

ARTICLE INFO

Received 10 September 2025
Revised 25 October 2025
Accepted 27 October 2025
Published 30 December 2025

PROGETTARE CON L'ACQUA

Strategie, protocolli e progetti
nell'architettura e per le città

DESIGNING WITH WATER

Strategies, protocols, and projects
in architecture and for cities

Tiziana Campisi, Luisa Lombardo

ABSTRACT

La gestione dell'acqua è sempre più centrale nel progetto di architettura e di rigenerazione urbana, sia per le nuove costruzioni che per il Patrimonio esistente. La carenza globale di acqua dolce, aggravata dalle ricorrenti siccità, ne richiede un ripensamento radicale dell'uso, in linea con il riconoscimento delle Nazioni Unite dell'accesso all'acqua come diritto umano. Promuoverne l'efficienza richiede strategie integrate come la raccolta e il riciclo dell'acqua piovana, i sistemi di infiltrazione e le tecnologie di monitoraggio avanzate. La progettazione deve adottare materiali sostenibili che minimizzino i consumi e garantiscano un'efficienza a lungo termine. Questo articolo analizza le pratiche attuali e i casi di studio, proponendo protocolli e buone pratiche replicabili. L'acqua diventa non solo una risorsa gestita ma anche un generatore di valore, resilienza e benessere a supporto dell'Agenda 2030 per lo Sviluppo Sostenibile.

Water management is becoming increasingly central to both architectural design and urban regeneration, encompassing not only new developments but also the preservation and adaptation of existing heritage. The global scarcity of freshwater, exacerbated by recurrent droughts, necessitates a radical rethinking of water use, aligned with the United Nations' recognition of access to water as a fundamental human right. Improving water efficiency demands integrated strategies such as rainwater harvesting and reuse, infiltration systems, and advanced monitoring and control technologies. Architectural design must incorporate sustainable materials and systems that minimise resource consumption while ensuring long-term performance, durability, and efficiency. This paper analyses current practices and case studies, proposing transferable protocols and best practices. In this context, water emerges not merely as a managed resource but as a generator of environmental, social, and economic value, resilience, and well-being, supporting the objectives of the 2030 Agenda for Sustainable Development.

KEYWORDS

gestione dell'acqua, architettura sostenibile, rigenerazione urbana, conservazione dell'acqua, progetto resiliente

water management, sustainable architecture, urban regeneration, water conservation, resilient design



Tiziana Campisi, Architectural Engineer and PhD, is a Full Professor of Architectural Engineering at the Department of Architecture, University of Palermo (Italy). Her research focuses on architectural construction techniques, with particular attention to the sustainable and compatible rehabilitation of traditional architecture. E-mail: tiziana.campisi@unipa.it

Luisa Lombardo, Engineer and European PhD in Architecture, Arts, and Planning, Junior Researcher at the Department of Architecture, University of Palermo (Italy). Her research focuses on sustainable heritage rehabilitation and smart villages, integrating architecture, cultural heritage, and project sustainability strategies. E-mail: luisa.lombardo01@unipa.it

Negli ultimi decenni l'attività antropica ha accelerato processi di alterazione climatica ed ecosistemica senza precedenti, favorendo la manifestazione di eventi estremi quali ondate di calore, inondazioni, siccità e incendi diffusi (Barnett, 2006). Tale scenario, aggravato dalla crescita demografica globale, mette a rischio gli equilibri vitali della biosfera, compromettendo la resilienza dei sistemi naturali e sociali e colpendo in modo sproporzionato le comunità più vulnerabili (IPCC, 2023). Parallelamente la perdita di biodiversità indebolisce la stabilità degli ecosistemi, mentre l'omogeneizzazione dei sistemi socioeconomici – guidata da logiche di efficienza e profitto – riduce la capacità collettiva di adattamento e la resilienza agli shock ambientali (Javanroodi, Nik and Scartezini, 2021).

In questo contesto l'acqua emerge come risorsa strategica, intimamente connessa ai cicli naturali e assolutamente determinante non solo per l'adattamento climatico, ma anche per la promozione della giustizia ambientale. Il diritto all'accesso all'acqua e il suo uso consapevole sono ormai concepiti non solo come obiettivi di conservazione, ma come leve progettuali e tecnologiche in grado di migliorare le prestazioni edilizie, di modulare i microclimi urbani (Valente et alii, 2024) e di supportare strategie integrate di resilienza (Matthies and Menne, 2009). Le politiche urbane più avanzate degli ultimi anni enfatizzano approcci integrati in cui energia, acqua e infrastrutture verdi convergono in spazi multifunzionali – quali scuole, giardini, centri civici e hub comunitari – fungendo da catalizzatori per la rigenerazione sociale e ambientale (Blecic et alii, 2024).

Le risposte contemporanee all'emergenza climatica tendono a concentrarsi prevalentemente sulla decarbonizzazione (Ness, 2024) e sulle energie rinnovabili, trascurando spesso l'impatto delle risorse materiali necessarie alla costruzione di tali infrastrutture, che comportano rilevanti consumi energetici e contributi emissivi (Olatunde et alii, 2024). Un approccio progettuale realmente efficace richiede quindi un ampliamento del focus tecnico-scientifico, includendo una gestione razionale delle risorse non rinnovabili e integrando le azioni nel quadro degli Obiettivi di Sviluppo Sostenibile (SDG) delle Nazioni Unite, in particolare degli Obiettivi 6, 9, 11 e 13 (Hendawy, Junaid and Amin, 2024). Tecnologia, energia e tempo, intrecciati da tempo immemore in ogni genere di Rivoluzione Industriale, hanno plasmato le società moderne, nelle quali la disponibilità continua di energia e servizi è data per scontata, condizionando comportamenti individuali e collettivi.

L'iperconnessione e la domanda costante di flussi energetici intensificano le pressioni sulle risorse naturali, rendendo imprescindibile un ripensamento del rapporto tra architettura e risorsa idrica: progettare con l'acqua implica superare logiche lineari ed estrattive, adottando approcci sistemici in cui energia, risorse idriche e cicli sociali si coordinano in strategie integrate di resilienza ecologica e sociale.

Il progetto architettonico assume un ruolo cruciale nel tradurre principi derivati dalla permacultura, dalle strategie low-tech e da visioni speculative come il Solarpunk in pratiche spaziali concrete (Crosby, 2023). Alla stregua di un vero e proprio 'dispositivo progettuale', tra performance ambientale e sperimentazione architettonica, l'uso dell'acqua assume una duplice funzione, al contempo simbolica e funzionale, configurandosi come elemento regolatore dei microclimi, mediatore dell'esperienza spaziale e componente attiva nei sistemi energetici so-

stenibili (Brisotto et alii, 2023). Gli edifici non sono più entità statiche, ma dispositivi ambientali dinamici, capaci di interagire con il contesto climatico e sociale; in questa prospettiva l'acqua si configura come catalizzatore di innovazione ambientale, tecnologica e culturale.

Storicamente, l'acqua ha favorito il dialogo tra costruito e paesaggio naturale, come mostrano la Fallingwater di Frank Lloyd Wright (1935-1937), integrata strutturalmente con il corso d'acqua, e la Farnsworth House di Mies van der Rohe (1951), sopraelevata per affrontare esondazioni stagionali. Dagli anni Settanta il suo ruolo evolve da simbolico a performativo, con soluzioni basate su accumulo termico e tecnologie solari passive (Peng et alii, 2023): progetti come il Blur Building di Diller Scofidio + Renfro (2002), il Digital Water Pavilion di Carlo Ratti e MIT (Expo Saragozza, 2008) e l'IceHotel di Jukkasjärvi (1991) esplorano l'acqua come medium esperienziale e interattivo.

La ricerca tecnologica ha sviluppato sistemi avanzati di regolazione termica e adattamento climatico (Sposito, 2017). Esempi più datati includono i Water Drum Walls degli anni Quaranta del XX secolo e si ricordano, negli anni Settanta-Ottanta dello stesso secolo, le soluzioni di Steve Baer, John Hammond e Marshall Hunt, applicate in ambito residenziale e agricolo, sino ai contenitori modulari translucidi realizzati dalla Kalwall Corporation e dal Water Wall Engineering Group, per arrivare infine ai più recenti dispositivi quali le Transparent Water Storage Envelopes (TWSE) o ai sistemi ceramici porosi che permettono una gestione stagionale avanzata del comfort termo-igrometrico, con incrementi di efficienza energetica tra 25% e 88% (Xiangfeng and Tianxing, 2007). Permangono criticità legate all'energia incorporata, spesso trascurata da protocolli come LEED, BREEAM, Passivhaus e ActiveHouse (Vosoughkhosravi et alii, 2022).

Le strategie emergenti puntano a un approccio sistemico, integrando efficienza, multifunzionalità e adattabilità (Butera, 2024): l'acqua diventa componente attiva e adattiva, permettendo edifici climaticamente responsivi, sostenibili e tecnologicamente innovativi, capaci di coniugare qualità ambientale, prestazioni energetiche e sperimentazione architettonica.

Alla luce delle premesse esposte il contributo ha l'obiettivo di definire strategie e protocolli progettuali per la gestione integrata della risorsa idrica nei contesti urbani e nel Patrimonio costruito, con particolare attenzione alla sostenibilità, alla resilienza e alla replicabilità delle soluzioni. Il contributo è strutturato in tre sezioni principali: una prima parte teorico-metodologica che inquadra il tema, le criticità e le opportunità di intervento; una seconda parte dedicata all'analisi critica di casi studio internazionali e locali, evidenziandone punti di forza, limiti, criteri di selezione e trasferibilità; una terza parte in cui vengono proposti protocolli, indicatori di performance (KPI) e diagrammi operativi per supportare la progettazione resiliente dell'acqua.

L'originalità dello studio risiede nell'approccio analitico sistemico, che integra tecnologie avanzate, materiali sostenibili, gestione delle risorse e impatto sociale, mentre l'impatto atteso riguarda la proposizione / definizione di linee guida replicabili e misurabili, capaci di informare politiche urbane e pratiche progettuali innovative. Il contributo fornisce inoltre una riflessione critica sui limiti e sulle barriere (culturali, economiche e normative) che ostacolano la diffusio-

ne delle buone pratiche e sugli scenari di trasferibilità dei risultati ad altri contesti socio-ambientali, contribuendo al dibattito scientifico sugli SDG 6, 9, 11 e 13 e alle sinergie possibili con gli altri Obiettivi.

Stato dell'arte | La gestione integrata delle risorse idriche urbane è oggi una sfida prioritaria per la sostenibilità ambientale, sociale ed economica (Badamah, 2016). La letteratura evidenzia la necessità di superare i tradizionali sistemi lineari di drenaggio e accumulo, favorendo modelli idricamente sensibili, orientati a conservazione, riuso e resilienza (Zacharias, Dimitriou and Koussouris, 2003). In questo contesto, il Water Sensitive Urban Design (WSUD) integra il controllo delle acque meteoriche con spazi verdi multifunzionali, migliorando benessere urbano, resilienza climatica e microclima (Donofrio et alii, 2009).

La trasformazione da città impermeabili a 'città-spugna' promuove l'infiltrazione naturale, la riduzione del rischio idraulico e la disponibilità di acqua non potabile tramite sistemi diffusi di captazione, stoccaggio e trattamento naturale, attraverso tecnologie chiave che includono coperture e facciate verdi, pavimentazioni permeabili e sistemi di fitodepurazione (Vacanti and Leonardi, 2024). Il Sustainable Drainage Systems (SuDS) e l'approccio SuDS / WSUD risultano scalabili dalla scala edilizia a quella urbana, con tecniche come trincee filtranti, canali vegetati, bioritenzione, bacini di detenzione, stagni artificiali e fitodepurazione (Ferrans et alii, 2022), la cui scelta dipende da obiettivi specifici di sicurezza idraulica, depurazione e riuso, incremento della biodiversità o rigenerazione urbana.

Protocolli di certificazione ambientale promuovono sistemi a basso consumo idrico e sensori intelligenti per la gestione digitale dei flussi e l'efficienza energetica e studi recenti sottolineano la necessità di concepire edifici e spazi pubblici come sistemi attivi e interattivi, capaci di regolare microclimi, accumulare energia, promuovere biodiversità e incentivare pratiche comunitarie sostenibili (Berizzi, Mazurkiewicz and Terlicher, 2025).

Questi sistemi idro-ecologici favoriscono la coevoluzione tra natura e ambiente costruito, contribuendo alla resilienza urbana, tuttavia la gestione resta spesso frammentata e le dimensioni sociali, educative e culturali sono raramente integrate, evidenziando l'urgenza di un approccio sistemico e multidisciplinare che integri progettazione urbana, ingegneria, architettura, ecologia e partecipazione civica. In questo quadro l'acqua diventa elemento progettuale centrale e l'innovazione risiede nell'integrazione sinergica di infrastrutture idriche, energetiche e sociali per modelli replicabili di architettura resiliente e sostenibile.

Obiettivi, metodologia e fasi della ricerca | Gli obiettivi della ricerca riguardano la definizione di un framework integrato per la gestione sostenibile delle risorse idriche in ambito urbano ed edilizio, l'integrazione tra sistemi idrici, dispositivi energetici e spazi pubblici multifunzionali, la strutturazione di un protocollo operativo replicabile per supportare progettisti, amministratori e stakeholder locali. La ricerca adotta un approccio metodologico qualitativo-analitico, articolato in tre fasi, finalizzato alla definizione del citato un framework, con l'obiettivo di valorizzare l'acqua come elemento attivo nella generazione di performance ambientali, sociali e tecnologiche (Rahman et alii, 2019).



Fig. 1 | West Village (2013), University of California Davis (credit: Sherwin-Williams, 2015).

La prima fase è l'analisi critica e la revisione sistematica della letteratura scientifica, normativa e tecnica su sistemi di gestione idrica urbana (WSUD), comunità energetiche e infrastrutture blu-verdi. La revisione della letteratura è stata condotta su database scientifici peer-reviewed (Scopus, Web of Science, ScienceDirect) per il periodo 2010-2025, utilizzando parole chiave quali 'urban water management', 'WSUD', 'green-blue infrastructure', 'storm-water harvesting' e 'sustainable architecture'. Sono stati selezionati studi peer-review con dati sperimentali, linee guida tecniche, casi studio replicabili e report istituzionali, privilegiando pubblicazioni focalizzate su tecnologie integrate per il controllo dei flussi idrici e l'efficienza energetica, con particolare attenzione a tecnologie per la raccolta, il trattamento e il riuso delle acque meteoriche, SuDS, coperture e facciate verdi, superfici permeabili, dispositivi di fitodepurazione e strumenti digitali per il monitoraggio in tempo reale dei flussi idrici.

La seconda fase è la comparazione dei casi studio nella quale si prevede l'analisi critica di casi studio nazionali e internazionali; questa fase costituisce il fondamento teorico su cui si innesta l'analisi comparativa dei casi studio, in quanto indagine critica capace di individuare le buone pratiche nell'integrazione tra infrastrutture idriche, dispositivi energetici e spazi pubblici resilienti.

La comparazione è stata condotta secondo quattro categorie interpretative principali: 1) scala e contesto che rimandano alla dimensione degli interventi, al bacino d'utenza e alle caratteristiche territoriali; 2) funzionalità intesa come configurazione dei sistemi integrati di gestione idrica, efficienza energetica e servizi accessori; 3) impatto ambientale valutato in termini di riduzione delle emissioni, resilienza idrica e regolazione microclimatica; 4) integrazione sociale con riferimento al grado di partecipazione civica, all'inclusione educativa e all'attivazione di pratiche comunitarie.

