

DX.DOI.ORG/10.19199/2021.162.1121-9041.05

Studio sperimentale della depurazione di acque grigie mediante muri verdi

Elisa Costamagna*
 Bianca Raffaelli*
 Silvia Fiore*,**
 Fulvio Boano*,**

* DIATI (Dipartimento di Ingegneria per l'Ambiente, il Territorio e le Infrastrutture), Politecnico di Torino
 ** CleanWaterCenter@PoliTo, Politecnico di Torino

Corresponding author: Fulvio Boano

Experimental study of greywater treatment through green walls. Among nature-based solutions (NBSs), green walls represent a key technology in the urban context because of the low energy demand and of the many ecological and social outcomes. This work presents the results of the experimental study at laboratory scale of the treatment of greywater (e.g. domestic wastewater excluding toilet flushes) through a green wall. It is made of two modular panels (1-set up for this study and 2-in use for 15 months), made of twelve pots arranged on four columns and three rows, and filled with a mix of coconut and perlite and different ornamental plant species. The green wall was fed discontinuously with 96 L/d of synthetic greywater for two months during the winter season. The treatment performances of the two panels were very high about total suspended solids (>87%), biological oxygen demand (>98%) and chemical oxygen demand (~80%), in agreement with literature. Panel 1 exceeded the performances of panel 2 only about total suspended solids (96% vs 87%), probably because of a clogging phenomenon. This study proved the efficiency of green walls towards greywater treatment in challenging experimental conditions, as winter temperature and high hydraulic loading rate.

Keywords: green wall, greywater, reuse, nature-based solution, treatment, filter media.

Le tecnologie basate su processi naturali “proteggono e ristorano ecosistemi naturali o modificati, gestiscono efficacemente e si adattano alle sfide sociali, provocando allo stesso tempo effetti positivi al benessere umano ed alla biodiversità” (IUCN, 2016). Esse sono state identificate dalla Commissione Europea (EC, 2015) come soluzioni efficienti e sostenibili per migliorare la resilienza delle aree urbane, contrastare gli effetti dei cambiamenti climatici, ridurre il consumo di fonti pregiate di acqua e preservare i sistemi naturali. In generale, le tecnologie basate su processi naturali imitano i processi naturali in contesti urbani e in varie applicazioni, con minime richieste di energia e sostanze chimiche e fornendo benefici ecologici e sociali. Uno degli aspetti critici della applicazione di tali tecnologie nel contesto urbano è la mancanza di spazio, pertanto l'uso delle superfici verticali degli edifici e dei

tetti per la costruzione di muri verdi e tetti verdi può rappresentare un'ottima soluzione (Francis & Lorimer, 2011).

Alcuni studi recenti (Boano *et al.*, 2020a; Boano *et al.*, 2020b) hanno dimostrato l'efficacia dei muri verdi rispetto alla depurazione di acque grigie (la quota di acque reflue domestiche che esclude gli scarichi dei WC) e che in Europa, Nord America e Asia corrisponde a circa 0.1 m³/giorno/abitante. Le acque grigie, rispetto alle acque reflue domestiche, sono caratterizzate da concentrazioni di inquinanti inferiori (Boutin and Eme, 2016), e ben si prestano a un trattamento *in situ*, consentendo successivamente il riuso delle acque depurate per usi domestici non potabili (es. scarico dei WC). La letteratura esistente sulla depurazione di acque grigie mediante muri verdi (Pradhan *et al.*, 2019; Boano *et al.*, 2020a) riporta efficienze depurative variabili se-

