

Attilio Nebuloni¹, <https://orcid.org/0000-0002-9552-7002>

Fiammetta Costa¹, <https://orcid.org/0000-0002-5568-0061>

Giorgio Buratti¹, <https://orcid.org/0000-0002-6882-0844>

Matteo Meraviglia¹

Luciana Migliore², <https://orcid.org/0000-0003-3554-3841>

Annamaria Alabiso²

Valerio Cantelmo²

¹ Dipartimento di Design, Politecnico di Milano, Italia

² Dipartimento di Biologia, Università di Roma Tor Vergata, Italia

attilio.nebuloni@polimi.it

fiammetta.costa@polimi.it

giorgio.buratti@polimi.it

matteo.meraviglia@polimi.it

luciana.migliore@uniroma2.it

annamaria.alabiso@gmail.com

valeriocantelmo@gmail.com

Abstract. Tra le strategie capaci di affrontare le molteplici sfide connesse al raggiungimento del target NetZero, il *greening* urbano rappresenta non solo una strategia per aumentare l'efficienza energetica degli edifici, ma l'occasione per disegnare nuovi scenari di un abitare biofilico, capace di ristabilire connessioni positive tra persone e natura nell'ambiente costruito. In tale contesto, un'area di studio di crescente interesse si concentra sul recupero sostenibile delle acque grigie domestiche per il riutilizzo nelle costruzioni a fini irrigui. Il paper presenta i risultati di un progetto di ricerca interdisciplinare, che mediante processi di bio-filtrazione permette il recupero delle acque di scarico degli elettrodomestici per alimentare soluzioni di green architecture.

Parole chiave: *Environmental design; Wastewater management; Greening urbano; Biophilic design; Biotechnologie.*

Framework

Lo sviluppo di un'architettura sostenibile e resiliente che integri nella costruzione, in particolare nel suo involucro, la dimensione organica quale strategia possibile per il raggiungimento di un target NetZero, vede nell'acqua un elemento di potenziale criticità. Ai benefici derivanti dall'adozione di approcci di *greening*, infatti, si contrappone spesso un consumo di acqua potabile poco sostenibile, particolarmente critico in aree e periodi con scarse precipitazioni. In alternativa, è auspicabile utilizzare acqua di falda, se disponibile, oppure riciclare acque di scarico agendo con soluzioni tecnologico-impiantistiche centralizzate, non sempre attuabili per localizzazione, densità del costruito,

tipologia di intervento o per gli elevati costi di realizzazione e gestione¹. Più in generale, già oggi il consumo di acqua dolce per fini irrigui è stimato, a livello globale, al 70% del prelievo totale, riconoscendo così il trattamento, il recupero e il riutilizzo delle acque reflue sempre più come un'efficace soluzione per affrontare la scarsità d'acqua (Kunz *et al.*, 2016; Barbagallo *et al.*, 2001) e nel contempo ridurre i costi d'intervento, le esternalità ambientali e l'impatto antropico sugli ecosistemi naturali (Feeny *et al.*, 1990). I vantaggi di tale soluzione sono sia in ambito strettamente agricolo sia, in prospettiva, in ambienti urbani caratterizzati da una sempre più stretta integrazione tra verde e architettura (Walk and Dierich, 2014); da un lato, ciò si configura come strategia per migliorare l'efficienza energetica delle costruzioni, dall'altro, per favorire forme di sinergia tra persone e natura².

Sebbene il riutilizzo delle acque reflue nell'agricoltura tradizionale sia stato ampiamente investigato, dimostrandone il vantaggio per chi opera in contesti di scarsità d'acqua (Bichai *et al.*, 2018), l'adozione di analoghe pratiche a livello urbano e architettonico, in forma individuale o collettiva, è un argomento di ricerca relativamente inesplorato. Zero Mile si propone di colmare tale *gap*. A partire dal riutilizzo delle acque grigie provenienti dalle lavastoviglie per la coltivazione di un orto domestico o, più in generale, per fini irrigui, Zero Mile permette

Biotechnologies and urban greening: the Zero Mile approach

Abstract. Among the strategies capable of addressing the multiple challenges related to achieving the NetZero target, urban greening is not only a strategy to increase the energy efficiency of buildings but also an opportunity to design new scenarios of biophilic living, capable of re-establishing positive connections between people and nature in the built environment. In this context, an area of study of growing interest focuses on the sustainable recovery of domestic greywater for reuse in buildings for irrigation purposes. The paper outlines the results of an interdisciplinary research project, which, through bio-filtration processes, enables the recovery of wastewater from household appliances to supply green architecture solutions.

Keywords: *Environmental design; Wastewater management; Urban greening; Biophilic design; Biotechnologies.*

Framework

Water is a potentially critical element in developing a sustainable and resilient architecture that integrates the organic dimension into construction, particularly the envelope, as a possible strategy for achieving a NetZero target. Indeed, the benefits of adopting greening approaches are often offset by unsustainable potable water consumption, which is particularly critical in areas and periods of low rainfall. As alternatives, it is desirable to use groundwater, if available, or to recycle wastewater with centralised technological plant solutions, which are only sometimes feasible due to location, built density, type of intervention, or high implementation and operating costs¹.

Generally, today freshwater consumption for irrigation purposes is globally estimated at 70 percent of total with-

drawal. This acknowledges wastewater treatment, recovery, and reuse increasingly as an effective solution to address water scarcity (Kunz *et al.*, 2016; Barbagallo *et al.*, 2001), while reducing intervention costs, environmental externalities and anthropogenic impact on natural ecosystems (Feeny *et al.*, 1990). The benefits of such a solution are both in strictly agricultural settings and, prospectively, in urban environments characterised by increasingly close integration of green and architecture (Walk and Dierich, 2014). This is seen as a strategy to improve the energy efficiency of buildings, and also as a device to foster forms of synergy between people and nature².

While wastewater reuse in traditional agriculture has been extensively investigated, demonstrating its benefit for those operating in water-scarce settings (Bichai *et al.*, 2018), the

la creazione di un sistema potenzialmente chiuso ed autosufficiente (Costa and Nebuloni, 2021). A tal fine, viene introdotto un nuovo biofiltro sviluppato *ad hoc* in grado di produrre acqua pulita che viene poi riutilizzata nella costruzione per irrigare un orto o un giardino verticale, o per eseguire ulteriori cicli della lavastoviglie. Il nuovo biofiltro rappresenta il nodo di un sistema integrato capace di rispondere a due principi dell'economia circolare: i) la riduzione del consumo di acqua e del refluo da smaltire, ii) il riciclo dei nutrienti presenti nei reflui mediante la loro mineralizzazione e l'uso come fertilizzanti nella produzione domestica di verdure e piante. Nel contesto di un'economia circolare, le acque reflue rappresentano pertanto una risorsa preziosa, il cui riutilizzo diventa più fattibile in ragione del grado di prossimità a quello di produzione (WWAP, 2017). Nell'approccio "dal rifiuto al valore", è cruciale così andare oltre la semplice riduzione dell'inquinamento e ottenere valore dalle acque reflue stesse, attraverso il recupero di nutrienti ed energia.

