

## ARTICLE INFO

Received 14 October 2024  
 Revised 18 October 2024  
 Accepted 20 October 2024  
 Published 30 December 2024

## IA GENERATIVA E COMPLESSITÀ Verso un nuovo paradigma nel design digitale rigenerativo

## GENERATIVE AI AND COMPLEXITY Towards a new paradigm in regenerative digital design

Consuelo Nava, Alessandro Melis

### ABSTRACT

La sintesi di intelligenza artificiale, deep learning e progettazione parametrica nell'ambito del design digitale rigenerativo ha il potenziale per rimodellare in modo significativo la fase di pre-progettazione in scenari climatici. Attraverso la formulazione di un nuovo flusso di lavoro che collega i processi computazionali con la progettazione incentrata sull'uomo è possibile realizzare un approccio più adattabile alla progettazione ambientale, che non solo anticipa le complessità del nostro ambiente costruito, ma favorisce anche una creatività collettiva reattiva e resiliente. Partendo dall'abstract e dall'introduzione, si propone un focus che indaga la complessità e il campo emergente della progettazione digitale rigenerativa, in particolare nell'ambito degli scenari climatici. La premessa fondamentale è che la capacità di apprendimento profondo e di elaborazione del linguaggio naturale dell'IA può andare oltre i semplici risultati visivi per affrontare sfide progettuali ricche di sfumature e sfaccettature.

The synthesis of artificial intelligence, deep learning and parametric design in regenerative digital design can significantly reshape the pre-design phase in climate scenarios. By formulating a new workflow linking computational processes with human-centred design, it is possible to realise a more adaptive approach to environmental design that anticipates the complexities of our built environment and fosters responsive and resilient collective creativity. Starting from the abstract and introduction, a focus is proposed to investigate the complexity and emerging field of regenerative digital design, particularly in climate scenarios. The basic premise is that AI's deep learning and natural language processing capabilities can go beyond simple visual outcomes to address nuanced and multifaceted design challenges.

### KEYWORDS

intelligenza artificiale, design digitale rigenerativo, tecnologie abilitanti, tecnologie emergenti, esattazione

artificial intelligence, regenerative digital design, enabling technologies, emerging technologies, exaptation

**Consuelo Nava** is a Full Professor of Technological and Environmental Design of Architecture, Director of the Department of Architecture and Territory of the 'Mediterranea' University of Reggio Calabria (Italy) and Scientific Coordinator of ABITA Lab, a laboratory active on the Reggio Calabria site of the ABITA Inter-University Centre. She investigates the issue of innovation and sustainability of the project through frontier research experiences based on the most recent paradigms of technologies for the environment, their evolution of enabling and emerging technologies, and the application of emerging technologies to regenerative digital design in climate change scenarios. E-mail: consuelo.nava@unirc.it

**Alessandro Melis** is the first Chair of the IDC Foundation and Professor at the School of Architecture and Design of the New York Institute of Technology (USA). In 2021, he was Curator of the Italian Pavilion at the Venice Biennale and was appointed Ambassador of Italian Design in 2021 in Paris and 2022 in New York and Washington. He was Director of the International Cluster for Sustainable Cities at the University of Portsmouth and Director of Postgraduate Engagement at the University of Auckland. His research topics include studies of architecture and palaeontology, the visioning of resilient communities in climate change scenarios, and transdisciplinary insights into exactitude in architecture. Email: amelis@nyit.edu



Come premessa assumiamo una visione più ampia dell'uso dell'IA nella sua applicazione all'ingegneria e all'architettura incentrata sull'uomo, richiamando un importante contributo della letteratura recente, pubblicato sulla rivista *Computers in Human Behavior Reports*, dal titolo *Towards Human-centered Artificial Intelligence (AI) in Architecture, Engineering, and Construction (AEC) Industry* (Rafsanjani and Nabizadeh, 2023, p. 1) in cui si considera «[...] Human-centered AI, mainly via natural language processing and machine reading comprehension, can understand and learn from human interests, preferences, languages, and behaviors for providing human-centered environments, systems, and approaches that satisfy human interests and preferences». Come benefici chiave si prevede che l'Intelligenza Artificiale (IA) incentrata sull'uomo porti all'ottimizzazione dell'elaborazione architettonica, al miglioramento delle capacità di progettazione e ingegnerizzazione, alla gestione dei progetti basata sui dati, al miglioramento della collaborazione e al potenziamento della sicurezza.

La personalizzazione dell'IA incentrata sull'uomo e la formazione dei suoi sistemi sono considerate le sfide principali nello sviluppo di questa tecnologia nel settore AEC. È chiaro che si stanno prendendo in considerazione anche i rischi di un tale utilizzo, il che supporta anche il Rapporto 2023 del WEF, in cui la mappa dell'impatto delle tecnologie emergenti sulla percezione delle comunità rivela un senso di paura e sfiducia verso l'uso di tali tecnologie avanzate, una importante sfida sociale (WEF, 2023).

Non si può negare che l'IA in architettura svolga un ruolo importante nei processi di automazione, ma nelle condizioni specifiche in cui il mondo fisico deve essere collegato al mondo digitale e viceversa, attraverso un processo che coinvolge la modellazione nella ricerca applicata, cambia l'approccio stesso alla progettazione (Nava, 2024). Un nuovo rapporto tra progetto, tecnologia e nuova cibernetica si profila in ambito di transizione digitale ed ecologica in cui la stessa cibernetica «[...] diventa allo stesso tempo il modello attraverso cui interpretiamo la realtà e la struttura di assiomi e regole di trasformazione tramite cui strutturiamo il nostro agire razionale» (Zaffagnini and Palmi, 2022, p. 25).

Questo approccio integrativo enfatizza l'accoppiamento degli algoritmi di IA – principalmente quelli coinvolti nell'apprendimento automatico (ML) e nell'apprendimento profondo (DL) – con suggerimenti in linguaggio naturale per facilitare i processi decisionali nella fase di pre-progettazione. Tali suggerimenti fungono da 'ponti' linguistici, guidando l'IA verso risposte ottimali che non sono solo basate sull'immagine, ma anche radicate negli aspetti funzionali, performativi ed esperienziali del design.

La sfida consiste quindi nel creare un ambiente di progettazione generativa in cui le capacità dell'IA non siano semplicemente reattive, ma si impegnano attivamente nella complessità della progettazione guidata dai dati; ciò comporta l'utilizzo di reti neurali e algoritmi genetici (Russell and Norvig, 2016) per prevedere e visualizzare le prestazioni ambientali, i comportamenti degli utenti e le risposte dei materiali (Abdel-Rahman et alii, 2019). Posizionando l'IA all'interno di questo quadro più ampio di progettazione digitale rigenerativa, i progettisti possono gestire in modo più efficace obiettivi contrastanti, come bilanciare l'efficienza energetica con le preferenze estetiche o ottimizzare la so-

stenibilità senza compromettere la funzionalità (Melis, Pievani and Lara-Hernandez, 2024).

**Un nuovo metodo di design: verso un nuovo flusso di lavoro con approcci integrativi all'IA e alla progettazione parametrica** | L'attuale dibattito sulla Progettazione Assistita dall'Intelligenza Artificiale (AIAD) tende a focalizzarsi sulle capacità di text-to-image, come esemplificato da sistemi quali Dall-E 2, Stable Diffusion e MidJourney (Melis, Fadhil and Battistoni, 2024). Sebbene questi strumenti eccellano nella generazione di contenuti visivi informati da suggerimenti chiave, essi rappresentano solo un aspetto del più ampio potenziale dell'IA. L'integrazione dell'IA nei processi di progettazione parametrica, che tradizionalmente si basano su modelli matematici per simulare le condizioni climatiche e ottimizzare le prestazioni ambientali, suggerisce un'applicazione dell'IA più ricca di quella attualmente in uso. Sorge quindi la domanda: come può l'IA generativa, in particolare i modelli di DL, essere sfruttata più efficacemente per affrontare le sfide della progettazione che comprendono dimensioni ambientali, sociali e tecnologiche complesse?

In questo contesto è importante affrontare il processo di discretizzazione, ovvero il metodo di scomporre i dati continui in intervalli discreti a fini computazionali. La discretizzazione è un passaggio cruciale quando si utilizzano strumenti di simulazione ambientale (ad esempio Lady Bug ed ENVI-met) e la capacità dell'IA di elaborare grandi quantità di dati offre un'opportunità interessante per perfezionare i modelli predittivi nell'ambito degli scenari climatici. Unendo questi strumenti con algoritmi generativi basati sull'IA emerge un nuovo flusso di lavoro, in cui l'IA contribuisce alla fase di pre-progettazione attraverso continui cicli di feedback che affinano e migliorano le soluzioni progettuali (Melis, Pievani and Lara-Hernandez, 2024).

Il processo rigenerativo, inteso nelle sue relazioni di produzione e scambio di dati-informazioni-risorse, è stato più volte descritto nel suo profilo innovativo come capace di guidare la progettazione e la discussione dei temi della sostenibilità in modo 'avanzato' e con risultati di 'alta performatività', in grado di lavorare per scenari di adattamento e mitigazione del clima, rispondendo a diversi stati di impatto sull'ecosistema fisico. Da un punto di vista digitale è in grado di produrre e scambiare visioni preventive e predittive: il design rigenerativo assume così un carattere organizzativo per individuare opzioni che portino a nuove soluzioni attraverso l'uso di tecnologie adattive. In effetti il design ecologico e sostenibile ha sempre avuto nella sua natura la capacità di comprendere la necessità della sua struttura argomentativa e processuale (Nava, 2023).

