

Fra mente e algoritmo: l'intelligenza artificiale nel progetto urbano

Between Mind and
Algorithm: Artificial
Intelligence in Urban
Design

Iacopo Zetti

DIDA, Università di Firenze
iacopo.zetti@unifi.it
orcid.org/0000-0002-1890-8530

Biagio Martino

DIDA, Università di Firenze
biagiomartino98@gmail.com

Received: March 2025 / Accepted: September 2025 | © 2025 Author(s).
This article is published with Creative Commons license CC BY-SA 4.0
Firenze University Press.
DOI: 10.36253/contest-16002

keywords
artificial intelligence
assisted design
generative design

1. Introduzione

L'introduzione dell'intelligenza artificiale (da qui in poi AI) in molti campi della nostra vita è un dato evidente, perfino più capillare di quanto sia percepito. Tuttavia, la letteratura che ne analizza l'impiego nel campo della progettazione risulta ancora relativamente limitata. Se poi restringiamo il campo alla progettazione urbanistica possiamo osservare come sia quasi inesistente a livello nazionale¹. Allo stesso tempo sappiamo che gli strumenti di lavoro influiscono in maniera significativa sui risultati, come bene ha sottolineato chi si è interrogato sull'uso della cartografia tradizionale in urbanistica (Dematteis, 1985), sulla sua trasformazione digitale

(Farinelli, 2004; Dalton, 2015; Dodge and Kitchin, 2012) e sul suo ruolo di «immagine per agire» (Söderström, 2000). Riteniamo dunque fondamentale riflettere su quali siano gli impatti prevedibili e, allo stato attuale, possibili di software e piattaforme di AI nella progettazione urbanistica.

In questo articolo analizzeremo il ruolo degli strumenti di progettazione assistita nel processo di pianificazione urbanistica, esaminandone po-

The paper analyses the application of artificial intelligence in urban planning through a concrete case study. Using computational tools, the proposed test compares AI-generated solutions with a traditional design process. The analysis highlights the ability of the algorithms to generate layouts but reveals limitations in the integration with the urban context and in the management of qualitative aspects. The tools used prove to be effective in supporting design schemes and in allowing rapid environmental simulations,

but require human guidance to interpret the spatial fabric and urban standards. The experiment confirms the role of the designer in mediating between calculation and creativity, integrating ethics, spatial narrative and contextual adaptation. AI emerges as a regulatory device but does not replace human vision in interpreting urban complexity and translating social values into design solutions.

tenzialità e limiti, e a tal fine presenteremo i risultati di un test appositamente sviluppato per valutarne l'efficacia. Trattandosi di un caso studio singolo e non di un'ampia sperimentazione è importante valutare i risultati con cautela, dobbiamo però considerare che, ad oggi, non ci pare esista in letteratura una qualche analisi appoggiata su sperimentazioni analoghe, che utilizzano l'AI in confronto ad una esperienza di concorso di progettazione urbana².

L'ipotesi da cui parte l'esperimento è che gli strumenti computazionali possono esplorare soluzioni che l'intelligenza umana potrebbe non cercare, o che potrebbero essere fuori dall'orizzonte della nostra comprensione immediata. Questo non tanto perché gli applicativi di cui parleremo sono intrinsecamente intelligenti, ma piuttosto perché riescono a enfatizzare specifici aspetti del percorso di progettazione. In altre parole, ci domanderemo: l'automazione co-

gnitiva può cogliere sottili sfumature, schemi e relazioni complesse che potrebbero sfuggire all'osservazione umana, permettendo di identificare soluzioni innovative ed inaspettate nei contesti di progettazione architettonica e pianificazione urbana? Oppure si limita a supportare un percorso già tracciato, rendendo i processi decisionali comunque più rapidi, meno onerosi e potenzialmente più efficaci nel testare nuove soluzioni?

Il testo che segue non pretende di fornire risposte definitive a queste domande, ma cerca di introdurre alcuni spunti per una riflessione critica.

2. Intelligenza artificiale

2.1 Brevi cenni sull'intelligenza (artificiale)

La replica del comportamento cognitivo umano è stata una sfida di grande fascino fin dai primordi dell'informatica, alimentando un vivace dibattito teorico e filosofico sulla distinzione fra le forme di pensiero umane e computerizzate (basti citare le note teorie di Alan Turing - Turing, 1950). Ancora oggi però non esiste una definizione univoca di AI e questa mancanza sottolinea proprio la complessità delle questioni trattate.

Marvin Minsky nel 1986, definiva l'intelligenza come capacità di affrontare e risolvere problemi complessi, sottolineandone un aspetto che non si limita alla riproduzione di comportamenti umani, ma riguarda piuttosto la capacità di sviluppare soluzioni innovative in situazioni differenti. Egli paragona il cervello ad una società or-

ganizzata, costituita da componenti interconnesse e gerarchicamente strutturate. Nella sua prospettiva esiste un legame diretto tra il funzionamento cognitivo umano e i processi di elaborazione informatica: il nucleo cognitivo può essere visto come una macchina operativa (Minsky, 1961, 1988).

Già a partire dal 1960, John McCarthy concepiva l'intelligenza umana come la componente computazionale della capacità di raggiungere obiettivi. Per McCarthy l'intuito non è una caratteristica esclusiva degli esseri umani, ma anche di animali e altri esseri viventi, ed è presente anche in certi comportamenti esibiti dalle macchine. La sua visione considera l'intelletto un processo computazionale finalizzato al raggiungimento di obiettivi, superando la concezione tradizionale che lo attribuisce esclusivamente agli umani (McCarthy, 2008).

Infine Lawrence Jerome Fogel, pioniere del calcolo evolutivo, definisce l'intelligenza come la capacità di un sistema di adeguare il proprio comportamento per conseguire tutti i propri obiettivi in una varietà di contesti e situazioni. Egli sottolinea che per le specie biologiche la sopravvivenza costituisce un obiettivo primario, mentre per le macchine tale scopo deve essere specificato dal progettista. Questa prospettiva richiama l'essenza dell'evoluzione, in cui l'adattamento alle condizioni ambientali è cruciale per la sopravvivenza (Fogel, 1964; Fogel et al., 1966).

In sintesi, il raggiungimento di obiettivi e la ri-

soluzione di problemi rappresentano il filo conduttore fra queste tre prospettive: Fogel pone l'accento sull'adattamento comportamentale, Minsky sull'innovazione nella risoluzione dei problemi e McCarthy sugli aspetti computazionali. Le loro teorie non solo arricchiscono la comprensione dell'intelligenza come concetto sfaccettato, ma evidenziano anche la (affascinante) complessità dei sistemi logici su cui si basa lo sviluppo dell'AI (Plebe, Perconti, 2022).

2.2 *Machine Learning e Deep Learning*

Qualsiasi definizione di AI si scelga, è evidente che non può essere elusa una connessione con il concetto di apprendimento ed in particolare con l'apprendimento automatico. In questo quadro il Machine Learning e il Deep Learning hanno assunto un ruolo di primo piano.

2.2.1 *Machine Learning*

Il Machine Learning si occupa dello studio di algoritmi e modelli capaci di apprendere dai dati forniti, migliorando nel tempo l'esecuzione di compiti specifici (Mahes, 2020). Questo concetto, introdotto da Arthur Lee Samuel nel 1959, si basa sull'idea che l'approccio ottimale per insegnare alle macchine ad imparare è quello di consentire loro di interagire con l'ambiente circostante, di modo da sviluppare una serie di strategie per risolvere problemi. Samuel testò negli anni '60 le sue teorie attraverso giochi strategici come la dama (Wiederhold, McCarthy, 1992), e non sfuggirà qualche analogia tra questo tipo di

interazione e l'attività di pianificazione urbanistica in quanto anch'essa si sviluppa all'interno di un contesto specifico, le cui regole sono talvolta esplicite (livello normativo), o implicite nel palinsesto territoriale.

