



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA
DIPARTIMENTO DI AGRONOMIA ANIMALI
ALIMENTI RISORSE NATURALI E AMBIENTE

Corso di laurea magistrale in Scienze e tecnologie per
l'ambiente e il territorio

Prestazioni di un sistema pilota di
fitodepurazione a cascata per il trattamento
di refluo suino

Relatore
Prof. Maurizio Borin

Correlatore
Dott.sa Jessica Tamiazzo

Laureanda
Martina Carraro
Matricola n. 1060755

ANNO ACCADEMICO 2013-2014

Ringraziamenti

Grazie a Jessica, che mi ha aiutato nella realizzazione di questo lavoro; grazie a Gino, sempre presente per un aiuto in campo; grazie ai miei genitori, Lucia e Roberto, sempre disponibili per un consiglio e grazie a Matteo, che mi è sempre stato vicino, durante la realizzazione del mio progetto.

INDICE

RIASSUNTO	5
ABSTRACT	7
1 INTRODUZIONE	9
1.1 <i>Il refluo suino</i>	9
1.2 <i>Il problema dell'inquinamento da nitrati</i>	12
1.2.1 <i>La "Direttiva Nitrati"</i>	13
1.2.2 <i>Le limitazioni per l'imprenditore agricolo</i>	15
1.3 <i>Trattamenti "tradizionali" del refluo suino</i>	16
1.4 <i>La fitodepurazione nel trattamento dei reflui zootecnici</i>	19
1.4.1 <i>Sistema di fitodepurazione verticale</i>	21
1.5 <i>Scopo della tesi</i>	23
2 MATERIALI E METODI.....	25
2.1 <i>Descrizione dell'impianto</i>	26
2.1.1 <i>Sistema di pretrattamento</i>	26
2.1.2 <i>Sistema di fitodepurazione a "cascata"</i>	28
2.2 <i>La vegetazione</i>	30
2.2.1 <i>Descrizione botanica delle piante</i>	31

2.3	<i>Gestione dell'impianto:</i>	40
2.4	<i>Metodi di monitoraggio</i>	43
2.4.1	<i>I volumi</i>	43
2.4.2	<i>Analisi sul refluo</i>	45
2.4.3	<i>Raccolta della biomassa</i>	48
2.5	<i>Elaborazione dei dati</i>	48
3	RISULTATI	51
3.1	<i>Condizioni meteorologiche</i>	51
3.2	<i>Bilancio idrico</i>	53
3.3	<i>Efficienza depurativa del sistema</i>	57
3.3.1	<i>Parametri fisici</i>	57
3.3.2	<i>Parametri chimici</i>	62
3.3.3	<i>Abbattimento di massa dei parametri chimici</i>	70
3.4	<i>Analisi del refluo all'interno delle vaschette</i>	72
3.5	<i>Sopravvivenza, produzione e asportazioni della vegetazione</i>	74
4	CONCLUSIONI	81
	RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	85

RIASSUNTO

In questo lavoro sono state valutate le prestazioni di un sistema integrato filtri e fitodepurazione “a cascata” per il trattamento di refluo suino, in modo da fornire una soluzione all'imprenditore agricolo che si trova a dover gestire grandi quantità di refluo e non ha a disposizione sufficiente terreno dove spargere, in seguito alle restrizioni imposte dalla Direttiva Nitrati.

Per fare questo è stato valutato il consumo di acqua da parte del sistema, con il calcolo dell'evapotraspirazione di ciascuna specie vegetale; la capacità di rimozione dei principali parametri chimici, ossia azoto (nella forma nitrica e ammoniacale), fosforo (in particolare la forma solubile), COD e BOD; la variazione di parametri fisici come pH, conducibilità elettrica (EC, mS/cm), ossigeno disciolto (OD, mg/l), temperatura (°C) e torbidità (NTU); la produzione di biomassa e la capacità di asportare azoto e fosforo fissato nei tessuti vegetali.

Il sistema è composto da sei linee di fitodepurazione verticale in cui sono state utilizzate quattro specie di piante alofite, tolleranti la salinità (*Puccinellia palustris* (Seen.) Hayek, *Halimione portulacoides* (L.) Aellen, *Sarcocornia fruticosa* (L.) A.J. Scott, *Artemisia caerulescens* L.), e altre due specie, *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud., per vedere il comportamento di una delle piante maggiormente utilizzate in fitodepurazione e *Cynodon dactylon* (L.) Pers., specie che si trova facilmente nel nostro territorio, con una grande capacità di crescere e propagarsi.

