AQUA

Achieving good water quality status in intensive animal production areas

LIFE09 ENV/IT/000208

VENETO AGRICOLTURA
Azienda Regionale per i settori Agricolo, Forestale e Agro-Alimentare

LA FITODEPURAZIONE PER IL TRATTAMENTO DI ACQUE DI ORIGINE AGRICOLA E DI REFLUI ZOOTECNICI

LIFE09 ENV/IT/000208 - AQUA

Coordinatore

CRPA

Progetto Finanziato dall'Unione Europea nel Programma Life Plus Ambiente

Partner

FCSR · CRA Consiglio per la ricerca e la sperimentazione in agricoltura · ipla istituto per le piante da legno e l'ambiente ipla spa, società controllata dalla Regione Piemonte · ERSAF Ente regionale per i servizi all'agricoltura e alle foreste · Veneto Agricoltura, Azienda Regionale per i settori Agricolo, Forestale e Agro-Alimentare · ersa Agenzia regionale per lo sviluppo rurale, Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia

Cofinanziatori

Regione Piemonte · Regione Lombardia · Regione Emilia-Romagna · Regione del Veneto · iren · HERA · AGCO Your Agriculture Company

AQUA

Achieving good water quality status in intensive animal production areas

LIFE09 ENV/IT/000208

VENETO AGRICOLTURA
Azienda Regionale per i settori Agricolo, Forestale e Agro-Alimentare

LA FITODEPURAZIONE PER IL TRATTAMENTO DI ACQUE DI ORIGINE AGRICOLA E DI REFLUI ZOOTECNICI

Coordinatore

CRPA

Progetto Finanziato dall'Unione Europea nel Programma Life Plus Ambiente

Partner

ECSRS · CRA Consiglio per la ricerca e la sperimentazione in agricoltura · ipla istituto per le piante da legno e l'ambiente ipla spa società controllata dalla Regione Piemonte · ERSAF Ente regionale per i servizi all'agricoltura e alle foreste · Veneto Agricoltura Azienda Regionale per i settori Agricolo, Forestale e Agro-Alimentare · ersa Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia Agenzia regionale per lo sviluppo rurale

Cofinanziatori

Regione Piemonte · Regione Lombardia · Regione Emilia-Romagna · Regione del Veneto · iren · HERA · AGCO Your Agriculture Company

Progetto Finanziato dall'Unione Europea nel Programma Life Plus Ambiente
Organismo responsabile dell'informazione: **Veneto Agricoltura**
Coordinatore: **Centro Ricerche Produzioni Animali C.R.P.A. S.p.A.**

Coordinamento per il Veneto: Arduin M., Sartori A. - *Veneto Agricoltura*

Coordinamento: Maurizio Borin - *DAFNAE*

Elaborazioni e testi:
Maurizio Borin - *DAFNAE*
Carmelo Maucieri - *DAFNAE*
Anna Mietto - *DAFNAE*
Francesca Pavan - *DAFNAE*
Marco Politeo - *DAFNAE*
Michela Salvato - *P.A.N. s.r.l.*
Jessica Tamiazzo - *DAFNAE*
Davide Tocchetto - *P.A.N. s.r.l.*

Foto:
Maurizio Borin
Francesca Pavan
Michela Salvato
Davide Tocchetto
P.A.N. - Piante, Acque, Natura, s.r.l.

Ringraziamenti:
P.A.N. - Piante, Acque, Natura, s.r.l.
Spin off dell'Università di Padova
Via Croce Rossa, 112 - Padova
e-mail: info@panspinoff.com

Pubblicazione edita da:
Veneto Agricoltura
Azienda Regionale per i Settori Agricolo, Forestale ed Agroalimentare
Viale dell'Università, 14 - 35020 Legnaro (PD)
Tel. 049 8293711 - Fax 049 8293815
e-mail: ricerca@venetoagricoltura.org
www.venetoagricoltura.org

Realizzazione editoriale:
Veneto Agricoltura
Azienda Regionale per i Settori Agricolo, Forestale ed Agroalimentare
Coordinamento editoriale:
Silvia Ceroni - *Settore Divulgazione Tecnica, Formazione Professionale ed Educazione Naturalistica*
Federica Mazzuccato - *Edizioni MB srl - Rovigo*
Via Roma, 34 - 35020 Legnaro (PD)
Tel. 049 8293920 - Fax 049 8293909
e-mail: divulgazione.formazione@venetoagricoltura.org

È consentita la riproduzione di testi, tabelle, grafici ecc. previa autorizzazione da parte di Veneto Agricoltura, citando gli estremi della pubblicazione.

Finito di stampare nel mese di marzo 2014
presso TEXT di Crivellaro Massimo e Roberto - via Cristofori, 1 /a - z.i. Vigorovea
35020 S. Angelo di Piove di Sacco (PD) - Fax 049 9714507 - e-mail: info@digitaltext.it

SOMMARIO

PREFAZIONE ..... pag. 4

1. AGRICOLTURA E INQUINAMENTO IDRICO ..... » 5

2. IMPIANTI DI FITODEPURAZIONE ..... » 8

2.1 Impianti a flusso superficiale ..... » 8
2.1.1 Bacini con piante radicate ..... » 8
2.1.2 Sistemi flottanti ..... » 11

2.2 Impianti a flusso sotto superficiale ..... » 14
2.2.1 Flusso sotto superficiale orizzontale ..... » 14
2.2.2 Flusso sotto superficiale verticale ..... » 16
2.2.3 Vasche a scarico zero ..... » 18

2.3 Impianti ibridi e intensificati ..... » 19

3. LA VEGETAZIONE ..... » 21

3.1 Funzioni della vegetazione ..... » 21

3.2 Specie utilizzate ..... » 22

3.3 Trapianto e gestione della vegetazione ..... » 24

4. PRESTAZIONI DELLA FITODEPURAZIONE A SCALA MONDIALE ..... » 27

4.1 Caratteristiche degli impianti ..... » 27

4.2 Prestazioni depurative ..... » 29

4.3 Considerazioni ..... » 31

5. IMPIANTI E MONITORAGGI NEL VENETO ..... » 33

5.1 Impianti di fitodepurazione a flusso superficiale ..... » 33
5.1.1 Impianto di fitodepurazione a flusso superficiale per il trattamento di acque di drenaggio agricolo sito nell'azienda sperimentale "L. Toniolo" dell'Università di Padova ..... » 33
5.1.2 Area umida ricostruita di "Cà di Mezzo" per la riduzione nelle acque di bonifica dell'inquinamento di origine agricola ..... » 35

5.2 Impianti di fitodepurazione a flusso sotto superficiale ..... » 35
5.2.1 Impianto di fitodepurazione ibrido per il trattamento di reflui suinicoli ..... » 35
5.2.2 Impianto pilota ibrido di fitodepurazione per il trattamento di digestato ..... » 39

5.3 Emissioni di gas serra da impianti di fitodepurazione ..... » 41

6. CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE ..... » 42

7. BIBLIOGRAFIA CONSULTATA ..... » 43

PREFAZIONE

L'agricoltura impiega il 70% dell'acqua dolce disponibile sul pianeta e questo dato è destinato ad aumentare al crescere della popolazione e del benessere. Il fabbisogno di acqua è mutevole nello spazio e nel tempo ed è più marcato nelle condizioni in cui c'è meno disponibilità: d'estate piuttosto che d'inverno, nei climi aridi piuttosto che in quelli umidi.

Durante la sua permanenza all'interno del territorio agricolo, l'acqua subisce una serie di trasformazioni delle sue caratteristiche. Può cedere sostanze e arricchirsi di altre, con conseguenze talora negative, talora positive per la sua qualità. Il territorio agricolo può dunque agire da sorgente diffusa di inquinamento o da filtro, restituendo acque migliori di quelle in ingresso.

Il settore agricolo è dunque chiamato, in sinergia con gli altri attori coinvolti nell'uso e nella gestione dell'acqua, a contribuire per razionalizzare l'utilizzo, ridurre gli sprechi, preservare la qualità.

Nella Water Economy l'impegno congiunto del settore pubblico e di quello privato, ciascuno presidiando e ottimizzando il proprio ruolo, è fondamentale: il pubblico tutelando la risorsa e garantendo a tutti il diritto fondamentale ad averne accesso, il privato sviluppando tecnologie e adottando pratiche che aumentano l'efficienza, minimizzando gli sprechi.

Il progetto AQUA ha l'obiettivo di supportare l'innovazione dei processi produttivi delle imprese del settore agro-alimentare sul piano della riduzione dei consumi e degli sprechi idrici e della tutela della qualità. In questo contesto, la fitodepurazione per il trattamento delle acque di origine agricola e dei reflui zootecnici rappresenta un'opzione interessante per controllare queste sorgenti di inquinamento. Al tempo stesso i sistemi di fitodepurazione, grazie alla loro versatilità e polifunzionalità, possono supportare molti servizi ecosistemici dell'agricoltura.

1. AGRICOLTURA E INQUINAMENTO IDRICO

I fenomeni di inquinamento idrico di origine agricola hanno alcuni aspetti peculiari che ne caratterizzano le manifestazioni e le possibilità di controllo:

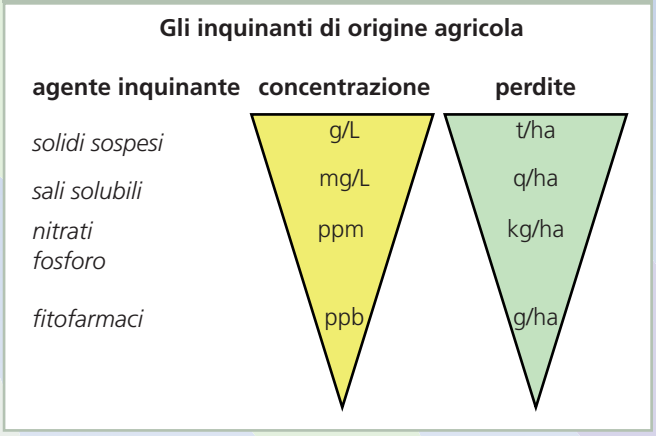
- origine diffusa: le fonti agricole vengono comunemente definite non-point o diffuse, distinguendole da quelle puntuali (es. impianti industriali o collettori fognari) poiché esse si originano dalle intere superfici coltivate e non in punti facilmente individuabili;
- mancanza di semplici relazioni causa-effetto: i fenomeni di rilascio di nutrienti e prodotti chimici non sono spiegabili solo conoscendo gli apporti (ad esempio non è sufficiente conoscere le dosi di fertilizzanti per sapere le possibili perdite di nutrienti), ma dipendono da complesse relazioni che si instaurano nel sistema pianta-suolo-atmosfera, nonché dalle tecniche colturali;
- impossibilità di governare completamente il fenomeno: solo una parte dei fenomeni di inquinamento dipende da variabili antropiche, mentre i fattori più importanti sono generalmente incontrollabili e fra questi si ricorda in particolare l'andamento meteorologico;
- molteplicità dei soggetti: la componente antropica del fenomeno, a livello territoriale, è determinata dalla combinazione degli effetti di una miriade di soggetti, gli agricoltori, ognuno dei quali gestisce porzioni relativamente piccole del sistema complessivo.

Il processo di inquinamento dei corpi idrici si realizza attraverso diverse modalità, a seconda che si tratti di corpi idrici superficiali o profondi. Passaggio comune è la genesi, che prende luogo all'interno degli appezzamenti coltivati. Segue il trasporto, che avviene secondo flussi prevalentemente orizzontali nelle zone di bassa pianura, poco permeabili e organizzate con una rete più o meno fitta di fossi, scoli e collettori che attraversano il territorio agricolo; il trasporto avviene invece con un movimento verticale nelle aree di alta pianura, più permeabili. La terza fase è la consegna al corpo idrico recettore: esso può essere un corso d'acqua principale e, in ultima analisi, il mare nel primo caso o un acquifero profondo, generalmente di qualità pregiata, nel secondo.

I principali agenti inquinanti di origine agricola (figura 1) sono:

- i sedimenti, prodotti dall'azione erosiva delle acque di ruscellamento superficiale. Hanno un duplice effetto sull'ambiente: diretto, alterando l'ecologia dei corpi d'acqua a seguito di una maggiore torbidità che limita la trasmissione della luce; indiretto, trasportando sostanze adsorbite quali fosforo e fitofarmaci;
- i sali, apportati con la fertilizzazione e derivanti dall'evoluzione della sostanza organica, che aumentano la conducibilità elettrica dell'acqua;
- i nutrienti delle piante, principalmente azoto e fosforo. Sono sostanze metabolizzabili, che entrano nei processi fisiologici dell'ambiente e sono responsabili del diffuso fenomeno dell'eutrofizzazione;
- i fitofarmaci, che includono un'ampia varietà di sostanze organiche di sintesi, utilizzate per il controllo delle malerbe, degli insetti parassiti delle piante, dei funghi fitopatogeni, ecc. Sono sostanze, normalmente di difficile metabolizzazione, che spesso esercitano un'azione tossica nei confronti degli organismi viventi diversi da quelli da controllare. Vengono rilasciati intenzionalmente nell'ambiente a basse dosi, anche se a volte possono avvenire sversamenti accidentali che determinano un rilascio puntiforme in elevate quantità o in elevate concentrazioni.

Figura 1 – Principali inquinanti delle acque di origine agricola.



Considerando anche il comparto zootecnico, il suo impatto sulla qualità delle acque assume connotazioni diverse, essa è più facilmente assimilabile a una fonte puntiforme di rilascio di inquinanti. I reflui possono originare problemi legati alla presenza di elementi nutrizionali, di carica batterica, di metalli pesanti e di sali solubili.

Il territorio veneto, che si estende per una superficie di 18.399 km^2 (6% del territorio nazionale) suddivisa in 581 comuni (7,2% dei comuni italiani), è per il 56% pianeggiante, per il 29% montano e per il 15% collinare. L'area interessata è percorsa da numerosi fiumi e si caratterizza per la presenza di estese lagune costiere. Gli ambienti naturali si concentrano soprattutto in collina e in montagna, mentre gli insediamenti produttivi si distribuiscono essenzialmente nell'area centrale della regione. Più della metà del territorio regionale è rappresentato da zone agricole, una parte rilevante, circa il 30%, è coperto da boschi e/o ambienti semi-naturali, mentre più del 5% del territorio è costituito da corpi idrici e zone umide. Il rimanente territo-

rio è a destinazione urbana, industriale ed infrastrutturale. Le superfici agricole occupano il 52% dell'intero territorio veneto pari a 1.171.600 ha in totale, di cui 832.200 di superficie agricola utilizzata (SAU) destinata per il 65,70% a colture seminative, 0,20% a orti familiari, 19,80% a prati permanenti e 14,30% per culture legnose (Programma di Sviluppo Rurale per il veneto 2007-2013).

In Veneto molte zone agricole presentano un'intensa concentrazione di allevamenti, di conseguenza vi è una produzione elevata di reflui zootecnici, che in ottemperanza alle attuali disposizioni legislative devono trovare percorsi di valorizzazione tecnica, economica ed ambientale alternativi all'utilizzazione agronomica.

Un corretto utilizzo agronomico dei reflui zootecnici deve tenere conto di molteplici fattori tra cui il contenuto di elementi nutritivi (principalmente azoto e fosforo), l'omogeneità della distribuzione, le modalità ed i tempi di spandimento in modo da non compromettere il potere fertilizzante e da non creare problemi a livello ambientale.

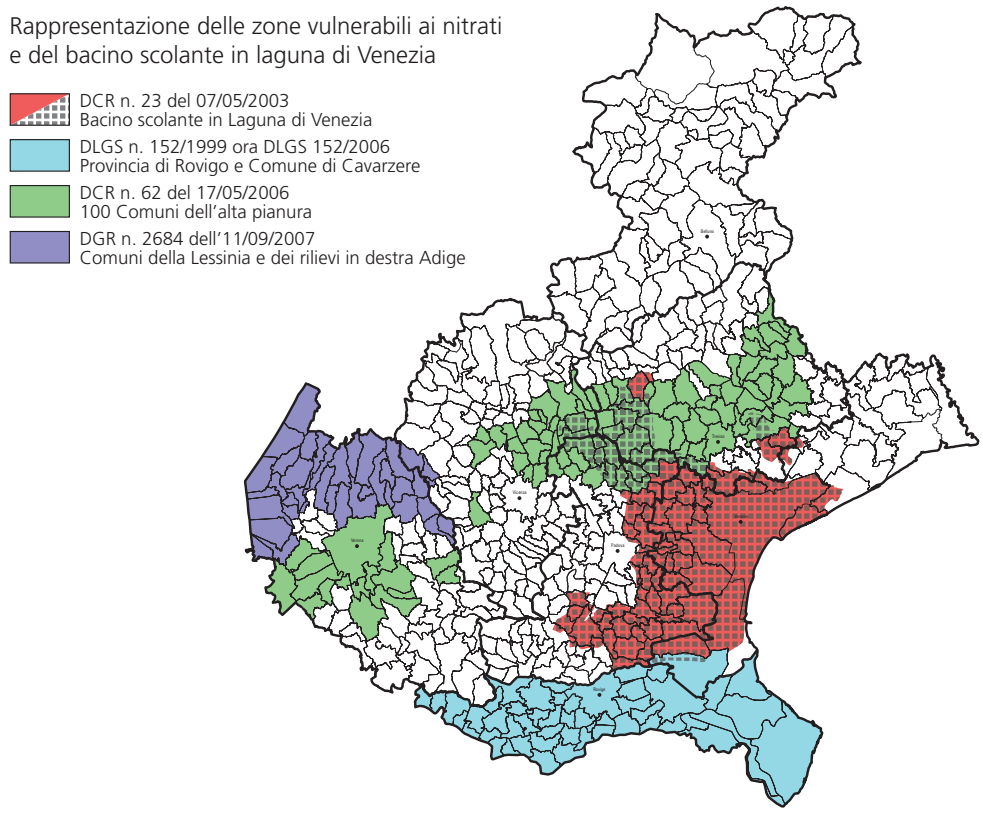
Nel territorio regionale sono state individuate le zone vulnerabili rappresentate in figura 2. La consistenza zootecnica sul territorio regionale, riferendosi alle stime più recenti è di circa 1.300.000 capi, di cui il 64 % sono bovini, il 28,6% suini ed il 4% ovicaprini. Si valutano, inoltre, oltre 60,5 milioni di avi-cunicoli. (www.riducareflui.venetoagricoltura.org)

La quantità totale di reflui zootecnici prodotta a livello regionale è deducibile a partire dalla consistenza zootecnica e si stima sia di 6,5 milioni di m^3 di liquame e di 4,8 milioni di tonnellate di letame. La provincia con maggiore produzione di deiezioni è Verona (29,5% del liquame e 29,6% del letame prodotti in regione) seguita da Treviso (19,1% di liquame e 16,9% di letame), Vicenza (18,4% e 17,1%) e Padova (17,4% e 19,3%).

Il Programma straordinario di intervento per l'attuazione della direttiva nitrati nel Veneto ha individuato, a livello provinciale e di singolo comune, gli ambiti territoriali in cui gli allevamenti producono un surplus di azoto, rispetto ai limiti previsti per le zone vulnerabili e non vulnerabili dalla direttiva comunitaria e dal decreto ministeriale. Dal Programma emerge che tale eccedenza ammonta a circa 14.500 t in provincia di Verona, a poco più di 4.000 t in provincia di Padova e a circa 3.500 nelle provincie di Treviso e Vicenza.

Per quel che riguarda invece i dati a livello provinciali riferiti alle singole specie, emerge che il 60% circa del surplus di azoto regionale deriva da allevamenti bovini, interessando, in modo decrescente, principalmente le province di Verona, Vicenza, Padova e Treviso. Il 28% concerne invece il settore avicolo, concentrato per oltre il 65% nella sola provincia di Verona. Il 10% del surplus regionale riguarda, infine, il settore suinicolo che, per oltre la metà, si colloca in provincia di Verona.

Figura 2 – Rappresentazione delle zone vulnerabili ai nitrati del bacino scolante in laguna di Venezia.



I reflui zootecnici sono assimilabili, da un punto di vista legislativo, agli effluenti di allevamento (E.A.) definite nel Dlgs 11 maggio 1999 n. 152 e successive modifiche ed integrazioni, come "le deiezioni del bestiame o una miscela di lettiera e di deiezione di bestiame, anche sotto forma di prodotto trasformato".

Negli allevamenti di suini, bovini e avicoli caratterizzati da specifiche tipologie strutturali e/o gestionali, i reflui zootecnici prodotti sono costituiti da liquami. In linea di massima, questi ultimi, presentano un contenuto in sostanza secca (s.s.) inferiore al 20%. La loro composizione chimica e le quantità prodotte per capo variano con la specie animale allevata, lo stadio fisiologico dell'animale, il regime alimentare e il tipo di stabulazione.

I liquami suini, con s.s. compresa tra 0,5 e 2%, sono prodotti in allevamenti con pavimentazione piena e pulizia giornaliera con acqua. Il contenuto in s.s. dei E.A. aumenta passando a pavimento parzialmente fessurato e da questo a pavimento totalmente fessurato. Analogamente il contenuto in s.s. dei E.A. aumenta passando dal lavaggio periodico con acqua, all'accumulo in fosse profonde, alla pulizia meccanica con raschiatore, alla pulizia per ricircolo dei liquami.

I liquami bovini sono suddivisi in E.A. prodotti da allevamenti di vitelli a carne bianca in box singolo con pulizia ad acqua (s.s. compresa tra 0,5 e 3%), E.A. prodotti in allevamenti di bovini da carne in stabulazione libera in box su pavimento fessurato (s.s. compresa tra 7 e 10%) e E.A. prodotti in allevamenti di vacche da latte il cui contenuto in s.s. aumenta passando dagli allevamenti a stabulazione libera su cuccette con corsie di servizio a pavimentazione piena o fessurata, ad allevamenti a stabulazione fissa con pulizia delle canalette per ricircolo dei liquami (s.s. compresa tra 10 e 16%).

I liquami avicoli sono prodotti in allevamenti di galline ovaiole in batterie piramidali con canale sottostante.

La costruzione di impianti di biogas alimentati esclusivamente o parzialmente da effluenti zootecnici sta riscontrando un interesse crescente da parte degli allevatori perché incentivati dai seguenti presupposti[1]:

- un sensibile miglioramento della normativa specifica (DLgs 387 e s.m.e i.; Dgr 1349 del 03/08/2011; Dgr 1391 del 19/05/2009);
- un affinamento della tecnologia che consente l'utilizzo di deiezioni fino a qualche tempo fa considerate "non adatte", quali quelle provenienti da allevamenti avicunicoli e di vitelli da latte;
- le notevoli e continue oscillazioni dei prezzi di mercato di alcune materie prime utilizzate per l'alimentazione degli impianti quali gli insilati di cereali;
- un business plan che conferma la validità economica dell'investimento;
- non ultimo il DLgs 28/2011, attuativo della Direttiva CEE 2009/28 sulla promozione dell'uso dell'energia da fonti rinnovabili che prevede l'aumento degli incentivi:
  - per i nuovi impianti di biogas che utilizzano quasi esclusivamente deiezioni come materia prima;
  - per gli impianti che utilizzano il calore prodotto dalla cogenerazione;
  - per gli impianti che prevedono un processo di depurazione del digestato.

Il digestato ottenuto dagli impianti di biogas può essere sottoposto a processi di separazione solido/liquido che originano una frazione palabile e un chiarificato fluido. L'abbattimento dell'azoto risulta pertanto un problema irrisolto, e da risolvere, e ancor più accentuato quando si inizierà ad utilizzare deiezioni provenienti da allevamenti avicoli, cunicoli, suinicoli e di vitelli a carne bianca, che generalmente non dispongono di terreni agricoli collegati all'attività zootecnica. La riduzione dell'azoto nel digestato appare pertanto un presupposto inderogabile.