Pochi anni dopo Tom Mitchell fornì un ulteriore chiarimento riguardo al concetto di apprendimento automatico. Egli scrisse che il Machine Learning può essere descritto come un processo che si applica a compiti nuovi migliorando la sua efficienza nel tempo grazie all'acquisizione di esperienza (Mitchel, 1997). Esistono diverse tipologie di approcci che possono essere utilizzati in questo contesto, classificabili in base al processo di apprendimento, ma complessivamente essi si distinguono in approccio supervisionato o non supervisionato (Alloghani et al., 2020).

La prima tipologia prevede modelli addestrati utilizzando dati etichettati, che contengono solo risposte corrette ed è particolarmente adatta per problemi di classificazione.

La seconda analizza dati non etichettati, cercando di individuare strutture nascoste e raggruppando elementi simili ed è utile per l'esplorazione di schemi non evidenti. In alcuni casi i due approcci possono essere combinati per ottenere una comprensione più approfondita dei dati e dei modelli (Nasteski, 2017).

Premesso che in questo articolo non avrebbe senso spingersi più a fondo nella descrizione tecnica del Machine Learning, preme qui evidenziare che nel caso di studio presentato è stato sperimentato un approccio inizialmente auto-

matico, seguito da una supervisione qualitativa delle soluzioni generate dal software. I dettagli del processo saranno descritti nelle sezioni successive.

2.2.2 *Deep Learning*

Nel corso degli anni le tecnologie di Machine Learning hanno assunto particolare importanza grazie ai miglioramenti dell'hardware e della disponibilità di grandi quantità di dati. I Big Data in particolare sono una fonte preziosa per l'esperienza accumulata dalla macchina, contribuendo a sviluppare algoritmi di apprendimento capaci di elaborare informazioni sempre più dettagliate. Essi infatti permettono di addestrare modelli più complessi grazie alla possibilità di correggere efficacemente i parametri modificabili all'interno del modello (per esempio il peso di ciascun neurone di una rete neurale).

Le due innovazioni combinate hanno permesso di sviluppare algoritmi raffinati, basati sul concetto di perceptrone già proposto nel 1958 da Frank Rosenblatt (Rosenblatt, 1960), che mirava a replicare meccanismi di funzionamento del sistema nervoso umano capaci di riconoscere delle forme. Questa innovazione ha aperto la strada a quello che viene definito apprendimento profondo e alle reti neurali.

Il Deep Learning è stato sviluppato per superare i limiti tradizionali legati all'elaborazione dei dati in forma grezza. Esso dimostra un miglioramento esponenziale delle prestazioni all'aumentare dei dati forniti, riuscendo così a emu-

lare alcune capacità della mente umana. Si basa su una struttura stratificata che consente di apprendere progressivamente rappresentazioni sempre più complesse degli elementi in ingresso, concedendo al modello di estrarre autonomamente caratteristiche rilevanti. Ciascun livello è costituito da moduli semplici ma non lineari, i quali prendono le attivazioni provenienti dal livello precedente e le trasformano in una rappresentazione leggermente più astratta (LeCun et al., 2015).

In sostanza il Deep Learning sfrutta un sistema gerarchico di tipi logici in grado di assimilare i dati e prendere decisioni in modo autonomo. Anche nel caso del Deep Learning esistono diversi approcci e modelli, ciascuno con le proprie caratteristiche e finalità. In sintesi citiamo:

- reti neurali artificiali - modelli matematici che regolano l'apprendimento in base agli errori di previsione rispetto ai dati di addestramento consentendo di generalizzare le previsioni su nuovi dati (Zhang, 2000);
- reti neurali convoluzionali - strutture che utilizzano filtri per estrarre caratteristiche da input tridimensionali per poi eseguire la classificazione basandosi sulle rappresentazioni apprese (sono fondamentali per il riconoscimento delle immagini - IBM 2025);
- reti neurali ricorrenti - modelli che considerano la dipendenza temporale tra i dati e che per questo sono ideali per affrontare problemi come il riconoscimento di sequenze e il linguaggio naturale.

Queste sono solo alcune delle tipologie di apprendimento profondo e benché il Deep Learning sia affascinante ed utile per le sue potenzialità, è importante sottolineare che richiede un notevole calcolo computazionale, con implicazioni anche dal punto di vista economico e della gestione (Aggarwal, 2023).

Nel nostro caso, grazie alle potenzialità del Deep Learning, è stato possibile analizzare fotografie satellitari per estrarre informazioni dettagliate:

- sull'uso del suolo, la disposizione degli edifici,
- la distribuzione della vegetazione e altri elementi dell'ambiente urbano.
- In questo contesto le reti neurali sono state addestrate su immagini di quartieri e città per identificare caratteristiche urbane come:
- le linee stradali,
- la densità degli edifici,
- la distribuzione del verde,

fornendo una visione dell'ambiente costruito e dei suoi componenti (Basu et al., 2022). Va detto per chiarezza che non conosciamo con precisione il metodo di addestramento del software utilizzato, essendo proprietario, ma è probabile che proprio queste ultime potenzialità siano alla base della tecnologia. Nel prosieguo del testo vedremo come in effetti le capacità analitiche che derivano dall'apprendimento su banche dati geografiche siano effettivamente sviluppate e forniscano notevoli opportunità, mentre l'approccio alla generazione di schemi progettuali richiede una guida costante.

2.3 Applicazioni dell'AI in campo urbanistico

L'impiego di modelli matematici per ottimizzare lo sviluppo urbano ha suscitato a lungo l'interesse di esperti e ricercatori. Il matematico George Dantzig nel 1947 diede un contributo fondamentale al settore, sviluppando modelli per affrontare problemi di pianificazione e programmazione. Il suo lavoro portò alla creazione del metodo del simplesso, un algoritmo numerico per la risoluzione di problemi che derivano dalla programmazione lineare in uno spazio multidimensionale. Dantzig credeva che i risultati potessero essere di vitale importanza per la soluzione di molteplici questioni che richiedevano un approccio sistemico, tra cui la pianificazione urbana (Gill et al., 2008). Naturalmente tale approccio non si diffuse subito, ma l'avvento del *personal computer* segnò un punto di svolta nel settore della pianificazione, determinando un sempre maggior utilizzo degli algoritmi e della logica formale.

Il PC ha di fatto reso accessibili ai professionisti le metodologie basate su sistemi informatici, consolidando la loro fiducia nelle tecnologie e nelle scienze applicate. Parallelamente, la diffusione dei Sistemi Informativi Geografici ha rivoluzionato la pianificazione, ampliando le capacità di analisi del contesto e ottimizzando la gestione delle scelte di progetto (Harris, Batty, 1993).

Oggi ai professionisti è richiesta una solida competenza informatica e una padronanza dei software, mentre l'evoluzione degli algoritmi ha

segnato un significativo progresso nella generazione di forme architettoniche consentendo una modellazione più organica, basata su regole definite dal progettista (Nebuloni, Rossi, 2017). Proprio questo interesse nel campo delle materie scientifiche ha permesso lo sviluppo del concetto di design computazionale.

