2008). *Will the real smart city please stand up?: Intelligent, progressive or entrepreneurial?* *City*, 12(3), 303–320.  
<https://doi.org/10.1080/13604810802479126>
- [i] Mahizhnan A. (1999). *Smart cities. The Singapore case*. *Cities*, 16(1), 13–18.
- [k] Choo C.W. (1997). *IT2000: Singapore's vision of an intelligent island*. In *Intelligent environments* (pp. 49–65). Elsevier.
- [m] Dassault Systèmes (2016). *2015 3DEXperience Annual Report*. Report.
- [n] French Chamber Singapore (n.d.). *Urban innovations*.  
<https://urban-innovations.fccsingapore.com/> (consultato il 26/03/21).



## DT.4. Amaravati.

### Overview.

<b>Progetto.</b>	Amaravati Capital City.
<b>Claim.</b>	“Amaravati will be born as a Digital Twin” Michael Jansen, Cityzenith. “hundreds of IoT [internet of things] systems and public databases are consolidated into a single portal” Cityzenith.
<b>Parole chiave.</b>	Smart city, IoT, digital twin.
<b>Clienti.</b>	Andhra Pradesh Capital Regional Development Authority (APCRDA).
<b>Sviluppatori.</b>	APCRDA, Cityzenith, AEC Digital Studio.
<b>Framework.</b>	3D GIS.
<b>Stato.</b>	Un prototipo è stato presentato all'inizio del 2019. L'intero progetto di Amaravati è attualmente fermo.
<b>Budget.</b>	6.5 G\$ (per il progetto Amaravati Capital City nel suo complesso).

### Specifiche tecniche.

<b>Estensione.</b>	217 km <sup>2</sup> (area del progetto urbano).
<b>Input.</b>	Dati da sensori, BIM.
<b>Output.</b>	Modello 3D, simulazioni fisiche.
<b>Risoluzione.</b>	Dettagli geometrici degli edifici.
<b>Software.</b>	Smart World Pro (Cityzenith).
<b>Standard.</b>	Informazioni non reperibili (BIM, GIS).

### Applicazioni.

**Monitoraggio del microclima e simulazioni.** Il modello può simulare le temperature medie della città e testare nuovi progetti, tenendo in considerazione gli effetti determinati dalla vegetazione e dalle ombre. I dati in tempo reale saranno forniti dai sensori [a, b].

**Monitoraggio del cantiere.** Applicazioni previste. Il modello urbano può interagire con modelli alla scala urbana in formato BIM [b].

**Accessibilità e gestione dei dati da sensori.** Il modello è progettato per crescere con la costruzione del "gemello" fisico, e prevede dunque un'interazione stretta con sistemi di IoT [a, b].

**Comunicazione online per i servizi al cittadino.** Il modello integrerà servizi ed informazioni basati su i codici identificativi dei cittadini. Un esempio dei servizi previsti riguarda la possibilità di richiedere il permesso di costruire attraverso la piattaforma [a, b].

**Coordinamento e visualizzazione di modelli per VR.** Il modello fornisce l'accesso ad applicazioni di VR abilitate dal servizio commerciale Matterport [b, f]. Quest'ultimo offre scene immersive basate su modelli *mesh* fotorealistici e immagini sferiche, che possono integrare "tag" spaziali di collegamento a informazioni e documenti.

**Interfaccia per l'integrazione di modelli spaziali.** Il sistema è caratterizzato da funzioni "drag and drop" per l'integrazione di *dataset* spaziali e modelli dettagliati (anche in formato BIM) che includano impianti degli edifici e reti di servizi [a, b].

**Link tra documenti.** Il modello geometrico può essere connesso a documenti come immagini e file di testo attraverso *tag* semantici o spaziali [a, b].

**Query spaziali in linguaggio naturale.** Il sistema permette di effettuare ricerche degli elementi del modello, anche attraverso il riconoscimento del linguaggio naturale [a, b].

**Monitoraggio del traffico e simulazioni.** Applicazioni previste. Il modello prevede il monitoraggio del traffico sulla base di sensori e la simulazione di scenari di progetto [a, b].

### Fonti.

[a] Cityzenith (n.d.). *Smart City Cityzenith's SmartWorldPro™ Digital Twin Platform Selected for New Capital City in India.*  
<https://cityzenith.com/smart-world-pro-digital-twin-smart-city-india/>  
(consultato il 25/03/19).

[b] Cityzenith (2019). *A Digital Twin for Amaravati.* Vimeo.  
<https://vimeo.com/312641882> (consultato il 25/03/19).

- [c] Foster + Partners (2017). *Amaravati masterplan*.  
<https://www.fosterandpartners.com/projects/amaravati-masterplan/>  
(consultato il 25/03/19).
- [d] Zeiba D. (2019). *Chicago-based start up wants to make a digital clone of a city*. The Architect's Newspaper.  
<https://archpaper.com/2019/04/cityzenith-techplus/> (consultato il 24/03/21).
- [e] Minsky C. (2020). *Digital twins give urban planners virtual edge*. Financial Times, 29 gennaio 2020 (online).  
<https://www.ft.com/> (consultato il 24/03/21).
- [f] Matterport (2021). *Capture, share, and collaborate the built world in immersive 3D*.  
<https://matterport.com> (consultato il 24/03/21).

## DT.5. Amsterdam – Amsterdam Zuidoost.

### Overview.

<b>Progetto.</b>	Amsterdam Zuidoost e Amsterdam Smart City Dashboard.
<b>Claim.</b>	“We will use the digital twin to allow for optimal design and to test certain scenarios” Huib Pasman, Amsterdam ArenA Innovation Centre. “[Amsterdam Zuidoost] is based on the three key elements for any smart city: energy transition, living environment and transport.” Geodan.
<b>Parole chiave.</b>	Digital twin, smart city, decision-making, dati in tempo reale.
<b>Clienti.</b>	Città di Amsterdam.
<b>Sviluppatori.</b>	Città di Amsterdam, Amsterdam Innovation ArenA, Geodan, Huawei Technologies.
<b>Framework.</b>	3D GIS.
<b>Stato.</b>	Progetto avviato nel 2018; nel 2019 è stato presentato il <i>digital twin</i> di Amsterdam Zuidoost.

### Specifiche tecniche.

<b>Estensione.</b>	~ 22 km <sup>2</sup> (distretto di Amsterdam Zuidoost).
<b>Input.</b>	Dati da sensori, dati municipali.
<b>Output.</b>	3D city model, city dashboard (data visualization).
<b>Risoluzione.</b>	LoD1-3.
<b>Software.</b>	Informazioni non reperibili.
<b>Standard.</b>	Standard aperti non specificati (compatibili con BIM e GIS).

### Applicazioni.

- Raccolta di dati da dispositivi mobili.** Secondo Geodan, il *dashboard* può raccogliere dati da dispositivi mobili per ottenere analisi come l'uso dei *social network* sul territorio e mappe di affollamento [d].
- Monitoraggio del traffico.** I trasporti costituiscono uno dei principali temi monitorati dal progetto. Diverse metriche derivanti da dati in tempo reale sui flussi di traffico possono essere prodotte e integrate con altri dati sulla mobilità, come dati sui servizi di *bike sharing* e sul trasporto pubblico. Il modello permette la visualizzazione dei dati sul *network* stradale [d].
- Verifica dei regolamenti urbani.** Secondo la descrizione data da Geodan dei servizi di *digital twinning* forniti “plans and various scenarios are automatically checked against current legislation and regulations, such as zoning plans” [d].
- Raccolta di video di sorveglianza.** Le telecamere di sicurezza e le telecamere per il monitoraggio del traffico possono essere connesse al *dashboard* e consultate dal modello in base alla posizione [d].
- Raccolta di dati sulla produzione e il consumo di energia elettrica.** Il modello è impiegato per il monitoraggio e la visualizzazione dei dati sulla produzione di energia (da turbine eoliche, pannelli solari e altri impianti) e sul consumo di energia, con l'obiettivo generale di raggiungere i target di transizione energetica della Città [d].
- City dashboard.** Il servizio permette di raccogliere e connettere dati e mappe da molte fonti (e.g., monitoraggio del traffico, dell'energia elettrica, dell'uso dei dispositivi mobili, di parametri ambientali) [a]. Gli strumenti per la visualizzazione di dati in tempo reale e per la visualizzazione contemporanea di più livelli informativi possono supportare gli *stakeholder* nei processi decisionali [d].
- Accessibilità e gestione di dati da sensori.** Nello specifico, il progetto pilota permette il monitoraggio dei livelli di rumore. Altri sistemi integrabili comprendono i sensori per la qualità dell'aria [d].
- Simulazioni per la pianificazione.** Applicazioni previste. I dati e le stime statistiche possono fornire previsioni sull'impatto delle trasformazioni urbane — ad esempio per la valutazione della conversione di destinazione d'uso degli edifici, o per nuovi progetti — tenendo in considerazione, tra l'altro, i valori immobiliari e gli aspetti ambientali [a, d].
- Comunicazione online per l'accesso dei cittadini all'informazione.** Applicazioni previste. La piattaforma può essere usata per fornire informazioni in tempo reale accessibili ai cittadini [d].