È da rilevare però che un primo vero ostacolo all'abbattimento dell'azoto, si riscontra nei vari procedimenti fisico-chimici impiegati, che risultano economicamente convenienti fino a quote di abbattimento del 70-75% del carico, divenendo poi antieconomici e di difficile gestione tecnica. Pertanto, se da un lato un abbattimento dell'azoto del 70-75% può essere sufficiente per allevamenti legati alla disponibilità di terreni agricoli quali vitelloni e vacche da latte, dall'altro anche un carico residuo del 25-30% può risultare un problema per tutti quegli allevamenti che non dispongono di terreni.

Un'ipotesi alternativa o complementare agli impianti a elevato abbattimento dell'azoto (es. osmosi, strippaggio, ozono, ecc…) può essere individuata nella fitodepurazione a valle del processo fisico-chimico che ha prodotto l'abbattimento del 70-75%. Questo consentirebbe, con limitati costi di gestione, il trattamento di affinamento delle acque parzialmente depurate. È da segnalare che l'ARPAV e le Province Venete non sono contrarie allo scarico del digestato depurato ai sensi del DLgs 152/06 in corpo idrico superficiale, purché rispetti i limiti della Tabella 3 allegata al predetto decreto.

Nei capitoli successivi il processo di fitodepurazione sarà descritto nei dettagli e saranno riportati i risultati derivanti dall'analisi della bibliografia internazionale sul monitoraggio di impianti a scala reale. Saranno inoltre riportati alcuni casi studio di impianti di fitodepurazione che trattano acqua di drenaggio agricolo, reflui zootecnici, digestato e acqua di origine agricola presenti nel territorio veneto.

[1] Contributo del Dr. Agronomo Ferdinando Pellizzari.

2. IMPIANTI 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 caratterizzano gli habitat acquatici e le zone umide naturali.
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 pretrattamento 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. Ad 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.
Le tipologie impiantistiche di base più diffuse sono classificabili come riportato in figura 3.

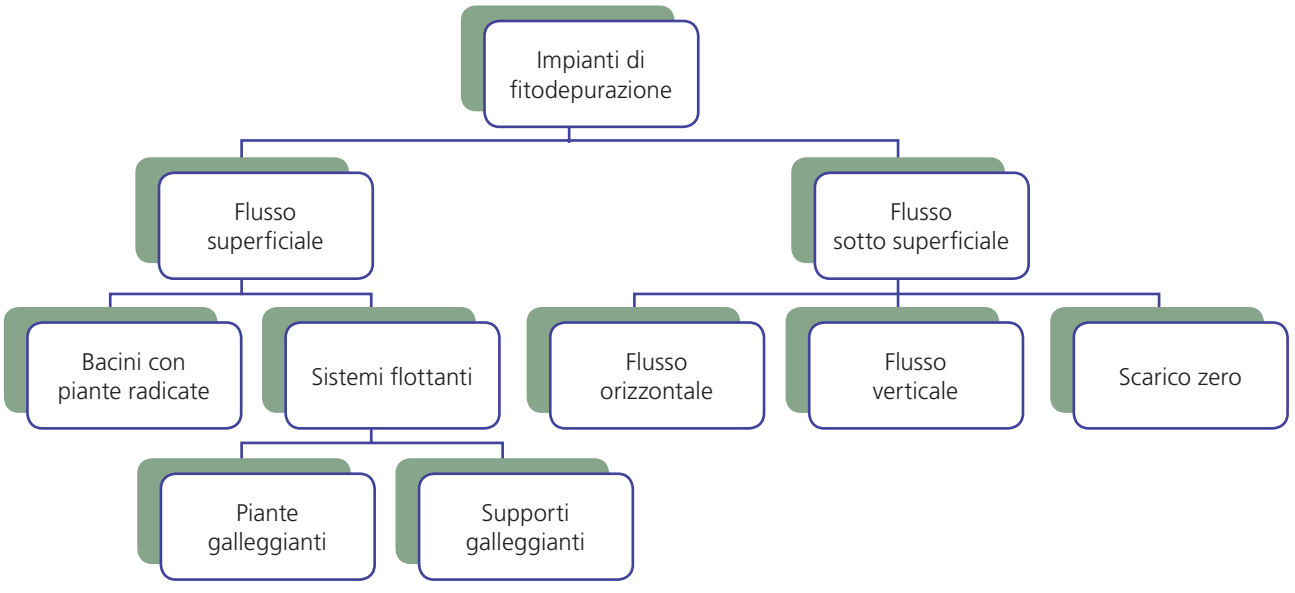
2.1 Impianti a flusso superficiale

Consistono in ambienti vegetati (bacini naturali o artificiali, corsi d'acqua) in cui la superficie dell'acqua è a contatto con l'atmosfera.

2.1.1 Bacini con piante radicate

I bacini con piante radicate (constructed wetland, FWS - free water surface, zone umide) 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 di escludere la possibilità di vita per specie vegetali non adatte a suoli umidi. La constructed wetland riporta in linea di massima i caratteri delle zone umide naturali, ma viene adattata per quanto concerne forma, dimensioni e gestione in base alla disponibilità di spazio. In presenza di ampi spazi, la zona umida viene realizzata in modo da assomigliare il più possibile a quella che si avrebbe in natura. Si tratta di un bacino scavato su suolo poco permeabile, compattato con macchine opportune nel corso delle operazioni di realizzazione e arginato, sul cui fondo viene messa a dimora la vegetazione. L'acqua deve transitare nel bacino con flusso lento e uniforme per ottenere le migliori prestazioni depurative (figura 4).
Il sistema è particolarmente adatto a depurare grandi volumi d'acqua e trova applicazioni nel trattamento di acque derivate da fiumi (nel qual caso si possono avere soluzioni in alveo o fuori alveo, figura 5), da bacini agrari o da ampi

Figura 3 – Classificazione delle tipologie di base degli impianti di fitodepurazione.



insediamenti abitativi. Le zone umide costruite possono così trovare collocazione a fianco dei corsi d'acqua da cui ricevono una parte della portata che viene restituita più a valle, a valle di laghi, prima di impianti di sollevamento in aree di bonifica e nelle zone costiere prima dello scarico in mare.
Tipicamente una zona umida artificiale dovrebbe essere costituita da tre settori (figura 6):

1. *zona di sedimentazione*, costituita da un bacino aperto e poco profondo, che funge da zona di transizione fra il corso d'acqua che drena un bacino e la zona umida. Ha lo scopo di ridurre la velocità dell'acqua che entra in modo da favorire la sedimentazione e l'accumulo delle particelle più grossolane. Eventuali piante acquatiche insediate ai bordi aumentano la capacità di stabilizzare le sponde e controllano la velocità di ingresso dell'acqua in corrispondenza di intensi eventi piovosi;
2. *zona vegetata*, densamente coperta da piante palustri funge da trappola per foglie e materiale organico e da ambiente in cui piante e microrganismi che crescono sugli steli e sul substrato assorbono e/o convertono i nutrienti in sostanze elementari e/o gassose e collaborano al trattamento delle acque di piena;

Figura 4 – Schema di bacino vegetato a flusso superficiale.

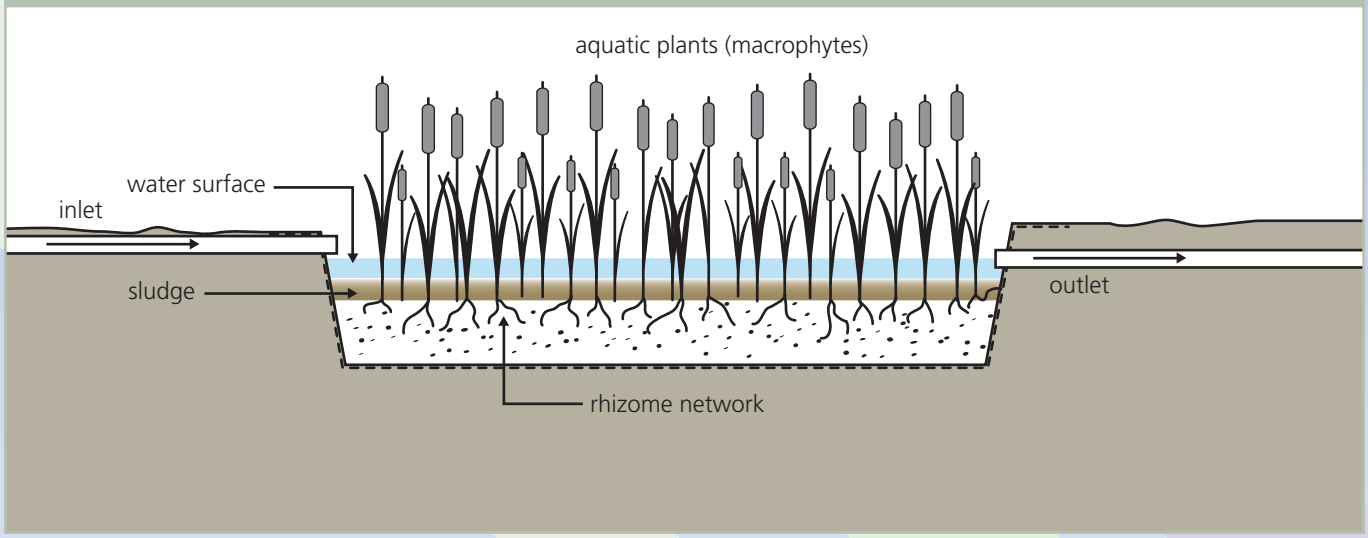


Figura 5 – Schema di bacino vegetato a flusso superficiale in alveo (sinistra) e fuori alveo (destra).

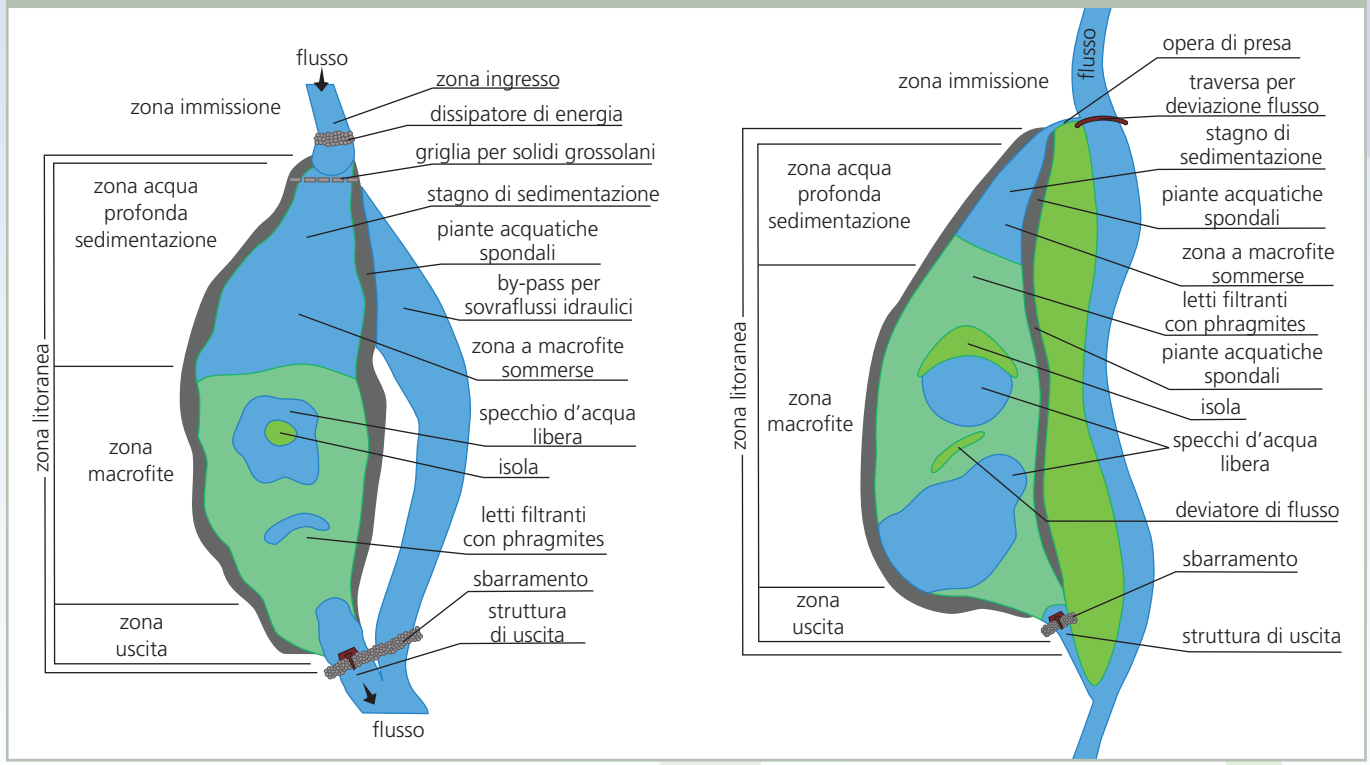
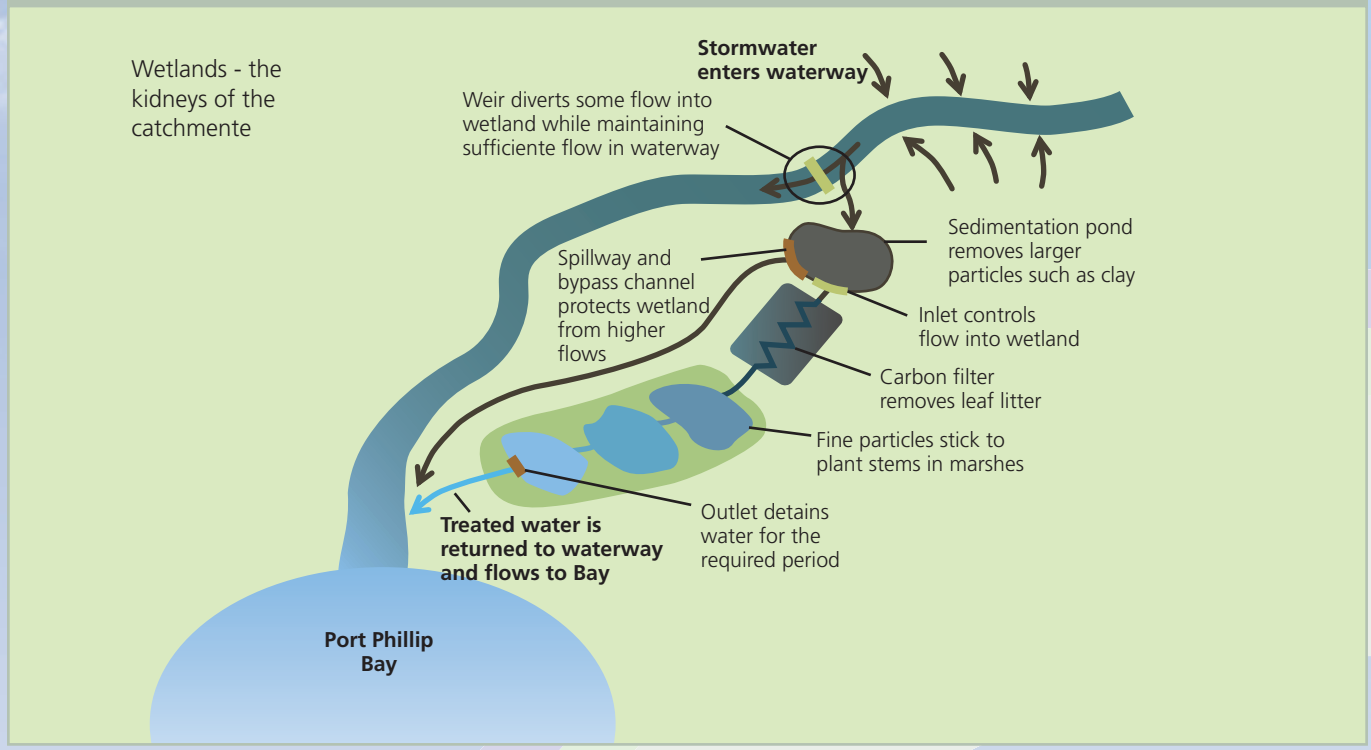


Figura 6 – Settori tipici di una zona umida a flusso superficiale.



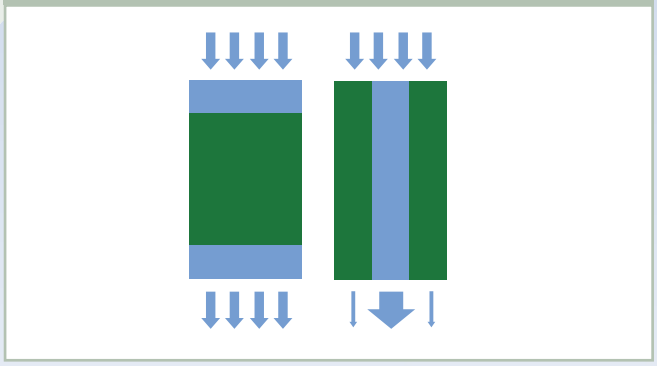
3. *zona per la ritenzione di particelle fini e di contaminanti in soluzione*. Sono bacini più profondi, per la sedimentazione e la ritenzione delle particelle più fini e per consentire l'abbattimento batterico per opera della luce solare. A causa della luminosità e della disponibilità di nutrienti, possono verificarsi fioriture algali, che, a loro volta, assorbono eventuali nutrienti ancora presenti.

La presenza di tutte le zone sopra descritte dipende dalle caratteristiche quantitative e qualitative del refluo da trattare. Spesso infatti è presente solo la zona vegetata.

Per l'efficacia depurativa della constructed wetland è fondamentale che l'acqua in transito passi attraverso zone omogenee, o completamente vegetate o completamente scoperte. La vegetazione deve essere quindi disposta trasversalmente alla direzione del flusso (figura 7). La presenza invece di situazioni in cui la vegetazione impegna le sponde e la parte centrale del bacino è libera al flusso idrico è favorevole alla creazione di un flusso preferenziale, presupposto di transito disomogeneo. Di conseguenza l'acqua che scorre più velocemente avrà un minore tempo di residenza e minori interazioni col sistema piante-microrganismi per la sua depurazione.

Frequentemente all'interno di wetland costruite o naturali ripristinate di grandi dimensioni vengono ricavate zone in cui si infittisce la vegetazione, mantenendo il flusso idrico di tipo superficiale, al fine di intensificare i processi di depurazione. Questi ambienti divengono aree naturali di pregio con l'insediamento di flora e fauna acquatica. La

Figura 7 – Schemi di disposizione corretta (a sinistra) e non corretta (a destra) della vegetazione in un bacino di fitodepurazione a flusso superficiale in relazione alla direzione del flusso idrico.



regolazione del livello dell'acqua consente di guidare la diversità dell'habitat in relazione agli obiettivi ambientali-paesaggistici voluti. Mantenendo il livello dell'acqua sempre al di sopra del terreno si permette alla vegetazione di crescere senza competizione, in presenza di pesci, anfibi e invertebrati. Interrompendo la superficie sommersa si instaurano le condizioni per una differente flora e fauna. La presenza di bacini liberi da piante incrementa la diversità dell'ambiente e favorisce condizioni per lo sviluppo di pesci, anfibi, uccelli, mammiferi e vegetazione ripariale.

Quando lo spazio è contenuto o si è in presenza di volumi ridotti di refluo da trattare, i bacini a flusso superficiale sono realizzati utilizzando vasche o teli impermeabili per evitare drenaggi con la possibilità di inquinare la falda sot-

tostante. La vasca è riempita con uno strato sufficiente di substrato per supportare la vegetazione (almeno 10-20 cm). Per tale scopo, si può usare terreno agricolo o sabbia di fiume (in rapporto ai valori granulometrici voluti e alla capacità del terreno di interagire con gli elementi chimici presenti nei reflui). Sul substrato si ancora la vegetazione e trovano supporto le colonie di microrganismi. Il livello dell'acqua viene tenuto mediamente a circa 50 cm. Nelle progettazioni più recenti questo tipo di constructed wetland viene inserito sempre più frequentemente a valle di impianti a flusso sotto superficiale per l'affinamento delle acque, conseguendo una qualità finale molto elevata. Recenti impostazioni attribuiscono agli impianti conformazioni tali da rendere i bacini a flusso superficiale dei piccoli laghi o stagni, con l'inserimento e la diffusione di flora e fauna. L'impianto, nella sua parte finale, svolge anche funzione di miglioramento ambientale e può essere sfruttato a scopo ricreativo.

Le dimensioni variano da alcuni a qualche migliaio di metri quadri, con superfici comprese tra 1 e 5 m^2 per abitante equivalente che insiste sul bacino.

I principali criteri di progettazione per la costruzione delle zone umide sono il flusso medio giornaliero delle acque reflue, il tempo di residenza, i livelli di carico organico, la profondità delle acque, i rapporti tra lunghezza e larghezza del bacino, il tempo di vita della vegetazione.

2.1.2 Sistemi flottanti

I sistemi flottanti sono realizzati utilizzando strutture di sostegno per le macrofite acquatiche non in grado di galleggiare autonomamente, ma altamente utilizzate ed efficaci per scopi depurativi.

Questo tipo di fitodepurazione permette di trattare grandi volumi di acqua in spazi relativamente contenuti ed è adatto alla depurazione in alveo in canali, fiumi e fossati, ma può essere realizzato anche all'interno di vasche opportunamente installate (figura 8).

Lo sviluppo delle radici delle piante può raggiungere e superare il metro di profondità, svolgendo un importante ruolo di filtrazione fisica oltre che di assorbimento dei nutrienti e di depurazione per effetto combinato con le comunità microbiche simbionti. Le piante non subiscono le normali oscillazioni stagionali del livello dell'acqua in quanto galleggiano su di essa e quindi, si elimina il pericolo di un periodo più o meno lungo di siccità che ne compromette la vitalità.

La fitodepurazione flottante può essere realizzata utilizzando gli elementi flottanti Tech-IA. Un elemento Tech-IA è di forma rettangolare e pesa circa 2 Kg. Presenta alta resistenza meccanica, elevata sopportazione ad agenti chimici, biologici e climatici e può sostenere un carico fino a 20 kg. Ogni elemento è dotato di otto griglie adatte a ospitare le piante per la fitodepurazione (figura 9) e di sei

Figura 8 – Schema di vasca con sistemi flottanti di fitodepurazione.