Questo approccio alla pianificazione utilizza parametri variabili per definire e manipolare forme e strutture e permette la generazione di una vasta gamma di soluzioni progettuali, inoltre consente di creare forme complesse e strutture innovative grazie a sistemi avanzati basati su AI e Deep Learning.

Il design computazionale può essere utilizzato per ottimizzare i progetti in base a criteri specifici, come efficienza funzionale, performance energetica o costi, ma uno dei suoi vantaggi principali è la capacità di esplorare una vasta gamma di soluzioni progettuali in risposta a modifiche nei parametri di input, consentendo di testare rapidamente molteplici scenari (Langella et al., 2017; Eloy et al., 2022).

Questo approccio mira a generare schemi di disposizione spaziale urbana direttamente dalla prospettiva del computer, fornendo supporto alla pianificazione ed al design urbano tradizionali. In tali schemi i dati relativi all'ambiente circostante l'area di progettazione giocano un ruolo decisivo e pertanto vengono inclusi come input (Wan, Ma, 2022).

3. Il riuso della caserma «Lupi di Toscana» a Firenze. Un test operativo

Nei paragrafi seguenti illustreremo un test di progettazione urbana eseguito con strumenti di IA, sulla base di un'opportunità di confronto con una procedura di progettazione tradizionale relativa a un concorso per un'area all'interno del comune di Firenze. In questo contesto intendiamo per progettazione urbana il complesso processo di organizzazione degli elementi fisici all'interno di un ambiente urbano, al fine di creare uno spazio costruito che sia efficiente, vivibile e sostenibile dal punto di vista ambientale (Carmona, 2010; Gehl, 2010).

In particolare, la sfida principale che testeremo risiede nella disposizione degli edifici, un aspetto di primaria importanza poiché influisce non solo sulla struttura fisica delle costruzioni, ma anche sulle dinamiche di interazione tra le persone e l'ambiente circostante. Questo test di progettazione impiega metodi generativi e parametrici assistiti per esplorare una vasta gamma di alternative, con l'obiettivo di soddisfare requisiti specifici. In questo campo le reti generative conosciute come GAN (Generative Adversarial Networks) risultano particolarmente efficienti per la generazione automatica dei layout degli edifici (Jiang et al., 2023), e dunque ciò che ci proponiamo di testare è se in effetti questi sistemi siano in grado di estrarre relazioni implicite e conoscenze urbane dai dati inseriti, per verificare che le soluzioni generate siano coerenti sia semanticamente che urbanisticamente (Newton, 2019).

3.1 Strumenti impiegati

Nel test la scelta è stata quella di ricorrere a un software di progettazione generativa, Autodesk Forma, che sfrutta questa nuova tecnologia per proporre soluzioni progettuali attraverso l'integrazione di Machine Learning e Deep Learning. Nello specifico Forma consente, oltre alla produzione di schemi di distribuzione di edifici a partire da input sui volumi edilizi e percentuali di diversi usi del suolo, anche di effettuare analisi su dati (come densità e caratteristiche ambientali), sin dalle prime fasi del flusso progettuale.

La scelta di Forma è legata alla sua relativa facilità d'utilizzo, alla diffusione dei prodotti Autodesk e, ovviamente, alle sue caratteristiche, le quali saranno illustrate brevemente di seguito³.

Il flusso di lavoro sarà dunque legato all'uso di Forma, ma utilizzeremo anche generatori di immagini basati su reti neurali, nello specifico PromAi e Stable Diffusion (prodotto da Stability AI), per testare una filiera completa di strumenti che, oltre allo schema di distribuzione su scala urbana, consentono quantomeno una verifica sommaria di scelte relative all'architettura degli spazi.

3.1.1 Forma: caratteristiche ed elementi per il test

Negli ultimi decenni gli strumenti informatici per la progettazione hanno subito un'evoluzione significativa passando dai software di disegno assistito (CAD) a più complessi sistemi di gestione di informazioni, ovvero i sistemi Build-

ding Information Modeling (BIM). Questo cambiamento è stato determinato principalmente dall'esigenza di fornire una visione dettagliata e integrata dell'intero processo progettuale.

Oggi la pianificazione e la progettazione si basano sull'elaborazione di grandi quantità di informazioni, la cui gestione è strettamente legata all'utilizzo di modelli computazionali capaci di interpretare questa mole di informazioni (Montjoy, 2023). In questa prospettiva si inserisce il progetto Spacemaker avviato nel 2016 dall'architetto Havard Haukeland, con l'obiettivo di sviluppare un software per ottimizzare il flusso preliminare di progettazione. Spacemaker ha affrontato la complessità architettonica e urbanistica traducendola in formule matematiche e modelli generativi, capaci di analizzare i dati di input e le preferenze dell'utente per restituire soluzioni ottimizzate. Nel novembre del 2020, il suo successo porta l'azienda Autodesk all'acquisizione del software cambiandone il nome in "Autodesk Forma".

Forma è un software di progettazione urbana, che dopo aver contribuito a produrre uno schema di progetto, permette di effettuare valutazioni ambientali grazie al Machine Learning. Nello specifico gli strumenti offerti rendono possibile:

- elaborazione rapida di varianti progettuali a partire da vincoli geometrici e normativi;
- analisi prestazionali ambientali (luce, rumore, vento, comfort termico) con parametri verificabili.

Prima della fase di test abbiamo assunto l'ipotesi che uno strumento di questo tipo sia in grado di anticipare criticità, ottimizzare i progetti e contribuire al miglioramento delle prestazioni complessive.

3.1.2 L'area di studio

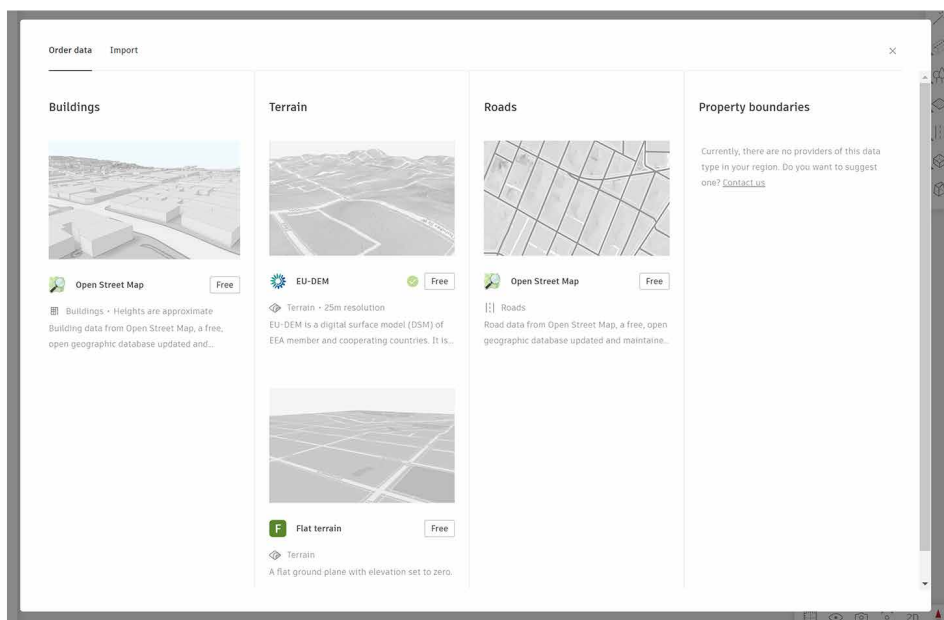
La sperimentazione è stata condotta in un'area interessata da un intervento di riqualificazione urbana, per la quale il Comune di Firenze ha ufficialmente approvato un progetto.