Il progetto è stato avviato grazie alla ricerca FARB "Design for sustainability and ICT"³ e al finanziamento "Torno subito" della Regione Lazio⁴. Ha coinvolto nel corso del suo sviluppo diversi gruppi universitari del Politecnico di Milano e dell'Università di Roma Tor Vergata e alcune aziende.

Biotechnologie per il trattamento delle acque reflue

casi, dei batteri. Tali tecniche, tuttavia, sono spesso costose e richiedono elevati livelli di energia (Gonçalves *et al.*, 2017). Un

Il processo di trattamento delle acque reflue è oggi principalmente di tipo biologico ed utilizza, nella maggior parte dei

adoption of similar practices at the urban and architectural level, either individually or collectively, is a relatively unexplored research topic. Zero Mile aims to bridge this gap. Starting by reusing greywater from dishwashers to grow a home garden or, more generally, for irrigation purposes, Zero Mile allows the creation of a potentially closed and self-sufficient system (Costa and Nebuloni, 2021). To this end, a new *ad hoc* developed biofilter is introduced to produce clean water, which is then reused in the building to irrigate a vegetable garden or a vertical garden, or to run additional dishwasher cycles. This new biofilter is the node of an integrated system capable of responding to two principles of circular economy, namely i) the reduction of water consumption and wastewater to be disposed of, and ii) the recycling of

nutrients in wastewater through their mineralisation and use as fertilisers in home production of vegetables and plants. Wastewater is, therefore, a valuable resource within the context of circular economy, and its reuse becomes more feasible depending on the degree to which it is close to the production process (WWAP, 2017). In the "waste to value" approach, it is thus crucial to go beyond simply reducing pollution in order to obtain value from wastewater through nutrient and energy recovery.

This project was launched thanks to FARB research "Design for sustainability and ICT"³ and "Torno subito" grants issued by Regione Lazio⁴. During its development, it has involved several university teams including the Polytechnic of Milan, the University of Rome Tor Vergata, and some companies.

approccio più sostenibile è quello che utilizza consorzi microbici basati sulla relazione tra organismi fotosintetici e batteri eterotrofi (Posadas *et al.*, 2013; 2017); i primi, attraverso la fotosintesi, forniscono ossigeno ai batteri eterotrofi, mentre gli eterotrofi, attraverso la degradazione organica, rilasciano CO₂ e nutrienti minerali, utilizzati dagli autotrofi. In ragione della capacità del consorzio di microrganismi di rimuovere i contaminanti e di biofiltrare, il risultato di questo scambio è un aumento di biomassa del consorzio che può essere utilizzata come fertilizzante. Il sistema Zero Mile si basa su un processo di doppia filtrazione: la prima meccanica e la seconda biologica, consistente in un consorzio di microrganismi assemblato *ad hoc* per il trattamento del contenuto organico delle acque reflue (Fig. 1). Il trattamento è effettuato da un sistema biologico autosufficiente, ovvero un consorzio costituito da un cianobatterio e da batteri eterotrofi colonizzatori del refluo della lavastoviglie, che si struttura in un aggregato sospeso tridimensionale. In sintesi, il biofiltro integrato nel sistema permette di "attaccare e mineralizzare" la frazione organica presente nelle acque di scarico di una lavastoviglie domestica, che vengono successivamente utilizzate per l'irrigazione di vegetali o, eventualmente, reimmesse in circolo per ulteriori cicli di lavaggio. Più in dettaglio, il principio alla base di questo biofiltro è quello di assemblare colonizzatori del refluo della lavastoviglie con microrganismi atti a produrre biofilm in modo che l'insieme (il consorzio) sia in grado di prosperare nelle acque reflue della lavastoviglie. L'insieme rappresenta così una sorta di "rifugio" in cui il degradatore eterotrofo del carico organico e il cianobatterio costruiscono una "casa" che permette a entrambi di sopravvivere e crescere nel refluo. L'organismo "rifugio" è stato selezionato tra la colle-

Biotechnologies in wastewater treatment

Currently, the wastewater treatment process is mainly biological and uses bacteria in most cases. However, such techniques are often expensive and require high levels of energy (Gonçalves *et al.*, 2017). A more sustainable approach is one that uses microbial consortia based on the relationship between photosynthetic organisms and heterotrophic bacteria (Posadas *et al.*, 2013; 2017); the former, through photosynthesis, provide oxygen to heterotrophic bacteria, while the heterotrophs, through organic degradation, release CO₂ and mineral nutrients, which are used by the autotrophs. Due to the ability of the consortium of microorganisms to remove contaminants and bio-filtrate, this exchange results in an increase in consortium biomass that can be used as fertiliser.

Zero Mile system is based on a dual filtration process, the first mechanical and the second biological, consisting of a consortium of microorganisms assembled *ad hoc* to treat the organic content of wastewater (Fig. 1). Treatment is carried out by a self-sustaining biological system, i.e., a consortium consisting of a cyanobacterium and heterotrophic bacteria colonising the dishwasher effluent, which is structured into a three-dimensional suspended aggregate. In brief, the system's integrated biofilter allows the organic fraction in domestic dishwasher wastewater to be "attacked and mineralised". It is then used for plant irrigation or, eventually, re-circulated for further washing cycles. Specifically, the principle behind this biofilter is to assemble colonisers of dishwasher effluent with microorganisms capable of producing biofilms so that the whole

zione di cianobatteri del Laboratorio delle alghe dell'Università di Roma Tor Vergata: il cianobatterio scelto è *Thricormus variabilis* (VRUC168), un microrganismo fotosintetico e azotofissatore, proveniente da biofilm naturali che crescono nella laguna di Cabras, in Sardegna. Da solo, *Thricormus* non è in grado di sopravvivere nel refluo. Invece, nel suo insieme, il gruppo selezionato di microrganismi conferisce al biofiltro funzioni e proprietà uniche che lo rendono sicuro nella produzione di acqua fertilizzata, priva di sostanze chimiche pericolose⁵.

Il sistema Zero Mile è il primo del suo genere e rappresenta un'innovazione nel recupero delle acque reflue della cucina. La ricerca condotta sino ad oggi ha riguardato lo studio e la sperimentazione su materiali, componenti e processi, comprese le misurazioni di laboratorio e diverse ipotesi di integrazione della biotecnologia in prototipi sperimentali. Allo stato dell'arte della ricerca, sul sistema sono stati depositati un brevetto nazionale ed uno internazionale⁶.

Metodologia, articolazione e risultati della ricerca

Le principali fasi della ricerca sono state: i) progettazione tecnica e funzionale del sistema Zero Mile; ii) sviluppo del biofiltro, con la messa a punto del consorzio microbico, la sua applicazione in laboratorio, il monitoraggio e l'analisi dei risultati; iii) costruzione di un primo prototipo operativo in ambiente indoor; iv) user-centred design research; v) analisi stato dell'arte di soluzioni tecnologiche di verde verticale e roof gardening; vi) definizione dei criteri di progettazione per il trasferimento del sistema in ambiente esterno; vii) costruzione di un secondo prototipo modulare e interattivo.