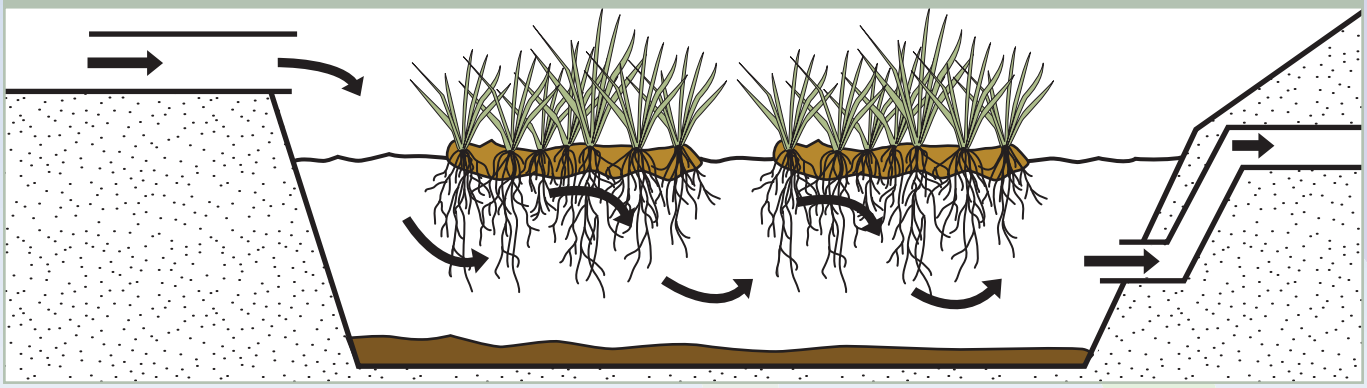
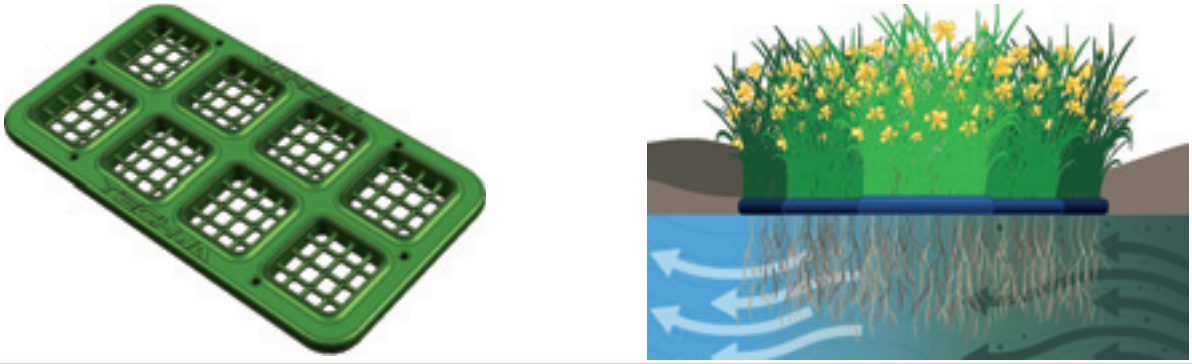


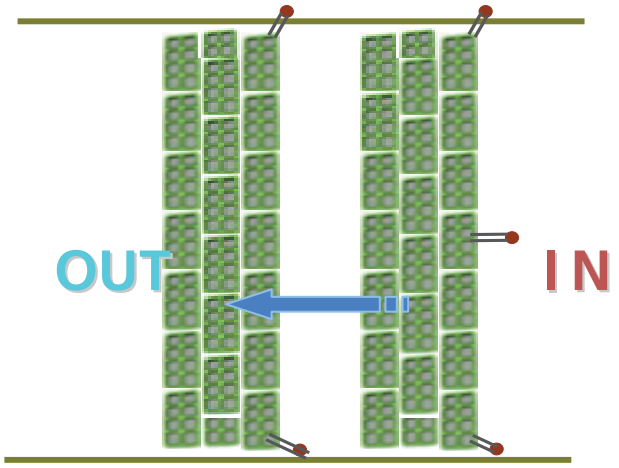
Figura 9 – Elemento Tech-IA per la fitodepurazione flottante e schema di processo.

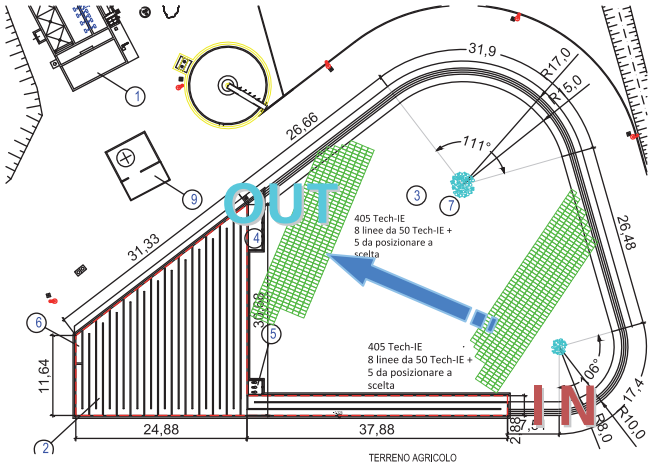


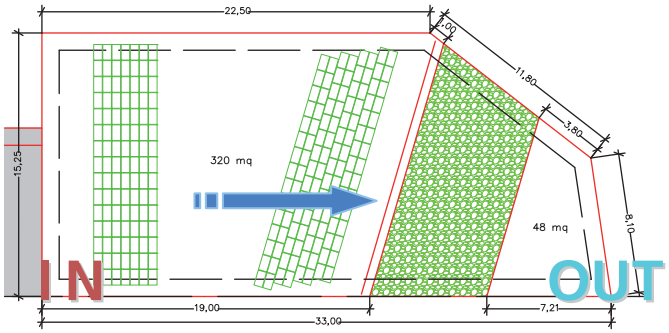
fori per l'ancoraggio agli altri elementi e alle sponde per l'ancoraggio statico.
Gli elementi Tech-IA possono essere facilmente assemblati in molteplici disposizioni a formare nastri fitodepuranti o barriere di conformazione varia, che vanno posti trasversalmente al flusso dell'acqua da trattare (figura 10). Il sistema è flessibile, in quanto con operazioni facili si può cambiare la disposizione degli elementi a seconda delle necessità e modulare, perché la posa degli elementi all'interno dello specchio d'acqua può essere arricchita nel corso del tempo.

L'assemblaggio e l'insediamento della vegetazione possono essere realizzati esternamente o direttamente all'interno dei bacini (figura 11). La primavera è il periodo più adatto per l'installazione, perché favorisce l'attecchimento delle piante (temperatura dell'acqua e dell'aria idonee). Tuttavia, anche installazioni in piena o tarda estate hanno dato risultati soddisfacenti di insediamento iniziale della vegetazione, che si è però completamente sviluppata solo nell'annata successiva.
La realizzazione dei moduli è alquanto semplice, ma non per questo dovranno essere trascurati i particolari riportati

Figura 10 – Esempi di disposizione di elementi Tech-IA per la fitodepurazione flottante. Da sinistra in alto, in senso orario: barriere all'interno di un corso d'acqua a valle di impianti di acquacoltura e installazioni all' interno di bacini di finissaggio di trattamento di acque reflue civili con diversa percentuale di bacino coperta.



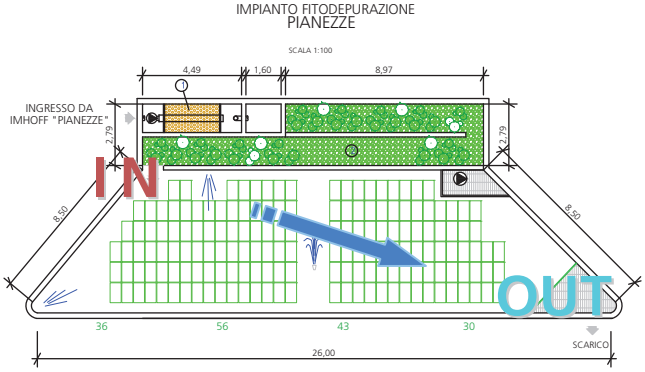




Impianto formato da 225 Tech-IE diviso in 2 blocchi

Il primo blocco presenta:
7 file con 15 Tech-IE

Il secondo blocco presenta:
8 file con 15 Tech-IE



Impianto formato da 165 Tech-IE diviso in 2 blocchi

Il primo blocco presenta:
8 file con 6 Tech-IE
6 file con 5 Tech-IE
1 file con 3 Tech-IE
1 fila con 4 Tech-IE

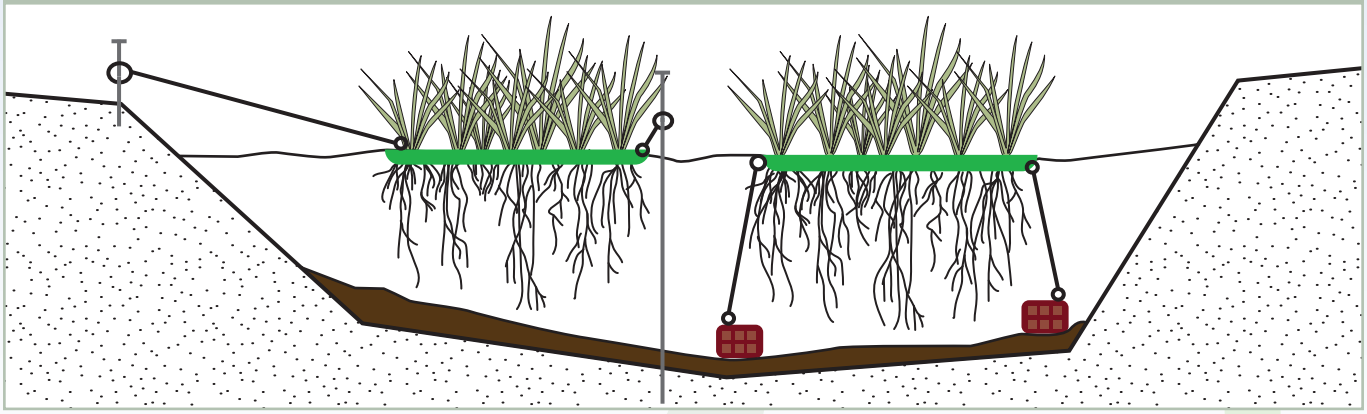
Il secondo blocco presenta:
9 file con 6 Tech-IE
4 file con 5 Tech-IE
2 file con 3 Tech-IE

di seguito. I singoli elementi, per formare moduli alleggianti di piccole e grandi dimensioni, devono essere uniti tra loro con fascette in materiale plastico (larghezza minima delle fascette 8 mm). I moduli dovranno essere saldamente ancorati a riva mediante picchetti, o sul fondo del bacino mediante una serie di pesi morti (figura 12), avendo cura di lasciare abbondante corda per agevolare le fluttuazioni di livello, il moto ondoso ed evitare la tensione delle corde e di tutta la struttura galleggiante. L'eccessiva tensione può comportare il distacco degli elementi e la conseguente rottura dei moduli. Le funi utilizzate per i collegamenti dovranno essere, preferibilmente, di materiale plastico o di uso nautico.

Ogni singola pianta viene ancorata in una delle otto gri-

Figura 11 – Assemblaggio degli elementi flottanti Tech-IA: fuori alveo (a sinistra) e in alveo (a destra).

Figura 12 – Schema di ancoraggio al fondo degli elementi flottanti Tech-IA.



glie che caratterizzano l'elemento Tech-IA mediante un apposito filo di materiale plastico (figura 13). L'esecuzione corretta del trapianto è premessa per un rapido sviluppo di folte radici nella lama d'acqua (figura 14), essenziale per il processo depurativo.
La manutenzione è ridotta e comprende il controllo periodico degli ancoraggi e il taglio della parte aerea della vegetazione a fine stagione. Per questo intervento è possibile operare direttamente all'interno dei bacini, eventualmente avvalendosi di barche a fondo piatto, o riportando le bande a riva.

Figura 13 – Ancoraggio delle piante alle griglie dell'elemento Tech-IA.

Figura 14 – Sviluppo delle radici nel sistema flottante Tech-IA un anno dopo il trapianto.

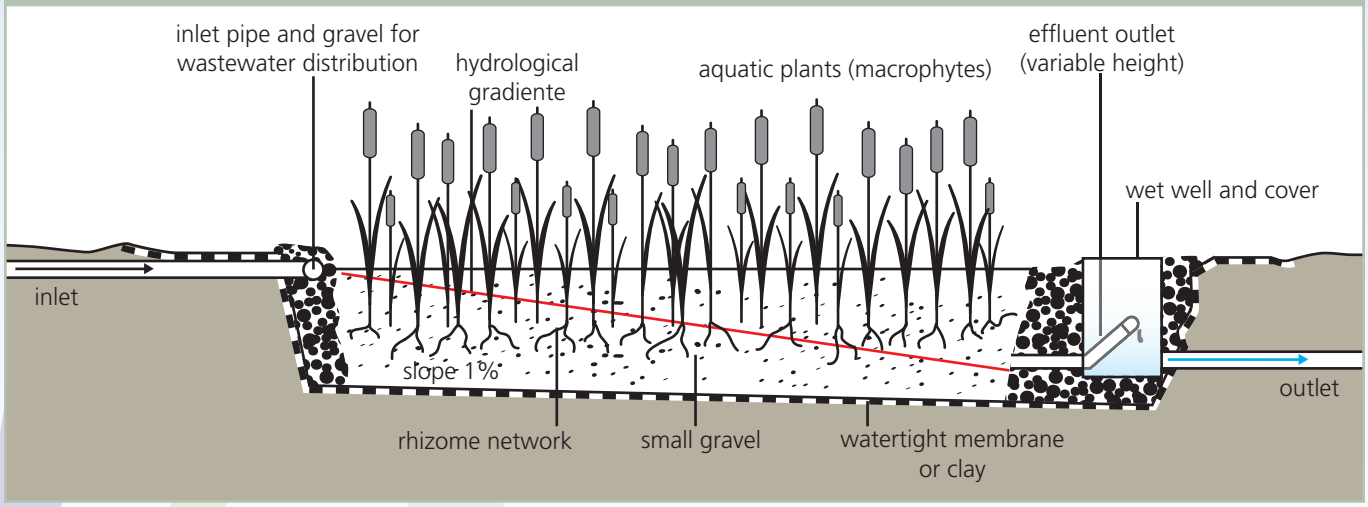
2.2 Impianti a flusso sotto superficiale

In questa tipologia di impianti l'acqua non ha contatto diretto con l'atmosfera e scorre in uno strato di terreno con ghiaia, sabbia, argilla espansa o altri materiali inerti e porosi, dove si sviluppano le radici delle piante radicate emergenti.

2.2.1 Flusso sotto superficiale orizzontale (HF- horizontal flow)

Sono vasche riempite di un medium vegetato all'interno delle quali l'acqua reflua viene distribuita all'estremità superiore, fluisce lentamente attraverso il medium seguendo la leggera pendenza del fondo e raggiunge la fine, dove viene raccolta da un tubo drenante (figura 15).

Figura 15 – Schema di impianto a flusso sotto superficiale orizzontale.



Le vasche sono di forma rettangolare e in genere l'alimentazione avviene dal lato corto. Le dimensioni sono legate al carico idraulico, alla concentrazione dell'inquinante critico e all'obiettivo di qualità del refluo da conseguire in uscita. La profondità dipende dalla specie vegetale che verrà insediata, ma generalmente è compresa fra 60 e 80 cm.
Il medium di riempimento delle vasche è costituito da materiale inerte (roccia, ghiaia, sabbia o altri materiali locali) a diversa granulometria. L'adozione di materiale pulito e lavato consente di ridurre i rischi di intasamento del letto che può originare flusso superficiale. Inoltre la conducibilità idraulica, nei letti riempiti con questi inerti, può essere considerata abbastanza stabile nel tempo. Il medium di crescita della vegetazione, oltre a svolgere una funzione di filtrazione meccanica, costituisce, insieme all'apparato radicale delle macrofite, il substrato per l'adesione della pellicola biologica (batteri, funghi, protozoi, metazoi) responsabile della depurazione. Si tratta quindi di un elemento importante per il funzionamento dell'impianto. Per di più, la permeabilità del medium, insieme al gradiente idraulico, contribuisce a controllare il regime idraulico. Per questo motivo, una volta scelta la miscela più idonea per l'impianto, questa dovrebbe essere sottoposta a verifiche della porosità, n=(volume vuoti/volume totale) e della conducibilità idraulica, Ks (m d^{-1}) o (m s^{-1}). Accanto a queste caratteristiche sono da conoscere la costante cinetica e le dimensioni del materiale inerte (tabella 1).
In generale, nei sistemi HF le dimensioni del medium sono omogenee e devono possedere conduttività compresa tra 1×10^{-3} e 3×10^{-3} m s^{-1} (l'European Design and Operations Guidelines consiglia di adottare materiali con valori di 1×10^{-3} m s^{-1}). Al di sopra dei 6 mm la ghiaia deve essere il più possibile tondeggiante. La non osservanza dei valori e delle forme consigliati può originare formazione di flussi superficiali e ridurre la capacità di scambio gassoso tra l'interno e l'esterno del letto.
L'impermeabilizzazione della vasca viene ottenuta quasi sempre impiegando manti sintetici (HDPE, PVC) con spessori complessivi variabili da 1 a 2 mm, in soluzione monostrato o multistrato. Il liquame in ingresso può essere distribuito in diversi modi, lungo l'intero lato iniziale della vasca (figura 16). Si possono utilizzare: una canaletta superficiale da cui il liquame tracima; un tubo superficiale forato, nel quale diametro e distanza dei fori sono inversamente proporzionali; un tubo simile al precedente, ma installato qualche centimetro sotto lo strato ghiaioso per non avere presenza di acqua reflua in superficie; ingresso libero.
Le prestazioni che si possono ottenere sono differenti e la scelta va fatta tenendo in considerazione obiettivi e vincoli. Lo scopo è di garantire un flusso uniforme per tutta la larghezza della vasca. In ogni caso, è consigliato realizzare, sia in testa che in coda alla vasca, una striscia trasversale di materiale inerte di grossa pezzatura di larghezza adeguata, in modo che non si creino vie preferenziali all'interno del letto. Prima dell'uscita può essere posto un tubo a T forato sul fondo di tutta larghezza della vasca per raccogliere le acque trattate che vengono poi fatte uscire attraverso un tubo. È opportuno installare, fuori della vasca, un pozzetto di regolazione e controllo dove il tubo di uscita dall'impianto è collegato con un raccordo a gomito con una tubazione inclinabile che serve per regolare il livello idrico all'interno della vasca, permettendo lo svuotamento totale o l'allagamento, a seconda delle esigenze (figura 17).

Figura 16 – Esempi di sistemi di distribuzione del refluo in impianti a flusso sotto superficiale orizzontale.

Tabella 1 – Caratteristiche tecniche del medium per impianti di fitodepurazione a flusso sotto superficiale orizzontale.

Mezzo	Dimensioni della grana (mm)	Porosità	Conducibilità idraulica (Ks), $m^3\ m^{-2}\ d^{-1}$	K_{20}
Sabbia media	1	0.42	0.42	1.84
Sabbia grossolana	2	0.39	0.48	1.35
Sabbia ghiaiosa	8	0.35	0.50	0.86

Figura 17 – Particolari di sistema di raccolta dell'acqua all'uscita di una vasca a flusso sotto superficiale orizzontale (a sinistra) e del pozzetto di controllo e regolazione (a destra).

2.2.2 Flusso sotto superficiale verticale (VF- vertical flow)

Sono vasche di fitodepurazione dove il refluo da trattare è immesso dall'alto con carico alternato discontinuo e percola verticalmente in un filtro di materiali inerti in cui si sviluppano le radici delle macrofite per essere poi raccolto sul fondo da una rete di tubi drenanti e scaricato all'esterno (figura 18).

In questi impianti il medium di riempimento può essere omogeneo, come proposto dalla scuola tedesca, o stratificato sovrapponendo piani con materiali di dimensioni diverse i cui valori di riferimento sono riportati in tabella 2. A parità di carico inquinante gli impianti a flusso verticale consentono una migliore efficienza depurativa rispetto a quelli orizzontali o superficiali, per cui richiedono minore superficie. Per contro sono leggermente più complessi

Figura 18 – Schema di impianto a flusso sotto superficiale verticale.

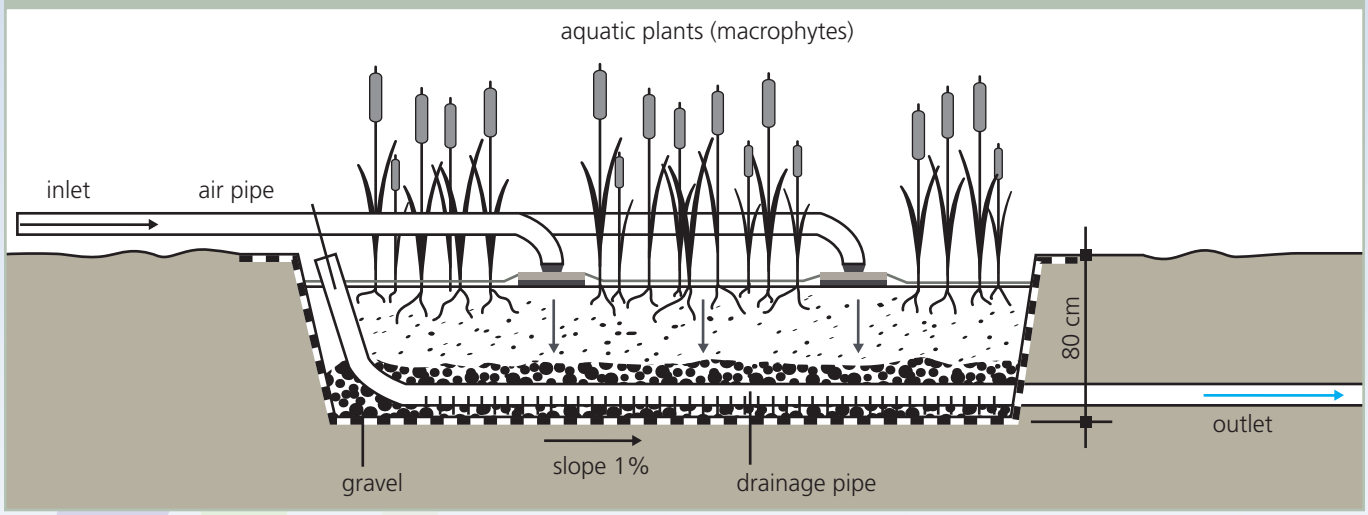


Tabella 2 – Caratteristiche dei materiali utilizzati nei letti a flusso verticale.

Mezzo	Profondità (cm)	Tipo e dimensione (mm)
strato superiore	8-10	sabbia tagliente 0,2-0,5
	15-25	ghiaia fine lavata 6
	10-20	ghiaia tondeggiante lavata 12
strato inferiore	15-25	ghiaia tondeggiante lavata 30-60

nella realizzazione e nella gestione e possono avere bisogno di energia elettrica per l'azionamento di pompe.
I sistemi di distribuzione del refluo devono garantire la ripartizione più omogenea possibile su tutta la superficie (figura 19).
Possono essere impiegate diverse soluzioni, con condotte tubate collocate quasi sempre sopra la superficie. Si possono impiegare reti di tubi di plastica con erogatori simili a quelli utilizzati per l'irrigazione localizzata, con spruzzatori microjet, oppure semplici tubi forati o ancora tubi di metallo o di plastica di diametro di 10 cm e più che terminano con una curva verso il basso e che scaricano il refluo sopra una piastra frangiflutto. La scelta del sistema di distribuzione è dettata dalle caratteristiche del refluo; se quest'ultimo è sufficientemente chiarificato si possono adottare le prime soluzioni descritte, se, all'opposto, è ancora ricco di materiali organici e torbido è opportuno ricorrere a tubazioni di diametro maggiore. Il refluo si disperde sulla superficie e percola all'interno della vasca.
Sul fondo vasca si deve disporre una rete di tubi drenanti di materiale plastico, in modo da intercettare il refluo trattato e convogliarlo verso il punto di uscita (figura 20).
La gestione delle fasi di carico e scarico rappresenta uno degli elementi di maggiore interesse di questa tipologia di impianto. L'obiettivo è ottenere l'alternanza di condizioni di aerobiosi e di anaerobiosi, che consente l'attivazione di processi differenti a carico delle sostanze inquinanti. Si possono avere diversi schemi operativi:

- *carico a intermittenza e percolazione libera*; in questo caso gli impianti a flusso verticale vengono fatti lavorare come semplici filtri percolatori vegetati. Il refluo viene immesso con una pompa a intermittenza, con quattro-dieci cicli di carico al giorno che durano alcuni minuti, intervallati da fasi di percolazione di qualche ora. La frequenza di dosaggio deve essere temporizzata in modo tale che la precedente quantità di refluo caricata sia giunta al fondo della vasca in modo tale che l'ossigeno entri nel medium e venga spinto verso il basso dal flusso del refluo. Quando il refluo giunge sul fondo viene immediatamente scaricato;

Figura 19 – Esempi di sistemi di distribuzione del refluo in impianti a flusso sotto superficiale verticale.