condo la configurazione e le condizioni ambientali, corrispondenti a rimozioni pari a 7-99% per l'azoto totale, 25-99% per la domanda biologica di ossigeno (BOD₅), 28-97% per la domanda chimica di ossigeno (COD) e 32-100% per l'*Escherichia coli*. Tra le configurazioni esistenti possibili, i muri verdi a flusso verticale, costituiti da pannelli su cui sono montati vasi contenenti specie vegetali e un mezzo poroso filtrante, sono stati particolarmente sperimentati per il trattamento delle acque grigie. In particolare, sono stati messi a confronto mezzi filtranti a base di sabbia (Masi *et al.*, 2016; Fowdar *et al.*, 2017), argilla espansa (Svete, 2012; Masi *et al.* 2016; Prodanovic *et al.*, 2017; Pradhan *et al.*, 2020), fibra di cocco (Masi *et al.* 2016; Prodanovic *et al.*, 2017; Boano *et al.*, 2020b; Pradhan *et al.*, 2020) e perlite (Prodanovic *et al.*, 2017; Boano *et al.*, 2020b; Pradhan *et al.*, 2020). Per quanto riguarda le specie vegetali, esse devono essere selezionate tra quelle in grado di sopportare elevati volumi di acqua e carichi inquinanti relativamente contenuti, salvaguardando l'estetica per favorire l'inserimento dei muri verdi nel contesto urbano (Castellar da Cunha *et al.*, 2018; Pradhan *et al.*, 2019).

Nonostante la presenza in letteratura di vari studi riguardanti l'applicazione di muri verdi al trattamento di acque grigie,

rimangono ancora da esplorare aspetti cruciali a supporto dell'implementazione in piena scala di questa soluzione tecnologica; in particolare, la valutazione delle prestazioni a medio e lungo termine dei muri verdi, la massimizzazione delle prestazioni depurative in presenza di portate elevate e concentrazioni di inquinanti variabili e la minimizzazione della complessità e delle dimensioni della struttura del muro verde. Questo lavoro presenta i risultati dello studio sperimentale delle prestazioni di un muro verde, composto da pannelli modulari, rispetto alla depurazione di acqua grigia artificiale alimentata in condizioni di alto carico idraulico e di temperature invernali. Lo studio confronta le prestazioni di due pannelli, uno appena installato e un altro in uso da circa 15 mesi, mediante un'attività di monitoraggio protratta per 2 mesi (gennaio-febbraio 2021) e analizzando le variazioni dei parametri fisico-chimici in ingresso e in uscita ai pannelli.

2. Materiali e metodi

2.1. Acqua grigia

Al fine di garantire la replicabilità della ricerca, l'acqua grigia è stata preparata adottando una composizione di riferimento (Diaper *et al.*, 2008), con frequenza settimanale. La composizione dell'acqua grigia adottata è la stessa utilizzata in studi precedenti sulla depurazione di acqua grigia con muri verdi (Fowdar *et al.*, 2017; Prodanovic *et al.*, 2017).

2.2. Apparato sperimentale

Il muro verde utilizzato nell'attività di ricerca è costituito da due pannelli metallici modulari da 1 m²

(Fig. 1) montati all'aperto, sui quali sono fissati 12 vasi aventi dimensioni 18 × 18 × 22 cm disposti su 4 colonne e 3 righe, riempiti di un mezzo filtrante (miscela di fibra di cocco e perlite, materiali comunemente utilizzati per la coltivazione di piante ornamentali), e contenenti specie vegetali ornamentali diverse in ogni riga: *Carex morrowii* (prima riga dall'alto), *Hedera helix* (seconda riga), *Lonicera nitida* (terza riga). Ciascuna colonna costituisce un sistema a flusso verticale indipendente alimentato in modo discontinuo. L'acqua grigia, contenuta in un serbatoio da 1.5 m³ periodicamente miscelato da una pompa automatica, viene fornita con un sistema automatico di irrigazione a goccia a ciascuna colonna

secondo cicli con periodicità oraria (4 L/h erogati per 15 minuti, 45 minuti di pausa), corrispondenti a una portata giornaliera complessiva alimentata a ciascun pannello di 96 L/giorno, equivalente alla portata giornaliera di acqua grigia prodotta da 1 abitante. Le precipitazioni giornaliere nel periodo della ricerca (gennaio-febbraio 2021) sono state trascurabili rispetto al volume giornaliero di acqua grigia fornito al sistema. Il muro verde è costituito da due pannelli: uno avviato appositamente per la ricerca (pannello 1) ed uno in uso da circa 15 mesi (pannello 2). Per ciascun pannello sono state analizzate tre colonne, da intendersi come repliche della medesima configurazione.



Fig. 1 – Struttura e schema di funzionamento di un pannello modulare.

