



UNIVERSITÀ
DI TRENTO

www.xydigitale.it

Year XI, January - June 2026
Anno XI, Gennaio - Giugno 2026

*Critical review of studies
on the representation
of architecture
and use of the image
in science and art*

*Rassegna critica di studi
sulla rappresentazione
dell'architettura
e sull'uso dell'immagine
nella scienza e nell'arte*

17

**ARTIFICIAL
EXAPTATION**

**EXATTAMENTO
ARTIFICIALE**

Cover. *Exaptation as a logic of resignification*, image synthetically generated by

Le Chat (Mistral AI), 2026. © Fabrizio Gay.

Charles Darwin in a natural history museum of artefacts, surrounded by genealogies of technical artefacts in evolutionary order, under Steampunk chandeliers; the image offers a visual interpretation of the concept of artificial exaptation, where objects and tools are reused and given new meaning in new functional contexts.

In copertina. *L'exattamento come logica di risignificazione*, immagine generata sinteticamente da

Le Chat (Mistral AI), 2026. © Fabrizio Gay.

Charles Darwin in un museo di storia naturale degli artefatti, circondato da genealogie di artefatti tecnici in ordine evolutivo, sotto lampadari Steampunk; l'immagine offre un'interpretazione visiva del concetto di exattamento artificiale, dove oggetti e strumenti vengono riutilizzati e risignificati in nuovi contesti funzionali.

XY: rassegna critica di studi sulla rappresentazione dell'architettura e sull'uso dell'immagine nella scienza e nell'arte = Critical review of studies on the representation of architecture and use of the image in science and art – A. 11, n. 17 (gen.-giu. 2026) = Y. 11, no. 17 (Jan.-Jun. 2026)

Trento: Università degli Studi di Trento; 2016 - . - v. : ill.; 30 cm. – Semestrale

ISSN (online): 2499-8346

ISBN (online): 978-88-5541-176-9

DOI: <http://dx.doi.org/10.15168/xy.v11i17>

Università degli Studi di Trento

via Calepina, 14 - 38122 Trento

tel. +39 0461 283016 - 281722

casaeditrice@unitn.it

© 2026 the Authors / le Autrici e gli Autori



Except where otherwise noted, contents on this journal are licensed with a
Creative Commons Attribution – Share Alike 4.0 International License

Eccetto ove diversamente specificato, i contenuti della rivista sono rilasciati con
Licenza Creative Commons Attribuzione – Condividi allo stesso modo 4.0 Internazionale

Cover. Exaptation as a logic of resignification, image synthetically generated by Le Chat (Mistral AI), 2026. © Fabrizio Gay.

Charles Darwin in a natural history museum of artefacts, surrounded by genealogies of technical artefacts in evolutionary order, under Steampunk chandeliers; the image offers a visual interpretation of the concept of artificial exaptation, where objects and tools are reused and given new meaning in new functional contexts.

In copertina. L'exattamento come logica di risignificazione, immagine generata sinteticamente da Le Chat (Mistral AI), 2026. © Fabrizio Gay.

Charles Darwin in un museo di storia naturale degli artefatti, circondato da genealogie di artefatti tecnici in ordine evolutivo, sotto lampadari Steampunk; l'immagine offre un'interpretazione visiva del concetto di exattamento artificiale, dove oggetti e strumenti vengono riutilizzati e risignificati in nuovi contesti funzionali.

XY: rassegna critica di studi sulla rappresentazione dell'architettura e sull'uso dell'immagine nella scienza e nell'arte = Critical review of studies on the representation of architecture and use of the image in science and art – A. 11, n. 17 (gen.-giu. 2026) = Y. 11, no. 17 (Jan.-Jun. 2026)

Trento: Università degli Studi di Trento; 2016 - . - v. : ill.; 30 cm. – Semestrale

ISSN (online): 2499-8346

ISBN (online): 978-88-5541-176-9

DOI: <http://dx.doi.org/10.15168/xy.v11i17>

Università degli Studi di Trento
via Calepina, 14 - 38122 Trento
tel. +39 0461 283016 - 281722
casaeditrice@unitn.it

CC

BY

SA

Except where otherwise noted, contents on this journal are licensed with a Creative Commons Attribution – Share Alike 4.0 International License

Eccetto ove diversamente specificato, i contenuti della rivista sono rilasciati con Licenza Creative Commons Attribuzione – Condividi allo stesso modo 4.0 Internazionale

Contents / Indice

4	Edoardo Dotto Francesco Maggio	Editorial. An Other Intelligence Editoriale. Un'altra intelligenza
8	Fabrizio Gay	Techno-Aesthetic Exaptation: A Letter on Drawing from 2051 Exaptation tecno-estetica: una lettera sul disegno dal 2051
40	Irene Cazzaro	Exaptation as a Criterion for Modelling Complex Ecosystems. The Case of the Venice Lagoon / Exaptation come criterio per la modellazione di ecosistemi complessi. Il caso della laguna di Venezia
60	Michela Rossi Sara Conte Cecilia Santacroce Giorgio Buratti	Italo Calvino's Algorithms in Representing the DNA of Urban Complexity Gli algoritmi di Italo Calvino e la rappresentazione del DNA della complessità urbana
78	Cesare Battelli	From Traces to the Mythopoietic Co-Optation of AI Dalle tracce alla co-optazione mitopoietica dell'IA
98	Angela Cicala	Text-to-Form: Artificial Exaptation in Algorithmic Design Text-to-form: exaptation artificiale nella progettazione algoritmica
116	Paola Raffa	Ordered Fragments. From Forms to Form: A Conversation with Demetrio Di Grado / Frammenti ordinati. Dalle forme alla forma: colloquio con Demetrio Di Grado
130	Roberto de Rubertis	Notes on a Similarity Note su una somiglianza

3

Exaptation as a Criterion for Modelling Complex Ecosystems. The Case of the Venice Lagoon

Irene Cazzaro



In their celebrated essay on the spandrels of St Mark's Basilica in Venice, Gould and Lewontin criticised the adaptationist tendency to interpret every form as the optimal outcome of a function. With the concept of exaptation, Gould and Vrba subsequently proposed an evolutionary perspective based on contingent processes of co-option and re-functionalisation. Transposed to the modelling of complex ecosystems, this perspective makes it possible to overcome the idea that systems such as the Venice Lagoon evolve towards determined equilibrium states, inviting instead an interpretation of them as emerging configurations produced by functional reuses and multi-level interactions. In a lagoon system, hydraulic infrastructures, salinity gradients, plant communities and anthropogenic pressures do not organise themselves according to linear trajectories, but generate side effects that become conditions for new forms of stability: salt marshes arising from altered sedimentary processes, species colonising artificial habitats, and technical devices modifying ecological niches. Exaptation thus becomes not only an interpretative category but a methodological criterion: it guides the construction of models capable of detecting emerging patterns at different scales and of integrating mechanistic description and statistical learning without reducing complexity to pure prediction. Contemporary hybrid approaches – combining process-based simulation and physics-informed neural networks – can be reread as exploratory rather than predictive devices: tools for probing scenarios in which functions, relationships and ecological roles are redefined over time. From this perspective, modelling Venice means designing a field of possibilities, rather than optimising an outcome. Exaptation operates as a principle of validation and generation: it invites comparison of models with multiple and unexpected patterns, recognising that ecological innovation – like technical innovation – often emerges from unintended deviations and reuses. Adopting exaptation as an operative criterion therefore entails a specific epistemic stance: replacing the search for equilibrium with the analysis of contingent transformations, and understanding artificial intelligence not as a tool of control, but as a means of making visible the lateral trajectories of lagoon evolution.

Keywords: artificial drawing, complex systems, scenarios.

1. Introduction

In recent years, the modelling of complex ecosystems has evolved considerably through the integration of process-based approaches and machine-learning techniques. In lagoon environments, and particularly in the Venice Lagoon, these tools have been used to simulate hydrodynamic processes, water quality and changes in ecological parameters, with the aim of improving the descriptive and predictive capacity of models (Aslan, Zennaro, Furlan, Critto 2022; Zennaro, Furlan, Canu, Aveytua Alcazar, Rosati, Solidoro, Aslan, Critto 2023; Bozzeda, Sigovini, Lionello 2025). This orientation is part of a broader trend in which artificial intelligence is becoming a crucial resource for analysing and predicting complex environmental systems (Rubbens, Brodie, Cordier, Destro Barcellos, Devos, Fernandes-Salvador, Fincham et al. 2023; Cipriano, Noce, Mereu, Santini 2025; Spillias, Trebilco, Adams, Boschetti, Constable, Dunstan, Ferrier et al. 2026).

Without questioning the validity of these approaches, this paper proposes a reconsideration of their underlying paradigm. Part of environmental modelling is still interpreted through an adaptationist lens: the system is understood as if it tended towards progressively more stable and optimisable equilibrium states. Such a reading risks reducing the complexity of evolutionary processes to a logic of functional adaptation, while overlooking the role of contingency, side effects and unintended transformations.

The paper therefore proposes to reinterpret the modelling of complex ecosystems through the concept of exaptation (Gould, Vrba 1982). This concept, although not formalised, is already partially embedded in some advanced artificial-intelligence applications used by these models, for example in the management of deviations from expected patterns.

From this perspective, systems such as the Venice Lagoon are not regarded as configurations oriented towards an end, but as emerging outcomes of processes of re-functionalisation in which



Exaptation come criterio per la modellazione di ecosistemi complessi. Il caso della laguna di Venezia

Irene Cazzaro

Nel celebre saggio sui pennacchi della basilica di San Marco a Venezia, Gould e Lewontin criticavano la tendenza adattazionista a leggere ogni forma come esito ottimale di una funzione. Con il concetto di *exaptation*, Gould e Vrba hanno successivamente proposto una visione evolutiva fondata su cooptazioni e ri-funionalizzazioni contingenti. Trasposta nell'ambito della modellazione degli ecosistemi complessi, questa prospettiva consente di superare l'idea che sistemi come la laguna di Venezia evolvano verso stati di equilibrio determinati, invitando invece a leggerli come configurazioni emergenti prodotte da riusi funzionali e interazioni multilivello. In un contesto lagunare, infrastrutture idrauliche, gradienti salini, comunità vegetali e pressioni antropiche non si organizzano secondo traiettorie lineari, ma generano effetti collaterali che diventano condizioni per nuove stabilità: barene nate da processi sedimentari alterati, specie che colonizzano habitat artificiali, dispositivi tecnici che modificano nicchie ecologiche. L'*exaptation* diventa qui non solo categoria interpretativa, ma criterio metodologico: orienta la costruzione di modelli capaci di intercettare pattern emergenti a diverse scale e di integrare descrizione meccanicistica e apprendimento statistico senza ridurre la complessità a pura previsione. Gli approcci ibridi contemporanei – che combinano simulazione *process-based* e reti neurali informate dalla fisica – possono essere riletti come dispositivi esplorativi più che predittivi: strumenti per sondare scenari in cui funzioni, relazioni e ruoli ecologici si ridefiniscono nel tempo. In questa prospettiva, modellare Venezia significa progettare un campo di possibilità, non ottimizzare un esito. L'*exaptation* opera come principio di validazione e generazione: invita a confrontare i modelli con pattern multipli e inattesi, riconoscendo che l'innovazione ecologica – come quella tecnica – emerge spesso da deviazioni e riusi non intenzionali. Assumere l'*exaptation* come criterio operativo implica dunque una postura epistemica specifica: sostituire la ricerca dell'equilibrio con l'analisi delle trasformazioni contingenti, e intendere l'intelligenza artificiale non come strumento di controllo, ma come mezzo per rendere visibili le traiettorie laterali dell'evoluzione lagunare.

Parole chiave: disegno artificiale, scenari, sistemi complessi.

1. Introduzione

Negli ultimi anni, la modellazione degli ecosistemi complessi ha conosciuto una significativa evoluzione grazie all'integrazione tra approcci *process-based* e tecniche di apprendimento automatico. In ambito lagunare, e in particolare nel caso della laguna di Venezia, tali strumenti sono stati ampiamente utilizzati per simulare processi idrodinamici, qualità delle acque e variazioni di parametri ecologici, con l'obiettivo di migliorare la capacità predittiva dei modelli (Aslan, Zennaro, Furlan, Critto 2022; Zennaro, Furlan, Canu, Aveytua Alcazar, Rosati, Solidoro, Aslan, Critto 2023; Bozzeda, Sigovini, Lionello 2025). Questo orientamento si inserisce in una più ampia tendenza che vede l'intelligenza artificiale come strumento privilegiato per l'analisi e la previsione dei sistemi ambientali complessi (Rubbens, Brodie, Cordier, Destro Barcellos, Devos, Fernandes-Salvador, Fincham et al. 2023; Cipriano, Noce, Mereu, Santini 2025; Spillias, Trebilco, Adams, Boschetti, Constable, Dunstan, Ferrier et al. 2026).