Figura 20 – Esempi di sistemi di drenaggio posti sul fondo di impianti a flusso sotto superficiale verticale.

- *carico con ricircolo nella stessa vasca*; si utilizzano vasche profonde anche oltre 1.5 m, con un'elettrovalvola collegata alla tubazione di uscita. In fase di carico la valvola chiude la vasca e il refluo tende ad accumularsi sul fondo. Qui una pompa sommersa ripesca il refluo e lo rilancia in superficie. Dopo una serie di carichi e ricircoli l'elettrovalvola viene aperta e la vasca è scaricata;
- *alternanza di fasi tutto pieno/tutto vuoto con flusso intermittente (reattori batch)*. L'immissione del refluo avviene fino a completo riempimento; successivamente, un sistema di uscita a sifone determina il completo svuotamento della vasca, con conseguente richiamo di aria all'interno del medium di crescita delle piante. Può essere realizzata all'interno della stessa vasca, con l'utilizzo di pompe e temporizzatori (figura 21) o con vasche in batteria. Nel primo caso possono essere regolati i tempi di carico, scarico e permanenza nelle condizioni di tutto pieno e tutto vuoto a seconda delle necessità. Il secondo implica l'impiego di almeno due vasche che funzionano a flusso alternato, in modo da far coincidere la fase di riempimento di una vasca con quella di svuotamento dell'altra. È possibile regolare i tempi di riossigenazione del letto variando frequenza e quantità del carico idraulico in ingresso, mediante l'adozione di dispositivi a sifone autoadescante opportunamente dimensionati. Questo sistema di gestione è diffuso in Francia, dove gli impianti di fitodepurazione a flusso verticale sono utilizzati come unico trattamento per i reflui civili dopo un semplice intervento di grigliatura/separazione del materiale grossolano. Il sistema è tipicamente costituito da tre vasche nelle quali si alternano fasi di carico, di scarico e di riposo. Il refluo viene apportato al letto vegetato tramite tubazioni di diametro elevato che scaricano, tramite connessione a gomito, su una piastra. Il liquame si distribuisce sulla superficie del letto e, a percolazione terminata, lascia una leggera fanghiglia durante la fase di scarico. Durante la fase di riposo la fanghiglia si essicca, origina una sottile crosta che prima crepaccia e poi viene gradualmente degradata anche grazie all'azione fisica degli steli delle piante di canna palustre. La rottura della crosta è dovuta sia alla continua emissione di nuovi germogli da parte dei rizomi, sia all'oscillazione degli steli causata dal vento.

2.2.3 Vasche a scarico zero

Si tratta di vasche vegetate nelle quali viene apportato un carico idraulico pari all'evapotraspirazione delle piante in modo tale che non vi sia alcuno scarico.
I sistemi presentano un notevole potenziale per rimozione di inquinanti con ciclo gassoso, fra cui i composti azotati e organici, ma possono andare incontro a fenomeni di saturazione e accumulo per fosforo (P), metalli e sostanze non biodegradabili.
Le vasche possono essere interrate o fuori terra. Nel primo caso, se si opera in substrati pedologici poco permeabili, quali argille o limi pesanti, si possono scavare bacini anche profondi, si costipa il fondo e si può riutilizzare il terreno scavato per il riempimento. Solitamente però si ricorre alla stesura di teli impermeabili, in modo del tutto analogo a quanto previsto per gli impianti a flusso sotto superficiale, per creare bacini che vengono poi riempiti ancora con il terreno di scavo. Per impianti fuori terra si possono utilizzare vasconi prefabbricati o realizzazioni in cemento opportunamente impermeabilizzato. Questi possono essere riempiti con ghiaia, sabbia o terreno permeabile oppure lasciati vuoti ma ricoperti di elementi flottanti per il sostegno della vegetazione (figure 22 e 23).

Figura 22 – Esempio di vasche evaporanti a scarico zero realizzate fuori terra con elementi flottanti.

Figura 21 – Schema di gestione di una vasca a flusso sotto superficiale verticale con alternanza di fasi.

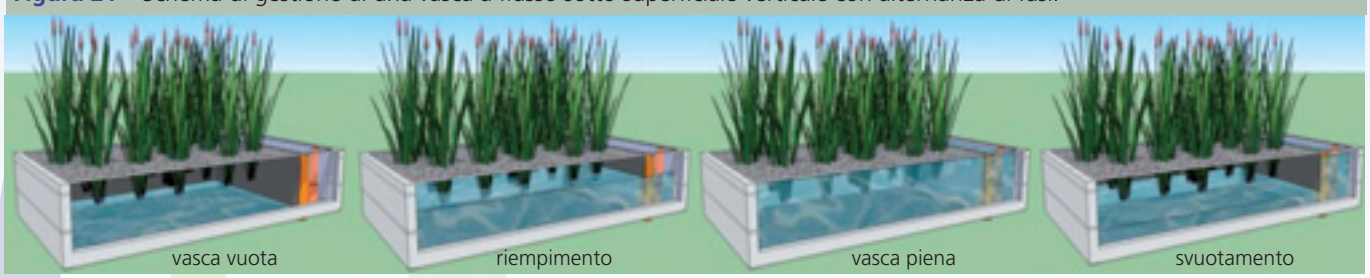
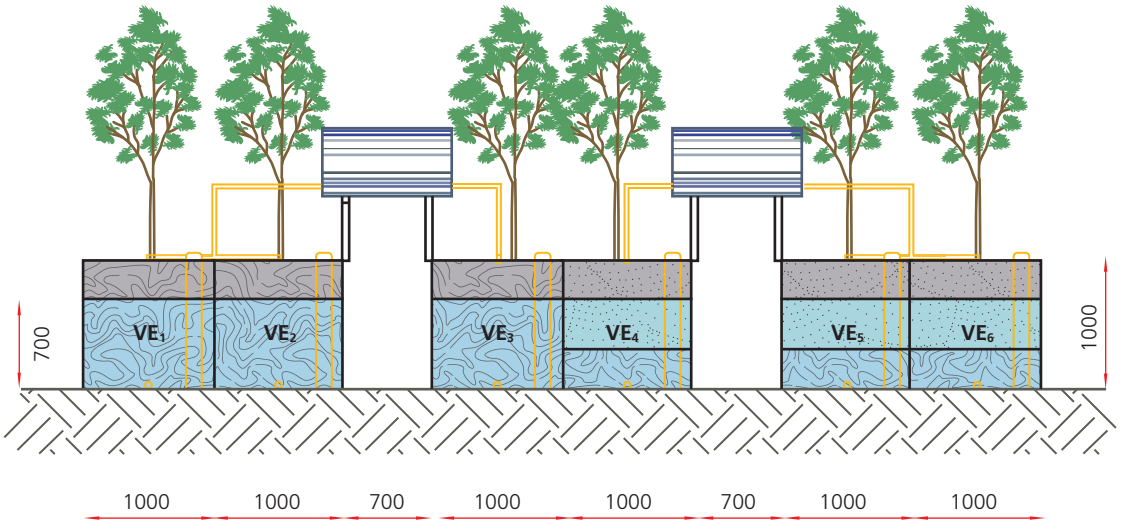


Figura 23 – Vasche evaporanti a scarico zero realizzate fuori terra e vegetate con piante arboree da legno.



Le vasche a scarico zero richiedono una progettazione accurata e una gestione attenta, perché si devono combinare dinamiche quasi sempre differenti della produzione del refluo e dell'evapotraspirazione. Infatti la prima è generalmente costante, mentre la seconda ha andamento a campana nel corso dell'anno, con massimi estivi e minimi invernali. Diventa quindi necessario avere a disposizione vasche con volumi che consentano un effetto volano. A parità di superficie utilizzata questo è ottenuto o aumentando la profondità o vegetando la vasca vuota con supporti galleggianti. Con vasche profonde è opportuno utilizzare piante capaci di sviluppare apparati radicali profondi, fra le quali si fanno preferire salici, pioppi e ontani che possono essere utilizzati anche come colture energetiche.

2.3 Impianti ibridi e intensificati

Gli impianti ibridi derivano dalla combinazione di due o più tipologie di base e sono realizzati allo scopo di combinare al meglio le prestazioni depurative offerte dai singoli elementi. Ad esempio gli impianti a flusso verticale sono molto efficienti nella degradazione dell'azoto ammoniacale, ma nel processo può essere generato azoto nitrico. Questo potrebbe essere trattato successivamente con un impianto a flusso orizzontale generando quindi un ibrido verticale-orizzontale. Impianti ibridi possono essere costituiti dalle successioni più diversificate, per cui le tipologie costruttive sono numerosissime e difficilmente riconducibili a casi tipo.

Gli impianti intensificati sono soluzioni che mirano a ottenere un incremento delle prestazioni depurative attraverso modifiche della struttura e/o della gestione degli impianti di base. Si possono realizzare attraverso modifiche ecologiche o ambientali agli impianti, apportando additivi chimici e fisici, attuando strategie di gestione particolari o costruendo sequenze integrate di sistemi naturali.

Fra le modifiche ecologiche rientrano:

- l'*inoculo batterico*, interessante per velocizzare l'entrata a regime della funzionalità degli impianti, soprattutto nelle condizioni in cui le popolazioni batteriche naturali possono richiedere anche alcune settimane per svilupparsi adeguatamente;
- la *scelta di piante selezionate/ingegnerizzate*, come ad esempio l'utilizzo di iper-accumulatrici, o di micorrize;
- l'*adozione di sistemi di climatizzazione* per incrementare le prestazioni in periodi freddi, quali tunnel stagionali o protezioni permanenti (figura 24);

Figura 24 – Intensificazione di un impianto a flusso sotto superficiale verticale tramite copertura invernale.

L'apporto di additivi chimici o fisici può essere eseguito arricchendo il substrato o immettendo le sostanze direttamente nell'acqua reflua, con differenti obiettivi, quali:

- l'adsorbimento di P (zeoliti, substrati ferrosi o di Ca, aggregati argillosi);
- la precipitazione di metalli (tipicamente ottenuta con substrati organici, torbe, compost);
- la genesi di C per supportare l'attività delle popolazioni microbiche (pacciamatura organica per aumentare la disponibilità di C, effetto starter per la denitrificazione).

Queste soluzioni richiedono una manutenzione periodica più attenta, vanno valutate per costo e difficoltà di ripristino e possono ridurre la vita tecnica dell'impianto a 5-10 anni. Fra gli additivi mescolati nei substrati stanno trovando impiego crescente le zeoliti, allumosilicati ad impalcatura tetraedrica tridimensionale contenente cavità occupate da grossi ioni e molecole d'acqua dotati di elevata mobilità tale da permette lo scambio ionico e la disidratazione reversibile. Strutturalmente, le zeoliti costituiscono, con i feldspati ed i feldspatoidi, la classe dei tettosilicati in cui le unità "primarie" [i tetraedri (SiO_4)] sono unite per i quattro vertici a formare unità "secondarie" (catene, anelli singoli e doppi, poliedri) a loro volta collegate in diversi modi a formare differenti impalcature tridimensionali di carica elettrica negativa. La capacità di scambio cationico (CSC) delle zeoliti arriva fino a valori di 2-4 meq g^{-1} che non solo è nettamente superiore a quella degli altri composti inorganici naturali (montmorillonite 1 meq g^{-1}; sepiolite 0,1-0,2 meq g^{-1}), ma si realizza in modo tipicamente selettivo in quanto da una soluzione policationica vengono maggiormente e primariamente rimossi i cationi a più bassa energia di solvatazione, ossia quelli con carica bassa ed elevato raggio cationico; tra questi i principali sono lo ione potassio (K^+) e lo ione ammonio (NH_4^+).

Negli impianti a flusso sotto superficiale si può inoltre ricorrere a vari sistemi di areazione con l'obiettivo di originare bolle nel mezzo saturo che risultano però di non facile realizzazione. Tali sistemi presentano generalmente alti costi di investimento e gestione, richiedono energia, ma consentono un notevole risparmio di superficie. La loro convenienza economica viene conseguita solo quando la vita tecnica è tale da compensare l'ammortamento. Queste soluzioni sono state applicate nel trattamento di reflui contenenti idrocarburi, N ammoniacale, e liquido antigelo impiegato negli aeroporti.

Fra le strategie gestionali si ricordano:

- l'*alimentazione a gradini* nella quale l'introduzione del refluo avviene in punti differenti lungo il percorso con l'obiettivo di evitare il sovraccarico all'ingresso;
- le *sequenze temporali di alimentazione*, simili a quanto descritto a proposito della gestione dei sistemi a flusso verticale;
- il *ricircolo*, che consiste nel riportare il refluo trattato dall'uscita all'ingresso per ulteriore trattamento e diluisce gli inquinanti. Questa operazione può servire per la diluizione dell'influente, da adottarsi nelle circostanze in cui le concentrazioni di inquinanti in ingresso possono essere tossiche per la vegetazione, per cui rimandare in testata parte dell'acqua dopo trattamento può migliorare le condizioni di abitabilità. L'operazione richiede l'utilizzo di una pompa di rilancio ed energia.

L'integrazione fra più sistemi naturali, che potrebbe anche essere considerata un sistema ibrido, spesso rappresenta una soluzione obbligata, per il trattamento simultaneo di diversi inquinanti e per esigenze di miglioramento dell'efficacia depurativa. Viene adottata nel trattamento di runoff stradale per sedimenti e inquinanti in soluzione, di runoff agricolo per sedimenti e nutrienti, di acque da corsie di alimentazione in allevamenti dove si devono trattare feci e urine, acque di lavaggio, con un'elevata domanda di ossigeno complessiva.

3. LA VEGETAZIONE

L'elemento che distingue la fitodepurazione da altri sistemi di depurazione delle acque è la presenza della vegetazione. La vegetazione utilizzata allo scopo è costituita principalmente da specie macrofite, tuttavia in natura esistono oltre 6700 specie da ambienti umidi, fra cui legnose, arbustive, suffruticose, erbacee e fra queste si annoverano sia specie annuali che perenni. Vi sono piante che vivono completamente sommerse (idrofite), piante che rimangono con l'apparato radicale e la parte basale quasi sempre sommersi, mentre le foglie e i fiori emergono dall'acqua (elofite) e piante che presentano elevate esigenze idriche e vivono in condizioni di elevata umidità (igrofite). Le piante sommerse possono essere liberamente galleggianti e non radicate o radicate al fondo con foglie e fiori semisommersi; le specie liberamente galleggianti non necessitano di un substrato in cui far crescere le radici ma il loro apparato radicale si sviluppa direttamente nell'acqua; le galleggianti radicate hanno fusti sufficientemente lunghi da consentire alle foglie di galleggiare sulla superficie dell'acqua; le sommerse occupano la nicchia compresa fra la superficie dei sedimenti e il pelo dell'acqua. Nelle emergenti la maggior parte dell'apparato epigeo emerge dall'acqua e vive in piena aria. In condizioni naturali, le piante si dispongono in fasce parallele alla sponda, differenziate in ragione della profondità delle acque.

3.1 Funzioni della vegetazione

Le principali funzioni della vegetazione all'interno dei sistemi di fitodepurazione sono:

- *sostegno di attività eterotrofica dovuta all'elevata produzione primaria*. Gli steli e le foglie delle macrofite che emergono dalla colonna d'acqua fanno da substrato per la formazione di biofilm. I tessuti delle piante sono colonizzati da dense comunità di alghe fotosintetiche, da batteri e protozoi. Inoltre steli, lettiera, radici e rizomi fanno da substrato per la crescita di microrganismi, i quali a loro volta sono attori di intensa attività degradativa;
- *distribuzione omogenea e riduzione della velocità del flusso d'acqua*. Si creano così condizioni ottimali per la sedimentazione dei solidi sospesi, si riduce il rischio di erosione e risospensione, e aumenta il tempo di contatto tra la superficie vegetale e l'acqua circostante;
- *stabilizzazione della superficie del suolo*, grazie ai loro organi ipogei che riducono la formazione di canali d'erosione;
- *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 – 1000 Kg di N e 30 – 150 Kg di P. La maggior parte dei nutrienti assimilati nei tessuti delle piante 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 piante (es. *Typha latifolia* L., *Salix* spp.) sono in grado di assorbire metalli pesanti;
- *rilascio di ossigeno nella rizosfera*, una funzione da molti ritenuta altamente importante per il buon funzionamento dell'ecosistema wetland, per le oggettive 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 aerenchimatico 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. Vengono così a formarsi dei micrositi favorevoli ai batteri aerobi, attivi nella decomposizione della materia organica. Nel corso dell'inverno, con la vegetazione non attiva, una quota di ossigeno

viene trasmessa per induzione dell'effetto Venturi dai culmi rotti alla rizosfera. Il flusso di ossigeno rilasciato dagli organi ipogei è dell'ordine di 0,02 g m^{-2} al giorno per piante emerse e di 0,025 – 9,6 g m^{-2} per piante galleggianti.

3.2 Specie utilizzate

La scelta delle piante dipende dalle condizioni climatiche, dalle caratteristiche del refluo, dalla qualità richiesta dell'effluente. Tenuto conto di ciò, e ricordando la numerosità di specie potenzialmente utilizzabili, è opportuno scegliere specie:

- autoctone, perché sono adatte al clima in cui si opera e non rappresentano pericoli per eventuali sviluppi incontrollati ed incontrollabili;
- capaci di vivere in condizioni di saturazione del terreno e di avvantaggiarsi di acque eutrofiche;
- che presentino, a maturità, un adeguato sviluppo fogliare e ipogeo per assorbire l'acqua e apportare l'ossigeno almeno fino a 0,5-0,6 m di profondità;
- preferibilmente erbacee, in quanto colonizzano più velocemente e uniformemente l'ambiente, che normalmente ha dimensioni limitate. Fra le erbacee, puntare decisamente su quelle dotate di organi perennanti, per porre i presupposti affinché il sistema di depurazione naturale raggiunga più velocemente le prestazioni desiderate e le mantenga più costantemente nel tempo;
- aventi requisiti di adattabilità, resistenza e competitività, affinché sappiano sopravvivere nelle condizioni particolari di "coltura", non siano soggette a patologie 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 alofite 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. ex Steud, *Typha latifolia* L., *Iris pseudacorus* L. e *Carex* spp., *Phalaris arundinacea* L. (figura 25), *Glyceria maxima* (Hart.) Holm e *Sparganium erectum* L. (figura 26).

In Italia le specie di maggiore interesse sono:

Phragmites australis (figura 27), la più utilizzata per vegetare zone umide, è comunemente chiamata cannuccia di palude. Appartiene alla famiglia delle *Poaceae* ed è una

Figura 25 – *Phalaris arundinacea.*

Figura 26 – *Sparganium erectum* in un'area umida.

Figura 27 – *Phragmites australis.*

pianta C3 subcosmopolita erbacea perenne con robusti rizomi sotterranei orizzontali e stoloni che possono arrivare anche ai 10 metri di lunghezza, talvolta epigei e radicanti ai nodi. I culmi eretti possono superare i 5 metri di altezza. È alofila, per cui si può trovare negli ambienti palustri anche fino in riva al mare, dalla sorgente del fiume fino alla sua foce. In letteratura la produttività varia da 2 a 60 t ha^{-1} per anno di sostanza secca e in un esperimento a scala di mesocosmo condotto dal DAFNAE dell'Università di Padova ha mostrato una produttività di 12 t ha^{-1} per anno di sostanza secca.

Typha latifolia (figura 28) è una specie cosmopolita, conosciuta con il nome di mazza sorda per la caratteristica infiorescenza, presentei in Italia dai 0 ai 2000 m di altitudine. Specie vegetale perenne resistente ai freddi invernali 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, con ampio range di pH, da acido ad alcalino, e resiste alle inondazioni e ai periodi siccitosi estivi. Cresce anche in acque abbastanza ricche di sali e inquinati, ed è particolarmente resistente ai metalli. Gli habitat tipici della specie sono: paludi, acque poco profonde, fossi, aree umide e rappresenta una pianta eccellente per la filtrazione dell'acqua. È in grado di sopportare solamente brevi periodi di emersione. Raggiunge un'altezza di 250 cm, presenta foglie appiattite e lineari, larghe 10-20 mm, verde-glaucescenti; a maturità la spiga presenta un diametro che arriva a 30 mm, e con la parte dei fiori maschili di lunghezza quasi uguale a quella dei fiori femminili. Presenta rizoma allungato e robusto che si trova nel terreno ad una profondità di 8 - 10 cm, crescendo anche fino a raggiungere qualche metro di lunghezza. La pianta ha una buona capacità produttiva di biomassa (20-30 t ha^{-1}). 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.

Figura 28 – Sviluppo vegetativo e fiorale di *Typha latifolia*.

Iris pseudacorus (figura 29) è originario dell'Europa, ove in passato era spesso utilizzato come pianta da colorante ed erba medicinale. Comune in tutt'Italia, dal livello del mare fino ai 1000 m circa.

Vive in superficie ma anche nelle acque profonde che superano la corona sino a più di 15 centimetri, e resiste alle inondazioni e ai periodi siccitosi estivi. La pianta può raggiungere 120 cm di altezza e si allarga sino a 60-75 cm. Le foglie grigio-verdastre si dipartono dalla base della pianta, formando una specie di stretto ventaglio; sono di forma spadiforme, parallelinervie, con nervatura mediana sporgente, larghe fino a 3 cm, mentre le spate fiorali hanno dimensioni minori. I fiori sono raccolti a gruppi all'ascella di grandi brattee verdi (spate); di forma attinomorfa hanno diametro che può superare i 10 cm e sono di un intenso colore giallo dorato. I frutti sono grandi capsule triloculari contenenti numerosi semi, che a maturità si aprono liberando i semi, di color bruno-giallastro. Presenta rizoma grosso, dal diametro irregolare, obliquo e scuro.

Figura 29 – *Iris pseudacorus*.

Schoenoplectus lacustris (figura 30) appartiene alla famiglia delle ciperacee e ricopre vaste aree umide con acque dolci. Presenta un rizoma grosso, ad andamento orizzontale, affondato nel fango; il fusto è cilindrico, alto anche 3 metri, con diametro fino a 15 mm e viene usato per lavori artigianali come gli altri giunchi. Si adatta a un pH compreso fra 4 e 9, e tollera una salinità fino a 20 ppm.

Il genere *Carex* appartenente alla famiglia delle *Cyperaceae*, comprende più di 3000 specie e rappresenta uno dei gruppi di piante vascolari più comuni nel mondo. Hanno importanza ambientale in particolare nel rassodare terreni

Figura 30 – *Schoenoplectus lacustris.*

acquitrinosi e nel rinforzare le sponde dei fossi. I carici si trovano in ambienti molto diversi, in particolare in torbiere, paludi, prati e pascoli. Le specie si distinguono tra cespitose e rizomatose, sono sempreverdi e fioriscono in primavera con infiorescenze nella parte superiore degli steli. La propagazione si effettua per seme o per suddivisione dei rizomi o dei cespi. Le specie più utilizzate nelle wetland sono *C. riparia* e *C. elata* (figure 31 e 32), che pur essendo più piccolo di *C. riparia* riesce comunque a fornire una produzione annua che può raggiungere le 60 t ha^{-1}.