La terza fase è l'elaborazione di protocolli operativi replicabili, nella quale sono stati individuati strumenti progettuali e strategie integrate per la gestione sinergica di acqua ed energia, applicabili sia al retrofit ambientale sia a nuovi interventi edilizi. I protocolli sono concepiti per supportare progettisti, amministratori e stakeholder locali e le strategie individuate sono orientate non solo a migliorare le prestazioni ambientali, tecnologiche e sociali, ma anche a valorizzare il Patrimonio architettonico esistente, pro-

muovendo resilienza climatica, equità sociale ed efficienza tecnologica. L'approccio metodologico deduttivo consente così di colmare il divario tra teoria e pratica, ponendo l'acqua non solo come dispositivo progettuale, ma anche come vettore di innovazione sistemica in architettura (Mecca, Gaballo and Todella, 2023).

Lo studio si caratterizza quindi per il suo approccio integrato e sistemico alla gestione dell'acqua in contesti urbani e edilizi, tema ancora poco approfondito nella letteratura corrente, che tende a trattare separatamente le dimensioni tecnologica, sociale o ambientale. L'originalità della ricerca deriva dalla combinazione tra analisi critica della letteratura, comparazione dei casi studio e sviluppo di protocolli operativi, permettendo di identificare buone pratiche trasferibili in contesti diversi. Assecondando tali presupposti lo studio vuole colmare una lacuna significativa nella gestione integrata delle risorse idriche, stimolando da un lato il dibattito sul tema presso la comunità scientifica e professionale, dall'altro ulteriori ricerche su strategie sostenibili e innovative per la valorizzazione dell'acqua come elemento attivo e generatore di resilienza e coesione sociale.

Casi studio | Per comprendere l'applicazione dei principi di gestione integrata dell'acqua, i casi studio sono stati organizzati in tre macrocategorie – extraeuropei, europei e italiani – al fine di evidenziarne differenze di scala, approcci tecnologici e strategie di integrazione con energia e spazi pubblici.

Partendo dai casi extraeuropei, negli Stati Uniti il Campus West Village dell'Università della California Davis (Fig. 1) rappresenta un esempio virtuoso di comunità 'net zero energy' dove sistemi fotovoltaici, accumulo energetico e digestione anaerobica dei rifiuti sono integrati con la raccolta e il riuso dell'acqua grigia e piovana. La capacità complessiva di stoccaggio idrico, pari a 1,2 milioni di litri, viene utilizzata per irrigazione e servizi comuni: sensori e sistemi di monitoraggio intelligente ottimizzano in tempo reale i flussi idrici e la gestione energetica, con una riduzione del 50% del consumo idrico rispetto a edifici con caratteristiche analoghe. La gestione digitale coordina anche il fabbisogno energetico dei pannelli fotovoltaici e dei sistemi di digestione anaerobica: l'acqua è concepita come vettore di efficienza energetica e sostenibilità edilizia (Maziotis, Sala-Garriido and Molinos-Senante, 2024). In India il Solar Canal Project (Fig. 2) integra risorse idriche e produ-

zione energetica; l'acqua presente nei canali è essa stessa sistema di raffreddamento dei pannelli fotovoltaici galleggianti, incrementandone l'efficienza, riducendo l'evaporazione e ottimizzando l'uso dell'acqua per il territorio agricolo (Sananse et alii, 2023). A Singapore i Water Gardens (Fig. 3), progettati da Peter Walker & Partners, dimostrano l'integrazione di bacini d'acqua in contesti urbani ad alta densità che combinano stoccaggio delle acque piovane, raffrescamento naturale e micro-climatizzazione urbana, generando spazi pubblici resilienti e multifunzionali, capaci di supportare attività ricreative e sociali (Yap and Koh, 2010).

In Nord America e Giappone numerosi edifici residenziali impiegano bacini e canali come 'serbatoi di calore' naturali, sfruttando la capacità termica dell'acqua per accumulare calore durante il giorno e rilasciarlo di notte, migliorando l'efficienza energetica degli impianti di riscaldamento e raffrescamento (Kepekci and Asma, 2020). La gestione integrata dell'acqua svolge un ruolo strategico nella sostenibilità idrica, ma anche nell'ottimizzazione energetica e nel miglioramento delle condizioni microclimatiche interne ed esterne degli edifici (Corradi et alii, 2024).

In Europa l'integrazione tra infrastrutture blu-verdi e progettazione urbana rappresenta un approccio consolidato per la gestione sostenibile delle acque e la resilienza ai cambiamenti climatici. Nei Paesi Bassi il Waterplein Benthemplein a Rotterdam dimostra come le piazze urbane possano trasformarsi in bacini temporanei durante eventi pluviometrici intensi grazie a pavimentazioni permeabili, aree verdi multifunzionali e sensori per il monitoraggio dei livelli idrici, consentendo il drenaggio modulato e la riduzione del rischio di allagamenti (Prestamburgo et alii, 2021).

A Copenhagen il Cloudburst Management Plan si caratterizza per un approccio digitale avanzato alla gestione delle acque meteoriche con bacini temporanei, parchi urbani e sistemi di drenaggio sostenibile per precipitazioni fino a 100 mm/h: sensori pluviometrici, sistemi SCADA e modellazione predittiva permettono il controllo in tempo reale dei flussi idrici, mentre superfici permeabili e bacini sotterranei garantiscono l'accumulo e il rilascio graduale dell'acqua.

Altri esempi includono l'Eden Project a Cornwall (Fig. 4) e l'Aquatic Centre di Londra (Fig. 5), in cui l'acqua si configura quale elemento di regolazione del microclima interno, illuminazione naturale e irrigazione vegetale. In Svizzera il Blur Building (Fig. 6) sfrutta nebbie generate da getti d'acqua controllati digitalmente per esperienze sensoriali e analisi termodinamiche, mentre l'Ice Hotel in Svezia (Fig. 7) è un esempio di uso temporaneo dell'acqua congelata per costruzioni stagionali che promuove sostenibilità e innovazione architettonica (Ciccarese and Fino, 2004).

I casi europei di Copenhagen, Rotterdam e Friburgo sono stati selezionati come esempi di eccellenza europea nella gestione integrata delle acque, impiegando soluzioni tecnologiche, ambientali e sociali replicabili in altri contesti urbani. L'analisi di tali progetti – secondo le tre dimensioni principali di scala e contesto territoriale, innovazione tecnologica e sostenibilità ambientale e grado di inclusione sociale e partecipazione civica – consente di identificare limiti, barriere e opportunità di trasferibilità, offrendo un contributo originale alla comunità scientifica e fornendo linee guida operative per progettisti e de-

cisori pubblici. Analogamente i casi studio italiani presentati nel seguito della trattazione sono stati scelti in base a criteri di rilevanza, replicabilità e capacità di integrare le infrastrutture idriche con energia, spazi pubblici e servizi urbani, sia in contesti metropolitani sia in aree periurbane e rurali. Con maggiore definizione di dettaglio si presentano alcuni esempi europei e italiani emblematici per i caratteri di resilienza, regolazione dei microclimi urbani, comunità smart, rigenerazione urbana ambientale.

Enghaveparken: infrastruttura verde multifunzionale e urbanismo resiliente | Il progetto Enghaveparken (Fig. 8), inserito all'interno del Cloudburst Management Plan della Città di Copenhagen, è un caso emblematico di integrazione tra infrastrutture idriche, qualità paesaggistica e partecipazione civica. Il Parco, realizzato oltre novant'anni fa nel quartiere popolare di Vesterbro, è stato oggetto di recente riqualificazione: con una capacità di immagazzinamento pari a 22.600 mc di acqua piovana, funziona come infrastruttura verde resiliente, capace di combinare sicurezza idraulica, mitigazione microclimatica e servizi ecosistemici a scala urbana (Avramidou and Manika, 2021).

La strategia progettuale si fonda su bacini ribassati, serbatoi sotterranei e morfologie topografiche adattive. Aree come il Water Garden e il Rose Garden sono state modellate per raccogliere e trattenere l'acqua in eccesso durante gli eventi di pioggia intensa, mentre dighe, mini-argini e un serbatoio interrato da 2.000 mc ne regolano i flussi e ne consentono l'accumulo temporaneo: l'acqua immagazzinata viene utilizzata per l'irrigazione del verde e la pulizia delle strade, riducendo il prelievo da falda. Il sistema garantisce la continuità delle funzioni vegetali e ricreative in condizioni di siccità e durante periodi di piovosità.

Oltre alla funzione tecnica l'intervento ha preservato e valorizzato le preesistenze storiche, viali alberati e padiglioni originari, arricchendo il Patrimonio arboreo con 83 nuovi esemplari, a beneficio della biodiversità e della regolazione microclimatica. Parallelamente il progetto ha integrato dispositivi sensoriali e pedagogici che trasformano l'acqua in un elemento di educazione e consapevolezza climatica con fontane interattive, canali a cielo aperto e spazi ludici.

Enghaveparken è un modello di urbanismo resiliente, capace di trasformare la gestione del rischio idrico in un'opportunità di rigenerazione urbana. La riqualificazione dimostra come l'alleanza tra ingegneria idraulica, progettazione paesaggistica e inclusione sociale possa produrre benefici integrati, riducendo la vulnerabilità climatica, migliorando la qualità della vita e rafforzando il valore culturale e ambientale dello spazio urbano: l'acqua diventa medium operativo per una città sostenibile, adattiva e consapevole.

Il caso Enghaveparken conferma l'efficacia di un approccio integrato alla gestione delle acque urbane, in cui ingegneria idraulica, paesaggio e partecipazione civica convergono in un sistema adattivo e multifunzionale. Le soluzioni adottate, basate su morfologie topografiche flessibili e dispositivi sensoriali, offrono contributi significativi al dibattito scientifico sulle soluzioni basate sulla natura applicate alla resilienza urbana. Più che un modello replicabile Enghaveparken rappresenta una metodologia di progetto trasferibile, capace di orientare la pianificazione urbana verso forme di adattamento dinamico fon-



Fig. 2 | Solar Canal Project (2014) in Gujarat, India (credit: PBS News, 2022).

date sulla relazione tra infrastruttura ecologica, memoria storica e uso sociale dello spazio.

Rotterdam, la 'città spugna' | La strategia complessiva di Rotterdam (Fig. 9), nota come 'città spugna', integra coperture e facciate verdi e quartieri galleggianti per immagazzinare e riutilizzare l'acqua piovana, al fine di regolare i microclimi urbani e sostenere la biodiversità (Dolman and Verlinde, 2024). Situata al di sotto del livello del mare e circondata da fiumi la città olandese rappresenta uno degli esempi più avanzati di adattamento urbano ai cambiamenti climatici, con un approccio proattivo alla gestione delle acque che trasforma ogni superficie urbana in dispositivo capace di assorbire, trattenere e riutilizzare l'acqua meteorica. Strade, piazze e marciapiedi sono progettati come bacini temporanei di raccolta, mentre impianti di stoccaggio e sistemi di recupero ne consentono l'impiego per l'irrigazione, usi non potabili e regolazione microclimatica.

Tra gli interventi più innovativi si collocano i quartieri galleggianti – attualmente in fase di sviluppo – concepiti come centri per attività sociali e culturali, oltre che prototipi di architettura resiliente che permettono di adattarsi alla variazione dei livelli idrici senza compromettere le funzioni urbane. La trasformazione urbana ha comportato l'impiego di materiali impermeabili e pavimentazioni innovative, ma soprattutto l'attivazione di politiche di coinvolgimento dei cittadini incentivate alla raccolta dell'acqua piovana e a pratiche sostenibili tramite agevolazioni fiscali e campagne di sensibilizzazione. Dal 2008 a oggi sono stati installati oltre 140.000 mq di tetti verdi con l'obiettivo di raggiungere i 200.000 mq entro il 2030 dimostrando la capacità del Piano di coniugare azioni su scala individuale e comunitaria. La gestione adattiva delle acque è diventata anche risorsa economica e tecnologica: le competenze sviluppate a Rotterdam nella progettazione di sistemi anti-inondazione sono oggi richieste in numerosi contesti internazionali, da città statunitensi come New Orleans fino a diversi Paesi dell'Africa, del Sud-est Asiatico e dell'America Latina. L'esperienza olandese mostra come la gestione idrica possa essere al tempo stesso strumento di prevenzione, di sostenibilità ambientale e di sviluppo economico, configurando la città come modello globale di urbanismo resiliente.

Il caso di Rotterdam dimostra come la gestione integrata delle acque possa costituire una stra-

tegia di governance urbana oltre che un modello tecnico di resilienza. Le azioni sviluppate – dai quartieri galleggianti alle coperture verdi – rivelano un approccio olistico che unisce innovazione, partecipazione e competitività economica, ridefinendo il rapporto tra città e acqua in chiave produttiva e identitaria. L'esperienza olandese, più che fornire un modello univoco, apre un quadro teorico di riferimento per la pianificazione adattiva in aree a rischio idraulico, delineando una possibile traiettoria di transizione per le città europee verso scenari climaticamente consapevoli.

Friburgo | La città di Friburgo in Brisgovia (Fig. 10), definita la 'capitale ecologica' della Germania, è un modello di comunità smart in cui sostenibilità ambientale, innovazione tecnologica e partecipazione civica si intrecciano in un sistema urbano resiliente e replicabile. Con circa 230.000 abitanti ha avviato già dagli anni Settanta del Novecento un percorso di pianificazione sostenibile, originato dalla mobilitazione popolare contro la centrale nucleare di Wyhl, che ha inaugurato nuove forme di governance partecipativa dal basso.

L'assetto urbanistico della città si fonda su principi di densificazione controllata, riduzione del consumo di suolo e integrazione funzionale. Quartieri come Vauban e Rieselfeld incarnano tale visione: il primo, sorto su una ex area militare, si configura come eco-quartiere a mobilità ridotta, caratterizzato da edifici ad alte prestazioni energetiche, sistemi di raccolta e riuso delle acque meteoriche, limitazione dell'uso delle automobili e una rete diffusa di trasporto pubblico e ciclabilità; il secondo integra edilizia sociale, mix funzionale tra residenza, servizi e spazi pubblici e attenzione alla connettività ecologica del tessuto urbano.

Entrambi i quartieri rispondono a criteri di compattezza urbana, verde permeabile e resilienza microclimatica, contribuendo a ridurre l'impatto ambientale e a migliorare la qualità della vita. La mobilità cittadina si basa su una rete integrata di tram elettrici, trasporto pubblico efficiente e oltre 400 km di piste ciclabili, promuovendo un modello di 'mobilità sostenibile'.

La città ha poi investito su fotovoltaico diffuso, teleriscaldamento da biomassa e geotermia e strategie di economia circolare per la gestione dei rifiuti. Un elemento distintivo è la sinergia tra governance istituzionale e partecipazione civica, sostenuta da

strumenti quali referendum locali, assemblee di quartiere e cooperative energetiche e abitative, che favoriscono la gestione condivisa delle risorse e il rafforzamento del senso comunitario. A questo si aggiunge un ecosistema della conoscenza che comprende l'Università di Friburgo, il Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems e altri Centri di ricerca applicata che promuovono il trasferimento tecnologico e la sperimentazione urbana.