Si propone quindi la costruzione di un nuovo flusso di lavoro che rifonda metriche, pratiche, piattaforma, strumenti, interazioni (Nava, 2022b), reinterpretando il quadro operativo adottato della progettazione rigenerativa di tipo socio-ecologico. La sua operatività si fonda tra la fase degli strumenti che praticano l'ottimizzazione multi-obiettivo e la fase delle interazioni; tale processo, secondo l'approccio del salto di scala, introduce, attraverso processi di DL, gli strumenti di modellazione diffusa per la produzione di immagini dal testo, che si collocano nelle stesse interazioni come spazio di discretizzazione per la visualizzazione di opzioni di scenario o tempi di scenario, la cui visualizzazione è prodotta con l'IA.

Poiché il carattere incentrato sull'uomo è fortemente enfatizzato, a causa della necessità di produrre tali visualizzazioni, dalla selezione generativa personalizzata ai fini della formulazione predittiva e prescrittiva di interventi sugli scenari emergenti, si è proceduto a sviluppare un nuovo quadro operativo che viene illustrato in Figura 1. È chiaro che alcune delle metriche sono alimentate dai nuovi paradigmi e che le stesse vengono messe in discussione come tecnologie operative. Le pratiche sono discusse nella capacità di realizzare prototipi digitali e fisici che tracciano la 'forma generativa' delle immagini create con l'IA su scenari di simulazione ottenuti dal processo rigenerativo<sup>1</sup>. La piattaforma operativa rimane 'dati / informazioni / risorse', dove è evidente che i dati e le informazioni degli algoritmi di IA si aggiungono a quelli dei processi rigenerativi, estendendo il contenuto del DL attraverso la definizione dei caratteri della visualizzazione informatica.

Le attività di ricerca condotte da ABITAlab sulle tecnologie abilitanti i processi di innovazione (Nava, 2019; Weber and Rohrer, 2012), fin dalla loro prima sperimentazione, esprimono attraverso la digitalizzazione un sapere esperto nel rapporto tra 'dati / informazioni / risorse', con l'ambizione di definirne ambiti 'intelligenti' di operatività e prodotti evoluti in termini di innovazione tecnologica di tipo incrementale. L'impatto sociale di tale scenario evoluto è differenzialmente registrabile in termini di prodotti immateriali e materiali, valutando l'efficienza del funzionamento di dispositivi, reti, strumentazioni e processi ottimizzati.

Nel settore industriale, con particolare riferimento alle costruzioni, lo sviluppo sperimentale è applicato a esercizi sul metabolismo urbano, sull'ecologia e circolarità delle risorse, sull'automazione dell'housing, sul cantiere evoluto industrializzato disposto dal design digitale, fino alla capacità del progetto di gestire e operare con una quantità di dati e quindi di informazioni per il processo progettuale, mai esperito prima, e alla capacità di optare tra strategie e configurazioni alternative per le scelte più complesse in ambito di trasformazione dell'ambiente costruito (Nava, 2024; Mussinelli, 2023).

Le attività di ricerca condotte da ABITAlab sulle tecnologie emergenti per i processi più avanzati e ad alto impatto ecologico (Nava, 2023), assorbendo il dato digitale dalle KETs (Key Enabling Technologies), operano all'interno di livelli di conoscenza e del loro trasferimento, al fine di aumentare la consapevolezza degli utenti finali sui prodotti e sui processi, verso l'uso di dispositivi sempre più performanti, la cui innovazione di tipo radicale spinge a che la diffusione della disponibilità degli stessi e il loro uso produca un alto impatto socio-tecnico, rappresentando la necessità di evolvere la scienza verso i confini più estremi, ma anche più indirizzati a ottenere i livelli più alti di qualità totale e di benessere degli utenti.

I processi rigenerativi studiati e organizzati per il progetto ambientale alla scala territoriale, urbana e di cluster rappresentano la più efficace condizione con cui le tecnologie emergenti connettono le strumentazioni più evolute con l'interfaccia dei comportamenti umani, come condizione principale del successo degli stessi esercizi applicati. Si pensi alla capacità della prototipazione alla scala 1:1 di personalizzare i prodotti (compreso le case) e alle condizioni per cui la circolarità delle risorse investe un secondo livello di uso delle stesse, avanzando le

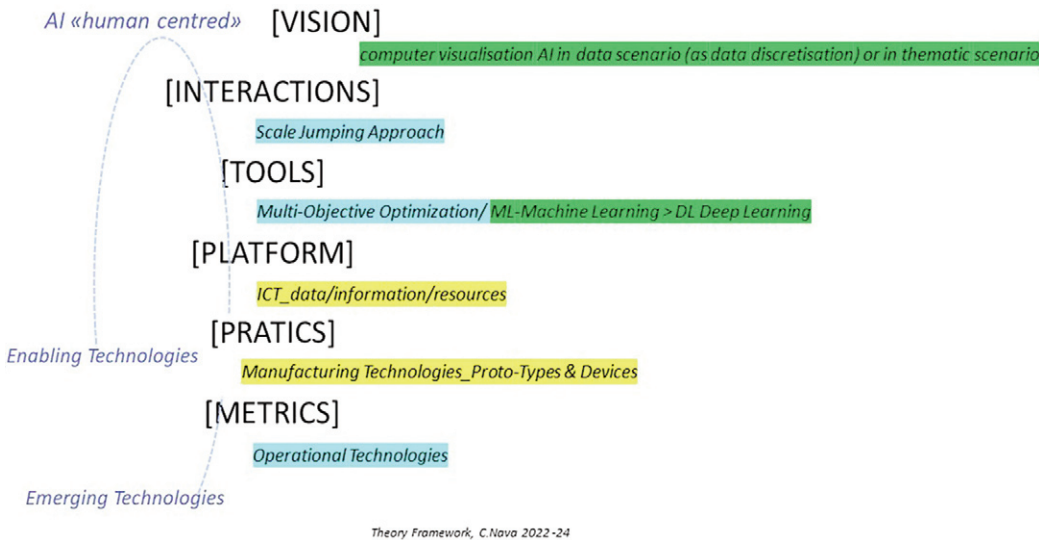
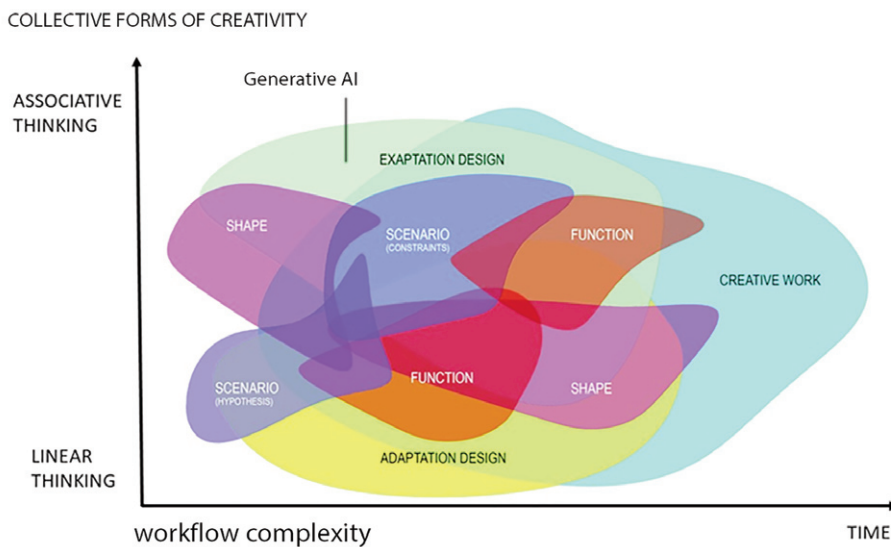


Fig. 1 | New Re-Generative Digital Design framework (credit: C. Nava, 2024).

Fig. 2 | Diagram describing the complexity of the design workflow extended to 'exaptation' mechanisms (credit: the Authors, 2024).



teorie del riciclo con quelle dell'upcycling per tecnologie e prodotti migliorati.

E ancora, all'uso dell'IA, come opportunità per aumentare la propria condizione previsionale del progetto urbano e di architettura in scenari rigenerativi in cui il design dell'ottimizzazione e del 'salto di scala' divengono nuovi livelli di operatività del progetto predittivo e interscalare. E infine si pensi al settore dei materiali avanzati, capaci di ibridare la materia di tipo biogenica con quella di tipo antropogenica, ai fini dei processi di decarbonizzazione ancora troppo impattanti, come quelli che operano attraverso i processi costruttivi di tipo industriale (Nava, 2024; Yildirim, 2022).

**Verso l'applicazione al design rigenerativo: approccio multidominio, ottimizzazione e salto di scala** | Il ruolo dell'IA nel promuovere la creatività e affrontare la complessità è strettamente allineato alla sua capacità di interpretare e agire su grandi insiemi di dati multidimensionali (Fig. 2). Nell'ambito della progettazione urbana e dell'architettura l'integrazione dell'IA offre un modo per andare oltre le singole narrazioni dello spazio e verso approcci più olistici, adattabili e resilienti; questa capacità di sintesi interdisciplinare sottolinea il potenziale dell'IA come mediatore tra le dimensioni tangibili e intangibili della progettazione architettonica.

L'IA può funzionare non solo come generatore di immagini, ma anche come motore per la 'geo-

strategizzazione', ossia per l'analisi dei dati geografici insieme a fattori comportamentali, culturali e ambientali per informare le strategie di progettazione adattiva. Queste strategie si estendono a una miriade di applicazioni, dalla previsione dell'utilizzo dell'energia e dal monitoraggio delle prestazioni degli edifici fino al miglioramento delle esperienze degli utenti e all'immaginazione di scenari urbani futuri (Melis and Pievani, 2022).