Riconoscendo prima di tutto la validità e l'efficacia di questi approcci, il presente contributo intende aggiungere una chiave di lettura concettuale che ne riesamina il sottostante paradigma. L'impostazione attuale, infatti, rischia troppo spesso di essere interpretata in un'ottica adattazionista, secondo la quale il sistema viene orientato verso stati di equilibrio più o meno stabili e ottimizzabili. Tale prospettiva rischia di ridurre la complessità dei processi evolutivi a una logica di adattamento funzionale, trascurando il ruolo della contingenza, degli effetti collaterali e delle trasformazioni non intenzionali.

Il contributo propone quindi di reinterpretare la modellazione degli ecosistemi complessi attraverso il concetto di *exaptation* (Gould, Vrba 1982), un concetto che, sebbene non formalizzato, è già parzialmente inserito in alcune applicazioni avanzate di intelligenza artificiale che questi modelli utilizzano (ad esempio, nella gestione degli scarti rispetto ai *pattern* attesi).

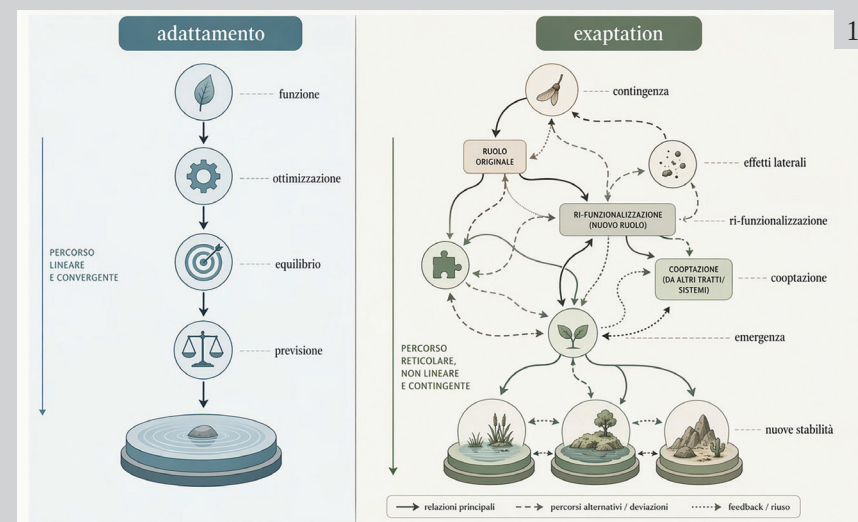
multi-scalar interactions continuously produce unforeseen effects that can be reabsorbed and transformed into new conditions of stability.

Adopting exaptation as an operative criterion entails a twofold shift: from a predominantly predictive logic to an exploratory one, and from a model oriented towards optimisation to a device capable of constructing and interrogating a field of possibilities. In this framework, artificial intelligence is understood less as a tool of control than as a means of making latent patterns, emerging dynamics and lateral trajectories of the system visible. Alongside this hypothesis, the paper introduces a second line of inquiry concerning artificial drawing and, in this case, the representational dimension of modelling. As highlighted by important studies on the use of images in scientific and design processes (Daston, Galison 2007; Belting 2011), representation cannot be treated as a simple output, but as an active component in the construction of knowledge. Diagrams, maps and simulations act as interfaces, bringing together data, models and design hypotheses.

Starting from these premises, the paper addresses four main questions: (1) how exaptation can be translated into an operative criterion for modelling complex ecosystems; (2) how hybrid models based on artificial intelligence can be reinterpreted as exploratory rather than predictive devices; (3) what role images can assume in the construction, interpretation and validation of models; (4) how can lateral and unintended trajectories of lagoon evolution be made visible through modelling. Through the case study of the Venice Lagoon, the paper aims to show how exaptation can operate simultaneously as an epistemic principle, a methodological criterion and a representational device, contributing to a redefinition of the relationship between modelling, design and image.

2. Exaptation: From a Biological Concept to an Epistemic Device

The concept of exaptation, formulated by Stephen Jay Gould and Elisabeth Vrba (Gould, Vrba 1982), emerged within evolutionary debate to describe traits that originated either without a specific function or in relation to a different function and were subsequently



co-opted for new uses. Exaptation thus introduces a discontinuity with the adaptationist interpretation of evolution, already criticised by Gould and Lewontin (Gould, Lewontin 1979), because it shows how the relationship between form and function is often the result of successive re-articulations rather than a linear process of optimisation (fig. 1).

Beyond its original field, exaptation can be adopted as a category for interrogating processes of knowledge production in complex systems (Trisciunglio 2024). It therefore does not merely describe an evolutionary dynamic, but also makes it possible to question epistemic models based on stable correspondences between structure and purpose. As suggested by theoretical approaches that emphasise the contingency and historicity of systems (Allen, Hoekstra 2015; DeLanda 2016), observable configurations emerge from chains of heterogeneous events, in which reuse, deviation and reconfiguration play a constitutive role.

This theoretical shift makes it possible to reformulate the problem of modelling beyond a narrowly representational logic. Rather than assuming the model as a reduction of reality oriented towards stabilising relevant variables, exaptation invites us to consider it as a device capable of keeping the system's conditions of indeterminacy operative. In this sense, the model is a selective construction of relationships that makes otherwise latent trajectories observable. This interpretation is close to conceptions of simulation as an

Figure 1
Confronto tra paradigma adattazionista e paradigma "exaptativo". A sinistra, la logica lineare orientata a funzione, ottimizzazione, equilibrio, e previsione; a destra, la logica reticolare della contingenza, della cooptazione e della ri-funzionalizzazione, in cui effetti collaterali e deviazioni possono diventare condizioni di nuove stabilità. Author's elaboration using ChatGPT.

In questa prospettiva, sistemi come la laguna di Venezia non vengono più considerati come configurazioni orientate a un fine, ma come esiti emergenti di processi di ri-funzionalizzazione, in cui interazioni multi-scalari producono continuamente effetti non previsti che possono essere riassorbiti e trasformati in nuove condizioni di stabilità.

Assumere l'*exaptation* come criterio operativo implica una duplice trasformazione: da un lato, il passaggio da una logica predittiva a una logica esplorativa; dall'altro, lo spostamento da un modello orientato all'ottimizzazione a un dispositivo capace di costruire e interrogare un campo di possibilità. In questo quadro, l'intelligenza artificiale è intesa, più che come strumento di controllo, come mezzo per rendere visibili *pattern* latenti, dinamiche emergenti e traiettorie laterali del sistema. Accanto a questa ipotesi, il contributo introduce una seconda linea di indagine, relativa al disegno artificiale e, in questo caso, alla dimensione rappresentazionale della modellazione. Come evidenziato da noti studi sull'uso delle immagini nei processi scientifici e progettuali (Daston, Galison 2007; Belting 2011), la rappresentazione non può essere ridotta a semplice *output*, ma costituisce una componente attiva nella costruzione della conoscenza. Diagrammi, mappe e simulazioni agiscono come interfacce attraverso cui il modello prende forma e viene continuamente riorganizzato.

A partire da queste premesse, il contributo si articola attorno a quattro domande di ricerca: (1) In che modo l'*exaptation* può essere tradotta in un criterio operativo per la modellazione degli ecosistemi complessi? (2) Come possono i modelli ibridi basati su intelligenza esplorativi più che predittivi? (3) Quale ruolo assumono le immagini nella costruzione, interpretazione e validazione dei modelli? (4) Come rendere visibili, attraverso la modellazione, le traiettorie laterali e non intenzionali dell'evoluzione lagunare?

Attraverso il caso studio della laguna di Venezia, il contributo intende mostrare come l'*exaptation* possa operare simultaneamente come principio epistémico, criterio metodologico e dispositivo rappresentazionale, contribuendo a ridefinire il rapporto tra modellazione, progetto e immagine.

2. Exaptation: da concetto biologico a dispositivo epistémico

Il concetto di *exaptation*, formulato da Stephen Jay Gould ed Elisabeth Vrba (Gould, Vrba 1982), nasce all'interno del dibattito evoluzionistico per descrivere quei tratti che, originatisi in assenza di una funzione specifica o in relazione a una funzione diversa, vengono successivamente cooptati per nuovi usi. In questo senso, l'*exaptation* introduce una discontinuità rispetto alla lettura adattazionista dell'evoluzione, già criticata da Gould e Lewontin (Gould, Lewontin 1979), evidenziando come la relazione tra forma e funzione sia spesso il risultato di riarticolazioni successive piuttosto che di un processo lineare di ottimizzazione (fig. 1).

Al di là del suo ambito originario, l'*exaptation* può essere interpretata come una categoria capace di interrogare più in generale i processi di produzione della conoscenza nei sistemi complessi (Trisciunglio 2024). Essa non si limita quindi a descrivere una dinamica evolutiva, ma consente di mettere in discussione modelli epistémici fondati su corrispondenze stabili tra struttura e finalità. Come suggerito da approcci teorici che enfatizzano la contingenza e la storicità dei sistemi (Allen, Hoekstra 2015; DeLanda 2016), le configurazioni osservabili emergono da concatenazioni di eventi eterogenei, in cui riuso, deviazione e riconfigurazione giocano un ruolo costitutivo.

Questo spostamento teorico permette di riformulare il problema della modellazione al di fuori di una logica rappresentazionale in senso stretto. Piuttosto che assumere il modello come una riduzione del reale orientata alla stabilizzazione delle variabili rilevanti, l'*exaptation* invita a considerarlo come un dispositivo capace di mantenere operative le condizioni di indeterminazione del sistema. In tal senso, il modello è una costruzione selettiva di relazioni che rende osservabili traiettorie altrimenti latenti. Questa interpretazione si avvicina a quelle concezioni della simulazione come pratica esplorativa, in cui il valore conoscitivo risiede meno nella previsione puntuale che nella generazione di scenari e nella messa alla prova di ipotesi (Winsberg 2010; Parker 2009).

Un ulteriore elemento di interesse riguarda il

Figura 1
Confronto tra paradigma adattazionista e paradigma "exaptativo". A sinistra, la logica lineare orientata a funzione, ottimizzazione, equilibrio e previsione; a destra, la logica reticolare della contingenza, della cooptazione e della ri-funzionalizzazione, in cui effetti collaterali e deviazioni possono diventare condizioni di nuove stabilità. Elaborazione dell'autrice con l'utilizzo di ChatGPT.

exploratory practice, in which its epistemic value lies less in precise prediction than in the generation of scenarios and the testing of hypotheses (Winsberg 2010; Parker 2009).

A further element of interest concerns the relationship between exaptation and non-linearity. In complex systems, the most significant transformations do not necessarily result from incremental variations along optimal trajectories, but from deviations, bifurcations and reconfigurations that produce effects disproportionate to the initial conditions (Mitchell 2009). Exaptation provides an appropriate model for describing such phenomena, as it makes it possible to interpret unintended outcomes not as anomalies to be eliminated, but as generative moments within the dynamics of the system.

Applied to ecosystem modelling, this perspective entails a reconsideration of validation and calibration practices. Rather than aiming exclusively to reduce error with respect to observed data, the modelling process can be oriented towards identifying and interpreting discrepancies as indicators of possible reconfigurations of the system.

This approach is consistent with recent developments in pattern-oriented modelling (Grimm, Revilla, Berger, Jeltsch, Mooij, Railsback, Thulke et al. 2005), but extends its framework by emphasising not only the correspondence between simulated and observed patterns, but also the heuristic potential of discrepancies. Conceiving exaptation as an epistemic device also entails a redefinition of the relationship between analysis and design. If configurations emerge through processes of re-functionalisation, then modelling can be understood as a practice that does not merely describe states of the system, but intervenes in their articulation, making alternative possibilities explicit.

The transition from a biological concept to an epistemic device therefore does not consist in a simple metaphorical extension, but in a reformulation of the conditions under which complex systems can be understood: from the centrality of function to the plurality of uses, from the stability of forms to their continuous reconfiguration, and from the prediction of outcomes to the exploration of possibilities.