L'esperienza di Friburgo dimostra come l'integrazione di innovazione tecnologica, progettazione ecologica e responsabilizzazione comunitaria possa generare un sistema urbano a basse emissioni, caratterizzato da elevata qualità della vita e forte coesione sociale. La città è oggi un laboratorio avanzato

di transizione ecologica, con modelli scalabili e replicabili che forniscono strumenti concreti per affrontare la crisi climatica, le pressioni antropiche e le disuguaglianze urbane (Mössner, 2015).

L'esperienza di Friburgo si distingue per la capacità di tradurre principi di sostenibilità e partecipazione in un ecosistema urbano di innovazione sociale e tecnologica. I Quartieri Vauban e Rieselfeld dimostrano che la resilienza non è solo infrastrutturale ma anche culturale, frutto di processi di apprendimento collettivo e governance inclusiva. Più che come modello da imitare Friburgo va inteso come laboratorio evolutivo, in cui ricerca scientifica, amministrazione e cittadinanza co-producono soluzioni scalabili per la transizione ecologica e la giustizia cli-

matica; il suo valore risiede dunque nella capacità di generare conoscenza e prassi condivise, orientando le città europee verso forme di abitare più consapevoli e solidali.

Italia: gestione integrata delle risorse e rigenerazione urbana multifunzionale | In Italia l'adozione di strategie integrate per la gestione sostenibile dell'acqua si manifesta attraverso una crescente convergenza tra progettazione architettonica, innovazione tecnologica e rigenerazione urbana e ambientale, sia in contesti metropolitani che rurali. I casi studio selezionati dimostrano come le pratiche sensibili all'acqua e di efficientamento energetico possano essere sinergicamente applicate per incremen-



tare la resilienza climatica, la fruibilità degli spazi pubblici e la qualità ecologica del costruito.

Il Bosco Verticale a Milano dello Studio Boeri (2014; Fig. 11) costituisce un esempio emblematico di infrastruttura verde verticale ad alta intensità vegetativa, che integra sistemi intelligenti di irrigazione automatizzata per il mantenimento della biodiversità arborea distribuita sui balconi. Tali sistemi con sensori climatici e idrici modulano l'apporto di acqua garantendo l'ottimizzazione dei consumi e contribuendo alla mitigazione del microclima urbano. L'intervento favorisce anche l'assorbimento di CO₂, la filtrazione degli inquinanti atmosferici, l'isolamento acustico e la schermatura passiva degli edifici, coniugando qualità architettonica e prestazio-

ni ecosistemiche (Liu, 2023). Sempre a Milano, edifici certificati LEED e WELL, quali Gioia 22 (Shrivastava, Segura D'Angelo and Lai, 2021; Fig. 12) e Vetra Building (Zanzottera, 2022; Fig. 13), adottano sistemi avanzati di raccolta e riuso delle acque piovane e di falda, consentendo una riduzione del consumo idrico fino all'86% rispetto a edifici tradizionali; tali soluzioni sono integrate da tecnologie IoT per la regolazione dei flussi idrici in tempo reale. Il progetto Santa Chiara Open Lab (ANSA, 2017; Fig. 14), sviluppato nel contesto della riqualificazione del Parco Santa Chiara a Trento, integra gestione sostenibile delle acque meteoriche, valorizzazione del Patrimonio edilizio esistente e attivazione sociale come da 'Programma straordinario di intervento per

la riqualificazione urbana e la sicurezza delle periferie delle città metropolitane e dei comuni capoluogo di Provincia' promosso dal DPCM 25 maggio 2016.¹

Nel dettaglio il sistema di fitodepurazione cattura le acque piovane dalle coperture degli edifici circostanti in una vasca integrata nel paesaggio urbano, riutilizzandole per irrigazione e attività ricreative. In occasione di eventi meteorologici estremi il Parco funge da infrastruttura di ritenzione temporanea, contribuendo alla riduzione del carico sulle reti fognarie e alla mitigazione del rischio idraulico. L'intervento garantisce l'accessibilità universale e la continuità funzionale degli spazi pubblici, integrando elementi storici recuperati con nuove funzioni a

Previous page

Fig. 3 | Watergardens (2021) in Singapore (credit: Singapore Land Group, 2021).

Fig. 4 | Eden Project (2001) in Cornwall, UK (credit: Eden Project, 2001).



Fig. 5 | London Aquatics Centre (2012) in London, UK (credit: Zaha Hadid Architects, 2012).

Fig. 6 | Blur Building (2002), Yverdon-les-Bains, Switzerland (credit: Diller Scofidio + Renfro, 2002).

Fig. 7 | ICEHOTEL (2008) in Jukkasjärvi, Sweden (credit: ICEHOTEL, 2008).





Fig. 8 | Enghaveparken Climate Park (2021) in Copenhagen, Denmark, designed by City of Copenhagen (credit: State of Green, 2021).



Fig. 9 | Spoorweghaven District (2025) in Rotterdam, The Netherlands, designed by MAST (source: Domus, 2025).

carattere comunitario, tra cui un Urban Center, e spazi dedicati all'emanipazione dei giovani. Il progetto rappresenta un prototipo operativo replicabile, poiché combina soluzioni ingegneristiche, valenze ecologiche e finalità socioculturali in un modello adattabile ad altri contesti urbani.

In ambito rurale e periurbano, interventi di housing sociale sostenibile, come quelli di Montelabbate (PU) e San Nicola da Crissa (VV), incorporano sistemi di raccolta delle acque meteoriche, SuDS e impianti fotovoltaici condivisi (Castellini et alii, 2024), ottenendo una riduzione del fabbisogno idrico tra il 35% e il 40%, e un abbattimento stimato di circa 600

tonnellate annue di CO₂ (Turki et alii, 2023): soluzioni low-tech ad alto impatto in contesti a bassa densità insediativa.

Infine il caso di Venezia che, oltre al sistema MOSE (Faranda et alii, 2023), sta sperimentando architetture anfibe e dispositivi resilienti come gradinate urbane, bacini temporanei e modelli predittivi di marea, per una gestione dinamica del rischio idrico, salvaguardando la fruizione degli spazi pubblici e il Patrimonio del tessuto urbano storico (Umgieser, 2020). L'acqua non è dunque solo risorsa da conservare, ma vettore di efficienza energetica, micro-climatizzazione, biodiversità e resilienza sociale,

capace di aprire nuove prospettive per architetture resilienti e multifunzionali (Consiglia et alii, 2025).

L'analisi dei casi italiani rivela un panorama progettuale in evoluzione nel quale l'acqua diviene catalizzatore di innovazione architettonica, rigenerazione ambientale e coesione sociale. Le esperienze analizzate – dai grattacieli vegetali di Milano alle infrastrutture verdi di Trento fino ai dispositivi anfibi di Venezia – testimoniano la capacità di elaborare risposte multilivello alla crisi climatica, combinando soluzioni tecnologiche avanzate e strategie low-tech adattate alle specificità locali. Ne emerge un quadro di sperimentazione diffusa che supera la logica

Fig. 10 | Centro Direzionale e Commerciale, PlusEnergy-bauweise (2018), designed by Rolf Disch (source: Green-Cluster.it, 2018).



Fig. 11 | Bosco Verticale (2014) in Milano, designed by Stefano Boeri Architetti (credit: Heritage Images/Getty Images).



del modello replicabile per configurarsi come sistema aperto di pratiche integrate, in cui il dialogo tra Patrimonio, innovazione e governance produce nuovi paradigmi di progetto. In questa prospettiva l'esperienza italiana non si limita a offrire buone pratiche, ma propone una grammatica operativa della resilienza, fondata sull'interazione tra scala architettonica e scala territoriale, tra gestione sostenibile delle risorse e qualità dello spazio abitato. Tale approccio, ancora in via di consolidamento, rappresenta un laboratorio strategico per la transizione ecologica delle città europee, in cui la cultura del progetto si afferma come strumento di mediazione tra sostenibilità ambientale, inclusione sociale e rigenerazione del patrimonio costruito.

Discussione, sintesi comparativa e analisi critica dei casi studio: punti di forza, limiti e barriere alla replicabilità | L'analisi comparativa dei casi extraeuropei, europei e italiani evidenzia matrici progettuali eterogenee accomunate da una visione dell'acqua come infrastruttura attiva nella resilienza urbana, qualità ambientale e inclusione sociale. Le differenze non sono solo geografiche, ma riflettono paradigmi di governance, capacità tecnologiche, cultura progettuale e strutture istituzionali. Emergono modelli di successo, limiti applicativi e nodi teorici da approfondire.

Nei casi extraeuropei – dal Solar Canal Project al West Village e Water Gardens – l'acqua è fortemente tecnologizzata, gestita tramite infrastrutture intelligenti, algoritmi e sistemi SCADA. La sostenibilità è funzionalizzata all'efficienza idrica, energetica e climatica, con utenti spesso passivi o mediati digitalmente; pur avanzati questi approcci producono spazi funzionali ma poco relazionali e dipendenti da governance locali robuste.

In Europa l'acqua è concepita in modo più relazionale e paesaggistico, integrata nel tessuto urbano per resilienza climatica, estetica e sociale. Casi come Enghaveparken e Benthemplein combinano infrastrutture blu-verdi, spazi sensoriali, educativi e partecipativi, memoria storica e co-design; tuttavia

richiedono contesti istituzionali avanzati e pianificazione integrata senza i quali le infrastrutture rischiano di rimanere interventi isolati o estetici. In Italia l'approccio è interstiziale: l'acqua supporta rigenerazione urbana, riduzione dei rischi e attivazione sociale, bilanciando vincoli storici, carenze infrastrutturali e innovazioni incremental. Esempi come il Bosco Verticale di Milano e il Santa Chiara Open Lab a Trento combinano micro-climatizzazione, biodiversità, fitodepurazione e gestione sostenibile delle acque. In aree periurbane e rurali soluzioni a bassa tecnologia mostrano alta efficienza sistemica, tuttavia discontinuità normativa, frammentazione degli attori e scarsa pianificazione intersettoriale limitano scalabilità e replicabilità.

Dal confronto emergono convergenze strategiche che definiscono un paradigma comune per la gestione idrica urbana integrata, sintetizzato nella Tabella 1; accanto a queste convergenze si rilevano le divergenze strutturali sintetizzate nella Tabella 2. La lettura comparativa mostra che non esiste un modello unico: le soluzioni devono adattarsi al contesto locale, bilanciando capacità istituzionali, dati e tecnologie, cultura partecipativa, densità urbana e vulnerabilità climatica. In questo quadro l'acqua diventa matrice progettuale trasversale, capace di generare engagement civico, miglioramenti ambientali, efficienze infrastrutturali e nuove narrazioni architettoniche.

L'analisi comparativa dei casi studio fornisce elementi fondamentali per la definizione di protocolli operativi replicabili, capaci di tradurre buone pratiche e lezioni apprese in strumenti progettuali concreti. Le strategie individuate – tecnologiche, ambientali e sociali – vengono formalizzate in linee guida modulari, adattabili a contesti urbani e rurali differenti, bilanciando vincoli territoriali, capacità istituzionali e cultura partecipativa. I protocolli integrano sistemi di gestione idrica, dispositivi energetici e spazi pubblici multifunzionali, includendo indicazioni tecniche (SuDS, fitodepurazione, sensori intelligenti), ecologiche (microclima, biodiversità) e sociali (educazione, partecipazione civica). La loro applicazione

sia a nuovi interventi sia a retrofit urbani permette di trasformare l'acqua da semplice risorsa in vettore di resilienza, efficienza e inclusione sociale, fornendo strumenti concreti a progettisti, amministratori e decisori pubblici.

La proposta di un protocollo gestionale | Di fronte alle crescenti sfide ambientali e climatiche, l'architettura dell'acqua si configura come una nuova disciplina strategica per la progettazione sostenibile, in grado di integrare innovazione tecnologica, sostenibilità ambientale e inclusione sociale. Soluzioni tecniche quali la bio-fitodepurazione, la raccolta differenziata e il riuso delle acque meteoriche, unitamente a sistemi di infiltrazione finalizzati alla ricarica artificiale delle falde acquifere, rappresentano strumenti imprescindibili per rispondere efficacemente alle esigenze di resilienza e gestione sostenibile delle risorse idriche negli ambiti edilizi e urbani.

In particolare nel contesto italiano, caratterizzato da consumi idrici domestici medi superiori a 220 litri per abitante al giorno, diviene prioritario adottare strategie progettuali orientate alla significativa riduzione dei prelievi di acqua potabile, favorendo il riutilizzo delle acque grigie e meteoriche per usi non potabili quali irrigazione, scarichi sanitari e attività di lavaggio. Tali strategie si articolano su diverse scale di intervento: dalla singola unità abitativa, con sistemi di raccolta e accumulo delle acque piovane e sanitari a basso consumo, fino all'ambito urbano, dove si promuovono tetti e pareti verdi, piazze d'acqua e SuDS, nonché interventi territoriali di rinaturalizzazione dei corsi d'acqua e recupero delle zone umide.

A partire dall'analisi comparativa dei casi studio analizzati, si propone un protocollo modulare e scalabile per la gestione integrata dell'acqua, dell'energia e degli spazi sociali – descritto avvalendosi della Tabella 3 – concepito per la replicabilità e l'adattabilità in contesti urbani e rurali, per nuove costruzioni così come per processi di rigenerazione urbana.

La fase iniziale prevede la definizione rigorosa dei parametri di intervento tramite una mappatura dettagliata dei bacini idrici disponibili, dei flussi ener-



Fig. 12 | Gioia 22 (2021) in Milano, designed by Pelli Clarke Pelli Architects (credit: COIMA, 2021).

Fig. 13 | Vetra Building (2021) in Milano designed by Il Prisma (credit: AXA IM Alts / Il Prisma, 2021).

Fig. 14 | Santa Chiara Open Lab (2025) in Trento, designed by the University of Siena (credit: Municipality of Trento, 2025).



energetico sinergici che ne massimizzano l'efficienza complessiva e la sostenibilità combinando soluzioni low-tech e high-tech per garantire una gestione olistica che ottimizza le prestazioni funzionali (Rossi, 2019). Una componente di pari rilievo è la governance e la partecipazione attiva della comunità; modelli innovativi quali le Comunità Energetiche Rinnovabili (CER) e i Positive Energy Districts (PED) sono in grado di distribuire responsabilità e benefici tra cittadini, Istituzioni pubbliche e associazioni civiche, generando coesione sociale, educazione ambientale e resilienza urbana. Il coinvolgimento diretto degli utenti nella gestione delle risorse idriche ed energetiche si traduce in una manutenzione più efficace degli impianti e in una diffusione più capillare di pratiche di sostenibilità (Cascone, Margani and Sapienza, 2020).

Il protocollo prevede poi un sistema di monitoraggio e manutenzione continuo basato su IoT e cruscotti digitali, per il controllo in tempo reale dei flussi, della produzione energetica e dell'efficienza degli impianti favorendo la replicabilità degli interventi, un adattamento dinamico alle variazioni climatiche e alle mutate esigenze delle comunità di riferimento (Patsidis et alii, 2023).