*Fonti.*

- [a] Doyle S. (2019). *Siblings make sense of smart cities*. Engineering Technology, 14(1), 42–45.  
<https://doi.org/10.1049/et.2019.0103>
- [b] Johan Cruijff ArenA (2021). *Johan Cruijff ArenA | Innovation Lab*.  
<https://amsterdaminnovationarena.com> (consultato il 24/03/21).
- [c] Takken R. (2019). *Inclusive Smart Cities By Design*. Geospatial World.  
<https://www.geospatialworld.net/blogs/inclusive-smart-cities-by-design/>  
(consultato il 24/03/21).
- [d] Geodan (2021). *Geodan - Managing urban processes intelligently with the Amsterdam Smart City Dashboard*.  
<https://www.geodan.com/knowledge-and-innovation/managing-urban-processes-intelligently-with-the-amsterdam-smart-city-dashboard/> (consultato il 24/03/21).
- [e] Monerie A. (2019). *Digital twin maakt Amsterdam leefbaar*. Computable.  
<https://www.computable.nl/artikel/nieuws/digital-innovation/6688524/250449/digital-twin-maakt-amsterdam-leefbaar.html> (consultato il 24/03/21).
- [f] ZO! Nieuws (2018). *Amsterdam gaat investeren in geluk inwoners Zuidoost*.  
<https://www.zuidoost.nl/amsterdam-gaat-investeren-in-geluk-inwoners-zuidoost/> (consultato il 24/03/21).
- [g] Amsterdam Innovation Arena (2021). *Videos*. YouTube.  
<https://www.youtube.com/channel/UC-J1KvKUUF8vgy8eRpxAsyg/videos>  
(consultato il 24/03/21).

## DT.6. Toronto – Quayside.

### Overview.

<b>Progetto.</b>	Sidewalk Toronto / Quayside project.
<b>Claim.</b>	"The world's first neighbourhood built from the internet up" Sidewalk Labs.
<b>Parole chiave.</b>	Inclusività, sostenibilità, <i>climate-positive development</i> .
<b>Clienti.</b>	Waterfront Toronto (società <i>not-for-profit</i> finanziata dai governi federale, provinciale e regionale).
<b>Sviluppatori.</b>	Sidewalk Toronto ( <i>joint venture</i> : Sidewalk Labs e Waterfront Toronto).
<b>Framework.</b>	Dati da sensori, dato <i>crowdsourced</i> .
<b>Stato.</b>	Progetto interrotto. Il progetto è iniziato nel 2017; la proposta di Sidewalk Labs è stata pubblicata nel giugno 2019; Sidewalk Labs ha lasciato il progetto nel maggio 2020.
<b>Budget.</b>	50 M\$ (primo anno, sviluppo del <i>masterplan</i> ).
<b>Note.</b>	La proposta di Sidewalk Labs ha ricevuto diverse critiche sulla protezione della <i>privacy</i> , da parte di cittadini ed esperti.

### Technical specifications.

<b>Estensione.</b>	~50 000 m <sup>2</sup> .
<b>Input.</b>	Dati da sensori, modello 3D.
<b>Output.</b>	Visualizzazione di dati.
<b>Risoluzione.</b>	Livelli di dettaglio del BIM e delle reti infrastrutturali (strade, servizi).
<b>Software.</b>	Strumenti sviluppati da Sidewalk Labs (inclusi Replica, Coord, CommonSpace).
<b>Standard.</b>	Brick (edifici, inclusi HVAC), IFC (BIM), OpenStreetMap (spazio pubblico), CityGML e CityJSON (forma degli edifici e metriche), Public Life Data Protocol (standard per la descrizione dell'uso dello spazio pubblico definito dal Gehl Institute), altri standard relativi al traffico.

### Applications.

Le applicazioni descritte sono quelle previste dal *Master Innovation and Development Plan* pubblicato da Sidewalk Labs [h]. Alcune delle applicazioni citate non sono esplicitamente connesse al modello geometrico, ma sono confrontabili con precedenti applicazioni dei *3D city model* [cfr. o].

**Monitoraggio crowdsourced dello spazio pubblico.** La app CommonSpace di Sidewalk Labs permette a volontari e addetti dell'amministrazione di documentare le attività umane negli spazi aperti [f, h].

**Gestione degli asset pubblici.** È prevista la realizzazione di una mappa 3D dettagliata dello spazio pubblico, che comprenda spazi aperti (parchi, piazze...), reti di servizi (raccolta delle acque meteoriche, rete elettrica...) e componenti mobili (sedute, segnali...). Le funzioni di visualizzazione possono informare i cittadini, stimolare la partecipazione, supportare la manutenzione, la progettazione e la gestione di processi di complessi [h].

**Monitoraggio e del traffico e simulazioni.** Il software Replica di Sidewalk Labs sottende un database geo-spaziale e un'interfaccia di visualizzazione per il monitoraggio dei flussi di popolazione e delle attività svolte, e permette di eseguire complesse *query* [c]. Il modello è basato su un campione di dati da dispositivi mobili (resi anonimi), usati per generare una popolazione sintetica ed eseguire simulazioni.

**Showcase.** Dal 2018, il *307 Workspace* di Sidewalk Labs a Quayside ha ospitato le attività di comunicazione del progetto e di coinvolgimento della cittadinanza. Qui è stato reso disponibile al pubblico uno strumento di modellazione generativa per la produzione di scenari di trasformazione basati su metriche urbane parametrizzate [c, f].

**Gestione delle acque meteoriche.** È previsto un sistema di gestione attiva e riciclo delle acque meteoriche basato su sensori ed attuatori, utili anche alla raccolta di dati con finalità di pianificazione e ricerca [h].

**Regolamenti edilizi su base prestazionale.** Si prevede il monitoraggio attraverso sensori di parametri ambientali e di integrità strutturale alla scala dell'edificio (pressione sonora, odori, vibrazioni...). I valori rilevati possono essere confrontati con i regolamenti edilizi ed urbani. Queste verifiche di conformità possono

supportare la sostituzione di una pianificazione per *zone* rigide con sistemi favorevoli a usi misti, validati in maniera dinamica [h].

**Sistemi automatici di gestione energetica.** Sensori e attuatori possono essere impiegati per ottimizzare i consumi energetici degli edifici (e.g., regolando gli impianti in base all'uso degli ambienti) [h].

*Fonti.*

- [a] Doyle S. (2019). *Siblings make sense of smart cities*. Engineering Technology, 14(1), 42–45.  
<https://doi.org/10.1049/et.2019.0103>
- [b] Bowden N. (2018). *Introducing Replica, a next-generation urban planning tool*. Medium.  
<https://medium.com/sidewalk-talk> (consultato il 24/03/21).
- [c] Replica (2021). *Replica*.  
<https://replicahq.com> (consultato il 24/03/21).
- [d] Verdict (2019). *Toronto's smart city project shows public trust in Big Tech is in trouble*. Verdict.  
<https://www.verdict.co.uk/smart-city-toronto/> (consultato il 24/03/21).
- [e] Sidewalk Labs (2020). *Sidewalk Toronto*.  
<https://www.sidewalktoronto.ca/> (consultato il 24/03/21).
- [f] Mattern S. (2020). *Post-It Note City*. Places.  
<https://placesjournal.org/article/post-it-note-city/> (consultato il 24/03/21).
- [g] Belesky P. (2020). *A Perennial Practice: Designing Between Urban Landscape and Urban Network*. Architectural Design, 90(3), 100–107.  
<https://doi.org/10.1002/ad.2575>
- [h] Sidewalk Labs (2019). *Master Innovation and development plan*.  
<https://www.sidewalktoronto.ca/accessible-midp/> (consultato il 24/03/21).
- [i] Waterfront Toronto (2017). *Request for Proposals*.  
<https://quaysidetoronto.ca/wp-content/uploads/2019/04/Waterfront-Toronto-Request-for-Proposals-March-17-2017.pdf> (consultato il 24/03/21).
- [k] Wiley (2018). *Searching for the Smart City's Democratic Future*. Centre for International Governance Innovation.  
<https://www.cigionline.org/articles/searching-smart-citys-democratic-future> (consultato il 24/03/21).
- [m] Austen I. (2019). *Trash-Picking Robots? Park Bench Monitors? Toronto Debates Tech Giant's Waterfront Plans*. The New York Times, 24 giugno 2019 (online).  
<https://www.nytimes.com/2019/06/24/world/canada/toronto-google-sidewalk-labs.html> (consultato il 24/03/21).
- [n] Austen I. (2020). *You Can't Fight City Hall. But Maybe You Can Fight Google*. The New York Times, 10 marzo 2020 (online).  
<https://www.nytimes.com/2020/03/10/world/canada/toronto-sidewalk-labs-google.html> (consultato il 24/03/21).
- [o] Biljecki F., Stoter J., Ledoux H., Zlatanova S., Çöltekin A. (2015). *Applications of 3D City Models: State of the Art Review*. ISPRS International Journal of Geo-Information, 4(4), 2842–2889.  
<https://doi.org/10.3390/ijgi4042842>

## DT.7. Rennes.

### Overview.

<b>Progetto.</b>	Virtual Rennes (3DEXPERIENCity Virtual Rennes).
<b>Claim.</b>	"This model allows planning for the future and imagining future services in order to respond better to the environmental and societal challenges that it faces." 3DEXPERIENCE Lab, Dassault Systèmes.
<b>Parole chiave.</b>	Piattaforma collaborativa, <i>cloud</i> .
<b>Clienti.</b>	Rennes Métropole.
<b>Sviluppatori.</b>	Dassault Systèmes, Rennes Métropole (e società partner)
<b>Framework.</b>	BIM/CIM (compatibile con GIS).
<b>Stato.</b>	Progetto formalmente concluso nell'estate del 2020 (la piattaforma 3D è correntemente usata dall'amministrazione). Un'interfaccia pubblica aggiornata non è ancora disponibile.
<b>Budget.</b>	2.5 M€ (finanziato per 0.75 M€ da Rennes Métropole, per 0.27 M€ dallo Stato francese, per 1.48 M€ da Dassault Systèmes).

