

## La fitodepurazione: tipologie impiantistiche, vegetazione, esempi applicativi

Maurizio Borin<sup>1\*</sup>, Giuseppe Luigi Cirelli<sup>2</sup> e Alessia Marzo<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Dipartimento di Agronomia, Animali, Alimenti, Risorse naturali e Ambiente (DAFNAE), Università di Padova

<sup>2</sup> Dipartimento di Agricoltura, Alimentazione e Ambiente (Di3A) - Università di Catania

Ricezione: 1 novembre 2014; Accettazione: 16 marzo 2015

### Wetland treatments: systems, vegetation, examples

**Abstract.** Constructed wetland is a suitable technology mainly diffused for treating wastewater coming from small and medium municipalities and from decentralized settlements (holiday resorts, shopping centers) where high variability in wastewater flow and quality occurs. In addition they are increasingly used to treat agricultural and animal wastewater, landfill leachates, industrial wastewater, runoff. The paper presents the features of the different phytoremediation systems, the role of the vegetation and the characteristics of the most interesting species. Examples of some systems installed in Southern and Northern Italy are here presented. In particular a constructed wetland for wastewater treatment of IKEA store in Catania allowed to obtain water always satisfying the limits imposed by the Italian Legislation to discharge the wastewater in surface water bodies. Similarly, satisfactory performance was obtained also by floating wetland systems installed in different locations of North Italy.

**Key words:** Subsurface horizontal flow systems, Subsurface vertical flow systems, surface flow systems, floating systems, removal efficiency.

### Introduzione

Il notevole progresso tecnologico conseguito nel settore della depurazione delle acque reflue ha consentito la messa a punto di sistemi di trattamento sempre più avanzati ed in grado di rimuovere un notevole numero di inquinanti. Tuttavia, il trattamento delle acque reflue rappresenta tuttora, soprattutto per i piccoli e medi insediamenti (ovvero quelli in cui il numero degli Abitanti Equivalenti -AE- è compreso tra 500 e 5.000), un rilevante problema economico e gestionale, anche in relazione ai vincoli sempre più restrittivi allo scarico imposti dalla direttiva dell'Unione

Europea n.271 del 21 maggio 1991, recepita per la prima volta a livello nazionale con il D.Lgs. 152/99 e successivamente dal D.Lgs 152/2006.

Generalmente per le piccole e medie comunità, la causa del mancato funzionamento ovvero della scarsa efficienza depurativa degli impianti di depurazione dipende dalla mancanza di personale qualificato e dagli elevati oneri di esercizio e manutenzione. In Italia, in molti casi sono state utilizzate tecnologie di trattamento non idonee al contesto socio-economico e alle caratteristiche qualitative e quantitative delle acque reflue, privilegiando l'utilizzo di tecnologie di tipo tradizionale o intensivo (fanghi attivi, dischi biologici, ecc.) che a causa del loro contenuto tecnologico, sempre più spinto, sono caratterizzate da alti costi di gestione e manutenzione (Cirelli, 2003; Barbagallo *et al.*, 2012). Negli impianti di depurazione di tipo tradizionale o intensivo, infatti, i tempi di reazione sono generalmente dell'ordine di qualche ora e lo spazio necessario alla loro costruzione è inferiore a 0,5 m<sup>2</sup>/AE; in tali impianti occorre disporre di apparecchiature elettro-meccaniche con un notevole consumo energetico ed un elevato costo di esercizio e manutenzione. Per tale motivo, come già avviene da qualche decennio in numerosi altre nazioni, particolare interesse avrebbe in Italia l'applicazione di trattamenti naturali come la fitodepurazione, il lagunaggio, l'accumulo in serbatoi (Barbagallo *et al.*, 2001; Cirelli, 2003). Tali trattamenti vengono denominati anche estensivi in quanto i processi di depurazione di tipo chimico-fisico e biologico richiedono:

- lunghi tempi (da 1-2 giorni fino a qualche decina di giorni);
- estese superfici (da 1-2 m<sup>2</sup>/AE fino a 10 m<sup>2</sup>/AE).

Recentemente il mondo scientifico ha riscoperto le potenzialità depurative delle zone umide naturali nell'ottica di sviluppare i sistemi di fitodepurazione. La fitodepurazione è una tecnica naturale di rimozione degli inquinanti che si basa sul principio di riprodurre gli stessi processi fisici, chimici e biologici di autodepurazione del sistema suolo-piante-microrganismi che

\* maurizio.borin@unipd.it

caratterizzano gli habitat acquatici e le zone umide presenti in natura.

Nella maggioranza dei casi la fitodepurazione è un trattamento biologico secondario o terziario, che necessita di trattamenti a monte la cui tipologia dipende dalle caratteristiche del refluo da trattare e la cui funzione è di rendere il refluo adatto a essere depurato in ambiente naturale. Nel caso di reflui civili il pre-trattamento può essere limitato a una linea composta da condensa grassi e vasca Imhoff o equivalente; in altri casi gli impianti potranno essere più complessi.

In Italia le prime applicazioni di questa tecnologia di trattamento delle acque reflue risalgono a circa venti anni fa e riguardano principalmente il settore dei reflui domestici; solo in tempi più recenti sono stati realizzati impianti caratterizzati da elevata capacità di depurazione, utilizzabili ad esempio per il trattamento di reflui agro-industriali (es. cantine, caseifici, sale di mungitura), percolati di discarica, runoff stradale (Masi e Martinuzzi, 2007). A oggi si stima che siano attivi oltre 1.000 impianti di fitodepurazione per reflui civili, sia come unico trattamento che come finissaggio, alcune decine di impianti per disinquinamento di reflui di cantina, alcune decine di aree umide a flusso superficiale per depurare acque di runoff o drenaggio agricolo (Borin *et al.*, 2014).

### Sistemi di fitodepurazione

I sistemi di fitodepurazione possono essere classificati in funzione della tipologia di macrofite utilizzate (Kadlec e Wallace, 2009; Fonder e Headley, 2013):

- *sistemi a macrofite galleggianti*: vengono utilizzate delle piante acquatiche che si sviluppano sulla superficie liquida dei bacini in cui vengono immerse le acque reflue;
- *sistemi a macrofite radicate sommerse*: si fa ricorso ad essenze vegetali radicate al fondo del bacino e con il fusto totalmente immerso nelle acque reflue;
- *sistemi a macrofite radicate emergenti*: vengono impiegate essenze vegetali radicate al fondo ed aventi l'apparato radicale, ed eventualmente solo parte dello stelo, immerso nelle acque reflue.

Un'ulteriore classificazione dei sistemi di fitodepurazione è quella effettuata sulla base del regime di funzionamento idraulico:

- sistemi a flusso superficiale;
- sistemi a flusso subsuperficiale.

I sistemi di fitodepurazione a flusso superficiale (FWS) trattano le acque reflue in bacini o canali a superficie libera su suolo permanentemente saturo. In tali sistemi possono essere utilizzate macrofite galleg-

gianti, macrofite radicate sommerse, macrofite radicate emergenti o, in sistemi sperimentali, anche microfite. Il sistema a microfite è costituito da stagni aerobici che presentano, in sospensione nelle acque reflue, specie vegetali di ridotto sviluppo (unicellulari o pluricellulari), rappresentate quasi totalmente da alghe microscopiche.

Nei sistemi a flusso subsuperficiale, invece, le acque reflue scorrono attraverso un letto filtrante che costituisce il supporto per le radici delle macrofite radicate emergenti. Il livello idrico viene mantenuto sempre al di sotto della superficie del substrato nel quale si vengono a creare condizioni sature e/o insature. Tali sistemi possono essere a flusso orizzontale o verticale (ISPRA, 2012).

Le tipologie illustrate possono essere diversamente combinate in un unico impianto, definito ibrido o multistadio, allo scopo di ottenere una riduzione delle aree superficiali necessarie al raggiungimento degli obiettivi depurativi o per migliorare alcuni processi come l'abbattimento dell'azoto e del fosforo.

### Sistemi a flusso superficiale (*Free Water Surface - FWS*)

I sistemi di fitodepurazione a flusso superficiale sono detti anche "a superficie libera" o, con terminologia anglosassone, *free water surface* (FWS). Tali sistemi sono costituiti da bacini, di forma allungata, aventi una profondità variabile in relazione alle macrofite adottate ed ai tipi di trattamento (secondario o terziario) per i quali vengono utilizzati (Kadlec e Wallace, 2009; Fonder e Headley, 2013).

I sistemi FWS, i cui meccanismi di rimozione riproducono i processi depurativi delle aree umide naturali, vengono alimentati con un flusso in continuo e le acque reflue immerse nel bacino risultano direttamente a contatto con l'atmosfera (fig. 1).

Gli inconvenienti derivanti dall'impiego di tali impianti sono connessi alla possibile diffusione nell'atmosfera di odori sgradevoli e alla proliferazione di insetti. Tuttavia lo sviluppo degli insetti può essere efficacemente contenuto mediante l'introduzione all'interno dei bacini di animali insettivori, quali pesci e rane, che si nutrono delle larve presenti sul pelo libero. In particolare, in ambienti prevalentemente aerobici, risulta particolarmente diffusa l'introduzione di pesci *Gambusia* (*Gambusia affinis*) efficienti predatori di larve di zanzara. Anche la colonizzazione degli impianti di fitodepurazione da parte di uccelli selvatici può risultare un elemento efficace ai fini della riduzione della proliferazione degli insetti. Ad Arcata, California, è stata osservata una ridotta pre-

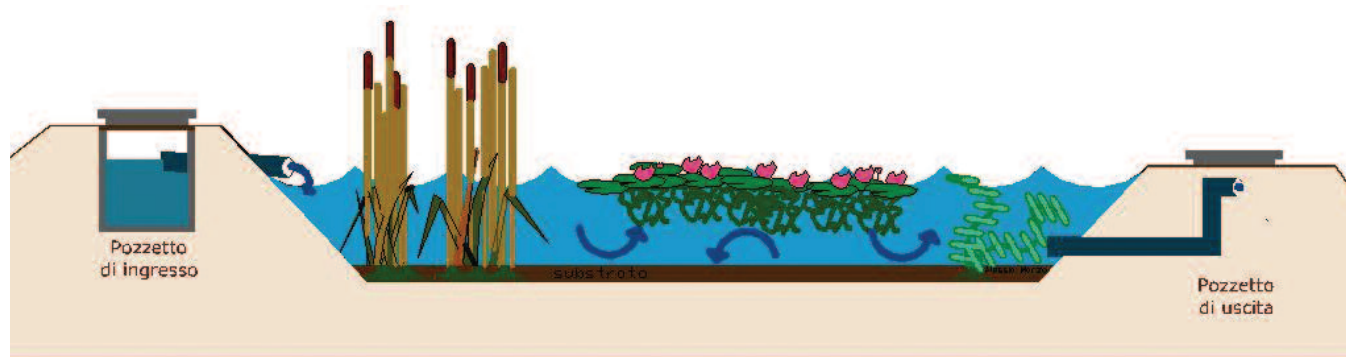


Fig. 1 - Sistema a flusso superficiale a macrofite radicate emergenti (FWS) (Barbagallo *et al.*, 2012).

Fig. 1 - Free Water Surface system (FWS) (Barbagallo *et al.*, 2012).

senza di larve in concomitanza con un'elevata concentrazione di rondini.