Il protocollo (Fig. 15) permette così di riconfigurare edifici esistenti in hub integrati acqua-energia, orientare la progettazione di nuovi edifici secondo un paradigma sistemico e resiliente e promuovere pratiche sostenibili su scala urbana e rurale; l'acqua diventa elemento progettuale attivo, capace di innescare trasformazioni spaziali, ecologiche e sociali, da semplice risorsa a vettore chiave per la costruzione di ambienti resilienti, multifunzionali e culturalmente significativi, adeguati a rispondere alle pressanti sfide poste dal cambiamento climatico e dall'urbanizzazione contemporanea.

Il protocollo proposto si distingue per l'approccio modulare e scalabile, che integra sinergicamente acqua, energia e spazi sociali, e per la capacità di tradurre principi complessi di resilienza urbana in linee guida operative concrete. L'originalità risiede nella combinazione di approcci low-tech e high-tech, nella valorizzazione del Patrimonio edilizio come hub multifunzionale e nella partecipazione attiva della comunità tramite modelli quali le CER e i PED. Le KPI individuate – quali percentuale di riuso delle acque, capacità di infiltrazione e ritenzione, efficienza energetica degli impianti e coinvolgimento comunitario – consentono una valutazione quantitativa e comparativa tra contesti differenti, rendendo il protocollo uno strumento replicabile e adattabile a scale diverse, dal singolo edificio all'intero ambito ur-



getici associati e della densità di utenza. La quantificazione precisa dei volumi e dei flussi delle acque meteoriche, grigie e nere, integrata dall'analisi della disponibilità e potenzialità di energia rinnovabile, costituisce la base quantitativa essenziale per la progettazione consapevole e il dimensionamento ottimale degli impianti tecnologici.²

Segue la classificazione funzionale degli edifici e degli spazi urbani, basata sulla valutazione integrata della vulnerabilità idrica, della domanda energetica e delle potenzialità di rigenerazione sostenibile. Edifici pubblici come scuole, strutture civiche e residenze plurifamiliari possono essere riconfigurati come nodi idrico-energetici multifunzionali, capaci di accumulare, trattare e redistribuire risorse idriche ed energetiche verso utenze interne o comunitarie, in-

crementando così l'efficienza e la condivisione delle risorse (González-Campaña, Lafaurie-Debany and Rabazo Martin, 2023). La valutazione delle sinergie tra infrastrutture tecniche e spazi pubblici diviene cruciale per favorire un'integrazione che valorizzi contemporaneamente gli aspetti ambientali e sociali (Marzot, 2019).

Il terzo asse del protocollo riguarda l'adozione e integrazione di tecnologie avanzate in sistemi modulari per la raccolta e lo stoccaggio delle acque dotati di sensori IoT per il monitoraggio in tempo reale, il riuso delle acque per usi non potabili quali servizi igienici, irrigazione e raffrescamento evaporativo, nonché l'implementazione di infrastrutture vegetate capaci di trattenerne fino al 60-70%. I sensori IoT devono essere integrati con dispositivi di accumulo

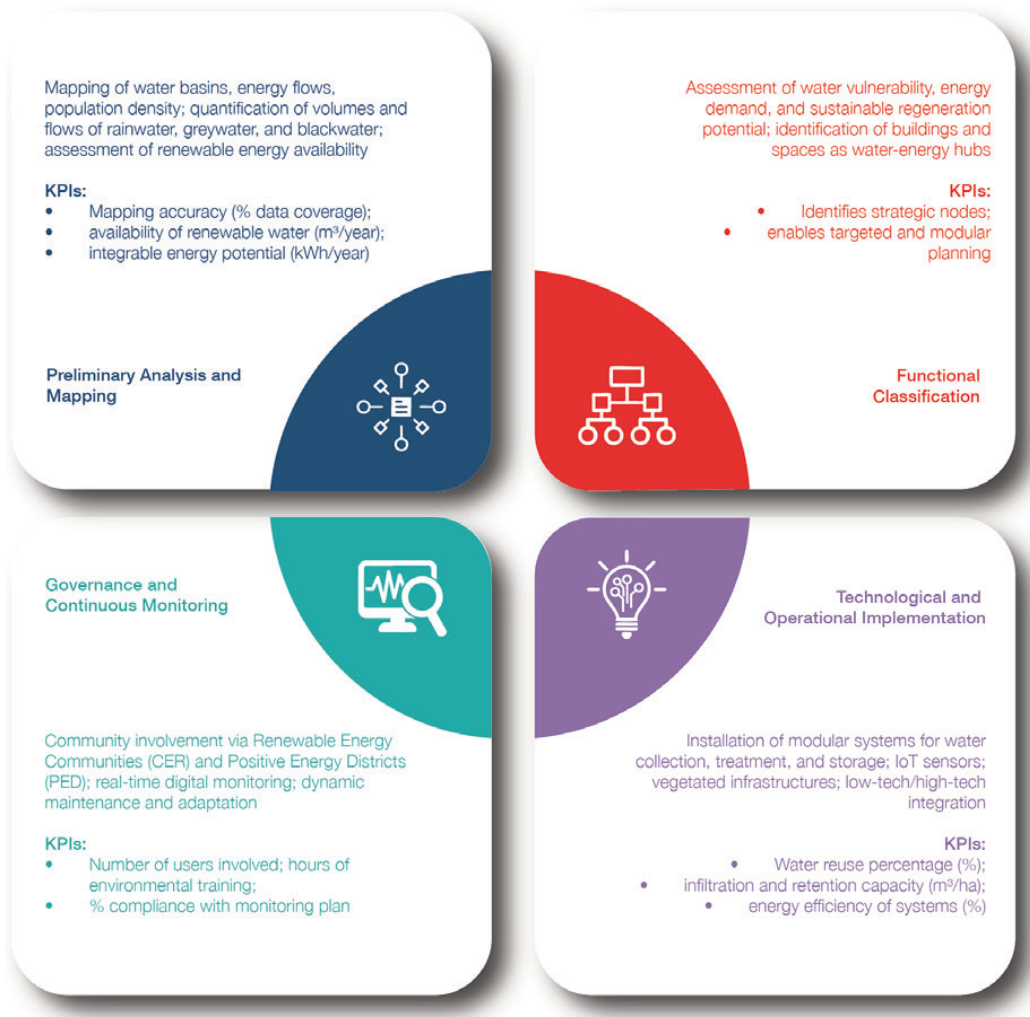


Fig. 15 | Ideogram illustrating the operational protocol for integrated water, energy, and social management, visually representing the phases, activities, and KPIs (credit: L. Lombardo, 2025).

Bosco Verticale evidenzia la declinazione tecnologica e architettonica del protocollo, con l'adozione di sensori climatici, sistemi automatizzati di irrigazione e gestione integrata dei flussi idrici ed energetici, a dimostrazione di come la scala dell'edificio possa diventare un laboratorio di simbiosi tra natura e costruito (Rossi, 2019).

L'analisi comparativa dei tre casi rivela una progressione concettuale e operativa del protocollo: Copenhagen privilegia l'integrazione spaziale e sociale, Rotterdam la scalabilità e la resilienza sistemica, Milano la precisione tecnologica e la verticalizzazione delle funzioni. Tale confronto evidenzia la potenzialità del modello nel superare l'approccio lineare e monodimensionale alla gestione idrica, configurandosi come strumento progettuale dinamico, capace di mettere in relazione infrastrutture fisiche, componenti ecologiche e dimensioni culturali del progetto. La modularità e l'adattabilità del protocollo lo rendono efficace anche in contesti complessi, come centri storici e Beni culturali, integrando la gestione idrica con interventi di recupero sostenibile e valorizzazione territoriale, ampliando la replicabilità internazionale. Il protocollo operativo rappresenta un contributo innovativo alla letteratura scientifica e alla pratica professionale, offrendo un framework olistico e multidisciplinare che integra gestione idrica, energia, materiali, design e partecipazione sociale coerenti con gli SDG.

Rispetto ai protocolli già presenti nella letteratura scientifica e nelle piattaforme internazionali – come i Water Safety Plans (WHO, 2024), i Sustainable Urban Water Management Frameworks (Mitchell, 2006) e i modelli di Integrated Urban Water Management (Bahari, 2012) – quello proposto introduce un approccio evolutivo, orientato alla convergenza tra dimensione tecnologica, sociale e progettuale. A differenza dei modelli tradizionali, spesso settoriali o focalizzati sulla sicurezza idrica e sull'efficienza operativa, il nuovo schema integra parametri ambientali, energetici e culturali in un quadro coerente, scalabile e adattabile ai diversi contesti territoriali.

La principale innovazione risiede nella modularità operativa e nella multiscalarità applicativa che consentono di trasferire principi di gestione integrata dal livello urbano a quello architettonico e comunitario. L'acqua non è più considerata solo come risorsa tecnica da gestire, ma come infrastruttura attiva di progetto, capace di generare valore aggiunto in termini di inclusione sociale, efficienza ecologica e qualità dello spazio pubblico. In tal senso il protocollo agisce come strumento dinamico di progetto e governance, in grado di coordinare dati, tecnologie e

bano o rurale. In tal senso il contributo dello studio supera la mera proposizione teorica, offrendo alla comunità scientifica un modello operativo innovativo, capace di supportare progettisti e decisori pubblici nella pianificazione di interventi sostenibili, resilienti e multifunzionali, con un impatto concreto su efficienza ambientale, coesione sociale e rigenerazione urbana.

Discussione e conclusioni | L'analisi dei casi studio e la sperimentazione dei protocolli operativi dimostrano che l'acqua non può più essere considerata una risorsa passiva, ma va concepita come vettore progettuale attivo, capace di generare sinergie multidimensionali tra architettura, pianificazione urbana e dinamiche sociali. La gestione integrata e partecipata dell'acqua si configura come uno strumento multifunzionale in grado di produrre benefici ambientali, energetici e socioculturali interconnessi, traducendosi in riduzione dei consumi, incremento dell'efficienza energetica, miglioramento del microclima urbano, valorizzazione della biodiversità e potenziamento della governance locale (Ofori and Mdee, 2021).

I casi studiati confermano che l'integrazione tra sistemi idrici ed energetici consente di progettare edifici e quartieri resilienti e adattivi, capaci di attenuare gli effetti degli eventi climatici estremi e ridurre le pressioni sul ciclo naturale dell'acqua e sulle emissioni di gas serra (Biswas, 2008). Strategie come raccolta e riuso delle acque, interventi sostenibili e sistemi di accumulo energetico integrati ottimizzano simultaneamente la gestione, riducendo la dipen-

denza dalle reti pubbliche e aumentando la sostenibilità complessiva degli edifici.

L'adozione di tecnologie intelligenti, sensori e piattaforme di monitoraggio permette una gestione predittiva e adattativa, basata su dati in tempo reale, riducendo gli sprechi, favorendo la manutenzione preventiva e garantendo replicabilità e scalabilità delle soluzioni in contesti diversi (Grigg, 2025). Dal punto di vista sociale l'acqua diventa catalizzatore di partecipazione civica e innovazione comunitaria, con edifici pubblici trasformati in hub integrati che promuovono comportamenti sostenibili, educazione ambientale e consapevolezza collettiva.

La Tabella 4 illustra l'applicazione del protocollo operativo ai casi studio di Enghaveparken (Copenaghen), Rotterdam e Bosco Verticale (Milano), evidenziando la capacità del modello di adattarsi a differenti scale, condizioni climatiche e strutture di governance. In Enghaveparken la fase analitica e la successiva implementazione dimostrano come la morfologia del Parco, basata su bacini ribassati e sistemi di drenaggio adattivi, trasformi un'infrastruttura idraulica in dispositivo sociale, capace di coniugare sicurezza urbana, ricreazione e didattica ambientale (Marzot, 2019).

Il caso di Rotterdam, attraverso la strategia della 'città spugna', mostra invece l'efficacia del protocollo su scala urbana: la combinazione di pavimentazioni permeabili, serbatoi temporanei e sistemi fotovoltaici rappresenta un paradigma di rigenerazione resiliente e di governance evoluta, fondata sulla partecipazione e sugli incentivi civici (González-Campaña, Lafaurie-Debany and Rabazo Martin, 2023). Infine il

Convergent Aspects	Description
Water as an active device	No longer just a resource to manage, but a design, climatic, social, and identity element
Multi-system integration	Water is connected to energy, landscape, biodiversity, and public space use
Digitalisation and sensor technology	In all cases, to varying degrees, forms of smart monitoring and adaptive management emerge
Flexibility and multifunctionality of spaces	Water systems are designed to operate under both ordinary and critical conditions, with differentiated uses (recreational, ecological, and technical)

Tab. 1 | Comparison of the convergent aspects and description of the analysed projects (credit: the Authors, 2025).

Divergences	Extra-European Cases	European Cases	Italian Cases
Dominant paradigm	Technological-systemic	Socio-ecological-landscape	Regenerative-participatory
Level of automation	High	Medium-high	Medium-low
Role of the user / citizen	Marginal or mediated	Active and co-protagonist	Participatory and community-based
Governance	Centralized and technology-driven	Institutionally mature	Often fragmented or experimental
Critical risks	Tech-dependence, low relationality	High costs, complex maintenance	Political discontinuity, small scale

Tab. 2. | Structural divergences of the analysed projects (credit: the Authors, 2025).

Operational Phase	Activities	Key Performance Indicators (KPIs)	Originality / Notes
Preliminary Analysis and Mapping	Mapping of water basins, energy flows, and population density; quantification of volumes and flows of rainwater, greywater, and blackwater; assessment of renewable energy availability	Mapping accuracy (% data coverage); availability of renewable water (m ³ /year); integrable energy potential (kWh/year)	Provides a quantitative baseline; allows comparative evaluations across contexts; integrates water, energy, and social data
Functional Classification	Assessment of water vulnerability, energy demand, and sustainable regeneration potential; identification of buildings and spaces as water-energy hubs	Water vulnerability index; % of public/residential buildings convertible into multifunctional hubs	Identifies strategic nodes; enables targeted and modular planning
Technological and Operational Implementation	Installation of modular systems for water collection, treatment, and storage; IoT sensors; vegetated infrastructures; low-tech / high-tech integration	Water reuse percentage (%); infiltration and retention capacity (m ³ /ha); energy efficiency of systems (%)	Combines low-tech and high-tech approaches; ensures replicability across different contexts
Governance and Continuous Monitoring	Community involvement via Renewable Energy Communities (RECs) and Positive Energy Districts (PEDs); real-time digital monitoring; dynamic maintenance and adaptation	Number of users involved; hours of environmental training; % compliance with monitoring plan	Participatory governance as a structural component; supports social resilience and adaptability

Tab. 3 | The operational protocol for integrated water, energy, and social management, detailing phases, activities, KPIs, and notes on originality (credit: the Authors, 2025).

partecipazione civica all'interno di processi decisionali flessibili e iterativi (Grigg, 2025).
In prospettiva il modello proposto può essere letto come un'evoluzione dei framework più recenti di Water-Sensitive Urban Design e Nature-based Solutions, arricchiti da una componente di governance adattiva e da un impianto metodologico replicabile in contesti europei e mediterranei. Tale impostazione risponde alle esigenze di coerenza con gli obiet-

tivi dell'Agenda 2030 (UN, 2015) e del Green Deal europeo (European Commission, 2019), offrendo uno strumento operativo per la transizione ecologica delle città e dei territori fragili.
Ripensare l'acqua come risorsa progettuale generativa e tecnologica è dunque una leva strategica per la rigenerazione sostenibile di edifici e spazi urbani. La gestione integrata e partecipativa non solo migliora le prestazioni ambientali e funzionali delle

infrastrutture, ma favorisce la coesione sociale, stimola processi di innovazione collettiva e potenzia la resilienza delle comunità. Questo approccio apre prospettive di ricerca interdisciplinare in cui architettura, ingegneria, ecologia e governance collaborano per affrontare le sfide idriche e climatiche del XXI secolo, trasformando l'acqua in risorsa progettuale centrale, generativa di innovazione tecnologica, sociale e ambientale.