Si tratta dell'ex caserma Gonzaga che ha ospitato fino al 2008 il 78° Reggimento fanteria noto come "Lupi di Toscana". Situata ai margini del territorio comunale, ma nella conurbazione fiorentina, è stata ceduta al Comune nel 2014 e nel 2015 il Regolamento Urbanistico l'ha designata come sede di un'importante trasformazione territoriale, da operarsi attraverso la realizzazione di un nuovo insediamento abitativo.

L'area ha una posizione strategica tra importanti vie di comunicazione, mentre su un lato confina con strutture sanitarie di livello sovra locale. Nel 2016 è stato indetto un concorso internazionale con due obiettivi principali: trasformare l'intera area in un complesso edilizio orientato principalmente al social housing; progettare un insediamento ad alta efficienza energetica.

I vincitori del concorso sono gli architetti Poloni, Saracino e Ghirardelli ed a valle dell'esito della competizione è stato approvato un piano attuativo di iniziativa pubblica.

Per testare un percorso di progettazione ba-



sato sull'AI abbiamo adottato i parametri della proposta vincitrice, sviluppando su tale base un progetto autonomo. Successivamente abbiamo effettuato un confronto diretto tra il progetto approvato dall'amministrazione e le diverse alternative generate dall'AI. Questo confronto si avvale di una tabella valutativa che ha il fine di determinare l'efficacia delle soluzioni generate dal software e, di conseguenza, definire il suo possibile ruolo in un flusso di pianificazione urbanistica a livello di piano attuativo.

3.1.3 Flusso di progetto

Forma è una piattaforma che sfrutta dati reperibili in rete, per questo motivo il flusso progettuale è puramente di natura digitale ed in sintesi, nel nostro caso, è stato composto dalle seguenti fasi:

1. delimitazione del sito mediante coordinate geografiche, dimodoché la piattaforma possa definire gli elementi di OpenStreet-

Map ed EU-DEM (un modello digitale di superficie - DSM) da caricare (Fig.1);

2. delimitazione precisa del confine dell'area di intervento;
3. generazione di schemi di distribuzione volumetrici, viabilità interna e verde secondo parametri dimensionali definiti da algoritmi di Machine Learning.

Da una prima esplorazione degli schemi generati dal software emerge come il modello di apprendimento profondo integri elementi chiave del contesto (soprattutto dal punto di vista funzionale) come le due rotonde esterne, formulando proposte che introducono una nuova uscita stradale per ottimizzare i flussi veicolari e dimostrando la capacità di introiettare alcune delle caratteristiche specifiche del sito. Tuttavia, i layout volumetrici generati mostrano una tendenza a forme rigide e ripetitive, dovuta alla suddivisione dello spazio in particelle sostanzialmente omogenee che hanno l'effetto pri-

Schermata dati tridimensionali disponibili in Autodesk Forma.

Fonte: Martino, B. (2024).

L'intelligenza artificiale e il suo ruolo nella progettazione urbana. Tesi di laurea magistrale, Università degli Studi di Firenze, Dipartimento di Architettura.

Fig. 1

Proposte di Layout generate da Autodesk Forma

Fonte: Martino, B. (2024).

L'intelligenza artificiale e il suo ruolo nella progettazione urbana. Tesi di laurea magistrale, Università degli Studi di Firenze, Dipartimento di Architettura.

Figg. 2-3



mario di garantire distanze minime tra edifici. Dall'osservazione del risultato si evince dunque che il primo parametro che guida le soluzioni è il rispetto di un dato sostanzialmente quantitativo e dimensionale, questo comporta anche un ulteriore limite visibile del software nella gestione degli spazi verdi rispetto alle aree edificate, poiché quest'ultimi vengono regolati solo attraverso dei parametri quantitativi.

Le immagini riportate mostrano come modificando la dimensione degli edifici e la suddivisione delle particelle del terreno, i layout risultino anche sensibilmente diversi (Fig.2 e Fig.3).

Nell'ottica di un confronto con la soluzione progettuale di concorso la genericità degli schemi prodotti dal software rappresenta una criticità, poiché non riflette la complessità del tessuto urbano, ovvero non consente di cogliere l'insieme delle relazioni spaziali, funzionali e ambientali che caratterizzano quello specifico insediamento, includendo aspetti quali la varietà morfo-ti-

pologica, la continuità e permeabilità degli spazi pubblici, la presenza di polarità funzionali e la stratificazione storica delle preesistenze (utilizziamo qui il concetto di complessità dell'ambiente urbano ben espresso in Alexander et al., 1977). Per superare questa limitazione si è implementata una griglia morfologica derivata dall'analisi del tessuto urbano adiacente. Questa griglia, costruita attraverso un'analisi delle maglie viarie, degli allineamenti edilizi e delle connessioni pedonali, è stata inserita come vincolo di orientamento volumetrico. Lo scopo è quello di imprimere una direzione al processo generativo favorendo la produzione di soluzioni progettuali più in sintonia con il contesto, più vicine cioè al rispetto del patrimonio territoriale (Magnaghi, 2010) che concretizza i rapporti storici fra le diverse fasi di trasformazioni che hanno dialogato nell'area, nel corso del tempo (pur nei limiti di una sperimentazione che è in questo senso non approfondita).

Proposta	Ore sole solstizio inverno	Ore sole solstizio estate	Microclima ⁴	Vento sulla copertura	SUL fabbricati
1	3,5% ≥ 8 ore di sole 96,7% < 8 ore di sole	76,4% ≥ 8 ore di sole 23,6% < 8 ore di sole	1% sup 10-15 C° 6% sup 15-20 C° 33% sup 20-25 C° 60% sup 30-35 C°	97% vento leggero 3% vento medio 0% vento forte	62.629 m²
2	3,4% ≥ 8 ore di sole 96,6% < 8 ore di sole	75,2% ≥ 8 ore di sole 24,8% < 8 ore di sole	1% sup 10-15 C° 5% sup 15-20 C° 26% sup 20-25 C° 68% sup 30-35 C°	91% vento leggero 9% vento medio 0% vento forte	73.510 m²
3	5% ≥ 8 ore di sole 95% < 8 ore di sole	78,9% ≥ 8 ore di sole 21,1% < 8 ore di sole	1% sup 10-15 C° 7% sup 15-20 C° 29% sup 20-25 C° 64% sup 30-35 C°	93% vento leggero 7% vento medio 0% vento forte	49.789 m²

Tabella dei valori risultanti dalle analisi effettuate con Autodesk Forma sulle proposte progettuali generate.

Fonte: Martino, B. (2024). L'intelligenza artificiale e il suo ruolo nella progettazione urbana. Tesi di laurea magistrale, Università degli Studi di Firenze, Dipartimento di Architettura.
Tab. 1

Con questo vincolo il software ha generato tre proposte progettuali, successivamente analizzate e confrontate (vedi tabella 1).

I criteri di valutazione sono stati:

1. comportamento degli edifici rispetto all'esposizione solare, durante il solstizio d'estate e d'inverno;
2. analisi delle condizioni microclimatiche, per calcolare la temperatura percepita nell'area;
3. valutazione dell'effetto dei venti all'interno del sito, al fine di garantire il comfort pedonale.