### Sistemi a flusso superficiale a macrofite galleggianti

I sistemi a flusso superficiale a macrofite galleggianti consistono in uno o più bacini con una profondità variabile da 0,1 m a 0,6 m e con il fondo impermeabilizzato da argilla o geomembrane (Kadlec e Wallace, 2009; Fonder e Headley, 2013).

Le piante utilizzate hanno un apparato radicale che si sviluppa nella massa liquida ed i loro tessuti fotosintetizzanti, espandendosi sulla superficie, ombreggiano quasi completamente il liquido sottostante e impediscono lo sviluppo di alghe (Brix, 1998). Questo fenomeno favorisce l'instaurarsi di condizioni anaerobiche nella maggior parte dell'altezza della colonna d'acqua ad eccezione della zona superficiale, dove perdurano condizioni aerobiche per il trasferimento di ossigeno dai tessuti fotosintetici alle radici e da queste alle acque reflue (ISPRA, 2012).

Il principale limite dei sistemi a macrofite galleggianti è rappresentato dall'elevata frequenza con la quale è necessario rimuovere le piante; ciò implica una notevole richiesta di manodopera e problemi di smaltimento della biomassa prodotta.

### Sistemi a flusso superficiale a macrofite radicate

Nei sistemi FWS a macrofite radicate vengono di solito adoperate insieme macrofite emergenti e sommerse. È rara l'applicazione di sole macrofite sommerse, mentre i sistemi a flusso superficiale con sole macrofite emergenti trovano un moderato utilizzo.

Gli impianti a macrofite radicate sono costituiti da bacini il cui livello idrico varia tra 0,1 e 1 m in funzione delle caratteristiche del liquame da trattare e del tipo di essenza vegetale adottata. Le profondità minori garantiscono un'adeguata presenza di ossigeno

lungo tutta la colonna d'acqua, mentre con altezze maggiori si vengono a stabilire condizioni anaerobiche sul fondo.

Il fondo del bacino, opportunamente impermeabilizzato, viene ricoperto con materiale di diversa natura (sabbia, pietre, ghiaia, argilla), per consentire la radicazione delle piante. L'altezza del medium in grado di permettere il normale sviluppo delle radici e rizomi delle macrofite più comunemente utilizzate è di 0,3-0,4 m; tale altezza è in grado di impedire anche la possibile perforazione, da parte delle radici, dell'eventuale copertura sintetica (Kadlec e Wallace, 2009; Fonder e Headley, 2013).

Nei sistemi a FWS con macrofite radicate, al contrario di quanto accade in quelli a macrofite galleggianti, la superficie del bacino risulta quasi completamente a contatto con l'atmosfera favorendo così l'azione battericida svolta dalla radiazione solare negli strati superficiali della colonna d'acqua.

Inoltre, la presenza della vegetazione all'interno della massa liquida, rallenta il flusso delle acque reflue aumentando così il tempo di contatto tra le piante e le acque reflue e favorendo la sedimentazione dei solidi sospesi e lo svolgimento dei processi biologici. In tal modo viene anche limitata la velocità del vento vicino alla superficie delle acque reflue riducendo la turbolenza idraulica che ostacola il processo di sedimentazione. Nel complesso, dunque, i sistemi a macrofite radicate presentano, rispetto a quelli a macrofite galleggianti, una maggiore efficienza depurativa che peraltro risulta essere pressoché costante durante tutto l'anno grazie alla sopravvivenza, nella stagione fredda, delle radici e rizomi sui quali si sviluppano i batteri (ISPRA, 2012).

Un ulteriore vantaggio è rappresentato dalla minore frequenza di rimozione della biomassa. Lo sfalcio e/o il taglio delle macrofite viene infatti effettuato mediamente con frequenza annuale, principalmente per rinnovare la vegetazione ed evitare che i residui vegetali, adagiandosi sul fondo del bacino, reintrodu-

cano nel ciclo di biodegradazione gli elementi inquinanti da loro assorbiti.

### Sistemi a flusso subsuperficiale (*Subsurface Flow - SSF*)

I sistemi a flusso subsuperficiale, indicati in letteratura internazionale con il termine *subsurface flow* (SSF), rappresentano il sistema di fitodepurazione maggiormente utilizzato in Europa (Kadlec e Wallace, 2009; Fonder e Headley, 2013).

La principale differenza fra i sistemi SSF e quelli FWS è rappresentata dalla presenza, all'interno dei bacini, di un materiale inerte di riempimento che ha funzione di supporto su cui si sviluppano le radici delle macrofite radicate. Tale letto filtrante presenta, solitamente, altezze variabili da 0,2 a 0,8 m a seconda del tipo di macrofite adottate e della profondità dei loro apparati radicali.

Il letto filtrante, all'interno del quale defluiscono le acque reflue che non pervengono mai direttamente in contatto con l'atmosfera, riduce o elimina del tutto i problemi connessi alla presenza di cattivi odori e alla proliferazione di insetti. Inoltre, l'efficienza depurativa ottenuta permane elevata anche nei mesi invernali grazie all'inerzia termica del medium ed alla copertura vegetale. D'altro canto, però, vengono a mancare gli effetti benefici della radiazione solare per la rimozione dei microrganismi e viene ostacolato lo scambio di ossigeno con l'atmosfera limitandone di fatto la presenza alla sola rizosfera (ISPRA, 2012).

Infine, la frequenza di rimozione della massa vegetale risulta essere notevolmente ridotta (al massimo una volta l'anno) contenendo così il problema dello smaltimento della biomassa prodotta.

Nei sistemi SSF vengono utilizzate le stesse essenze vegetali impiegate nei sistemi a flusso superficiale

con macrofite radicate. La specie in assoluto più impiegata risulta essere la *Phragmites australis*, grazie principalmente alla minore manutenzione richiesta, all'elevato tasso di crescita e alle maggiori profondità raggiunte dall'apparato radicale rispetto alla quasi totalità delle altre macrofite adottate. Quest'ultima caratteristica consente un più efficace trasferimento di ossigeno al substrato.

### Sistemi a flusso subsuperficiale orizzontale (*H-SSF*)

Nei sistemi a flusso subsuperficiale orizzontale le acque reflue pretrattate sono distribuite uniformemente su tutta la larghezza della vasca attraverso una tubazione di distribuzione interrata posta nella sezione trasversale di ingresso del letto perpendicolarmente alla direzione del flusso. Le acque reflue vengono immerse nel sistema con un flusso in continuo e percorrono il letto filtrante in direzione prevalentemente orizzontale per tutta la sua lunghezza fino a giungere nella sezione terminale dove vengono raccolte per mezzo di una tubazione forata posizionata sul fondo e convogliate in un pozzetto di uscita (fig. 2). In tale pozzetto vengono collocate le strutture di regolazione del livello idrico del letto filtrante costituite, generalmente, da tubazioni flessibili regolabili in altezza (Kadlec e Wallace, 2009; Fonder e Headley, 2013; Barbagallo *et al.*, 2011).

Il letto filtrante è costituito da materiale inerte a granulometria costante, ad eccezione della zona di ingresso e quella di uscita delle acque reflue dove vengono posizionati degli inerti di maggiore pezzatura per evitare la formazione di percorsi preferenziali da parte del liquame. Lungo il percorso compiuto dalle acque reflue attraverso il medium gli inquinanti vengono rimossi da una combinazione di processi

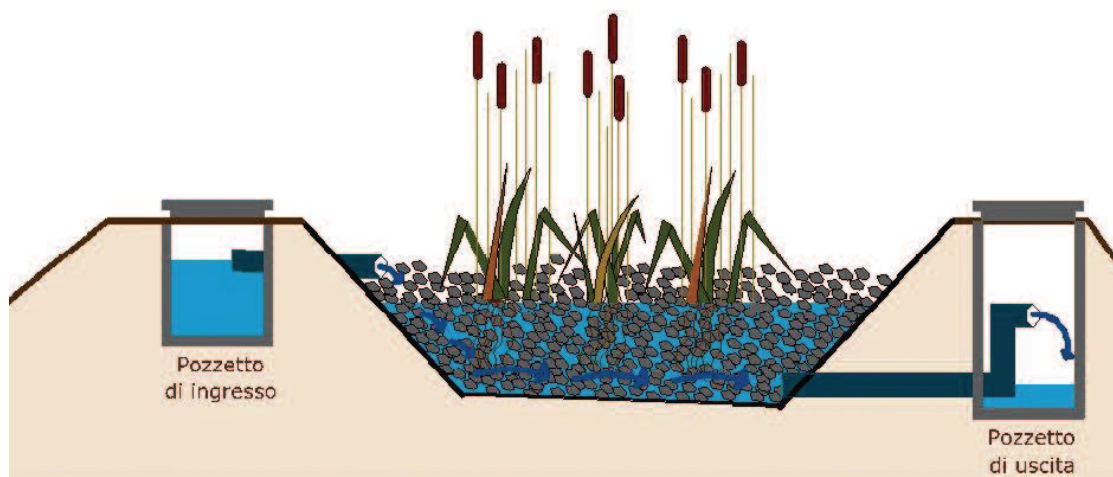


Fig. 2 - Sistema a flusso subsuperficiale orizzontale (H-SSF) (Barbagallo *et al.*, 2012).  
 Fig. 2 - Horizontal SubSurface Flow system (H-SSF) (Barbagallo *et al.*, 2012).



fisici, chimici, e biologici che comprendono la sedimentazione, la precipitazione, l'adsorbimento sulle particelle del suolo, l'assimilazione da parte dei tessuti delle piante e i processi microbici (ISPRA, 2012).

I sistemi a flusso subsuperficiale orizzontale sono particolarmente efficienti nella rimozione dei solidi sospesi che avviene grazie ai processi di filtrazione e sedimentazione che si verificano in maggior misura nella sezione di ingresso del letto filtrante. Le quantità di azoto rimosse risultano generalmente modeste poiché le piante non riescono a fornire al letto filtrante adeguati volumi di ossigeno per la degradazione della sostanza organica e per le reazioni di nitrificazione.

### Sistemi a flusso subsuperficiale verticale (V-SSF)

I sistemi a flusso subsuperficiale verticale sono, da un punto di vista costruttivo, del tutto simili a quelli a flusso orizzontale appena descritti. La differenza è rappresentata dalla modalità di immissione dei reflui e dalla tipologia di riempimento del sistema. Le acque reflue da trattare vengono infatti immesse dall'alto (fig. 3) mediante una rete di tubazioni forate o dotate di erogatori che distribuiscono i reflui sull'intera superficie del letto. Le acque reflue percolano attraverso il medium con un flusso verticale, vengono raccolte sul fondo da un sistema di tubazioni di drenaggio e quindi convogliate in un pozzetto di uscita (Wallace e Knight, 2006; Barbagallo *et al.*, 2011).

Il riempimento delle vasche avviene in maniera discontinua con cicli alternati di riempimento-svuotamento, per cui il substrato non risulta costantemente saturo. In presenza dunque di un approvvigionamento intermittente, per garantire la continuità del processo depurativo è necessario disporre di almeno due letti filtranti posti in parallelo e alimentati in modo alternato, oppure servirsi, a monte del sistema di fitodepurazione,

di una vasca di raccolta e regolazione delle acque reflue pretrattate che può fungere anche da vasca di equalizzazione e sedimentazione. L'alimentazione può essere realizzata per mezzo di un sistema di pompaggio temporizzato oppure mediante sistemi a sifone, nel caso in cui il carico idraulico lo permetta (ISPRA, 2012).