### Specifiche tecniche.

<b>Estensione.</b>	705 km <sup>2</sup> (Rennes Métropole), ~ 450 000 abitanti.
<b>Input.</b>	Modello 3D (volumi degli edifici, DTM, <i>texture</i> ), dati dagli operatori dei servizi urbani e altri partner, dati demografici, modelli di progetto.
<b>Output.</b>	Visualizzazione di dati (sulla base del modello 3D).
<b>Risoluzione.</b>	LoD2 (livello di dettaglio stimato; comprende <i>texture</i> esterne degli edifici e modelli di progetto a maggior dettaglio).
<b>Software.</b>	3DEXPERIENCity (Dassault Systèmes).
<b>Standard.</b>	INSPIRE, CityGML, IFC.

### Applicazioni.

- Progettazione urbana.** I pianificatori possono usare il modello "*to envision the potential growth of the region, [...] optimize the systems and networks necessary to serve that new development, plan new urban services, communicate effectively with the public, and administer construction to minimize delays and negative effects*" [d].
- Monitoraggio del traffico.** Le infrastrutture per la mobilità sono rappresentate e connesse in tempo reale con dati sul traffico, fornendo approfondimenti per la gestione e la progettazione [d].
- Comunicazione online per il coinvolgimento della popolazione.** Un modello 3D di Rennes è pubblicamente accessibile in rete. Il modello è finalizzato alla comunicazione degli scenari di progetto e al coinvolgimento dei cittadini nei processi di sviluppo [b, c, d, e].
- Piattaforma collaborativa.** Con l'obiettivo di rendere più efficaci le politiche pubbliche, il modello può essere usato come una piattaforma centralizzata per la raccolta e la condivisione di dati. Gli strumenti di visualizzazione supportano la comparazione e la connessione di dati provenienti da diversi *provider*, e la comunicazione tra i professionisti [c].
- Mappa del consumo energetico.** Il modello genera e mostra stime del consumo energetico alla scala dell'edificio — sulla base di dati demografici, dati sul tessuto urbano e serie storiche sul consumo energetico alla scala del quartiere [c].
- Valutazioni ambientali e simulazioni.** Il sistema 3DEXPERIENCity permette simulazioni relative a onde radio, rumore, inquinanti e venti.

### Fonti.

- [a] Doyle S. (2019). *Siblings make sense of smart cities*. Engineering Technology, 14(1), 42–45.  
<https://doi.org/10.1049/et.2019.0103>
- [b] Dassault Systèmes (2017). *Rennes, France Virtually Experiences its Sustainable Future with Dassault Systèmes*.  
<https://www.3ds.com/press-releases/single/rennes-france-virtually-experiences-its-sustainable-future-with-dassault-systemes/> (consultato il 24/03/21).

- [c] Dassault Systèmes (2017). *3DEXPERIENCity® - Virtual Rennes - Dassault Systèmes*. YouTube.  
<https://youtu.be/jeee4OwOPEc> (consultato il 24/03/21).
- [d] Cooper R. (2018). *Urban Planning in 3D: How Creating a Digital Twin Leads to Smarter Cities*. Meeting of the Minds.  
<https://meetingoftheminds.org/urban-planning-3d-creating-digital-twin-leads-smarter-cities-25212> (consultato il 24/03/21).
- [e] Dassault Systèmes (n.d.). *Rennes Métropole*.  
<https://www.3ds.com/insights/customer-stories/rennes-metropole>
- [f] Rennes, Ville et Métropole (n.d.). *Rennes en 3D*.  
<https://rennes2030.fr/rennes-en-3d/> (consultato il 25/02/19).
- [g] Rennes, Ville et Métropole (n.d.). *Rennes Métropole, Smart City*.  
<https://metropole.rennes.fr/rennes-metropole-smart-city> (consultato il 24/03/21).
- [h] Voisin M. (2017). *Le projet de Virtual Rennes 3D experiencity*. Veille Carto 2.0.  
<https://veillecarto2-0.fr/2017/12/18/projet-de-virtual-rennes-3d-experiencity/>  
 (consultato il 24/03/21).
- [i] Diguët C., Gobled L., Opigez X. (2017). *Partage des données et politiques publiques, exemples français*. Les Cahiers n° 174 de l'Institut d'Aménagement et d'Urbanisme, 128–130. IAU île-de-France.  
[https://www.institutparisregion.fr/fileadmin/NewEtudes/Etude\\_1411/C174\\_web.pdf](https://www.institutparisregion.fr/fileadmin/NewEtudes/Etude_1411/C174_web.pdf)
- [k] Guillemin C. (2018). *Rennes Métropole. La ville virtuelle pour bâtir la smart city*. Smart City Mag, 20, October 2018, 38–39.
- [m] Dassault Systèmes (2020). *Cities and COVID-19: Response and Resilience*.  
<https://blogs.3ds.com/perspectives/cities-and-covid-19-response-and-resilience/> (consultato il 24/03/21).



## DT.8. Los Angeles – Lincoln Heights.

### Overview.

<b>Progetto.</b>	n.d. (nome non ufficiale: prototipo Azure Digital Twins).
<b>Claim.</b>	"Create comprehensive digital models of entire environments" Azure Digital Twins, Microsoft.
<b>Parole chiave.</b>	Digital twin, IoT.
<b>Clienti.</b>	Itron.
<b>Sviluppatori.</b>	Microsoft, Itron, Vectorform (presentazione in AR).
<b>Framework.</b>	Digital Twin Definition Language (DTDLD, un linguaggio di modellazione flessibile e aperto basato su JSON).
<b>Stato.</b>	Un prototipo è stato presentato con uno <i>showcase</i> al CES 2019. Sono previsti ulteriori avanzamenti.

### Specifiche tecniche.

<b>Estensione.</b>	~0.27 km <sup>2</sup> (stima basata su immagini del modello presentato).
<b>Input.</b>	Modello 3D, dati da sensori, <i>network</i> stradale.
<b>Output.</b>	Grafo gerarchico (" <i>live graph</i> "), infografica (sulla base del modello 3D).
<b>Risoluzione.</b>	LoD2 (livello di dettaglio stimato). Il prototipo permette di interagire con parametri alla scala dell'isolato, ma il linguaggio di modellazione usato è flessibile rispetto alla scelta degli elementi rappresentati.
<b>Software.</b>	Azure Digital Twins (Microsoft).
<b>Standard.</b>	Il software impiegato non richiede standard specifici (è compatibile con dati BIM e GIS).

### Applicazioni.

- Grafo delle componenti.** Secondo Microsoft, una delle funzioni principali della piattaforma Azure Digital Twins è il "*live execution environment*". La funzione mostra il grafo di tutte le componenti del modello, aggiornate attraverso un database *cloud*. L'utente può eseguire *query* e variare il *layout* del grafo. Il sistema è basato su un linguaggio di modellazione aperto che permette di costruire modelli *custom*, definendo classi di elementi e connessioni [c].
- Raccolta di dati da sensori.** Azure Digital Twins può ricevere input da dispositivi di IoT, come sensori della qualità dell'aria e termostati [c].
- Raccolta di dataset spaziali.** La piattaforma può integrare documenti di in altri formati per la modellazione informativa, come BIM e GIS [c].
- Monitoraggio del microclima e simulazioni.** Il modello può essere alterato per simulare scenari di trasformazione e calcolarne gli impatti. Nel prototipo presentato, sono mostrate simulazioni che registrano una variazione del microclima urbano [d].
- Monitoraggio energetico e simulazioni.** Tra gli altri, possono essere raccolti dati sulla domanda di energia elettrica. Sulla base degli stessi, possono essere simulati scenari di trasformazione [d].
- Showcase.** Durante la presentazione del prototipo al CES 2019, Itron ha messo a disposizione dei visitatori un modello navigabile con funzioni interattive per alternare scenari e parametri e osservare la valutazione degli impatti conseguenti. L'esperienza è stata realizzata in AR usando la tecnologia Microsoft HoloLens, e un modello fisico come base per la sovrapposizione dei contenuti digitali [a].
- Progettazione urbana.** Le funzioni di simulazione sono progettate per supportare i processi di progettazione.
- Monitoraggio del traffico e simulazioni.** Anche la rappresentazione dei *network* stradali permette di simulare il traffico e testare configurazioni alternative [e].

### Fonti.

- [a] Nichols G. (2019). *CES 2019: Microsoft Azure Digital Twins is like SimCity (but the stakes are real)*. ZDNet.  
<https://www.zdnet.com/article/ces-2019-microsoft-azure-digital-twins-is-like-simcity-but-the-stakes-are-real/> (consultato il 24/03/21).
- [b] Van Hoof B. (2019). *Announcing Azure Digital Twins: Create digital replicas of spaces and infrastructure using cloud, AI and IoT*.  
<https://azure.microsoft.com/ru-ru/blog/announcing-azure-digital-twins-create->

digital-replicas-of-spaces-and-infrastructure-using-cloud-ai-and-iot/  
(consultato il 24/03/21).