Le analisi hanno confermato come il software sia in grado di produrre soluzioni con prestazioni ambientali omogenee e conformi agli standard, anche in presenza di vincoli complessi derivati dalla griglia, dimostrando così la possibilità di mantenere elevate prestazioni microclimatiche senza compromettere la coerenza urbanistica delle proposte generate.

In questa condizione di limitata differenziazione delle soluzioni rispetto ai risultati del processo di generazione, l'analisi delle similitudini e delle criticità tra le opzioni ha rappresentato un passo fondamentale per la definizione dello schema finale, come illustrato nella tabella 1 basata sui risultati delle simulazioni.

Sebbene non sia possibile commentare qui ogni elemento di comparazione, si evidenzia che, pur non eccellendo in ogni singolo parametro, la prima proposta progettuale ha offerto un equilibrio ottimale tra illuminazione naturale, comfort termico e superficie utile lorda. È però a questo punto importante sottolineare che, allo stato attuale, Forma non è in grado di generare soluzioni progettuali che integrino tutti gli elementi che un piano attuativo può richiedere. Nel caso specifico, infatti, uno



Soluzione progettuale finale derivata dalla sintesi dei tre modelli generati dall'intelligenza artificiale di Autodesk Forma.

Fonte: Martino, B. (2024). L'intelligenza artificiale e il suo ruolo nella progettazione urbana. Tesi di laurea magistrale, Università degli Studi di Firenze, Dipartimento di Architettura.

Fig. 4

degli obiettivi chiave del concorso era la predisposizione di spazi sociali, ma la limitazione del software nel distinguere le diverse aree funzionali oltre la dicotomia verde-costruito, ha rappresentato un ostacolo significativo per il raggiungimento di tale obiettivo in modo automatizzato. Di conseguenza il ruolo dell'architetto rimane centrale nella definizione e disposizione degli spazi sociali (o più in generale di tutto ciò che sfugge alla dicotomia sopra evidenziata), garantendo il soddisfacimento delle specifiche richieste.

La sperimentazione suggerisce che l'adozione di flussi ibridi, dove l'intelligenza artificiale fornisce soluzioni preliminari e il progettista esercita un controllo critico e creativo, rappresenta una strategia promettente per superare i limiti attuali e valorizzare le potenzialità del design generativo. Alla luce di queste considerazioni la soluzione

finale, illustrata qui sotto (Fig.4), è un'evoluzione naturale della prima proposta progettuale, arricchita dall'ottimizzazione degli spazi destinati al social housing così come anche ripresi da elementi contenuti nella seconda e nella terza proposta generate dal programma. Il percorso sviluppato ha integrato strumenti di AI in un approccio che, pur non rientrando nel concetto tecnico di apprendimento assistito in ambito di Machine Learning, si estende al processo progettuale nel suo complesso.

Di seguito è possibile verificare la soluzione finale accompagnata dalla tabella riassuntiva delle analisi ambientali.

Per concludere il percorso di sperimentazione, abbiamo deciso di testare i nuovi generatori di immagini basati su input testuali (prompt), realizzando così una rappresentazione foto-realistica. Quest'ultimo elemento non è stato il cen-

Ore sole solstizio inverno	Ore sole solstizio estate	Microclima	Vento sulla copertura	SUL fabbricati
4% ≥ 8 ore di sole 96% < 8 ore di sole	77,5% ≥ 8 ore di sole 22,5% < 8 ore di sole	1% sup 10-15 C° 7% sup 15-20 C° 34% sup 20-25 C° 58% sup 30-35 C	98% vento leggero 2% vento medio 0% vento forte	55.321 m²

Tabella riassuntiva dei risultati derivanti dalla combinazione delle proposte progettuali generate.

Fonte: Martino, B. (2024). L'intelligenza artificiale e il suo ruolo nella progettazione urbana. Tesi di laurea magistrale, Università degli Studi di Firenze, Dipartimento di Architettura.
Tab. 2

tro della sperimentazione, ma corrisponde comunque al tentativo di utilizzare strumenti basati sull'AI oggi disponibili sul mercato e accessibili per tutti i professionisti, per una fase di prefigurazione dei risultati. Corrisponde per altro alla necessità, evidente in un progetto urbano ancorché allo stato di piano attuativo, di non esaurirsi in una serie di schemi planimetrici che hanno un valore comunicativo solo per esperti all'interno di un processo di decisione tecnico, ma di aprirsi alla comprensione degli esiti di scelte politiche tecnicamente assistite (secondo una nota lettura dell'urbanistica di Francesco Indovina) e quindi condivise fuori dal ristretto novero di *policy makers* e urbanisti.

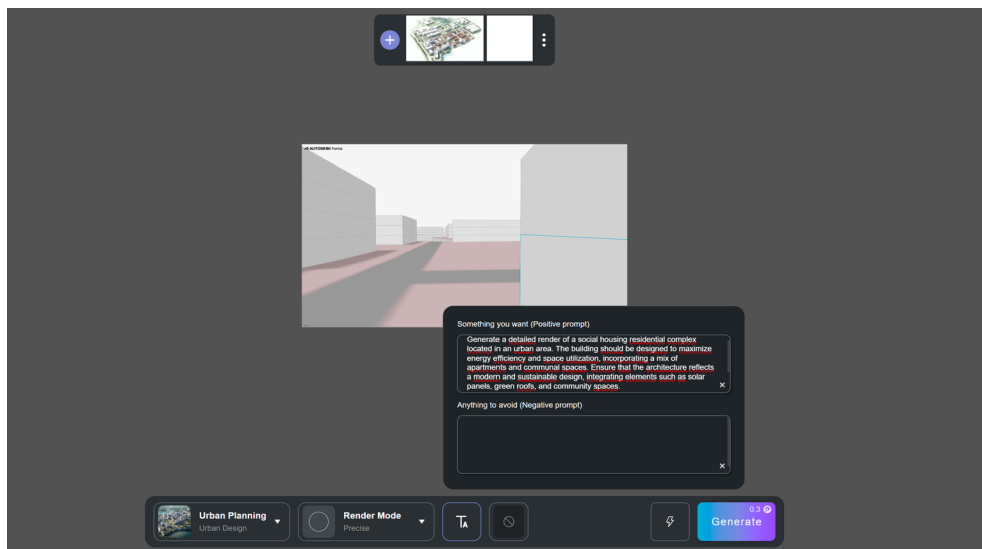
Evidentemente nel nostro caso non discutiamo di una proposta architettonica finalizzata alla restituzione dettagliata dello spazio, ma nonostante questo l'elaborazione di scenari da parte di un progettista non è mai un mero esercizio di stile, rappresenta piuttosto uno strumento creativo utile per comprendere e comunicare le potenzialità del progetto, soprattutto in un piano attuativo che dovrebbe essere soggetto ad un dibattito pubblico. Lo scopo è stato dunque quello di esplorare le potenzialità offerte dagli strumenti di generazione di immagini, combinando diverse tecnologie di AI per ottenere rappresentazioni che rendano visivamente tangibile il progetto anche fuori da una lettura prettamente di tecnica urbanistica.

Forma consente di catturare lo spazio proposto come modello tridimensionale e su questa base è stata condotta la sperimentazione, i cui risultati sono riportati nelle immagini seguenti (Fig.5 e Fig.6).

3.1.4 Il confronto con il progetto ufficiale

Come riportato in precedenza le linee guida del concorso miravano ad un insediamento con mix funzionale e ad alta efficienza energetica. Per rispondere a questi requisiti il team di progettisti vincitori ha proposto un modello insediativo organizzato attorno a un asse connettivo centrale che struttura una griglia ordinata di strade secondarie, stabilendo così un ritmo costante tra gli spazi aperti e quelli edificati.