Nei sistemi a flusso verticale vengono inoltre utilizzati materiali di riempimento a granulometria variabile, crescente dall'alto verso il basso della vasca, per evitare l'occlusione dei pori in prossimità del drenaggio di fondo.

I meccanismi di rimozione degli inquinanti sono sostanzialmente uguali a quelli che si verificano nei sistemi H-SSF. La differenza sostanziale, dal punto di vista dell'efficienza depurativa, è rappresentata dalla maggiore efficacia dei processi di degradazione della sostanza organica e nitrificazione degli impianti a flusso verticale rispetto a quelli a flusso orizzontale. Ciò è dovuto alla maggiore concentrazione di ossigeno presente nel sistema, ottenuta grazie ai cicli di riempimento e svuotamento. I sistemi V-SSF vengono dunque proposti con la funzione specifica di nitrificazione, in associazione con letti a flusso orizzontale che effettuino la successiva denitrificazione anossica.

### Processi di rimozione

Gli impianti di fitodepurazione sono capaci di rimuovere la maggior parte degli agenti inquinanti presenti nelle acque (tab. 1). I meccanismi di rimozione possono essere di natura chimica, fisica e biologica e si possono verificare simultaneamente o sequenzialmente durante la permanenza dell'acqua all'interno dell'impianto di fitodepurazione.

I due principali processi di depurazione delle acque reflue sono rappresentati dalla separazione della

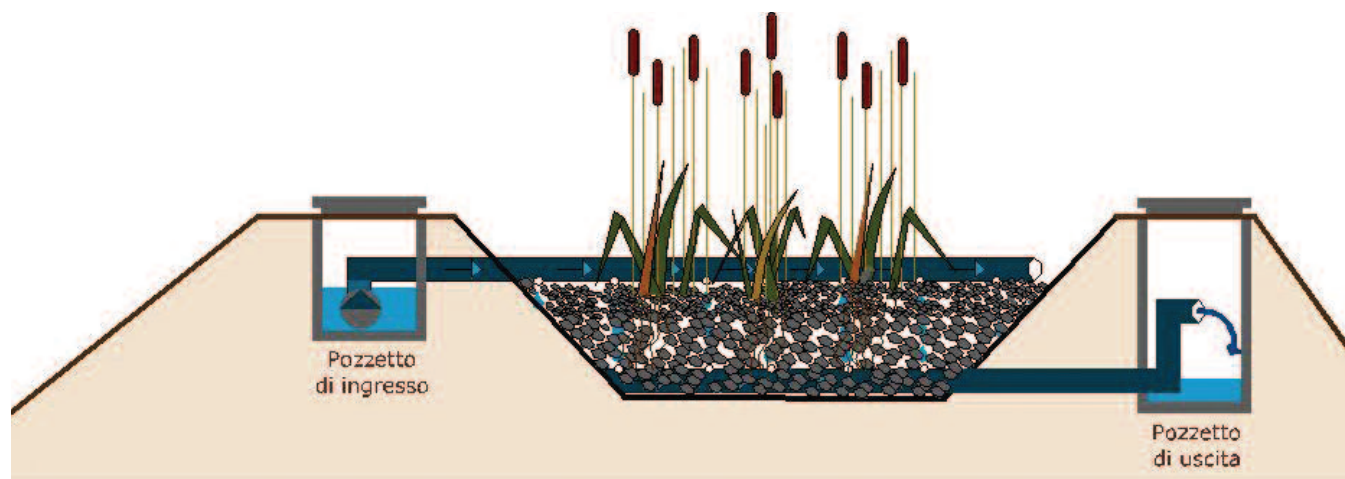


Fig. 3 - Sistema a flusso subsuperficiale verticale (V-SSF) (Barbagallo *et al.*, 2012).  
Fig. 3 - Vertical SubSurface Flow system (V-SSF) (Barbagallo *et al.*, 2012).

Tab. 1 - Processi di rimozione dei principali inquinanti in un impianto di fitodepurazione (Vymazal, 2014). **P** = effetto principale; **S** = effetto secondario; **A** = effetto accidentale (si verifica durante la rimozione di altri inquinanti).  
 Tab. 1 - Removal processes of the main pollutants in a constructed wetland (Vymazal, 2014). **P** = main effect; **S** = side effect; **A** = accidental effect (occurs while removing other pollutants).

Processo	Inquinanti coinvolti	Spiegazione
<i>Processi fisici</i>		
Sedimentazione	<b>P</b> – solidi sospesi <b>S</b> – solidi colloidali <b>A</b> – BOD, azoto, fosforo, metalli pesanti, sostanza organica refrattaria, batteri e virus	Sedimentazione per gravità dei solidi e inquinanti associati
Filtrazione	<b>S</b> – solidi sedimentabili, solidi colloidali	Le particelle vengono filtrate e trattenute durante il passaggio attraverso il substrato, le radici, ecc.
Adsorbimento	<b>S</b> – solidi colloidali	Per azioni di forze di Van der Waals
Volatilizzazione	<b>P</b> – sostanze organiche volatili, sostanze aromatiche, composti alogenati leggeri	Le sostanze organiche con alta pressione di vapore passano all'atmosfera dove possono venire eventualmente ossidate
<i>Processi chimici</i>		
Precipitazione	<b>P</b> – fosforo, metalli pesanti	Formazione di, o coprecipitazione di, composti insolubili
Adsorbimento	<b>P</b> – fosforo, metalli pesanti <b>S</b> – sostanza organica refrattaria	Adsorbimento sul substrato e superfici organiche
Decomposizione	<b>P</b> – sostanza organica refrattaria	Decomposizione di composti meno stabili per radiazione UV, ossidazione e riduzione
<i>Processi biologici</i>		
Metabolismo microbico	<b>P</b> – solidi colloidali, BOD, azoto, sostanza organica refrattaria, metalli pesanti	Rimozione dei solidi colloidali e della sostanza organica disciolta dai batteri associati alla vegetazione Nitrificazione/denitrificazione batterica Ossidazione microbica di metalli
Metabolismo vegetale	<b>S</b> – sostanza organica refrattaria, batteri e virus	Assorbimento e metabolizzazione della sostanza organica della vegetazione Essudati radicali potenzialmente tossici per organismi enterici
Adsorbimento vegetale	<b>S</b> – azoto, fosforo, metalli pesanti, sostanza organica refrattaria	Le piante ne assorbono discrete quantità in presenza di adeguate condizioni
Morte naturale	<b>P</b> – batteri e virus	Morte naturale degli organismi in un ambiente sfavorevole

fase solida da quella liquida e dalla trasformazione delle sostanze presenti (USEPA, 2000). La separazione in genere include la separazione per gravità, la filtrazione, l'adsorbimento, lo scambio ionico e la volatilizzazione. Le trasformazioni possono essere chimiche (reazioni di ossidazione/riduzione, flocculazione, reazioni acido/base) o biochimiche e avvenire in condizioni aerobiche, anaerobiche o anossiche. Sia le separazioni che le trasformazioni possono determinare la rimozione del contaminante o, più frequentemente, il suo accumulo all'interno dell'impianto di trattamento.

L'efficienza del processo di depurazione è strettamente legata al tempo di residenza del refluo all'interno dell'impianto. Normalmente esistono tempi di permanenza ottimali che permettono di ottenere buone efficienze di rimozione degli inquinanti riducendo al minimo la possibilità di cambiamento dello stato redox dei sedimenti causa dei processi di risolubilizzazione dei nutrienti e degli inquinanti.

Anche le piante svolgono un ruolo importante nei processi di fitodepurazione trasferendo ossigeno dalle parti aeree a quelle sommerse. In tal modo si vengono

a creare, in corrispondenza della rizosfera, dei micro-siti aerobici in ambienti prevalentemente anaerobici che favoriscono lo sviluppo di una ricca e varia flora batterica in grado di compiere un'efficiente azione degradativa (Brix, 1994).

### La vegetazione

La fitodepurazione è una tecnica naturale di rimozione degli inquinanti che si basa sul principio di riprodurre gli stessi processi fisici, chimici e biologici di autodepurazione del sistema suolo-piante-microrganismi che caratterizzano gli habitat acquatici e le zone umide (*wetland*) presenti in natura.

Queste ultime sono ambienti in cui la presenza di acqua nel corso dell'anno è tale da alterare le proprietà del suolo a causa dei cambiamenti chimici, fisici e biologici che avvengono durante la sommersione e da consentire l'insediamento solo di specie vegetali adatte a vivere in tali condizioni. Per effetto della notevole disponibilità di acqua, le *wetland* hanno proprietà peculiari fra gli ecosistemi, che le rendono fra i

più produttivi della terra in termini di biomassa; sono frequentemente coperte da fitta vegetazione e ospitano una moltitudine di animali, fra cui mammiferi, uccelli, rettili, anfibi e pesci, situazione non comune ad altri ecosistemi.

Data la loro intensa attività biologica, le aree umide sono capaci di trasformare inquinanti comuni che si trovano nelle acque reflue in prodotti biologici innocui o in nutrienti essenziali che possono essere usati, a loro volta, per sostenere ulteriore produttività biologica. Tali trasformazioni sono ottenute con un impegno contenuto di lavoro umano, energia, strutture, per cui le wetland rappresentano sistemi di depurazione fra i meno costosi da gestire e mantenere.

La presenza della vegetazione è l'elemento che distingue la fitodepurazione dagli altri sistemi naturali di trattamento delle acque reflue. Le macrofite acquatiche rappresentano la componente strutturale dominante di gran parte dei sistemi di fitodepurazione (Kadlec e Wallace, 2009). Si tratta di un gruppo definito su base ecologico-funzionale che comprende numerosi taxa vegetali macroscopicamente visibili e rinvenibili sia in prossimità sia all'interno di acque dolci superficiali (Chambers *et al.*, 2008), composto da oltre 6700 specie fra cui si annoverano piante legnose, arbustive, suffruticose, erbacee, sia annuali che plurienni. In base a morfologia, fisiologia e ambiente di crescita Wetzel (2001) distingue i seguenti gruppi di macrofite:

- galleggianti libere, non radicate al fondo, che trovano condizioni favorevoli allo sviluppo negli specchi d'acqua non turbolenti e protetti (e.g., *Lemna minor*, *Spirodela polyrhiza*, *Eichhornia crassipes*);
- piante sommerse, radicate al fondo, che si possono sviluppare a differenti profondità in relazione alla limpidezza dell'acqua; le angiosperme vascolari (e.g., *Myriophyllum spicatum*, *Ceratophyllum demersum*) possono raggiungere al massimo 10 m di profondità, mentre alcune macroalghe (e.g. *Rhodophyceae*) giungono fino a 200 m;
- con foglie flottanti, radicate al fondo a profondità di 0.5-3 m e dotate di steli che portano foglie e fiori a galleggiare sulla superficie dell'acqua (e.g., *Nymphaea spp.*, *Nuphar luteum*);
- emergenti, che vivono in ambienti saturi o sommersi, dove l'oscillazione del livello dell'acqua è compresa fra -0.5 e 1 m rispetto al piano campagna (e.g., *Acorus calamus*, *Carex spp.*, *Phragmites australis*, *Schoenoplectus (Scirpus) lacustris*, *Typha latifolia*).