(the consortium) is able to thrive in dishwasher wastewater. The ensemble is, therefore, a kind of "refuge" in which the heterotrophic organic load degrader and the cyanobacterium build a "home" that allows both to survive and grow in the wastewater. The "refuge" organism was selected from the collection of cyanobacteria at the Algae Laboratory of the University of Rome Tor Vergata. The chosen cyanobacterium is *Thricormus variabilis* (VRUC168), a photosynthetic and nitrogen-fixing microorganism from natural biofilms growing in the Cabras Lagoon, Sardinia. Alone, *Thricormus* is unable to survive in the effluent. Instead, as a whole, the selected group of microorganisms endow the biofilter with unique functions and properties that make it safe to produce fertilised water, free of hazardous chemicals⁵. Zero Mile system is the first of its kind,

an innovation in kitchen wastewater recovery. The research carried out to date has involved the study and testing of materials, components, and processes, including laboratory measurements and various hypotheses for integrating biotechnology into experimental prototypes. At the current state of research, national and international patents have been filed on the system⁶.

Research methodology, structure and results

The main steps of the research were: (i) technical and functional design of the Zero Mile system; (ii) development of the biofilter, including development of the microbial consortium, its application in the laboratory, and monitoring and analysis of the results; (iii) construction of a first operational prototype for an indoor environment; (iv) user-centred design research; (v)



i) Progettazione tecnica e funzionale del sistema Zero Mile

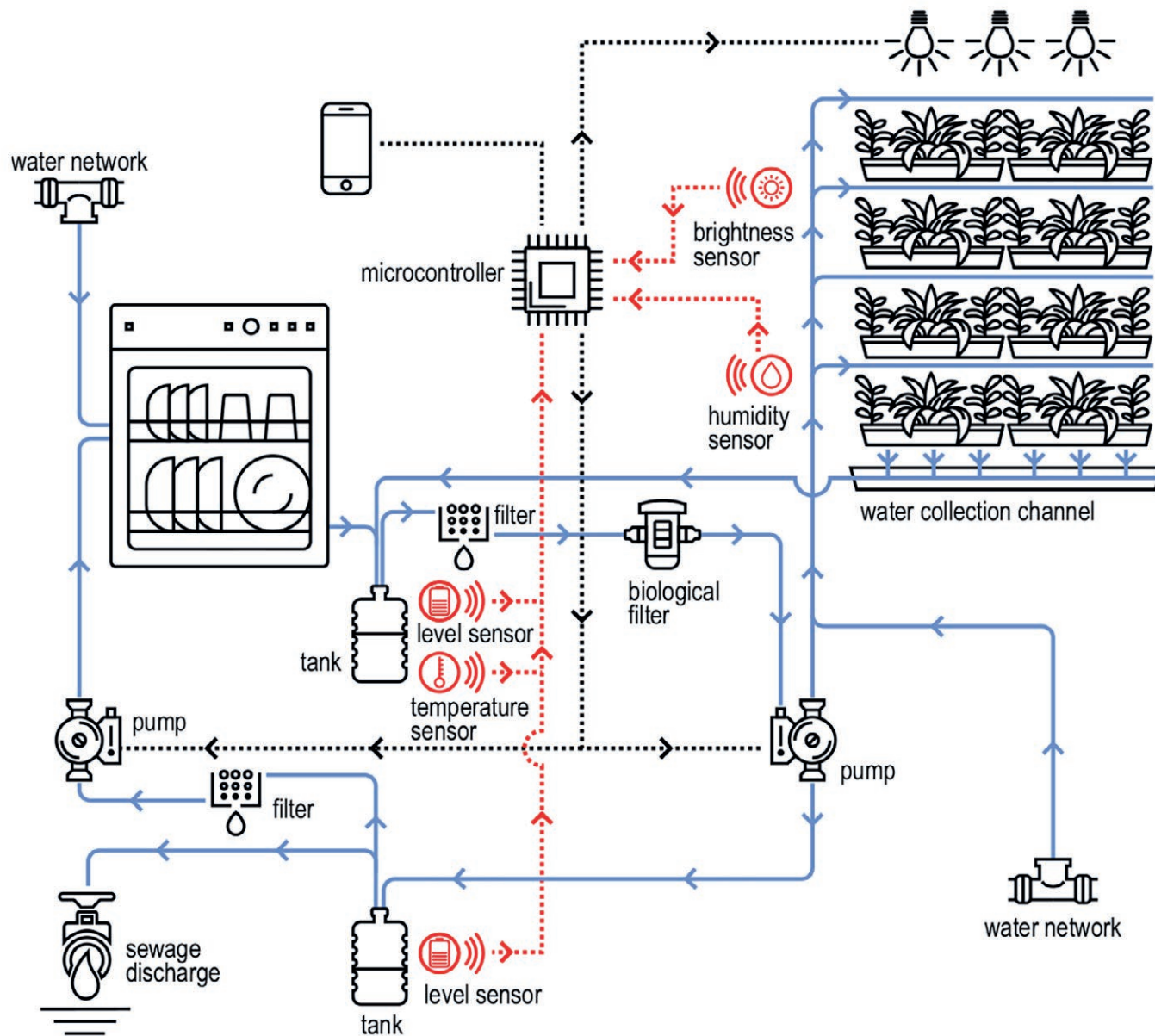
Il sistema Zero Mile è composto da tre sottosistemi: il sottosistema idraulico, quello di bio-filtrazione e infine il sottosistema di coltivazione. Nel suo complesso, Zero Mile è stato progettato in modo che i sottosistemi possano essere integrati in un insieme unitario, essere aggregati in configurazione variabile a seconda delle necessità di applicazione nella costruzione o funzionare separatamente (Fig. 2). Ciò ha consentito di svolgere sperimentazioni in parallelo all'avvio del progetto per poi verificare le integrazioni nelle fasi successive. Il modulo idraulico, sviluppato dall'azienda Kawe, è composto essenzialmente da due serbatoi, una lampada UV e dai dispositivi necessari per il circolo del refluo nel modulo idraulico e l'invio all'irrigazione. Il primo serbatoio, dotato di filtro meccanico, ha la funzione di raccogliere e contenere il refluo di scarico della lavastoviglie, dalla sua produzione all'utilizzo nel biofiltro, una volta raggiunta la temperatura idonea per il trattamento. Il secondo ha la funzione di contenere il refluo trattato, disponibile per l'irrigazione. La lampada UV è utilizzata per la sterilizzazione del refluo trattato. Il sistema di filtraggio biologico è costituito da un contenitore all'interno del quale il consor-

state-of-the-art analysis of vertical greening and roof gardening technological solutions; (vi) definition of design criteria for transferring the system to an outdoor environment; and (vii) construction of a second modular and interactive prototype.