Nel dettaglio il piano prevede la demolizione della maggior parte delle strutture esistenti per una superficie lorda di circa 33.000 m²; un'allocazione totale di 53.000 m² suddivisi per la maggior parte in 36.000 per attività commerciali e residenziali, 2.000 per il settore industriale e 11.000 per spazi di accoglienza e attività private. In sintesi, l'idea progettuale si concentra sulla creazione di un nuovo complesso multifunzionale, in cui il social housing rappresenta oltre il 68% dell'area edificabile, affiancato da spazi per attività produttive e artigianali, nonché per servizi privati. Le altezze degli edifici variano da 3 a 5 piani, con alcune eccezioni per strutture speciali che raggiungono 8 piani⁵.



Importazione immagine tridimensionale in PromeAi per la generazione di un concept render preliminare.

Fonte: Martino, B. (2024). L'intelligenza artificiale e il suo ruolo nella progettazione urbana. Tesi di laurea magistrale, Università degli Studi di Firenze, Dipartimento di Architettura.

Fig. 5

Render realizzato con Stable Diffusion V.2.1

Fonte: Martino, B. (2024). L'intelligenza artificiale e il suo ruolo nella progettazione urbana. Tesi di laurea magistrale, Università degli Studi di Firenze, Dipartimento di Architettura.

Fig. 6

Risultati ottenuti con l'utilizzo del Software Autodesk Forma per la progettazione dell'area ex caserma Lupi di Toscana.

Fonte: Martino, B. (2024). L'intelligenza artificiale e il suo ruolo nella progettazione urbana. Tesi di laurea magistrale, Università degli Studi di Firenze, Dipartimento di Architettura.

Tab. 3

Risultati ottenuti dal progetto vincitore ex caserma Lupi di Toscana senza l'utilizzo di strumenti di intelligenza artificiale generativa.

Fonte: Martino, B. (2024). L'intelligenza artificiale e il suo ruolo nella progettazione urbana. Tesi di laurea magistrale, Università degli Studi di Firenze, Dipartimento di Architettura.

Tab. 4

Per valutare le prestazioni del progetto formulato mediante l'utilizzo di Forma è stato effettuato un confronto tra le due soluzioni mediante l'uso di una griglia di lettura basata su criteri definiti per il piano dalla pubblica amministrazione. Di seguito vengono riportate due tabelle, partendo dall'analisi del progetto sviluppato mediante AI.

L'impiego di strumenti di AI ha prodotto risultati interessanti, soprattutto in relazione alla valutazione dell'impatto ambientale delle proposte. Allo stesso tempo emerge che molti degli schemi generati non riescono a considerare pienamente il tessuto urbano esistente.

Attualmente il design generativo presenta alcune limitazioni poiché non è in grado di integrare in modo efficace le caratteristiche morfologiche dell'area circostante. Questo problema è stato riscontrato anche in altri casi noti in letteratura, come nell'esperienza di Alkmaar dove è stato impiegato l'algoritmo NSGA-II. Inoltre, nella sperimentazione condotta non è stato possibile modificare alcuni parametri di input cruciali, come il rapporto tra aree verdi ed edificabili. Evidentemente senza una guida basata su una griglia morfologica che tenga conto del palinsesto urbano questi strumenti tendono a generare una grande varietà di schemi che però risultano isolati dal contesto.

Per quanto riguarda il progetto vincitore del concorso l'applicazione della stessa griglia permette di evidenziare alcune considerazioni.

Il progetto di concorso ha seguito un percorso di progettazione tradizionale, mettendo in evidenza l'importanza di adattare la visione architettonica a un contesto urbano consolidato. Questo percorso si articola attraverso diverse fasi decisionali, non è lineare, ma rappresenta un viaggio complesso che richiede pazienza, perseveranza e una profonda comprensione delle problematiche da affrontare.

Tale approccio implica un'analisi approfondita del territorio, considerando la sua storia, cultura, ambiente e dinamiche sociali. Questi aspetti, fondamentali per una progettazione integrata, non sono ancora adeguatamente affrontati dagli strumenti di AI, come dimostrato dai limiti riscontrati nella generazione degli schemi progettuali.

4. Conclusioni

L'obiettivo di questo studio è stato esplorare la possibilità di elaborare un progetto urbanistico utilizzando esclusivamente strumenti computazionali. I modelli adottati hanno consentito di analizzare sia le potenzialità che le limitazioni di tali strumenti, confrontato un'esperienza di progettazione semi-automatizzata con un pro-

Voci	Parametri	Obiettivi	Risultati
Benessere ambientale	Sostenibilità ambientale	Promuovere l'uso di materiali ecologici e a basso impatto ambientale	Verifica dell'impatto ambientale e della quantità di energia elettrica utilizzabile da fonti rinnovabili (e non)
	Comfort abitativo	Garantire la progettazione di edifici con ottima qualità d'illuminazione naturale, esposizione al vento e basso inquinamento acustico	Le analisi condotte permettono di scegliere le proposte che più rispondono a tali obiettivi
	Analisi energetica	Ottimizzare i consumi	Analisi condotte con gli strumenti messi a disposizione da Forma
Estetica e design	Adattabilità al contesto urbano	Capacità del progetto di adattarsi a, ed integrarsi con, il paesaggio circostante	Senza l'intervento dell'operatore (progettista) il sistema non è stato in grado di comprendere a pieno il palinsesto territoriale
Funzionalità ed utilità	Utilizzo dello spazio	Ottimizzare l'uso dello spazio per una migliore funzionalità	La corretta gestione degli spazi è stata ottenuta grazie agli input inseriti dall'operatore
	Accessibilità	Garantire facilità di accesso a tutte le aree	Le soluzioni proposte facilitano l'accesso alle aree progettate grazie all'implementazione delle informazioni geografiche inizialmente richieste dal software
Economicità	Costi iter progettuale	Minimizzare i costi dell'iter progettuale	Costi caratterizzati dall'utilizzo di piattaforme di AI
Coinvolgimento stakeholder	Coinvolgimento del cliente	Coinvolgere la comunità nelle decisioni progettuali	Durante lo svolgimento del progetto è possibile condividere e modificare rapidamente lo stato avanzamento

Voci	Parametri	Obiettivi	Risultati
Benessere ambientale	Sostenibilità ambientale	Promuovere l'uso di materiali ecologici e a basso impatto ambientale	Spazio verde lineare che contribuisce a regolazione microclima e assorbimento di CO ₂
	Comfort abitativo	Garantire la progettazione di edifici con ottima qualità d'illuminazione naturale, esposizione al vento e basso inquinamento acustico	Aspetto non menzionato nel piano particolareggiato
	Analisi energetica	Ottimizzare i consumi	Il progetto si pone l'obiettivo del raggiungimento di una buona efficienza energetica degli edifici
Estetica e design	Adattabilità al contesto urbano	Capacità del progetto di adattarsi a, ed integrarsi con, il paesaggio circostante	Il progetto si adatta al contesto mediante l'utilizzo di direttrici storiche e la valorizzazione dello spazio aperto
Funzionalità ed utilità	Utilizzo dello spazio	Ottimizzare l'uso dello spazio per una migliore funzionalità	Viene minimizzata l'interferenza tra spazio pubblico e spazio dei trasporti
	Accessibilità	Garantire facilità di accesso a tutte le aree	Si prevede un alto grado di integrazione tra le diverse modalità di trasporto, per l'obiettivo della massima accessibilità
Economicità	Costi iter progettuale	Minimizzare i costi dell'iter progettuale	Non menzionati nei documenti di piano
Coinvolgimento stakeholder	Coinvolgimento del cliente	Coinvolgere la comunità nelle decisioni progettuali	Si tratta di un progetto di concorso, fasi di partecipazione sono state precedenti o comunque non direttamente parte dell'iter di ideazione

cesso tradizionale, prevalentemente attraverso la piattaforma Autodesk Forma, integrata da generatori di immagini basati su testo.