L'idea della 'mutazione per diffusione', che è la tecnica di trasformazione e generazione di immagini attraverso i sistemi di IA, serve come punto di partenza per considerare come l'IA generativa potrebbe analogamente 'mutare' i paradigmi tradizionali del design. Il processo di progettazione diventa un dialogo iterativo tra l'intuizione umana e l'intelligenza della macchina, in cui i confini tra creatore e strumento diventano sempre più labili: è qui che l'IA funge da catalizzatore per la 'exaptation' (termine usato per descrivere come strutture o concetti esistenti vengono cooptati per nuove funzioni) spingendo i designer a ripensare e riconfigurare le relazioni spaziali e funzionali all'interno del loro lavoro (Melis, Pievani and Lara-Hernandez, 2024).

Inoltre la nozione di creatività collettiva emerge come elemento cruciale di questo discorso; piuttosto che rafforzare una divisione binaria tra umani e macchine, l'IA favorisce una partnership simbiotica in cui il design è un processo esattivo che consente alle idee di evolvere oltre i vincoli lineari della

coscienza. Ciò si allinea con la tesi più ampia secondo cui la creatività è intrinsecamente associativa, emergendo attraverso reti di influenza, collaborazioni interdisciplinari e cicli di feedback iterativi: l'IA diventa quindi un amplificatore di queste connessioni, aprendo nuovi percorsi di sperimentazione ed esplorazione. Su tali premesse è quindi possibile costruire un nuovo flusso di lavoro, di tipo rigenerativo, in grado di lavorare su domini digitalmente connessi e informati sia da strumenti di data-climate, che utilizzano la modellazione parametrica (Naboni and Havinga, 2019; Nava, 2022a), sia da informazioni prodotte (immagini) con la modellazione diffusa che utilizza processi di AI, le cui fasi possono essere descritte come segue:

- Fase 1, costruzione del quadro operativo che mostra i domini collegati digitalmente (intento progettuale, processo e risultati del quadro);
- Fase 2, correlazione degli obiettivi ai dati e individuazione delle relazioni con gli oggetti dello studio, attraverso la personalizzazione dei componenti realizzata con la modellazione parametrica (Figg. 3-5);
- Fase 3, accoppiamento tra le attività di generazione degli oggetti e l'azione degli strumenti di rigenerazione;
- Fase 4, salto di scala 1 con comprensione degli obiettivi in conflitto, multidominio e ottimizzazione degli obiettivi e prima visualizzazione dei modelli predittivi sugli scenari climatici (Figg. 6-8);
- Fase 5, salto di scala 2 con analisi dell'integrazione multidominio attraverso il Machine Learning Regenerative Digital Design e dell'integrazione multidominio attraverso il Deep Learning (Figg. 9, 10);
- Fase 6, produzione di modelli di previsione e delle relative immagini attraverso operazioni di text-to-image e di visualizzazione computerizzata AI in uno scenario di dati (come discretizzazione dei dati) o in uno scenario di tipo informatico (Fig. 11).

Nel contesto del design digitale rigenerativo e della sua attenzione agli scenari climatici (IPCC, 2023), i principi della 'exaptation' possono guidare il processo creativo verso soluzioni adattive e multifunzionali. La ridondanza insita in molti sistemi di progettazione – sotto forma di spazio in eccesso, resistenza strutturale o proprietà dei materiali – non deve essere vista come uno spreco, ma come una riserva di possibili innovazioni. Ciò è in linea con il concetto di evolvibilità nella biologia evolutiva, dove le caratteristiche apparentemente inefficienti di un organismo contengono il potenziale per futuri

THERMAL COMFORT UTCI

OUTDOOR SOLAR TEMPERATURE ADJUSTOR MRT

OUTDOOR COMFORT CALCULATOR

PLOT DATA

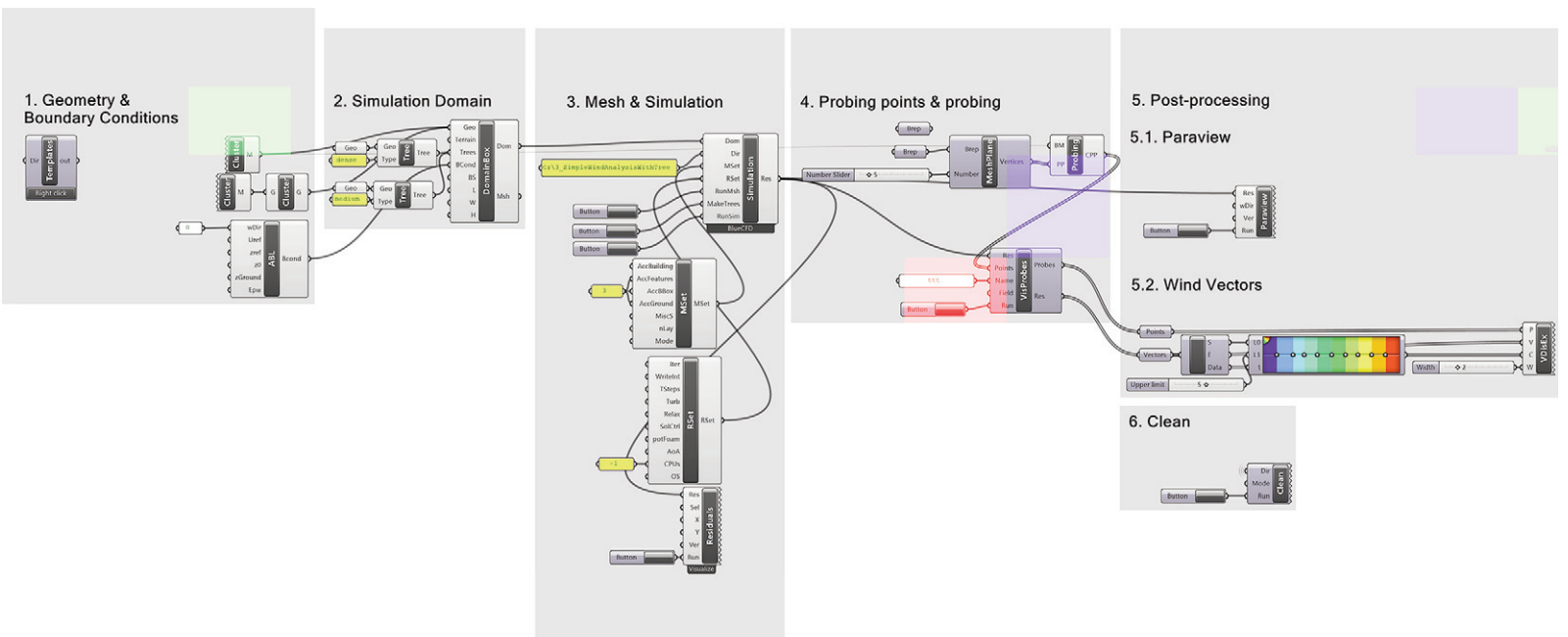
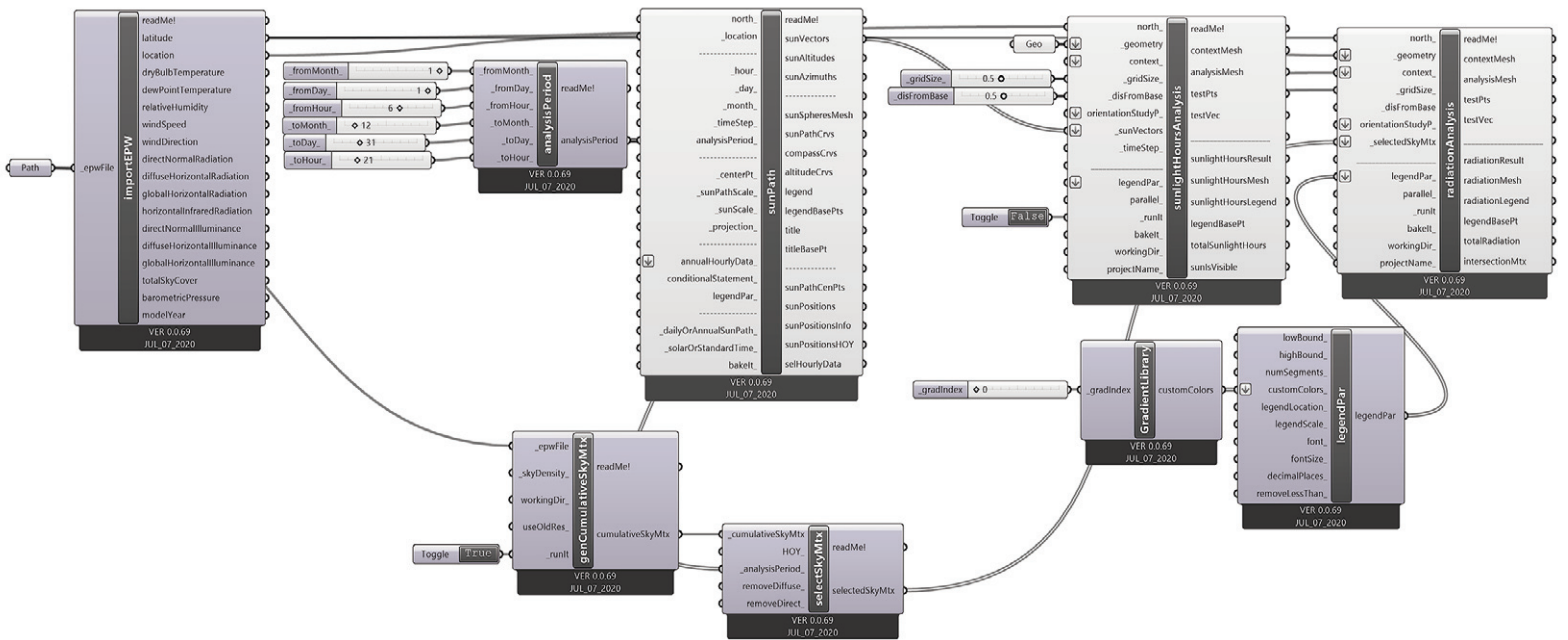
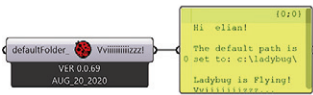
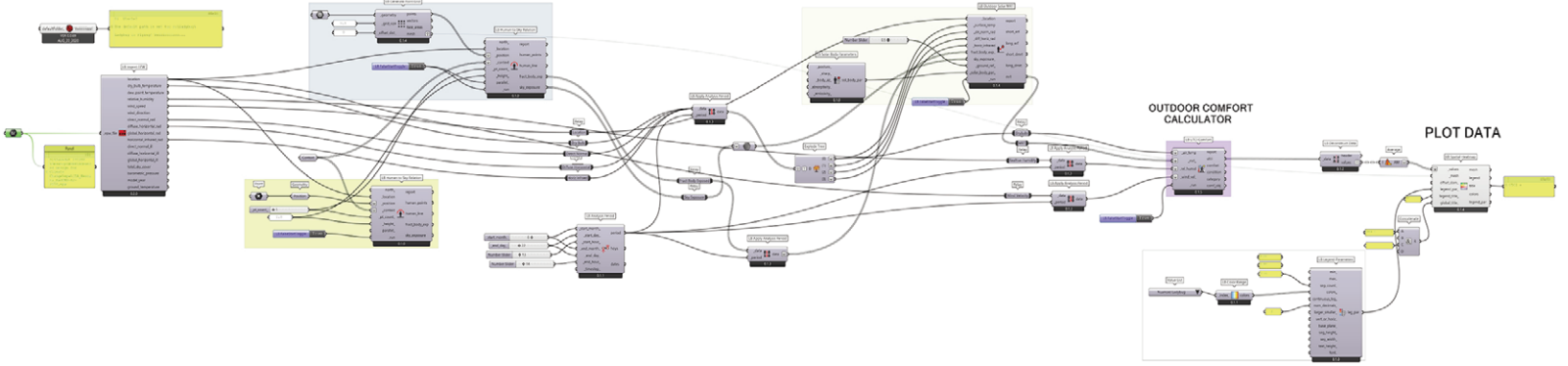