In condizioni naturali, le piante si dispongono in fasce parallele alla sponda, differenziate in ragione

della profondità delle acque. I primi due gruppi (idrofite) occupano la zona sommersa e quella stagnale; le radicate emergenti (elofite) si trovano nella zona palustre. La vegetazione degli ambienti umidi è completata dalle piante igrofite, cui appartengono piante erbacee come *Lythrum salicaria* o arbustive e arboree (*Salix spp.*, *Populus spp.*). Esse vivono spontaneamente nella zona riparia, che è generalmente emersa, spesso satura d'acqua e occasionalmente allagata.

### Funzioni della vegetazione

Le principali funzioni della vegetazione all'interno dei sistemi di fitodepurazione sono (Brix, 1999; Tanner, 2001):

- sostegno di attività eterotrofica dovuta all'elevata produzione primaria. Gli steli e le foglie delle macrofite che emergono dalla colonna d'acqua favoriscono la formazione di biofilm che ospita comunità di alghe fotosintetiche, batteri e protozoi, i quali a loro volta sono attori di intensa attività degradativa;
- riduzione della velocità e distribuzione omogenea del flusso d'acqua; gli steli delle piante e i loro apparati ipogei intercettano il flusso idrico, ne riducono l'intensità e lo disperdono. Di conseguenza si favorisce la sedimentazione dei solidi sospesi, si riduce rischio di erosione del fondo e di risospensione dei particolati e aumenta il tempo di contatto tra la superficie vegetale e l'acqua circostante;
- stabilizzazione della superficie del suolo, dovuta agli organi ipogei che imbrigliano il substrato e riducono la formazione di canali d'erosione, nonché alla lettiera, che rallenta il flusso dell'acqua;
- sviluppo di uno strato intermedio tra l'atmosfera e il suolo o la superficie dell'acqua, in cui si instaurano importanti gradienti fisici. La velocità del vento vicino al suolo o alla superficie acquosa è ridotta, e ciò ostacola la risospensione del materiale sedimentato e incrementa la sedimentazione dei solidi sospesi. La copertura vegetale attenua il passaggio della luce, fatto che inibisce la produzione algale e protegge l'ambiente sottostante dai rigori invernali;
- assorbimento diretto di nutrienti e inquinanti. Le piante richiedono una certa disponibilità di nutrienti per la loro crescita e sviluppo, assimilati principalmente dalle radici. La capacità di assorbimento annua per ettaro di superficie delle macrofite terrestri assume valori tipici di 200 - 1.000 Kg di N e 30 - 150 Kg di P. La maggior parte dei nutrienti assimilati nei tessuti delle pian-

te ritorna nel sistema per decomposizione. L'accumulo nel lungo periodo nelle wetland risulta dalla frazione non decomposta prodotta dai vari elementi del ciclo biogeochimico. Alcune specie (es. *Typha latifolia* L., *Salix spp.*) sono in grado di assorbire metalli pesanti;

- rilascio di ossigeno nella rizosfera, una funzione di grande importanza per il buon funzionamento dell'ambiente wetland per le difficoltà che questo elemento trova nel passaggio dalla fase aerea a quella liquida sotto superficiale. La differenza fondamentale tra un suolo asciutto e un suolo saturo d'acqua o sommerso risiede nella disponibilità di ossigeno per la respirazione dell'apparato radicale, per la respirazione microbica e per i processi di ossidazione chimica. In un suolo asciutto la porosità è riempita con aria relativamente ricca di ossigeno che viene facilmente utilizzato dagli organismi tellurici e dalle radici delle piante. In un suolo saturo d'acqua gli spazi porosi sono riempiti e il tasso di diffusione dell'ossigeno nell'acqua è tre milioni di volte più lento che nell'aria, anche a causa della bassa idrosolubilità di questo elemento. Come conseguenza, i suoli saturi d'acqua sono in anaerobiosi, fatta eccezione per i pochi millimetri in contatto diretto con l'atmosfera. In queste condizioni, le radici e i rizomi, che necessitano di ossigeno per la loro crescita, devono ricavarlo mediante una via di trasporto all'interno delle piante. Il sistema di lacune, che caratterizza le piante delle zone umide, è molto esteso e arriva ad occupare fino al 60% del volume totale della pianta. La quota di ossigeno non utilizzata dalle radici per i cicli di conservazione e di crescita viene diffusa nella rizosfera, creando condizioni di ossidazione nelle zone anossiche del terreno. Si generano così micrositii favorevoli ai batteri aerobi, attivi nella decomposizione della materia organica. Nel corso dell'inverno con la vegetazione non attiva una quota di ossigeno è trasmessa per induzione dell'effetto Venturi dai culmi rotti alla rizosfera. Il flusso di ossigeno rilasciato dagli organi ipogei è sull'ordine di 0.02 g m<sup>-2</sup> al giorno per piante emerse e di 0.025 - 9.6 g m<sup>-2</sup> per piante galleggianti (Brix, 1993; 1999; Sottmeister *et al.*, 2003).

Alle funzioni primarie va affiancata una serie di funzioni ancillarie che, seppure non indispensabili per le finalità depurative, possono rappresentare un valore aggiunto dei sistemi di fitodepurazione e vanno attentamente considerate in sede di progettazione. Le più frequenti sono l'abbellimento estetico, la produzione di biomassa, il supporto alla biodiversità.

## Principali specie utilizzate

La scelta delle piante dipende dalle condizioni climatiche, dalle caratteristiche del refluo, dalla qualità richiesta dell'effluente, nonché dalle funzioni ancillarie che ci si propone di conseguire con gli impianti di fitodepurazione. Tenuto conto di ciò, è opportuno scegliere specie (Borin, 2003):

- capaci di vivere in condizioni di saturazione del terreno e di avvantaggiarsi di acque eutrofiche;
- autoctone, perché sono adatte al clima in cui si opera e non rappresentano pericoli per eventuali sviluppi incontrollati ed incontrollabili;
- che presentino, a maturità, un adeguato sviluppo ipogeo per assorbire l'acqua e apportare l'ossigeno almeno fino a 0.5-0.6 m di profondità e fogliare;
- preferibilmente erbacee, in quanto colonizzano più velocemente e uniformemente l'ambiente, che normalmente ha dimensioni limitate. Fra le erbacee, sono da utilizzare quelle dotate di organi perennanti, per porre i presupposti affinché il sistema di depurazione naturale raggiunga più velocemente le prestazioni desiderate e le mantenga costantemente nel tempo senza necessità di ricorrere a semine o trapianti nel corso degli anni;
- aventi requisiti di adattabilità, resistenza e competitività, affinché sappiano sopravvivere nelle condizioni particolari di "coltura", non siano soggette a malattie o attacchi parassitari e sappiano mantenere nel tempo l'associazione floristica desiderata.

A questi criteri va aggiunto che a volte si deve selezionare la specie in funzione di obiettivi particolari (ad esempio, impiego di specie iperaccumulatrici di metalli, per la loro rimozione dal refluo da trattare o alofiti se il refluo presenta un elevato contenuto di sali).

Come detto la natura è molto ricca di piante potenzialmente adatte alla fitodepurazione, ma le specie più utilizzate allo scopo in Europa sono *Phragmites australis* Cav. Trin., *Typha latifolia* L., *Iris pseudacorus* L., *Carex spp.*, *Phalaris arundinacea* L., *Glyceria maxima* (Hart.) Holm e *Sparganium erectum* L. (Vymazal, 2011; 2013).

In Italia la maggior parte degli impianti è vegetata con *P. australis*, comunemente chiamata cannuccia di palude (fig. 4). Appartiene alla famiglia delle *Poaceae* ed è una pianta subcosmopolita erbacea perenne a ciclo C3 la cui produttività della parte epigea varia da 2 a 60 t ha<sup>-1</sup> di sostanza secca per anno in relazione al clima e alle disponibilità di acqua e nutrienti; nel Nord Italia sono state misurate rese fino a 12 t ha<sup>-1</sup> per anno di sostanza secca (Borin e Salvato, 2012) al Sud addirittura superiori a 100 t ha<sup>-1</sup> (Politeo *et al.*, 2011). Se l'acqua non è fattore limitante la sua





Fig. 4 - *Phragmites australis* Cav. Trin.  
Fig. 4 - *Phragmites australis* Cav. Trin.

ET può essere anche tre volte superiore a quella delle più esigenti colture agrarie (Borin *et al.*, 2011).

Meno utilizzata negli impianti di fitodepurazione è *T. latifolia*, specie cosmopolita conosciuta con il nome di mazza sorda per la caratteristica infiorescenza (fig. 5). In Italia è diffusa da 0 a 2000 m, anche grazie alla sua capacità di resistere ai freddi invernali



Fig. 5 - *Typha latifolia* L..  
Fig. 5 - *Typha latifolia* L.

e al gelo. Cresce al sole o a mezz'ombra, in superficie ma anche nelle acque profonde che superano la corona sino a più di 15 centimetri. E' in grado di adattarsi a un ampio range di pH, da acido ad alcalino, ma sopporta solamente brevi periodi di assenza di sommersione. Cresce anche in acque abbastanza ricche di sali e inquinate, ed è particolarmente resistente ai metalli. Si riproduce normalmente per via vegetativa tramite i rizomi, ma anche per via sessuata tramite i semi che vengono prodotti in grande quantità nelle spighe.

Fra le specie tipiche degli ambienti umidi e delle wetland a flusso superficiale meritano di essere ricordati i carici, i giunchi e il giunco di palude. Il genere *Carex*, appartenente alla famiglia delle *Cyperaceae*, comprende più di 1.000 specie e rappresenta uno dei gruppi di piante vascolari più comuni nel mondo. I carici hanno importanza ambientale nel rassodare terreni acquitrinosi e nel rinforzare rive dei fossi. Vengono propagati per seme o per suddivisione dei rizomi o dei cespi. Le specie più utilizzate nelle wetland sono *C. riparia* (fig. 6) e *C. elata* che, pur essendo più piccolo del primo, è in grado di fornire una produzione annua di 60 t ha<sup>-1</sup> (Borin e Salvato, 2012).

Alle *Cyperaceae* appartiene lo *Schoenoplectus lacustris* L. (giunco di palude) che ricopre vaste aree umide con acque dolci. Si adatta a un pH compreso fra 4 e 9, e tollera una salinità fino a 20 ppm.

I giunchi (*Juncus spp.*), molto numerosi, appartengono alla famiglia delle *Juncaceae* e sono caratterizzati da sviluppo moderatamente rapido. In buone condizioni ambientali, sono in grado di produrre una



Fig. 6 - *Carex riparia* L..  
Fig. 6 - *Carex riparia* L.



copertura densa dopo un anno dall'insediamento. Gradiscono un pH da subacido a neutro e tollerano una salinità dell'acqua fino a 20 ppm.