Un primo aspetto emerso è la capacità della pianificazione computazionale di generare rapidamente molteplici soluzioni; tuttavia, la qualità degli spazi prodotti non riesce a cogliere la complessità del tessuto urbano esistente. Per mitigare questa criticità abbiamo implementato una griglia morfologica che ha guidato il software, introducendo vincoli relazionali per mantenere un legame con il contesto. Le analisi ambientali, condotte tramite strumenti di AI, hanno confermato come il software sia in grado di produrre soluzioni con prestazioni omogenee e conformi agli standard, anche in presenza di vincoli complessi, dimostrando così la possibilità di mantenere elevate prestazioni microclimatiche senza compromettere la coerenza urbanistica. Persistono tuttavia limiti nel generare proposte che rispettino con precisione parametri urbanistici complessi, come il rapporto qualitativo tra aree verdi ed edificabili, dove le prime non siano solo il risultato di calcoli dimensionali, ma spazio pubblico connettivo; o il soddisfacimento di altri elementi specifici, come nel nostro caso gli interventi tesi a garantire aspetti sociali del nuovo insediamento.

Relativamente all'utilizzo dei generatori di immagini risulta evidente che non possano produrre direttamente soluzioni progettuali operative, in quanto si basano su database generalisti e dunque (e ovviamente) ignorano le specificità locali. Possono però essere utili nelle fasi

preliminari di progettazione per esplorare rapidamente idee e suggestioni visive, a patto di investire tempo e competenze nella personalizzazione dei modelli e nella costruzione di prompt mirati.

Dalla nostra esperienza, seppur basata su un test semplice e limitato, emerge che le immagini migliori vengono generate con software open-source, come nel nostro caso Stable Diffusion. Questo proprio perché consente un alto grado di personalizzazione attraverso modelli, plugin e un'attenta elaborazione dei prompt, ma anche per la grande quantità di immagini generate dalla community. I limiti di questi software rappresentano una sfida per la progettazione: da un lato, un utilizzo mirato offre un enorme potenziale, dall'altro, le soluzioni più immediate tendono a essere generiche. L'investimento iniziale in formazione e sperimentazione è inevitabile.

Va infine sottolineato che il progetto da noi sviluppato non ha tenuto conto di processi di consultazione o partecipazione diretta degli abitanti. Analogamente però il progetto di concorso, se pure ha avuto alcuni input e la valutazione delle proposte sottomesse ha tenuto conto di elementi emersi nel dibattito locale, è stato sviluppato da concorrenti anonimi fino alla data della valutazione e quindi non in un confronto con la società locale. Non possiamo dunque proporre considerazioni precise su come l'uso dell'AI possa rendere più o meno efficace un percorso di co-progettazione (tema di sicuro interesse e che varrebbe la pena sviluppare), sebbene sia

evidente come la rapidità nel generare varianti e scenari possa rappresentare un supporto rilevante in contesti partecipativi.

In conclusione abbiamo visto come l'uso di sistemi generativi possa aprire nuove prospettive, ma seguendo l'esperienza qui descritta possiamo affermare che i modelli computazionali devono restare strumenti di supporto alla creatività e al discernimento umano. Alla base del buon progettare vi è innanzitutto la capacità di empatizzare con il paesaggio circostante, ma ancor più centrale è il ruolo etico e sociale della disciplina urbanistica, la sua natura morale (Ferraro, 1996). La capacità degli architetti di narrare attraverso le loro scelte è un'abilità che le macchine non possono, allo stato attuale, né replicare, né comprendere. Questa capacità è intrinsecamente etica, poiché ogni decisione progettuale, dalla scelta dei materiali alla configurazione degli spazi, contribuisce a creare un'esperienza unica per chi vi entra in contatto. Il risultato in termini spaziali diventa uno degli elementi costitutivi di quella che Paba definiva felicità pubblica (Paba, 2012). Peraltro è bene ricordare che i processi creativi alla base della progettazione si basano sulla generazione di molte possibilità, seguita da una rigorosa selezione, si tratta dunque di processi stocastici ed evolutivi (Bateson, 1979). In questo quadro gli strumenti di AI testati non sono tanto generatori di soluzioni ottimali, quanto meccanismi di valutazione e selezione. In termini logici potremmo definirli strumenti di retroazione negativa (cioè regolativa) (Waddington, 1977), molto utili, ma non propria-

mente creativi nel senso qui delineato (per una revisione sistematica della letteratura recente sulla creatività nel contesto del progetto di architettura Casakin, Wodehouse, 2021).

Questa esperienza di ricerca dunque ribadisce ed enfatizza il ruolo insostituibile del progettista. L'architetto non è soltanto un risolutore di problemi, ma un narratore di spazi e significati. Nelle sue mani gli strumenti di design generativo possono offrire un valido e prezioso supporto al processo progettuale, ma non possono sostituire la visione, l'intuizione e l'empatia. Il valore del progettista risiede dunque nella capacità di integrare le possibilità offerte dalla tecnologia con la sensibilità necessaria a creare luoghi che contribuiscono al benessere ed all'identità per la comunità.

Note

¹Controllando le pubblicazioni presenti nel database Scopus, con parole chiave AI e pianificazione urbana o progettazione urbana si ottengono in totale, negli ultimi dieci anni, due articoli su rivista ed un capitolo su libro collettaneo di autori con affiliazione italiana, ma nessuno pubblicato in Italia. A questi si aggiungono un articolo in italiano reperito su Urbanistica Informazioni (Mascarucci, Bocca, 2024).

²Da una ricerca analoga a quanto illustrato alla nota 1 è emerso un unico articolo, per altro non esattamente assimilabile al tema qui trattato (Berčić et al., 2024).

³Autodesk ci ha concesso una prova gratuita del software, con l'obiettivo di mostrare le sue possibilità e di raccogliere feedback per eventuali implementazioni futuri. Di tale possibilità gli autori ringraziano.

⁴Viene calcolato di default nel giorno dell'equinozio di primavera.

⁵Tutte le informazioni provengono dalla Relazione Urbanistica presente nel regolamento urbanistico del comune di Firenze.