3. The Venice Lagoon as an ‘Exaptive’ System and Artificial Garden

The Venice Lagoon is an exemplary complex ecosystem in which natural processes and anthropogenic actions intertwine. Far from being a system oriented towards a stable equilibrium state, the lagoon is a dynamic field traversed by multi-scalar interactions, in which hydrodynamic, biological, infrastructural and socio-economic components produce continuously changing configurations (Marani, D’Alpaos, Lanzoni, Carniello, Rinaldo 2007; Fagherazzi, Kirwan, Mudd, Guntenspergen, Temmerman, D’Alpaos, Van De Koppel et al. 2012; Carniello, Silvestri, Marani, D’Alpaos 2009).

In this context, lagoon dynamics can be effectively read through the lens of exaptation. Infrastructures designed for specific purposes, such as regulating water flows or protecting against high waters, generate side effects that modify sedimentary processes and, consequently, the morphology of the lagoon itself. The *barene*, for example, are not simply natural elements, but outcomes of complex interactions between currents, sediment supply and human interventions that can, over time, produce new conditions of ecological stability. Similarly, artificial habitats can be colonised by species that redefine their original function, transforming technical devices into new ecological niches. These phenomena show that the lagoon cannot be understood through linear or deterministic models, but requires tools capable of capturing the emergent nature of its configurations. Causal relations do not unfold along univocal trajectories, but are articulated through feedback networks in which secondary effects can acquire a structuring role. What initially appears as a deviation or disturbance may, over time, become a fundamental component of the system.

This reading can be extended by considering the lagoon as a form of ‘artificial garden’ at the territorial scale. The Venetian paradox – a constructed nature that tends to present itself as natural – was highlighted by Tafuri (Tafuri 1985), who identifies the tension between utopia and technical design as a core element of the city’s myth. This tension, already visible in

rapporto tra *exaptation* e non-linearità. Nei sistemi complessi, le trasformazioni più rilevanti non derivano necessariamente da variazioni incrementali lungo traiettorie ottimali, ma da deviazioni, biforcazioni e riconfigurazioni che producono effetti sproporzionati rispetto alle condizioni iniziali (Mitchell 2009). L’*exaptation* fornisce un modello adeguato per descrivere tali fenomeni, poiché consente di leggere gli esiti non intenzionali non come anomalie da eliminare, ma come momenti generativi all’interno della dinamica del sistema.

Applicata alla modellazione degli ecosistemi, questa prospettiva implica una riconsiderazione delle pratiche di validazione e calibrazione. Invece di mirare esclusivamente alla riduzione dell’errore rispetto a dati osservati, il processo modellistico può essere orientato a identificare e interpretare gli scarti come indicatori di possibili riconfigurazioni del sistema.

Tale impostazione è in linea con sviluppi recenti del *pattern-oriented modelling* (Grimm, Revilla, Berger, Jeltsch, Mooij, Railsback, Thulke et al. 2005), ma ne estende l’impianto, enfatizzando non solo la corrispondenza tra *pattern* simulati e osservati, bensì anche il potenziale euristico delle discrepanze.

Concepire l’*exaptation* come dispositivo epistemico comporta inoltre una ridefinizione del rapporto tra analisi e progetto. Se le configurazioni emergono attraverso processi di ri-funzionalizzazione, allora la modellazione può essere intesa come una pratica che non si limita a descrivere stati del sistema, ma che interviene nella loro articolazione, rendendo esplicite possibilità alternative.

Il passaggio da concetto biologico a dispositivo epistemico non consiste dunque in una semplice estensione metaforica, ma in una riformulazione delle condizioni di intelligibilità dei sistemi complessi: dalla centralità della funzione alla pluralità degli usi, dalla stabilità delle forme alla loro continua riconfigurazione, dalla previsione degli esiti alla esplorazione delle possibilità.

3. La laguna di Venezia come sistema “esattivo” e giardino artificiale

La laguna di Venezia costituisce un caso emblematico di ecosistema complesso in cui si intrecciano processi naturali e azioni antropiche.

Lungi dall’essere un sistema orientato verso uno stato di equilibrio stabile, la laguna si configura come un campo dinamico attraversato da interazioni multi-scalari, in cui componenti idrodinamiche, biologiche, infrastrutturali e socio-economiche producono configurazioni continuamente mutevoli (Marani, D’Alpaos, Lanzoni, Carniello, Rinaldo 2007; Fagherazzi, Kirwan, Mudd, Guntenspergen, Temmerman, D’Alpaos, Van De Koppel et al. 2012; Carniello, Silvestri, Marani, D’Alpaos 2009).

In questo contesto, le dinamiche lagunari possono essere lette efficacemente attraverso la lente dell’*exaptation*. Infrastrutture progettate per scopi specifici, come la regolazione dei flussi idrici o la difesa dalle acque alte, generano effetti collaterali che modificano i processi sedimentari e, di conseguenza, la morfologia stessa della laguna. Le barene, ad esempio, non sono semplicemente elementi naturali, ma esiti di complesse interazioni tra correnti, apporti sedimentari e interventi umani, che nel tempo hanno prodotto nuove condizioni di stabilità ecologica. Analogamente, habitat artificiali possono essere colonizzati da specie che ne ridefiniscono la funzione originaria, trasformando dispositivi tecnici in nuove nicchie ecologiche. Questi fenomeni evidenziano come la laguna non possa essere compresa attraverso modelli lineari o deterministici, ma richieda strumenti capaci di cogliere la natura emergente delle sue configurazioni. Le relazioni causali non si dispongono lungo traiettorie univoche, bensì si articolano in reti di *feedback* in cui effetti secondari possono assumere un ruolo strutturante. In questo senso, ciò che inizialmente appare come deviazione o perturbazione può diventare, nel tempo, una componente fondamentale del sistema.

Questa lettura può essere ulteriormente estesa assumendo la laguna come una forma di “giardino artificiale” su scala territoriale. Il paradosso veneziano – una natura costruita che tende a rappresentarsi come naturale – è stato messo in evidenza da Tafuri (Tafuri 1985), che individua nella tensione tra utopia e progetto tecnico il nucleo del mito della città. Tale tensione, già visibile nella contrapposizione tra le visioni di Cornaro e Sabbadino sulla gestione idraulica lagunare (Cessi 1981),

the contrast between Cornaro's and Sabbadino's visions for lagoon hydraulic management (Cessi 1981), finds a new articulation today in the relationship between design imagination and computational modelling (fig. 2).

In this framework, elements such as *barene*, *velme* and channel margins can be interpreted as hybrid devices, in which primary ecological processes – tides, salinity, sedimentation and vegetation succession – are re-oriented towards spatial, cultural and perceptual functions. The notion of an artificial plant niche makes it possible to describe these configurations not as mere containers for vegetation, but as generative structures that integrate ecological conditions (water, soil, microclimate) and conditions of spatial legibility (thresholds, paths, hierarchies). The lagoon's historical dimension reinforces this interpretation. Over the centuries, infrastructural interventions, economic practices and environmental transformations have produced a stratification of effects that cannot be reduced to a single logic. The lagoon thus appears as a palimpsest in which each current configuration incorporates traces of past functions, often reactivated in unexpected forms. This stratification is not simply something to be recorded, but an active condition that continues to influence present dynamics.

To consider the Venice Lagoon as an 'exaptive' system therefore means recognising its open and non-teleological character.

This recognition has direct implications for modelling: it requires tools capable not only of describing what is, but also of interrogating what might emerge from configurations that have not yet been actualised. In this sense, the lagoon itself becomes a device through which models oriented towards the exploration of possibilities can be tested.

4. Hybrid Modelling: From Predictive Tool to Exploratory Device

In environmental modelling, the integration of process-based approaches, rule-based models and machine-learning techniques has given rise to a new generation of hybrid models, particularly relevant to complex systems such as the Venice Lagoon. These approaches combine mechanistic descriptions of physical and biolog-

ical phenomena with the capacity of algorithms to learn patterns from data, making it possible to address contexts characterised by high variability and incomplete information (Rubbens, Brodie, Cordier, Destro Barcellos, Devos, Fernandes-Salvador, Fincham et al. 2023; Zennaro, Furlan, Canu, Aveytua Alcazar, Rosati, Solidoro, Aslan, Critto 2023; Lalic, Cuong, Petric, Pavlovic, Firanj Sremac, Roantree 2024).

At the same time, a consolidated tradition of rule-based models – from cellular automata to L-systems (Lindenmayer 1968; Prusinkiewicz, Lindenmayer 1990) and agent-based models (Grimm, Railsback 2005; Batty 2005; Batty 2013) – has shown how local rules can generate emerging spatial structures, offering a morphogenetic paradigm useful for understanding the formation of ecological and territorial patterns. Such approaches are particularly pertinent to lagoon environments because morphology emerges from local interactions among flows, sediments and vegetation.

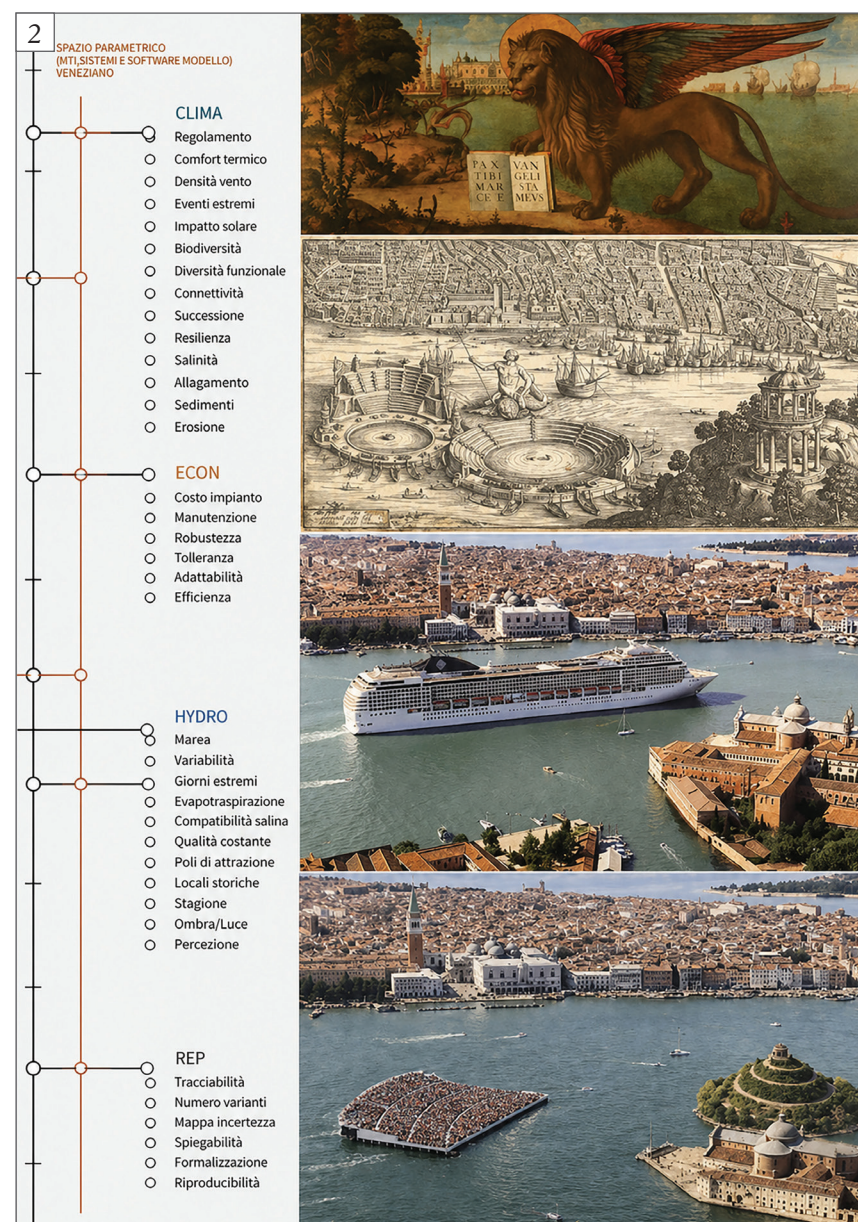
Despite this convergence, the use of hybrid models often remains oriented towards optimisation: the main objective is to reduce error, improve accuracy and converge towards a representation consistent with the observed behaviour of the system. Introducing exaptation as an operative criterion makes it possible to radically reconsider this orientation. A central aspect of this reconfiguration therefore concerns precisely the relationship between error and knowledge: in traditional models, the discrepancy between prediction and observation is generally treated as a deviation to be minimised; from an 'exaptive' perspective, however, such discrepancies can be interpreted as signals of processes not yet understood or of emerging dynamics (fig. 3). Error thus becomes an epistemic resource, an indication of the presence of latent configurations that the model can help make visible.