### Piante ornamentali

Il crescente interesse della fitodepurazione per il trattamento di reflui domestici ha fatto sorgere l'attenzione verso piante che, oltre ad assolvere le funzioni tipiche dei sistemi wetland, siano anche ornamentali, in modo tale da presentare il sito di depurazione come una gradevole macchia di colore (Borin *et al.*, 1999; 2004; Borin e Tocchetto, 2006; Cossu *et al.*, 2001). Anche in questo caso esistono, in potenza, ampi margini di scelta. Ai criteri descritti in precedenza, si devono aggiungere:

- l'opportunità di preferire associazioni pluri specifiche piuttosto che coperture mono specifiche (minori rischi per fallanza di una specie e maggiore effetto decorativo); ciò richiede di realizzare accostamenti di specie diverse che siano in grado di sopportare la promiscuità;
- la potenzialità di conseguire una macchia di colore per periodi prolungati sfruttando differenti epoche e durate di fioritura;
- la possibilità di usare piante aromatiche per confondere eventuali odori, tenere lontano insetti molesti, o più in generale, profumare l'aria.

Tenendo in considerazione questi aspetti, in tabella 2 vengono riassunte le principali caratteristiche vegetative e ambientali di una selezione di specie potenzialmente adatte allo scopo (Della Fior, 1985; Pignatti, 1997; Speichert e Speichert, 2004).

Si tratta di specie appartenenti a famiglie diverse, adatte a climi temperati e temperato-caldi; date però le condizioni d'impiego, caratterizzate da acque altamente eutrofiche, in flusso continuo e con temperature in entrata anche superiori ai 15°C, si ritiene che possano sopportare basse temperature esterne invernali anche per periodi prolungati. Sono tutte piante dotate di fiori appariscenti, con diversi colori e periodi di fioritura. La maggior parte di esse vive spontaneamente nei diversi ambienti umidi italiani, è facilmente reperibile e quindi garantisce ottime possibilità di attecchimento dopo il trapianto.

Le più interessanti fra le specie ornamentali per la fitodepurazione sono:

- *Iris pseudacorus* L. (*Iridaceae*) (fig. 7), noto come giaggiolo d'acqua, originario dell'Europa, ove in passato era spesso utilizzato come pianta da colorante ed erba medicinale è comune in tutt'Italia, dal livello del mare fino ai 1.000 m circa. Vive emerso, ma anche nelle acque che

superano la corona sino a più di 15 centimetri, e resiste alle inondazioni e ai periodi siccitosi estivi. Sviluppa radici profonde fino a mezzo metro, fascicolate, estese, che lo rendono particolarmente adatto all'utilizzo in sistemi flottanti;

- *Canna indica* L. (*Cannaceae*) (fig. 8). Originaria dell'India e della Guiana, è frequentemente coltivata come pianta ornamentale. In Sicilia si trova inselvatichita nelle acque lentamente scorrenti presso Siracusa. Predilige posizione in pieno sole, ma tollera anche l'ombra, è abbastanza sensibile ai rigori invernali. Presenta cv con fiori di differenti colori (rosso vivace, rosso-aranciato, rosa, giallo con screziature rosse ecc.) formati da vistose corolle tubolari molto aperte, riuniti in tirsii ter-



Fig. 7 - *Iris pseudacorus* L.  
Fig. 7 - *Iris pseudacorus* L.



Fig. 8 - *Canna indica* L.  
Fig. 8 - *Canna indica* L.

Tab. 2 - Caratteristiche di specie ornamentali potenzialmente utilizzabili in impianti di fitodepurazione domestica.  
 Tab. 2 - Features of ornamental species potentially usable in home constructed wetlands plant system.

Specie	Famiglia	Epoca di fioritura	Colore corolla	Caratteristiche vegetative			Propagazione	Caratteristiche gestionali		Caratteristiche ambientali		
				Altezza (dm)	Apparato fogliare	Apparato ipogeo		Profondità max di impianto	n.° pp/m <sup>2</sup>	Nitrofilia	calc.	Resistenza al freddo
<i>Alisma plantago-aquatica</i> L. (Mestolaccia comune)	<i>Alismataceae</i>	VI - IX	Bianco roseo	1-8	ben sviluppato	rizoma tuberoso	seme - frammentazione del rizoma	-40	42285	+++	indiff.	+++
<i>Calla palustris</i> L. (Calla)	<i>Araceae</i>	V - VII	Bianco	2-7	ben sviluppato	rizoma strisciante	seme - frammentazione del rizoma	-15	42285	++	++	+++
<i>Canna indica</i> L. (Cannacoro)	<i>Cannaceae</i>	VII - IX	Giallo rosso	10-20	molto sviluppato	rizoma tuberoso	frammentazione del rizoma	-20	42097	+++	+++	+
<i>Eupatorium cannabinum</i> L. (Canapa acquatica)	<i>Compositae</i>	VII - X	Rosa	10-15	ben sviluppato	radice fittonante	seme	-10	15 - 20	+++	+++	+++
<i>Iris pseudacorus</i> L. (Giglio acquatico)	<i>Iridaceae</i>	IV - VI	Giallo	5-10	sviluppato	rizoma strisc.	frammentazione del rizoma	-15	42128	+++	indiff.	+++
<i>Lobelia cardinalis</i> L. (Fior di cardinale)	<i>Campanulaceae</i>	VII - IX	Carminio	3-10	sviluppato	radice fittonante	seme - frammentazione del rizoma	-15	42160	++	+	+
<i>Lysimachia vulgaris</i> L. (mazza d'oro comune)	<i>Primulaceae</i>	V - VII	Giallo dorato	6-12	ben sviluppato	rizoma strisc.	seme - frammentazione del rizoma	-10	6	indiff.	indiff.	indiff.
<i>Lythrum salicaria</i> L. (Salcerella comune)	<i>Lythraceae</i>	VI - X	Rosa violaceo	4-12	ben sviluppato	rizoma fusiforme	seme - frammentazione del rizoma	-30	42339	indiff.	+++	+++
<i>Mentha aquatica</i> L. (Menta d'acqua)	<i>Labiatae</i>	VI - X	Lilla	2-8	ben sviluppato	stoloni radicanati	talea	-30	10	++	+++	+++
<i>Thalia dealbata</i> Fras. (Talia)	<i>Maranthaceae</i>	VI - IX	Azzurro porpora	10-15	molto sviluppato	rizoma tuberoso	separazione rigetti	-20/-60	42160	++	++	++
<i>Typha latifolia</i> L. (Mazza- sorda)	<i>Thyphaceae</i>	VI - VIII	Marrone	15-20	ben sviluppato	rizoma	frammentazione del rizoma	-10/-40	42348	+++	indiff.	+++

minali e portati da un fusto cilindrico e carnoso. Fiorisce tra luglio e settembre. In inverno la vegetazione scompare ma i rizomi si mantengono normalmente vitali sotto la superficie del terreno. La propagazione avviene per seme o per divisione dei tuberi.

- *Pontederia cordata* L. (*Pontederiaceae*) (fig. 9). Pianta acquatica perenne rizomatosa a crescita vigorosa, preferisce i luoghi molto luminosi, preferibilmente soleggiati, ma si adatta anche a mezz'ombra. Generalmente non teme il freddo soprattutto se insediata in acque sufficientemente profonde da proteggere radici e rizomi dalle gelate. In estate produce una spiga di fiorellini viola-blu decorativa e appariscente, su un lungo stelo rigido; la fioritura solitamente è lunga e può protrarsi fino all'arrivo dei primi freddi autunnali. La varietà alba ha fiori completamente bianchi. Può essere utilizzata nei sistemi flottanti grazie al fatto che sviluppa un apparato radicale profondo e diffuso.

### Piante da biomassa

Gli obiettivi della politica energetica Europea, delineati con il Libro Verde del 2006 e recepiti con Direttiva Europea n.28 del 2009, hanno stimolato la produzione di energie rinnovabili, fra le quali quelle provenienti da biomasse svolgono un ruolo di primo



Fig. 9 - *Pontederia cordata* L.  
Fig. 9 - *Pontederia cordata* L.

piano. Al tempo stesso, la crescente diffusione di sistemi di fitodepurazione di acque reflue di varia origine, la necessità di gestire la vegetazione di aree umide naturali e di superfici destinate alla laminazione delle piene, le periodiche operazioni di manutenzione della chilometrica rete di canali di bonifica unite alla sempre presente opportunità di trovare nuove prospettive per la coltivazione di terreni marginali possono originare la disponibilità di ingenti quantitativi di biomasse erbacee la cui destinazione può risultare problematica. L'utilizzazione di tali biomasse per l'ottenimento di energia rinnovabile può pertanto rappresentare un'interessante prospettiva per lo sviluppo rurale e per trovare impiego ad acque reflue di scarsa qualità. Si otterrebbero così i presupposti di una produzione energetica decentrata e di valorizzazione di corpi idrici che altrimenti potrebbero richiedere trattamenti di finissaggio qualitativo. Si può pertanto parlare di fitodepurazione produttiva (Borin *et al.*, 2009), un tema che è stato sviluppato, fra l'altro, con finanziamenti PRIN 2007 (Produzione e trasformazione energetica di piante erbacee da biomassa irrigate con acque reflue) e MIUR 2010 (FITOPROBIO - Fitodepurazione produttiva di biomasse cellulosiche per l'ottenimento di etanolo di seconda generazione).

Accanto a molte delle piante sopra descritte, in grado di fornire quantitativi annui di biomassa secca superiori addirittura a quelli prodotti dal mais, merita di essere ricordata la canna gigante (*Arundo donax* L.). Appartenente alla famiglia delle *Poaceae*, si trova spontaneamente nelle zone ripariali e si adatta a molteplici ambienti, da terreni sabbiosi ad argillosi e inquinati, salini o alcalini al punto da essere considerata una specie invasiva. Sopporta la siccità ma teme la sommersione. E' pianta erbacea pluriennale, che cresce sino a più di 4 metri d'altezza, in cespi che si allargano sino a più di 3 metri. Coltivata in condizioni di abbondante disponibilità di acqua e nutrienti ha raggiunto rese parcellari superiori a 100 t ha<sup>-1</sup> anno<sup>-1</sup>, più di quattro volte superiori a quelle del mais nelle stesse condizioni (Borin *et al.*, 2013; Florio *et al.*, 2012).

### Trapianto e gestione della vegetazione

Per ottenere i migliori risultati fin dal primo anno, l'impianto della vegetazione va eseguito in primavera, in modo da consentire alle piante una lunga stagione di crescita per giungere all'inverno bene insediate, con organi ipogei sviluppati. Si pongono così le condizioni per un'efficace ripresa vegetativa nella stagione successiva, che, a sua volta, permette alle piante di consolidare l'insediamento nel secondo anno. Al terzo



anno l'impianto potrà così raggiungere la maturità di sviluppo e fornire le prestazioni depurative definitive.

In primavera, si possono utilizzare sia organi di propagazione, sia piante già sviluppate. In tutti i casi, il trapianto va eseguito su substrato pulito, livellato, dal quale si siano eliminate le erbe infestanti.

Con riferimento alla canna palustre, che può essere presa come pianta guida, i rizomi vanno interrati con un angolo di 45° rispetto alla superficie del terreno a circa 4 cm di profondità con un estremo fuori terra (Hawke e José, 1996). Dopo la messa a dimora è opportuno creare un leggero flusso d'acqua in superficie a cui si deve far seguire una condizione di elevata e costante umidità del substrato. La densità di messa a dimora varia fra 4 e 10 rizomi per m<sup>2</sup>. I germogli compariranno 15-30 giorni dopo il trapianto, secondo le condizioni ambientali.