Cynodon dactylon (L.) Pers. si è dimostrata essere la specie più efficiente sia per quanto riguarda l'abbattimento dei principali parametri chimici, sia per la produzione di biomassa e la capacità di asportare azoto e

fosforo; questa è stata anche la specie che si è sviluppata più velocemente e ha consumato la maggior quantità di acqua.

Puccinellia palustris (Seen.) Hayek, invece, non è stata in grado di attecchire e quindi non ha dato risultati soddisfacenti, come ci si sarebbe aspettati, sulla base di precedenti studi effettuati su questa specie.

ABSTRACT

In this work were evaluated the performance of an integrated system of filters and "cascade" constructed wetland for the treatment of swine wastewater, to provide a solution to the farmer who has to handle large amounts of wastewater and hasn't enough land where he can spread, as a result of restrictions imposed by the Nitrates Directive.

It was considered the consumption of water by the system, with the calculation of evapotranspiration of each plant species; the removal ability of main chemical parameters, like nitrogen (in nitric and ammoniacal form), phosphorus (in particular the soluble form), COD and BOD; the variation of physical parameters such as pH, electrical conductivity (EC, mS / cm), dissolved oxygen (OD mg / l), temperature (° C) and turbidity (NTU); the biomass production and the ability to remove nitrogen and phosphorus fixed in plant tissues.

The system is composed by six lines of vertical constructed wetland in which we used four species of halophytic plants, salinity tolerant (*Puccinellia palustris* (Seen.) Hayek, *Halimione portulacoides* (L.) Aellen, *Sarcocornia fruticosa* (L.) AJ Scott, *Artemisia caerulescens* L.), and two other species, *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud., to see the behavior of one of the most widely used plants in constructed wetlands and *Cynodon dactylon* (L.) Pers, a species that is easily found in our area, with a great ability to grow and propagate.

Cynodon dactylon (L.) Pers has proved to be the most efficient species both as regards the reduction of main chemical parameters, both for the production of biomass and the ability to remove nitrogen and phosphorus; it was also the species that grew faster and consumed the greatest amount of water.

Puccinellia palustris (Seen.) Hayek, however, has not been able to take root and then did not give satisfying results, as would be expected, based on previous studies carried out on this species.

1 INTRODUZIONE

1.1 Il refluo suino

L'argomento che andrò ad approfondire all'interno del mio elaborato, ossia il refluo suino e il suo trattamento, risulta essere importante dal momento in cui l'allevamento di suini è una presenza significativa nel territorio italiano, ed in particolare nella regione Veneto.

In Italia, con riferimento a dati ISTAT 2003, si contano circa 124.000 aziende di suini, il 3% delle quali sono ubicate nella regione Veneto.

Di questo 3%, le imprese con oltre 1.000 capi rappresentano il 3,4% delle aziende del Veneto, contro l'1,6% della media nazionale ed in esse è concentrato l'86% dei capi, contro l'81% della media nazionale.

Più in particolare si osserva una larga diffusione delle aziende con suini nelle provincie di Treviso, Padova e Venezia, ove insistono quasi il 70% di esse, mentre la maggior concentrazione in termini di capi allevati si registra a Verona (32%), Treviso (20%) e Padova (17%). (Defrancesco, 2007).