i) Technical and functional design of the Zero Mile system

The Zero Mile system consists of three subsystems: the hydraulic subsystem, the bio-filtering subsystem and, finally, the cultivation subsystem. Zero Mile was designed to integrate the subsystems into a unified whole, aggregate them in variable configurations depending on the application needs in construction, or operate separately (Fig. 2). This made it possible to run experiments in parallel at the start of the project, and then to verify the integrations in subsequent phases. The

hydraulic module, developed by the company Kawe, consists of two tanks, a UV lamp, and the necessary devices to circulate the effluent in the hydraulic module and send it to irrigation. The first tank, equipped with a mechanical filter, has the function of collecting and containing the wastewater from the dishwasher, from its production to its use in the biofilter, once it reaches a suitable temperature for treatment. The second tank has the function of containing the treated effluent, that is available for irrigation. The UV lamp is used for sterilisation of the treated effluent. The biological filtration system consists of a container within which the consortium of microorganisms degrades the effluent's organic load. The cultivation subsystem is organised into a vertical support structure, containment tanks and piping for drip irrigation. For indoor applications, a series



of lamps are also required to enable uniform illumination of plants and the consortium of microorganisms.

ii) Development of the biofilter

The aim of this research phase led by the Department of Biology at Tor Vergata was to assemble an autotrophic/heterotrophic consortium using microorganisms that can thrive in dishwasher wastewater. Standard microbiological techniques allowed the isolation of heterotrophic bacteria present in dishwasher wastewater samples, identified on the basis of their 16S rRNA (Congestri *et al.*, 2019). These bacteria were assayed for their ability to assemble and grow together with

Thricormus variabilis in progressively more complex associations (from one-to-one to one-to-three associations). The ability of the consortia formed by these microorganisms to thrive is a consequence of their relationship in quantitative and qualitative terms, which only field research has allowed to assess through continuous feedback and iterations. At the end of the assemblage tests, among the microorganisms that had demonstrated good growth in association with *Thricormus variabilis*, three were chosen based on their distribution in the effluent, precisely two dominant species and one rare species. Indeed, dominant species can efficiently utilise the resources present,

while rare species make use of specific resources.

iii) Construction of a first operational prototype for an indoor environment

The first physical tests of system operation and evaluation of the relationship between artifact and space were conducted with an experimental prototype consisting of a dishwasher integrated with an indoor growing device (Fig. 3). For its sizing, the following factors were considered: a) the frequency of use of the dishwasher by Italian households, about four times a week; b) the amount of wastewater discharged at each washing cycle, about 10 litres; and c) the water con-

sumption per plant, about 40 mL/day in the lettuce hypothesis. The following items were applied in the prototype: a) a reservoir to receive wastewater from the dishwasher; b) a mechanical filter operating on the wastewater in the reservoir; c) a pumping device from the reservoir to the green wall; d) an irrigation system; and, e) a lighting system.

iv) User-centred design research

The main barriers to the spread of wastewater reuse practices are treatment prices, besides a mix of regulatory issues and lack of credibility. If costs act as a barrier upstream, the lack of credibility is mainly related to

zio di microrganismi svolge la sua funzione di degradazione del carico organico del refluo. Il sottosistema di coltivazione è organizzato in struttura portante verticale, vasche di contenimento e tubazioni per l'irrigazione a goccia. Per l'applicazione indoor sono inoltre necessarie una serie di lampade utili a consentire un'illuminazione uniforme dei vegetali e del consorzio di microrganismi.

ii) Sviluppo del biofiltro

Obiettivo di questa fase della ricerca condotta dal Dipartimento di Biologia di Tor Vergata è stato quello di assemblare un consorzio autotrofo/eterotrofo utilizzando i microrganismi in grado di prosperare nelle acque reflue della lavastoviglie. Tecniche microbiologiche standard hanno permesso l'isolamento dei batteri eterotrofi presenti in campioni di refluo di lavastoviglie, identificati sulla base del loro 16S rRNA (Congestri *et al.*, 2019). Questi batteri sono stati saggiati per la capacità di assemblarsi e crescere assieme a *Thricormus variabilis* in associazioni via via più complesse (da associazioni *one-to-one* fino ad associazioni *one-to-three*). La capacità di prosperare dei consorzi costituiti da questi microrganismi è conseguenza dello loro rapporto in termini quantitativi e qualitativi, che solo la ricerca sul campo, attraverso continui feedback e iterazioni, ha permesso di valutare. Alla fine dei test di assemblaggio, tra i microrganismi che avevano dimostrato una buona crescita in associazione con il *Thricormus variabilis*, ne sono stati scelti tre in base alla loro distribuzione nel refluo: due specie dominanti e una rara. Infatti, le specie dominanti sono quelle che sono in grado di utilizzare in maniera efficiente le risorse presenti, mentre quelle rare hanno capacità di utilizzare specifiche risorse.

a misperception of the safety of treated wastewater (Anderson *et al.*, 2008). This second aspect, in particular, is a key factor in the success of any initiative in this context (Kunz *et al.*, 2016). This research used a multi-method approach (quantitative data analysis, focus groups, interviews, and stakeholder involvement) with the aim of identifying the strengths and weaknesses of the proposed system (Volontè and Grana, 2021). The first prototype was an essential element in understanding the project during the user discussion phases. The most significant aspects that emerged were: i) focus on size and relationship with other kitchen equipment; ii) the necessary easy use and preference for automation; iii) the possibility of opening up to more types of greenery to encourage greening processes; and iv) the extent of the solution's application to other rooms

in the home and to additional functional types.

v) State-of-the-art analysis of vertical greening and roof gardening technological solutions

The system's application scenarios were defined in parallel with the development of the biofilter and the first prototype. This step was used to define scopes and dimensions of spatial spillovers of a technology that enables decentralised recovery and treatment of domestic greywater. Paradigmatic case studies of green architecture, vertical green projects and their implementation, and roof gardening were collected and analysed, particularly focusing on the ways and degree of integration between the proposed technology and existing construction. Two main application approaches emerged: (i) juxtaposition or overlapping, when each element of

iii) Costruzione di un primo prototipo operativo in ambiente indoor

I primi test fisici di funzionamento del sistema e di valutazione della relazione tra artefatto e spazio, sono stati condotti con un prototipo sperimentale costituito da una lavastoviglie integrata con un dispositivo di coltivazione indoor (Fig. 3), per il cui dimensionamento sono stati considerati: a) la frequenza di utilizzo della lavastoviglie da parte delle famiglie italiane, circa 4 volte a settimana; b) la quantità di acque reflue scaricate ad ogni ciclo di lavaggio, circa 10 litri; c) il consumo di acqua per ogni pianta, circa 40 ml/giorno nell'ipotesi della lattuga. Nel prototipo hanno trovato applicazione: a) un serbatoio utile a ricevere i reflui di scarico della lavastoviglie; b) un filtro meccanico che opera sui reflui del serbatoio; c) un dispositivo di pompaggio dal serbatoio alla parete verde; d) un sistema di irrigazione; e) un sistema di illuminazione.