Con il procedere della stagione, è invece opportuno ricorrere all'uso di piante, impiegando prima materiale derivato da seme e più tardi quello con rizomi già formati. L'investimento consigliato è di 4-6 piante al m<sup>2</sup>, in ragione della stagione e dello sviluppo delle piante.

Il primo anno di impianto è il periodo più critico per l'attecchimento e l'insediamento della vegetazione, per cui devono essere eseguiti interventi di gestione idrica e manutenzione. Il livello dell'acqua all'interno della vasca va tenuto sufficientemente vicino alla zona radicale (profondità massima di 20 cm) e si devono controllare le malerbe. Quest'operazione potrà essere eseguita manualmente o con il ricorso a erbicidi selettivi nel caso di impianti di maggiori dimensioni.

Se le condizioni di impianto e di gestione sono state ottimali, la canna palustre è in grado di produrre fino a 200 culmi al m<sup>2</sup> alti più di 1 m già alla fine della stagione di crescita.

Gli interventi di manutenzione della vegetazione vanno continuati anche negli anni a seguire, quando può essere necessario eliminare le infestanti resistenti e/o ripristinare la vegetazione nel caso di fallanze.

A fine stagione, la vegetazione può essere raccolta o lasciata sul posto a essiccare. L'epoca di raccolta e la frequenza con cui viene eseguito l'intervento nel corso degli anni hanno conseguenze sul comportamento della vegetazione. Raccolte di fine estate-inizio autunno consentono di rimuovere le maggiori quantità di inquinanti e nutrienti dalla vasca fitodepurativa, ma possono indebolire la ripresa vegetativa successiva, in quanto le piante non hanno avuto modo di traslocare gli assimilati verso gli organi di conservazione ipogei. L'opposto si verifica con raccolte a fine inverno (Borin *et al.*, 2001). Nei climi più freddi è consigliato

tenere la vegetazione sulla vasca durante l'inverno in modo da sfruttarne l'effetto pacciamante. L'esecuzione della raccolta ogni anno aiuta a eliminare le infestanti, favorendo la canna palustre, e riduce l'accumulo di lettiera.

La gestione di vasche con consociazioni di specie diverse, caso che può presentarsi negli impianti ornamentali, richiede maggiore attenzione e puntualità negli interventi manutentori. Oltre a quelli già citati, potranno rendersi necessari interventi di diradamento e/o di ripristino, che spesso vanno eseguiti a primavera. In questo momento, infatti, le specie più precoci nella ripresa vegetativa trovano l'ambiente meno soggetto a competizione, per cui tendono a diffondersi prima che le altre inizino a germogliare. Per mantenere l'effetto estetico, inoltre si dovranno eseguire operazioni tipiche del giardinaggio (eliminazione di fiori secchi, di parti di pianta danneggiate, diradamenti, eventuali trattamenti antiparassitari e insetticidi).

E' opportuno considerare fin dalla progettazione quale sarà il destino della biomassa raccolta. A tal proposito le destinazioni possono variare secondo le finalità, il tipo di refluo trattato e le caratteristiche della vegetazione. In impianti domestici di piccole dimensioni la biomassa viene generalmente smaltita con le modalità del verde ornamentale. Uno degli utilizzi di maggiore interesse è, come detto, la valorizzazione energetica, per la quale possono essere attivate le filiere del bioetanolo, della combustione e della fermentazione (Pappalardo *et al.*, 2015). La praticabilità di quest'utilizzo dipende da svariati fattori, quali la produzione areica, l'attitudine delle specie e la distanza fra siti di produzione e centro di utilizzazione. Quando la fitodepurazione è applicata a reflui contenenti materiali tossici o metalli pesanti (fitoestrazione) è opportuno destinare le biomasse in discarica.

### **Impianto di fitodepurazione a servizio dell'IKEA Store di Catania**

L'impianto di fitodepurazione a servizio dell'IKEA Store di Catania è stato realizzato per affinare le acque reflue provenienti dai servizi igienici e dalle cucine del negozio, precedentemente sottoposte ad un trattamento in un impianto biologico di tipo discontinuo con schema SBR (*Sequential Batch Reactor*). L'impianto è ubicato in un'area prevalentemente a carattere urbano ed è composto da tre letti di fitodepurazione funzionati in serie. Ad un primo letto a flusso sub-superficiale orizzontale (H1), vegetato con *Phragmites australis* L., e *Typha domingensis* Pers., segue un letto a flusso sub-superficiale verticale (V1) vegetato con *Cyperus papyrus* e *Canna indica* L.

e infine un ulteriore sistema V-SSF (V2) vegetato con *Hibiscus palustris* e *Iris pseudacorus*. Nella tabella 3 sono riportate le dimensioni dei singoli letti di fitodepurazione.

La scelta delle suddette macrofite è motivata anche dal notevole pregio estetico delle stesse, in tal modo l'impianto di fitodepurazione offre anche l'opportunità per creare una zona a verde di alto valore estetico e contribuirà alla riqualificazione dell'area marginale compresa tra l'edificio IKEA e la Tangenziale di Catania (fig. 10).

L'impianto di fitodepurazione a servizio dell'IKEA Store di Catania è stato capace di produrre un effluente con concentrazione dei parametri chimico-fisici e microbiologici sempre al di sotto dei limiti imposti per lo scarico nei corpi idrici superficiali (D.Lgs 152/2006) che per il riutilizzo a scopo irriguo dei reflui depurati (D.M. 185/03).

### La fitodepurazione con sistemi flottanti

I sistemi flottanti di fitodepurazione rispondono all'esigenza di intercettare e trattare i flussi di in-

nammento direttamente all'interno di corpi idrici superficiali, siano essi naturali che artificiali. Sono realizzati formando barriere trasversali al flusso dell'acqua, con l'utilizzo di piante galleggianti o non galleggianti, ma inserite su supporti flottanti.

Il ricorso a piattaforme galleggianti consente di utilizzare macrofite acquatiche che non galleggiano, ma che sono specificatamente utilizzate ed efficaci per scopi depurativi. I vantaggi di questo sistema sono: gamma di scelta delle specie più ampia; uniformità di insediamento e comportamento della barriera; confinamento della vegetazione nel settore assegnato; adattamento a mutevoli profondità della lama d'acqua; versatilità gestionale.

La fitodepurazione flottante permette di trattare grandi volumi di acqua in spazi relativamente contenuti ed è adatta alla depurazione in alveo in canali, fiumi e fossati, ma può essere realizzata anche all'interno di bacini artificiali e di vasche installate opportunamente (Borin *et al.*, 2014).

Questo tipo di fitodepurazione può essere realizzato utilizzando gli elementi flottanti Tech-IA® (P.A.N. - Piante, Acqua, Natura s.r.l. Spin-off dell'Università

Tab. 3 - Caratteristiche dei letti di fitodepurazione a servizio dell'IKEA Store di Catania.

Tab. 3 - Features of the wetland system developed for the IKEA Store in Catania.

Letto	Area m <sup>2</sup>	Materiale di riempimento			Macrofite Piantumata	
		Tipo	Dimensione (mm)	Profondità (m)	Nome	Densità (rizomi per m <sup>2</sup> )
H1	400	pietrisco lavico	8-15	0,6	<i>Phragmites australis</i>	4
V1	530	sabbia vulcanica	circa 0,05-10	0,40	<i>Cyperus papyrus</i>	2,5
		pietrisco lavico	8-15	0,40	<i>Canna Indica L.</i>	
V2	530	sabbia vulcanica	circa 0,05-10	0,40	<i>Ibiscus palustris</i>	
		pietrisco lavico	8-15	0,40	<i>Iris pseudacorus</i>	



Fig. 10 - Stato di fatto del sistema di fitodepurazione a servizio dell'IKEA Store di Catania.

Fig. 10 - The wetland system developed for the IKEA Store in Catania.

di Padova). Un elemento Tech-IA® è di forma rettangolare, lungo 90 cm e largo 50 cm, ha peso medio di 1730 g ed è realizzato in E.V.A. (*ethylen vinil acetate*), prodotto riciclabile e atossico. La struttura del materiale è a cellula chiusa (quindi non assorbe e non trattiene l'acqua), presenta alta resistenza meccanica ed elevata sopportazione a condizioni chimiche, biologiche e climatiche. Ogni elemento è dotato di otto griglie adatte a ospitare le piante per la fitodepurazio-

ne e di sei fori sulla cornice che permettono di connettere gli elementi tra di loro e agganciarli alle sponde (fig. 11). Un singolo elemento può sostenere un carico fino a 20 kg.

Gli elementi Tech-IA® possono essere assemblati facilmente in molteplici disposizioni a formare nastri fitodepuranti o barriere di conformazione varia, che vanno posti trasversalmente al flusso dell'acqua da trattare (fig. 12).

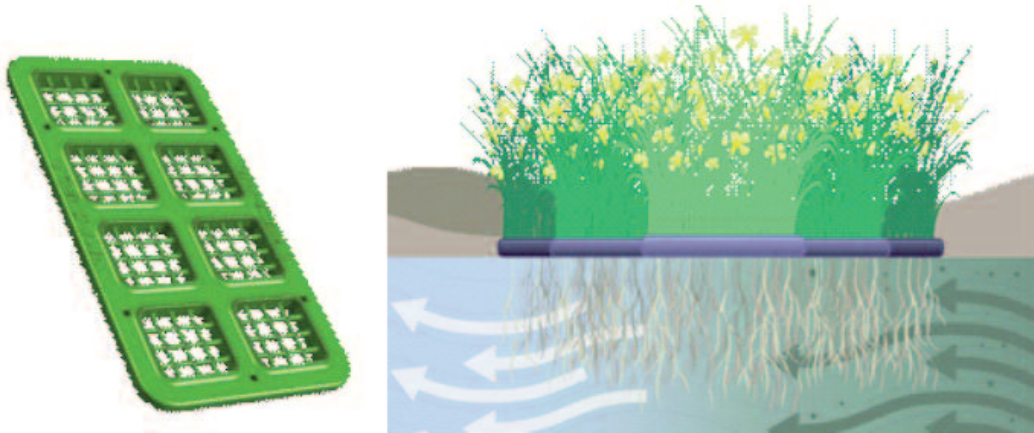


Fig. 11 - Elemento flottante Tech-IA e principio di funzionamento della fitodepurazione flottante.  
 Fig. 11 - Floating element Tech-IA and principles of operation of the floating phytoremediation.