In recent decades, human activity has accelerated unprecedented climate and ecosystem changes, fostering the occurrence of extreme events such as heat waves, floods, droughts, and widespread fires (Barnett, 2006). This scenario, further aggravated by global population growth, threatens the vital balance of the biosphere, undermines the resilience of natural and social systems, and disproportionately affects the most vulnerable communities (IPCC, 2023). Meanwhile, the loss of biodiversity weakens ecosystem stability, while the homogenisation of socioeconomic systems – driven by the logic of efficiency and profit – reduces collective adaptability and resilience to environmental shocks (Javanroodi, Nik and Scartezzini, 2021).

In this context, water stands out as a strategic resource, deeply interconnected with natural cycles and crucial not only for climate adaptation but also for promoting environmental justice. The right to have access to water and its responsible use are now conceived not merely as conservation goals, but as design and technological levers capable of improving building performance, regulating urban microclimates (Valente et alii, 2024) and supporting integrated resilience strategies (Matthies and Menne, 2009). In recent years, the most advanced urban policies have emphasised integrated approaches in which energy, water, and green infrastructure converge into multifunctional spaces – such as schools, gardens, civic centres, and community hubs – acting as catalysts for both social and environmental regeneration (Blecic et alii, 2024).

However, contemporary responses to the climate emergency tend to focus primarily on decarbonisation (Ness, 2024) and renewable energies, often overlooking the impact of the material resources needed to build these infrastructures, which entail significant energy consumption and emissions (Olatunde et alii, 2024). A truly effective design approach requires a broader scientific and technical perspective, including a rational management of non-renewable resources and integrating actions within the framework of the UN SDGs, particularly Goals 6, 9, 11, and 13 (Hendawy, Junaid and Amin, 2024). Technology, energy, and time, intertwined throughout the Industrial Revolutions, have shaped modern societies, normalising the continuous availability of energy and services while shaping individual and collective behaviour.

Hyper connection and the constant demand for energy flows amplify pressures on natural resources, making it essential to rethink the relationship between architecture and water resources. Designing with water thus implies transcending linear and extractive logics and adopting systemic approaches that coordinate energy, water, and social cycles through integrated strategies for ecological and social resilience. Architectural design plays a pivotal role in translating principles derived from permaculture, low-tech

strategies, and speculative visions such as Solarpunk into concrete spatial practices (Crosby, 2023). As a true 'design tool', between environmental performance and architectural experimentation, the use of water acquires a dual function, both symbolic and functional, acting as a regulator of microclimates, a mediator of spatial experience, and an active component in sustainable energy systems (Brisotto et alii, 2023). Buildings are no longer static entities, but dynamic environmental systems, capable of interacting with climatic and social contexts; in this perspective, water emerges as a catalyst for environmental, technological, and cultural innovation.

Historically, water has fostered the dialogue between the built environment and the natural landscape, as shown by Frank Lloyd Wright's Fallingwater (1935-1937), structurally integrated with the watercourse, and Mies van der Rohe's Farnsworth House (1951), elevated to cope with seasonal flooding. Since the 1970s, its role has evolved from symbolic to performative, with solutions based on thermal storage and passive solar technologies (Peng et alii, 2023). Projects such as Diller Scofidio + Renfro's Blur Building (2002), Carlo Ratti and MIT's Digital Water Pavilion (Expo Zaragoza, 2008), and the IceHotel in Jukkasjärvi (1991) explore water as an experiential and interactive medium.

Technological research has developed advanced systems for thermal regulation and climatic adaptation (Sposito, 2017). Earlier examples include the Water Drum Walls from the 1940s, followed in the 1970s–1980s by the solutions of Steve Baer, John Hammond, and Marshall Hunt, applied in the residential and agricultural sectors, up to the translucent modular containers developed by the Kalwall Corporation and the Water Wall Engineering Group. More recently, systems such as Transparent Water Storage Envelopes (TWSE) and porous ceramic technologies have enabled advanced seasonal control of thermo-hygrometric comfort, achieving energy efficiency gains ranging from 25% to 88% (Xiangfeng and Tianxing, 2007). Nevertheless, challenges related to embodied energy, which is often neglected by certification protocols such as LEED, BREEAM, Passivhaus, and ActiveHouse (Vosoughkhosravi et alii, 2022).

Emerging strategies aim to adopt a systemic approach that integrates efficiency, multifunctionality, and adaptability (Butera, 2024). Water becomes an active and adaptive component, allowing climate-responsive, sustainable, and technologically innovative buildings that merge environmental quality, energy performance, and architectural experimentation.

In light of the foregoing, this paper aims to define design strategies and protocols for the integrated management of water resources in urban contexts and built heritage, with particular attention to sustainability, resilience, and replicability of solutions. The contribution is structured into three main sections: a theoretical-methodological framework outlining the theme, critical issues, and opportunities for intervention; a critical analysis of international and local case studies, highlighting their strengths, limits, selection criteria, and transferability; and a section proposing protocols, performance indicators (KPIs), and operational diagrams to support water-resilient design.

The originality of this study lies in its systemic analytical approach, which integrates advanced technologies, sustainable materials, resource management, and social impact, while the expected impact

concerns the definition of replicable and measurable guidelines, capable of informing urban policies and innovative design practices. This paper also provides a critical reflection on the limitations, as well as on the cultural, economic, and regulatory barriers that hinder the dissemination of best practices, and on the potential transferability of results to other socio-environmental contexts, thus contributing to the scientific debate on Sustainable Development Goals 6, 9, 11, and 13 and to the possible synergies with other SDGs.

State of the art | The integrated management of urban water resources has become a priority challenge for environmental, social, and economic sustainability (Badamah, 2016). The literature highlights the need to overcome traditional linear systems of drainage and storage, and to promote water-sensitive models oriented toward conservation, reuse, and resilience (Zacharias, Dimitriou, and Koussouris, 2003). In this framework, Water Sensitive Urban Design (WSUD) integrates rainwater management with multifunctional green spaces, thus improving urban well-being, climate resilience, and microclimatic regulation (Donofrio et alii, 2009).

The transformation from impermeable cities to 'sponge-cities' promotes natural infiltration, reduces hydraulic risk, and increases the availability of non-potable water through widespread systems of catchment, storage, and natural treatment. Key technologies include green roofs and façades, permeable flooring, and plant-based water treatment systems (Vacanti and Leonardi, 2024). Sustainable Drainage Systems (SuDS) and the combined SuDS / WSUD approach can be applied across multiple scales, from the building to the urban level, through techniques such as infiltration trenches, vegetated swales, bioretention, detention basins, artificial ponds, and plant-based water treatment systems (Ferrans et alii, 2022), whose choice depends on specific objectives such as hydraulic safety, water purification and reuse, biodiversity enhancement, or urban regeneration.

Environmental certification protocols promote low-water-consumption systems and smart sensors for digital flow management and energy efficiency. Recent studies emphasise the need to conceive buildings and public spaces as active and interactive systems, capable of regulating microclimates, storing energy, promoting biodiversity, and fostering sustainable community practices (Berizzi, Mazurkiewicz and Terlicher, 2025).

These hydro-ecological systems encourage the coevolution between nature and the built environment, contributing to urban resilience. However, management often remains fragmented and social, educational, and cultural dimensions are rarely integrated, highlighting the urgency of a systemic and multidisciplinary approach that integrates urban design, engineering, architecture, ecology, and civic participation. In this framework, water becomes a central design element, and innovation lies in the synergistic integration of water, energy, and social infrastructure to create replicable models of resilient, sustainable architecture.

Objectives, methodology and phases of the research | The research aims to define an integrated framework for the sustainable management of water resources within urban and architectural contexts, promoting the integration of water systems with energy devices and multifunctional public spa-

ces, and establishing a replicable operational protocol to support designers, administrators, and local stakeholders. The study adopts a qualitative-analytical methodological approach, articulated in three phases, aimed at developing the proposed framework and enhancing the role of water as an active component in generating environmental, social, and technological performance (Rahman et alii, 2019).

The first phase consists of a critical analysis of the literature, including a systematic review of scientific, regulatory, and technical publications on urban water management systems (WSUD), energy communities, and blue-green infrastructure.

The literature review was conducted on peer-reviewed scientific databases (Scopus, Web of Science, ScienceDirect) covering the period 2010-2025, using keywords such as 'urban water management', 'WSUD', 'blue-green infrastructure', 'stormwater harvesting', and 'sustainable architecture'. Peer-reviewed studies containing experimental data, technical guidelines, replicable case studies, and institutional reports were selected, with preference given to publications focusing on integrated technologies for water flow control and energy efficiency. Particular attention has been devoted to integrated technologies enabling rainwater collection, treatment, and reuse, together with real-time monitoring tools for efficient water flow control.

The second phase consists of comparing case studies, which entails a critical analysis of national and international examples. This phase provides the theoretical foundation for the comparative analysis, as it constitutes a critical investigation capable of identifying best practices for integrating water infrastructure, energy systems, and resilient public spaces.

The comparison was carried out according to four main interpretative categories: (1) scale and context, which refer to the size of the interventions, the catchment area, and territorial characteristics; (2) functionality, defined as the configuration of integrated water management systems, energy efficiency, and ancillary services; (3) environmental impact, assessed in terms of emission reduction, water resilience, and microclimatic regulation; (4) social integration, referring to the degree of civic participation, educational inclusion, and activation of community practices.

The third phase of the study developed an elaboration / proposal for a replicable operational protocol, aimed at translating analytical results into concrete design tools by suggesting integrated strategies for the synergic management of water and energy, applicable to both new building projects and retrofitting interventions. The identified strategies aim not only to improve environmental, technological, and social performance but also to enhance the existing architectural heritage and promote climate resilience, social equity, and technological efficiency. The deductive methodological approach helps bridge the gap between theory and practice, viewing water not merely as a design device but as a vector of systemic innovation in architecture (Mecca, Gaballo and Todella, 2023).

This study is characterised by its integrated, systemic approach to water management in urban and architectural contexts, a topic that remains underexplored in the current literature, which tends to address technological, social, and environmental dimensions separately. The originality of the research stems from the combination of critical analysis of the literature, case study comparison, and the develop-

ment of operational protocols, which allow the identification of transferable best practices across different contexts. In line with this premise, the study aims to fill a significant gap in integrated water resource management, while offering a positive impact on the scientific and professional community, thereby stimulating further research on sustainable and innovative strategies to enhance water as an active element that fosters resilience and social cohesion.

Case studies | To understand the application of integrated water management principles, the case studies were organised into three macro-categories – non-European, European, and Italian – to highlight differences in scale, technological approaches, and strategies for integrating energy systems and public spaces.

Starting with non-European cases, in the United States, the West Village Campus of the University of California Davis (Fig. 1) represents a model example of a 'net zero energy' community, where photovoltaic systems, energy storage, and anaerobic digestion of waste are integrated with the collection and reuse of greywater and rainwater. The total water storage capacity of 1.2 million litres is used for irrigation and common services. Sensors and smart monitoring systems optimise water flows and energy management in real time, reducing water consumption by 50% compared to similarly equipped buildings. Digital management also coordinates the energy supply from photovoltaic panels and anaerobic digestion systems: water is conceived as a driver of energy efficiency and sustainability (Maziotis, Sala-Garrido and Molinos-Senante, 2024).

In India, the Solar Canal Project (Fig. 2) integrates water resources and energy production: the water in the canals serves as a cooling medium for floating photovoltaic panels, increasing their efficiency, reducing evaporation, and optimising water use for agricultural purposes (Sananse et alii, 2023). In Singapore, the Water Gardens (Fig. 3), designed by Peter Walker & Partners, demonstrate the integration of water basins in high-density urban contexts, which combine rainwater storage, natural cooling, and urban microclimate regulation, while generating resilient and multifunctional public spaces that support recreational and social activities (Yap and Koh, 2010).

In North America and Japan, numerous residential buildings use basins and canals as natural 'heat reservoirs', exploiting water's thermal capacity to store heat during the day and release it at night, thereby improving the energy efficiency of heating and cooling systems (Kepekci and Asma, 2020). Integrated water management plays a strategic role not only for water sustainability but also for energy optimisation and the enhancement of indoor and outdoor microclimatic conditions in buildings (Corradi et alii, 2024).

It should be noted that in Europe, integrating blue-green infrastructure into urban design is a well-established practice for sustainable water management and resilience to climate change. In the Netherlands, the Waterplein Benthemplein in Rotterdam demonstrates how urban squares can serve as temporary basins during intense rainfall events, thanks to permeable paving, multifunctional green areas, and water-level monitoring sensors, enabling controlled drainage and reducing flood risk (Prestamburgo et alii, 2021).

In Copenhagen, the Cloudburst Management Plan adopts an advanced digital approach to rain-

water management, integrating temporary basins, urban parks, and sustainable drainage systems designed for rainfall events up to 100 mm/h. Rainfall sensors, SCADA systems, and predictive modelling enable real-time control of water flows, while permeable surfaces and underground basins ensure gradual water storage and release.

Other examples include the Eden Project in Cornwall (Fig. 4) and the Aquatic Centre in London (Fig. 5), where water acts as a regulator of indoor microclimate, natural lighting and plant irrigation. In Switzerland, the Blur Building (Fig. 6) employs digitally controlled water jets to generate fog for sensory experiences and thermodynamic analysis. At the same time, the Ice Hotel in Sweden (Fig. 7) exemplifies the temporary use of ice as a building material, promoting both sustainability and architectural innovation (Ciccarese and Fino, 2004).

The European cases of Copenhagen, Rotterdam, and Freiburg were selected as examples of European excellence in integrated water management, representing technological, environmental, and social solutions that are replicable in other urban contexts. The analysis of these projects allows the identification of limits, barriers, and transferability opportunities, providing an original contribution to the scientific community and operational guidelines for designers and public decision-makers. Similarly, the Italian case studies presented hereafter were chosen for their relevance, replicability, and ability to integrate water infrastructure with energy, public spaces, and urban services, both in metropolitan contexts and in rural and peri-urban areas. Some emblematic European and Italian examples are presented in greater detail for their resilience, regulation of the urban microclimate, smart communities, and urban environmental regeneration.

Enghaveparken: multifunctional green infrastructure and resilient urbanism

The Enghaveparken project (Fig. 8), included in the city of Copenhagen's Cloudburst Management Plan, is an emblematic case of integration among water infrastructure, landscape quality, and civic participation. Built initially over ninety years ago in the historic district of Vesterbro, the park has recently been redeveloped: with a rainwater storage capacity of 22,600 cubic metres, it now functions as a resilient green infrastructure that combines hydraulic safety, microclimatic mitigation, and urban-scale ecosystem services (Avramidou and Manika, 2021).

The design strategy is based on lowered basins, underground reservoirs, and adaptive topographical morphologies. Areas such as the Water Garden and the Rose Garden have been shaped to collect and retain excess water during heavy rainfall events, while dykes, mini-embankments, and a 2,000 m³ underground reservoir regulate its flows and temporarily store water. This water is then reused for irrigation and street cleaning, reducing groundwater extraction. The system ensures the continuity of vegetation growth and recreational activities during both droughts and periods of intense rainfall.