| 03

iv) *User-centred design research*

I principali ostacoli alla diffusione delle pratiche di riutilizzo delle acque reflue sono, da un lato, i prezzi del trattamento, dall'altro, un mix di questioni regolatorie e mancanza di credibilità. Se i costi agiscono a monte come barriera, la mancanza di credibilità è principalmente legata ad una errata percezione di sicurezza delle acque reflue trattate (Anderson *et al.*, 2008). Questo secondo aspetto, in particolare, è un fattore chiave per il successo di qualsiasi iniziativa in tale contesto (Kunz *et al.*, 2016). La ricerca ha utilizzato un approccio multi-metodo (analisi di dati quantitativi, focus group, interviste, coinvolgimento di *stakeholders*), con l'obiettivo di identificare punti di forza e debolezze del sistema proposto (Volontè and Grana, 2021). Nelle fasi di confronto con gli utenti, il primo prototipo è stato un essenziale elemento di comprensione del progetto. Tra gli aspetti più significativi che sono emersi si segnalano: i) l'attenzione alle dimensioni ed alla relazione con le altre dotazioni della cucina; ii) la necessaria semplicità di utilizzo e la preferenza per l'automazione; iii) la possibilità di aprire a più tipologie di verde per favorire processi di greening; iv) l'estensione della soluzione applicativa anche ad altri ambienti della casa e ad ulteriori tipologie funzionali.

v) *Analisi stato dell'arte di soluzioni tecnologiche di verde verticale e roof gardening*

La definizione degli scenari applicativi del sistema è avvenuta parallelamente allo sviluppo del biofiltro e del primo prototipo. Questa fase è servita per definire ambiti e dimensioni delle ricadute spaziali di una tecnologia che permette di decentrare il recupero ed il trattamento delle acque grigie domestiche. Sono stati raccolti ed analizzati casi studio paradigmatici

the system (new green technology and existing building) retains its autonomy, with the building envelope thus acting as mere support; (ii) integration, when the components seek new forms of convergence and integration toward a single complex system that is not easily divisible into basic elements (Nebuloni *et al.*, 2019). Hence, the application strategies were used to define the design requirements of the second step of the research.

vi) *Definition of design criteria for transferring the system to an outdoor environment*

The design criteria defined at this stage were based on the functional aspects and environmental constraints that allow for the stability and well-being of the biotechnology consortium (above all, the use of transparent polymeric materials to maximise the contribution of natural light in photosynthesis

processes, and easy access, maintenance and handling of the components constituting the system). They also took into account the conditions for its integration into the architecture. In the latter field, the initial hypotheses based on the building's incremental rationale and plant-structural implementation processes gradually gave way to application scenarios centred on small-scale intervention. In this spatial level, the innovation of the proposed solution emerges more than others. Decentralised treatment of wastewater at its production points is, in fact, the main advantage of the Zero Mile system over today's most popular treatment plant technology solutions.

vii) *Construction of a second modular and interactive prototype*

The second prototype was assembled with the aim of integrating the three

di *green architecture*, progetti e realizzazioni di verde verticale e *roof gardening*, focalizzandosi in particolare sulle modalità ed il grado di integrazione tra la tecnologia proposta e la costruzione esistente, da cui sono emersi due principali approcci applicativi: i) per giustapposizione o sovrapposizione, quando ogni elemento del sistema (nuova tecnologia verde e manufatto esistente) mantiene la propria autonomia, con l'involucro edilizio che funge così da semplice supporto; ii) per integrazione, quando i componenti cercano nuove forme di convergenza e integrazione verso un unico sistema complesso non facilmente divisibile in elementi base (Nebuloni *et al.*, 2019). Da ciò derivano le strategie applicative utilizzate nella definizione dei requisiti progettuali della seconda fase della ricerca.

vi) *Definizione dei criteri di progettazione per il trasferimento del sistema in ambiente esterno*

I criteri progettuali definiti in questa fase si sono basati sia sugli aspetti funzionali e i vincoli ambientali che permettono di garantire la stabilità ed il benessere del consorzio biotecnologico (su tutti, l'utilizzo di materiali polimerici trasparenti per massimizzare l'apporto di luce naturale nei processi di fotosintesi e la facilità di accesso, manutenzione e movimentazione delle componenti costituenti il sistema) sia sulle condizioni per la sua integrazione nell'architettura. In questo secondo ambito, le ipotesi iniziali basate su logiche incremental e processi di implementazione impiantistico-strutturale della costruzione, hanno via via lasciato il passo a scenari applicativi centrati sulla piccola scala di intervento, livello spaziale in cui più di altri emerge l'innovazione della soluzione proposta. Infatti, il trattamento decentrato del refluo presso i suoi punti di produzione è il van-

subsystems into a whole, and of shaping scalability and modularity hypotheses as objectives emerging both from critical analysis of examples in the literature, and from what matured with the first prototype. The construction of the latter prioritised spatial "visualisation" of the idea for purposes of communication and comparison with users, while the second prototype was, instead, functional in experimenting with the automation aspects of the process and sizing of the technological components with a view to their integration (Fig. 4). The latter prototype also made it possible to evaluate the behaviour of the biofilter in different environmental contexts, obtaining useful data on the stability of the biotechnology consortium as lighting and temperature parameters changed. This information is now being further investigated both biologically and from a

design perspective. Ease of interaction and management was another evaluation point, providing useful criteria for engineering the system. A grade three to four Technology Readiness Level was achieved by this prototype, from experimental proof of concept to laboratory-validated technology. Methodological reasons also dictated its construction, precisely to define an interdisciplinary design framework for adopting integrated bio-design solutions. According to the Research through Design methodology (Stappers and Giaccardi, 2017), this prototype was the core element, a common "physical" experimental base on which to set up cross-disciplinary research in design and biology. From a set of initial hypotheses, the research was thus approached through design cycles of prototyping, evaluation and implementation.

taggio principale del sistema Zero Mile rispetto alle soluzioni tecnologico impiantistiche di trattamento oggi più diffuse.

vii) Costruzione di un secondo prototipo modulare e interattivo

Il secondo prototipo è stato costruito con l'obiettivo di integrare in un tutt'uno i tre sottosistemi, oltre che per dare forma a ipotesi di scalabilità e modularità, come obiettivi emergenti sia dalla lettura critica degli esempi della letteratura sia di quanto maturato con il primo prototipo. Se la costruzione di quest'ultimo ha dato priorità alla "visualizzazione" spaziale dell'idea per finalità di comunicazione e confronto con l'utenza, il secondo prototipo è stato invece funzionale alla sperimentazione degli aspetti di automazione del processo e al dimensionamento dei componenti tecnologici in vista della loro integrazione (Fig. 4). Questo secondo prototipo ha permesso inoltre di valutare il comportamento del biofiltro in contesti ambientali differenti, ricavando dati utili sulla stabilità del consorzio biotecnologico al variare dei parametri di illuminazione e temperatura. Tali informazioni sono ora oggetto di ulteriori approfondimenti sia a livello biologico sia dal punto di vista del design. La facilità di interazione e gestione è stato un ulteriore punto di valutazione ed ha fornito criteri utili per l'ingegnerizzazione del sistema. Con questo prototipo si è giunti ad un Technology Readiness Level di grado 3/4, da *proof of concept* sperimentale a tecnologia validata in laboratorio. La sua costruzione è stata inoltre dettata da ragioni metodologiche: definire un framework progettuale interdisciplinare per l'adozione di soluzioni integrate di biodesign. Secondo la metodologia Research through Design (Stappers and Giaccardi, 2017), questo prototipo di studio è stato infatti l'elemento