Fig. 3 | Phases 2 and 3: script developed for the thermal comfort analysis of the workflow process with Grasshopper / Plug-in (credit: ABITAlab; processed by D. Laganà, 2023).

Fig. 4 | Phases 2 and 3: script developed for the Sunlight Hours Analysis and Solar Radiation Analysis (credit: ABITA

Fig. 5 | Phases 2 and 3: script developed for Wind Flow Analysis (credit: ABITAlab; processed by E. Catalano, 2024).

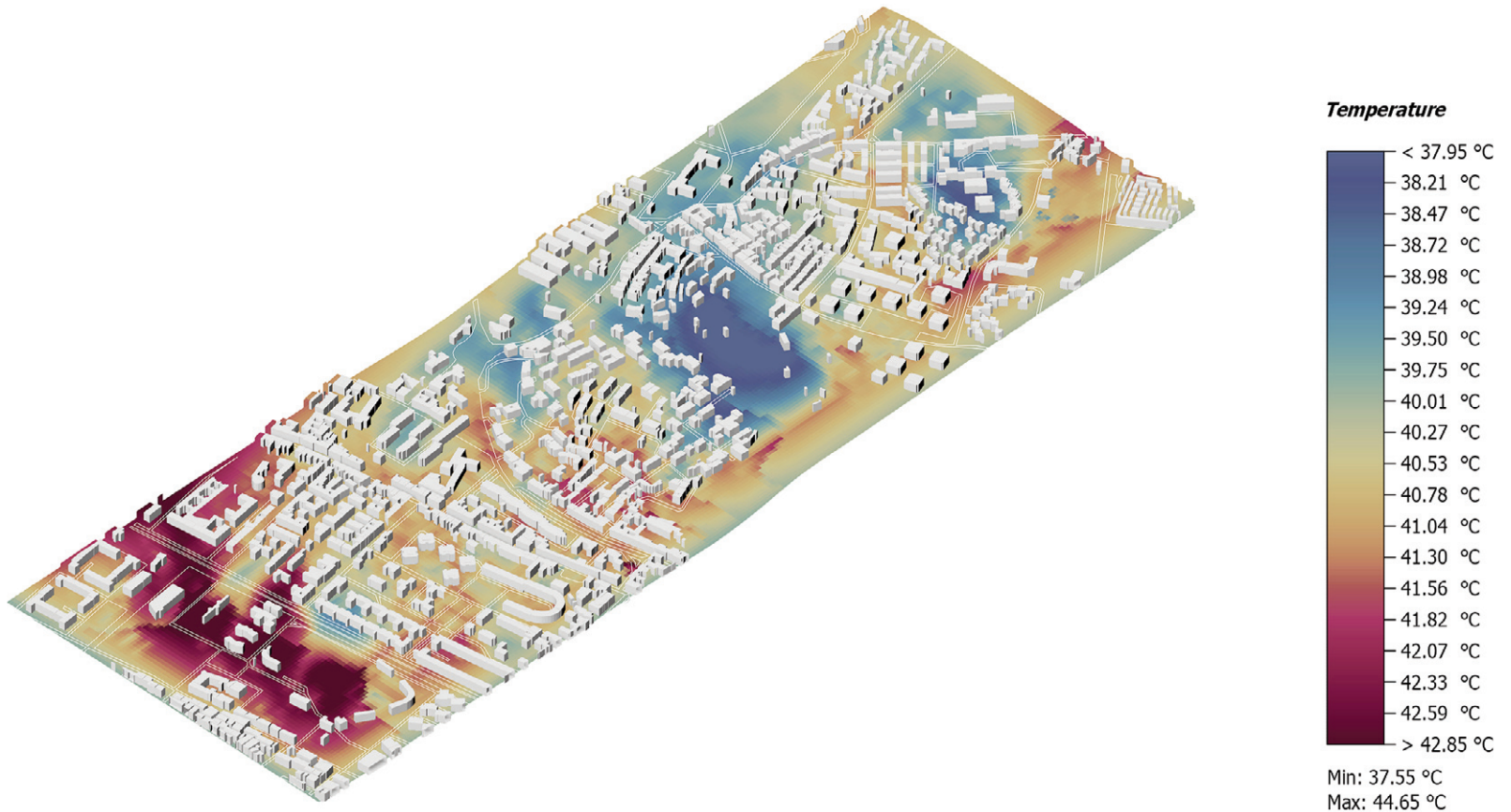


Fig. 6 | Step 4: Visualisation of the Reggio Cal.Sud temperature cluster, processed with ENVI-met scenario 2050, critical day 11 July (credit: ABITAlab; processed by E. Catalano, 2024).

adattamenti e risposte ai cambiamenti ambientali (Pievani and Serrelli, 2011).

**Riflessioni conclusive sulla convergenza della complessità: exaptation, ridondanza e potenzialità del design adattivo** | Nei processi di progettazione parametrica la flessibilità di simulare e regolare un'ampia gamma di variabili consente di esplorare le opportunità latenti all'interno di uno spazio di progettazione. Le capacità generative dell'IA migliorano ulteriormente questo processo, consentendo ai progettisti di esplorare diverse permutazioni e percorsi che potrebbero non essere immediatamente evidenti. I sistemi di intelligenza artificiale, attraverso l'apprendimento profondo, possono aiutare a riconoscere i modelli di ridondanza o di potenziale inutilizzato all'interno di dati e strutture, consentendo di cooptare questi elementi per nuovi scopi, in modo simile all'adattamento nei sistemi biologici (Tattersall, 2010).

La convergenza dell'IA generativa e della complessità del design apre nuove strade per esplorare il potenziale dell'adattamento all'interno delle pratiche creative. Sfruttando l'IA per modellare, prevedere e suggerire usi alternativi per gli elementi di design, i professionisti possono andare oltre i tradizionali schemi adattivi e abbracciare l'imprevedibilità intrinseca dei sistemi complessi. Questa prospettiva non solo arricchisce il processo creativo, ma si allinea anche a un'etica di sostenibilità e resilienza in cui la ridondanza e la multifunzionalità diventano risorse per rispondere ai mutevoli contesti ambientali e sociali.

In sintesi la complessità nel design, intesa attraverso la lente evolutiva dell'adattamento, enfatizza la fluidità della forma e della funzione e inco-

raggia l'apertura alle possibilità emergenti dei sistemi di progetto. Integrando questi principi nei flussi di lavoro assistiti dalla IA e nei processi di progettazione parametrica i designer possono coltivare una pratica adattabile, innovativa e profondamente in sintonia con il potenziale di trasformazione creativa (Figg. 12, 13).

Comprendere la complessità del design attraverso la lente della 'exaptation' (Fig. 14) significa riconoscere che l'origine e lo sviluppo delle caratteristiche del design non sono sempre lineari o guidati dallo scopo: come le ali dell'airone nero, inizialmente adattate per la termoregolazione e in seguito cooptate per proiettare ombre atte a catturare le prede (McLachlan and Liversidge, 1972), gli elementi di design possono servire a scopi multipli e stratificati nel tempo. In architettura ciò potrebbe manifestarsi come spazi o materiali originariamente destinati a un uso che vengono ripensati in risposta a esigenze culturali o ambientali in evoluzione.