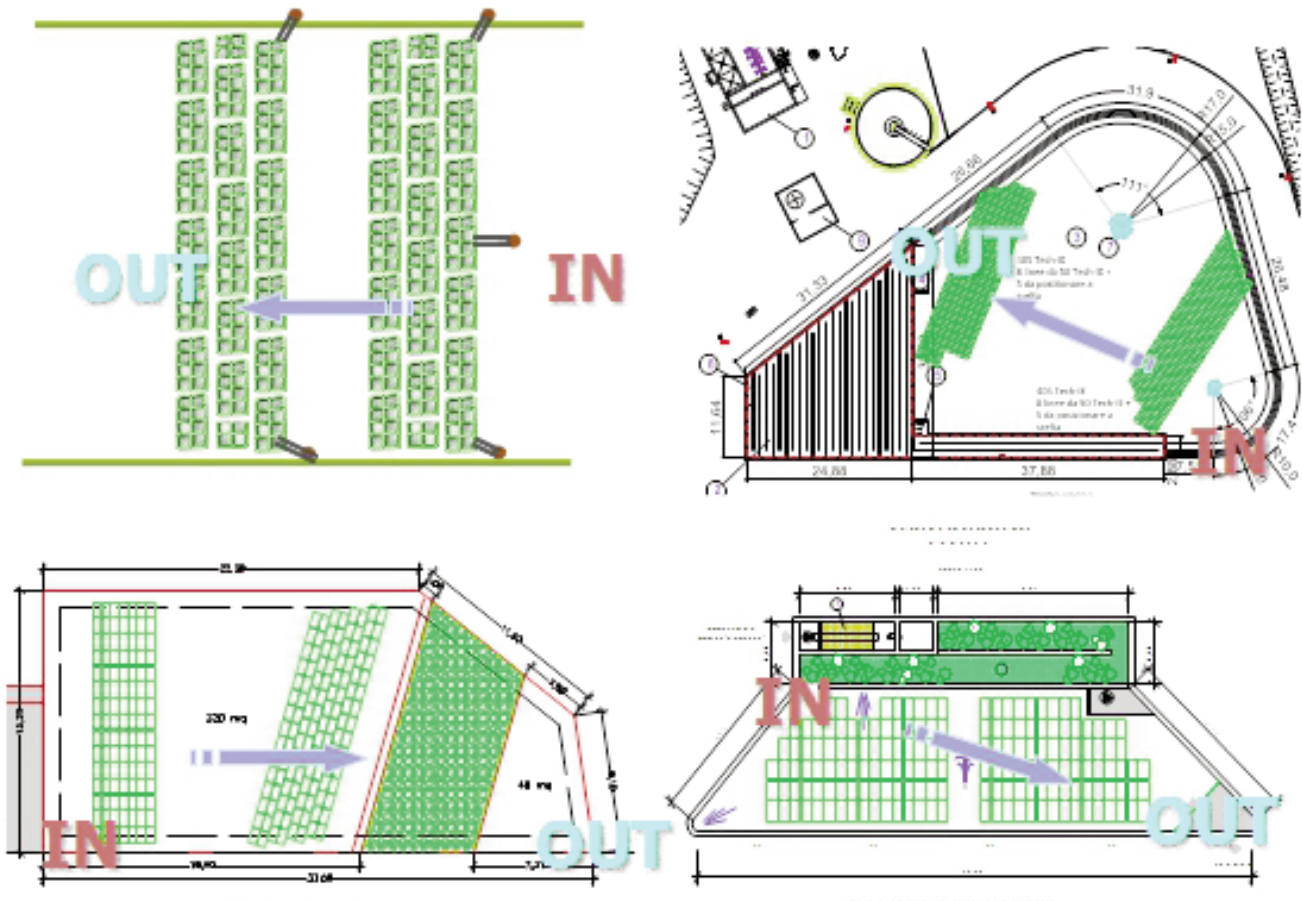


Fig. 12 - Esempi di disposizione di elementi flottanti.  
 Fig. 12 - Examples of floating elements arrangement.



In Italia la fitodepurazione con sistemi flottanti è apparsa solo negli ultimi anni e rappresenta la soluzione più recente di questa eco tecnologia. Esistono tuttavia significativi esempi applicativi in ambiti alquanto differenziati.

La prima installazione del sistema è stata realizzata nel 2006 all'interno del Parco Naturale del Fiume Sile (Tv) per trattare acque scaricate da un grande allevamento di acquacoltura. Sono state installate barriere di due e di tre file di elementi, agganciate da sponda a sponda di due canali. La capacità di depurazione, monitorata per tre anni consecutivi, ha evidenziato abbattimenti del 69% per il COD, del 49% per il BOD, del 22% azoto totale e del 64% fosforo totale (De Stefani *et al.*, 2011). Dopo i primi mesi dall'installazione si è anche osservato lo sviluppo di vegetazione spontanea direttamente nelle barriere realizzate che ha aumentato il valore naturalistico dei siti. In particolare sono stati osservati numerosi esemplari di avifauna acquatica che frequentavano regolarmente le barriere, alcuni anche nidificanti.

Un'applicazione successiva del sistema Tech-IA® ha visto l'installazione di 1800 elementi, disposti in 5 barriere, per una superficie complessiva di 900 m<sup>2</sup>, e con circa 14000 piante trapiantate negli elementi galleggianti. Il progetto è stato realizzato in Provincia di Brescia all'interno di un bacino della superficie di 1.4 ha per l'affinamento delle acque di un depuratore comunale ed il successivo riutilizzo in agricoltura. I dati analitici del monitoraggio hanno mostrato diminuzione del 29% per l'azoto totale, del 24% per l'ammoniacale, del 46% per il nitrico, del 28% per il COD e del 40% per il fosforo totale. Anche in questo caso numerosi nidi di uccelli acquatici, bisce d'acqua e insetti sono stati osservati nelle barriere galleggianti.

Isole flottanti di fitodepurazione sono state anche installate all'interno di bacini di finissaggio di impianti di depurazione in quattro Comuni in Provincia di Vicenza (Mietto *et al.*, 2013). In tutti i casi la loro installazione ha consentito un miglioramento delle prestazioni depurative dei sistemi. A titolo di esempio si riportano i dati acquisiti nel Comune di Alonte, dove l'affinamento ha consentito di ottenere che la totalità dei campioni analizzati rientrasse nei limiti di scaricabilità imposti dal d.lgs 152/2006, mentre prima della fitodepurazione erano sopra il limite di legge il 20% dei campioni per il fosforo totale e il 30% dei campioni per l'azoto nitrico (tab. 4).

Il miglioramento delle prestazioni depurative tende a manifestarsi fin dal periodo immediatamente successivo all'installazione solo per alcuni parametri, come evidenziato in tabella 5.

Tab. 4 - Prestazioni depurative della fitodepurazione flottante nel Comune di Alonte.

*Tab. 4 - Purifying performance of constructed floating wetlands in the Municipality of Alonte.*

Elementi	Abbattimento (%)	Limite di legge (d.lgs 152/2006) (mg/L)	Frequenza di superamento (%)	
			in	out
COD	23,7	≤ 160	0	0
TP	35,2	≤ 10	20	0
NH <sub>4</sub> -N	69,9	≤ 15	0	0
NO <sub>3</sub> -N	70,9	≤ 20	30	0

Tab. 5 - Prestazioni depurative di bacini con e senza flottanti nel periodo immediatamente successivo all'installazione (da Mietto *et al.*, 2013).

*Tab. 5 - Purifying performance with and without floating system immediately after the installation (from Mietto et al., 2013).*

Elementi	Unità di misura	In	Con flottanti	Senza flottanti
N totale	mg/L	35,7	23,6	26,0
N nitrico	mg/L	3,7	0,2	0,7
N ammoniacale	mg/L	25,1	20,0	18,7
Fosforo totale	mg/L	4,9	4,6	5,0
COD	mg/L	155	68	74
BOD <sub>5</sub>	mg/L	45	15	15
<i>Escherichia coli</i>	CFU/100mL	74.000	3.600	6.000

## Conclusioni

Le conoscenze e le applicazioni esistenti sul territorio nazionale consentono di ritenere ormai superata la fase pionieristica e di annoverare a pieno titolo la fitodepurazione fra le soluzioni affidabili e praticabili per risolvere una vasta gamma di problematiche di inquinamento idrico.

La fitodepurazione, infatti, presenta grande versatilità e può adattarsi a situazioni estremamente differenziate per quanto concerne tipo di reflu, dinamica delle portate nel corso dell'anno, polifunzionalità, risparmio energetico, sostenibilità.

Le applicazioni più frequenti riguardano il trattamento dei reflui domestici, ma ormai nel nostro Paese esistono impianti operanti nell'industria lattiero casearia, nelle cantine, per il trattamento di percolato di discarica, delle acque di runoff autostradale, di alcuni insediamenti industriali, di aree di servizio e centri commerciali. Nel settore primario sono diffusi impianti per la depurazione delle acque di drenaggio agricolo, ma anche per il trattamento dei reflui zootecnici. L'impianto di fitodepurazione si adatta alle condizioni del sito in cui viene realizzato, al punto che non esiste un impianto uguale all'altro. Anche a parità di carico da trattare gli impianti possono differire per forma, dimensioni, substrato, vegetazione e



molti altri parametri progettuali e della gestione. Ciò rende necessaria professionalità sia da parte del progettista che dell'esperto di gestione della vegetazione.

Molti impianti di fitodepurazione si adattano alle variazioni di portata nel corso dell'anno e possono fungere da serbatoi temporanei di acqua. Questo li rende particolarmente interessanti sia per mitigare gli eventi di piena, ormai drammaticamente frequenti e distribuiti sul nostro territorio, sia per l'accumulo finalizzato al riuso (es. irriguo, antincendio).

La multifunzionalità è un valore aggiunto dei sistemi di fitodepurazione, in quanto essi sono in grado di offrire prestazioni ancillarie in aggiunta al miglioramento qualitativo dell'acqua. Si pongono così le condizioni affinché il costo dell'impianto possa essere ripartito su più comparti e l'investimento divenga più conveniente. Le zone umide sono siti ricchi di flora e di fauna, la cui composizione è condizionata da molti fattori, sia naturali che gestiti dall'uomo. La vegetazione dominante è di tipo macrofita e presenta strette relazioni con la composizione faunistica, ornitica in particolare. Gli uccelli, che qui trovano cibo e siti per la nidificazione, rappresentano la componente faunistica più appariscente, ricca e di maggiore interesse conservazionistico. La maggior parte delle specie è migratrice, ma se ne trovano anche di nidificanti e di svernanti, di notevole interesse naturalistico, tanto da essere tutelati dall'UE. Tra l'altro, gli uccelli sono fra i vertebrati più capaci di colonizzare dei biotopi creati ex-novo, come possono essere le zone umide artificiali per la fitodepurazione.

Sempre più apprezzate sono le valenze ricreative e formative di questi ambienti; soprattutto le zone umide di maggiore estensione sono frequentemente meta di visitatori che trovano occasioni di svago e di esercizio fisico, di appassionati naturalisti, attratti soprattutto dalla ricchezza di uccelli, di scolaresche che possono affrontare sul campo le problematiche della conservazione del patrimonio idrico e della natura.

Come visto, le zone umide di grande estensione possono dare contributi significativi nel campo delle bio-energie. Si tratta, di volta in volta, di individuare e utilizzare le specie vegetali più adatte a fornire biomasse che potranno essere destinate alla combustione o alla fermentazione.

I letti vegetati, date le dimensioni inferiori e la maggiore presenza di elementi artificiali, hanno una valenza naturalistica inferiore a quella dei sistemi di maggiore scala spaziale, ma possono fornire grandi quantità di biomassa, che può essere raccolta anche più volte l'anno. Si integrano pertanto molto bene con la filiera delle energie rinnovabili. Non va dimentica-

ta, inoltre, la funzione estetica ottenibile con il ricorso a piante ornamentali.

A tutto questo, si aggiunge che i sistemi naturali di depurazione idrica possiedono anche una grande valenza sociale e di accettazione da parte della popolazione. Trattandosi, in molti casi di impianti di dimensioni medio piccole, se non addirittura domestici, il cittadino li percepisce più vicini a sé e diviene più partecipe delle problematiche dell'inquinamento e del suo controllo.