Conclusions

Integrating wastewater treatment systems into the context of the built space is a strategy that can improve domestic water use efficiency. Zero Mile addresses the reuse of wastewater from the dishwasher, and can bring significant benefits in reducing the amount of wastewater effluent and freshwater consumed. The solution proposed by the research also makes it possible to implement design experiences of green architecture not only to the climate neutrality of buildings and the increase in urban biodiversity, but also to promote new forms of socialisation that, from a biophilic perspective, benefit from the proximity between man and nature. This is especially true when the proposed solution is functional for water-intensive activities, such as in the restaurant sector, setting itself up as a possible lever for the redevelopment of urban spaces through

Zfarming practices and zero-mile cultivation (Weisser *et al.*, 2022) integrated into buildings (Figs. 5, 6). The multidisciplinary dimension of the research is underpinned by the data. Indeed, according to the European Environment Agency, about three-quarters of the total CO₂ released into the atmosphere comes from the energy sectors, where building consumption accounts for one-third of the value; about 10 percent of the remainder can be attributed to agriculture in its various forms⁷. More than others, these two sectors are, therefore, called upon to play a key role in decarbonisation processes, individually and even more so at the system level. Zero Mile suggests an integrating scenario between them in the forms that characterise a small scale intervention, with benefits arising from the use of biotechnological components and the modification of simple everyday be-

centrale, una comune base di sperimentazione "fisica" su cui impostare una ricerca trasversale alle discipline del design e della biologia; da un insieme di ipotesi iniziali, la ricerca è stata così affrontata attraverso cicli progettuali di prototipazione, valutazione e implementazione.

Conclusioni

L'integrazione del sistema di trattamento delle acque reflue nel contesto dello spazio costruito è una strategia che può migliorare l'efficienza dell'uso domestico dell'acqua. Zero Mile si occupa del riutilizzo delle acque reflue della lavastoviglie e può portare significativi benefici in termini di riduzione della quantità di reflui di scarico e di acqua dolce consumata. La soluzione proposta dalla ricerca permette inoltre di implementare esperienze progettuali di *green architecture* dirette non solo alla neutralità climatica delle costruzioni e all'incremento della biodiversità urbana, ma a favorire nuove forme di socializzazione che in ottica biofilica traggono beneficio della prossimità tra



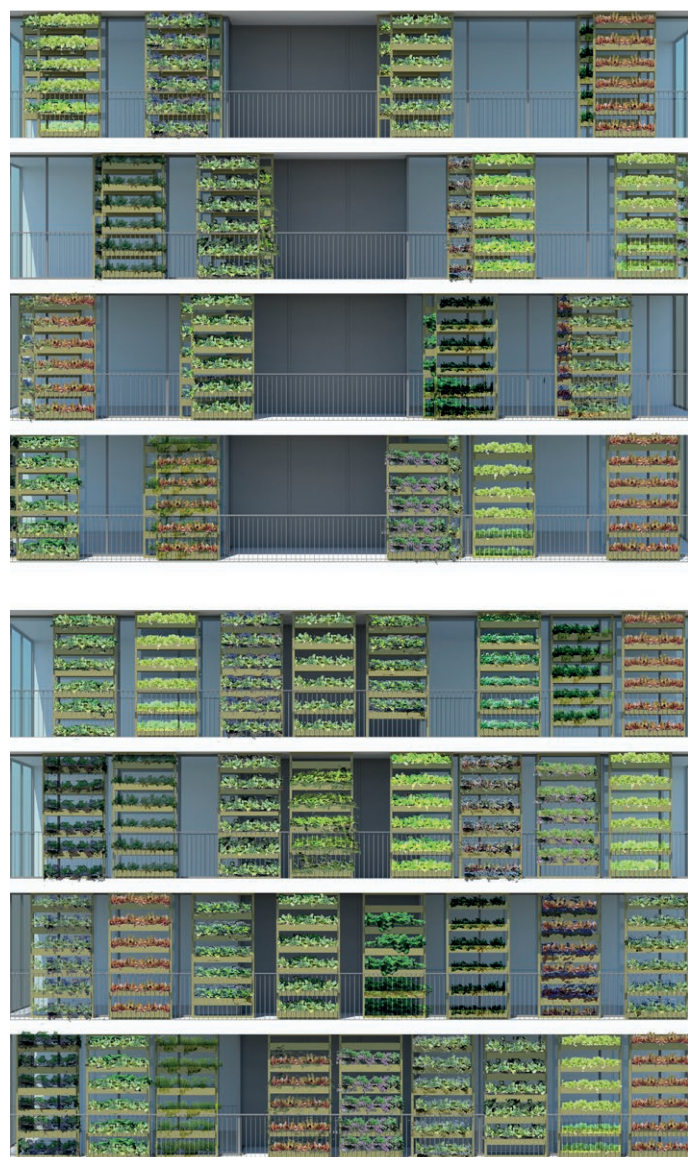
| 04

uomo e natura. Ciò, in particolare, quando la soluzione proposta è funzionale ad attività ad alto consumo di acqua, come nel settore della ristorazione, configurandosi come possibile leva per la riqualificazione degli spazi urbani attraverso pratiche di Zfarming e coltivazione a chilometro zero (Weisser *et al.*, 2022) integrate nelle costruzioni (Figg. 5, 6).

La dimensione multidisciplinare della ricerca trova ragione nei dati. Secondo l'Agenzia Europea per l'Ambiente, infatti, circa tre quarti del totale della CO₂ immessa in atmosfera deriva dai settori dell'energia, dove i consumi degli edifici quotano per un terzo del valore; della rimanente parte, il 10% circa è attribuibile all'agricoltura nelle sue diverse forme⁷. Più di altri, questi due settori sono quindi chiamati a giocare un ruolo chiave nei processi di decarbonizzazione, singolarmente e a maggior ragione a livello di sistema. Zero Mile propone uno scenario di integrazione tra di essi, nelle forme che caratterizzano una piccola scala di intervento, con benefici derivanti dall'utilizzo di componenti biotecnologici e dalla modifica di semplici comportamenti quotidiani; nello specifico: portare ad un cambiamento culturale bottom-up nella percezione del valore delle acque reflue stesse, da un lato, spingere le persone a passare da un'economia dello scarto (lineare) ad un'economia rigenerativa (e circolare), dall'altro. Le successive fasi della sperimentazione sono indirizzate: i) al design dell'elemento tecnologico biofiltro; ii) alla messa a punto del sistema, compresa l'apertura ad altri ambienti domestici⁸; iii) alla sua implementazione in ottica di componente edilizio integrato (coperture e facciate verdi); iv) allo sviluppo di scenari applicativi coerenti con l'innovazione proposta dal progetto Zero Mile ed in continuità con quanto elaborato nella prima fase della ricerca; v) alla costruzione di