- [c] Microsoft (2021). *Digital Twins – Modeling and Simulations* | Microsoft Azure.  
<https://azure.microsoft.com/en-us/services/digital-twins/> (consultato il 24/03/21).
- [d] Vectorform (2019). *Demonstrating real-time impact of neighborhood improvements through a new lens*.  
<https://www.vectorform.com/work/augmenting-smart-city/> (consultato il 24/03/21).
- [e] Itron (2019). *Itron Idea Labs to Demonstrate Mixed Reality for Industrial IoT at CES*.  
<https://www.itron.com/cn/company/newsroom/2019/01/02/press-relitron-idea-labs-to-demonstrate-mixed-reality-for-industrial-iot-at-cesease>  
(consultato il 24/03/21).

## DT.9. Antwerp.

### Overview.

<b>Progetto.</b>	n.d. (nome non ufficiale: Antwerp Digital Twin; il <i>digital twin</i> fa parte del progetto <i>City of Things</i> di IMEC).
<b>Claim.</b>	"A digital control room at [...] disposal to plan measures to improve the quality of life and mobility of [the] city" Jan Adriaenssens, IMEC.
<b>Parole chiave.</b>	IoT, <i>policy making</i> .
<b>Clienti.</b>	IMEC, TNO.
<b>Sviluppatori.</b>	IMEC, TNO (monitoraggio della qualità dell'area e del rumore), Tom Tom (modello 3D), Governo fiammingo (modello del traffico di base), PTV (modellazione del traffico), Microsoft ( <i>software provider</i> ).
<b>Framework.</b>	3D GIS.
<b>Stato.</b>	Un prototipo è stato presentato nel settembre 2018; nessun uso operativo documentato è stato reperito. Lo strumento di simulazione Urban Strategy è stato sviluppato attraverso diversi casi applicativi a partire dal 2007.

### Specifiche tecniche.

<b>Estensione.</b>	n.d. (municipalità di Antwerp: 205 km <sup>2</sup> ).
<b>Input.</b>	Modello 3D, dati da sensori, dati demografici, <i>network</i> stradale.
<b>Output.</b>	Mappe 2D (sulla base del modello 3D).
<b>Risoluzione.</b>	LoD1-2 (livello di dettaglio stimato).
<b>Software.</b>	Azure Digital Twin (Microsoft), Urban Strategy (TNO).
<b>Standard.</b>	Il software Azure Digital Twin non richiede standard specifici (è compatibile con dati BIM e GIS).

### Applicazioni.

- Valutazioni ambientali e simulazioni.** Il modello mostra dati in tempo reale sulla qualità dell'aria e l'inquinamento acustico, grazie a un denso *network* di sensori. Gli utenti del modello possono visualizzare sia dati in tempo reale che dati simulati [d].
- Raccolta di dati da sensori.** Azure Digital Twins può ricevere input da dispositivi di IoT, come sensori della qualità dell'aria e sensori di rumore [d].
- Monitoraggio del traffico e simulazioni.** Il traffico è monitorato in tempo reale attraverso contatori automatici (capaci di distinguere auto, van e camion) collocati sulle strade principali dal Governo fiammingo. L'effetto sul traffico dell'alterazione della rete stradale può essere simulato [d].
- Progettazione urbana e pianificazione.** Gli strumenti di visualizzazione supportano la pianificazione e le decisioni di *policy* con analisi trasversali a diversi domini. Funzioni interattive permettono di modificare il modello e produrre studi predittivi e valutazioni di impatto [d].
- Grafo delle componenti.** La piattaforma Azure Digital Twins permette di visualizzare il grafo delle componenti del modello, con opzioni di filtro e *layout*. Il linguaggio di modellazione permette di definire classi di elementi e connessioni personalizzate.

### Fonti.

- [a] Degans H., Lörtzer M. (2018). *Imec and TNO launch Digital Twin of the city of Antwerp. Digital 3D replica of the city and urban liveability*. Press release. <https://www.imec-int.com/en/articles/imec-and-tno-launch-digital-twin-of-the-city-of-antwerp> (consultato il 24/03/21).
- [b] Lefever S. (2019). *Why a smart city can be so much more than just the sum of its smart parts*. <https://www.imec-int.com/en/imec-magazine/imec-magazine-december-2019/why-a-smart-city-can-be-so-much-more-than-just-the-sum-of-its-smart-parts> (consultato il 24/03/21).
- [c] Imec (n.d.). *Open Digital Twin framework: facilitates cross-domain insights for cities*. <https://www.imeccityofthings.be/en/projecten/digital-twin> (consultato il 24/03/21).
- [d] Microsoftbelux (2019). *Imec builds Digital Twin of the city of Antwerp*. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=hkPUOZhonPc> (consultato il 24/03/21).

- [e] Klein T. (2020). *Le Luxembourg va créer son «jumeau numérique»*. Luxemburger Wort, 06 gennaio, 2020 (online).  
<https://www.wort.lu/fr/luxembourg/le-luxembourg-va-creer-son-jumeau-numerique-5e12fc0dda2cc1784e35368e> (consultato il 24/03/21).
- [f] TNO (2021). *TNO - innovation for life | TNO*.  
<https://www.tno.nl> (consultato il 24/03/21).
- [g] Microsoft (2021). *Digital Twins – Modeling and Simulations | Microsoft Azure*.  
<https://azure.microsoft.com/en-us/services/digital-twins/> (consultato il 24/03/21).



# Appendice A2.

## **Casi d'uso.**

### **Applicazioni.**

Le applicazioni documentate riguardano la pianificazione di nuove costruzioni e di interventi di riqualificazione energetica, la gestione automatizzata degli impianti per l'ottimizzazione dei consumi, la raccolta di dati con finalità divulgative e di ricerca. Queste applicazioni possono basarsi su diversi insiemi di informazioni, che variano per dimensione, granularità e attendibilità (possono ad esempio riguardare solo i consumi per il riscaldamento o più impianti, ed essere basati su dati aggregati o su misurazioni tramite sensori).

Il caso di Rennes [DT.7] integra le sole funzioni di stima, calcolate alla scala dell'edificio, sulla base di dati demografici, energetici e territoriali aggregati alla scala territoriale del quartiere. Il semplice prototipo realizzato per Los Angeles [DT.8] adotta gli isolati come unità, ma integra capacità previsionali che sfruttano il dettaglio geometrico del modello (la funzione documentata permette di valutare gli effetti dell'alterazione del colore dei tetti). Per il calcolo dei consumi correnti, il prototipo è progettato per raccogliere dati da sensori in tempo reale. Anche il caso di Toronto (fermo al master plan) [DT.6] ha previsto sensori per il monitoraggio. L'applicazione è indirizzata ad ottimizzare i consumi attraverso l'automazione del funzionamento degli impianti. Il modello di Kalasatama (Helsinki) utilizza un *software* di valutazione energetica per stimare i consumi di ogni edificio e in rapporto al singolo utente (riscaldamento ed elettricità) e mostra i risultati in uno strumento di consultazione in rete [DT.2]. Lo stesso sistema può essere usato a fini previsionale.

### **Definizione (operazioni e dati).**

Un set minimo di informazioni per stimare il consumo energetico alla scala urbana comprende: (1) il tipo di edificio secondo una classificazione morfologica, (2) il periodo di costruzione, (3) la superficie dei locali, (4) il numero di occupanti, (5) la destinazione d'uso degli edifici (*cf.* Mutani *et al.*, 2016; Nouvel *et al.*, 2015). Il tipo e il periodo di costruzione permettono di stimare i parametri fisici dell'oggetto e determinano i possibili interventi di *retrofitting* (Nouvel *et al.*, 2015) mentre i dati su superficie e utenti influenzano la domanda di energia. Le stime possono essere rese più precise con l'aggiunta di altri dati ad un livello omogeneo di granularità, come caratteristiche degli impianti, o abitudini delle utenze. I progetti di dimensioni più contenute propongono anche una raccolta capillare di dati da sensori [DT.6, DT.8]. Per i *digital twin* capaci di integrare modelli BIM, come la piattaforma impiegata nei progetti per Rennes e Singapore,

è teoricamente possibile l'uso di informazioni di dettaglio architettonico, ma la stima su un più ampio brano di città deve comunque confrontarsi con la disponibilità effettiva dei dati. Anche in questi casi sono quindi sufficienti dei dati spaziali di minor dettaglio — come suggerito dal modello di Rennes, le cui stime sono basate su dati alla scala del quartiere [DT.7].

### **Interazioni.**

*CU.2. Calcolo dell'irraggiamento solare.* L'esposizione delle superfici esterne può essere rilevante per i calcoli — si veda il caso di Los Angeles, in cui è considerata la risposta all'irraggiamento dei tetti [DT.8].

*CU.3. Classificazione spaziale.* La classificazione su base tipologica degli edifici possono essere inferite dalla geometria.

*CU.9. Integrazione di dati spazializzati.* La piattaforma 3DEXPERIENCE di Dassault, usata ad esempio per i modelli di Singapore e Rennes, permette di elaborare le informazioni registrate in oggetti BIM integrati al modello urbano. Anche se un simile uso dei modelli non è stato individuato nei casi studiati, la valutazione energetica fa parte delle funzioni affermate della modellazione BIM (Volk *et al.*, 2014). È quindi possibile ipotizzare che, con un sufficienti campioni a disposizione, i dati di dettaglio architettonico possano contribuire alla calibrazione delle stime a una minore risoluzione.