In this context, artificial drawing becomes instrumental in managing the phases of generation and control within a single operative pipeline. On the one hand, generative models based on deep learning foster divergent exploration by producing variants and counterfactual scenarios; on the other, rule-based and process-based models ensure verifiable convergence by trans-

Figure 2

On the left, the training trajectory of a hybrid generative AI model for simulating lagoon scenarios according to sets of criteria (climate, ecology, economy, hydrodynamics, representation). On the right, the tension between historiographical reconstruction and counterfactual prefiguration through Carpaccio's *Il leone di San Marco*, Jacopo de' Barbari's *Veduta di Venezia* reread by Alvise Cornaro (TAFURI 1985), and contemporary visual fragments including the Pink Floyd concert (1989) and Robert Smithson's installation *Broken Circle / Spiral Hill* (1971), which inform the generative-AI simulation of Alvise Cornaro's *Teatro* at the bottom right. Author's elaboration using ChatGPT.

Figura 2
A sinistra, traiettoria di addestramento di un modello ibrido di AI generativa per simulare scenari lagunari secondo famiglie di criteri (clima, ecologia, economia, idrodinamica, rappresentazione). A destra, tensione tra ricostruzione storiografica e prefigurazione controfattuale attraverso *Il leone di San Marco* di Carpaccio, la veduta di Venezia di Jacopo de' Barbari riletta da



trova oggi una nuova articolazione nel rapporto tra immaginazione progettuale e modellazione computazionale (fig. 2).

In questo quadro, elementi come *barene*, *velme* e margini di canale possono essere interpretati come dispositivi ibridi, in cui processi ecologici primari – marea, salinità, sedimentazione, successione vegetale – vengono ri-orientati verso funzioni spaziali, culturali e percettive. La nozione di nicchia vegetale artificiale consente di descrivere tali configurazioni non come semplici contenitori di vegetazione, ma come strutture generative che integrano condizioni ecologi-

che (acqua, suolo, microclima) e condizioni di leggibilità spaziale (soglie, percorsi, gerarchie). La dimensione storica della laguna rafforza dunque questa interpretazione: nel corso dei secoli, interventi infrastrutturali, pratiche economiche e trasformazioni ambientali hanno prodotto una stratificazione di effetti che non possono essere ricondotti a una logica unitaria. La laguna appare così come un palinsesto in cui ogni configurazione attuale incorpora tracce di funzioni passate, spesso riattivate in forme inattese. Questa stratificazione non è semplicemente un dato da registrare, ma una condizione attiva che continua a influenzare le dinamiche presenti.

Considerare la laguna di Venezia come un sistema "exattativo" significa quindi riconoscerne il carattere intrinsecamente aperto e non teleologico. Tale riconoscimento ha implicazioni dirette sulla modellazione: richiede strumenti capaci non solo di descrivere ciò che è, ma di interrogare ciò che potrebbe emergere da configurazioni non ancora attualizzate. In questo senso, la laguna diventa proprio un dispositivo attraverso cui mettere alla prova modelli orientati all'esplorazione delle possibilità.

4. Modellazione ibrida: da strumento predittivo a dispositivo esplorativo

Nel campo della modellazione ambientale, l'integrazione tra approcci *process-based*, modelli *rule-based* e tecniche di *machine learning* ha dato origine a una nuova generazione di modelli ibridi, particolarmente rilevanti per sistemi complessi come la laguna di Venezia. Tali approcci combinano la descrizione meccanicistica dei fenomeni fisici e biologici con la capacità degli algoritmi di apprendere *pattern* dai dati, consentendo di affrontare contesti caratterizzati da elevata variabilità e incompletezza informativa (Rubbens, Brodie, Cordier, Destro Barcellos, Devos, Fernandes-Salvador, Fincham. et al. 2023; Zennaro, Furlan, Canu, Aveytua Alcazar, Rosati, Solidoro, Aslan, Critto 2023; Lalic, Cuong, Petric, Pavlovic, Firanj Sremac, Roantree 2024).

Parallelamente, una tradizione consolidata di modelli *rule-based* – dagli automi cellulari agli *L-system* (Lindenmayer 1968; Prusinkiewicz, Lindenmayer 1990) fino ai modelli ad agenti

lating environmental constraints and explicit knowledge into simulatable procedures. In contemporary terms, the distinction between divergent and convergent thinking (Guilford 1967) is thus reformulated as a computational dynamic. Operationally, this approach translates into the construction of comparative workflows coupling artificial-intelligence tools with environmental simulation models. Through the definition of 'lightweight' digital twins, the extraction of hydrological, climatic and heritage constraints, and the parametric generation of design variants, it is possible to produce structured sets of alternatives that are subsequently subjected to eco-geomorphological simulations and multi-objective evaluation. Measurable indicators – ecological (resilience, biodiversity, continuity) and aesthetic-spatial (legibility, hierarchies, rhythm) – make it possible to make trade-offs explicit and construct comparable scenarios (fig. 4).

The data-driven component does not merely stabilise the model, but makes it sensitive to local variations and disturbances; the process-based component provides a physical anchor that limits arbitrary drift. Hybridisation thus becomes an intermediate space in which simulation takes the form of a practice of interrogating the system.

From this perspective, modelling approaches design practice: the model is no longer a tool aimed at determining what will happen, but a device capable of exploring what might happen. It is precisely in this transition that exaptation assumes a central role: it directs modelling towards the production of differences, the valorisation of discrepancies, and the construction of alternative configurations.

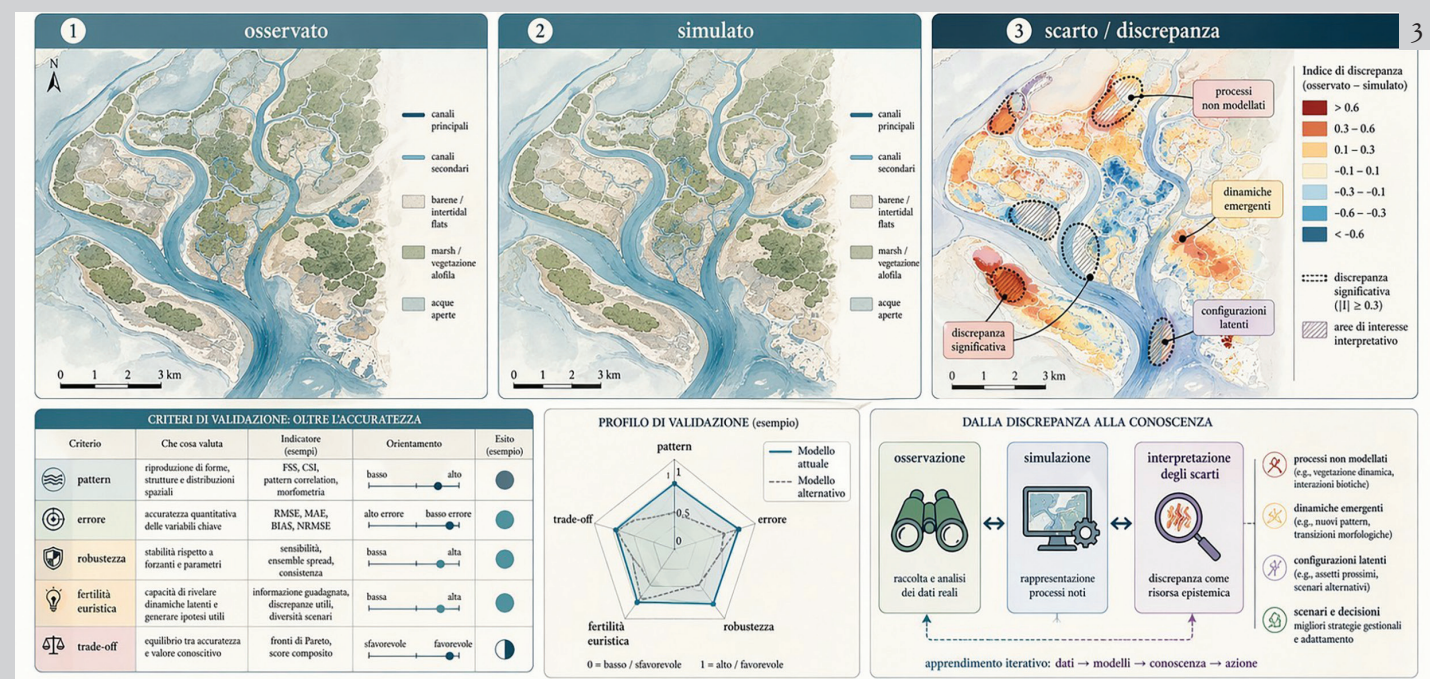
5. The Role of the Image: Modelling as a Representational Practice

Reconsidering modelling as an exploratory device entails a substantial redefinition of the role of the image. In conventional scientific practices, images are generally understood as model outputs: final representations that translate into visual form results already determined elsewhere. Thematic maps, graphs and renderings thus operate as tools for communication or verification, situated downstream of the knowledge-production process.

This paper instead proposes to treat representation as an operative component of modelling. In line with studies on the epistemic status of images (Daston, Galison 2007; Belting 2011), diagrams, simulations and visualisations do not merely make data legible, but actively participate in constructing the

Figure 3 'Exaptative' model validation: comparison between observed patterns, simulated patterns, and the discrepancy map. The discrepancy is not treated merely as an error to be minimised, but as an interpretable signal of unmodelled processes, emerging dynamics, and latent configurations, integrated into an evaluation combining accuracy, robustness, and heuristic fertility. Author's elaboration using ChatGPT.

Figure 4 Lightweight digital twin of the lagoon as a multi-level spatial model. The synoptic overlay of hydrodynamic, sedimentary, vegetation, and infrastructural layers makes feedbacks, chains of effects, and interactions across different scales legible, transforming environmental constraints into comparable indicators for exploring alternative scenarios. Author's elaboration using ChatGPT.



Alvise Cornaro (TAFURI 1985) e frammenti visivi contemporanei tra cui il concerto dei Pink Floyd (1989) e l'installazione di Robert Smithson *Broken Circle / Spiral Hill* (1971), che informano la simulazione del "Teatro" di Alvise Cornaro tramite AI generativa in basso a destra. Elaborazione dell'autrice con l'utilizzo di ChatGPT.