Bibliografia

- Aggarwal, C. C. 2023, *Neural Networks and Deep Learning: A Textbook*, Springer, Cham.
- Alexander, C., Ishikawa, S., Silverstein, M. 1977, *A pattern language: towns, buildings, construction*, Oxford university press, New York.
- Alloghani, M., Al-Jumeily, D., Mustafina, J., Hussain, A., Aljaaf, A.J. 2020, *A Systematic Review on Supervised and Unsupervised Machine Learning Algorithms for Data Science*, in M.W. Berry, A. Mohamed, B.W. Yap (a cura di), *Supervised and Unsupervised Learning for Data Science*, Springer, Cham.
- Basu, P., Talwar, P., As, I. (a cura di) 2022, *Artificial Intelligence in Urban Planning and Design: Technologies, Implementation, and Impacts*, Elsevier, Amsterdam.
- Bateson, G. 1979, *Mind and Nature: A Necessary Unity*, Fontana/Collins, Glasgow.
- Berčič, T., Bohanec, M., Ažman Momirski, L. 2024, *Integrating Multi-Criteria Decision Models in Smart Urban Planning: A Case Study of Architectural and Urban Design Competitions*, «Smart Cities», 7, 2, pp. 786-805, 10.3390/smartcities7020033.
- Carmona, M. (a cura di), 2010, *Public Places, Urban Spaces: The Dimensions of Urban Design*, Routledge, London.
- Casakin, H., Wodehouse, A. 2021, *A Systematic Review of Design Creativity in the Architectural Design Studio*, «Buildings», 11(1), 31, doi.org/10.3390/buildings11010031.
- Dalton, C.M. 2015, *For Fun and Profit: The Limits and Possibilities of Google-Maps-based Geoweb Applications*, «Environment and Planning A», 47, 5, pp. 1029-1046, 10.1177/0308518X15592302.
- Dematteis, G. 1985, *Le Metafore Della Terra: La Geografia Umana Tra Mito e Scienza*, Feltrinelli, Milano.
- Dodge, M., Kitchin, R. 2012, *Mapping Experience: Crowdsourced Cartography*, «Environment and Planning A», 10.2139/SSRN.1921340.
- Eloy, S., Kreutzberg, A., Symeonidou, I. (a cura di) 2022, *Virtual Aesthetics in Architecture: Designing in Mixed Realities*, Taylor & Francis, New York, London.
- Farinelli, F. 2004, *Sui Tipi Non Cartografabili*, in: *Atlante Dei Tipi Geografici*, Istituto Geografico Militare, Firenze, pp. 77-79.
- Ferraro, G. 1996, *Mappe e Sentieri. Una Introduzione Alle Teorie Della Pianificazione*, «CRU - Critica della Razionalità Urbanistica», 6, pp. 52-63.
- Fogel, L. 1964, *On the Organization of Intellect*, University of California, Los Angeles.
- Fogel, L.J., Owens, A.J., Walsh, M.J. 1966, *Artificial Intelligence through Simulated Evolution*, J. Wiley, New York.
- Gehl, J. 2010, *Cities for People*, Island Press, Washington.
- Gill, P.E., Murray, W., Saunders, M.A., Tomlin, J.A., Wright, M.H. 2008, *George B. Dantzig and Systems Optimization*, «Discrete Optimization», 5, 2, pp. 151-158, 10.1016/j.disopt.2007.01.002.
- Harris, B., Batty, M. 1993, *Locational Models, Geographic Information and Planning Support Systems*, «Journal of Planning Education and Research», 12, 3, pp. 184-198, 10.1177/0739456X9301200302.
- IBM, *Cosa Sono Le Reti Neurali Convolutionali?*, <URL: <https://www.ibm.com/it-it/think/topics/convolutional-neural-networks>> (2/25)
- Jiang, F., Ma, J., Webster, C.J., Li, X., Gan, V.J. 2023, *Building Layout Generation Using Site-Embedded GAN Model*, «Automation in Construction», 151, 10.1016/j.autcon.2023.104888.
- Langella, C., Scodeller, D., Dal Buono, V. 2017, *Design Parametrico e Generativo: Nuove Prospettive Di Ricerca*, «MD Journal», 3, pp. 6-13.
- LeCun, Y., Bengio, Y., Hinton, G. 2015, *Deep Learning*, «Nature», 521, 7553, pp. 436-444, 10.1038/nature14539.

- Magnaghi, A. 2010, *Il progetto locale: verso la coscienza di luogo*, Bollati Boringhieri, Torino.
- Mahes, B. 2020, *Machine Learning Algorithms - A Review*, «International Journal of Science and Research», 9, 1, pp. 381-386, 10.21275/ART20203995.
- Mascarucci, R., Bocca, A. 2024, *Progetto urbanistico e decisione algoritmica. Le nuove sfide disciplinari nell'epoca dell'intelligenza artificiale*. «Urbanistica Informazioni», 315, <https://doi.org/10.62661/ui315-2024-065>.
- McCarthy, J. 2008, *What is Artificial Intelligence?*, Computer Science Department Stanford University, Palo Alto, CA, <URL: www-formal.stanford.edu/jmc/whatsai> (2/25)
- Minsky, M. 1961, *Steps toward Artificial Intelligence*, «Proceedings of the IRE», 49, 1, pp. 8-30, 10.1109/JRPROC.1961.287775.
- Minsky, M. 1988, *The Society of Mind*, Simon & Schuster., New York.
- Mitchel, T. 1997, *Machine Learning*, McGraw Hill, New York.
- Montjoy, V. 2023, *What Is the Future Role of Architects in the Age of AI and Data?*, «ArchDaily», <URL: <https://www.archdaily.com/995781/what-is-the-future-role-of-architects-in-the-age-of-ai-and-data>> (2/25).
- Nasteski, V. 2017, *An Overview of the Supervised Machine Learning Methods*, «Horizons», 4, pp. 51-62.
- Nebuloni, A., Rossi, A. 2017, *Codice e progetto : il computational design tra architettura, design, territorio, rappresentazione, strumenti, materiali e nuove tecnologie*, Mimesis, Milano.
- Newton, D. 2019, *Deep Generative Learning for the Generation and Analysis of Architectural Plans with Small Datasets*, «Proceedings of 37 eCAADe and XXIII SIGraDi Joint Conference», Blucher, Porto, 10.5151/proceedings-ecaadesigraDi2019\s\do5(1)35.
- Paba, G. 2012, *Felicità e Territorio. Benessere e Qualità Della Vita Nella Città e Nell'ambiente*, in A. Magnaghi (a cura di), *Il Territorio Bene Comune*, Florence University Press, Firenze.
- Plebe, A., Perconti, P. 2022, *The Future of the Artificial Mind*, CRC Press, Boca Raton.
- Rosenblatt, F. 1960, *Perceptron Simulation Experiments*, «Proceedings of the IRE», 48, 3, pp. 301-309, 10.1109/JRPROC.1960.287598.
- Söderström, O. 2000, *Des Images Pour Agir. Le Visuel En Urbanisme*, Payot, Lausanne.
- Turing, A.M. 1950, *I.-Computing Machinery and Intelligence*, Mind, LIX, 236, pp. 433-460 10.1093/mind/LIX.236.433.
- Waddington, C.H. 1977, *Strumenti per pensare: un approccio globale ai sistemi complessi*, Mondadori, Milano.
- Wan, L., Jin, Y., Echenique, M., Batty, M., Wegener, M. 2024, *From Urban Modelling to City Digital Twins - Reflections from the Applied Urban Modelling (AUM) Symposia*, «Environment and Planning B», 10.1177/23998083241279601.
- Wan, T., Ma, Y. 2022, *Urban Planning and Design Layout Generation Based on Artificial Intelligence*, «Mathematical Problems in Engineering», 2022, 1, 8976943, 10.1155/2022/8976943.
- Wiederhold, G., McCarthy, J., 1992, *Arthur Samuel: Pioneer in Machine Learning*, «IBM Journal of Research and Development», 36, 3, pp. 329-331, 10.1147/rd.363.0329.
- Zhang, X-S., 2000, *Introduction to Artificial Neural Network*, in X-S. Zhang (a cura di), *Neural Networks in Optimization*, Springer US, Boston, MA.