Figura 31 – Infiorescenze mature di *Carex riparia.*

Il crescente interesse della fitodepurazione 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 (tabella 3). Anche in questo caso esistono, in potenza, ampi margini di scelta. Ai criteri di scelta precedentemente descritti, si devono aggiungere:

- l'opportunità di privilegiare 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 più o meno lunghi a seconda dell'epoca di fioritura;
- la possibilità di utilizzare piante aromatiche per confondere gli eventuali odori, per tenere lontano insetti molesti, o più in generale, per profumare l'aria.

Figura 32 – Infiorescenze di *Carex elata.*

3.3 Trapianto e gestione della vegetazione

Per ottenere i migliori risultati fin dal primo anno, l'impianto della vegetazione va fatto 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 una 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 definitive.

In primavera, si possono utilizzare sia organi di propagazione (rizomi), sia piante già sviluppate. In tutti i casi, la

Tabella 3 – Specie ornamentali atte alla fitodepurazione con periodo di fioritura.

Iris pseudacorus

Canna indica

Lythrum salicaria

Epilobium sp.

	Gennaio	Febbraio	Marzo	Aprile	Maggio	Giugno	Luglio	Agosto	Settembre	Ottobre	Novembre	Dicembre
Phalaris arundinacea												
Carex pendula												
Carex elata												
Iris pseudacorus												
Iris levigata												
Canna indica												
Veronica beccabunga												
Oenanthe javanica flamingo												
Pontederia cordata												
Lythrum salicaria												
Helianthus tuberosus												
Epilobium sp.												
Thalia dealbata												

Helianthus tuberosus

Pontederia cordata

Iris levigata

Thalia dealbata

messa a dimora delle piante va fatta su substrato pulito, livellato, dal quale si siano eliminate le erbe infestanti.
Con riferimento alla canna palustre, i rizomi vanno interrati con un angolo di 45 gradi rispetto alla superficie del terreno a circa 4 cm di profondità con un estremo fuori terra. 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^2. I nuovi getti compariranno 15-30 giorni dopo il trapianto, a seconda delle condizioni ambientali (figura 33). Tra la messa a dimora e l'attecchimento si può riscontrare una riduzione di investimento, che in certi casi può raggiungere il 20-25%. La grande capacità di sviluppare rizomi, tuttavia, consente un rapido recupero della situazione.
Con il procedere della stagione, è invece opportuno ricor-

Figura 33 – Sviluppo di rizomi e germogli in *Phragmites australis* dopo due mesi dalla messa a dimora di un rizoma.

rere all'uso di piante, impiegando prima materiale derivato da seme e più tardi quello con rizomi già formati (figura 34). L'investimento consigliato è di 4-6 piante al m^2, 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. Questa operazione potrà essere eseguita manualmente o con il ricorso ad 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^2 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 rendersi 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 tardive. L'esecuzione del taglio 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 effettuare operazioni tipiche del giardinaggio (eliminazione di fiori secchi, di parti di pianta danneggiate, diradamenti, eventuali trattamenti antiparassitari ed insetticidi).

Figura 34 – Sviluppo di *Phragmites australis* dopo due mesi dalla messa a dimora di un rizoma germogliato.

4. PRESTAZIONI DELLA FITODEPURAZIONE A SCALA MONDIALE

Il database utilizzato in questo lavoro deriva dalla consultazione degli articoli scientifici pubblicati su riviste internazionali referizzate e sui più importanti atti di convegni internazionali sulla fitodepurazione, nonché dalla riutilizzazione dei dati contenuti nel Gulf of Mexico Program Livestock Wastewater Treatment Wetland Database. Data la finalità del presente dossier si è scelto di considerare solamente contributi relativi al monitoraggio di impianti a scala reale, che trattavano in toto o in parte effluenti zootecnici. Non sono stati invece considerati gli articoli riguardanti applicazioni a piccola scala, in dispositivi pilota e/o comunque di piccole dimensioni.

Da ciascun articolo, oltre ai necessari riferimenti bibliometrici, sono state estrapolate informazioni utili a descrivere le realtà operative, le caratteristiche degli impianti e la loro efficacia depurativa. In particolare i caratteri rilevati sono: tipo di refluo trattato, numero di capi, tipo di pretrattamento, tipologia di sistema di fitodepurazione distinguendo sistemi naturali (N), superficiali (S), a flusso orizzontale (O) e a flusso verticale (V), carico idraulico, tempo di ritenzione, substrato di riempimento e specie vegetale utilizzata. Nel caso in cui il sistema di fitodepurazione fosse costituito da più impianti separati, di ciascuno si sono rilevate, quando possibile, la tipologia e le caratteristiche tecniche.

Sono stati ricavati i dati di concentrazione di TKN (Azoto Kjeldhal Totale), azoto ammoniacale (NH_4^+-N) e nitrico (NO_3^--N) in ingresso (IN) e in uscita (OUT) dagli impianti e si sono calcolate le efficienze di abbattimento:

efficienza di abbattimento = (concentrazione IN –concentrazione OUT)/concentrazione IN

Dove erano disponibili i dati di carico idraulico giornaliero e di superficie dell'impianto si è proceduto al calcolo del tasso medio di rimozione giornaliera, espresso in g m^{-2} $giorno^{-1}$.

Nel complesso sono stati individuati e consultati 36 articoli riguardanti reflui bovini, per un totale di 129 impianti descritti, e 18 articoli su reflui suini, con 89 impianti. Un solo articolo ha riguardato i reflui avicoli e non è stato tenuto in considerazione nelle elaborazioni per mancanza di rappresentatività, mentre sui reflui di digestione anaerobica non sono stati riscontrati articoli relativi a impianti a scala reale. Si sono però trovati 5 articoli su esperienze a scala di mesocosmo (attorno a 1 m^2 di superficie) e, in mancanza di altre indicazioni, si è ritenuto comunque utile la loro lettura e interpretazione, almeno a livello di indirizzo generale.

Non tutti gli articoli riportavano il dettaglio di tutte le informazioni sopra descritte, per cui in alcuni casi le elaborazioni sono state eseguite su un minor numero di dati.

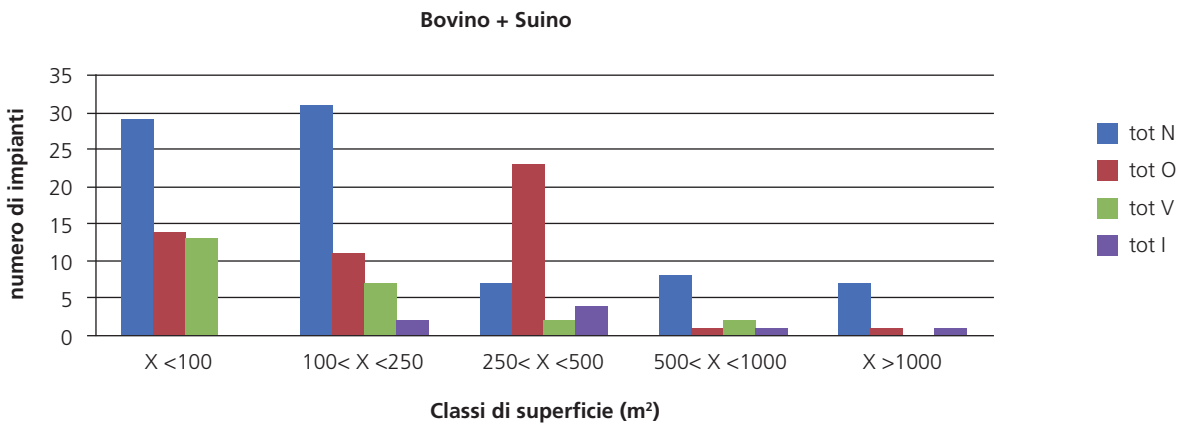
C'è da rilevare che la maggioranza degli articoli deriva da esperienze condotte negli anni novanta, proviene dagli Stati Uniti e riguarda sistemi di fitodepurazione di tipo naturale o a flusso superficiale.

4.1 Caratteristiche degli impianti

Considerando l'insieme degli impianti per il trattamento di reflui bovini e suini si rileva che prevalgono celle di piccole e medie dimensioni, soprattutto nel caso della fitodepurazione in wetland naturali o superficiali (figura 35). Stesse considerazioni possono essere fatte per le celle a flusso verticale, mentre per gli impianti a flusso orizzontale prevalgono le dimensioni comprese fra 250 e 500 m^2.

Analizzando separatamente gli impianti di trattamento

Figura 35 – Distribuzione di frequenza degli impianti di fitodepurazione per il trattamento di reflui zootecnici (bovini e suini), descritti per classi di superficie (N = naturale + superficiale, O = orizzontale, V = verticale, I = ibrido). Dati ricavati dalla bibliografia scientifica mondiale.



delle due tipologie di refluo si evince che mancano esperienze di impianti ibridi nel trattamento di reflui bovini, dove invece sono molto più diffusi i sistemi naturali di fitodepurazione (figura 36).
Nel caso di reflui suini le wetland naturali utilizzate nei lavori consultati sono di piccole dimensioni e vi è presenza di impianti ibridi, talvolta anche di elevate dimensioni complessive (figura 37).
I pretrattamenti, sempre necessari per ottenere un refluo idoneo alla fitodepurazione, sono prevalentemente costituiti da semplici vasche di stoccaggio (tabella 4) che coprono la metà dei casi descritti. Il semplice stoccaggio è più diffuso per i reflui bovini che suini, dove quasi un terzo dei pretrattamenti è costituito dalla combinazione di vasche di stoccaggio e di lagunaggio. I sistemi di separazione solido liquido quali centrifughe o filtri sono pochissimo diffusi.

Tabella 4 – Tipologie d i pretrattamento utilizzate negli impianti di fitodepurazione per il trattamento di reflui zootecnici (bovini e suini). Dati ricavati dalla bibliografia scientifica mondiale. D = diluizione; L = lagunaggio; ST = vasca di stoccaggio; SSL = separazione solido liquido.

Pretrattamenti	Bovino	Suino
D	1	1
L	4	1
ST	15	6
D + ST	3	1
ST + SSL + D	1	0
ST + L	0	5
L + D	1	1
SSL + L	3	0
altro	0	2

Figura 36 – Distribuzione di frequenza degli impianti di fitodepurazione per il trattamento di reflui bovini, descritti per classi di superficie (N = naturale + superficiale, O = orizzontale, V = verticale, I = ibrido). Dati ricavati dalla bibliografia scientifica mondiale.

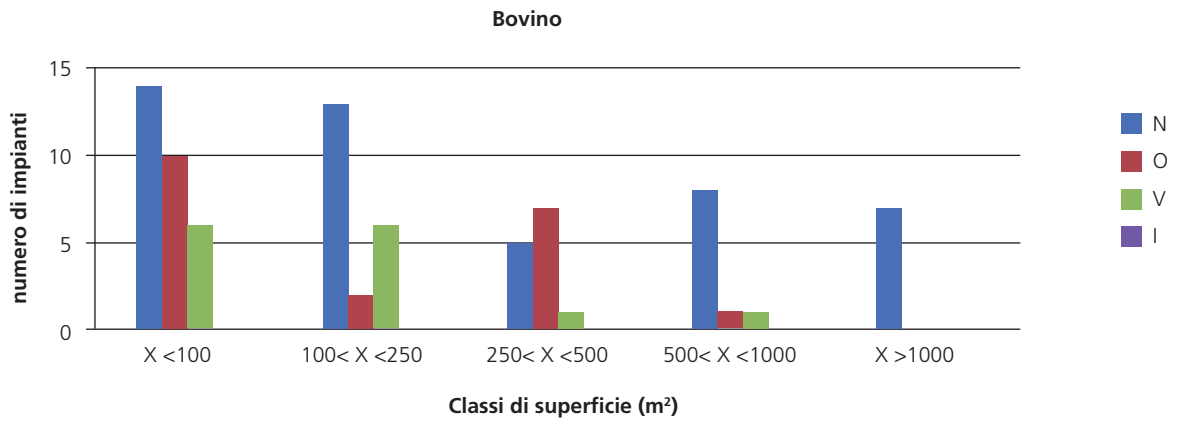
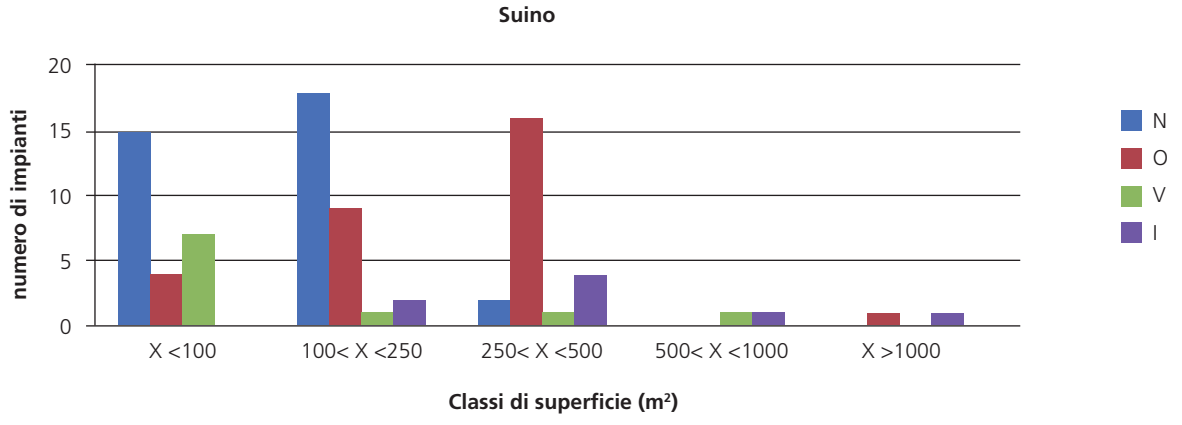


Figura 37 – Distribuzione di frequenza degli impianti di fitodepurazione per il trattamento di reflui suini, descritti per classi di superficie (N = naturale + superficiale, O = orizzontale, V = verticale, I = ibrido). Dati ricavati dalla bibliografia scientifica mondiale.



Negli impianti a flusso sotto superficiale prevale l'impiego di *P. australis*, che rappresenta l'unica specie utilizzata negli impianti a flusso verticale. Come atteso, nelle wetland naturali è molto più diffusa la presenza di associazioni pluri specfiche (tabella 5).
Il medium di riempimento caratterizza soprattutto gli impianti a flusso sotto superficiale (tabella 6); per gli orizzontali è frequentemente la ghiaia, ma esistono alcuni casi di utilizzo di pietrisco e altri medium di risulta, mentre non viene utilizzata la sabbia. Negli impianti a flusso verticale i substrati sono ghiaia e sabbia, spesso alternati in strati.

Tabella 5 – Famiglie botaniche utilizzate negli impianti di fitodepurazione per il trattamento di reflui zootecnici (bovini e suini). Dati ricavati dalla bibliografia scientifica mondiale.

	Orizzontale	Verticale	Naturale
Phragmites sp.	16	22	4
Typha sp.	1	0	13
Sparganium sp.	0	0	0
Altre specie	16	0	16
Associazioni	12	0	60

Tabella 6 – Medium di riempimento degli impianti a flusso sotto superficiale per il trattamento di reflui zootecnici (bovini e suini). Dati ricavati dalla bibliografia scientifica mondiale.

	Orizzontale	Verticale
Ghiaia	9	9
Sabbia	0	7
Terreno	2	-
Altro*	5	-

4.2 Prestazioni depurative

Con riferimento all'azoto totale (TKN) e alle sue principali forme, ammoniacale e nitrico, si è innanzitutto eseguita una rielaborazione dei dati bibliografici per ricavare i valori mediani e corrispondenti al 75mo percentile (Q3) di concentrazione in ingresso e in uscita dagli impianti, tenendo distinte, in una prima fase, le casistiche riguardanti i reflui bovini e quelli suini.
Nelle tabelle 7 e 8 vengono pertanto presentate le prestazioni depurative ottenute con la fitodepurazione considerando i valori derivanti dall'insieme degli impianti, ovvero indipendentemente dalla tipologia di impianto. Dalla loro analisi si evince che:

- le concentrazioni di TKN e azoto ammoniacale all'ingresso degli impianti di fitodepurazione sono superiori (sia come valore mediano che come valore Q3) nel caso di reflui suini;
- nel refluo suinicolo l'incidenza di azoto ammoniacale rispetto al totale è nettamente superiore a quanto non avvenga in quello bovino (75 e 22% rispettivamente, con riferimento alle mediane);
- l'azoto nitrico in ingresso agli impianti è presente in concentrazioni insignificanti, inferiori addirittura al limite consigliato dalla WHO per la potabilizzazione delle acque, a testimonianza del fatto che i reflui, ricchi di materiale organico, consumano ossigeno;
- nel refluo bovino una quota importante di azoto è costituita dalla forma organica;
- l'efficienza di abbattimento della fitodepurazione è molto simile per le due tipologie di refluo e si attesta fra il 50 e il 75% per l'azoto totale e fra il 41 e il 72% per la forma ammoniacale;

Tabella 7 – Prestazioni dei sistemi di fitodepurazione a scala reale per il trattamento di reflui bovini. Dati ricavati dalla bibliografia scientifica mondiale.

Reflui bovini	TKN				$N\text{-}NH_4$				$N\text{-}NO_3$			
	IN ($mg\ L^{-1}$)	OUT ($mg\ L^{-1}$)	Efficienza (%)	Rimozione ($g\ m^{-2}\ d^{-1}$)	IN ($mg\ L^{-1}$)	OUT ($mg\ L^{-1}$)	Efficienza (%)	Rimozione ($g\ m^{-2}\ d^{-1}$)	IN ($mg\ L^{-1}$)	OUT ($mg\ L^{-1}$)	Efficienza (%)	Rimozione ($g\ m^{-2}\ d^{-1}$)
Valore mediano	93,0	28,0	49,5	0,5	21,80	17,10	50,55	0,39	1,540	0,760	64,569	0,004
Q3	150,0	70,4	75,1	1,8	76,40	37,03	72,06	0,58	6,645	4,980	71,402	0,039
N. dati	75	75	75	32	31	31	31	30	31	31	31	11

Tabella 8 – Prestazioni dei sistemi di fitodepurazione a scala reale per il trattamento di reflui suini. Dati ricavati dalla bibliografia scientifica mondiale.

Reflui suini	TKN				$N\text{-}NH_4$				$N\text{-}NO_3$			
	IN ($mg\ L^{-1}$)	OUT ($mg\ L^{-1}$)	Efficienza (%)	Rimozione ($g\ m^{-2}\ d^{-1}$)	IN ($mg\ L^{-1}$)	OUT ($mg\ L^{-1}$)	Efficienza (%)	Rimozione ($g\ m^{-2}\ d^{-1}$)	IN ($mg\ L^{-1}$)	OUT ($mg\ L^{-1}$)	Efficienza (%)	Rimozione ($g\ m^{-2}\ d^{-1}$)
Valore mediano	184	109	40,1	5,02	141	53	41,7	0,8	1,06	2,26	64,7	
Q3	416,3	249,4	69,2	9,55	405,5	236,3	69,6	6,5	1,2	3,725	87,5	
N. dati	49	49	49	12	65	65	65	25	27	27	27	0

- sia per reflui bovini che suini l'efficienza di abbattimento è superiore quando i valori di concentrazione in ingresso sono elevati;
- l'abbattimento di azoto ammoniacale non è accompagnato da incremento della concentrazione di azoto nitrico, che anzi viene anch'essa ridotta dalla fitodepurazione;
- la rimozione giornaliera di azoto totale arriva a 9,55 g m^{-2} nelle situazioni di maggiore carico (Q3 reflui suini).

Le indicazioni ricavabili dalla bibliografia internazionale sulle prestazioni depurative della fitodepurazione applicata al digestato (tabella 9) vanno lette in maniera disgiunta dalle precedenti, in quanto, si ricorda, la bibliografia riporta solo casi studio condotti a scala molto piccola, in mesocosmi di 0,2-1 m^2 di superficie. Non si tratta quindi di applicazioni a scala reale e i valori riportati indicano comunque interessanti potenzialità, che devono essere sicuramente esplorate con ricerche più rappresentative.

I valori riportati evidenziano potenzialità di grande interesse, con abbattimenti sull'ordine dell'80% per l'azoto totale e superiori al 90% per la forma ammoniacale. Va messo in rilievo il fatto che le concentrazioni in ingresso sono notevolmente inferiori a quelle tipiche del digestato grezzo e sono assimilabili, come ordine di grandezza, a quelle riportate nelle tabelle 7 e 8 per i reflui bovini e suini. Questo lascia pensare che anche per il digestato, opportunamente sottoposto a pre trattamenti che vadano a eliminare il 70-80% del carico inquinante e cedano un refluo sufficientemente chiarificato, la fitodepurazione possa rappresentare una soluzione praticabile per il finissaggio. Questa ipotesi va però verificata in condizioni pratico-operative almeno su impianti pilota. Con questa finalità sono state realizzate le due linee di fitodepurazione descritte nel capitolo sull'impianto pilota per il trattamento del digestato.

Visto che le prestazioni della fitodepurazione sono risultate simili su reflui bovini e suini, nelle tabelle da 10 a 14 si presentano le elaborazioni riguardanti i risultati per tipologia di impianto, considerando assieme le categorie di refluo.

Le wetland naturali (tabella 10), utilizzate soprattutto negli Stai Uniti alla fine del secolo scorso, offrono efficienze di abbattimento comprese fra il 50 e il 70% per l'azoto totale e valori leggermente superiori per l'azoto ammoniacale. Conseguono però tali prestazioni con un notevole impegno di superficie, come testimoniato dai valori di rimozione specifica, che si aggirano sempre attorno a 0,5 g m^{-2} $giorno^{-1}$.

Sono stati riscontrati solo due casi di fitodepurazione con constructed wetland a flusso superficiale (tabella 11), dove peraltro è stato monitorato solamente l'azoto ammoniacale. L'efficienza di abbattimento è prossima al 30%, ma data la limitatezza e l'incompletezza delle informazioni non si ritiene di poter trarre indicazioni generalizzabili.

Sia gli impianti a flusso orizzontale (tabella 12) che quelli a flusso verticale (tabella 13) forniscono abbattimenti del 40-50% di azoto totale. Rispetto ai sistemi naturali sembrano quindi meno efficienti, ma sanno però offrire migliori indici di rimozione specifica, con valori che nei verticali superano i 9 g m^{-2} $giorno^{-1}$.

Le prestazioni migliori in termini di efficienza di abbattimento vengono conseguite dagli impianti ibridi (tabella 14) 76% dell'azoto totale e 70% della forma ammoniacale.

Tabella 9 – Prestazioni della fitodepurazione per il trattamento del digestato di origine zootecnica in esperienze a scala di mesocosmo.

Digestato	TKN				$N\text{-}NH_4$				$N\text{-}NO_3$			
	IN ($mg\ L^{-1}$)	OUT ($mg\ L^{-1}$)	Efficienza (%)	Rimozione ($g\ m^{-2}\ d^{-1}$)	IN ($mg\ L^{-1}$)	OUT ($mg\ L^{-1}$)	Efficienza (%)	Rimozione ($g\ m^{-2}\ d^{-1}$)	IN ($mg\ L^{-1}$)	OUT ($mg\ L^{-1}$)	Efficienza (%)	Rimozione ($g\ m^{-2}\ d^{-1}$)
Valore mediano	96,9	71,0	20,7	1,02	76,2	61,65	21,7	0,71	0,44	0,15	67	0,01
Q3	101	77,6	26	1,51	84,1	65,95	24,6	1,02	0,44	0,57	71,5	0,01
N. dati	10	10	10	6	10	10	10	6	10	10	10	3

Tabella 10 – Prestazioni dei sistemi naturali di fitodepurazione nel trattamento dell'azoto di origine bovina e suina.