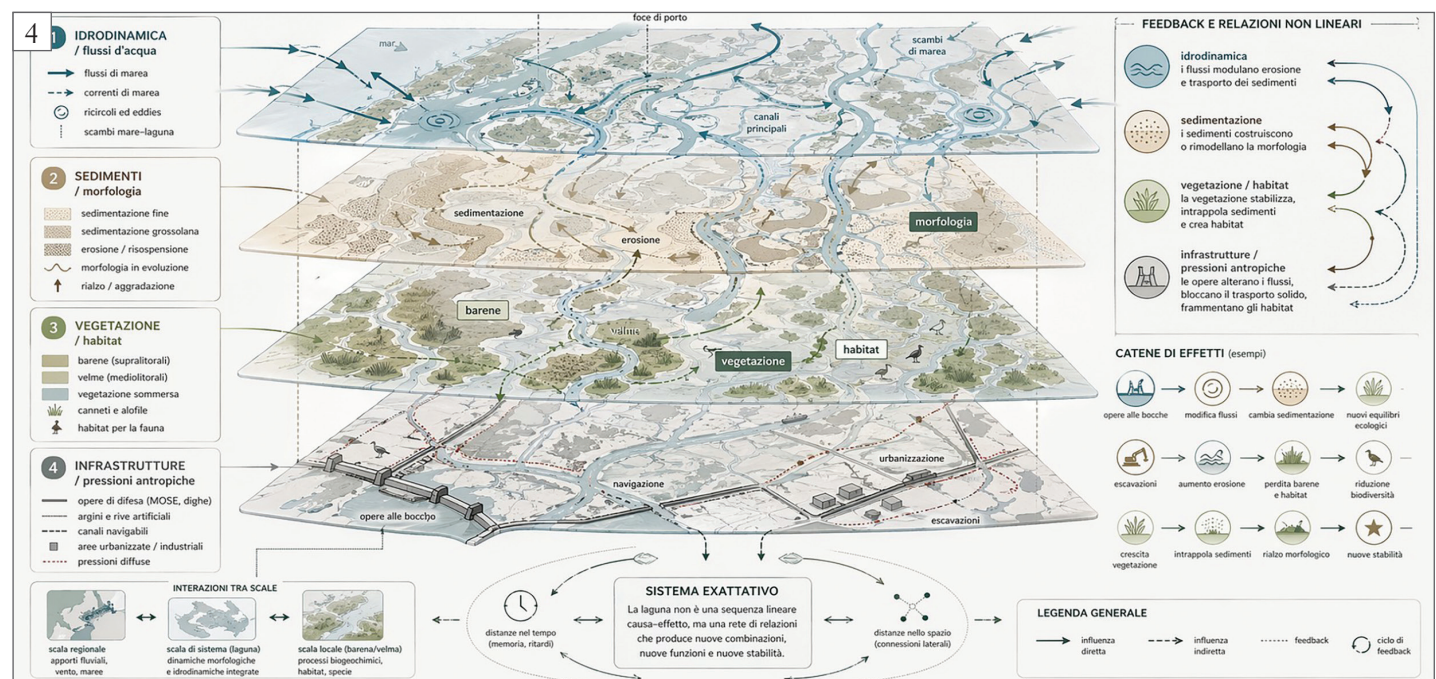
Figura 3 Validazione "exaptativa" del modello: confronto tra pattern osservati, pattern simulati e mappa delle discrepanze. Lo scarto non è trattato soltanto come errore da minimizzare, ma come segnale interpretabile di processi non modellati, dinamiche emergenti e configurazioni latenti, integrato in una valutazione che combina accuratezza, robustezza e fertilità euristica. Elaborazione dell'autrice con l'utilizzo di ChatGPT.

Figura 4 Digital twin leggero della laguna come modello spaziale multilivello. La sovrapposizione sinottica di layer idrodinamici, sedimentari,

(Grimm, Railsback 2005; Batty 2005; Batty 2013) – ha mostrato come regole locali possano generare strutture spaziali emergenti, offrendo un paradigma morfogenetico per comprendere la formazione di *pattern* ecologici e territoriali. In ambito lagunare, tali approcci trovano un terreno particolarmente fertile, in quanto la morfologia emerge da interazioni locali tra flussi, sedimenti e vegetazione.

Nonostante questa convergenza, l'impiego dei modelli ibridi rimane spesso orientato a una logica di ottimizzazione: l'obiettivo è ridurre l'errore, migliorare l'accuratezza e convergere verso una rappresentazione aderente al comportamento osservato del sistema. L'introduzione dell'*exaptation* come criterio operativo consente tuttavia di riconsiderare radicalmente questo orientamento. Un aspetto centrale di questa riconfigurazione riguarda infatti proprio il rapporto tra errore e conoscenza: nei modelli tradizionali, lo scarto tra previsione e osservazione è generalmente trattato come una deviazione da minimizzare; in un'ottica "exaptativa", invece, tali scarti possono essere interpretati come segnali di processi non ancora compresi o di dinamiche emergenti (fig. 3). L'errore diventa così una risorsa epistemica, un indice della presenza di configurazioni latenti che il modello può contribuire a rendere visibili.

In questo contesto, il disegno artificiale diventa funzionale alla gestione delle fasi di generazione e controllo all'interno di un'unica *pipeline* operativa. Da un lato, i modelli generativi basati su *deep learning* favoriscono una esplorazione divergente, producendo molteplici varianti e scenari controfattuali; dall'altro, i modelli *rule-based* e *process-based* garantiscono una convergenza verificabile, traducendo vincoli ambientali e conoscenze esplicite in procedure simulabili. Questa integrazione richiama, in termini contemporanei, la distinzione tra pensiero divergente e convergente (Guilford 1967), traducendola in una dinamica computazionale. Operativamente, tale approccio si traduce nella costruzione di *workflow* comparativi che accoppiano strumenti di intelligenza artificiale e modelli di simulazione ambientale. Attraverso la definizione di *digital twin* "leggeri", l'estrazione di vincoli (idrologici, climatici, patrimoniali) e la generazione parametrica di varianti progettuali, è possibile produrre insiemi strutturati a simulazioni eco-geomorfologiche e valutazioni multi-obiettivo. Indicatori misurabili – ecologici (resilienza, biodiversità, continuità) ed estetico-spaziali (leggibilità, gerarchie, ritmo) – consentono di esplicitare *trade-off* e costruire scenari comparabili (fig. 4).



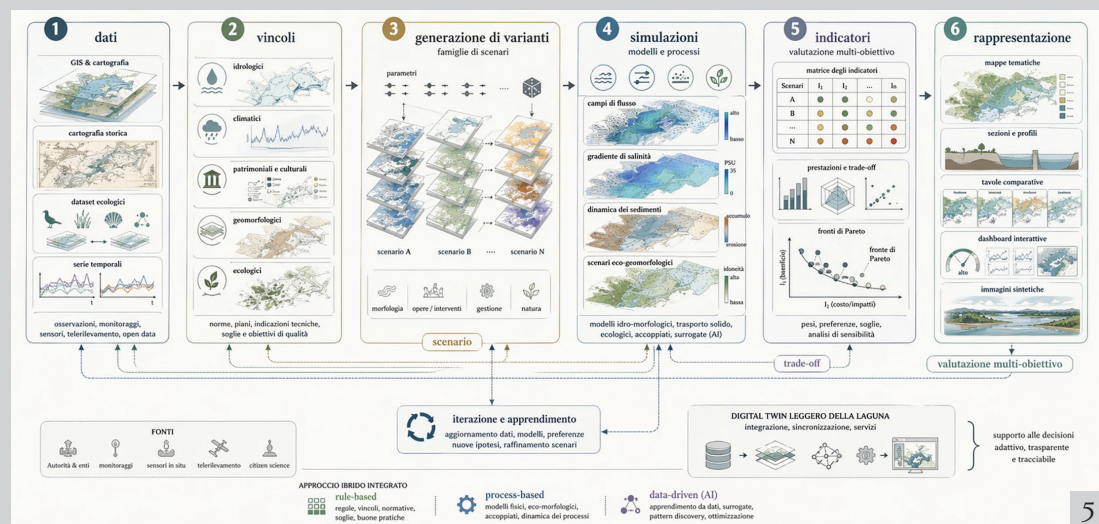


Figure 5
Operational pipeline of hybrid modelling: from data and constraints to the generation of variants, and subsequently to simulations, indicators, and representation. Each step produces intermediate visual artefacts – maps, sections, time series, comparative tables – that make the process traceable, verifiable, and open to the iterative reformulation of the model. Author’s elaboration using ChatGPT.

relations that define the system. The image becomes an interface through which the model is interrogated, modified and reorganised, making configurations visible that would not emerge from a purely numerical reading. Within this framework, representation assumes the role of a decision-making infrastructure. In hybrid modelling workflows, it organises the relationship among data, parameters, simulations and design scenarios, allowing alternative configurations to be compared explicitly and traceably. The operative pipeline can be schematised as an integrated sequence: data → constraints → variant generation → simulations → indicators → representation (fig. 5) in which each step produces intermediate visual artefacts (maps, sections, time series, dashboards) that make the process verifiable.

In the case of the Venice Lagoon, this approach is particularly relevant. The eco-geomorphological complexity of the system requires forms of representation capable of integrating heterogeneous variables: water levels, salinity gradients, sediment distribution, vegetation cover and temporal dynamics.

‘Lightweight’ digital twins of lagoon sites make it possible to construct multi-level spatial models in which GIS data, hydrodynamic simulations and ecological parameters are visualised synoptically, facilitating the identification of emerging patterns.

At a more specific level, some key quantities can be made operative through parameterised representations. For example:

- water residence time, understood as the average time water remains in the system, can be interpreted not only as a quantitative indicator, but as a continuous scalar field derived from hydrodynamic models, capable of representing spatial differences in water circulation and stagnation;
- similarly, the salinity field can be described as a spatio-temporal function $S(x,t)$, in which the distribution of salinity varies according to location and time, directly influencing the selection and distribution of plant species and creating differential conditions of habitability;
- relative elevation with respect to mean sea level can instead be expressed as the difference between ground elevation z and the water level varying over time $\eta(t)$; this relationship makes the alternation between emergence and submergence visible, identifying those dynamic thresholds underlying the formation and persistence of salt marshes (Carniello, Silvestri, Marani, D’Alpaos 2014; Fagherazzi, Kirwan, Mudd, Guntenspergen, Temmerman, D’Alpaos, Van De Koppel et al. 2012).

In all these cases, mathematical formalisation operates as an intermediate device between data and image, making explicit relations that would otherwise be difficult to observe. These variables, integrated into maps and temporal simulations, make it possible to construct synthetic indicators of ecological suitability, translating complex data into legible and comparable configurations.

In this context, the concept of exaptation also acquires specific relevance at the representation-

vegetazionali e infrastrutturali rende leggibili *feedback*, catene di effetti e interazioni tra scale diverse, trasformando i vincoli ambientali in indicatori comparabili per l’esplorazione di scenari alternativi.

Elaborazione dell’autrice con l’utilizzo di ChatGPT.

Figura 5
Pipeline operativa della modellazione ibrida: dai dati e dai vincoli alla generazione di varianti, quindi a simulazioni, indicatori e rappresentazione.

Ogni passaggio produce artefatti visivi intermedi – mappe, sezioni, serie temporali, tavole comparative – che rendono il processo tracciabile, verificabile e aperto alla riformulazione iterativa del modello.

Elaborazione dell’autrice con l’utilizzo di ChatGPT.

La componente *data-driven* non serve soltanto a stabilizzare il modello, ma a renderlo sensibile a variazioni locali e perturbazioni; quella *process-based* fornisce un ancoraggio fisico che impedisce derive arbitrarie. L’ibridazione diventa così uno spazio intermedio in cui la simulazione si configura come pratica di interrogazione del sistema.

In questa prospettiva, la modellazione si avvicina a una pratica progettuale. Il modello non è più uno strumento volto a determinare ciò che accadrà, ma un dispositivo capace di esplorare ciò che potrebbe accadere. È proprio in questo passaggio che l’*exaptation* assume un ruolo centrale: orienta la modellazione verso la produzione di differenze, la valorizzazione degli scarti e la costruzione di configurazioni alternative.

5. Il ruolo dell’immagine: modellazione come pratica rappresentazionale

La riconsiderazione della modellazione come dispositivo esplorativo implica una ridefinizione sostanziale del ruolo dell’immagine. Nelle pratiche scientifiche convenzionali, le immagini sono generalmente intese come *output* del modello: rappresentazioni finali che traducono in forma visiva risultati già determinati altrove. Mappe tematiche, grafici e *rendering* operano così come strumenti di comunicazione o verifica, collocati a valle del processo conoscitivo. Il presente contributo propone invece di assumere la rappresentazione come componente operativa della modellazione. In linea con gli studi sullo statuto epistemico delle immagini (Daston, Galison 2007; Belting 2011), diagrammi, simulazioni e visualizzazioni non si limitano a rendere leggibili i dati, ma partecipano attivamente alla costruzione delle relazioni che definiscono il sistema. L’immagine si configura come interfaccia attraverso cui il modello viene interrogato, modificato e riorganizzato, rendendo osservabili configurazioni che non emergerebbero da una lettura puramente numerica. In questo quadro, la rappresentazione assume il ruolo di infrastruttura decisionale. Nei *work-flow* di modellazione ibrida, essa organizza la relazione tra dati, parametri, simulazioni e scenari progettuali, permettendo di confrontare configurazioni alternative in modo esplicito e tracciabile. La *pipeline* operativa può essere sche-

matizzata come una sequenza integrata: dati → vincoli → generazione di varianti → simulazioni → indicatori → rappresentazione (fig. 5), in cui ogni passaggio produce artefatti visivi intermedi (mappe, sezioni, serie temporali, *dashboard*) che rendono il processo verificabile.

Nel caso della laguna di Venezia, questa impostazione trova un’applicazione particolarmente rilevante. La complessità eco-geomorfologica del sistema richiede infatti forme di rappresentazione capaci di integrare variabili eterogenee: livelli idrici, gradienti di salinità, distribuzione dei sedimenti, coperture vegetali e dinamiche temporali.