Questi spostamenti funzionali sono parte integrante della pratica della progettazione creativa, in cui le strutture non sono solo modellate per gli scopi previsti, ma anche dalle opportunità impreviste che si presentano al designer. Il concetto di 'spandrels' – spazi architettonici che emergono come sottoprodotto di vincoli strutturali, ma che forniscono un valore estetico o funzionale non previsto – funge da metafora per questo tipo di complessità (Gould and Vrba, 1982): proprio come gli 'spandrels' in biologia si riferiscono a tratti non adattivi poi cooptati per nuovi usi, così anche gli elementi di design architettonico e urbano possono emergere da vincoli e poi essere riutilizzati, fornendo un'opportunità per applicazioni innovative e funzionalità migliorate.

La 'exaptation' evidenzia pertanto il valore della polifunzionalità e della ridondanza, caratteristiche che, pur essendo apparentemente inefficienti o costose, fungono da riserva di potenziali trasformazioni. Così come il 'DNA spazzatura' ridondante del genoma umano funge da deposito per futuri geni funzionali (Pievani and Serrelli, 2011), anche gli elementi di design all'interno dell'architettura, dell'urbanistica e dei sistemi ambientali possono contenere possibilità latenti di riutilizzo. Questa prospettiva invita i progettisti a considerare la complessità non come una sfida da controllare, ma come un terreno fertile per scoprire allineamenti inaspettati e funzioni emergenti, con la necessità però di controllare anche l'impatto socio-etico che l'uso di tecnologie emergenti e approcci multiscalarari producono nell'avanzamento di processi di innovazione distruttiva e radicale, per affrontare le sfide più globali verso la neutralità climatica e carbonica (Wiarada and Doorn, 2023).

As a premise, we take a broader view of the use of human-centred AI in its application to engineering and architecture, recalling an essential contribution from the recent literature published in the journal *Computers in Human Behavior Reports*, entitled *Towards Human-centred Artificial Intelligence (AI) in Architecture, Engineering, and Construction (AEC) Industry* (Rafsanjani and Nabizadeh, 2023, p. 1) which considers «[...] Human-centered AI, mainly via natural language processing and machine reading comprehension, can understand and learn from human interests, preferences, languages, and behaviours for providing human-centred environments, systems,

and approaches that satisfy human interests and preferences». As key benefits, human-centred Artificial Intelligence (AI) is expected to lead to optimised architectural processing, improved design and engineering capabilities, data-driven project management, collaboration, and enhanced security.

The personalisation of human-centred AI and the training of its systems are considered the main challenges in developing this technology in the AEC sector. The risks of such use are also being considered, which also supports the WEF's 2023 Report, in which the map of the impact of emerging technologies on community perceptions reveals a sense of fear and distrust towards the use of such advanced technologies, a major societal challenge (WEF, 2023).

It cannot be denied that AI in architecture plays a vital role in automation processes, but in the specific conditions where the physical world needs to be connected to the digital world and vice versa, through a process involving modelling that, especially in applied research, changes the very approach to design (Nava, 2024). A new relationship between design, technology and the new cybernetics looms in the digital and ecological transition in which cybernetics itself «[...] becomes both the paradigm through which we interpret reality and the system of assumptions and rules that guides our rational agency» (Zaffagnini and Palmini, 2022, p. 31).

This integrative approach emphasises coupling AI algorithms – mainly those involved in machine learning (ML) and deep learning (DL) – with

natural language suggestions to facilitate decision-making processes in the pre-design phase. Such suggestions act as linguistic ‘bridges’, guiding AI towards optimal responses that are not only image-based but also rooted in design’s functional, performative and experiential aspects.

The challenge is, therefore, to create a generative design environment in which AI capabilities are not merely reactive but actively engage in the complexity of data-driven design. This involves using neural networks and genetic algorithms (Russell and Norvig, 2016) to predict and visualise environmental performance, user behaviour and material responses (Abdel-Rahman et alii, 2019). By positioning AI within this broader regenerative digital design framework, designers are faced with more effectively managing conflicting goals, such as balancing energy efficiency with aesthetic preferences or optimising sustainability without compromising functionality (Melis, Pievani and Lara-Hernandez, 2024).

**A new design method: towards a new workflow with integrative approaches to AI and parametric design**

The current debate on Artificial Intelligence Assisted Design (AIAD) tends to focus on text-to-image capabilities, as exemplified by systems such as Dall-E 2, Stable Diffusion, and Mid-Journey (Melis, Fadhil and Battistoni, 2024). Although these tools excel in generating visual content informed by key prompts, they represent only one aspect of the broader potential of AI. Integrating AI into parametric design processes, which tra-

ditionally rely on mathematical models to simulate climatic conditions and optimise environmental performance, suggests a more prosperous AI application than is currently in use. The question then arises: how can generative AI, particularly DL models, be more effectively harnessed to address design challenges that include complex environmental, social and technological dimensions?

In this context, it is essential to address the discretisation process, i.e., decomposing continuous data into discrete intervals for computational purposes. Discretisation is a crucial step when using environmental simulation tools (e.g., Lady Bug and ENVI-met), and the ability of AI to process large amounts of data offers an exciting opportunity to refine predictive models in the context of climate scenarios. Combining these tools with AI-based generative algorithms generates a new workflow in which AI contributes to the pre-design phase through continuous feedback loops that refine and improve design solutions (Melis, Pievani and Lara-Hernandez, 2024).

The regenerative process, understood in its relations of production and exchange of data-information-resources, has been repeatedly described in its innovative profile as capable of guiding the design and discussion of sustainability issues in an ‘advanced’ way and with ‘high performativity’ results, able to work for climate adaptation and mitigation scenarios, responding to different states of impact on the physical ecosystem. From a digital perspective, it can produce and exchange preven-