Beyond its technical role, this redevelopment has preserved and enhanced the park's historical features, including its tree-lined avenues and original pavilions, while enriching the urban arboreal heritage with 83 newly planted trees, benefiting biodiversity and microclimate regulation. At the same time, the project has integrated sensory and educational features that transform water into an element of environ-

mental awareness and climate education, through interactive fountains, open-air canals, and play areas.

Enghaveparken is a model of resilient urbanism, capable of transforming water risk management into an opportunity for urban regeneration. Its redevelopment demonstrates how the synergy among hydraulic engineering, landscape design, and social inclusion can yield integrated benefits, reducing climate vulnerability, improving quality of life, and strengthening the cultural and environmental value of urban spaces. Water thus becomes an active medium for a sustainable, adaptive, and aware city.

The Enghaveparken case analysis confirms the effectiveness of an integrated approach to urban water management, in which hydraulic engineering, landscape, and civic participation converge into an adaptive and multifunctional system. The adopted solutions, based on flexible topographic morphologies and sensory devices, make significant contributions to the scientific debate on nature-based solutions for urban resilience. Rather than a replicable model, Enghaveparken represents a transferable design methodology capable of guiding urban planning towards dynamic adaptation strategies, grounded in the connection between ecological infrastructure, historical memory, and the social use of space.

Rotterdam, the 'sponge city' | The overall strategy of Rotterdam (Fig. 9), known as the 'sponge city', integrates green roofs, façades, and floating districts to store and reuse rainwater, regulates urban microclimates, and supports biodiversity (Dolman and Verlinde, 2024). Located below sea level and surrounded by rivers, the Dutch city is one of the most advanced examples of urban adaptation to climate change, with a proactive approach to water management that transforms every urban surface into a device that absorbs, retains, and reuses stormwater. Streets, squares, and sidewalks are designed as temporary water basins, while storage and recovery systems enable reuse for irrigation, non-potable uses, and microclimate regulation.

Among the most innovative interventions are the floating districts, currently under development, conceived not only as centres for social and cultural activities, but also as prototypes of resilient architecture, as they can adapt to fluctuating water levels without compromising urban functionality. The urban transformation has involved the use of waterproof materials and innovative paving, but above all, the implementation of citizen-engagement policies that encourage rainwater collection and sustainable practices through tax incentives and awareness campaigns.

Since 2008, more than 140,000 square metres of green roofs have been installed, with the goal of reaching 200,000 square metres by 2030, demonstrating the plan's ability to combine individual and community actions. Adaptive water management has also become an economic and technological resource: the expertise developed in Rotterdam in the design of anti-flooding systems is now sought after in numerous international contexts, from U.S. cities such as New Orleans to several countries in Africa, Southeast Asia, and Latin America. The Dutch experience shows how water management can simultaneously serve as a tool for prevention, environmental sustainability, and economic development, configuring the city as a global model of resilient urbanism.

The case of Rotterdam demonstrates how integrated water management can function not only as a technical model of resilience, but also as a strate-

gy of urban governance. The initiatives implemented – from floating district to green roofs – reflect a holistic approach that combines innovation, participation, and economic competitiveness, redefining the connection between the city and its water in terms of production and identity. The Dutch experience, rather than providing a unique model, offers a theoretical framework for adaptive planning in flood-risk areas, outlining a possible transition pathway for European cities towards climate-aware scenarios.

Freiburg | The city of Freiburg im Breisgau (Fig. 10), often referred to as the ‘ecological capital’ of Germany, represents a paradigmatic example of a smart and sustainable urban system where environmental sustainability, technological innovation, and civic engagement are intertwined into a resilient and replicable urban system. With around 230,000 inhabitants, it has pursued sustainable urban development strategies since the 1970s. This originated in the grass-

roots mobilisation against the Wyhl nuclear power plant, which gave rise to new forms of grassroots participatory governance.

The city’s urban morphology is based on principles of controlled densification, land-use reduction, and functional integration. Districts such as Vauban and Rieselfeld embody this vision: the former, built on an ex-military site, is an eco-district with limited vehicle use, characterised by high energy-performance buildings, stormwater harvesting and reuse systems, restrictions on the use of cars, and a comprehensive public transport and cycling infrastructure; the latter integrates social housing, a functional mix of houses, public spaces and services, and the focus on the ecological connectivity of the urban fabric.

Both districts adhere to the principles of urban compactness, permeable green infrastructure, and microclimatic resilience, contributing to mitigating environmental impacts and enhancing urban quality of life. Urban mobility is based on an integrated net-

work of electric trams, efficient public transport, and over 400 km of cycling infrastructure, promoting a model of ‘sustainable mobility’.

The city has also strategically invested in widespread photovoltaic systems, biomass and geothermal district heating, and circular economy strategies for waste management. A distinctive feature of Freiburg’s model is the synergistic interaction between institutional governance and civic participation, supported by tools such as local referenda, district assemblies, and energy and housing cooperatives, which foster shared resource management and strengthen community bonds. In addition, there is a knowledge ecosystem that includes the University of Freiburg, the Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, and other centres for applied research that promote technology transfer and urban experimentation.

The experience of Freiburg demonstrates how integrating technological innovation, ecological de-

Case Study	Preliminary Analysis	Functional Classification	Technological and Operational Implementation	Governance and Continuous Monitoring
West Village, UC Davis (USA)	Total water storage capacity 1.2 million litres; greywater and rainwater collection and reuse; integration with photovoltaic panels and anaerobic digestion	Net-zero energy community with multifunctional hubs for irrigation, common services, and energy management	Intelligent monitoring systems for water flows; reuse for irrigation and services; digital coordination with photovoltaic panels and anaerobic digestion	Centralised digital management; users mediated by smart systems; 50% reduction in water consumption compared to similar buildings
Solar Canal Project (India)	Analysis of irrigation canals and water availability	Canals as multifunctional systems for irrigation, microclimate, and PV panel cooling	Floating photovoltaic panels integrated with water flows; reduced evaporation; natural cooling	Coordination of water and energy management at an agricultural scale; optimised territorial use
Water Gardens (Singapore)	Urban water basins and microclimate assessment	Public spaces as multifunctional hubs for urban resilience and recreational activities	Rainwater storage, natural cooling, urban microclimate regulation	Integrated management in high-density urban areas; social and recreational support
Enghaveparken, Copenhagen (Denmark)	Storage capacity 22,600 m ³ ; lowered basins and underground tanks	Park as hub for urban microclimate, ecosystem services, and environmental education	Lowered basins, underground tanks, interactive fountains and open channels, adaptive topographies	Environmental education and civic awareness; community engagement; participatory maintenance
Benthemplein, Rotterdam (The Netherlands)	Urban squares as temporary basins; critical impermeable surfaces	Neighbourhoods and public spaces as multifunctional hubs for water management and microclimate	Permeable pavements, temporary basins, integration with photovoltaics	Citizen awareness campaigns, fiscal incentives, and active participation
Freiburg (Germany)	Vauban and Rieselfeld districts; controlled densification; land use reduction	Urban hubs integrated for water, energy, sustainable mobility, and public spaces	Stormwater collection and reuse; high-performance buildings; distributed PV, biomass district heating, and geothermal energy	Participatory governance: referenda, energy and housing cooperatives, civic education
Bosco Verticale, Milan (Italy)	Vegetated surfaces and water availability for microclimate and irrigation	Buildings as multifunctional hubs for biodiversity and urban microclimate	Automated irrigation, climate and water sensors	Integrated condominium management; environmental education
Gioia 22 & Vetra Building, Milan (Italy)	Rainwater and groundwater collection; water consumption assessment	Buildings as multifunctional hubs for water, energy, and biodiversity	IoT technologies for real-time flow regulation; up to 86% water consumption reduction	Integrated management and resident participation; user awareness
Santa Chiara Open Lab, Trento (Italy)	Stormwater collection, reuse, and phytodepuration	Park as a multifunctional hub and social infrastructure	Integrated landscape tank, phytodepuration, irrigation, and recreational use	Community engagement, youth empowerment; public and participatory management
Montelabbate & San Nicola da Crissa (Italy)	Stormwater harvesting and shared photovoltaic availability	Sustainable social housing; rural multifunctional hubs	SuDS, shared photovoltaic systems; 35-40% reduction in water demand	Shared and participatory management; low-tech high-impact solutions
Venice (Italy)	MOSE and amphibious architecture; temporary basins	Resilient public spaces and multifunctional urban hubs	Predictive tide models, temporary basins, urban terraces	Adaptive water risk management, heritage protection; institutional participation

Tab. 4 | Application of the integrated water management protocol to selected case (credit: the Authors, 2025).

sign, and community empowerment can create a low-emission urban system characterised by high livability and robust social cohesion. The city is today an advanced laboratory of ecological transition, providing scalable and replicable models that offer practical solutions to the climate crisis, anthropogenic pressures, and urban inequalities (Mössner, 2015).

The significance of Freiburg's experience lies in its ability to translate principles of sustainability and participation into an urban ecosystem of social and technological innovation. The Vauban and Rieselfeld districts demonstrate that resilience is both cultural and infrastructural, as it is the outcome of collective learning processes and inclusive governance. Rather than a reference model, Freiburg should be regarded as an evolutionary laboratory, where scientific research, administration, and citizens co-produce scalable solutions for ecological transition and climate justice. Its value, therefore, lies in its ability to generate knowledge and shared practices, guiding European cities towards more aware and community-oriented ways of living.

Italy: integrated resource management and multifunctional urban regeneration | In Italy, integrated approaches to sustainable water management are increasingly emerging through a growing convergence among architectural design, technological innovation, and processes of urban and environmental regeneration, in both metropolitan and rural contexts. The selected case studies illustrate how water-sensitive design principles and energy-efficient strategies can be synergistically applied to enhance climate resilience, public space usability, and the ecological quality of buildings.

The Bosco Verticale in Milan, designed by Stefano Boeri Architetti (2014; Fig. 11), is an emblematic example of high-density vertical green infrastructure. The project integrates automated smart irrigation systems that preserve the arboreal biodiversity distributed across the façades. Equipped with climate and water sensors, these systems modulate water supply, optimising consumption and mitigating the urban microclimate. The project also promotes CO₂ absorption, air pollutant filtration, acoustic insulation, and the passive thermal shielding of buildings, effectively combining architectural quality with ecosystem performance (Liu, 2023).

Also in Milan, LEED- and WELL-certified buildings, such as Gioia 22 (Shrivastava, Segura D'Angelo and Lai, 2021; Fig. 12) and the Vetra Building (Zanzottera, 2022; Fig. 13), employ advanced systems for the collection and reuse of both rainwater and groundwater, achieving up to an 86% reduction in water consumption compared to traditional buildings. These solutions are enhanced by IoT-based technologies that enable the real-time regulation of water flows. The Santa Chiara Open Lab project (ANSA, 2017; Fig. 14), developed as part of the urban regeneration of urban regeneration initiative of Parco Santa Chiara in Trento, integrates sustainable stormwater management, the enhancement of the existing building heritage, and social activation within the framework of the 'Extraordinary programme for urban regeneration and security in metropolitan cities and provincial capitals' (Italian DPCM, 25 May 2016).¹

In detail, the constructed wetland system collects rainwater from the roofs of adjacent buildings within a landscape-integrated basin, enabling its reuse for irrigation and recreational purposes. Dur-

ing extreme weather events, the park functions as a temporary water retention infrastructure, thereby alleviating pressure on the sewage network and mitigating flood risks. The design ensures universal accessibility and functional continuity of public spaces, integrating restored historical features with new community-oriented facilities, including an urban centre and spaces dedicated to youth empowerment. It constitutes a replicable operational prototype, as it effectively combines engineering solutions, ecological principles, and socio-cultural objectives within a model adaptable to diverse urban contexts.

In rural and peri-urban contexts, sustainable social housing initiatives – such as those implemented in Montelabbate (PU) and San Nicola da Crissa (VV) – integrate stormwater harvesting systems, Sustainable Drainage Systems (SuDS), and shared photovoltaic installations (Castellini et alii, 2024). These interventions achieve a 35–40% reduction in water demand and an estimated annual decrease of approximately 600 tonnes of CO₂ emissions (Turki et alii, 2023), exemplifying high-impact yet low-tech solutions suitable for low-density settlements.

Finally, the case of Venice – which, beyond the well-known MOSE system (Faranda et alii, 2023), is experimenting with amphibious architectures and resilient urban devices such as floodable steps, temporary basins, and tide-prediction models for dynamic flood-risk management – aims to safeguard both public accessibility and the cultural heritage of the historic urban fabric (Umgiesser, 2020). Water thus emerges not only as a resource to be preserved, but also as a driver of energy efficiency, microclimatic regulation, biodiversity, and social resilience, capable of opening new perspectives for resilient and multifunctional architectural design (Consiglia et alii, 2025).

The analysis of the Italian case studies reveals an evolving design landscape in which water functions as a catalyst for architectural innovation, environmental regeneration, and social cohesion. The experiences examined – from the green skyscrapers of Milan to the green infrastructures of Trento and the amphibious systems of Venice – demonstrate the country's capacity to develop multilevel responses to the climate crisis, combining advanced technological solutions with low-tech strategies tailored to local specificities.

What emerges is a diffuse framework of experimentation that transcends the notion of a replicable model, giving rise to an open system of integrated practices where heritage, innovation, and governance intersect to generate new design paradigms. From this perspective, the Italian experience not only offers exemplary practices but also outlines an operational grammar of resilience, rooted in the interaction between architectural and territorial scales and in the integration of sustainable resource management with the quality of inhabited space. This approach – still in the process of consolidation – serves as a strategic laboratory for the ecological transition of European cities, in which design culture acts as a mediating tool between environmental sustainability, social inclusion, and the regeneration of built heritage.

Discussion, comparative synthesis, and critical analysis of case studies: strengths, limits, and barriers to replicability | The comparative examination of non-European, European, and Italian case studies reveals heterogeneous design frameworks that share a common vision of water as an active in-

frastructure for urban resilience, environmental quality, and social inclusion. The observed differences extend beyond geographical dimensions, reflecting divergent governance paradigms, technological capacities, design cultures, and institutional structures. From this analysis, successful models, implementation limits, and theoretical issues requiring further investigation emerge.

In the non-European case studies – from the Solar Canal Project to the West Village and the Water Gardens – water is highly technologised and managed through smart infrastructure, algorithmic control systems, and SCADA platforms. Sustainability is primarily framed in terms of water, energy, and climate efficiency, while users tend to play a passive or digitally mediated role. Although technologically advanced, such approaches risk generating functionally efficient yet socially disconnected environments and remain highly dependent on robust local governance frameworks.

In Europe, water is conceived through a relational and landscape-oriented perspective, integrated into the urban fabric to enhance climatic, aesthetic, and social resilience. Case studies such as Enghaveparken and Bentheimplein combine blue-green infrastructures with sensory, educational, and participatory spaces, as well as elements of historical memory and co-design. However, these models require mature institutional frameworks and integrated planning approaches; in their absence, such infrastructures risk remaining isolated prototypes or merely aesthetic interventions. In Italy, the approach can be described as interstitial: water supports urban regeneration, risk reduction, and social activation, while mediating between heritage constraints, infrastructural deficiencies, and incremental innovation processes.