## CU.2. Calcolo dell'irraggiamento solare.

### Applicazioni.

Dai *digital twin* studiati, l'uso del calcolo dell'irraggiamento solare, se si escludono le applicazioni legate alla visualizzazione delle ombre, non risulta sempre documentato. È però possibile dedurne l'impiego e alcuni aspetti in funzioni individuate in diversi casi.

La città di Helsinki, ha prodotto un *dataset* di stime sull'irraggiamento solare e sulla produzione di energia solare, non solo per i tetti, ma per ogni superficie dell'edificio (Ruohomäki *et al.*, 2018). L'analisi del potenziale solare è prevista dal *digital twin* di Zurigo (che però non presenta la funzione nelle versioni attualmente pubblicate in rete) (Schrotter e Hürzeler, 2020). La città virtuale è caratterizzata da superfici dei tetti modellate e distinte semanticamente dal resto degli edifici [DT.1]. Le immagini del progetto embrionale per Amaravati non suggeriscono l'uso del calcolo del potenziale solare, mentre è dichiarato l'uso del calcolo delle ombre per la stima e la simulazione del microclima urbano. Il prototipo realizzato per Los Angeles dimostra l'intento di usare il modello per calcolare e prevedere il consumo energetico anche in base a caratteristiche dei tetti quali il colore [v. CU.1]; su questa base, è possibile ipotizzare che il calcolo dell'irraggiamento sia usato nelle stime.

Altre applicazioni non esplicitate della documentazione dei modelli di città selezionati possono includere analisi delle ombre più articolate della proiezione di ombre come dettaglio della visualizzazione. Il modello di Kalasatama (Helsinki) usa il risultato dei rilievi digitali (il DSM, composto da *mesh* e *texture*) per gestire in maniera dinamica le ombre del modello *online*, e ha inoltre supportato la produzione di grafici di analisi delle ombre giornaliere [DT.2]. Un'altra applicazione consentita dai modelli è il calcolo del *solar envelope*<sup>103</sup> per fini prevalentemente legati al progetto dei volumi dell'edificato (Knowles, 2003).

### Definizione (operazioni e dati).

Secondo Biljecki (2017), i parametri fondamentali per il calcolo del potenziale solare sono area della superficie, inclinazione, azimuth e posizione geografica, e possono quindi essere riassunti nella geometria esterna dell'edificio e nei dati necessari a inserire il modello in un sistema di riferimento geografico.

---

<sup>103</sup> Il concetto di *solar envelope* indica il più grande volume capace di non proiettare ombre all'infuori di un perimetro dato in determinate ore del giorno (Knowles, 2003).

L'uso del modello per il calcolo dell'irraggiamento può inoltre essere definito attraverso le operazioni che elaborano questi dati, che comprendono la misurazione delle superfici (ad esempio, per assegnare un valore complessivo all'irraggiamento di un tetto), la proiezione di ombre e il calcolo dell'orientamento (inteso come il confronto tra l'orientamento di una superficie e la direzione dei raggi solari considerati).

Ross (2010) separa lo studio delle ombre e il calcolo del potenziale solare in due diverse categorie di analisi basate sul modello urbano, poiché il primo può basarsi su soli dati geometrici, mentre le applicazioni del calcolo del potenziale solare possono impiegare dati semantici (come il materiale della superficie) per ottenere ad esempio una valutazione energetica più accurata. Tuttavia, in questo caso, l'uso si distingue in primo luogo dall'operazione puramente geometrica della proiezione delle ombre, sottolineando il ruolo dell'informazione geografica e dello studio del rapporto con il sole nel tempo. Inoltre, i dati semantici che possono integrare l'analisi del potenziale solare sono qui considerati un carattere proprio non di questo uso del modello, bensì della valutazione energetica [CU.1], che dal calcolo dell'irraggiamento solare può acquisire dati.

### **Interazioni.**

*CU.1. Valutazione energetica.* Il calcolo dell'irraggiamento può contribuire alla valutazione energetica fornendo dati sullo scambio di calore di un ambiente con l'esterno, o con una stima della produzione di energia solare.

*CU.4. Visualizzazione.* Le applicazioni che prevedono la generazione di ombre hanno principale impiego nella visualizzazione del modello.

*CU.5. Simulazioni fisiche.* Il caso di Amaravati [DT.4] prevede l'applicazione del calcolo delle ombre a un modello per il calcolo del microclima urbano.

*CU.7. Progettazione.* Le analisi delle ombre e del potenziale solare, anche attraverso la visualizzazione, possono contribuire direttamente alla progettazione e alla pianificazione.

### CU.3. Classificazione della forma.

#### **Applicazioni.**

Nei casi studiati, le principali applicazioni della classificazione della forma sono legate alla generazione e all'aggiornamento automatico e semi-automatico dei modelli, mentre mancano applicazioni in cui l'organizzazione in classi delle parti del modello in classi sia il principale output.

Il caso di Kalasatama (Helsinki) ha riguardato la produzione di un modello coerente con lo standard CityGML (LoD2) a partire da tre modelli esistenti: il modello del terreno (DTM), il rilievo aereo digitale (DSM) e una mappa delle tracce degli edifici. Le tracce sono state collocate sul terreno alla quota corretta, estruse e quindi chiuse con tetti generati semi-automaticamente [DT.2].

Per il modello di Singapore, l'ETH Zurich ha studiato diversi sistemi di modellazione semi-automatica (fino al LoD3) basati su immagini aeree e nuvole di punti (da *laser scanner* aereo e mobile) (Gruen *et al.*, 2019). I sistemi includono l'aggiunta di dettagli a geometrie esistenti attraverso operazioni di modellazione procedurale.

#### **Definizione (operazioni e dati).**

Secondo Henn *et al.* (2012) i caratteri necessari a una classificazione tipologia degli edifici possono includere informazioni semantiche (*e.g.* la funzione), il rapporto con elementi vicini, le tracce a terra degli edifici, le altezze. Alcune informazioni topologiche, come ad esempio l'adiacenza di edifici o altri elementi, possono essere significative per la classificazione — favorendo ad esempio la distinzione di case isolate e case a schiera (Henn *et al.*, 2012). Le operazioni necessarie alla classificazione possono quindi essere sintetizzate nella definizione di tipi o categorie, in operazioni di confronto, nella modellazione procedurale per l'aggiunta di dettagli e informazioni, e nelle analisi topologiche.

L'avanzamento delle tecniche di *deep learning* applicate a geometrie tridimensionali può però rendere più complessi gli input delle operazioni di riconoscimento, e portare a considerare nel suo insieme la forma degli elementi. Attualmente, la generazione automatica di superfici da dati di rilievo si basa sulla segmentazione di nuvole di punti (Henn *et al.*, 2013; Pirotti *et al.*, 2019) — da cui tracce degli edifici, e forma e altezza dei tetti possono essere estratte — o sulla produzione delle tracce degli edifici a partire da ortofoto (Gruen *et al.*, 2019).

#### **Interazioni.**

*CU.4. Visualizzazione.* Le principali applicazioni dei modelli procedurali riguardano la visualizzazione di un ambiente urbano digitale che appaia realistico (Müller *et al.*, 2006).

*CU.9. Integrazione di dati spazializzati.* Dagli studi in letteratura (Henn *et al.*, 2012) risulta possibile che applicazioni della classificazione automatica possano integrare applicazioni di analisi spaziale — *e.g.*, la valutazione economica dei beni immobiliari basata sul contesto.

## CU.4. Visualizzazione.

### Applicazioni.

Diversi *digital twin* sfruttano la possibilità di realizzare visualizzazioni dinamiche e interattive dei modelli geometrici e dell'informazione associata attraverso piattaforme in rete. Strumenti come Cesium<sup>104</sup> o CityPlanner<sup>105</sup> permettono di rendere accessibili *online* modelli e database geo-spaziali. I servizi realizzati permettono di osservare scenari di trasformazione della città (con l'inserimento di piani e progetti nel modello dello stato di fatto), di ottenere informazioni sugli edifici, generare grafici, e visualizzare la città a diversi livelli di dettaglio (viste bidimensionali, dettagli dei tetti, *mesh* e *texture* da rilievo digitale) [DT.1, DT.2]. Altri *digital twin* non ancora pubblicamente accessibili prevedono di mettere a disposizione strumenti di ricerca e analisi basati sulle informazioni semantiche del modello, modelli e dati alla scala del BIM e servizi al cittadino (ad esempio la gestione di pratiche edilizie) [DT.3, DT.4].

Altre interfacce di visualizzazione sono indirizzate alle amministrazioni o ai gestori di servizi, a fini di monitoraggio e supporto alle decisioni. Queste prevedono la restituzione in tempo reale di dati da sensori e risultati di simulazioni (per traffico, rumore, inquinamento e altri livelli tematici), anche mostrando più livelli di dati in contemporanea [DT.5]. I modelli di Toronto e Los Angeles hanno presentato, nel corso di eventi e *showcase*, delle funzioni che permettono di visualizzare scenari di trasformazione e produrre alternative su base parametrica [DT.6] o integrare simulazioni per valutare gli impatti [DT.8]. Alcuni strumenti di visualizzazione supportano modalità di navigazione in realtà virtuale [DT.1, DT.8].

### Definizione (operazioni e dati).

Nella grande varietà di output prodotti e di funzioni abilitate dalla visualizzazione, l'individuazione delle operazioni e dei dati che permettono di definire il caso d'uso è condotta cercando di isolare il set minimo di azioni necessario a portare i dati in immagine.