2.3. Campionamento e procedure analitiche

Le operazioni di raccolta dei campioni in uscita da ogni colonna e dell'acqua grigia alimentata ai pannelli sono state svolte nel periodo gennaio-febbraio 2021, per un totale di 6 date di campionamento e 42 campioni raccolti e analizzati. Le analisi dei campioni hanno riguardato: temperatura, pH, conducibilità elettrica (CE) e ossigeno disciolto (OD) mediante una sonda portatile WTW Multi 3320 dotata di appositi sensori; solidi sospesi totali (SST) mediante filtrazione su membrane di cellulosa avente ritenzione 0.45 μm ; domanda chimica di ossigeno (COD) mediante kit Nanocolor COD 1500 HR, un termoreattore VELD COD ECO 16 e un fotometro AL450 Multidirect; domanda biologica di ossigeno (BOD_5) mediante un incubatore VELD FOC 215E.

3. Risultati e discussione

La campagna di monitoraggio si è svolta nel periodo invernale, e conseguentemente sono stati riscontrati valori di temperatura relativamente bassi per tutti i campioni di acqua analizzati. La temperatura media dell'acqua grigia è stata pari $7.6 \pm 2.6^\circ\text{C}$ mentre i campioni in uscita dai pannelli hanno mostrato temperature inferiori ($6.0 \pm 3.2^\circ\text{C}$ e $5.6 \pm 2.7^\circ\text{C}$), in quanto il serbatoio dell'acqua grigia è caratterizzato da un'inerzia termica maggiore rispetto al muro verde. Durante il passaggio attraverso il muro verde il pH dell'acqua è leggermente aumentato, passando da valori sostanzialmente neutri (7.3 ± 0.2) per l'acqua grigia a valori lievemente alcalini (7.8 ± 0.2 per entrambi i pannelli), indice di un processo di progressivo equilibrio dell'acqua con il terreno dei vasi. Per quanto riguarda la con-

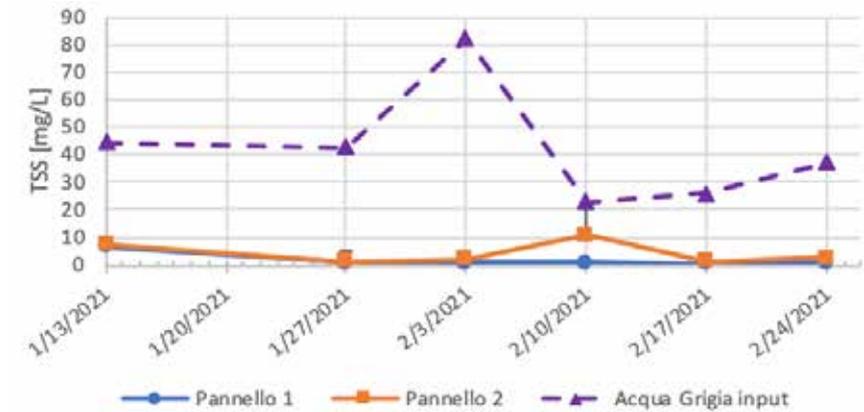


Fig. 2 – Andamento dei solidi sospesi totali (SST) nel periodo di monitoraggio.

ducibilità elettrica, non sono state riscontrate differenze significative tra i valori dell'acqua grigia ($699 \pm 10 \mu\text{S/cm}$) e quelli in uscita dai pannelli ($699 \pm 12 \mu\text{S/cm}$ e $707 \pm 12 \mu\text{S/cm}$, rispettivamente per i pannelli 1 e 2), suggerendo l'assenza di fenomeni significativi di rilascio di sali da parte del mezzo filtrante.