I *digital twin* “leggeri” dei siti lagunari permettono di costruire modelli spaziali multilivello, in cui dati GIS, simulazioni idrodinamiche e parametri ecologici vengono visualizzati in forma sinottica, facilitando l’individuazione di *pattern* emergenti.

A livello più specifico, alcune grandezze chiave possono essere rese operative attraverso rappresentazioni parametrizzate. Ad esempio:

- la residenza idrica, intesa come tempo medio di permanenza dell’acqua, può essere interpretata non solo come indicatore quantitativo, ma come campo scalare continuo derivato da modelli idrodinamici, capace di restituire differenze spaziali nella circolazione e nella stagnazione delle acque;

- in modo analogo, il campo di salinità può essere descritto come funzione spazio-temporale $S(x,t)$, in cui la distribuzione della salinità varia in relazione alla posizione e al tempo, influenzando direttamente la selezione e la distribuzione delle specie vegetali e costruendo condizioni differenziali di abitabilità;

- la quota altimetrica relativa rispetto al livello medio mare può essere invece espressa come differenza tra la quota del suolo z e il livello dell’acqua variabile nel tempo $\eta(t)$; questa relazione consente di rendere visibile l’alternanza tra emersione e sommersione, identificando quelle soglie dinamiche che sono alla base della formazione e della persistenza delle barene (Carniello, Silvestri, Marani, D’Alpaos 2014; Fagherazzi, Kirwan, Mudd, Guntenspergen, Temmerman, D’Alpaos, Van De Koppel et al. 2012).

In tutti questi casi, la formalizzazione matematica opera come dispositivo intermedio tra dato

al level. Images are not static entities, but devices open to re-functionalisation: heterogeneous materials – historical cartography, artistic iconography, scientific visualisations – can be co-opted into the model, assuming new interpretative roles. This assemblage of different elements produces a field of tensions in which new relationships between data, history and design emerge. Representation thus becomes a space of negotiation between the historiographical dimension and counterfactual simulation. On the one hand, historical images introduce constraints and stratifications; on the other, generative simulations make visible configurations that have not yet been actualised. The image therefore does not return a state of the system, but constructs a field of possibilities in which the model takes shape and becomes open to discussion.

6. Exaptation as a Criterion for Validation and Generation

Adopting exaptation as an operative criterion entails a profound transformation of the ways in which models are validated. In traditional paradigms, validation is based primarily on a model's ability to reproduce observed data or predict future states with a given degree of accuracy. Indicators such as mean error, standard deviation and predictive capacity constitute the main criteria of reliability.

In complex systems characterised by non-linear dynamics and strong dependence on initial conditions, however, these criteria are often insufficient: in the Venice Lagoon, for example, minimal variations in hydrodynamic or sedimentary parameters can produce amplified effects on morphology and on the distribution of plant communities (Marani, D'Alpaos, Lanzoni, Carniello, Rinaldo 2007; Fagherazzi, Kirwan, Mudd, Guntenspergen, Temmerman, D'Alpaos, Van De Koppel et al. 2012). In this context, exclusively predictive validation risks obscuring emerging dynamics and potential configurations.

From an 'exaptive' perspective, validation extends beyond correspondence between simulation and observation to include the model's capacity to generate meaningful configurations even when they diverge from expected data. The model is therefore evaluated not

only for its accuracy, but also for its heuristic fertility, namely its capacity to produce interpretable and relevant scenarios.

Operationally, this approach can be articulated through four complementary criteria:

1. First, pattern validation (pattern-oriented modelling) consists in comparing simulated and observed spatial and temporal configurations not at the point level, but through recurrences and recognisable structures at different scales (Grimm, Revilla, Berger, Jeltsch, Mooij, Railsback, Thulke et al. 2005).

2. This is accompanied by discrepancy analysis, in which discrepancies between simulated and observed values are not treated exclusively as errors to be reduced, but as signals of processes that are not fully modelled or of possible reconfigurations of the system

3. Multi-objective evaluation also makes it possible to relate different, often conflicting indicators, constructing comparative scenarios in which the trade-offs between ecological performance and design quality become explicit.

4. Finally, dynamic robustness is analysed, understood as the model's capacity to maintain coherent behaviour as initial conditions and parameters vary, thereby verifying the stability of the generated configurations.

In the lagoon context, these criteria can be made operative through specific indicators interpreted as fields of variation rather than isolated values (figs 6-7):

- salinity resilience, observed as variation in plant biomass in relation to the dynamics of the salinity field $S(x, t)$;
- sediment-trapping capacity, linked to the interaction between vegetation cover and flow velocity;
- submergence frequency, understood as the temporal rhythm of flooding events;
- ecological continuity, described as the degree of connection among different habitats.

Integrated within multi-objective evaluation matrices, these indicators make it possible to compare alternative design scenarios not in terms of an optimal solution, but as comparable configurations, making the trade-offs and the relationships between ecological processes and spatial qualities explicit.

Counterfactual simulation plays a crucial role in this framework. Generating scenarios that have

e immagine, rendendo esplicite relazioni altrimenti difficilmente osservabili. Queste variabili, integrate in mappe e simulazioni temporali, permettono di costruire indicatori sintetici di idoneità ecologica, traducendo dati complessi in configurazioni leggibili e comparabili.

In questo contesto, il concetto di *exaptation* acquista una rilevanza specifica anche sul piano rappresentazionale. Le immagini non sono entità statiche, ma dispositivi aperti alla ri-funzionalizzazione: materiali eterogenei – cartografia storica, iconografia artistica, visualizzazioni scientifiche – possono essere cooptati all'interno del modello, assumendo nuovi ruoli interpretativi. Questo montaggio di elementi diversi produce un campo di tensioni in cui emergono nuove relazioni tra dati, storia e progetto.

La rappresentazione diventa così uno spazio di negoziazione tra dimensione storiografica e simulazione controfattuale. Da un lato, le immagini storiche introducono vincoli e stratificazioni; dall'altro, le simulazioni generative rendono visibili configurazioni non ancora attualizzate. L'immagine non restituisce quindi uno stato del sistema, ma costruisce un campo di possibilità, in cui il modello prende forma e si rende discutibile.

6. Exaptation come criterio di validazione e generazione

L'assunzione dell'*exaptation* come criterio operativo comporta una trasformazione profonda anche delle modalità di validazione dei modelli. Nei paradigmi tradizionali, la validazione si fonda prevalentemente sulla capacità del modello di riprodurre dati osservati o di prevedere stati futuri con un certo grado di accuratezza. Indicatori come errore medio, deviazione standard e capacità predittiva costituiscono i principali criteri di affidabilità.

Tuttavia, nei sistemi complessi caratterizzati da dinamiche non lineari e da forte dipendenza dalle condizioni iniziali, tali criteri risultano spesso insufficienti. Nel caso della laguna di Venezia, ad esempio, variazioni minime nei parametri idrodinamici o sedimentari possono produrre effetti amplificati sulla morfologia e sulla distribuzione delle comunità vegetali (Marani, D'Alpaos, Lanzoni, Carniello, Rinaldo 2007; Fagherazzi, Kirwan, Mudd, Gun-

tenspergen, Temmerman, D'Alpaos, Van De Koppel et al. 2012). In questo contesto, una validazione esclusivamente predittiva rischia di occultare dinamiche emergenti e configurazioni potenziali.

In una prospettiva "exattativa", la validazione si estende oltre la corrispondenza tra simulazione e osservazione, includendo la capacità del modello di generare configurazioni significative anche quando divergono dai dati attesi. Il modello, quindi, non è valutato solo per la sua accuratezza, ma per la sua fertilità euristica, ovvero per la capacità di produrre scenari interpretabili e rilevanti.

Operativamente, questo approccio può essere articolato attraverso una combinazione di criteri:

1. In primo luogo, la validazione per *pattern* (*pattern-oriented modelling*) consiste nel confrontare configurazioni spaziali e temporali simulate con quelle osservate, non a livello puntuale ma attraverso ricorrenze e strutture riconoscibili a diverse scale (Grimm, Revilla, Berger, Jeltsch, Mooij, Railsback, Thulke et al. 2005).

2. A questa si affianca l'analisi degli scarti, in cui le discrepanze tra valori simulati e osservati non sono trattate esclusivamente come errori da ridurre, ma come segnali di processi non completamente modellati o di possibili riconfigurazioni del sistema.

3. La valutazione multi-obiettivo introduce inoltre la possibilità di mettere in relazione indicatori differenti, spesso in tensione tra loro, costruendo scenari comparativi in cui i *trade-off* tra prestazioni ecologiche e qualità progettuali diventano espliciti.

4. Infine, viene analizzata la robustezza dinamica, ossia la capacità del modello di mantenere comportamenti coerenti al variare delle condizioni iniziali e dei parametri, verificando la stabilità delle configurazioni generate.

Nel contesto lagunare, tali criteri possono essere resi operativi attraverso una serie di indicatori specifici, interpretati come campi di variazione più che come valori isolati (figg. 6-7):

- la resilienza alla salinità, osservata come variazione della biomassa vegetale in relazione alle dinamiche del campo salino $S(x, t)$;
- la capacità di intrappolamento sedimentario, legata all'interazione tra copertura vegetale e velocità dei flussi;

never occurred – for example, extreme variations in salinity or alternative vegetation configurations – makes it possible to explore the plasticity of the system and identify conditions of transformation. Such scenarios are not predictions, but tools for interrogating the system, capable of expanding the field of possibilities. Here too, the representational dimension is decisive. The images produced by the model – dynamic maps, time series and comparative visualisations – do not merely illustrate results, but contribute to their evaluation, making differences and relationships between scenarios perceptible. Validation thus becomes a visual and comparative process, as well as a numerical one.

7. Discussion

Introducing exaptation as an epistemic, methodological and representational criterion makes it possible to reformulate the role of modelling itself. At the theoretical level, the paper is situated within the critique of the adaptationist paradigm (Gould, Lewontin 1979; Gould, Vrba 1982), proposing an interpretation of complex systems based on contingency,

deviation and re-functionalisation. Observable configurations are therefore not interpreted as optimal outcomes, but as temporary states emerging from concatenations of heterogeneous processes, in line with approaches that emphasise the non-linearity and historicity of systems (Mitchell 2009; DeLanda 2016). Methodologically, adopting an ‘exaptive’ criterion makes it possible to reconsider hybrid modelling as an open practice oriented towards generating and comparing scenarios rather than predicting a single outcome. In this sense, the paper is continuous with pattern-oriented modelling (Grimm, Revilla, Berger, Jeltsch, Mooij, Railsback, Thulke et al. 2005) and with recent developments in hybrid models integrating process description and machine learning (Zennaro, Furlan, Canu, Aveytua Alcazar, Rosati, Solidoro, Aslan, Critto 2023; Lalic, Cuong, Petric, Pavlovic, Firanj Sremac, Roantree 2024), but introduces an additional shift: discrepancies, deviations and unexpected outcomes are interpreted as epistemic resources rather than model limitations. Of particular relevance in this framework is