Da questo punto di vista, le operazioni spaziali necessarie sono ricondotte alla navigazione della componente geometrica del modello e al *mapping* di dati, inteso in senso matematico come una funzione che permette di trasportare un insieme di dati in un sistema di coordinate che può essere geografico (e.g., la visualizzazione nel modello di immagini satellitari geo-riferite), tridimensionale (e.g., il *rendering* di *mesh*) e anche relativo a specifiche superfici (un'applicazione del modello di Helsinki permette ad esempio di mostrare la mappa di dispersione del calore per i tetti dei singoli edifici [DT.2]).

Le molte informazioni che i *digital twin* permettono di visualizzare — con i diversi formati che assumono — possono essere sintetizzate nei tipi di dati in cui devono essere tradotte (attraverso operazioni che non sono considerate necessariamente parte della visualizzazione) prima della restituzione grafica. Questi sono individuati in: *mesh*,

---

<sup>104</sup> <https://cesium.com/> (consultato il 22/03/21). Per una applicazione, si veda ad esempio il modello di Zurigo [DT.1].

<sup>105</sup> <https://cityplanneronline.com/> (consultato il 22/03/21). Per una applicazione, si veda ad esempio il caso di Helsinki [DT.2].

necessarie alla visualizzazione delle geometrie tridimensionali; attributi degli oggetti, che comprendono tutti i dati in formato schematico che possono essere associati a un elemento del modello, anche puntiforme come la posizione di un sensore; *texture*, che comprendono sia le immagini relative alla pura resa visiva del modello (materiali, ombre e altre mappe per il *rendering*), sia la visualizzazione di mappe analitiche (e.g., mappe da simulazioni fisiche).

### **Interazioni.**

La visualizzazione è coinvolta nella maggior parte delle applicazioni del modello digitale, spesso già nelle interfacce che permettono di eseguire le funzioni, prima che per l'uso dei risultati. La lista che segue, più che per altri casi, deve essere considerata parziale, e ripropone solo le interazioni più evidenti della visualizzazione con altri usi del modello.

*CU.1. Valutazione energetica.* I consumi energetici (ma anche la produzione di energia, ad esempio da pannelli fotovoltaici) possono essere visualizzati a fini di monitoraggio da parte dell'amministrazione o per informare gli utenti. Si trovano esempi nei casi di Helsinki ed Amsterdam [DT.2, DT.5].

*CU.2. Calcolo dell'irraggiamento solare.* La visualizzazione delle ombre è prevista per la maggior parte dei *digital twin*.

*CU.3. Classificazione della forma.* Alcuni modelli, come quelli di Singapore e Toronto [DT.3, DT.6], prevedono la generazione procedurale di dettagli al fine di una resa più realistica.

*CU.5. Simulazioni fisiche.* Le simulazioni fisiche si prestano alla realizzazione di mappe, come nel caso di Antwerp, che prevede il monitoraggio e la simulazione di qualità dell'aria e rumore [DT.9].

*CU.7. Progettazione.* La progettazione sfrutta la capacità del modello digitale di prefigurare scenari di trasformazione e comparare vari strati informativi. L'interazione di progettazione e strumenti di visualizzazione (anche *online*, per la condivisione di diversi contributi) è sottolineata in molti dei casi studiati, tra cui Helsinki, Singapore, Rennes [DT.2, DT.3, DT.7].

*CU.9. Integrazione di dati spazializzati.* Poiché concetto di *digital twin* è legato alla trasmissione rapida di dati, molti casi integrano strumenti di visualizzazione in tempo reale, nello spazio del modello, dei dati provenienti da sensori.

## CU.5. Simulazioni fisiche.

### Applicazioni.

Il tipo di applicazioni delle simulazioni fisiche più spesso rilevato nei *digital twin* riguarda la valutazione e la simulazione dell'impatto delle componenti del modello su diverse condizioni ambientali. Nei casi in cui i campi di applicazione sono specificati, il modello è impiegato per valutare la propagazione di rumori, di onde radio, o dell'inquinamento atmosferico, nonché per simulare venti [DT.1, DT.2, DT.3, DT.7, DT.9]. Le simulazioni possono stimare lo stato corrente, sulla base di dati da sensori, o rappresentare scenari previsionali, con condizioni alterate (ad esempio con l'integrazione di elementi di progetto nel modello: nuovi edifici, nuovi materiali, variazioni nelle sorgenti di rumore, di onde, di inquinamento...). Nel caso di Amsterdam le valutazioni ambientali sono integrate a un'applicazione indirizzata al progetto e alla pianificazione, che prevede anche simulazioni di altro genere (ad esempio, stime dell'alterazione dei valori immobiliari) [DT.5].

Il modello di Amaravati [DT.4] (e, pur con pochi dettagli divulgati, il modello di Los Angeles [DT.8]) prevede la simulazione del microclima urbano, con la possibilità di realizzare una mappa delle temperature. Il modello di Singapore applica invece algoritmi di simulazione fisica all'analisi della dispersione di folle in caso di emergenza permettendo anche di valutare l'efficacia delle procedure di evacuazione [DT.3]. Le diverse simulazioni possono avere output bidimensionali (mappe orizzontali o grafici mappati su tutte le superfici del modello) [v. sezione 1.2, figura 12] o output tridimensionali [v. sezione 4.2, figura 25, iv].

### Definizione (operazioni e dati).

L'esecuzione di simulazioni fisiche alla scala urbana richiede che i volumi degli edifici siano noti. Altri dati necessari provengono dai sensori, per quei modelli che prevedono aggiornamenti automatici allo stato di fatto. Le *mesh* del terreno possono integrare i vincoli delle simulazioni. In particolare, un DTM permetterebbe di aggiungere agli studi eseguibili anche simulazioni di inondazione o di comportamento delle acque meteoriche. Questo tipo di analisi è già presente nella letteratura sui modelli digitali di città (Biljecki *et al.*, 2015), sebbene solo il prototipo realizzato a Toronto sia associato a un interesse nella gestione dell'acqua piovana [DT.6]. L'accuratezza delle stime può essere ottimizzata sulla base di informazioni sugli oggetti, come il materiale delle superfici (Biljecki *et al.*, 2015).

I dati per le simulazioni possono quindi essere riassunti in: dati da sensori, volumi degli edifici, *mesh* del terreno e attributi degli oggetti. Le operazioni spaziali che elaborano questi dati sono individuate nei processi stessi di calcolo delle specifiche simulazioni, e nelle operazioni di *mapping* che riportano i risultati nello spazio del modello (per la visualizzazione, per la definizione di nuovi attributi degli oggetti, o per calcoli ulteriori).

### **Interazioni.**

*CU.4. Visualizzazione.* La visualizzazione dei risultati è prevista in tutti i casi studiati, e può ad esempio essere connessa a un *city dashboard* [DT.5], alla pubblicazione su portali in rete [DT.2], o strumenti interattivi di progettazione [DT.9].

*CU.6. Routing.* Per il caso di Singapore, che prevede la simulazione della dispersione di folle, si può ipotizzare un'intersezione con gli studi delle procedure di evacuazione basati sul *routing* [DT.3].

*CU.7. Progettazione.* Nella maggior parte dei casi, si evidenzia come il risultato delle simulazioni possa supportare la progettazione nella comprensione dello stato di fatto o nella valutazione degli impatti delle trasformazioni.



## CU.6. Routing.

### Applicazioni.

Le applicazioni del *routing* legate al traffico sono le più frequenti nei *digital twin* studiati. Il modello di Singapore può essere impiegato per trovare i percorsi ottimali per diverse categorie di utenti, compresi disabili [DT.3]. Il trasporto è un tema portante del *city dashboard* Amsterdam. Dati da più fonti sui diversi sistemi di trasporto urbani (come mobilità ciclabile e trasporto urbano) sono integrati, mostrando i risultati delle stime sul reticolo stradale [DT.5]. Il modello di Toronto è connesso ad una piattaforma software apposta per lo studio del traffico [DT.6]. La piattaforma prevede la raccolta di dati (anonimi) da un campione di dispositivi mobili e l'esecuzione di simulazioni, sulla base dei dati raccolti, usando una popolazione sintetica di cui si considerano le attività e i percorsi. Il sistema di monitoraggio e simulazione usato ad Antwerp è basato su contatori automatici (*counting systems*) installati dagli enti pubblici presso le vie principali [DT.9]. Altre applicazioni meno documentate riguardano i modelli di Amaravati, Rennes e Lincoln Heights (Los Angeles) [DT.8].

Il modello di Singapore prevede inoltre applicazioni che riguardano la simulazione e l'analisi della dispersione di folle e delle procedure di emergenza [DT.3]. Sulla base della letteratura scientifica (Gröger e Plümer, 2012; Chen *et al.*, 2014; Tashakkori, *et al.*, 2015), e in mancanza di dettagli sul caso di Singapore, si può ipotizzare per questo caso un ruolo delle funzioni basate sul *routing*, basate su un *network* di percorsi *indoor*.

### Definizione (operazioni e dati).

Il *routing*, nelle principali applicazioni rilevate, richiede alcuni dati aggiornati con frequenza. Questi possono includere la posizione degli utenti per i quali si calcola un percorso ottimale. In questo caso, la posizione può essere acquisita come dati GPS da un dispositivo mobile personale. Altre forme di rilevamento della posizione degli utenti includono l'uso di contatori automatici (*e.g.*, rilevatori di veicoli a spire) e possono produrre dati che esprimano attributi degli elementi del *network* stradale, come il livello di congestione o la velocità media di un tratto di strada.