Examples like the Bosco Verticale in Milan and the Santa Chiara Open Lab in Trento combine microclimatisation, biodiversity, constructed wetland system, and sustainable water management. In peri-urban and rural areas, low-tech solutions show high systemic efficiency; nonetheless, regulatory discontinuities, actor fragmentation, and weak intersectoral planning limit scalability and replicability.

The comparison highlights strategic convergences that define a common paradigm for integrated urban water management, summarised in Table 1; alongside these convergences, structural divergences are reported in Table 2. The comparative reading indicates that there is no single model: solutions must be adapted to local contexts, balancing institutional abilities, data and technologies, participatory culture, urban density, and climate vulnerability. Within this framework, water becomes a transversal design matrix capable of generating civic engagement, environmental improvements, infrastructural efficiencies, and new architectural narratives.

The comparative analysis of case studies provides essential elements for defining replicable operational protocols that translate good practices and lessons learned into concrete design tools. The identified technological, environmental, and social strategies are formalised into modular guidelines adaptable across urban and rural contexts, balancing territorial constraints, institutional capacities, and participatory culture. The protocols integrate water management systems, energy devices, and multifunctional public spaces, including technical (SuDS, constructed wetland system, smart sensors), ecological (microclimate, biodiversity), and social (education,

civic participation) indications. Their application to both new projects and urban retrofitting enables transforming water from a mere resource into a vector of resilience, efficiency, and social inclusion, thereby providing concrete tools for designers, administrators, and public decision-makers.

The proposal of a management protocol | In response to increasing environmental and climate challenges, water architecture is emerging as a new strategic discipline for sustainable design, capable of integrating technological innovation, environmental sustainability, and social inclusion. Technical solutions such as bio-constructed wetland systems, separate collection, and reuse of stormwater, along with infiltration systems for managed aquifer recharge, are essential tools to effectively respond to the needs of resilience and sustainable water management in both building and urban contexts.

In the Italian context, where average residential water consumption exceeds 220 litres per person per day, it is a priority to adopt design strategies that substantially reduce potable water withdrawals, encouraging the reuse of greywater and stormwater for non-potable uses such as irrigation, sanitary wastewater, and cleaning activities. These strategies operate at different levels: from individual housing units equipped with rainwater collection and low-consumption sanitary systems to the urban scale, where green roofs and walls, water squares, and SuDS are promoted, as well as territorial interventions for the renaturation of waterways and the recovery of wetlands.

Based on the comparative analysis of the examined case studies, a modular and scalable protocol is proposed for the integrated management of water, energy, and social spaces – illustrated in Table 3 – designed for replicability and adaptability in both urban and rural contexts, applicable to new constructions as well as urban regeneration processes.

The initial phase involves the strict definition of intervention parameters through detailed mapping of available water basins, associated energy flows, and user density. The precise quantification of stormwater, greywater, and blackwater volumes and flows, combined with the analysis of renewable energy availability and potential, represents the essential quantitative basis for conscious design and optimal sizing of technological systems.²

The functional classification of buildings and urban spaces follows, based on an integrated assessment of water vulnerability, energy demand, and sustainable regeneration potential. Public buildings, such as schools, civic facilities, and multifamily residences, can be reconfigured as multifunctional water-energy nodes capable of collecting, treating, and redistributing water and energy resources to internal or community users, thereby enhancing efficiency and resource sharing (González-Campaña, Lafaurie-Debany and Rabazo Martin, 2023). Evaluating the synergies between technical infrastructure and public spaces is crucial to fostering integration, thereby enhancing environmental and social aspects (Marzot, 2019).

The third axis of the protocol concerns the adoption and integration of advanced technologies in modular systems for water collection and storage, equipped with IoT sensors for real-time monitoring, the reuse of water for non-potable purposes such as toilet facilities, irrigation, and evaporative cooling, as well as the implementation of green infrastruc-

tures capable of retaining up to 60-70% of it. IoT sensors must be integrated with synergistic energy storage systems that maximise their overall efficiency and sustainability by combining low-tech and high-tech solutions to ensure holistic management and optimise functional performance (Rossi, 2019).

An equally crucial component concerns governance and community participation. Innovative models, such as Renewable Energy Communities (RECs) and Positive Energy Districts (PEDs), enable the distribution of responsibilities and benefits among citizens, public institutions, and civic associations, thereby fostering social cohesion, environmental education, and urban resilience. The direct involvement of users in the management of water and energy resources results in more effective plant maintenance and the widespread diffusion of sustainable practices (Cascone, Margani and Sapienza, 2020).

The protocol also provides for a continuous monitoring and maintenance system based on IoT and digital dashboards for real-time control of flows, energy production, and plant efficiency, thereby fostering the replicability of interventions and the dynamic adaptation to climate variations and to the evolving needs of local communities (Patsidis et alii, 2023).

The protocol (Fig. 15) thus allows to reconfigure existing buildings into integrated water-energy hubs, to guide the design of new buildings according to a systemic and resilient paradigm, and to promote sustainable practices on an urban and rural scale; water becomes an active design element, capable of triggering spatial, ecological, and social transformations, from a simple resource to a key vector for the creation of resilient, multifunctional, and culturally significant environments, responsive to the pressing challenges of climate change and contemporary urbanisation.

The proposed protocol stands out for its modular and scalable approach, which synergistically integrates water, energy, and social spaces, and for its ability to translate complex principles of urban resilience into concrete operational guidelines. Its originality lies in the combination of low-tech and high-tech approaches, in the enhancement of the existing building heritage as a multifunctional hub, and in the active participation of communities through models such as RECs and PEDs. The KPIs, such as water reuse percentage, infiltration and retention capacity, plant energy efficiency, and community engagement, enable quantitative and comparative evaluation across different contexts, making the protocol a replicable and adaptable tool at different scales from the individual building to the entire urban or rural district.

In this sense, the contribution of the study goes beyond the mere theoretical proposition, offering the scientific community an innovative operating model, capable of supporting designers and public decision-makers in planning sustainable, resilient, and multifunctional interventions with a concrete impact on environmental efficiency, social cohesiveness, and urban regeneration.

Discussion and conclusions | The analysis of the case studies and the testing of operational protocols demonstrate that water can no longer be considered a passive resource but rather an active design vector capable of generating multidimensional synergies among architecture, urban planning, and social dynamics. Integrated and participatory water manage-

ment is a multifunctional tool that produces interconnected environmental, energy, and socio-cultural benefits, resulting in reduced consumption, increased energy efficiency, improved urban microclimate, enhanced biodiversity, and strengthened local governance (Ofori and Mdee, 2021).

The examined study cases confirm that the integration of water and energy systems enables the design of resilient and adaptive buildings and districts, capable of mitigating the effects of extreme climate events and reducing pressure on the natural water cycle and greenhouse gas emissions (Biswas, 2008). Strategies such as water collection and reuse, green interventions, and integrated energy-storage systems simultaneously optimise resource management, reduce dependence on public networks, and improve the overall sustainability of buildings. The adoption of smart technologies, sensors, and monitoring platforms enables predictive and adaptive management, based on real-time data, reducing waste, promoting preventive maintenance, and ensuring replicability and scalability of solutions across different contexts (Grigg, 2025). From a social perspective, water becomes a catalyst for civic participation and community innovation, with public buildings transformed into integrated hubs that promote sustainable behaviours, environmental education, and collective awareness.

Table 4 illustrates the application of the operational protocol to the case studies of Enghaveparken (Copenhagen), Rotterdam, and Bosco Verticale (Milan), highlighting the model's ability to adapt to different scales, climate conditions, and governance structures. In Enghaveparken, the analytical phase and the subsequent implementation demonstrate how the park's morphology, based on lowered basins and adaptive drainage systems, transforms hydraulic infrastructures into a social device, combining urban safety, recreation, and environmental education (Marzot, 2019).

The case of Rotterdam, through the 'sponge city' strategy, shows the protocol's effectiveness on an urban scale: the combination of permeable pavements, temporary storage basins, and photovoltaic systems represents a paradigm of resilient regeneration and advanced governance, founded on participation and civic incentives (González-Campaña, Lafaurie-Debany and Rabazo Martin, 2023). Finally, the Bosco Verticale highlights the technological and architectural declination of the protocol, using climate sensors, automated irrigation systems, and integrated management of water and energy flows, demonstrating how the building scale can become a laboratory for symbiosis between nature and buildings (Rossi, 2019).

The comparative analysis of the three cases reveals a conceptual and operational progression in the protocol: Copenhagen prioritises spatial and social integration, Rotterdam emphasises scalability and systemic resilience, and Milan focuses on technological precision and the verticalisation of functions. This comparison underlines the model's potential to overcome linear, monodimensional approaches to water management, becoming itself a dynamic design tool capable of connecting physical infrastructures and ecological components with the project's cultural dimensions.

The modularity and adaptability of the protocol make it effective even in complex contexts, such as historic centres and cultural heritage sites, where water management can be integrated with sustainable

recovery and territorial enhancement, thus expanding its international replicability (IWA, 2013). The operational protocol represents an innovative contribution to both scientific literature and professional practice, offering a holistic and multidisciplinary framework that integrates water management, energy, materials, design, and social participation, consistent with SDGs.

Compared to the existing protocols in scientific literature and in international platforms – such as Water Safety Plans (WHO, 2024), Sustainable Urban Water Management Frameworks (Mitchell, 2006) and Integrated Urban Water Management models (Bahari, 2012) – the proposed protocol introduces an evolutionary approach, oriented towards the convergence of technological, social, and design dimensions. Unlike traditional models, often sector-based or focused solely on water safety and operational efficiency, this new method integrates environmental, energy, and cultural parameters into a coherent framework that is scalable and adaptable to different territorial contexts.

Acknowledgments

The coordination and critical review of the scientific content were carried out by Prof. T. Campisi, guaranteeing the methodological rigour and theoretical coherence of the study. The presentation and analysis of the case studies were developed by L. Lombardo, who drew extensively upon her doctoral research, 'Smart Villages in the Madonie Park – Strategies for the Rehabilitation and Enhancement of Inner Areas', integrating concepts of sustainable heritage rehabilitation, community engagement, and the application of smart village strategies in rural contexts. With the above premises, both authors are jointly responsible for the contents of the essay.

Notes

1) For further details, please refer to the webpage: governo.it/sites/governo.it/files/DPCM_20160525_testo.pdf [Accessed 28 September 2025].

2) For further details, please refer to the webpage: researchgate.net/publication/377747218_PRINCIPI_PER_LA_PROGETTAZIONE_REALIZZAZIONE_E_GESTIONE_DI_EDIFICI_INTELLIGENTI/link/65b5213d1e1ec12ef517249/download?_tp=eyJjb250ZXh0Ijp7ImZpcnN0UGFnZSI6bnB1YmtpY2F0aW9uIiwicGZnZSI6bnB1YmtpY2F0aW9uIn99 [Accessed 28 September 2025].

References

- ANSA (2017), “Trento, 18 milioni a progetto ‘Santa Chiara open lab’”, in *ANSA.it*, newspaper online, 18/12/2017. [Online] Available at: ansa.it/trentino/notizie/2017/12/18/trento-18-milioni-a-progetto-santa-chiara-open-lab_aecbf31d5d94ed3-903b6-b382f922f138.html [Accessed 28 September 2025].
- Avramidou, M. and Manika, S. (2021), “Interaction of modern architectural design with the environment – Evaluation and application in urban open spaces for developing resilient cities”, in *ICED2021 | 2nd International Conference on Environmental Design, Athens, Greece, October 23-24, 2021, IOP Conference Series | Earth and Environmental Science*, vol. 899, article 012011, Purpose-Led Publishing, pp. 1-8. [Online] Available at: doi.org/10.1088/1755-1315/899/1/012011 [Accessed 28 September 2025].
- Badarnah, L. (2016), “Water management lessons from nature for applications to buildings”, in *Procedia Engineering*, vol. 145, pp. 1432-1439. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.proeng.2016.04.180 [Accessed 28 September 2025].

The main innovation lies in its operational modularity and multiscale applicability, which enable the transfer of integrated management principles from the urban to the architectural and community levels. Water is no longer considered just a technical resource to be managed, but an active project infrastructure capable of generating added value in terms of social inclusion, ecological efficiency, and the quality of public spaces. In this sense, the protocol operates as a dynamic design governance tool, capable of coordinating data, technologies, and civic participation through flexible, iterative decision-making processes (Grigg, 2025).

From a forward-looking perspective, the proposed model can be interpreted as an evolution of the most recent frameworks of Water Sensitive Urban Design and Nature-based Solutions, enriched by an adaptive governance component and a replicable methodological structure that can be replicated in European and Mediterranean contexts. This approach responds to the needs of coherence with the objectives of the 2030 Agenda (UN, 2015) and

- Bahari, A. (2012), *Integrated Urban Water Management*, Global Water Partnership, Stockholm. [Online] Available at: gwp.org/globalassets/global/toolbox/publications/background-papers/16-integrated-urban-water-management-2012.pdf [Accessed 29 September 2025].
- Barnett, J. (2006), "Climate change, insecurity and injustice", in Adger, W. N., Paavola, J., Huq, S. and Mace, M. J. (eds), *Fairness in Adaptation to Climate Change*, MIT Press, Cambridge (MA), pp. 115-130. [Online] Available at: doi.org/10.7551/mitpress/2957.003.0011 [Accessed 29 September 2025].
- Berizzi, C., Mazurkiewicz, M. and Terlicher, G. (2025), "Public Open Spaces and Water – Urban Design in Response to Climate Change", in Hanzl, M., Kantarek, A. A., Zagula, A., Musiaka, L. and Figlus, T. (eds), *Urban Morphology versus Urban Redevelopment and Revitalisation – Proceedings of the XXIX Conference of the International Seminar on Urban Form 2022, Łódź and Kraków, Poland, September 2-11, 2022*, Springer, Cham, pp. 521-544. [Online] Available at: doi.org/10.1007/978-3-031-77752-3_26 [Accessed 28 September 2025].
- Biswas, A. K. (2008), "Current directions – Integrated water resources management – A second look", in *Water International*, vol. 33, issue 3, pp. 274-278. [Online] Available at: doi.org/10.1080/0250806080272812 [Accessed 28 September 2025].
- Blečić, I., Cois, E., Muron, E. and Saiu, V. (2024), "Spaces seeking activities - activities seeking spaces – Evaluation and policy design of neighbourhood-wide urban community spaces", in *City, Culture and Society*, vol. 39, article 100606, pp. 1-9. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.ccs.2024.100606 [Accessed 28 September 2025].
- Brisotto, C., Carney, J., Macaione, I. and Raffa, A. (2023), "Cambiamenti climatici nei paesaggi di bonifica – Adattamento tra modulo e modularità | Climate change in reclamation landscapes – Adaptation between module and modularity", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 14, pp. 62-73. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/1442023 [Accessed 28 September 2025].
- Butera, F. M. (2024), "La Città Ideale | The Ideal City", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 16, pp. 30-39. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/1622024 [Accessed 28 September 2025].
- Cascone, S. M., Margani, G. and Sapienza, V. (2020), *New Horizons for Sustainable Architecture | Nuovi orizzonti per l'architettura sostenibile*, EdicomEdizioni, Monfalcone.
- Castellini, M., Faiella, I., Lavecchia, L., Miniaci, R. and Valbonesi, P. (eds) (2024), *Rapporto Annuale – Anno 2023*. [Online] Available at: oipeosservatorio.it/wp-content/uploads/2024/09/Rapporto-Annuale-2023.pdf [Accessed 28 September 2025].

the European Green Deal (European Commission, 2019), offering an operational tool for the ecological transition of cities and fragile territories.