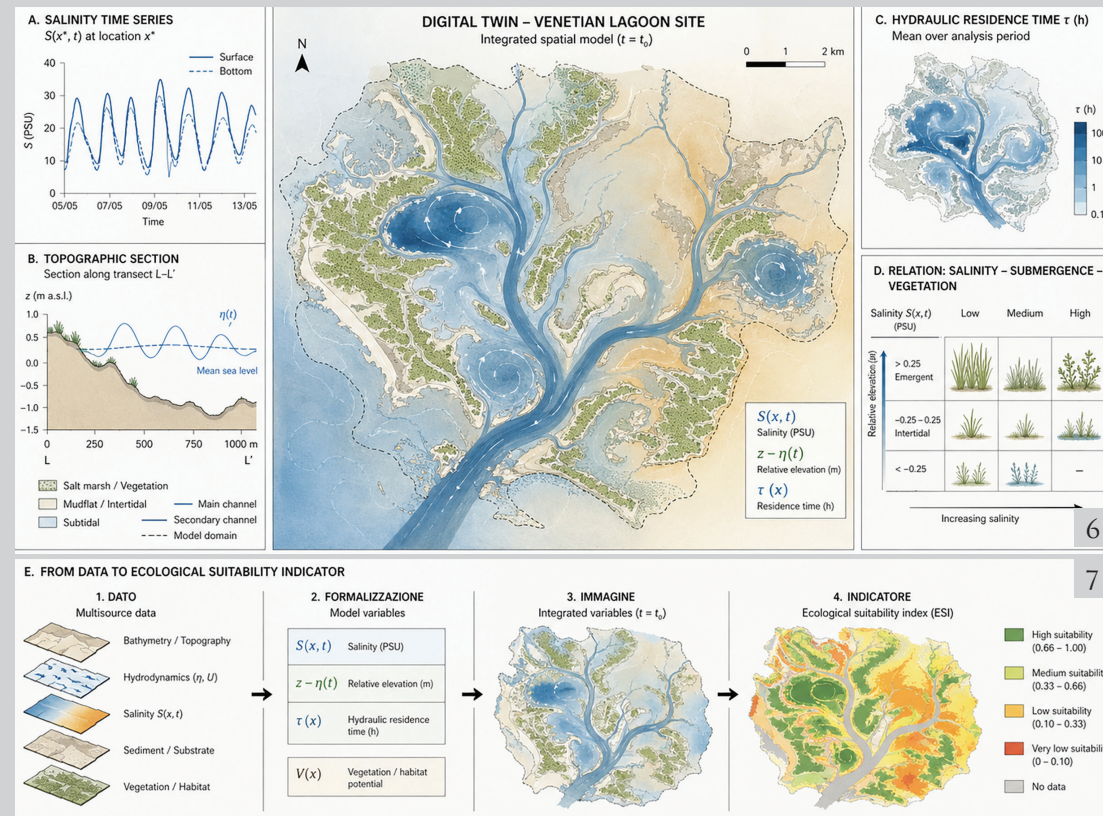


Figure 6
Extraction and formalisation of key parameters for the eco-geomorphological analysis of a lagoon site. The figure integrates salinity time series, an altimetric section, water residence time, and the relationship between salinity, submergence, and vegetation, showing how heterogeneous variables can be integrated into a synoptic spatial model. Author's elaboration using ChatGPT.

Figure 7
From parameterisation to indicator. Multisource data are formalised into operation variables – salinity field $S(x, t)$, relative elevation $z - \eta(t)$, water residence time, and vegetation potential – and recomposed into a synthetic ecological suitability indicator, useful for comparing configurations and scenarios. Author's elaboration using ChatGPT.

- la frequenza di sommersione, intesa come ritmo temporale degli eventi di allagamento;
- la continuità ecologica, descritta come grado di connessione tra habitat differenti.

Questi indicatori, integrati all'interno di matrici di valutazione multi-obiettivo, permettono di confrontare scenari progettuali alternativi non in termini di soluzione ottimale, ma come configurazioni tra loro comparabili, rendendo espliciti i *trade-off* e le relazioni tra processi ecologici e qualità spaziali. La simulazione controfattuale svolge in questo quadro un ruolo cruciale. Generare scenari che non si sono mai verificati – ad esempio variazioni estreme di salinità o configurazioni vegetazionali alternative – consente di esplorare la plasticità del sistema e di individuare condizioni di trasformazione. Tali scenari non sono previsioni, ma strumenti di interrogazione, capaci di ampliare il campo delle possibilità.

Anche in questo caso, la dimensione rappresentazionale è determinante. Le immagini prodotte dal modello – mappe dinamiche, serie temporali, visualizzazioni comparative – non si limitano a illustrare i risultati, ma contribuiscono alla loro valutazione, rendendo percepibili differenze e relazioni tra scenari. La validazione diventa così un processo visivo e comparativo, oltre che numerico.

7. Discussione

L'introduzione dell'*exaptation* come criterio epistemico, metodologico e rappresentazionale nella modellazione degli ecosistemi complessi consente di riformulare in modo significativo il ruolo stesso della modellazione. Sul piano teorico, il contributo si colloca all'interno della critica al paradigma adattazionista (Gould, Lewontin 1979; Gould, Vrba 1982), proponendo una lettura dei sistemi complessi fondata sulla contingenza, sulla deviazione e sulla ri-funzionalizzazione. In questa prospettiva, le configurazioni osservabili non sono interpretate come esiti ottimali, ma come stati temporanei emergenti da concatenazioni di processi eterogenei, in linea con approcci che enfatizzano la non linearità e la storicità dei sistemi (Mitchell 2009; DeLanda 2016). Dal punto di vista metodologico, l'assunzione di un criterio “exattativo” consente di riconsi-

derare la modellazione ibrida come una pratica aperta, orientata alla generazione e comparazione di scenari piuttosto che alla previsione di un esito unico. In questo senso, il contributo si pone in continuità con il *pattern-oriented modelling* (Grimm, Revilla, Berger, Jeltsch, Mooij, Railsback, Thulke et al. 2005) e con gli sviluppi recenti dei modelli ibridi che integrano descrizione processuale e apprendimento automatico (Zennaro, Furlan, Canu, Aveytua Alcazar, Rosati, Solidoro, Aslan, Critto 2023; Lalic, Cuong, Petric, Pavlovic, Firanj Sremac, Roantree 2024), ma introduce uno spostamento ulteriore: gli scarti, le deviazioni e gli esiti inattesi vengono interpretati come risorse epistemiche, non come limiti del modello. Particolarmente rilevante è, in questo quadro, l'integrazione con il paradigma del disegno artificiale, che consente di articolare operativamente la relazione tra modellazione e progetto. La costruzione di *workflow* comparativi – basati su *digital twin*, generazione parametrica, simulazioni eco-geomorfologiche e valutazione multi-obiettivo (fig. 8) – trasforma la modellazione in una infrastruttura decisionale capace di rendere espliciti vincoli, assunzioni e *trade-off*. Tale impostazione si avvicina alle recenti evoluzioni dei sistemi di rappresentazione integrata (*digital twin*, *landscape information modelling*), che interpretano la simulazione come parte di una catena operativa più ampia (Xing, Gan, Chen 2025).

Sul piano della rappresentazione, il contributo si inserisce nel dibattito sul ruolo attivo delle immagini nei processi scientifici e progettuali. La rappresentazione non è più intesa come semplice restituzione, ma come dispositivo attraverso cui il modello prende forma, viene interrogato e reso condivisibile. In questo senso, l'integrazione di materiali eterogenei – dati ambientali, simulazioni computazionali, cartografie storiche e immagini generate – configura la modellazione come pratica di montaggio, in cui domini differenti vengono messi in relazione. Nel caso della laguna di Venezia, tale approccio assume una particolare rilevanza. Il sistema lagunare si presenta infatti come un palinsesto dinamico, in cui dinamiche ecologiche, infrastrutturali e culturali si intrecciano storicamente (Tafuri 1985). L'adozione di una prospettiva “exattativa” consente di leggere questa stratifi-

Figura 6
Estrazione e formalizzazione di parametri chiave per l'analisi eco-geomorfologica di un sito lagunare. La figura integra serie temporali di salinità, sezione altimetrica, residenza idrica e relazione tra salinità, sommersione e vegetazione, mostrando come variabili eterogenee possano essere ricondotte a un modello spaziale sinottico. Elaborazione dell'autrice con l'utilizzo di ChatGPT.

Figura 7
Dalla parametrizzazione all'indicatore. I dati multisorgente vengono formalizzati in variabili operative – campo salino $S(x, t)$, quota relativa $z - \eta(t)$, tempo di residenza idrica e potenziale vegetazionale – e ricomposti in un indicatore sintetico di idoneità ecologica, utile al confronto tra configurazioni e scenari. Elaborazione dell'autrice con l'utilizzo di ChatGPT.

the integration with the artificial drawing paradigm, which makes it possible to articulate the relationship between modelling and design operationally. The construction of comparative workflows – based on digital twins, parametric generation, eco-geomorphological simulations and multi-objective evaluation (fig. 8) – transforms modelling into a decision-making infrastructure capable of making constraints, assumptions and trade-offs explicit. This approach is close to recent developments in integrated representation systems (digital twin, landscape information modelling), which interpret simulation as part of a broader operational chain (Xing, Gan, Chen 2025).

At the level of representation, the paper contributes to the debate on the active role of images in scientific and design processes. Representation is no longer understood as a simple restitution, but as a device through which the model takes form, is interrogated and becomes shareable. In this sense, the integration of heterogeneous materials – environmental data, computational simulations, historical cartography and generated images – configures modelling as a practice of assemblage, in which different domains are brought into relation.

In the case of the Venice Lagoon, this approach is particularly relevant. The lagoon system presents itself as a dynamic palimpsest, in which ecological, infrastructural and cultural dynamics are historically intertwined (Tafuri 1985). Adopting an ‘exaptive’ perspective makes it possible to read this stratification not as an overlap of states, but as a continuous process of re-functionalisation, while artificial drawing provides operative tools for translating this complexity into modellable and comparable configurations. Some critical issues must nevertheless be acknowledged. Expanding validation criteria and assigning value to the unexpected make it more difficult to define shared parameters of judgement. Moreover, the proliferation of possible scenarios risks weakening the model’s selective capacity unless it is accompanied by rigorous tools for comparison and evaluation. In addition, the integration of heterogeneous components – data, rules, models and representations – requires explicit control of the relationships

among the different levels, in order to avoid purely illustrative or arbitrary outcomes. Despite these limitations, the proposed approach makes it possible to redefine modelling as a critical and design practice capable not only of describing complex systems, but also of interrogating their latent dynamics and making visible the conditions of their transformation.

8. Conclusions

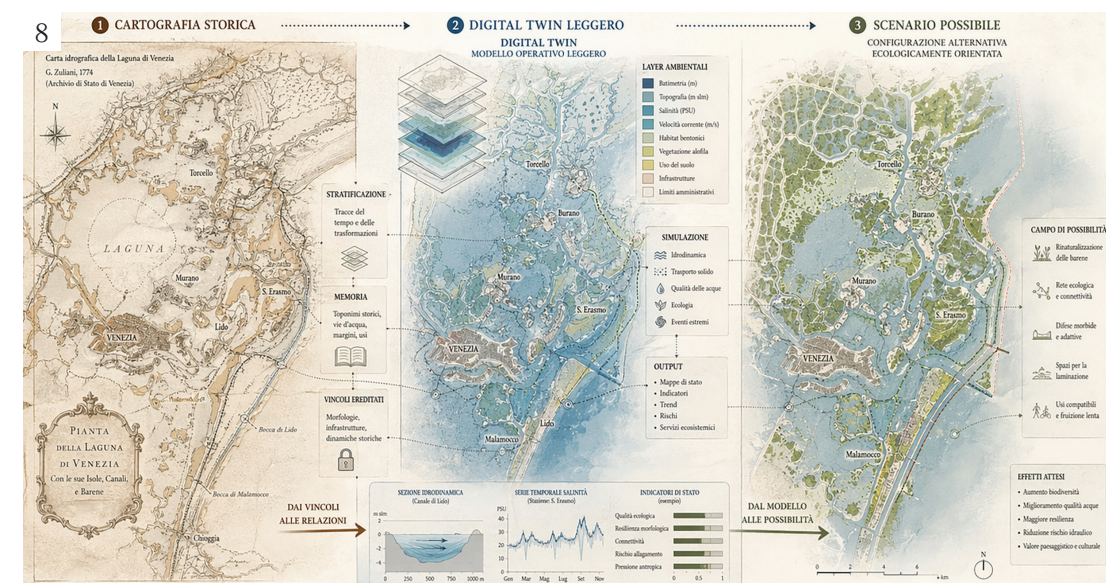
The paper has proposed a reinterpretation of exaptation as an operative, epistemic and representational criterion in the modelling of complex ecosystems, taking the Venice Lagoon as a paradigmatic case. Through this perspective, it has been possible to question the adaptationist and predictive orientation that characterises a large part of contemporary modelling practices, highlighting the need for tools capable of engaging with contingency, non-linearity and re-functionalisation.

Modelling has thus been reconsidered as an exploratory practice oriented towards constructing a field of possibilities rather than determining an optimal outcome. Within this framework, hybrid models based on artificial intelligence have been interpreted as devices capable of integrating process description and generative capacity, producing comparable scenarios and making latent patterns visible.

A central element of the work has been the recognition of the operative role of representation. The image has not been understood as a simple model output, but as an infrastructure through which data, simulations and constraints are organised, made legible and related to one another. Modelling thus emerges as an intrinsically representational practice, in which the production of images coincides with the construction of the field of inquiry itself.