I modelli tridimensionali possono apportare altre informazioni utili al *routing*, come le quote dei percorsi derivate dalla geometria del terreno. I dati geometrici per la generazione di reti di percorsi possono inoltre contribuire alla definizione del *network* stesso (soprattutto in assenza di strade altrimenti definite, casi che si può incontrare con ambienti *indoor*). I sistemi adottati nei *digital twin*, per i quali

informazioni di dettaglio non sono state reperite, sono prevedibilmente basati sulle caratteristiche semantiche del modello (come la gerarchia che mette in relazione gli spazi ed elementi), come concesso da diverse funzioni integrate alle piattaforme di sviluppo (Tashakkori, *et al.*, 2015). Tuttavia, è possibile individuare un'analogia di queste operazioni di costruzione automatica del *network* con le tecniche delle Space Syntax, che permettono di tradurre lo spazio urbano inteso come sistema di pieni e di vuoti in un grafo che descriva le possibilità offerte alla mobilità pedonale (Hillier, 2007 [1996]).

Le operazioni spaziali che caratterizzano il *routing* sono includono le analisi topologiche, che permettono l'individuazioni di percorsi minimi o percorsi ottimali su grafi pesati (ovvero sulla base di attributi degli elementi, come i tempi di percorrenza medi). Diverse operazioni di simulazione consentono di effettuare stime a partire dal campione di valori rilevati. Il caso di Singapore [DT.3] permette di ipotizzare che siano impiegate anche simulazioni ad agenti per lo studio della dispersione di folle e per il *routing* attraverso i percorsi di fuga, nell'ambito della simulazione di scenari d'emergenza. Possono infine essere necessarie operazioni di aggregazione di dati per trasformare i dati raccolti dai sensori in attributi degli elementi.

### **Interazioni.**

*CU.4. Visualizzazione.* Le funzioni di navigazione richiedono la visualizzazione, da parte dell'utente, del percorso risultante dalle funzioni di *routing*, e di altre informazioni utili, che possono comprendere la rappresentazione geometrica del modello. Le funzione di monitoraggio e simulazione richiedono la visualizzazione dei risultati su mappe o come *layer* sovrapposti ad altri strati informativi sulla città.

## CU.7. Progettazione.

### **Applicazioni.**

Nei casi studiati, si individuano molte applicazioni del modello che riguardano la progettazione e la pianificazione, riconducibili a due categorie principali, a volte coesistenti in un singolo caso: (a) applicazioni di simulazioni per la valutazione degli impatti; (b) applicazioni per lo sviluppo di progetti alla scala architettonica. In entrambi i casi, l'obiettivo principale è il confronto tra alternative, che rende la visualizzazione una componente fondamentale dell'applicazione.

Nel primo caso, il modello deve permettere l'inserimento di elementi di progetto (come gli edifici, ma anche nuovi *network* stradali, ad esempio) e la simulazione di condizioni ambientali quali il rumore, l'illuminazione, il microclima urbano [DT.3, DT.8, DT.9]. Inoltre, è prevista la visualizzazione comparata dei risultati, come strumento di supporto in processi decisionali complessi.

Nel secondo caso, è prevista l'integrazione al modello urbano di progetti di dettaglio architettonico, a volte compatibili con gli standard del BIM [DT.2]. Questi permettono la valutazione dell'inserimento dei nuovi elementi nel contesto, anche attraverso simulazioni con aspetti realistici (quali ombre, dettagli architettonici, materiali). Inoltre, le proprietà dei modelli informativi permettono quantificazioni, calcoli e comparazioni con aspetti normativi [DT.1, DT.2, DT.7].

Un uso particolare del modello nell'ambito della progettazione è previsto dal *digital twin* di Amaravati, che include l'uso del BIM per il monitoraggio e la gestione del progresso nei cantieri.

Tutte le applicazioni sottolineano i vantaggi del *digital twin* per la collaborazione e l'individuazione di soluzioni condivise anche attraverso la comunicazione con la cittadinanza.

### **Definizione (operazioni e dati).**

Data la grande varietà di applicazioni, il tipo di informazioni e il livello di dettaglio che possono caratterizzare i modelli impiegati per la progettazione risultano piuttosto variabili. Le operazioni di comparazione sono una prima famiglia che si può ritenere propria dell'uso del modello per la progettazione: il confronto tra alternative e la valutazione congiunta di diversi strati informativi sono richiesti sia nella considerazione degli aspetti morfologici del progetto, sia

nella valutazione delle mappe risultanti dalle simulazioni. L'ampia famiglia delle operazioni di modellazione (intese come le operazioni di costruzione degli elementi del progetto e l'eventuale valorizzazione dei parametri connessi) è inoltre necessaria alla generazione delle alternative progettuali.

Dunque, i dati fondamentali possono essere considerati: la forma degli elementi, rappresentati sia come volumi che come superfici, a seconda dei dettagli e degli aspetti visuali definiti dal progettista; gli attributi degli oggetti, anch'essi parte del progetto; le *mesh* del terreno o del contesto edificato, per permettere l'inserimento del progetto qualora il modello CAD manchi o sia poco dettagliato.

Questa definizione dell'uso è basata sull'esclusione degli aspetti legati ad altre funzioni spesso usate in sinergia — visualizzazione e simulazioni in primo luogo.

### **Interazioni.**

*CU.2. Calcolo dell'irraggiamento solare.* L'analisi delle ombre è un aspetto spesso considerato nella valutazione degli impatti delle soluzioni progettuali.

*CU.3. Classificazione della forma.* Si può ipotizzare un ruolo nella progettazione della modellazione procedurale (qui inclusa nell'uso del modello per la classificazione della forma), inclusa nello *showcase* di Quayside (Toronto) [DT.6].

*CU.4. Visualizzazione.* La visualizzazione è impiegata nella condivisione degli scenari di progetto tra diversi specialisti e con i cittadini.

*CU.5. Simulazioni fisiche.* Le simulazioni basate su scenari di trasformazione sono tra i principali strati informativi impiegati nella progettazione [DT.3, DT.8, DT.9].

*CU.9. Integrazione di dati spazializzati.* L'integrazione di documenti in formati compatibili con il BIM è prevista da diverse piattaforme su cui si basano i *digital twin*, anche per usarne i dati in simulazioni e visualizzazioni utili al progetto [DT.1, DT.2, DT.7].

## CU.8. Gestione di reti infrastrutturali.

### **Applicazioni.**

Sin dal 2013 la città di Zurigo raccoglie dati sulle reti di sottoservizi da operatori delle reti idrica, della rete elettrica, dei trasporti pubblici e della gestione dei rifiuti (Schrotter e Hürzeler, 2020). Attualmente il sistema è in due dimensioni ed è aggiornato ogni settimana sulla base di un sottoinsieme delle informazioni raccolte da ciascun operatore. Per i prossimi sviluppi, è previsto un aggiornamento a una rappresentazione tridimensionale, basata su standard BIM.

Anche il *master plan* del modello digitale di Toronto prevede un modello tridimensionale e dettagliato dei sottoservizi, con finalità di gestione, manutenzione e progettazione [DT.6].

Il modello di Amaravati [DT.4], grazie al software Cityzenith, che permette l'importazione di file BIM nel modello alla scala urbana, prevede l'accesso a informazioni sui sottoservizi e sugli impianti degli edifici.

Anche nella documentazione sul modello di Rennes si fa riferimento alla rappresentazione dei sottoservizi, come parte degli strumenti di progettazione integrati alla piattaforma 3DEXPERIENCity [DT.7].

### **Definizione (operazioni e dati).**

I dati rilevanti per la rappresentazione di reti infrastrutturali risultano la descrizione della forma fisica degli elementi (come parte della modellazione informativa integrata nei casi studiati), gli attributi degli stessi (che includono i caratteri gerarchici/topologici necessari alla gestione del sistema nel suo complesso) e i dati da sensori per le funzioni di aggiornamento automatico.

Le operazioni che definiscono l'uso includono la modellazione del *network* e dell'informazione connessa. Inoltre, il tipo di *asset* suggerisce l'utilità di operazioni di analisi topologica.

### **Interazioni.**

CU.4. *Visualizzazione.* Le applicazioni di gestione legate alla rappresentazione delle reti sono supportate da interfacce di visualizzazione del modello e lettura dei dati associati agli elementi.

CU.7. *Progettazione.* La documentazione su alcuni dei modelli studiati esplicita l'utilità della rappresentazione delle reti infrastrutturali nella

progettazione dello sviluppo urbano o di interventi di manutenzione della rete  
[DT.6, DT.7].

### **Applicazioni.**

Le applicazioni più comuni dell'integrazione di dati spaziali riguardano la raccolta di diversi database spaziali e la raccolta di dati da sensori. Un esempio ben documentato tra i casi applicativi studiati è il modello di Antwerp [DT.9], che permette di visualizzare all'interno del modello tridimensionale la posizione dei sensori e consultare i dati relativi (e.g., quelli sul traffico rilevato da un singolo contatore automatico). Il *city dashboard* di Amsterdam [DT.5] descrive anche la raccolta di dati spazializzati da dispositivi mobili privati, per analisi sull'uso dei *social network* e la generazione di mappe di affollamento.

Il modello di Amaravati [DT.4] rappresenta un caso di stretta interazione del modello urbano con dati BIM, poiché offre la possibilità di importare vari tipi di documenti e database geo-spaziali (anche attraverso semplici funzioni di *drag and drop*).