NATURALI	TKN				$N\text{-}NH_4$				$N\text{-}NO_3$			
	IN ($mg\ L^{-1}$)	OUT ($mg\ L^{-1}$)	Efficienza (%)	Rimozione ($g\ m^{-2}\ d^{-1}$)	IN ($mg\ L^{-1}$)	OUT ($mg\ L^{-1}$)	Efficienza (%)	Rimozione ($g\ m^{-2}\ d^{-1}$)	IN ($mg\ L^{-1}$)	OUT ($mg\ L^{-1}$)	Efficienza (%)	Rimozione ($g\ m^{-2}\ d^{-1}$)
Valore mediano	131,8	58,6	50,3	0,5	54,7	17,4	58,2	0,4	1,1	2,1	67,0	0,0
Q3	336,9	196,8	71,3	0,5	194,0	97,4	76,4	0,5	2,4	4,0	77,8	0,0
N. dati	67	67	67	6	78	78	78	13	46	46	46	18

Tabella 11 – Prestazioni dei sistemi fitodepurazione a flusso superficiale nel trattamento dell'azoto di origine bovina e suina.

SUPERFICIALI	TKN				$N\text{-}NH_4$				$N\text{-}NO_3$			
	IN ($mg\ L^{-1}$)	OUT ($mg\ L^{-1}$)	Efficienza (%)	Rimozione ($g\ m^{-2}\ d^{-1}$)	IN ($mg\ L^{-1}$)	OUT ($mg\ L^{-1}$)	Efficienza (%)	Rimozione ($g\ m^{-2}\ d^{-1}$)	IN ($mg\ L^{-1}$)	OUT ($mg\ L^{-1}$)	Efficienza (%)	Rimozione ($g\ m^{-2}\ d^{-1}$)
Valore mediano					190	135	27,8					
Q3					216	150	29,8					
N. dati	0	0	0	0	2	2	2	0	0	0	0	0

Tabella 12 – Prestazioni dei sistemi fitodepurazione a flusso sotto superficiale orizzontale nel trattamento dell'azoto di origine bovina e suina.

ORIZZONTALI	TKN				$N\text{-}NH_4$				$N\text{-}NO_3$			
	IN ($mg\ L^{-1}$)	OUT ($mg\ L^{-1}$)	Efficienza (%)	Rimozione ($g\ m^{-2}\ d^{-1}$)	IN ($mg\ L^{-1}$)	OUT ($mg\ L^{-1}$)	Efficienza (%)	Rimozione ($g\ m^{-2}\ d^{-1}$)	IN ($mg\ L^{-1}$)	OUT ($mg\ L^{-1}$)	Efficienza (%)	Rimozione ($g\ m^{-2}\ d^{-1}$)
Valore mediano	55	28	38,6	0,5	34	24,25	39,1	0,47	2,02	1	50	0,03
Q3	175	109	48,9	1,96	86	53	68	0,47	5,95	3,4	64,7	0,07
N. dati	31	31	31	19	22	22	22	14	7	7	7	5

Tabella 13 – Prestazioni dei sistemi fitodepurazione a flusso sotto superficiale verticale nel trattamento dell'azoto di origine bovina e suina. Dati ricavati dalla bibliografia scientifica mondiale.

VERTICALI	TKN				$N\text{-}NH_4$				$N\text{-}NO_3$			
	IN ($mg\ L^{-1}$)	OUT ($mg\ L^{-1}$)	Efficienza (%)	Rimozione ($g\ m^{-2}\ d^{-1}$)	IN ($mg\ L^{-1}$)	OUT ($mg\ L^{-1}$)	Efficienza (%)	Rimozione ($g\ m^{-2}\ d^{-1}$)	IN ($mg\ L^{-1}$)	OUT ($mg\ L^{-1}$)	Efficienza (%)	Rimozione ($g\ m^{-2}\ d^{-1}$)
Valore mediano	127,25	75,5	34,7	3,2	146	144	11,4	2,09				
Q3	439	333,64	44,3	9,2	234	234	31,6	4,4				
N. dati	17	17	17	8	26	26	26	20	0	0	0	0

Tabella 14 – Prestazioni dei sistemi ibridi di fitodepurazione nel trattamento dell'azoto di origine bovina e suina. Dati ricavati dalla bibliografia scientifica mondiale.

IBRIDI	TKN				$N\text{-}NH_4$				$N\text{-}NO_3$			
	IN ($mg\ L^{-1}$)	OUT ($mg\ L^{-1}$)	Efficienza (%)	Rimozione ($g\ m^{-2}\ d^{-1}$)	IN ($mg\ L^{-1}$)	OUT ($mg\ L^{-1}$)	Efficienza (%)	Rimozione ($g\ m^{-2}\ d^{-1}$)	IN ($mg\ L^{-1}$)	OUT ($mg\ L^{-1}$)	Efficienza (%)	Rimozione ($g\ m^{-2}\ d^{-1}$)
Valore mediano	137	24	76,5	2,54	77	22	69,6	0,5				
Q3	138	32	76,8	2,54	172	105	71,4	6,6				
N. dati	17	17	17	14	17	17	17	17	0	0	0	0

4.3 Considerazioni

La bibliografia scientifica internazionale ha messo in rilievo le potenzialità della fitodepurazione per il trattamento della frazione fluida dei reflui di allevamenti bovini e suini. La copiosa serie di pubblicazioni fa riferimento a monitoraggi di medio lungo periodo, con sequenze di dati che vanno a coprire archi temporali di parecchi mesi se non di anni. In certi casi poi il monitoraggio è stato ripetuto nello stesso impianto dopo alcuni anni e questo avvalora la robustezza della fitodepurazione nel corso del tempo. Si tratta di dati provenienti da impianti operativi a scala reale, mai di verifiche puntuali e non ripetute.

I dati ottenuti, pur se di sicuro interesse, vanno però interpretati correttamente per essere calati nelle realtà operative del Veneto e, più in generale, del Nord Italia. Si deve innanzitutto ricordare che molte delle informazioni derivano dall'utilizzo di wetland naturali, pratica abbastanza diffusa nel passato nelle pianure degli Stai Uniti. Si tratta di una soluzione non proponibile nel nostro ambiente, per una serie di motivazioni facili da immaginare.

Le analisi sopra presentate indicano gli impianti ibridi come le soluzioni più adatte per l'efficiente trattamento dei reflui. Si tratta della tipologia di impianto sviluppata più di recente, che quindi si è avvalsa delle conoscenze

e delle esperienze maturate con i sistemi di più vecchio concepimento e utilizzazione.
Come detto nella parte generale è difficile configurare tipologie standard di impianti ibridi; quelli descritti nella bibliografia internazionale sono uno differente dall'altro, essendo composti da successioni differenti quali ad esempio: verticale-orizzontale-superficiale; verticale-orizzontale-verticale; superficiale con celle a diversa vegetazione; flottante-verticale-orizzontale. In media le prestazioni depurative sono state di tutto rilievo, ma non si può escludere che esse possano essere addirittura migliorate con una progettazione attenta e mirata alle singole realtà locali.
Una perplessità, in tema di fitodepurazione, può sorgere a proposito della trasferibilità dei risultati conseguiti in ambienti diversi, data l'influenza delle condizioni climatiche sui processi biologici di degradazione delle sostanze inquinanti. Nell'esame delle casistiche internazionali va rilevato che solo pochi casi provengono da paesi con clima decisamente caldo e potrebbero non essere ragionevolmente simili alle condizioni venete e dell'Italia settentrionale. Quasi tutte le casistiche provengono da ambienti con inverni freddi, come e più di quelli del Nord Italia e non evidenziano sostanziali oscillazioni stagionali delle prestazioni depurative. Ciò è legato al fatto che nei sistemi a flusso sotto superficiale il refluo non viene in contatto con l'atmosfera e la sua temperatura anche nei mesi invernali è sufficiente per mantenere attivi i processi di degradazione operati dai microrganismi.
Alla luce di queste considerazioni si può pertanto ritenere che gli abbattimenti calcolati possano essere conseguiti anche nelle nostre condizioni.

5. IMPIANTI E MONITORAGGI NEL VENETO

5.1 Impianti di fitodepurazione a flusso superficiale

5.1.1 Impianto di fitodepurazione a flusso superficiale per il trattamento di acque di drenaggio agricolo sito nell'azienda sperimentale "L. Toniolo" dell'Università di Padova

L'impianto di fitodepurazione a flusso superficiale per il trattamento di acque refluo di drenaggio agricolo (figure 38 e 39), in esercizio dal 1996, è sito a Legnaro nell'azienda sperimentale "L. Toniolo" dell'Università degli Studi di Padova. È inserito a valle del sito sperimentale di drenaggio controllato dal quale riceve le acque (figura 40). Si estende su una superficie di 3300 m^2, è posto 0,4 m sotto il piano di campagna ed è circondato da un argine di 0,3 m sopra il piano di campagna. Lungo l'intero perimetro dell'area umida è stato posto, per una profondità di due metri, un film plastico di PVC dello spessore di 0,08 mm al fine di ridurre gli scambi laterali d'acqua. All'interno dell'area sono presenti tre argini che guidano il percorso dell'acqua (circa 200 m) dall'ingresso (figura 41) all'uscita (figura 42). Il tempo medio di permanenza delle acque al suo interno è di 5 giorni circa e la vegetazione è costituita prevalentemente da *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud.
Il sistema risulta particolarmente efficace nell'abbattimento sia dell'azoto totale e nitrico che del fosforo totale (tabella 15) raggiungendo rimozioni medie di circa il 90% per le forme azotate e di circa il 70% per il fosforo.
La produzione di biomassa secca asportabile annualmente è mediamente di 8,8 t ha^{-1} (2008-2011). Il sistema contribuisce inoltre all'incremento del carbonio organico del suolo risultando così in grado di fissare CO_2 atmosferica. Nel quinquennio 2007-2011 è stata stimata una fissazione di circa 110 t CO_2 ha^{-1}.

Figura 39 – Impianto di fitodepurazione a flusso superficiale per il trattamento delle acque di drenaggio agricolo in esercizio.

Figura 38 – Schema dell'impianto di fitodepurazione a flusso superficiale nell'azienda sperimentale "L. Toniolo". P = pompa d'ingresso che immette l'acqua dal pozzetto (B) di raccolta delle acque di drenaggio; U = uscita dell'acqua con scarico nel fosso aziendale recettore; a = arginelli; fr = freatimetro. Con linea tratteggiata il decorso dell'acqua.

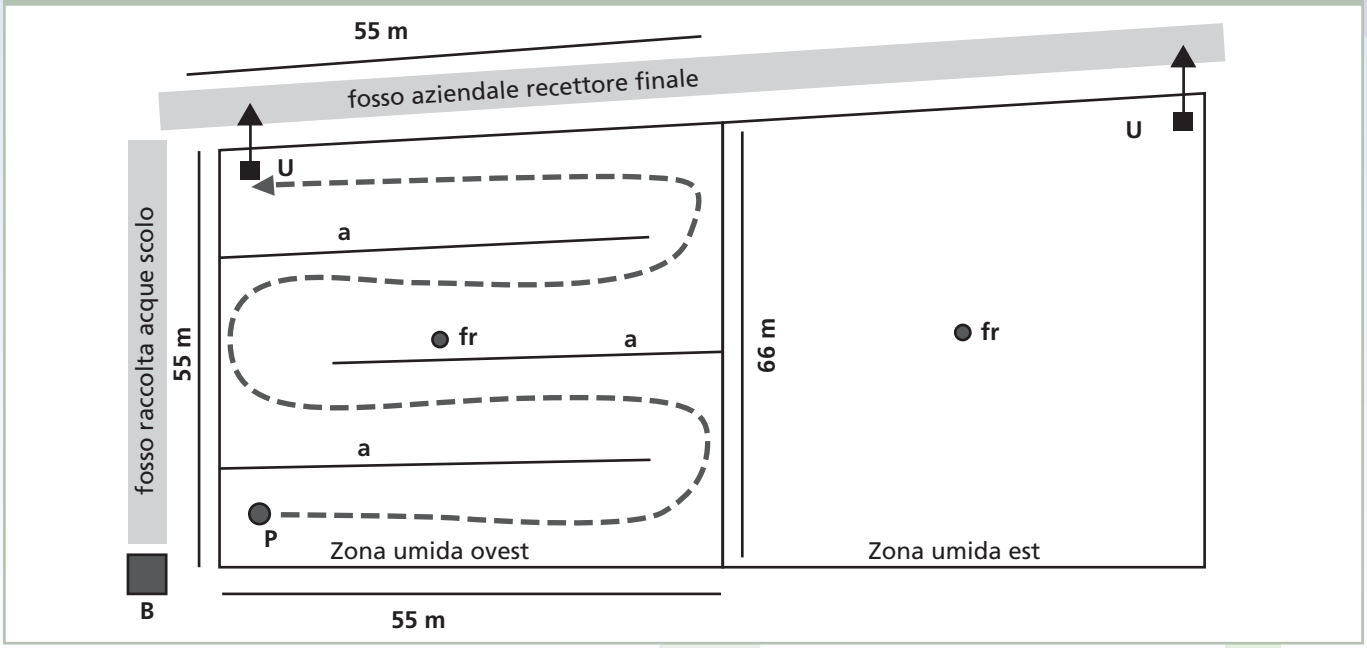


Figura 40 – Impianto di fitodepurazione a valle della rete di drenaggio nell'azienda agraria sperimentale "L. Toniolo".

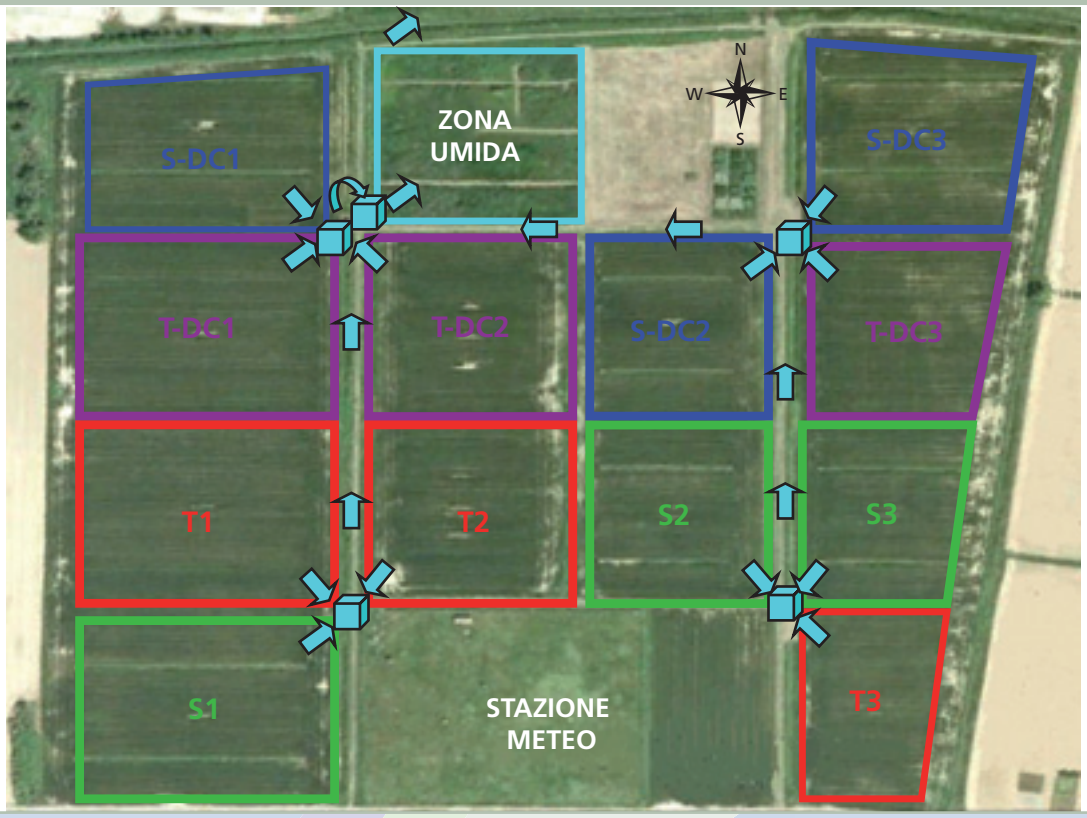


Figura 41 – Punto di immissione dell'acqua di drenaggio nel sistema di fitodepurazione a flusso superficiale nell'azienda sperimentale "L. Toniolo".

Figura 42 – Collettore finale dell'impianto di fitodepurazione a flusso superficiale sito nell'azienda sperimentale "L. Toniolo".

Tabella 15 – Bilanci di massa cumulati e % di abbattimento di azoto totale e nitrico e fosforo totale calcolati per l'impianto di fitodepurazione a flusso superficiale sito presso l'azienda sperimentale "L. Toniolo".

Annata agraria	N Tot. (kg ha^{-1})			NO_3 -N (kg ha^{-1})			P Tot. (kg ha^{-1})		
	IN (mg L^{-1})	OUT (mg L^{-1})	Rimozione (g m^{-2} d^{-1})	IN (mg L^{-1})	OUT (mg L^{-1})	Rimozione (g m^{-2} d^{-1})	IN (mg L^{-1})	OUT (mg L^{-1})	Rimozione (g m^{-2} d^{-1})
2008-2009	155,52	12,82	91,8	84,15	3,42	95,9	**4,57**	**0,31**	**93,2**
2009-2010	377,09	52,66	86,0	434,62	79,87	81,6	**6,82**	**3,00**	**56,0**
Media	266,31	32,74	87,7	259,39	41,65	83,9	5,70	1,66	70,9

5.1.2 Area umida ricostruita di "Cà di Mezzo" per la riduzione nelle acque di bonifica dell'inquinamento di origine agricola

L'area umida, che si estende per circa 30 ettari tra il Fiume Bacchiglione e il Canal Morto, è stata realizzata nel 2000 e opera come sistema di fitodepurazione delle acque dei canali di bonifica a monte dal 2006 (figura 43). Si compone di tre bacini e ha lo scopo principale di abbattere i soldi sospesi, i composti azotati e i fosfati nelle acque che successivamente defluiscono nella laguna di Venezia. La portata delle acque in ingresso è mediamente di circa 300 L s^{-1} ed sono invasate mediamente 90.000 m^3 di acque, le aree permanente sommerse sono circa 8 ha, le aree emerse circa 11 ha mentre le zone golenali, nelle quali in fase di realizzazione è stata impiantata della *P. australis* con una densità di 1 pianta m^2, si estendono per circa 10 ha. Il tempo di residenza dell'acqua all'interno del sistema è di 6-7 giorni e gli abbattimenti medi di azoto e fosforo totale sono rispettivamente del 10,9 e 12,9%. Durante gli anni di attività nell'area si sono diffuse, oltre alla *P. australis*, anche altre specie di macrofite quali: *Typha* sp., *Lythrum salicaria*, *Schoenoplectus lacustris*, *Cyperus longus*, *Juncus tenuis*, *Equisetum palustre*, *Iris pseudacorus* e *Carex* sp.

5.2 Impianti di fitodepurazione a flusso sotto superficiale

5.2.1 Impianto di fitodepurazione ibrido per il trattamento di reflui suinicoli

L'impianto è stato costruito nel 2008 presso un'azienda specializzata nell'allevamento di suini da ingrasso con una presenza media di circa 1.000 capi (corrispondenti a circa 1.950 abitanti equivalenti). L'impianto di fitodepurazione occupa complessivamente un'area di circa 130 m^2 e tratta fino a 2 m^3 di frazione fluida del liquame prodotto giornalmente e precedentemente sottoposta a pretrattamento. Il sistema, che funziona quindi come finissaggio, è

Figura 43 – Vista aerea dell'area umida di "Cà di Mezzo".

un impianto ibrido costituito da tre vasche a flusso sotto superficiale verticale (FV) che operano in parallelo seguite da una vasca a flusso sotto superficiale orizzontale (FO) (figura 44).

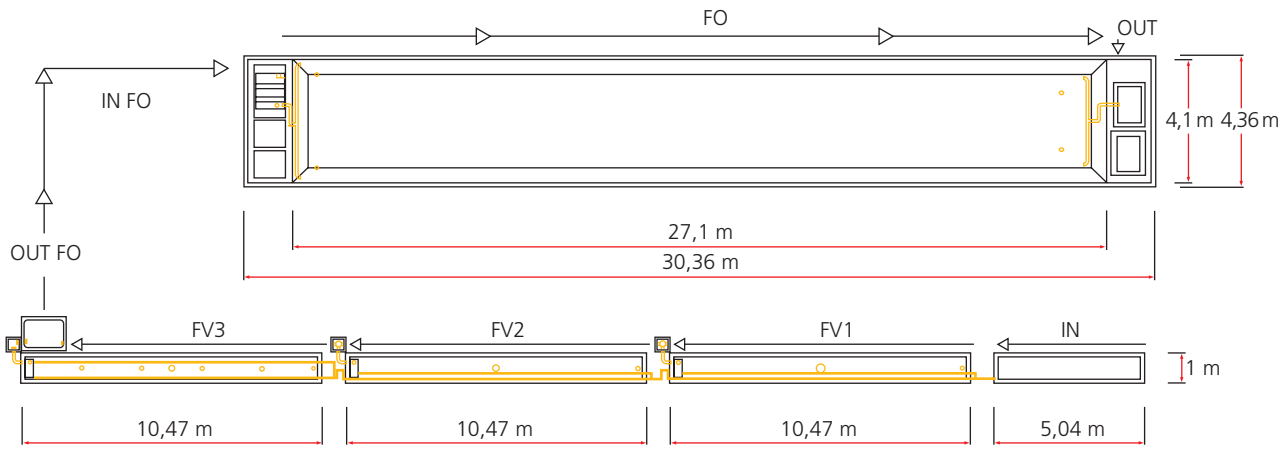
Le tre vasche FV misurano internamente 10 m di lunghezza per 0,70 m di larghezza e 0,70 m di profondità. Due di esse sono riempite con ghiaino lavato (ø 10-20 mm) vegetate l'una con *Canna indica* L. (FV1) (canna indica) (figura 45) l'altra (FV2) con *Phragmites australis* (Cav.) Trin (canna palustre); la terza (FV3) è riempita con ghiaino lavato (ø 10-20 mm) per 0,10 m seguito da sabbia di fiume (ø 3-5 mm) e zeolite, ed è vegetata con *P. australis*. La vasca a flusso sub superficiale orizzontale (FO) misura internamente 27,1 m di lunghezza, 4 m di larghezza e 0,70 m di profondità e ha il fondo con una pendenza longitudinale dell'1% che permette il deflusso del refluo. È stata riempita con ghiaino lavato (ø 10-20 mm) ed è vegetata prevalentemente con *P. australis* e alcune piante di *Carex pseudocyperus* L. (carice), *Juncus effusus* L. (giunco) e *Iris pseudacorus* L. (giaggiolo acquatico), collocate ai bordi della vasca per conferire un aspetto visivo gradevole nel periodo di fioritura (figura 46). L'operazione di carico e distribuzione del refluo nell'impianto di fitodepurazione avviene tramite un'elettropompa sommersa installata in una vasca di alimentazione posta in testata e comandata da un quadro elettrico con temporizzatori programmabili.

Il refluo in uscita dalle vasche FV viene convogliato tramite una tubatura sotterranea a un pozzetto di accumulo che contiene una pompa lineare a membrana azionata da un indicatore di livello a galleggiante. Quando il livello del refluo all'interno di questo pozzetto è sufficientemente alto, la pompa lo invia all'interno del pozzetto di entrata della vasca FO passando attraverso una coppia di filtri poliuretanici in spugna di resina espansa che hanno lo scopo di trattenere eventuali particelle di dimensioni eccessive. Il refluo permane all'interno della vasca FO per circa 6 giorni poi defluisce verso un pozzetto collegato con una vasca cilindrica di calcestruzzo armato avente una capacità utile di 2.000 m^3.