Conseguire una o più funzioni ancillarie, tuttavia, richiede un attento e competente lavoro di pianificazione. Fin dall'inizio, infatti, bisogna avere chiari gli obiettivi da conseguire, le strategie da attuare e le scelte operative. E' avvenuto, ad esempio, che in wetland superficiali si siano ricavati isolotti per favorire la nidificazione degli uccelli, ma che gli stessi isolotti siano stati collegati alla terraferma con ponticelli per consentire l'accesso ai visitatori, che, ovviamente, rappresentano una fonte di grande disturbo.

Nella fitodepurazione i processi di degradazione degli inquinanti sono sostenuti dall'energia solare che alimenta il funzionamento dell'ecosistema; i fabbisogni di energia ausiliaria sono limitati per lo più all'azionamento di pompe e sono incomparabilmente più bassi di quelli richiesti dai sistemi convenzionali di depurazione. Analogamente sono inferiori i costi di manutenzione.

Nonostante quanto detto, le potenzialità della fitodepurazione sono ancora largamente inesprese ed esistono ampi margini di sviluppo, che coinvolgono anche professionalità nel settore delle produzioni vegetali. Finora la stragrande maggioranza degli impianti è stata realizzata con canna palustre, e solo da pochi anni progettisti e impiantisti hanno iniziato a utilizzare specie diverse, anche con finalità ornamentali. Ci sono quindi presupposti per studiare e proporre nuove specie, sistemi di propagazione e di distribuzione. Nuove frontiere possono poi riguardare lo sviluppo di tetti verdi o pareti fitodepuranti, in piena sintonia con i moderni concetti del Blue Green Dream ([www.bgd.org.uk](http://www.bgd.org.uk)) e della gestione integrata della risorsa idrica.

## Riassunto

La fitodepurazione è considerata un sistema di depurazione adeguato per piccole e medie comunità e laddove ci sia un'ampia fluttuazione di utenti (località turistiche, centri commerciali, ecc.). Il lavoro passa in rassegna le caratteristiche dei diversi sistemi di fitodepurazione, illustra il ruolo della vegetazione e le specie di maggiore interesse. Vengono quindi presen-

tati alcuni esempi applicativi relativi a differenti casistiche nel Sud e Nord Italia [impianti realizzati per affinare le acque reflue provenienti dall'IKEA store di Catania, impianti con sistemi flottanti in diverse località del Veneto] che hanno evidenziato buone prestazioni dei letti filtranti in termini di efficienza di rimozione degli inquinanti chimico-fisici e microbiologici, garantendo il rispetto degli standard qualitativi imposti dalla normativa italiana per lo scarico su corpi idrici superficiali.

**Parole chiave:** sistemi a flusso subsuperficiale orizzontale, sistemi a flusso subsuperficiale verticale, sistemi a flusso superficiale, sistemi flottanti, efficienza di rimozione.

## Bibliografia

- BARBAGALLO S., CIRELLI G.L., MARZO A., MILANI M., TOSCANO A., 2011. *Hydraulic behaviour and removal efficiencies of two H-SSF constructed wetlands for wastewater*. Water Sci. and Techn., 64: 1032-1039.
- BARBAGALLO S., CIRELLI G.L., INDELICATO S., 2001. *Wastewater reuse in Italy*. Water Sci. and Techn., 43(10): 43-50.
- BARBAGALLO S., CIRELLI G.L., MARZO A., TOSCANO A., 2012. *Progettazione e gestione dei sistemi di fitodepurazione per il trattamento delle acque reflue urbane di piccoli e medi insediamenti*. QUADERNI CSEI Catania III serie vol. 10.
- BORIN M., 2003. *Fitodepurazione - Soluzioni per il trattamento dei reflui con le piante*. Il Sole 24 ore, Bologna, 198 p.
- BORIN M., BARBERA A.C., MILANI M., MOLARI G., ZIMBONE S.M., TOSCANO A., 2013. *Biomass production and N uptake of Giant reed under high water and N input in Mediterranean environments*. Eur. J. Agron., 51: 117-119.
- BORIN M., BONAITI G., SANTAMARIA G., GIARDINI L., 2001. *A constructed surface flow wetland for treating agricultural waste waters*. Water Sci. and Techn., 44: 523-530
- BORIN M., MAUCIERI C., MIETTO A., PAVAN F., POLITEO M., SALVATO M., TAMIAZZO J., TOCCHETTO D., 2014. *La fitodepurazione per il trattamento di acque di origine agricola e di reflui zootecnici*. Quaderno progetto AQUA, Veneto Agricoltura, ISBN 978-88-6337-107-9, 44 p
- BORIN M., MILANI M., SALVATO M., TOSCANO A., 2011. *Evaluation of Phragmites australis (Cav.) Trin. evapotranspiration in Northern and Southern Italy*. Ecol. Eng. 37(5): 721-728
- BORIN M., MOLARI G., TOSCANO A., ZIMBONE S.M., 2009. *Production and energy transformation of herbaceous biomasses irrigated with treated wastewater - First results*. In: De Santi G.F., Dallemand J.F., Ossenbrink H., Grassi A., Helm P. (Eds.) Proc. 17th European Biomass Conference and Exhibition, 29 June-3 July, Hamburg, Germany: 552-556.
- BORIN M., RAZZARA S., ZUIN M.C., 1999. *Piante ornamentali per sistemi di fitodepurazione domestica*. Acer, 2: 38-43
- BORIN M., SALVATO M., 2012. *Effects of five macrophytes on nitrogen remediation and mass balance in wetland mesocosms*. Ecol. Engin., 46: 34-42.
- BORIN M., TOCCHETTO D., 2006. *Ornamental plants in sub-surface horizontal flow treatment system*. Proc. 10th Int. Conf. On Wetland Systems for Water Pollution Control, Lisbon, Portugal: 1085-1092
- BRIX H., 1993. *Macrophyte-mediated oxygen transfer in wetlands: transport mechanisms and rates*. In: G.A. Moshiri, Constructed wetlands for water quality improvement, CRC Press, 391-400
- BRIX H., 1997. *Do macrophytes play a role in constructed treatment wetlands?* Water Sci. and Techn., 35(5): 11-17.
- CHAMBERS P. A., LACOUL, P. K., MURPHY J., THOMAZ S. M., 2008. *Global diversity of aquatic macrophytes in freshwater*. Developments in Hydrobiology, 198, 9-26
- CIRELLI G., 2003. *I trattamenti naturali delle acque reflue urbane*. Esselibri - Simone. 112 p.
- CIRELLI G.L., CONSOLI S., DI GRANDE V., MILANI M., TOSCANO A., 2007. *Subsurface constructed wetlands for wastewater treatment and reuse in agriculture: five years of experiences in Sicily, Italy*. Water Sci. and Techn., 56(3): 183-191.
- COSSU R., BORIN M., LAVAGNOLO M.C., BIGON E., SPINATO P., 2001. *A new approach to integrated wastewater and solid waste management*. In: Christiansen, Cossu e Stegmann (eds.): Sardinia 2001, 8th Intern. Waste management and landfill symposium, CISA, Envir. San. Engineer. Centre: 237-246
- DE STEFANI G., TOCCHETTO D., SALVATO M., BORIN M., 2011. *Performance of a floating treatment wetland for in-stream water amelioration in NE Italy*. Hydrobiologia, 674(1): 157-167.
- FLORIO G., BORIN M., CIRELLI G.L., MILANI M., ALBERGO A., 2012. *Production of Arundo donax L. and Miscanthus x giganteus Greef et Deu. to obtain second generation ethanol in two Italian environments*. In: Stoddard F.L. and Makela P. (Eds.) Abstracts of ESA12, 12th Congress of the European Society for Agronomy, Helisinky, Finland: 20-24.
- FONDER N., HEADLEY T. 2013. *The taxonomy of treatment wetlands: A proposed classification and nomenclature system*. Ecological Engineering 51: 203-211
- HAWKE. C.J., JOSE. P.V., 1996. *Reedbed management for commercial and wildlife interests*. RSPB management guides, NHBS, UK
- ISPRA (Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale) 2012. *Guida tecnica per la progettazione e gestione dei sistemi di fitodepurazione per il trattamento delle acque reflue urbane*. pp 182
- IWA, 2000. *Constructed wetlands for pollution control: processes, performance, design and operation*. Scientific and Technical Report n° 8, IWA Publishing, London, UK
- KADLEC R.H., KNIGHT R.L. 1996. *Treatment wetlands*. Lewis Publishers, New York, USA.
- KADLEC, R.H., WALLACE, S.D., 2009. *Treatment Wetlands (second edition)* CRC Press/Lewis Publishers, Boca Raton, Florida, 1016 pp
- MASI F., MARTINUZZI N., 2007. *Constructed wetlands for the Mediterranean countries: hybrid systems for water reuse and sustainable sanitation*. Desalination, 215: 44-55
- MIETTO A., BORIN M., SALVATO M., RONCO P., TADIELLO N., 2013. *TECH-IA floating system introduced in urban wastewater treatment plants in Veneto Region - Italy*. Water Sci. and Techn., 68.5, 1144-1150.
- PAPPALARDO S.E., PROSDOCIMI M., TAROLLI P., BORIN M., 2014. *Assessment of energy potential from wetland plants along the minor channel network in agricultural floodplain*. Environ. Sci. Pollut. Res., 2479-90.
- PIGNATTI S., 1997. *Flora d'Italia*. Volume terzo. Bologna: Edagricole - Edizioni Agricole della Calderini s.r.l.
- POLITEO M., BORIN M., MILANI M., TOSCANO A., MOLARI G., 2011. *Production and energy value of phragmites australis obtained from two constructed wetlands*. In Faulstich M., Ossenbrink H., Dallemand J.F., Baxter D., Grassi A. and Helm P. (Eds.): Proc. 19th European Biomass Conference and Exhibition, 6-10 June 2011, Berlin, Germany: 544-547.

- SPEICHERT G., SPEICHERT S., 2004. *Encyclopedia of water garden plants*. Portland: Timber Press, Inc.
- TANNER C.C., 2001. *Plants as ecosystem engineers in subsurface flow treatment wetlands*. *Water Sci. Techn.*, 44(11-12): 9-19.
- US ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, 2000. *Constructed wetlands treatment of municipal wastewaters*. EPA/625/R-99/010, Washington, USA.
- VYMAZAL J., 2011. *Plants used in constructed wetlands with horizontal subsurface flow: a review*. *Hydrobiologia*, 674: 133-156.
- VYMAZAL J., 2013. *Emergent plants used in free water surface constructed wetlands. A review*. *Ecological Eng.*, 61: 582-592
- VYMAZAL J., 2014. *Constructed wetlands for treatment of industrial wastewaters: A Review*. *Ecological Eng.* 73: 724-751.
- WALLACE S.D., KNIGHT R.L., 2006. *Small-scale constructed wetland wastewater treatment systems: Feasibility, design, and O&M requirements, Final Report*. Project 01-CTS-5. Water Environment Research Foundation (WERF), Alexandria, VA.
- WETZEL R.G., 2001. *Limnology. Lake and River Ecosystems*. Third Edition, Academic Press: San Diego, California.