behaviours. The project specifically brings about a bottom-up cultural change in the perception of the value of wastewater itself, pushing people to shift from a waste (linear) economy to a regenerative (and circular) economy. The next experimental steps will address: i) the design of the biofilter technology element; ii) the fine-tuning of the system, including opening it to other domestic environments⁸; iii) system implementation in terms of an integrated building component (green roofs and façades); iv) the development of application scenarios in line with the innovation proposed by the Zero Mile project, as a continuation of what was elaborated in the first phase of the research; and v) construction of a prototype to be validated within relevant environments to increase the TRL of the technology⁹. What emerged from both case analysis and experimental results is that a pro-

gressive path of system integration must be considered for the implementation of design solutions, from independent technological solutions to hybrid forms in morphology and building components. If, as demonstrated by the research outputs, technological innovation is achievable, social, cultural, and organisational changes are not as easy to achieve. Indeed, according to the principles of Interaction Design, innovation requires social awareness and engagement to understand impacts and verify consensus. Thus, a significant challenge that future research will have to address is social acceptance of the system by involving people in the development of application solutions (Marres, 2012) in order to move from an abstract concept of recycling to a decentralised technological application closely linked to living environments by encouraging new everyday behaviours. The con-



nection between humans and nature (Kellert and Calabrese, 2015), and the collaboration between different living organisms (Karana *et al.*, 2020) will be additional elements to be emphasised in further research to involve people emotionally. Finally, the contribution of the social sciences will also be instrumental in supporting interdisciplinary collaboration between biologists and designers (Prutzer *et al.*, 2023).

NOTES

¹ Examples include septic tanks and phytoremediation tanks.

² Using the concept of Biophilic design, Kellert and Calabrese (2015) define such synergy as the ability to create "good habitat for people as a biological organism in the modern built environment that advances people's health, fitness and wellbeing", biophilia being: "the human inclination to affiliate with

nature that even in the modern world continues to be critical to people's physical and mental health and wellbeing" (Kellert and Wilson, 1993).

³ Principal investigator Fiammetta Costa.

⁴ Principal investigator Luciana Migliore.

⁵ The use of eco-label detergents and the sourcing of effluent exclusively from the dishwasher excludes the presence of hazardous chemicals for health.

⁶ 102019000004583 and WO 2020/194224 A1.

⁷ See: <https://www.unep.org/resources/report/global-status-report-buildings-and-construction>; <https://www.europarl.europa.eu/topics/it/article/20180301STO98928> (July 2024).

⁸ The expansion to the system of wastewater from the washing machine.

⁹ The possibility of experimenting with adopting bio-receptive materials to replace current industrialised elements used as plant growth supports is strategic.

un prototipo da validare all'interno di ambienti rilevanti per l'incremento del TRL della tecnologia⁹.

Ciò che è emerso sia dall'analisi dei casi sia dai risultati delle sperimentazioni, per l'implementazione delle soluzioni progettuali si dovrà infatti considerare un percorso di progressiva integrazione del sistema, da soluzioni tecnologiche indipendenti a forme ibride per morfologia e componenti costruttivi. Se come dimostrano i risultati della ricerca l'innovazione tecnologica appare raggiungibile, i cambiamenti sociali, culturali e organizzativi non sono altrettanto facili da raggiungere. Secondo i principi del Design dell'Interazione, infatti, l'innovazione richiede consapevolezza e impegno sociale per comprendere gli impatti e verificare il consenso. Un'importante sfida che la ricerca futura dovrà affrontare riguarderà quindi l'accettazione sociale del sistema attraverso il coinvolgimento delle persone nello sviluppo di soluzioni applicative (Marres, 2012) al fine di passare da un concetto astratto di riciclo ad un'applicazione tecnologica decentralizzata e strettamente legata agli ambienti di vita, con lo sviluppo di nuovi comportamenti quotidiani. La connessione tra uomo e natura (Kellert and Calabrese, 2015) e

la collaborazione tra diversi organismi viventi (Karana *et al.*, 2020) sarà un ulteriore elemento da enfatizzare nel prosieguo della ricerca, al fine di coinvolgere anche emotivamente le persone. Il contributo delle scienze sociali sarà infine determinante anche per supportare la collaborazione interdisciplinare tra biologi e designer (Prutzer *et al.*, 2023).

NOTE

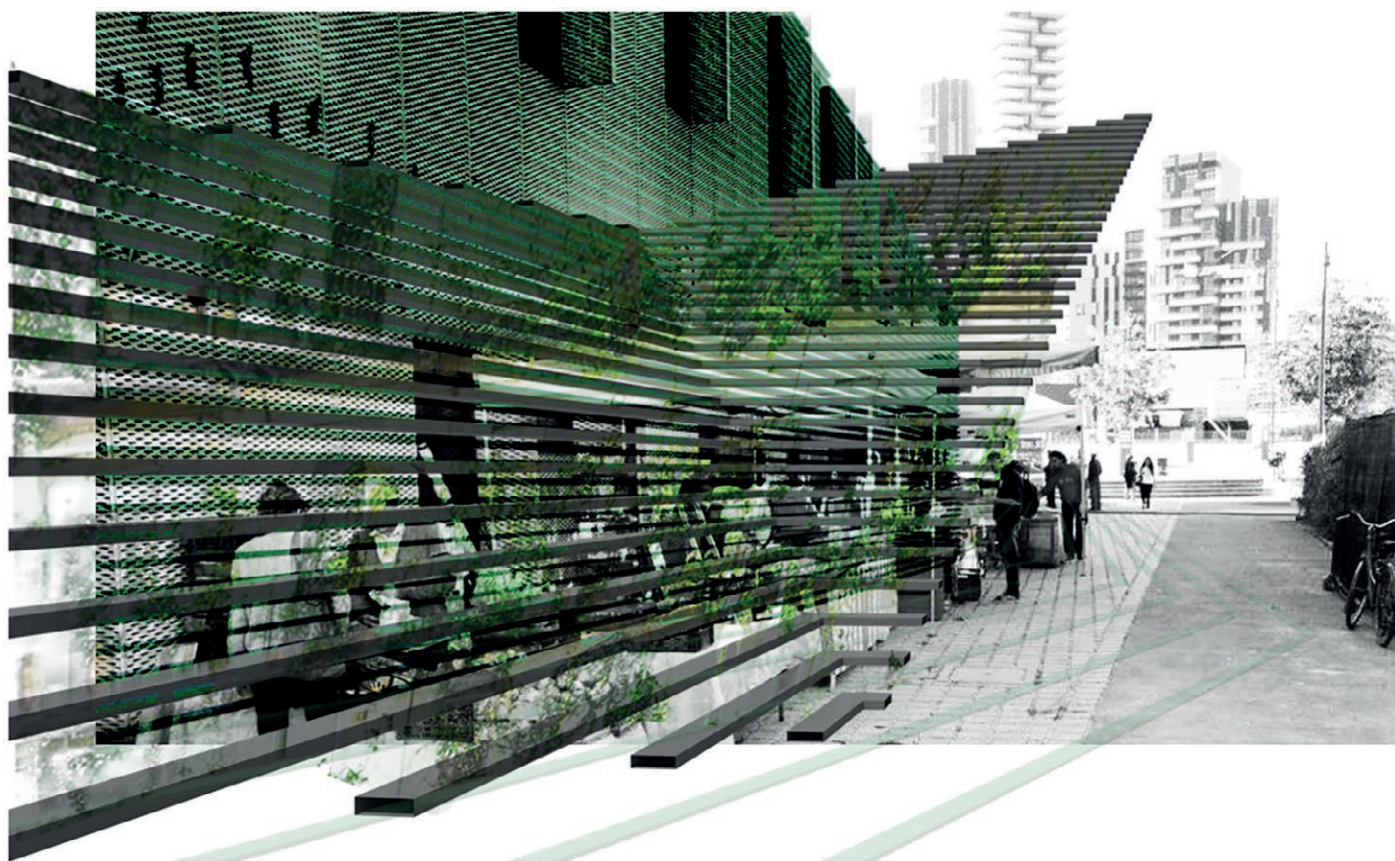
¹ Ne sono esempio le fosse settiche e le vasche per la fitodepurazione.