Figura 45 – Vasca a FV vegetata con *Canna indica*.

Figura 46 – Vasca FO vegetata con *Phragmites australis*; in primo piano alcuni individui di *Iris pseudacorus*.

Figura 44 – Planimetria del sistema di fitodepurazione ibrido per il trattamento di reflui suinicoli.



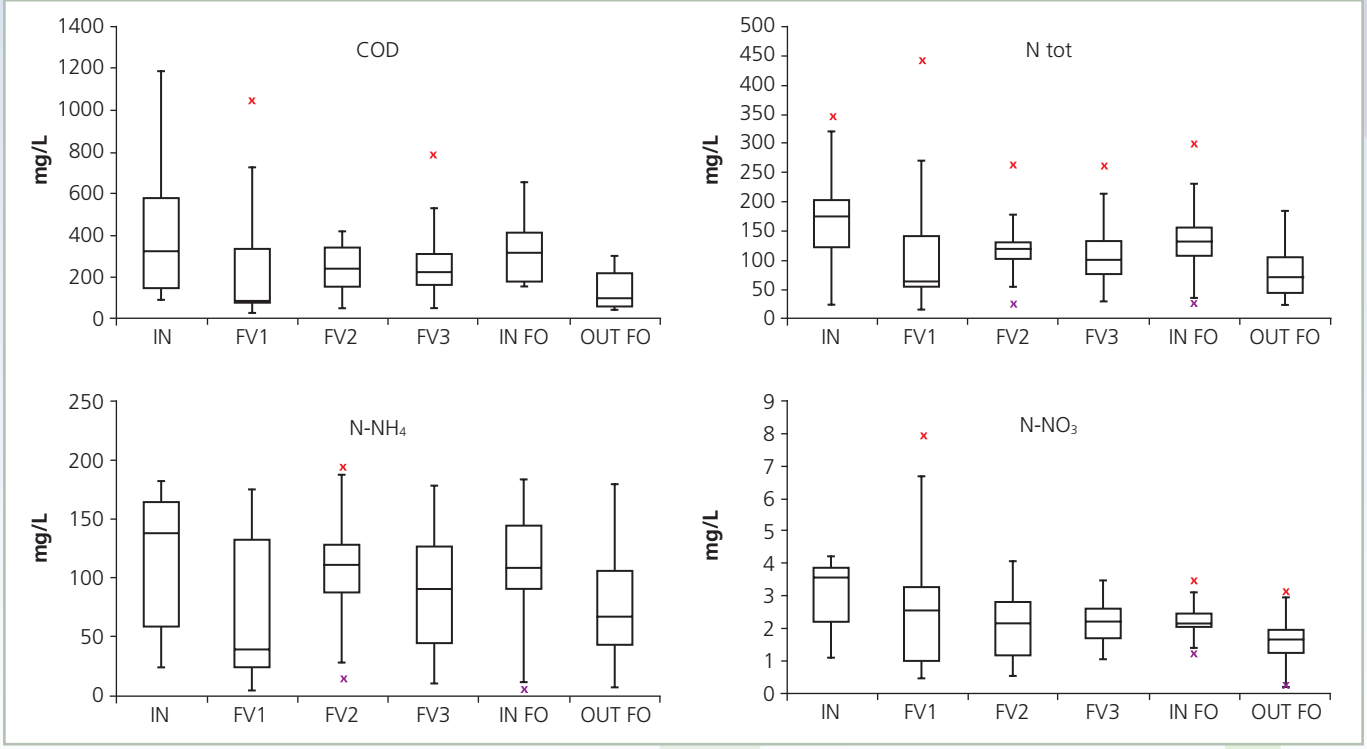
L'impianto è stato monitorato da marzo 2010 ad agosto 2011 distinguendo tre fasi operative:

- *da marzo a luglio 2010* durante la quale le vasche FV sono state caricate ogni giorno dalle 9 alle 11 e hanno funzionato come un "filtro biologico". Il livello del refluo all'interno della vasche veniva mantenuto costante grazie a un sifone di 0,44 m di altezza e 0,10 m di diametro installato nel pozzetto di controllo di cui è dotata ogni vasca FV;
- *da ottobre 2010 a marzo 2011* le vasche FV sono state gestite alternando fasi di "tutto pieno" e "tutto vuoto" grazie a un sistema di temporizzatori modulari pausa/lavoro a tempi indipendenti che azionavano tre elettropompe sommerse da 200W posizionate all'interno dei pozzetti di ispezione di ogni vasca FV. Lo schema di funzionamento prevedeva 2 ore per il carico simultaneo del refluo all'interno delle 3 vasche FV, 8 ore in cui il medium rimaneva saturo di refluo e si creavano condizioni di anaerobiosi, 2 ore per lo scarico delle vasche e 12 ore in cui il medium di riempimento rimaneva vuoto, per favorire la diffusione dell'ossigeno anche negli strati più profondi delle vasche. Durante il ciclo di scarico avveniva il carico della vasca FO, anch'esso intermittente;
- *da maggio ad agosto 2011* il sistema ibrido di fitodepurazione è stato caricato giornalmente con 1,7 m^3 di acqua in cui è stato sciolto nitrato d'ammonio (titolo 26%) in modo da ottenere un refluo ricostruito con concentrazioni in ingresso di circa 125 mg L^{-1} di azoto nitrico e 125 mg L^{-1} di azoto ammoniacale.

Le prestazioni depurative dell'impianto di fitodepurazione sono state valutate prelevando ed analizzando in laboratorio campioni da sei punti diversi: vasca di alimentazione (IN), uscite dalle vasche FV n.1 (FV1), n.2 (FV2) e n.3 (FV3), ingresso della vasca FO (IN FO) e uscita dalla stessa (OUT FO); durante l'ultima fase della sperimentazione sono stati prelevati e analizzati anche i campioni in uscita dalle vasche a elementi flottanti FS. In totale sono state eseguite 11 campagne di monitoraggio nel primo periodo, 10 nel secondo e 11 nel terzo per un totale di 192 campioni analizzati.

Nel primo periodo di monitoraggio (figura 47) la concentrazione di COD in entrata al sistema è risultata molto variabile, oscillando fra 93 e 1.183 mg L^{-1} con una mediana di 325 mg L^{-1}. Tutte tre le vasche FV hanno notevolmente ridotto la variabilità dei valori, abbattendo in particolare le concentrazioni più elevate; fra le tre vasche FV quella con canna indica ha dato i migliori risultati sulla mediana (84 mg L^{-1}), mentre fra le due vegetate con canna palustre non sono emerse differenze imputabili al diverso tipo di substrato. La vasca FO si è dimostrata particolarmente efficace abbattendo il COD da 322 a 103 mg L^{-1}. La concentrazione di azoto totale, che in entrata al sistema ha fatto registrare un valore mediano di 175,6 mg L^{-1}, è diminuita soprattutto all'uscita della vasca FV1 (64,7 mg L^{-1}) con un abbattimento del 63%. FV2 e FV3 hanno mostrato prestazioni simili (valori mediani dell'effluente pari a 120 e 103 mg L^{-1} e abbattimenti del 31% e 41%). La vasca FO ha ricevuto una concentrazione mediana di 134 mg L^{-1} e ha scaricato

Figura 47 – Variazioni di concentrazione di COD, azoto totale, ammoniacale e nitrico nel sistema SIF per il trattamento di reflui suinicoli. Primo periodo di monitoraggio (marzo – luglio 2010).



a concentrazione di 74 mg L^{-1} con un abbattimento del 45%. Nel complesso il SIF ha abbattuto del 58% la concentrazione di azoto presente all'ingresso. Le prestazioni per l'azoto ammoniacale hanno ricalcato quelle descritte per l'azoto totale: notevole abbattimento a opera della vasca vegetata con canna indica, comportamento sostanzialmente simile fra le due vasche FV con canna palustre e abbattimento del 52% della vasca FO. L'azoto nitrico presente nel refluo entrante al sistema presentava un intervallo di concentrazione varia fra 1,1 a 4,6 mg L^{-1}, con mediana di 3,6 mg L^{-1}. È utile notare come la concentrazione, molto bassa e addirittura inferiore al valore soglia per le acque potabili, è ulteriormente diminuita nei vari punti dell'impianto, con una mediana in uscita di 1,6 mg L^{-1}.

Anche nel secondo periodo di monitoraggio (figura 48) la concentrazione di COD in entrata al sistema è risultata molto variabile, oscillando fra 252 e 1.416 mg L^{-1}, la mediana di 836 mg L^{-1}. Tra le vasche FV quella con canna indica ha dato i migliori risultati di abbattimento del valore mediano (524 mg L^{-1}), mentre le due vegetate con canna palustre non hanno dimostrato un'azione significativa. La vasca FO è risultata efficace abbattendo il COD da 680 a 524 mg L^{-1}. La concentrazione di azoto totale, che in entrata al sistema ha fatto registrare un valore mediano di 674 mg L^{-1}, è diminuita all'uscita delle vasche FV1 e FV2 a 514 e 516 mg L^{-1} (abbattimenti del 24% e 23%) e a 466 mg L^{-1} dalla vasca FV3. La vasca FO ha ricevuto una concentrazione mediana di 468 mg L^{-1} e ha scaricato a concentrazione di 388 mg L^{-1} con un abbattimento del 17%. L'abbattimento complessivo del sistema è stato del 42%. La concentrazione di azoto ammoniacale ha presentato una ampia variabilità in tutti i punti del campionamento, e il valore mediano in ingresso, di poco superiore 600 mg L^{-1} è stato pressoché dimezzato in tutte le vasche FV. L'abbattimento ottenuto dalla vasca FO è stato del 25%. L'azoto nitrico presente nel refluo entrante al sistema presentava un valore mediano di concentrazione di 4,56 mg L^{-1} che veniva ridotto a 3,22 mg L^{-1} in uscita dall'impianto.

Nel terzo periodo di monitoraggio (tabella 16) il valore mediano di concentrazione di azoto ammoniacale in entrata al sistema è stato di 119 mg L^{-1}. La vasca FV3 è risultata la più efficace con un abbattimento del 46%. La vasca FO

Figura 48 – Variazioni di concentrazione di COD, azoto totale, ammoniacale e nitrico nel sistema SIF per il trattamento di reflui suinicoli. Secondo periodo di monitoraggio (ottobre – marzo 2011).

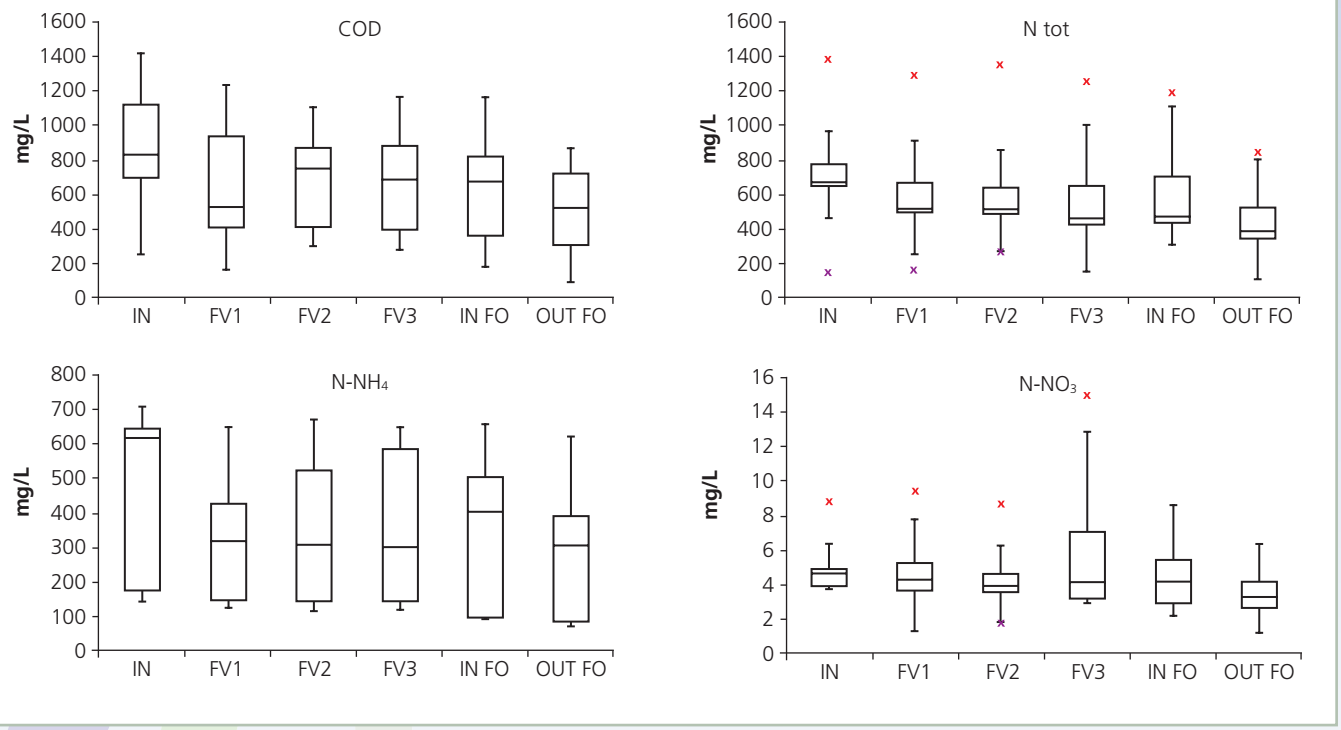


Tabella 16 – Variazioni di concentrazione mediana di azoto ammoniacale e nitrico nel sistema SIF e nelle vasche FS. Terzo periodo di monitoraggio (maggio – agosto 2011).

Parametro	IN (mg L^{-1})	FV1 (mg L^{-1})	FV2 (mg L^{-1})	FV3 (mg L^{-1})	IN FO (mg L^{-1})	OUT FO (mg L^{-1})	FS1 (mg L^{-1})	FS2 (mg L^{-1})	FS3 (mg L^{-1})
$N\text{-}NH_4$	119	68,5	71.2	71.6	61,2	53,7	41,2	48,9	40,4
$N\text{-}NO_3$	135	75,2	87,6	86,3	66,4	49,4	50,5	55,1	48,6

si è dimostrata meno efficace rispetto alle vasche FV con un abbattimento del 12%. Nel complesso le vasche FS, nonostante fossero di recente istallazione e con vegetazione poco sviluppata, hanno ulteriormente abbassato la concentrazione rispetto all'uscita dalla vasca FO, con giaggiolo acquatico (FS3) e thalia più performanti di trifoglio fibrino. La concentrazione di azoto nitrico, all'ingresso pari a 135 mg L^{-1}, veniva abbattuta del 44% in FV1 e del 35-36% nelle FV con canna palustre. La vasca FO ha ricevuto una concentrazione mediana di 66,4 mg L^{-1} e ha scaricato a concentrazione di 49,4 mg L^{-1} con un abbattimento del 26%. Le vasche FS hanno manifestato scarsa efficacia nei confronti di questa forma azotata.

I risultati del monitoraggio dimostrano che l'impianto ibrido di fitodepurazione ha operato in condizioni simili a quelle riscontrate nella letteratura internazionale, sia per quanto concerne le caratteristiche del refluo in ingresso, sia per le prestazioni depurative offerte. L'impianto ibrido ha infatti ridotto la concentrazione di azoto presente nel refluo pretrattato in misura variabile dal 42 a 61% in relazione ai valori di concentrazione in ingresso e alle modalità di gestione. È importante sottolineare che nel secondo periodo di monitoraggio le piante hanno saputo tollerare elevate concentrazioni di azoto totale e ammoniacale, addirittura dieci volte superiori a quelle ritenute tipiche di reflui da trattare con la fitodepurazione. I migliori risultati sono stati conseguiti nel terzo periodo di monitoraggio grazie alla gestione del sistema con i cicli programmati di carico e scarico delle vasche a flusso verticale e l'implementazione delle vasche con elementi flottanti a valle della vasca a flusso orizzontale. In questo periodo di monitoraggio l'azoto ha subito un abbattimento del 63% per una rimozione giornaliera di 1,86 g m^{-2} che corrisponderebbe a 6.789 kg $anno^{-1}$ per ettaro di superficie depurante. I migliori risultati di abbattimento sono stati ottenuti dalle vasche a flusso verticale, nonostante le dimensioni ridotte rispetto alla vasca a flusso orizzontale. Fra le prime, quella vegetata con canna indica ha dato prestazioni leggermente migliori di quelle vegetate con canna palustre, le quali non hanno mostrato differenze imputabili al diverso tipo di substrato. Le prestazioni delle vasche con elementi flottanti sono da ritenersi ancora transitorie dato lo scarso sviluppo della vegetazione; è lecito attendersi un progressivo miglioramento della loro efficacia depurativa con la crescita delle piante e dei loro apparati radicali.

5.2.2 Impianto pilota ibrido di fitodepurazione per il trattamento di digestato

L'impianto pilota ibrido di fitodepurazione per il trattamento della frazione liquida di digestato sito presso la Stalla Sociale di Terrassa Padovana e capace di trattare 0,7-1 m^3 di refluo al giorno, è costituito da due linee di trattamento poste in serie, la prima a flusso sotto superficiale e la seconda a flusso superficiale flottante (figure 49 e 50).

La prima linea di trattamento (SIF) è costituita in successione da: una vasca di diluizione, una vasca di sedimentazione, due vasche a flusso sotto superficiale verticale poste in parallelo e funzionanti in modo alternato ed una vasca a flusso sotto superficiale orizzontale (figura 51).

Figura 49 – Pianta dell'impianto pilota ibrido di fitodepurazione per il trattamento di digestato.

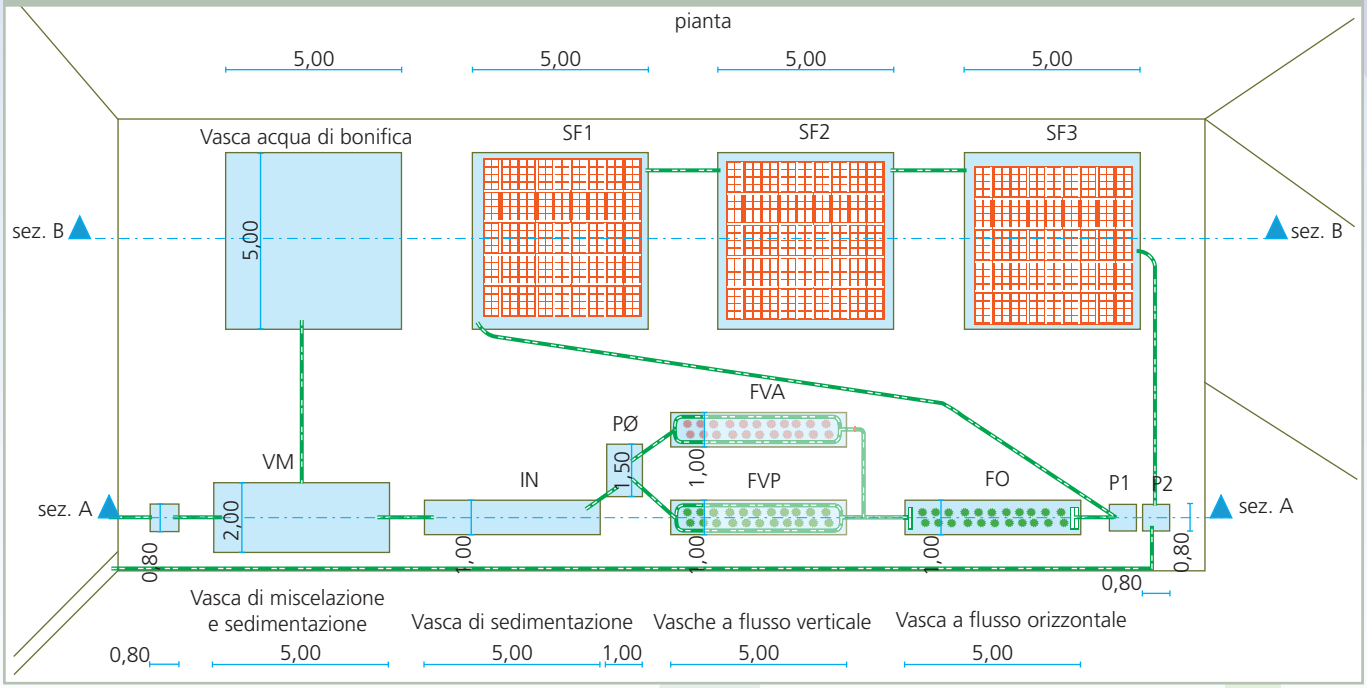


Figura 50 – Sezione dell'impianto pilota ibrido di fitodepurazione per il trattamento di digestato.

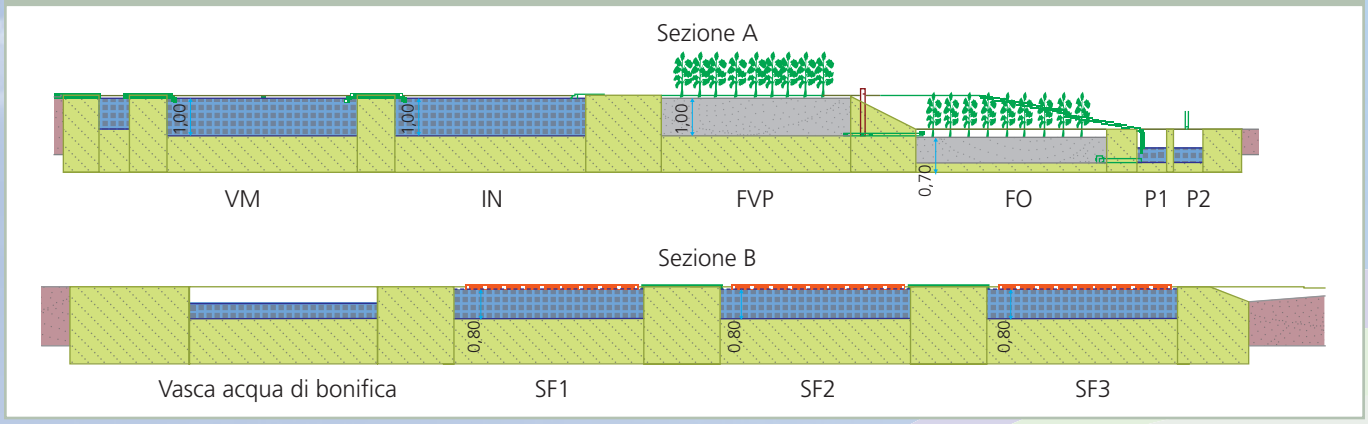


Figura 51 – Vista frontale della linea SIF dell'impianto pilota ibrido di fitodepurazione per il trattamento di digestato.