In this context, the artificial drawing paradigm has provided an operative structure for integrating generation and control, translating environmental constraints into design configurations and making multiple alternatives comparable. The data–constraints–variants–simulations–indicators–representation pipeline defines a working model in which each step is traceable and verifiable, and in which the final image is an argued synthesis, rather

Figure 8
Representational montage between historical cartography, digital twin, and possible scenario. The figure shows the transition from historical traces and inherited constraints to their reorganisation in a multi-level operational model, up to the construction of ecologically oriented scenarios: not a mere representation of the current state, but a field of possibilities rendered open to discussion through the image. Author’s elaboration using ChatGPT.



cazione non come sovrapposizione di stati, ma come processo continuo di ri-funionalizzazione, mentre il disegno artificiale offre strumenti operativi per tradurre tale complessità in configurazioni modellabili e comparabili. Accanto a questi elementi, è tuttavia necessario evidenziare alcune criticità. L’ampliamento dei criteri di validazione e la valorizzazione dell’imprevisto comportano una maggiore difficoltà nella definizione di parametri condivisi di giudizio. La proliferazione di scenari possibili rischia infatti di indebolire la capacità selettiva del modello, se non accompagnata da strumenti rigorosi di comparazione e valutazione. Inoltre, l’integrazione di componenti eterogenee – dati, regole, modelli e rappresentazioni – richiede un controllo esplicito delle relazioni tra i diversi livelli, per evitare derive puramente illustrative o arbitrarie. Nonostante tali limiti, l’approccio proposto consente di ridefinire la modellazione come pratica critica e progettuale, capace non solo di descrivere sistemi complessi, ma di interrogarne le dinamiche latenti e di rendere visibili le condizioni della loro trasformazione.

8. Conclusioni

Il contributo ha proposto una reinterpretazione dell’*exaptation* come criterio operativo, epistémico e rappresentazionale nella modellazione degli ecosistemi complessi, assumendo la laguna di Venezia come caso paradigmatico.

Attraverso questa prospettiva, è stato possibile mettere in discussione l’orientamento adattazionista e predittivo che caratterizza gran parte delle pratiche modellistiche contemporanee, evidenziando la necessità di strumenti capaci di confrontarsi con la contingenza, la non linearità e la ri-funionalizzazione.

La modellazione è stata così riconsiderata come una pratica esplorativa, orientata alla costruzione di un campo di possibilità piuttosto che alla determinazione di un esito ottimale. In questo quadro, i modelli ibridi basati su intelligenza artificiale sono stati interpretati come dispositivi capaci di integrare descrizione processuale e capacità generativa, producendo scenari comparabili e rendendo visibili *pattern* latenti.

Un elemento centrale del lavoro è stato il riconoscimento del ruolo operativo della rappresentazione. L’immagine non è stata intesa come semplice *output* del modello, ma come infrastruttura attraverso cui dati, simulazioni e vincoli vengono organizzati, resi leggibili e messi in relazione. La modellazione si configura così come una pratica intrinsecamente rappresentazionale, in cui la produzione di immagini coincide con la costruzione stessa del campo di indagine.

In questo contesto, il paradigma del disegno artificiale ha fornito una struttura operativa per integrare generazione e controllo, traducendo vincoli ambientali in configurazioni

Figura 8
Montaggio rappresentazionale tra cartografia storica, *digital twin* e scenario possibile. La figura mostra il passaggio da tracce storiche e vincoli ereditati alla loro riorganizzazione in un modello operativo multilivello, fino alla costruzione di scenari ecologicamente orientati: non una semplice restituzione dello stato attuale, ma un campo di possibilità reso discutibile attraverso l’immagine. Elaborazione dell’autrice con l’utilizzo di ChatGPT.

than a self-sufficient aesthetic outcome. The research questions thus find a possible articulation: exaptation operates as an operative criterion insofar as it directs modelling towards the production of differences and the valorisation of discrepancies; hybrid models become exploratory devices when they are freed from an exclusively predictive purpose; images assume a central role when they are recognised as active tools for construction and interpretation; and the unintended trajectories of lagoon evolution become visible when the model accepts the need to engage

with the plurality of possibilities. Adopting exaptation as an operative criterion entails a transformation of epistemic stance: from the search for stable states to the analysis of processes in becoming, from optimisation to exploration, and from representation as restitution to representation as a space of generation. From this perspective, the modelling of complex ecosystems takes the form of an open practice in which knowledge and design intertwine, contributing to making visible the latent dynamics and transformative potential of the lagoon system.

References / Bibliografia

- ALLEN T.F.H., HOEKSTRA T.W. (2015), *Toward a Unified Ecology*, New York, Columbia University Press.
- ASLAN S., ZENNARO F., FURLAN E., CRITTO A. (2022), *Recurrent neural networks for water quality assessment in complex coastal lagoon environments: A case study on the Venice Lagoon*, «Environmental Modelling & Software», 154. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2022.105403>.
- BATTY M. (2005), *Cities and Complexity: Understanding Cities with Cellular Automata, Agent-Based Models, and Fractals*, Cambridge, MA, The MIT Press.
- BATTY M. (2013), *The New Science of Cities*, Cambridge, MA, The MIT Press.
- BELTING H. (2011), *An Anthropology of Images: Picture, Medium, Body*, Princeton, Princeton University Press.
- BOZZEDA F., SIGOVINI, M., LIONELLO P. (2025), *Neural Network Modelling of Temperature and Salinity in the Venice Lagoon*, «Climate», 13, 9. DOI: <https://doi.org/10.3390/cli13090189>.
- CARNIELLO L., DEFINA A., D'ALPAOS L. (2009), *Morphological evolution of the Venice lagoon: Evidence from the past and trend for the future*, «Journal of Geophysical Research: Earth Surface», 114, F4. DOI: <https://doi.org/10.1029/2008JF001157>.
- CARNIELLO L., SILVESTRI S., MARANI M., D'ALPAOS A. (2014), *Sediment dynamics in shallow tidal basins: In situ observations, satellite retrievals, and numerical modeling in the Venice Lagoon*, «Journal of Geophysical Research: Earth Surface», 119, 4. DOI: <https://doi.org/10.1002/2013JF003015>.
- CESSI R. (1981), *Storia della Repubblica di Venezia*, Firenze, Giunti-Martello.
- CIPRIANO C., NOCE S., MEREU S., SANTINI M. (2025), *Algorithms going wild – A review of machine learning techniques for terrestrial ecology*, «Ecological Modelling», 506. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2025.111164>.
- DASTON L., GALISON P. (2007), *Objectivity*, New York, Zone Books.
- DELANDA M. (2016), *Assemblage Theory*, Edinburgh, Edinburgh University Press.
- FAGHERAZZI S., KIRWAN M.L., MUDD S.M., GUNTENSPERGEN G.R., TEMMERMAN S., D'ALPAOS A., VAN DE KOPPEL J. et al. (2012), *Numerical models of salt marsh evolution: Ecological, geomorphic, and climatic factors*, «Reviews of Geophysics», 50, 1. DOI: <https://doi.org/10.1029/2011RG000359>.
- GOULD S.J., LEWONTIN R.C. (1979), *The spandrels of San Marco and the Panglossian paradigm: A critique of the adaptationist programme*, «Proceedings of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences», 205, 1161, pp. 581-598. DOI: <https://doi.org/10.1098/rspb.1979.0086>.
- GOULD S.J., VRBA E.S. (1982), *Exaptation – A missing term in the science of form*, «Paleobiology», 8, 1, pp. 4-15, <http://www.jstor.org/stable/2400563> (ultima consultazione 10/9/2026).

progettuali e rendendo confrontabili molteplici alternative. La *pipeline* dati–vincoli–varianti–simulazioni–indicatori–rappresentazione definisce un modello di lavoro in cui ogni passaggio è tracciabile e verificabile, e in cui l'immagine finale è una sintesi argomentata, non un esito estetico autosufficiente. Le domande di ricerca trovano così una possibile articolazione: l'*exaptation* opera come criterio operativo nella misura in cui orienta la modellazione verso la produzione di differenze e la valorizzazione degli scarti; i modelli ibridi diventano dispositivi esplorativi quando vengono liberati da una finalità esclusivamente predittiva; le immagini assumono un ruolo centrale quando sono riconosciute come strumenti

attivi di costruzione e interpretazione; le traiettorie non intenzionali dell'evoluzione lagunare diventano visibili quando il modello accetta di confrontarsi con la pluralità delle possibilità. Adottare l'*exaptation* come criterio operativo implica una trasformazione della postura epistemica: dalla ricerca di stati stabili all'analisi di processi in divenire, dall'ottimizzazione all'esplorazione, dalla rappresentazione come restituzione alla rappresentazione come spazio di generazione. In questa prospettiva, la modellazione degli ecosistemi complessi si configura come una pratica aperta, in cui conoscenza e progetto si intrecciano, contribuendo a rendere visibili le dinamiche latenti e le potenzialità trasformative del sistema lagunare.

- GRIMM V., RAILSBACK S.F. (2005), *Individual-based Modeling and Ecology*, Princeton, Princeton University Press.
- GRIMM V., REVILLA E., BERGER U., JELTSCH F., MOOIJ W.M., RAILSBACK S.F., THULKE H.H. et al. (2005), *Pattern-oriented modeling of agent-based complex systems: Lessons from ecology*, «Science», 310, 5750, pp. 987-991. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.1116681>.
- GUILFORD J.P. (1967), *The Nature of Human Intelligence*, New York, McGraw-Hill.
- LALIC B., CUONG D.V., PETRIC M., PAVLOVIC V., FIRANJ SREMAC A., ROANTREE M. (2024), *Modelling Mosquito Population Dynamics using PINN-derived Empirical Parameters*, «arXiv». DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2412.07514>.
- LINDENMAYER A. (1968), *Mathematical models for cellular interaction in development I. Filaments with one-sided inputs*, «Journal of Theoretical Biology», 18, 3, pp. 280-299. DOI: [https://doi.org/10.1016/0022-5193\(68\)90079-9](https://doi.org/10.1016/0022-5193(68)90079-9).
- MARANI M., D'ALPAOS A., LANZONI S., CARNIELLO L., RINALDO A. (2007), *Biologically-controlled multiple equilibria of tidal landforms and the fate of the Venice lagoon*, «Geophysical Research Letters», 34, 11. DOI: <https://doi.org/10.1029/2007GL030178>.
- MITCHELL M. (2009), *Complexity: A Guided Tour*, Oxford, Oxford University Press.
- PARKER W.S. (2009), *Does matter really matter? Computer simulations, experiments, and materiality*, «Synthese», 169, 3, pp. 483-496. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11229-008-9434-3>.
- PRUSINKIEWICZ P., LINDENMAYER A. (1990), *The Algorithmic Beauty of Plants*, New York, Springer-Verlag.
- RUBBENS P., BRODIE S., CORDIER T., DESTRO BARCELLOS D., DEVOS P., FERNANDES-SALVADOR J.A., FINCHAM J.I. et al. (2023), *Machine learning in marine ecology: an overview of techniques and applications*, «ICES Journal of Marine Science», 80, 7, pp. 1829-1853. DOI: <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsad100>.
- SPILLIAS S., TREBILCO R., ADAMS M.P., BOSCHETTI F., CONSTABLE A., DUNSTAN P., FERRIER S. et al. (2026), *The Future of Artificial Intelligence in Ecosystem Modeling*, «BioScience», 76, 1, pp. 57-70. DOI: <https://doi.org/10.1093/biosci/biaf169>.
- TAFURI M. (1985), *Venezia e il Rinascimento*, Torino, Einaudi.
- TRISCIUOGGIO M. (2024), *Exaptation in Transitional Urban Morphologies: First Notes on the Dynamics of Urban Form Read through the Theories of Natural Evolution*, «Land», 13, 1. DOI: <https://doi.org/10.3390/land13010074>.
- WINSBERG E. (2010), *Science in the Age of Computer Simulation*, Chicago, University of Chicago Press.
- XING Y., GAN W., CHEN Q. (2025), *Artificial intelligence in landscape architecture: a survey*, «International Journal of Machine Learning and Cybernetics», 16, pp. 4685-4710. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13042-025-02536-w>.
- ZENNARO F., FURLAN E., CANU D., AVEYTUA ALCAZAR L., ROSATI G., SOLIDORO C., ASLAN S., CRITTO A. (2023), *Venice lagoon chlorophyll-a evaluation under climate change conditions: A hybrid water quality machine learning and biogeochemical-based framework*, «Ecological Indicators», 157. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.111245>.