² Con il concetto di Biophilic design, Kellert e Calabrese (2015) definiscono tale sinergia come la capacità di creare «good habitat for people as a biological organism in the modern built environment that advances people's health, fitness and wellbeing», essendo la biofilia: «the human inclination to affiliate with nature that even in the modern world continues to be critical to people's physical and mental health and wellbeing» (Kellert and Wilson, 1993).

³ Responsabile Fiammetta Costa.

⁴ Responsabile Luciana Migliore.

⁵ Per l'uso di detersivi Eco-label e per la provenienza dei reflui, esclusivamente dalla lavastoviglie, che permette di escludere la presenza di sostanze chimiche pericolose per la salute.



⁶ 102019000004583 e WO 2020/194224 A1.

⁷ <https://www.unep.org/resources/report/global-status-report-buildings-and-construction>; <https://www.europarl.europa.eu/topics/it/article/20180301STO98928> (July 2024).

⁸ L'allargamento al sistema dei reflui prevenienti dalla lavatrice.

⁹ Strategica appare la possibilità di sperimentare l'adozione di materiali *bio-receptive* per sostituire gli attuali supporti per la crescita delle piante.

REFERENCES

- Anderson, J. *et al.* (2008), "Public acceptance of water reuse", in Jimenez, B. and Asano, T. (Eds.), *Water Reuse: An International Survey of current practice, issues and needs*, IWA, London.
- Barbagallo, S. *et al.* (2003), "Wastewater reuse in Italy", in *WS&T*, 43(10): 43-50. Available at: <https://doi.org/10.2166/wst.2001.0576>
- Bichai, F. *et al.* (2018), "Addressing Barriers in the Water-Recycling Innovation System", in *Journal of Cleaner Production*, 171: 97-109. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.062>
- Congestri, R. *et al.* (2019), "The biological filter for an innovative Sustainable Product System to recycle domestic wastewater", in *European Recent Advances in the Microalgae Field*, EuAlgae COST Action, Madrid.
- Costa, F. and Nebuloni, A. (2021), *The Jetsons' kitchen. A zero-mile system for wastewater recycling and cultivation*, FrancoAngeli, Milano.
- Feeny, D. *et al.* (1990), "The Tragedy of the Commons", in *Human Ecology*, 18(1): 1-19. Available at: <https://doi.org/10.1007/BF00889070>
- Gonçalves, A.L. *et al.* (2017), "A review on the use of microalgal consortia for wastewater treatment", in *Algal Research*, 24: 403-415. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.algal.2016.11.008>
- Karana, E. *et al.* (2020), "Living Artefacts: Conceptualizing Livingness as a Material Quality in Everyday Artefacts", in *International Journal of Design*, 14: 37-53.
- Kellert, S. and Wilson, E. (1993), *The Biophilia Hypothesis*, Island Press, Washington.
- Kellert, S. and Calabrese, E. (2015), *The Practice of Biophilic Design*. Available at: <http://www.biophilic-design.com>
- Kunz, N.C. *et al.* (2016), "Drivers for and against municipal wastewater recycling: A review", in *WS&T*, 73(2): 251-259. Available at: <https://doi.org/10.2166/wst.2015.496>
- Marres, N. (2012), *Material Participation: Technology, the Environment and Everyday Publics*, Palgrave Macmillan, London.
- Nebuloni, A. *et al.* (2019), "Zero-kilometre plants production", in Ambrosio, M. and Vezzoli, C. (Eds.), *Designing sustainability for all*, POLI.design, Milano.
- Posadas, E. *et al.* (2013), "Carbon and nutrient removal from centrates and domestic wastewater using algal-bacterial biofilm bioreactors", in *Biore-source Technology*, 139: 50-58. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.04.008>
- Posadas, E. *et al.* (2017), "Microalgae cultivation in wastewaters", in Muñoz R. and González C. (Eds.), *Microalgae-Based Biofuels and Bioproducts*, Elsevier, 67-91.
- Prutzer *et al.*, (2023), "Rethinking responsibility in precision agriculture innovation: lessons from an interdisciplinary research team", in *Journal of Responsible Innovation*, 10(1): 13. Available at: <https://doi.org/10.1080/23299460.2023.2202093>
- Stappers, P.J. and Giaccardi, E. (2017), "Research through Design", in Soegaard, M. and Friis-Dam, R. (Eds.), *The Encyclopedia of Human-Computer Interaction*, The Interaction Design Foundation.
- Volontè, P. and Grana, M. (2021), "What people think: Attitudes towards recycling, recycling for food use, and a prototype eco-dishwasher", in Costa F. and Nebuloni A. (Eds.), *The Jetsons' kitchen*, FrancoAngeli, Milano.
- Walk, H. and Dierich, A. (2014), "Urban agriculture of the future: An overview of sustainability aspects of food production in and on buildings", in *Agriculture and Human Values*, Springer Nature, (31). Available at: <https://doi.org/10.1007/s10460-013-9448-4>
- Weisser, W.W. *et al.* (2023), "Creating ecologically sound buildings by integrating ecology, architecture and computational design", in *People and Nature*, Wiley & Sons, 5: 4-20. Available at: <https://doi.org/10.1002/pan3.10411>
- WWAP, United Nations World Water Assessment Programme (2017), "The United Nations World Water Development Report 2017", in *Wastewater: The Untapped Resource*, Paris, UNESCO. Available at: <https://doi.org/10.18356/df181e6f-en>