La seconda linea (SFF), che riceve il refluo parzialmente trattato in uscita dall'ultima vasca della linea precedente, è composta da tre vasche a flusso superficiale, poste in serie e contenenti al loro interno elementi flottanti (Tech-IA) vegetati con diciotto specie vegetali autoctone (figura 52).
Nella vasca di diluizione, a base rettangolare e avente un volume di 10 m^3, il refluo viene diluito 1 a 6 con acqua prelevata da un attiguo canale di bonifica. Segue poi una vasca di sedimentazione, anch'essa a base rettangolare (5 x 1 m), del volume di 5 m^3. I letti a flusso sotto superficiale verticale, con base rettangolare (5 x 1 m) e profondi 1 m, aventi tempo di ritenzione di 1 giorno, sono vegetati uno con *Phragmites australis* (Cav.) Trin e l'altro con *Arundo donax* L. e riempiti con materiale inerte di diversa sezione lungo il profilo (15 cm di ghiaia lavata in alveo (Ø 5 cm), 50 cm di ghiaia lavata in alveo (Ø 1-2 cm), 20 cm di sabbia lavata letto del fiume (Ø 2 mm), 10 cm di ghiaia lavata in alveo (Ø 1-2 cm)). Il letto a flusso sotto superficiale orizzontale, di dimensione uguale ai letti a flusso sotto superficiale verticale vegetato con *P. australis*, è riempito invece variando la sezione del materiale in senso longitudinale (0,5 m di ghiaia lavata letto del fiume (Ø 5 cm), 4 m di ghiaia lavata in alveo (Ø 1-2 cm), 0,5 m di ghiaia lavata letto del fiume (Ø 5 cm)).
Il refluo parzialmente trattato in uscita dal letto a flusso sotto superficiale orizzontale è raccolto in un pozzetto finale di accumulo dal quale, per mezzo di un'elettropompa, è rilanciato in testa alla seconda linea di trattamento.
Le tre vasche a flusso superficiale, a base quadrata e con un'altezza di circa 0,8 m, coprono una superficie complessiva di circa 100 m^2 e contengono al loro interno ciascuna 60 elementi flottanti (Tech-IA). Le principali specie impiegate in questi sistemi sono: *Cynodon dactylon*, *Cladium mariscus*, *Iris pseudacourus*, *Phragmites australis*, *Typha latifolia*, *Artemisia caerulescens*, *Elytrigia atherica*, *Halimione portulacoides*, *Juncus maritimus*, *Puccinellia palustris* e *Spartina maritima*).

Figura 52 – Vista della linea SFF dell'impianto pilota ibrido di fitodepurazione per il trattamento di digestato dopo il trapianto.

Le prestazioni depurative dell'impianto, in esercizio dall'estate 2012, sono monitorate mediante rilievi di campo e analisi in laboratorio. In tabella 17 sono riportati i valori dei principali parametri monitorati nel periodo primaverile-estivo 2013. I risultati mostrano elevati rendimenti depurativi e in particolare abbattimenti superiori al 70% per COD, azoto totale ed ammoniacale.

5.3 Emissioni di gas serra da impianti di fitodepurazione

Nei sistemi di fitodepurazione i nutrienti e la sostanza organica sono rimossi attraverso processi chimici fisici e biologici operati dal sistema suolo/substrato-pianta-microrganismi. Dai processi microbici, in particolare, vengono rilasciati diversi composti gassosi alcuni dei quali con effetto serra, in particolare anidride carbonica (CO_2), metano (CH_4) e protossido di azoto (N_2O).
La tipologia di impianto (flusso superfiale, flusso sotto superficiale orizzontale o flusso sotto superficiale verticali), il tipo di acqua reflua trattata e di substrato impiegato, le condizioni ambientali del sito in cui si realizzano questi sistemi, le specie vegetali impiegate e la loro gestione agronomica influenzano le attività biologiche degli impianti di fitodepurazione e con essi la quantità e la tipologia di gas serra prodotti ed emessi.
Monitoraggi di emissioni di gas serra (figura 53) sono stati eseguiti nell'impianto pilota ibrido di fitodepurazione di Terrassa Padovana e nell'impianto a flusso superficiale dell'azienda agraria "L. Toniolo".
Nel primo, dai letti a flusso sotto superficiale, si rilevano emissioni maggiori di metano a seguito delle operazioni di sfalcio della biomassa (figura 54) con flussi maggiori dal letto vegetato con *Arundo donax*.
Nel periodo primaverile-estivo tutti i letti a flusso sotto superficiale mostrano ampia variabilità nell'emissione di CO_2, CH_4 e N_2O sebbene solo in alcuni casi questa differenza è significativa. Le emissioni di $CO_{2(eq)}$ dai letti vegetati con *P. australis* sono di 4,2 e 3,3 g m^{-2} $giorno^{-1}$ rispettivamente per il flusso verticale ed il flusso orizzontale.
I flussi di gas serra dal sistema a flusso superficiale che tratta acque di drenaggio agricolo sono influenzati dall'idroperiodo che caratterizza l'impianto. Le emissioni di CH_4 sono pressoché simili tra la primavera e l'estate mentre sono superiori in primavera quelle di N_2O ed in estate quelle di CO_2. Le emissioni di $CO_{2(eq)}$ nelle due stagioni sono rispettivamente di 7 e 5,5 g m^{-2} $giorno^{-1}$ in primavera ed in estate.

Figura 53 – Camera statica non stazionaria per la misura delle emissioni di gas serra da impianti di fitodepurazione.

Figura 54 – Emissioni di metano dalla linea SIF dell'impianto pilota ibrido di fitodepurazione per il trattamento di digestato prima e dopo lo sfalcio della biomassa.

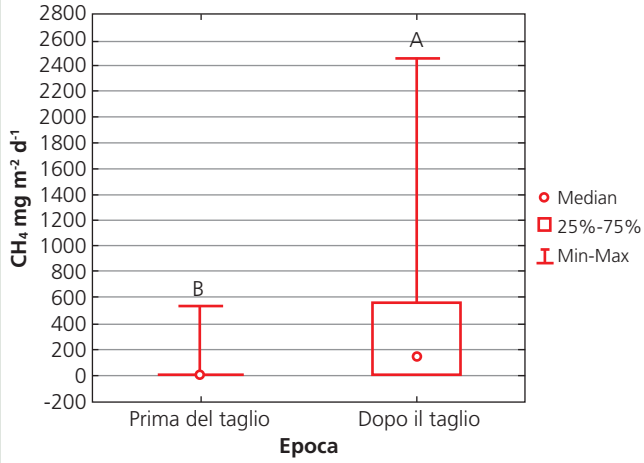


Tabella 17 – Rendimenti depurativi impianto pilota ibrido di fitodepurazione per il trattamento di digestato sito in Terrassa Padovana.

Parametro	REFLUO IN INGRESSO	REFLUO IN USCITA DAL SIF	REFLUO IN USCITA DAL SFF	ABBATTIMENTO % COMPLESSIVO
COD (mg L^{-1})	5744	4072	1655	71,2
TN (mg L^{-1})	534	302	124	76,8
NH_4-N (mg L^{-1})	359,3	183,0	90,5	74,8
NO_3-N (mg L^{-1})	36,8	36,8	12,1	67,1
TP (mg L^{-1})	38,6	28,0	19,8	48,7
PO_4-P (mg L^{-1})	27,2	24,9	18,1	33,5

6. CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

La bibliografia scientifica internazionale presenta numerosi esempi di applicazioni della fitodepurazione per il trattamento dell'azoto contenuto nella frazione fluida dei reflui bovini e suini.

L'efficienza di abbattimento della fitodepurazione è molto simile per le due tipologie di refluo e si attesta fra il 50 e il 75% per l'azoto totale e fra il 41 e il 72% per la forma ammoniacale. Per entrambi i tipi di refluo l'efficienza di abbattimento è superiore quando i valori di concentrazione in ingresso sono elevati. Le prestazioni migliori vengono conseguite dagli impianti ibridi che riducono l'azoto totale del 76% e l'azoto ammoniacale del 70%. La rimozione giornaliera di azoto totale arriva a 9,55 g m^{-2} nelle situazioni di maggiore carico.

La fitodepurazione richiede che il refluo venga sottoposto a pre trattamenti, che nella grande maggioranza dei casi a livello mondiale sono lagunaggio a cielo aperto e vasche di stoccaggio.

Un impianto ibrido monitorato nel Veneto da marzo 2010 ad agosto 2011 per il finissaggio del refluo di un allevamento suinicolo ha evidenziato prestazioni in linea con quelle delle esperienze internazionali.

Posto che i reflui zootecnici e il digestato da fermentazione anaerobia devono innanzitutto trovare valorizzazione nei piani di concimazione, la fitodepurazione si propone quale tecnica affidabile per ridurre i carichi nelle situazioni di eccesso di azoto.

Secondo il monitoraggio condotto in Veneto un ettaro di superficie fitodepurativa rimuove almeno 6.700 kg di azoto, che equivalgono a circa 40 ettari di terreno agricolo in regime normale di Direttiva Nitrati. Le esperienze internazionali testimoniano che può essere raggiunto anche un valore cinque volte più grande. Laddove l'azienda o una forma associativa di aziende non dispongano di estese superfici per lo spandimento dei reflui il "sacrificio" di una porzione limitata di territorio da destinare alla fitodepurazione può consentire di risolvere il problema dell'eccedenza di azoto.

7. BIBLIOGRAFIA CONSULTATA

Barbera, A. C., Borin, M., Ioppolo, A., Cirelli, G. L., & Maucieri, C. (2014). Carbon dioxide emissions from horizontal subsurface constructed wetlands in the Mediterranean Basin. Ecological Engineering, 64, 57-61.

Biddlestone, A. J., Gray, K. R., & Job, G. D. (1991). Treatment of dairy farm wastewaters in engineered reed bed systems. Process biochemistry, 26(5), 265-268.

Borin, M., Bonaiti, G., & Giardini, L. (2001). Controlled drainage and wetlands to reduce agricultural pollution. Journal of environmental quality, 30(4), 1330-1340.

Borin, M., Bonaiti, G., Santamaria, G., & Giardini, L. (2001). A constructed surface flow wetland for treating agricultural waste waters. Water Science & Technology, 44(11-12), 523-530.

Borin, M., & Bigon, E. (2002). Abatement of NO_3–N concentration in agricultural waters by narrow buffer strips. Environmental Pollution, 117(1), 165-168.

Borin, M. (2003). Fitodepurazione - Soluzioni per il trattamento dei reflui con le piante. Il Sole 24 ore Edagricole, Bologna, 198 pag., ISBN 88-506-4830-8

Borin, M., Bigon, E., Zanin, G., & Fava, L. (2004). Performance of a narrow buffer strip in abating agricultural pollutants in the shallow subsurface water flux. Environmental Pollution, 131(2), 313-321.

Borin, M., & Tocchetto, D. (2005). Fitodepurazione: possibilità applicative in ambito zootecnico. L'informatore zootecnico, 4, 30-36

Borin, M., & Tocchetto, D. (2006). Ornamental plants in subsurface horizontal flow treatment system. In: PROC. 10Th Int. Conf. on Wetland Systems for Water Pollution Control. 23-29/9. (vol. 2, pp. 1085-1092). ISBN/ISSN: 989-20-0361-6.

Borin, M., & Salvato, M. (2012). Effects of five macrophytes on nitrogen remediation and mass balance in wetland mesocosms. Ecological Engineering, 46, 34-42.

Borin, M., Politeo, M., & De Stefani, G. (2013). Performance of a hybrid constructed wetland treating piggery wastewater. Ecological Engineering, 51, 229-236.

Cronk, J. K. (1996). Constructed wetlands to treat wastewater from dairy and swine operations: a review. Agriculture, ecosystems & environment, 58(2), 97-114.

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.

Dunne, E. J., Culleton, N., O'Donovan, G., Harrington, R., & Olsen, A. E. (2005). An integrated constructed wetland to treat contaminants and nutrients from dairy farmyard dirty water. Ecological Engineering, 24(3), 219-232.

Finlayson, M., Chick, A., Von Oertzen, I., & Mitchell, D. (1987). Treatment of piggery effluent by an aquatic plant fiber. Biological wastes, 19(3), 179-196.

García, J., Capel, V., Castro, A., Ruiz, I., & Soto, M. (2007). Anaerobic biodegradation tests and gas emissions from subsurface flow constructed wetlands. Bioresource technology, 98(16), 3044-3052.

Harrington, R., & McInnes, R. (2009). Integrated Constructed Wetlands (ICW) for livestock wastewater management. Bioresource technology, 100(22), 5498-5505.

Harrington, C., & Scholz, M. (2010). Assessment of pre-digested piggery wastewater treatment operations with surface flow integrated constructed wetland systems. Bioresource technology, 101(20), 7713-7723.

Healy, M. G., Rodgers, M., & Mulqueen, J. (2007). Treatment of dairy wastewater using constructed wetlands and intermittent sand filters. Bioresource Technology, 98(12), 2268-2281.

Healy, M. G., & O'Flynn, C. J. (2011). The performance of constructed wetlands treating primary, secondary and dairy soiled water in Ireland (a review). Journal of environmental management, 92(10), 2348-2354.

Hernández, E., Olguín, E. J., Trujillo, S., & Vivanco, J. (1997). Recycling and treatment of anaerobic effluents from pig waste using *Lemna* sp. under temperate climatic conditions. Studies in Environmental Science, 66, 293-304.

Hill, D. T., Payne, V. W. E., Rogers, J. W., & Kown, S. R. (1997). Ammonia effects on the biomass production of five constructed wetland plant species. Bioresource Technology, 62(3), 109-113.

Humenik, F. J., Huntz, P. G., Szogis, A., Rices, M., Broome, S., Stern, G., & Smith, C. Evaluation of Alternative Constructed Wetland Systems for Swine Wastewater Treatment. Environmental Research Brief

Hunt, P. G., Szögi, A. A., Humenik, F. J., Rice, J. M., Matheny, T. A., & Stone, K. C. (2002). Constructed wetlands for treatment of swine wastewater from an anaerobic lagoon. Transactions of the ASAE, 45(3), 639-647.

Hunt, P. G., Matheny, T. A., & Szögi, A. A. (2003). Denitrification in constructed wetlands used for treatment of swine wastewater. Journal of environmental quality, 32(2), 727-735.

Hunt, P. G., Poach, M. E., Szogi, A. A., Reddv, G. B., Stone, K. C., Humenik, F. J., & Vanotti, M. B. (2003). Operational components and design of constructed wetlands used for treatment of swine wastewater. In Animal, Agricultural and Food Processing Wastes IX: proceedings of the Ninth International Symposium, 12-15 October, 2003, Raleigh, North Carolina. St. Joseph, Mich.: American Society of Agricultural Engineers, c2003.

Hunt, P. G., Poach, M. E., Shappell, N. W., Matheny, T. A., Reddy, G. B., Ro, K. S., & Szogi, A. A. (2007, September). Swine lagoon wastewater treatment in marsh-pond/floating wetland-marsh constructed wetland. In International Symposium on Air Quality and Waste Management for Agriculture: proceedings of the 16-19 September 2007 conference, Broomfield, Colorado. St. Joseph, Mich.: American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2007.

Hunt, P. G., Stone, K. C., Matheny, T. A., Poach, M. E., Vanotti, M. B., & Ducey, T. F. (2009). Denitrification of nitrified and non-nitrified swine lagoon wastewater in the suspended sludge layer of treatment wetlands. Ecological engineering, 35(10), 1514-1522.

Kantawanichkul, S., Neamkam, P., & Shutes, B. (2000). Nitrogen removal from piggery wastewater by a vertical constructed wetland and horizontal flow sand bed. Ecosystem Service and Sustainable Watershed Management in North China. International Conference, Beijing, P.R. China, August 23 - 25, 2000

Kantawanichkul, S., Pingkul, K., & Araki, H. (2008). Nitrogen removal by a combined subsurface vertical down-flow and up-flow constructed wetland system. In Wastewater treatment,

plant dynamics and management in constructed and natural wetlands (pp. 161-170). Springer Netherlands.

Karpiscak, M. M., Freitas, R. J., Gerba, C. P., Sanchez, L. R., & Shamir, E. (1999). Management of dairy waste in the Sonoran Desert using constructed wetland technology. Water science and technology, 40(3), 57-65.

Knight, R. L., Payne Jr, V. W., Borer, R. E., Clarke Jr, R. A., & Pries, J. H. (2000). Constructed wetlands for livestock wastewater management. Ecological engineering, 15(1), 41-55.

Lee, C. Y., Lee, C. C., Lee, F. Y., Tseng, S. K., & Liao, C. J. (2004). Performance of subsurface flow constructed wetland taking pretreated swine effluent under heavy loads. Bioresource Technology, 92(2), 173-179.

Lee, S., Maniquiz, M. C., & Kim, L. H. (2010). Characteristics of contaminants in water and sediment of a constructed wetland treating piggery wastewater effluent. Journal of environmental sciences, 22(6), 940-945.

Liao, X., Luo, S., Wu, Y., & Wang, Z. (2003, October). Studies on the abilities of *Vetiveria zizanioides* and *Cyperus alternifolius* for pig farm wastewater treatment. In International Conference on Vetiver and Exhibition (Vol. 3, pp. 174-181).

Majer Newman, J., Clausen, J. C., & Neafsey, J. A. (1999). Seasonal performance of a wetland constructed to process dairy milkhouse wastewater in Connecticut. Ecological Engineering, 14(1), 181-198.

Mantovi, P., Marmiroli, M., Maestri, E., Tagliavini, S., Piccinini, S., & Marmiroli, N. (2003). Application of a horizontal subsurface flow constructed wetland on treatment of dairy parlor wastewater. Bioresource Technology, 88(2), 85-94.

Matos, A. T., Freitas, W. S., Martinez, M. A., Tótola, M. R., & Azevedo, A. A. (2010). Tifton grass yield on constructed wetland used for swine wastewater treatment. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 14(5), 510-516.

Meers, E., Rousseau, D. P., Blomme, N., Lesage, E., Du Laing, G., Tack, F. M., & Verloo, M. G. (2005). Tertiary treatment of the liquid fraction of pig manure with Phragmites australis. Water, air, and soil pollution, 160(1-4), 15-26.

Meers, E., Tack, F. M. G., Tolpe, I., & Michels, E. (2008). Application of a full-scale constructed wetland for tertiary treatment of piggery manure: monitoring results. Water, air, and soil pollution, 193(1-4), 15-24.

Mietto, A., Borin, M., Salvato, M., Ronco, P., & Tadiello, N. (2013). Tech-IA floating system introduced in urban wastewater treatment plants in the Veneto region-Italy. Water Science & Technology, 68(5).

Munoz, P., Drizo, A., & Cully Hession, W. (2006). Flow patterns of dairy wastewater constructed wetlands in a cold climate. Water Research, 40(17), 3209-3218.

O'Neill, A., Foy, R. H., & Phillips, D. H. (2011). Phosphorus retention in a constructed wetland system used to treat dairy wastewater. Bioresource technology, 102(8), 5024-5031.

O'Geen, A. T., Budd, R., Gan, J., Maynard, J. J., Parikh, S. J., & Dahlgren, R. A. (2010). Chapter One-Mitigating Nonpoint Source Pollution in Agriculture with Constructed and Restored Wetlands. Advances in Agronomy, 108, 1-76.

Parkes, M. E., McBride, A. D., & Waalkens, A. (1998). Treatment of dilute piggery effluent with vertical flow reed beds. Journal of environmental quality, 27(4), 783-788.

Poach, M. E., Hunt, P. G., Sadler, E. J., Matheny, T. A., Johnson, M. H., Stone, K. C., Humenik, F. J., & Rice, J. M. (2002). Ammonia volatilization from constructed wetlands that treat swine wastewater. Transactions of the ASAE, 45(3), 619-927.

Poach, M. E., Hunt, P. G., Vanotti, M. B., Stone, K. C., Matheny, T. A., Johnson, M. H., & Sadler, E. J. (2003). Improved nitrogen treatment by constructed wetlands receiving partially nitrified liquid swine manure. Ecological Engineering, 20(2), 183-197.

Poach, M. E., Hunt, P. G., Reddy, G. B., Stone, K. C., Johnson, M. H., & Grubbs, A. (2004). Swine wastewater treatment by marsh–pond–marsh constructed wetlands under varying nitrogen loads. Ecological engineering, 23(3), 165-175.

Poach, M. E., Hunt, P. G., Reddy, G. B., Stone, K. C., Johnson, M. H., & Grubbs, A. (2007). Effect of intermittent drainage on swine wastewater treatment by marsh–pond–marsh constructed wetlands. ecological engineering, 30(1), 43-50.

Rice, J. M., Szogi, A. A., Broome, S. W., Humenik, F. J., & Hunt, P. G. (1998). Constructed wetland systems for swine wastewater treatment. System, 1, 2.

Schaafsma, J. A., H Baldwin, A., & Streb, C. A. (1999). An evaluation of a constructed wetland to treat wastewater from a dairy farm in Maryland, USA. Ecological Engineering, 14(1), 199-206.

Shamir, E., Thompson, T. L., Karpiscak, M. M., Freitas, R. J., & Zauderer, J. (2001). Nitrogen accumulation in a constructed wetland for dairy wastewater treatment. JAWRA Journal of the American Water Resources Association, 37(2), 315-325.

Sooknah, R. D., & Wilkie, A. C. (2004). Nutrient removal by floating aquatic macrophytes cultured in anaerobically digested flushed dairy manure wastewater. Ecological Engineering, 22(1), 27-42.

Stone, K. C., Poach, M. E., Hunt, P. G., & Reddy, G. B. (2004). Marsh-pond-marsh constructed wetland design analysis for swine lagoon wastewater treatment. Ecological Engineering, 23(2), 127-133.

Szogi, A. A., Hunt, P. G., Humenik, F. J., Stone, K. C., & Rice, J. M. (1995). Constructed wetlands for swine wastewater treatment in the Eastern Coastal Plain, USA. Versatility of wetlands in the agricultural landscape Florida, USA, 17-20 September 1995: 675-682.

Tanner, C. C., Clayton, J. S., & Upsdell, M. P. (1995). Effect of loading rate and planting on treatment of dairy farm wastewaters in constructed wetlands—II. Removal of nitrogen and phosphorus. Water Research, 29(1), 27-34.

Tapia González, F., Gíacoman Vallejos, G., Herrera Silveira, J., Quintal Franco, C., García, J., & Puigagut, J. (2009). Treatment of swine wastewater with subsurface-flow constructed wetlands in Yucatán, Mexico: influence of plant species and contact time. Water SA, 35(3), 335-342.

TilleY, E.; Luethi, C.; Morel, A.; Zurbruegg, C.; & Schertenleib, R. (2008): Compendium of Sanitation Systems and Technologies. Duebendorf, Switzerland: Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology (EAWAG).

Vymazal, J. (2009). The use constructed wetlands with horizontal sub-surface flow for various types of wastewater. Ecological Engineering, 35(1), 1-17.

Vymazal, J. (2011). Plants used in constructed wetlands with horizontal subsurface flow: a review. Hydrobiologia, 674(1), 133-156.

Vymazal, J. (2013). Emergent plants used in free water surface constructed wetlands: A review. Ecological Engineering, 61, 582-592.

Wood, J., Fernandez, G., Barker, A., Gregory, J., & Cumby, T. (2007). Efficiency of reed beds in treating dairy wastewater. Biosystems engineering, 98(4), 455-469.

Coordinatore

Centro Ricerche
Produzioni Animali
C.R.P.A. S.p.A.

Viale Timavo 43/2
42121 Reggio Emilia - Italia

Tel. +39 0522 436999
Fax +39 0522 435142

http://aqua.crpa.it
Email: aqua@crpa.it

Finanziato dall'Unione europea nell'ambito
del Programma Life Plus Ambiente,
il progetto AQUA è iniziato il 01 ottobre 2010
e terminerà il 31 marzo 2014.

AQUA è coordinato da CRPA spa e
cofinanziato dalle Regioni Piemonte, Lombardia,
Veneto ed Emilia-Romagna, dalle aziende multiservizi
IREN ed HerAmbiente, da AGCO Italia.

Partners per la realizzazione sono
Fondazione CRPA Studi e Ricerche, CRA, IPLA Piemonte,
ERSAF Lombardia, Veneto Agricoltura
ed ERSA Friuli Venezia-Giulia.