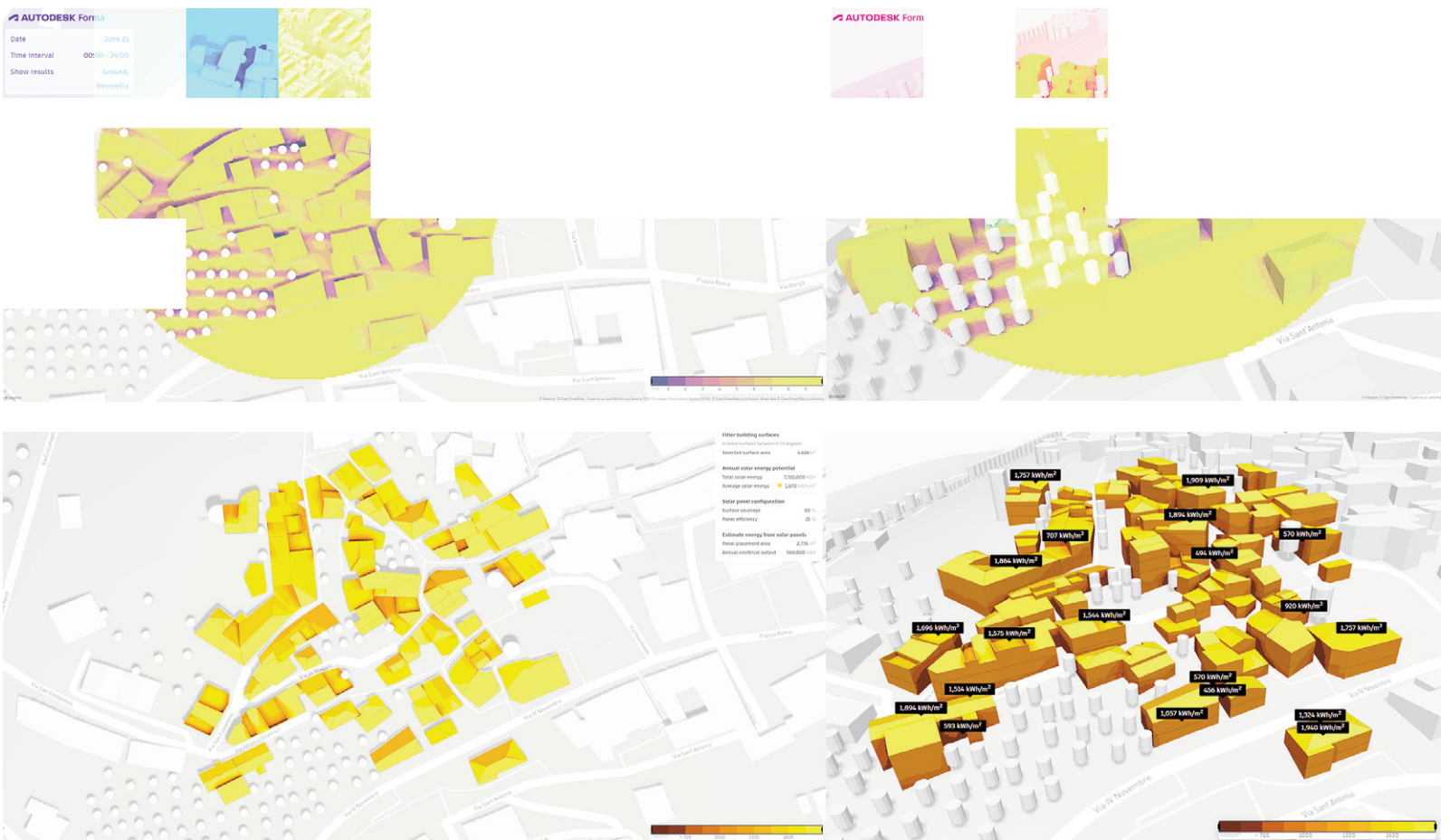
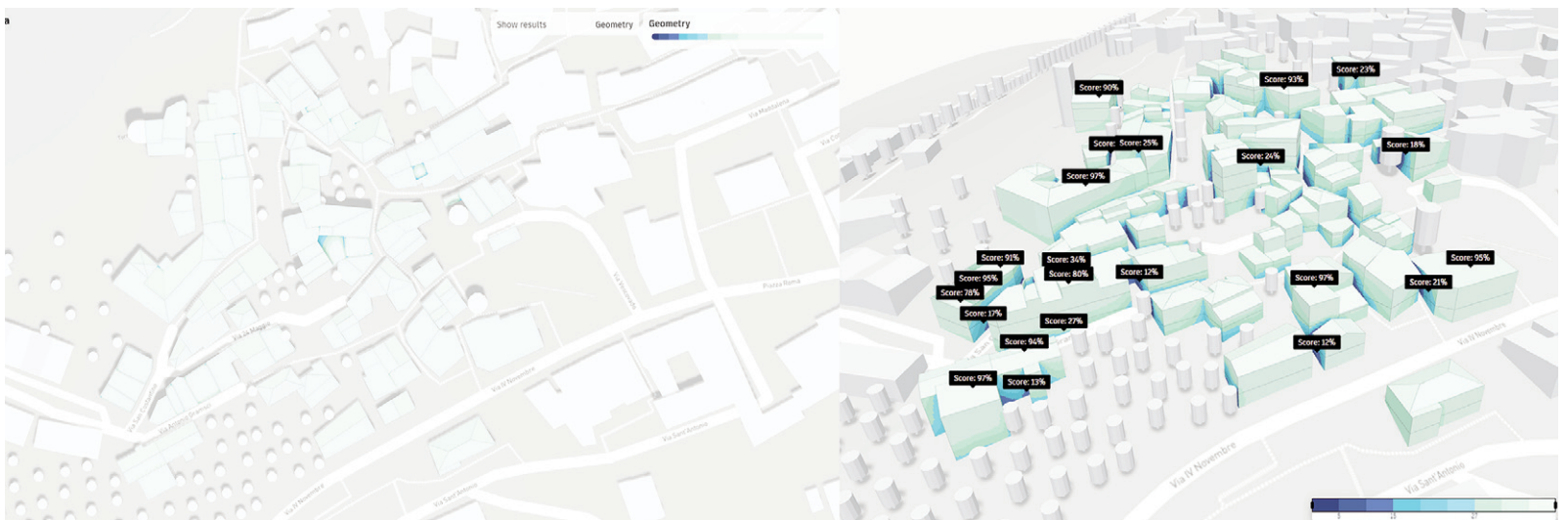
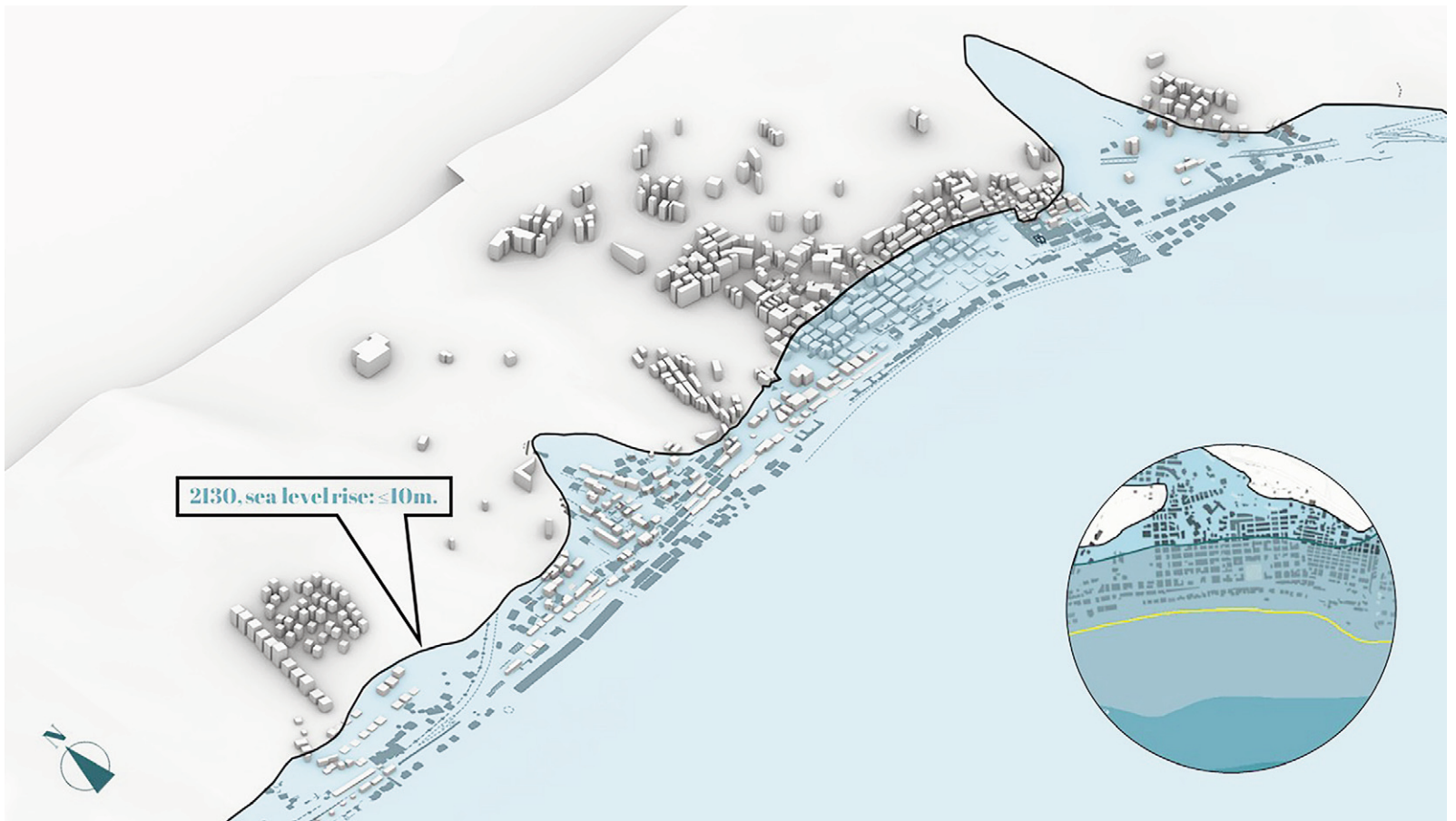
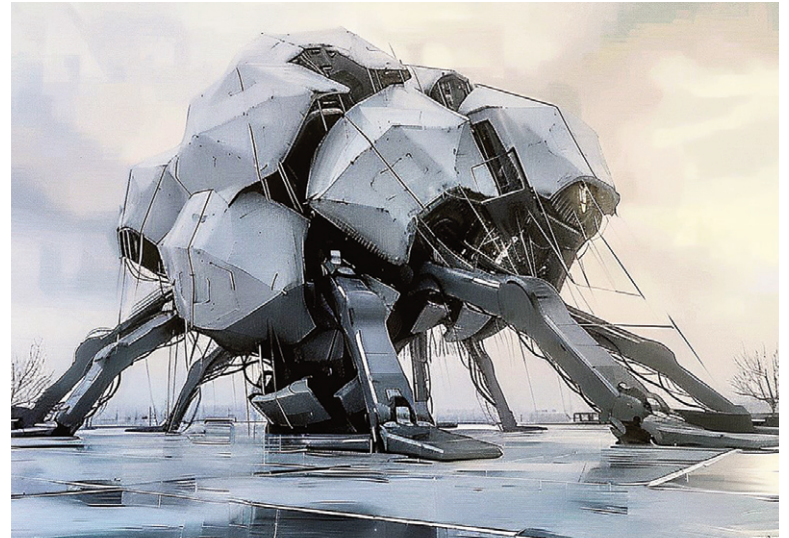
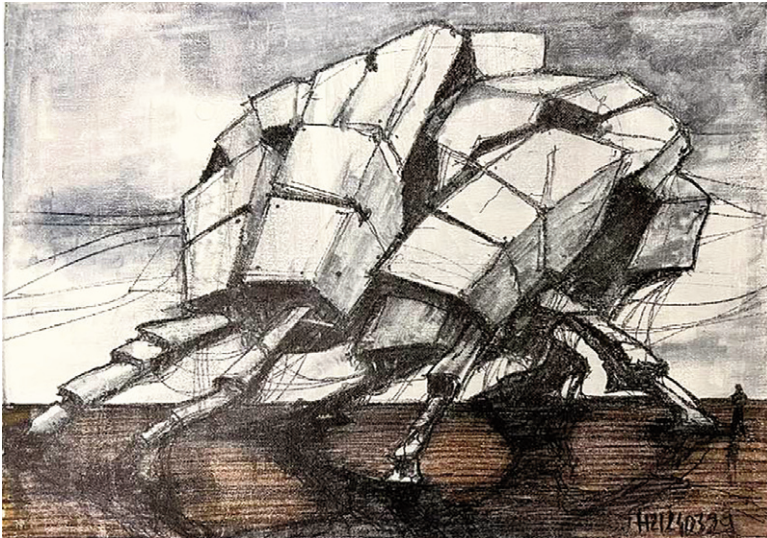


Fig. 7 | Step 4: Sunlight Hours Analysis for a cluster in Bova (RC) on 21 June 2023 processed with Forma Autodesk (credit: ABITAlab; processed by E. Catalano, 2024).