Considerando l'andamento dei SST (Fig. 2), nel periodo di campionamento le concentrazioni nell'acqua grigia si sono attestate su un valore medio pari a $42.4 \pm 21.3 \text{ mg/L}$, e sono state caratterizzate da alcune variazioni (in particolare nel campionamento del 03/02/2021), presumibilmente legate a processi di sedimentazione e ri-sospensione all'interno del serbatoio. Nonostante le variazioni nelle caratteristiche dell'acqua grigia, le concentrazioni di SST in

uscita da entrambi i pannelli sono decisamente ridotte, con valori lievemente inferiori per il pannello 1 ($1.7 \pm 2.4 \text{ mg/L}$) rispetto al pannello 2 ($4.2 \pm 3.9 \text{ mg/L}$); i valori maggiori per il secondo pannello sono soprattutto legati a un episodio di intasamento – e successivo rilascio di solidi – del dreno di un singolo vaso verificatosi il 10/02/2021. L'analisi delle serie temporali misurate ha fornito valori di efficienza di trattamento pari a $96 \pm 3\%$ (pannello 1) e $87 \pm 17\%$ (pannello 2). Il pannello più recente sembra quindi mostrare una maggiore efficacia nella rimozione dei solidi sospesi, sebbene tale differenza sia principalmente legata all'episodio di intasamento del 10/02/2021 precedentemente descritto.

Prendendo in esame l'andamento del BOD_5 (Fig. 3), ad eccezione del 13/01/2021 (il cui valore è sta-

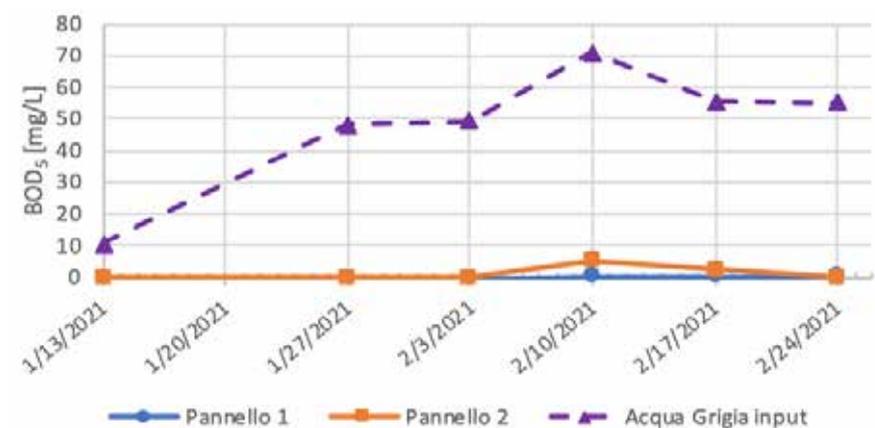


Fig. 3 – Andamento della domanda biologica di ossigeno (BOD_5) nel periodo di monitoraggio.

to sottostimato per un problema tecnico ed è stato quindi escluso dall'analisi) la concentrazione di BOD₅ nell'acqua grigia è stata piuttosto stabile (55.7 ± 9.0 mg/L) durante tutto il periodo di monitoraggio. Entrambi i pannelli hanno mostrato valori di concentrazione finali estremamente bassi, pari a 0.2 ± 0.2 mg/L e 1.3 ± 2.2 mg/L. La capacità di rimozione del BOD₅ è stata molto elevata, con differenze minime tra i valori di efficienza di rimozione del primo pannello ($99.7 \pm 0.4\%$) e del secondo ($98.1 \pm 3.2\%$). Questi risultati sono coerenti con i valori di efficienza di rimozione del BOD₅ riportati in letteratura, pari a 44-97% (Masi *et al.*, 2016; Prodanovic *et al.*, 2017; Boano *et al.*, 2020b) e dimostrano le ottime prestazioni dei muri verdi anche in condizioni invernali.

Per quanto riguarda l'andamento del COD (Fig. 4), l'acqua grigia è stata caratterizzata da modeste variazioni di concentrazione, che si è mantenuta stabile intorno a un valore medio di 116.8 ± 18.5 mg/L. Le concentrazioni in uscita dal muro verde si sono attestate su valori più bassi e sia per il primo (24.3 ± 5.3 mg/L) che per il secondo pannello (20.9 ± 1.5 mg/L). Si noti tuttavia che per le concentrazioni in uscita sono stati talvolta riscontrati valori inferiori al limite di rilevabilità (< 20 mg/L), e che tali valori sono stati cautelativamente

considerati pari ai 20 mg/L nell'analisi dei dati; questa scelta ha comportato una sovrastima delle concentrazioni in uscita dal muro verde e una sottostima dell'efficienza del trattamento. Seppure con queste cautele, i risultati indicano che entrambi i pannelli sono stati in grado di rimuovere efficacemente il COD; le differenze tra le efficienze di rimozione del primo ($79 \pm 2\%$) e del secondo pannello ($82 \pm 3\%$) possono essere considerate trascurabili, e i valori ottenuti sono in linea con i valori tipici (46-95%) riscontrabili in letteratura (Gattringer *et al.*, 2016; Jin *et al.*, 2018; Boano *et al.*, 2020b; Prodanovic *et al.*, 2020).