Rethinking water as a generative and technological design resource is therefore a strategic lever for the sustainable regeneration of buildings and urban spaces. Integrated and participatory management enhances the environmental and functional performance of infrastructure, fosters social cohesion, stimulates collective innovation processes, and strengthens community resilience. This approach opens new interdisciplinary research perspectives, in which architecture, engineering, ecology, and governance collaborate to face the water and climate challenges of the 21st century, transforming water into a central design resource that generates technological, social, and environmental innovation.

- 024/03/rapporto_2023_IT.pdf [Accessed 28 September 2025].
- Ciccarese, L. and Fino, A. (2003), *Le relazioni tra cambiamenti del clima ed ecosistemi vegetali*, Agenzia per la Protezione dell'Ambiente e per i servizi Tecnici, Rapporti 32/2003 [Online] Available at: isprambiente.gov.it/contentfiles/00003800/3806-cambiamenti-clima.pdf [Accessed 28 September 2025].
- Consiglia, M., Lahmar, A., Azrou, M. and Lahmar, A. (2025), "Towards resilient architecture in technological innovation and AI", in Kharnich, H., El Harrouni, K., Baba, K. and Karibi, K. (eds), *Vernacular Architecture – Support for Territorial Development*, National School of Architecture of Rabat, Rabat, Morocco, October 4-5, 2024, Materials Research Proceedings, vol. 47, Material Research Forum LLC., Millersville (PA), pp. 327-342. [Online] Available at: doi.org/10.21741/9781644903391-38 [Accessed 28 September 2025].
- Corradi, M., Stevens, T., Macaione, I., Raffa, A. and Andalaro, B. (2024), "Rigenerazione climatica green degli street-scapes – L'esperienza di De Urbanisten ad Anversa | Green climate-adaptive streetscapes regeneration – The De Urbanisten Experience in Antwerp", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 16, pp. 60-73. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/1652024 [Accessed 28 September 2024].
- Crosby, P. (2023), "Towards an Anti-Antiutopia – Solarpunk Cities and the Precarity of Our Urban Future", in *Enquiry | The ARCC Journal for Architectural Research*, vol. 20, issue 2, pp. 79-91. [Online] Available at: doi.org/10.17831/enqarcc.v20i2.1159 [Accessed 28 September 2025].
- Dolman, N. and Verlinde, J. (2024), "Achieving a Water-Resilient Rotterdam – Past, Present and Future Perspectives", in *Blue Papers*, vol. 3, issue 1, pp. 164-177. [Online] Available at: doi.org/10.58981/bluepapers.2024.1.13 [Accessed 28 September 2025].
- Donofrio, J., Kuhn, Y., McWalter, K. and Winsor, M. (2009), "Water-Sensitive Urban Design – An Emerging Model in Sustainable Design and Comprehensive Water-Cycle Management", in *Environmental Practice*, vol. 11, issue 3, pp. 179-189. [Online] Available at: doi.org/10.1017/S1466046609990263 [Accessed 28 September 2025].
- European Commission (2019), *Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions – The European Green Deal*, document 52019 DC0640, COM/2019/640 final. [Online] Available at: eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex:52019DC0640 [Accessed 28 September 2025].

- Faranda, D., Ginesta, M., Alberti, T., Coppola, E. and Anzidei, M. (2023), "Attributing Venice Acqua Alta events to a changing climate and evaluating the efficacy of MoSE adaptation strategy", in *Climate and Atmospheric Science*, vol. 6, article 181, pp. 1-8. [Online] Available at: doi.org/10.1038/s41612-023-00513-0 [Accessed 28 September 2025].
- Ferrans, P., Torres, M. N., Temprano, J. and Rodríguez Sánchez, J. P. (2022), "Sustainable urban drainage system (SUDS) modeling supporting decision-making – A systematic quantitative review", in *Science of The Total Environment*, vol. 806, issue 2, article 150447, pp. 1-14. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150447 [Accessed 28 September 2025].
- González-Campaña, J., Lafaurie-Debany, N. and Rabazo Martin, M. (2023), "Realizzare paesaggi innovativi – Balmori Associates ridefinisce il rapporto uomo-natura per le città del futuro | Making innovative landscapes – Balmori Associates redefining the human-nature relationship for the cities of the future", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 13, pp. 31-42. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/1322023 [Accessed 28 September 2025].
- Grigg, N. S. (2025), "Integrated Water Resources Management After 2030 – An Agenda for Educators", in *Water*, vol. 17, issue 2, article 189, pp. 1-15. [Online] Available at: doi.org/10.3390/w17020189 [Accessed 28 September 2025].
- Hendawy, M., Junaid, M. and Amin, A. (2024), "Integrating sustainable development goals into the architecture curriculum – Experiences and perspectives", in *City and Environment Interactions*, vol. 21, article 100138, pp. 1-11. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.cacint.2023.100138 [Accessed 28 September 2025].
- IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change (2023), *Climate Change 2021 – The Physical Science Basis – Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge (UK) and New York (NY). [Online] Available at: doi.org/10.1017/9781009157896 [Accessed 29 September 2025].
- Javanroodi, K., Nik, V. M. and Scartezzi, J. L. (2021), "Quantifying the impacts of urban morphology on modifying microclimate conditions in extreme weather conditions", in *Journal of Physics | Conference Series*, vol. 2042, article 012058, pp. 1-6. [Online] Available at: doi.org/10.1088/1742-6596/2042/1/012058 [Accessed 28 September 2025].
- Kepekci, H. and Asma, A. (2020), "Comparative Analysis of Heat Sink Performance Using Different Materials", in *AJER | American Journal of Engineering Research*, vol. 9, issue 4, pp. 204-210. [Online] Available at: ajer.org/papers/Vol9-issue4/Z0904204210.pdf [Accessed 28 September 2025].
- Liu, Y. (2023), "Analysis of the Vertical Forest of Milan in Terms of High-Rise Architecture and Biodiversity", in *Highlights in Art and Design*, vol. 3, issue 2, pp. 47-52. [Online] Available at: doi.org/10.54097/hiaad.v3i2.10043 [Accessed 28 September 2025].
- Marzot, N. (2019), "L'avventura del progetto e il destino dell'uomo – Architettura e costruzione della realtà sociale", in *Rivista di Estetica*, vol. 71, pp. 148-172. [Online] Available at: doi.org/10.4000/estetica.5566 [Accessed 28 September 2025].
- Matthies, F. and Menne, B. (2009), "Prevention and management of health hazards related to heatwaves", in *International Journal of Circumpolar Health*, vol. 68, issue 1, pp. 8-12. [Online] Available at: doi.org/10.3402/ijch.v68i1.18293 [Accessed 28 September 2025].
- Maziotis, A., Sala-Garrido, R. and Molinos-Senante, M. (2024), "Assessing energy efficiency and its dynamic changes in the water sector integrating heterogeneity and carbon emissions", in *Journal of Cleaner Production*, vol. 480, article 144137, pp. 1-12. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.144137 [Accessed 28 September 2025].
- Mecca, B., Gaballo, M. and Todella, E. (2023), "Measuring and evaluating urban sustainability | Misurare e valutare la sostenibilità urbana", in *Valori e Valutazioni*, vol. 32, pp. 17-29. [Online] Available at: doi.org/10.48264/VVSIEV-20233203 [Accessed 28 September 2025].
- Mitchell, V. G. (2006), "Applying Integrated Urban Water Management Concepts – A Review of Australian Experience", in *Environmental Management*, vol. 37, pp. 589-605. [Online] Available at: doi.org/10.1007/s00267-004-0252-1 [Accessed 28 September 2025].
- Mössner, S. (2015), "Urban development in Freiburg, Germany – Sustainable and neoliberal?", in *Die Erde | Journal of the Geographic Society of Berlin*, vol. 146, issue 2-3, pp. 189-193. [Online] Available at: doi.org/10.12854/erde-146-16 [Accessed 28 September 2025].
- Ness, D. (2024), "La decarbonizzazione degli edifici sarà sufficiente? – Limitare e ridistribuire l'aumento di superficie costruita | Will decarbonising buildings be enough? – Constrain and redistribute growth in floor area", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 15, pp. 84-97. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/1562024 [Accessed 30 August 2025].
- Ofori, A. and Mdee, A. (2021), "Integrated Water Resource Management", in Leal Filho, W., Azul, A. M., Brandli, L., Lange Salvia, A. and Wall, T. (eds), *Clean Water and Sanitation – Encyclopedia of the UN Sustainable Development Goals*, Springer, Cham, pp. 1-13. [Online] Available at: doi.org/10.1007/978-3-319-70061-8_4-1 [Accessed 28 September 2025].
- Olatunde, T. M., Okwandu, A. C., Akande, D. O. and Sikhakhane, Z. Q. (2024), "Energy efficiency in architecture – Strategies and technologies", in *Open Access Research Journal of Multidisciplinary Studies*, vol. 7, issue 2, pp. 31-41. [Online] Available at: doi.org/10.53022/oarjms.2024.7.2.0024 [Accessed 28 September 2025].
- Patsidis, A., Dyško, A., Booth, C., Oulis Rousis, A., Kalliga, P. and Tzelepis, D. (2023), "Digital Architecture for Monitoring and Operational Analytics of Multi-Vector Microgrids Utilizing Cloud Computing, Advanced Virtualization Techniques, and Data Analytics Methods", in *Energies*, vol. 16, issue 16, article 5908, pp. 1-19. [Online] Available at: doi.org/10.3390/en16165908 [Accessed 28 September 2025].
- Peng, L., Salem, M., Blazek, V., Prokop, L., Al-Bahrani, M. and Misak, S. (2023), "Thermal energy storage applications in solar water heaters – An updated review", in *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 57, article 103230, pp. 1-11. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.seta.2023.103230 [Accessed 28 September 2025].
- Prestamburgo, S., Sgroi, F., Venudo, A. and Zanin, C. (2021), "Universal design as resilient urban space plan strategy – New scenarios for environmental resources' sustainable management", in *AIMS Environmental Science*, vol. 8, issue 4, pp. 321-340. [Online] Available at: doi.org/10.3934/envirosci.2021021 [Accessed 28 September 2025].
- Rahman, M. M., Rahman, M. A., Haque, M. M. and Rahman, A. (2019), "Sustainable water use in construction", in Tam, V. W. Y. and Le, K. N. (eds), *Sustainable Construction Technologies – Life-Cycle Assessment*, Butterworth-Heinemann, Oxford (UK), pp. 211-235. [Online] Available at: doi.org/10.1016/B978-0-12-811749-1.00006-7 [Accessed 28 September 2025].
- Rossi, G. E. (2019), "Adattamento urbano, strategie e progetto – Il divario fra le politiche e la loro implementazione | Urban adaptation, strategies and projects – The gap between policies and their implementation", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 6, pp. 46-57. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/652019 [Accessed 28 September 2025].
- Sananse, N., Povekar, S., Wagh, A., Donde, S., Gurani, K. and Khadke, N. (2023), "The Canal Top Solar Power Generation Project", in *IJRASET | International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*, vol. 11, issue 4, pp. 3942-3947. [Online] Available at: doi.org/10.22214/ijraset.2023.51144 [Accessed 28 September 2025].
- Shrivastava, E., Segura D'Angelo, G. A. and Lai, Y. (2021), *Gioia 22 – Re-Articulating Porta Nuova – A public high-rise proposal in Milan skyline*, Thesis, Politecnico di Milano (Italy), Tutor Prof. Folli, M. G., co-Tutors Prof. Pecora, C., Dotelli, G., Imperadori, M. and Romano, F. [Online] Available at: hdl.handle.net/10589/181717 [Accessed 28 September 2025].
- Sposito, C. (2017), "Costruire con l'acqua – Nuovi paradigmi dell'architettura sostenibile | Building with water – new standards of sustainable architecture", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 2, pp. 117-126. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/2162017 [Accessed 28 September 2025].
- Turki, H., Zhang, J. Y., Ferroni, F. and Ramanan, D. (2023), "SUDS – Scalable Urban Dynamic Scenes", in *Computer Science*, arXiv:2303.14536v1, pp. 1-14. [Online] Available at: doi.org/10.48550/arXiv.2303.14536 [Accessed 28 September 2025].
- Umgiesser, G. (2020), "The impact of operating the mobile barriers in Venice (MOSE) under climate change", in *Journal for Nature Conservation*, vol. 54, article 125783, pp. 1-10. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.jnc.2019.125783 [Accessed 28 September 2025].
- UN – United Nations (2015), *Transforming our world – The 2030 Agenda for Sustainable Development – A/RES/70/1*. [Online] Available at: sustainabledevelopment.un.org/content/documents/21252030%20Agenda%20for%20Sustainable%20Development%20web.pdf [Accessed 28 September 2025].
- Vacanti, A. and Leonardi, C. (2024), "Tecnologia, energia e tempo – Percorsi sperimentali per il design di tecnologie appropriate | Technology, energy and time – Experimental paths for the design of appropriate technology", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 15, pp. 316-323. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/15262024 [Accessed 30 August 2025].
- Valente, R., Mazingo, L. A., Bosco, R. and Giacobbe, S. (2024), "Gestione integrata delle risorse naturali in contesti urbani sostenibili | Integrated natural resource management in sustainable urban context", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 15, pp. 180-189. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/15142024 [Accessed 29 September 2024].
- Vosoughkhosravi, S., Dixon-Grasso, L. and Jafari, A. (2022), "The impact of LEED certification on energy performance and occupant satisfaction – A case study of residential college buildings", in *Journal of Building Engineering*, vol. 59, article 105097, pp. 1-16. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.jobe.2022.105097 [Accessed 28 September 2025].
- WHO – World Health Organization (2024), *Water safety planning – A roadmap to supporting resources*. [Online] Available at: cdn.who.int/media/docs/default-source/wash-documents/water-safety-and-quality/water-safety-planning/revised_wsp_roadmap_23sept2024.pdf?sfvrsn=39eca14b_3&download=true [Accessed 28 September 2025].
- Xiangfeng, L. and Tianxing, S. (2007), "Conceptual Development of Transparent Water Storage Envelopes", in *Architectural Science Review*, vol. 50, issue 1, pp. 18-25. [Online] Available at: doi.org/10.3763/asre.2007.5003 [Accessed 28 September 2025].
- Yap, K. G. and Koh, A. (2010), "Creating a City of Gardens and Water – Singapore's Active, Beautiful, Clean Waters Programme", in *Proceedings of the Water Environment Federation*, Water Environment Federation, vol. 2010, issue 2, pp. 1-14. [Online] Available at: accesswater.org/publications/proceedings/-297673/creating-a-city-of-gardens-and-water---singapore-s-active--beautiful--clean-waters-programme?pdfdownload=true [Accessed 28 September 2025].
- Zacharias, I., Dimitriou, E. and Koussouris, T. (2003), "Developing sustainable water management scenarios by using thorough hydrologic analysis and environmental criteria", in *Journal of Environmental Management*, vol. 69, issue 4, pp. 401-412. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.jenvman.2003.09.017 [Accessed 28 September 2025].
- Zanzottera, F. (2022), *Vetra Building – Storia di un'architettura nel cuore di Milano*, Liberedizioni – BAMS Edizioni, Montichiari.