Fig. 8 | Phase 4: Radiation Analysis on a building cluster in Bova (RC, IT) for 21 June 2023, highlighting the highest solar exposure values (figure on right) processed with Forma Autodesk (credit: ABITAlab; processed by E. Catalano, 2024).



**Fig. 9** | Phase 5: model on flooding / rising effect studies on the Bova coastline, prepared for Medways (credit: ABITAlab, 2021).  
**Fig. 10** | Step 5: model on Daylight Potential Analysis for a building cluster in Bova (RC), simulated for 21 June 2023, highlighting the brightest values (figure on right) processed with Forma Autodesk (credit: ABITAlab; processed by E. Catalano, 2024).  
**Fig. 11** | Thematic scenery visualised on the computer (credit: V. Cordi, 2024).



Figg. 12, 13 | Land Bug Machine H21240328: acrylic and ink on canvas, new painting series; analogue exaptation on generative AI (credits: A. Melis).

tive and predictive visions: regenerative design thus takes on an organisational character to identify options that lead to new solutions through adaptive technologies. Indeed, ecological and sustainable design has always had in its nature the ability to understand the necessity of its argumentative and processual structure (Nava, 2023).

Therefore, it is proposed to construct a new workflow that recasts metrics, practices, platforms, tools, and interactions (Nava, 2022b), reinterpreting the adopted operational framework of socio-ecological regenerative design. Its operationalisation is founded between the phase of tools practising multi-objective optimisation and the phase of interactions; this process, according to the scale leap approach, introduces, through DL processes, the diffuse modelling tools for the production of images from text, which are placed in the same interactions as a discretisation space for the visualisation of scenario options or scenario times, the visualisation of which is produced with AI.

As the human-centred nature is strongly emphasised due to the need to produce such visualisations by customised generative selection for predictive and prescriptive formulation of interventions on emerging scenarios, a new operational framework has been developed and illustrated in Figure 1. Practices are discussed in the ability to create digital and physical prototypes that trace the 'generative form' of images created with AI on simulation scenarios obtained from the regenerative process<sup>1</sup>. The operational platform remains 'data / information / resources', where it is evident that the data and information of the AI algorithms are added to those of the regenerative processes, extending the content of the DL through the character definition of computer visualisation.

The research activities conducted by ABITAlab on the technologies enabling innovation processes (Nava, 2019; Weber and Rohrer, 2012), since their first experimentation, express through digitisation an expert knowledge in the relationship between 'data / information / resources', with the ambition of defining 'intelligent' spheres of operation and evolved products in terms of incremental technological innovation. The social impact of this evolved scenario can be differentially recorded in terms of intangible and material products, evaluating the ef-

iciency of optimised devices, networks, instruments and processes.

In the industrial sector, with particular reference to construction, experimental development is applied to exercises on urban metabolism, the ecology and circularity of resources, the automation of housing, and the evolved industrialised construction site arranged by digital design, up to the ability of the project to manage and operate with a quantity of data and thus of information for the design process, never experienced before, to the ability to opt between alternative strategies and configurations for the most complex choices in the sphere of transformation of the built environment (Nava, 2024; Mussinelli, 2023).

The research activities carried out by ABITAlab on emerging technologies for the most advanced processes with a high ecological impact (Nava, 2023), absorbing digital data from KETs (Key Enabling Technologies), operate within levels of knowledge and their transfer to increase end-users' awareness of products and processes, towards the use of increasingly high-performance devices, whose radical innovation pushes the spread of their availability and use to produce a high socio-technical impact, representing the need to evolve science towards the most extreme boundaries, but also more aimed at achieving the highest levels of total quality and user welfare. The regenerative processes studied and organised for environmental design at the territorial, urban and cluster scale represent the most effective condition by which emerging technologies connect the most advanced instrumentation with the interface of human behaviour as the primary condition for the success of the same applied exercises. One thinks of the capacity of prototyping on a 1:1 scale to customise products (including houses), of the conditions whereby the circularity of resources invests a second level of resource use, advancing theories of recycling with those of upcycling for improved technologies and products.

Again, AI is an opportunity to increase the already predictive status of urban and architectural design in regenerative scenarios in which optimisation and 'leap of scale' design become new levels of predictive and inter-scalar design operation. Finally, think of the sector of advanced materials, capable of hybridising biogenic type matter with anthropogenic type matter for decarbonisation pro-

cesses that are still too impactful, such as those operating through industrial-type construction processes (Nava, 2024; Yildirim, 2022).

#### Towards application to regenerative design: multi-domain approach, optimisation and leap of scale

The role of AI in fostering creativity and addressing complexity is closely aligned with its ability to interpret and act on large multi-dimensional datasets (Fig. 2). In the field of urban design and architecture, the integration of AI offers a way to move beyond single narratives of space and towards more holistic, adaptive and resilient approaches. This capacity for interdisciplinary synthesis underlines the potential of AI as a mediator between the tangible and intangible dimensions of architectural design.

AI can function as an image generator and an engine for 'geo-strategisation' (i.e., for analysing geographical data with behavioural, cultural and environmental factors to inform adaptive design strategies). These strategies extend to many applications, from predicting energy use and monitoring building performance to improving user experiences and imagining future urban scenarios (Melis and Pievani, 2022).

The idea of 'mutation by diffusion', transforming and generating images through AI systems, is a starting point to consider how generative AI could similarly 'mutate' traditional design paradigms. The design process becomes an iterative dialogue between human intuition and machine intelligence, in which the boundaries between creator and tool become increasingly blurred. It is here that AI acts as a catalyst for 'exaptation' (a term used to describe how existing structures or concepts are co-opted for new functions), prompting designers to rethink and reconfigure spatial and functional relationships within their work (Melis, Pievani and Lara-Hernandez, 2024).

Moreover, collective creativity emerges as a crucial element of this discourse. Rather than reinforcing a binary division between humans and machines, AI fosters a symbiotic partnership in which design is an exacting process that allows ideas to evolve beyond the linear constraints of consciousness. This aligns with the broader thesis that creativity is inherently associative, emerging through networks of influence, interdisciplinary collaborations and iterative feedback loops: AI then becomes an amplifier of these connections, opening up new avenues for ex-



perimentation and exploration. On these premises, it is possible to build a new regenerative kind of workflow, capable of working on digitally connected domains informed both by data-climate tools, which use parametric modelling (Naboni and Havinga, 2019; Nava, 2022a) and by information produced (images) with diffuse modelling using AI processes, whose phases or can be described as follows:

- Step 1, construction of the operational framework showing the digitally connected domains (design intent, process and results of the framework);
- Step 2, correlation of the objectives to the data and identification of the relationships with the objects of the study through the customisation of the components using parametric modelling (Fig. 3-5);
- Step 3, coupling between object generation activities and the action of regeneration tools;
- Step 4, scale-up 1 with an understanding of conflicting, multi-domain and optimised targets and first visualisation of predictive models on climate scenarios (Fig. 6-8);

– Step 5, staircase 2 with analysis of multi-domain integration through Machine Learning (Regenerative Digital Design) and multi-domain integration through Deep Learning (Fig. 9, 10);

– Step 6, production of prediction models and associated images utilising text-to-image and AI computer visualisation in a data scenario (such as data discretisation) or a computer scenario (Fig. 11).

In the context of regenerative digital design and its focus on climate scenarios (IPCC, 2023), the principles of 'exaptation' can guide the creative process towards adaptive and multifunctional solutions. The redundancy inherent in many design systems – excess space, structural strength or material properties – should not be seen as wasteful but as a reservoir of possible innovation. This is in line with the concept of evolvability in evolutionary biology, where the seemingly inefficient features of an organism contain the potential for future adaptations and responses to environmental changes (Pievani and Serrelli, 2011).

**Concluding reflections on the convergence of complexity: exaptation, redundancy and the potential of adaptive design** | In parametric design processes, the flexibility to simulate and adjust a wide range of variables allows for exploring latent opportunities within a design space. The generative capabilities of AI further enhance this process, allowing designers to explore permutations and paths that may take time to develop. Through deep learning, AI systems can help recognise patterns of redundancy or unused potential within data and structures, allowing these elements to be co-opted for new purposes, similar to adaptation in biological systems (Tattersall, 2010).

The convergence of generative AI and design complexity opens new avenues to explore the potential of adaptation within creative practices. By harnessing AI to model, predict and suggest alternative uses for design elements, practitioners can move beyond traditional adaptive patterns and embrace the inherent unpredictability of complex systems.



**Fig. 14** | 'Genome', installation realised according to the criteria of 'exaptation', at the Italian Pavilion – Venice Biennale 2021 (credit: PNAT, Heliopolis 21, L. Donovan-Stumbles, and D. Gyokchep-anar; photo by A. Avezzi).

This perspective enriches the creative process and aligns with an ethos of sustainability and resilience in which redundancy and multifunctionality become resources for responding to changing environmental and social contexts.

In sum, complexity in design, understood through the evolutionary lens of adaptation, emphasises the fluidity of form and function and encourages openness to the emerging possibilities of design systems. By integrating these principles into AI-assisted workflows and parametric design processes, designers can cultivate an adaptive, innovative practice and be deeply attuned to the potential for creative transformation (Figg. 12, 13).

Understanding the complexity of design through the lens of 'exaptation' (Fig. 14) means recognising that the origin and development of design features are only sometimes linear or purpose-driven. Like the wings of the black heron, initially adapted for thermoregulation and later co-opted to cast shadows to capture prey (McLachlan and Liversidge, 1972),

design elements can serve multiple and layered purposes over time. In architecture, this could manifest as spaces or materials initially intended for one use being rethought in response to changing cultural or environmental needs.