4. Conclusioni

Il presente lavoro ha analizzato l'utilizzo di un muro verde per il trattamento di acque grigie in condizioni invernali di temperatura e carico idraulico elevato, entrambe particolarmente impegnative per i processi di trattamento; in particolare, sono state confrontate le prestazioni di due pannelli entrati in funzione in momenti differenti, a circa 15 mesi di distanza. I risultati hanno dimostrato le ottime potenzialità del muro verde per il trattamento delle acque grigie, con valori medi di efficienza di rimozio-

ne molto elevati per quanto riguarda i solidi sospesi totali (> 87%), il BOD₅ (> 98%) e il COD (> 87%), e modeste fluttuazioni nel tempo.

Il confronto tra i risultati dei due pannelli ha indicato una lieve perdita di efficienza nella capacità di rimozione dei solidi sospesi totali per il pannello in funzione da due anni ($87 \pm 17\%$) rispetto a quello nuovo ($96 \pm 3\%$), verosimilmente dovuta a una maggiore frequenza di fenomeni di intasamento. La prosecuzione della campagna di monitoraggio permetterà di verificare la persistenza di tali problemi, che potrebbero essere mitigati mediante miglioramenti del sistema di drenaggio o con l'utilizzo di substrati differenti che portino a un minore cessione di materiali fini. Per quanto riguarda le sostanze organiche, non sono state riscontrate differenze significative tra i due pannelli per la rimozione di BOD₅ e COD, confermando l'elevato potenziale dei muri verdi per il trattamento delle acque grigie.

Bibliografia

- Boano, F., Caruso, A., Costamagna, E., Ridolfi, L., Fiore, S., Demichelis, F., Galvão, A., Piscoiro, J., Rizzo, A., Masi, F. 2020a. *A Review of Nature-Based Solutions for Greywater Treatment: Applications, Hydraulic Design, and Environmental Benefits*. *Science of the Total Environment*, 711, 134731, doi:10.1016/j.scitotenv.2019.134731
- Boano, F., Caruso, A., Costamagna, E., Fiore, S., Demichelis, F., Galva, A., Piscoiro, J., Rizzo, A., Masi, F. 2020b. *Assessment of the Treatment Performance of an Open-Air Green Wall Fed with Graywater under Winter Conditions*. *ES&T Water*, in press, <https://doi.org/10.1021/acsestwater.0c00117>
- Boutin, C., Eme, C., 2016 *Domestic Wastewater Characterization by Emission Source*. 13th IWA Specialized Con-

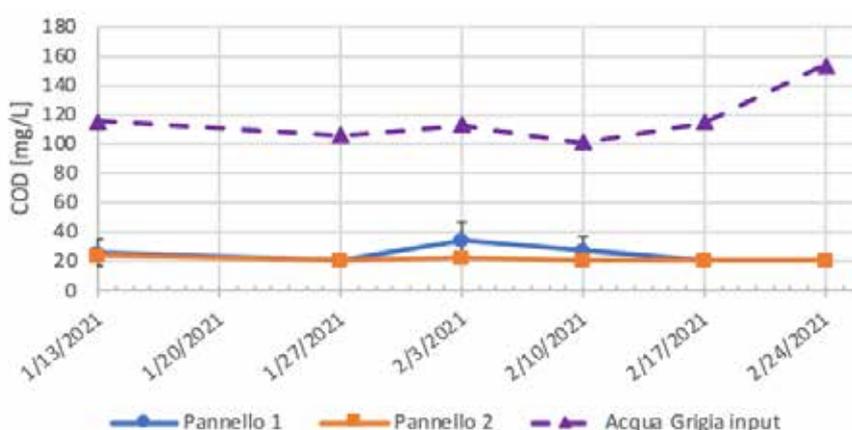


Fig. 4 – Andamento della domanda chimica di ossigeno (COD) nel periodo di monitoraggio.