Gli strumenti applicati a Zurigo e Helsinki [DT.1, DT.2] sfruttano invece la possibilità di convogliare diversi database in un unico modello per realizzare dei portali *web* di *open data* geo-spaziali<sup>106</sup>.

### **Definizione (operazioni e dati).**

I dati che caratterizzano l'uso sono quelli relativi ai sensori (la cui componente spaziale è prevalentemente in forma di punti nello spazio che rappresentano i singoli sensori) e i dati dei modelli informativi geo-spaziali importati (BIM e GIS). Sono inoltre necessari dati geo-spaziali per inserire in un sistema di riferimento comune i diversi *dataset*.

Le operazioni spaziali necessarie alla collezione e alla valorizzazione di questi dati come strati in interazione possono essere individuate in: operazioni di *mapping*, con cui si intendono anche le operazioni di conversione dei sistemi di riferimento necessarie a mettere insieme dati di origine diversa; operazioni di aggregazioni di dati, che includono il *data linking*, ovvero la raccolta di informazioni da diverse fonti in elementi coerenti e l'eliminazione delle ridondanze; operazioni di ricerca (*query*) basate sui caratteri spaziali, per

---

<sup>106</sup> Ulteriori casi applicativi coinvolgono dati da sensori e da database BIM o GIS. Alcuni di questi sono stati citati nella descrizione di altri usi, altri non sono documentati in maniera esaustiva nelle fonti reperite. Tali casi sono considerati analoghi a quelli già richiamati nella sezione e pertanto sono stati omessi. Inoltre, l'integrazione di dati geo-spaziali (come dati da sensori, e nuvole di punti), che riguarda la maggior parte degli usi individuati, è stata a sua volta omessa e non è stata segnalata nella descrizione degli altri usi, se non con un riferimento ai dati coinvolti.

consentire la navigazione dei dati raccolti — funzioni di ricerca e filtro degli elementi sono descritte per i modelli di Singapore e Amaravati [DT.3, DT.4].

### **Interazioni.**

*CU.3. Classificazione della forma.* Come risulta dal caso di Singapore [DT.3], i modelli possono essere impiegati per diverse analisi basate sull'interazione tra i molti attributi assegnabili agli elementi (e.g., studi del valore di mercato). Gli attributi degli elementi possono anche supportare la classificazione automatica degli elementi (Henn *et al.*, 2012).

*CU.4. Visualizzazione.* La visualizzazione permette di valorizzare la coesistenza nel modello di diversi strati di dati e di mettere le informazioni al servizio di molte applicazioni.

*CU.5. Simulazioni fisiche.* L'uso abilita le simulazioni fornendo sia i dati sulla morfologia urbana (compresi quelli di progetto) che i valori rilevati dai sensori, sulla base dei quali si possono calibrare i calcoli.

*CU.7. Progettazione.* L'inserimento di documenti BIM nella rappresentazione del contesto urbano può supportare le operazioni di progettazione. Inoltre, sono stati già citate le interazioni del progetto con le varie forme di informazione geospaziale inseribili nei modelli di città.



## Riferimenti bibliografici.

- Biljecki F.** (2017). *Level of detail in 3D city models* [PhD thesis].
- Biljecki F., Stoter J., Ledoux H., Zlatanova S., Çöltekin A.** (2015). Applications of 3D City Models: State of the Art Review. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 4(4), 2842–2889.
- Chen L.-C., Wu C.-H., Shen T.-S., Chou C.-C.** (2014). The application of geometric network models and building information models in geospatial environments for fire-fighting simulations. *Computers, Environment and Urban Systems*, 45, 1–12.
- Gröger G., Kolbe T.H., Nagel C., Häfele K.-H.** (a cura di) (2012). *OGC City Geography Markup Language (CityGML) Encoding Standard*. Open Geospatial Consortium.
- Gruen A., Schubiger S., Qin R., Schrotter G., Xiong B., Li J., Ling X., Xiao C., Yao S., Nuesch F.** (2019). Semantically enriched high resolution LoD 3 model generation. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-4/W15, 11–18.
- Henn A., Gröger G., Stroh V., Plümer L.** (2013). Model driven reconstruction of roofs from sparse LIDAR point clouds. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 76, 17–29.
- Henn A., Römer C., Gröger G., Plümer L.** (2012). Automatic classification of building types in 3D city models: Using SVMs for semantic enrichment of low resolution building data. *GeoInformatica*, 16(2), 281–306.
- Hillier B.** (2007). *Space is the machine: a configurational theory of architecture*. Space Syntax. [Prima pubblicazione 1996.]
- Knowles R.L.** (2003). The solar envelope: its meaning for energy and buildings. *Energy and Buildings*, 11.
- Müller P., Wonka P., Haegler S., Ulmer A., Gool L.V.** (2006). Procedural Modeling of Buildings. *ACM SIGGRAPH 2006 Papers*, 614–623.
- Mutani G., Delmastro C., Gargiulo M., Corgnati S.P.** (2016). Characterization of Building Thermal Energy Consumption at the Urban Scale. *Energy Procedia*, 101, 384–391.
- Nouvel R., Mastrucci A., Leopold U., Baume O., Coors V., Eicker U.** (2015). Combining GIS-based statistical and engineering urban heat consumption models: Towards a new framework for multi-scale policy support. *Energy and Buildings*, 107, 204–212.
- Pirotti F., Zanchetta C., Previtali M., Della Torre S.** (2019). Detection of building roofs and facades from aerial laser scanning data using deep learning. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-2/W11, 975–980.
- Ross L.** (2010). *Virtual 3D City Models in Urban Land Management - Technologies and Applications*. Technischen Universität Berlin.
- Ruohomäki T., Airaksinen E., Huuska P., Kesaniemi O., Martikka M., Suomisto J.** (2018). Smart City Platform Enabling Digital Twin. *2018 International Conference on Intelligent Systems (IS)*, 155–161.
- Schrotter G., Hürzeler C.** (2020). The Digital Twin of the City of Zurich for Urban Planning. *PFG – Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science*.
- Tashakkori H., Rajabifard A., Kalantari M.** (2015). A new 3D indoor/outdoor spatial model for indoor emergency response facilitation. *Building and Environment*, 89, 170–182.
- Volk R., Stengel J., Schultmann F.** (2014). Building Information Modeling (BIM) for existing buildings — Literature review and future needs. *Automation in Construction*, 38, 109–127.





# Glossario

<b>AR</b>	<i>Augmented reality</i> (realtà aumentata); tecnologia che permette la visualizzazione di elementi digitali sovrapposti ad elementi di un ambiente reale, in tempo reale.
<b>CAD</b>	<i>Computer Aided Design</i> ; tecnologia digitale per la progettazione che permette la rappresentazione geometrica dell'oggetto progettato e offre strumenti di disegno automatico, ottimizzazione, e analisi.
<b>Data linking</b>	Insieme di processi per l'integrazione di dati che consente nel far corrispondere elementi e attributi che appartengono a <i>dataset</i> di diversa origine.
<b>DL</b>	<i>Deep learning</i> ; classe di algoritmi di <i>machine learning</i> caratterizzata dalla capacità di apprendere concetti complessi sulla base di concetti più semplici (ad esempio, riconoscere il soggetto di un'immagine attraverso un processo che passa per l'individuazione di semplici elementi geometrici).
<b>DSM</b>	<i>Digital surface model</i> ; rappresentazione digitale della superficie terrestre comprensiva di elementi artificiali e naturali quali edifici e vegetazione.
<b>DTM</b>	<i>Digital terrain model</i> ; rappresentazione digitale della superficie del un terreno.
<b>ERP</b>	<i>Enterprise resource planning</i> ; insieme dei processi di gestione integrata delle imprese che possono essere gestiti attraverso strumenti software.
<b>Geospaziale</b>	Aggettivo che si riferisce ai dati direttamente connessi a posizioni geografiche.
<b>ICT</b>	<i>Information and communication technologies</i> (tecnologie dell'informazione e della comunicazione).
<b>INSPIRE</b>	<i>Infrastructure for Spatial Information in the European Community</i> ; progetto della Commissione Europea per la condivisione dei dati territoriali comunitari.
<b>LiDAR</b>	<i>Laser imaging detection and ranging</i> ; tecnica di rilevamento da remoto che permette di individuare la posizione di un punto nello spazio, sulla superficie di un oggetto, attraverso la misurazione del tempo di ritorno di un segnale di luce laser.
<b>LoD0-4</b>	<i>Level of detail</i> (livello di dettaglio) di un modello 3D; nella modellazione digitale di città, il livello di dettaglio è definito attraverso classi da 0 a 4, che indicano un dettaglio crescente (dalla sola traccia a terra degli edifici alla definizione di particolari degli interni).
<b>Modellazione procedurale</b>	Insieme di tecniche di grafica digitale che permettono di eseguire rappresentazioni dettagliate attraverso regole e algoritmi, e limitando dunque la modellazione manuale dei particolari.
<b>Ortofoto</b>	Immagine fotografica corretta al fine di far corrispondere gli elementi rappresentati alla loro posizione geografica in un sistema di riferimento dato.
<b>Rendering</b>	Processo di generazione di un'immagine a partire da un modello 3D.
<b>SQL</b>	<i>Structured query language</i> ; standard internazionale per la gestione di <i>database</i> .
<b>VR</b>	<i>Virtual reality</i> (realtà virtuale); tecnologia che permette la visualizzazione e l'esplorazione di un ambiente generato da un computer.