These functional shifts are an integral part of creative design practice, in which structures are not only shaped by the intended purposes but also by the unforeseen opportunities presented to the designer. The concept of 'spandrels' – architectural spaces that emerge as by-products of structural constraints but provide unanticipated aesthetic or functional value – serves as a metaphor for this type of complexity (Gould and Vrba, 1982): just as 'spandrels' in biology refer to non-adaptive traits that are then co-opted for new uses, so too architectural and urban design elements can emerge from constraints and then be re-used, providing an opportunity for innovative applications and improved functionality.

Exaptation' therefore, emphasises the value of multifunctionality and redundancy, features that, while

seemingly inefficient or expensive, act as a reservoir for potential transformation. Just as the human genome's redundant 'junk DNA' is a repository for future functional genes (Pievani and Serrelli, 2011), design elements within architecture, urbanism and environmental systems may also contain latent possibilities for reuse. This perspective invites designers to consider complexity not as a challenge to be reduced or controlled but as a fertile ground for discovering unexpected alignments and emerging functions, with the need, however, also to control the socio-ethical impact that the use of emerging technologies and multi-scalar approaches produce in advancing disruptive and radical innovation processes to address more global challenges towards climate and carbon neutrality (Wiarda and Doorn, 2023).

## Notes

1) See, for example, the AI exhibition ABITAlab 2023 – Digital exhibition – Emerging Technologies vs Atmosphere and AI Visions. ABITAlab's research and ATELIER22's thesis pathway challenge architectural design in transition cities, proposing customised and AI-produced images capable of expressing the generative value of emerging technologies before re-engaging with their formal value in a regenerative expression of ecological and digital quality that goes beyond performance. For more information, see the webpage: abitalab-unirc.com/ai-visions [Accessed 16 October 2024].

## References

Abdel-Rahman, A., Kosicki M., Michalatos, P. and Tsigkari, M. (2019), "Design of thermally deformable laminates using machine learning", in Zingoni, A. (ed.) *Advances in Engineering Materials, Structures and Systems – Innovations, Mechanics and Applications*, Taylor & Francis Group, London. [Online] Available at: [discovery.ucl.ac.uk/id/eprint/10114522/](https://discovery.ucl.ac.uk/id/eprint/10114522/) [Accessed 16 October 2024].

Gould, S. J. and Vrba, E. S. (1982), "Exaptation – A missing term in the science of form", in *Paleobiology*, vol. 8, issue 1, pp. 4-15. [Online] Available at: [jstor.org/stable/2400563](https://www.jstor.org/stable/2400563) [Accessed 16 October 2024].

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change (2023), *Climate Change 2023 – Synthesis Report – Contribution of working groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. [Online] Available at: [doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647](https://www.ipcc.org/report/AR6-9789291691647/) [Accessed 16 October 2024].

McLachlan, G. R. and Liversidge, R. (1972), *Roberts Birds of South Africa*, Cape & Transvaal Printers Ltd., Cape Town.

Melis, A. and Pievani, T. (2022), "Exaptation as a design strategy for resilient communities", in Rezaei, N. (ed.) *Transdisciplinarity – Integrated Science*, vol. 5, Springer, Cham, pp. 307-327. [Online] Available at: [doi.org/10.1007/978-3-030-94651-7\\_15](https://doi.org/10.1007/978-3-030-94651-7_15) [Accessed 16 October 2024].

Melis, A., Fadhil, F. and Battistoni, M. (2024), "Floating acrobats – Exploring exaptation in architecture through artificial intelligence", in Giordano, A., Russo, M. and Spallone, R. (eds), *Advances in Representation – Digital Innovations in Architecture, Engineering and Construction*, Springer, Cham, pp. 885-896. [Online] Available at: [doi.org/10.1007/978-3-031-62963-1\\_54](https://doi.org/10.1007/978-3-031-62963-1_54) [Accessed 16 October 2024].

Melis, A., Pievani, T. and Lara-Hernandez, J. A. (2024), *Architectural exaptation – When function follows form*, Taylor & Francis.

Mussinelli, E. (2023), "Tecnologie abilitanti e qualità del progetto | Enabling technologies and project quality", in *Techne | Journal of Technology for Architecture and Environment*, vol. 25, pp. 11-15. [Online] Available at: [doi.org/10.36253/techne-14626](https://doi.org/10.36253/techne-14626) [Accessed 16 October 2024].

Naboni, E. and Havinga, L. (2019), *Regenerative design in digital practice – A Handbook for the Built Environment*, Eurac, Bolzano. [Online] Available at: [issuu.com/kadk/docs/regenerative\\_design\\_in\\_digital\\_practice\\_lowres](https://www.issuu.com/kadk/docs/regenerative_design_in_digital_practice_lowres) [Accessed 16 October 2024].

Nava, C. (2024), "Human-Centred AI in the Post-Optimisation Regenerative Process for Climate Scenarios", in Calabrò, F., Madureira, L., Morabito, F. C. and Piñeira Mantinián, M. J. (eds), *Networks, Markets & People – NMP 2024 – Lecture Notes in Networks and Systems*, vol. 1189, Springer, Cham, pp. 76-97. [Online] Available at: [doi.org/10.1007/978-3-031-74723-6\\_7](https://doi.org/10.1007/978-3-031-74723-6_7) [Accessed 16 November 2024].

Nava, C. (2023), *Tecnologie Emergenti per il Progetto Rigenerativo – 5 questioni teoriche su Innovazione e Sostenibilità dalla prassi della Ricerca di frontiera*, Aracne, Roma.

Nava, C. (2022a), "Regenerative Design and Hybrid Buildings to Address Climate Change", in Calabrò, F., Della Spina, L. and Piñeira Mantinián, M. J. (eds), *New Metropolitan Perspectives – Post Covid Dynamics – Green and Digital Transition, between Metropolitan and Return to Villages Perspectives*, Springer International Publishing, Cham, pp. 1889-1901. [Online] Available at: [doi.org/10.1007/978-3-031-06825-6\\_182](https://doi.org/10.1007/978-3-031-06825-6_182) [Accessed 16 October 2024].

Nava, C. (2022b), "Reggio Calabria – La cultura tecnologica della Progettazione ambientale", in Attaianese, E. and Losasso, M. (eds), *La ricerca nella Progettazione ambientale – Gli anni 1970-2008*, SITdA Cluster della Progettazione Ambientale, Maggioli, Santarcangelo di Romagna, pp. 242-269. [Online] Available at: [sitda.net/wp-content/uploads/2023/09/916.50788\\_e-book\\_Attaianese\\_La-ricerca-nella-Progettazione-ambientale\\_bassa-risol.pdf](https://sitda.net/wp-content/uploads/2023/09/916.50788_e-book_Attaianese_La-ricerca-nella-Progettazione-ambientale_bassa-risol.pdf) [Accessed 16 October 2024].

Nava, C. (2019), *Ipersostenibilità e Tecnologie abilitanti – Teoria, Metodo, Progetto*, Aracne, Roma.

Pievani, T. and Serrelli, E. (2011), "Exaptation in human evolution – How to test adaptive vs exaptive evolutionary hypotheses", in *Journal of Anthropological Sciences | Rivista di Antropologia*, vol. 89, pp. 9-23.

Rafsanjani, H. N. and Nabizadeh, A. H. (2023), "Towards human-centered artificial intelligence (AI) in architecture,

engineering, and construction (AEC) industry", in *Computers in Human Behavior Reports*, vol. 11, article 100319, pp. 1-9. [Online] Available at: [doi.org/10.1016/j.chbr.2023.100319](https://doi.org/10.1016/j.chbr.2023.100319) [Accessed 16 October 2024].

Russell, S. J. and Norvig, P. (2016), *Artificial Intelligence – A Modern Approach*, Pearson Education Limited, Malaysia.

Tattersall, I. (2010), *Paleontology – A Brief History of Life*, Oxford University Press.

Weber, K. M. and Rohracher, H. (2012), "Legitimizing research, technology and innovation policies for transformative change – Combining insights from innovation systems and multi-level perspective in a comprehensive 'failures' framework", in *Research Policy*, vol. 41, issue 6, pp. 1037-1047. [Online] Available at: [doi.org/10.1016/j.respol.2011.10.015](https://doi.org/10.1016/j.respol.2011.10.015) [Accessed 18 October 2024].

WEF – World Economic Forum (2023), *The Global Risk Report 2023*. [Online] Available at: [weforum.org/publications/global-risks-report-2023/](https://www.weforum.org/publications/global-risks-report-2023/) [Accessed 18 October 2024].

Wiarda, M. and Doorn N. (2023), "Responsible innovation and societal challenges – The multi-scalar dilemma", in *Journal of Responsible Technology*, vol. 16, article 100072, pp. 1-6. [Online] Available at: [doi.org/10.1016/j.jrt.2023.100072](https://doi.org/10.1016/j.jrt.2023.100072) [Accessed 18 October 2024].

Yildirim E. (2022), "Text to Image Generation A.I. in Architecture", in Kozlu, H. (ed.), *Art and Architecture – Theory, Practice and Experience*, Livre de Lyon, Lyon, pp. 97-119.

Zaffagnini, T. and Palmi, O. (2022), "Retrospective e prospettive sul rapporto tra progetto, tecnologia e neocibernetica | Past and future of the connection between project, technology and neocybernetics", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 12, pp. 24-35. [Online] Available at: [doi.org/10.19229/2464-9309/1222022](https://doi.org/10.19229/2464-9309/1222022) [Accessed 18 October 2024].