- ference on Small Water and Wastewater System, Athens, Greece.
- Castellar da Cunha, J.A., Arias, C.A., Carvalho, P., Rysulova, M., Canals, J.M., Pérez, G., Bosch Gonzalez, M., Ferreras Moratò, J., 2018. "WETWALL" – an Innovative Design Concept for the Treatment of Wastewater at an Urban Scale. *Desalination and Water Treatment*, 109, 205-220, <https://doi.org/10.5004/dwt.2018.22143>
- Diaper, C., Toifl, M., Storey, M., 2008. Greywater technology testing protocol, s.l.: CSIRO: Water for a Healthy Country National Research Flagship.
- European Commission, 2015. *Towards an EU Research and Innovation Policy Agenda for Nature-Based Solutions & Re-Naturing Cities*. Directorate-General for Research and Innovation, doi: 10.2777/765301
- Fowdar, H.S., Hatt, B.E., Breen, P., Cook, P.L.M., Deletic, A., 2017. *Designing Living Walls for Greywater Treatment*. *Water Research*, 110, 218-232, <https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.12.018>
- Francis, R.A., Lorimer, J., 2011. *Urban reconciliation ecology: The potential of living roofs and walls*. *Journal of Environmental Management*, 92(6), 1429-1437, doi: 10.1016/j.jenvman.2011.01.012
- Gattringer, H., Claret, A., Radtke, M., Kisser, J., Zraunig, A., Rodriguez-Roda, I., Buttiglieri, G., 2016. *Novel Vertical Ecosystem for Sustainable Water Treatment and Reuse in Tourist Resorts*. *International Journal of Sustainable Development and Planning*, 11 (3), 263–274, doi: 10.2495/SDP-V11-N3-263-274
- International Union for Conservation of Nature (IUCN), 2016. *Defining Nature-based Solutions*. WCC-2016-Res-069-EN.
- Jin, Z., Xie, X., Zhou, J., Bei, K., Zhang, Y., Huang, X., Zhao, M., Kong, H., Zheng, X., 2018. *Blackwater Treatment Using Vertical Greening: Efficiency and Microbial Community Structure*. *Bioresource Technology*, 249, 175-181, doi:10.1016/j.biortech.2017.09.176
- Masi, F., Bresciani, R., Rizzo, A., Edathoot, A., Patwardhan, N., Panse, D., Langergraber, G., 2016. *Green Walls for Greywater Treatment and Recycling in Dense Urban Areas: A Case-Study in Pune*. *Journal of Water, Sanitation and Hygiene for Development*, 6 (2), 342-347, doi:10.2166/washdev.2016.019
- Pradhan, S., Al-Ghamdi, S.G., Mackey, H.R., 2019. *Greywater recycling in buildings using living walls and green roofs: a review of the applicability and challenges*. *Science of the Total Environment*, 652, 330-344, doi:10.1016/j.scitotenv.2018.10.226
- Pradhan, S., Helal, M.I., Al-Ghamdi, S.G., Macjey, H.R., 2020. *Performance evaluation of various individual and mixed media for greywater treatment in vertical nature-based systems*. *Chemosphere*, 245, doi: 10.1016/j.chemosphere.2019.125564
- Prodanovic, V., Hatt, B., McCarthy, D., Zhang, K., Deletic, A., 2017. *Green Walls for Greywater Reuse: Understanding the Role of Media on Pollutant Removal*. *Ecological Engineering*, 102, 625-635, doi:10.1016/j.ecoleng.2017.02.045
- Prodanovic, V., Hatt, B., McCarthy, D., Deletic, A., 2020. *Green Wall Height and Design Optimisation for Effective Greywater Pollution Treatment and Reuse*. *Journal of Environmental Management*, 261, 110173, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110173>
- Svete, L.E., 2012. *Vegetated Greywater Treatment Walls: Design Modifications for Intermittent Media Filters*. Norwegian University of Life Sciences.