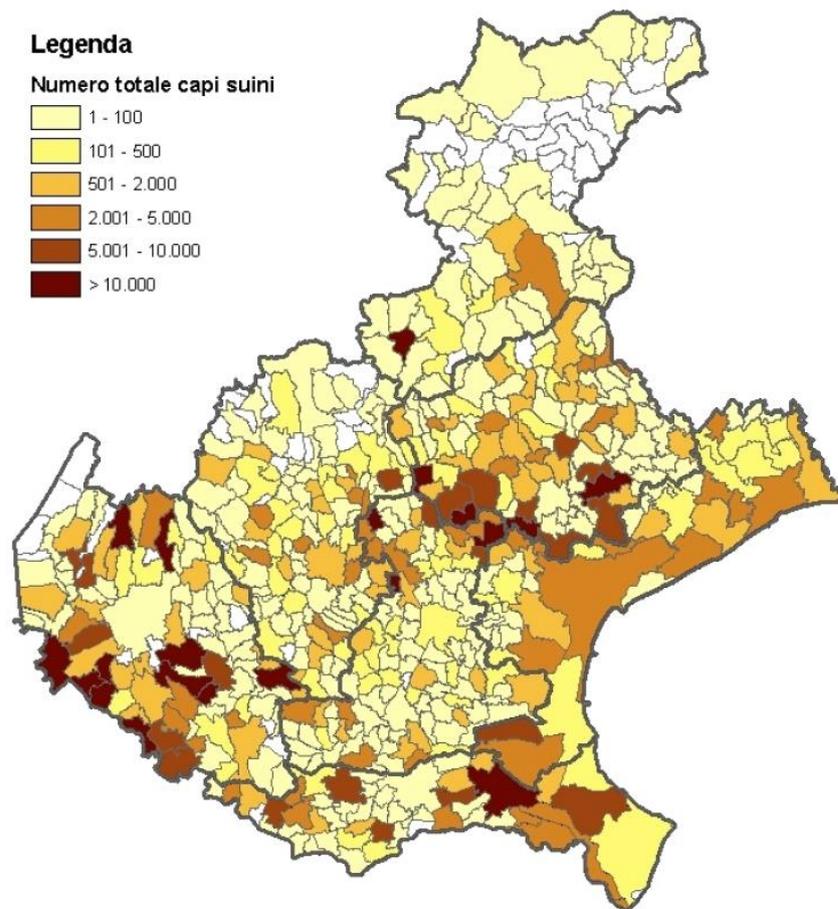


Fig.1.1 Comuni ove sono ubicate aziende con oltre 500 capi, secondo il censimento ISTAT del 2000

Il refluo suino è solitamente costituito da feci, urine e acque di lavaggio della stalla, a cui si aggiungono, talvolta, anche peli degli animali e prodotti di disinfezione utilizzati nelle stabulazioni.

Le caratteristiche quantitative e qualitative di questi reflui variano in misura considerevole da allevamento ad allevamento in funzione del tipo di allevamento (suino leggero, suino pesante, riproduttori, etc), dei sistemi di pulizia impiegati (grigliati, lavaggi con ribaltine e con getti d'acqua in pressione, etc), dalle dimensione (numero di capi allevati) e dalla composizione della popolazione animale (diverse razze, diverse età, diverso tipo di destinazione del suino, etc.), dall'età degli animali e dal tipo di alimentazione (a secco, in umido, diversi tipi di mangime, etc.).

In base ai sistemi di gestione troviamo delle differenze nei reflui solidi, se c'è o meno presenza di lettiera (con lettiera: 2,7-4,0 g/kg di ammonio, 4,0-4,9 g/kg di azoto totale, 1,4-2,6 g/kg di fosforo; senza lettiera: 2,2-3,6 g/kg di ammonio, 3,1-4,5 g/kg di azoto totale, 1,0-2,0 g/kg di fosforo) e nei reflui liquidi, se stoccati in condizioni anaerobiche o in lagoni (nel primo caso: 2,5-3,7 g/l di ammonio, 3,4-6,6 g/l di azoto totale, 0,7-1,6 g/l di fosforo; nel secondo caso: 0,2-0,6 g/l di ammonio, 0,4-0,7 g/l di azoto totale, 0,05-0,2 g/l di fosforo) (Hatfield *et al.*, 1993)

Nonostante la grande variabilità nella composizione di questo tipo di refluo, una caratteristica comune è l'elevata presenza di azoto, motivo per il quale la sua utilizzazione agronomica è sottoposta ai vincoli definiti dalla "Direttiva Nitrati", di cui parlerò in modo più approfondito in uno dei prossimi paragrafi.

Il refluo suino presenta, solitamente, le seguenti concentrazioni di nutrienti: 230-1300 mg/l di azoto totale, 170 mg/l di azoto ammoniacale, 17 mg/l di azoto nitrico, 65-600 mg/l di fosforo e 162-500 mg/l di potassio (Saggar *et al.*, 2004).

Studi hanno dimostrato che l'applicazione sul terreno di refluo suino contenente il 20,66% di N tot sulla s.s., l'8,23% di P₂O₅ sulla s.s, il 14,26% di K₂O sulla s.s., 942 mg/kg di rame e 777 mg/kg di zinco, esercita una certa influenza sui parametri chimici del terreno, limitatamente allo strato superficiale (0-20 cm), interessato dallo spandimento, aumentando i tenori di P₂O₅ assimilabile, K₂O scambiabile e le concentrazioni di Cu e Zn. (Bocchi *et al.*, 1998)

Per questo motivo risulta necessaria un'adeguata programmazione delle fertilizzazioni ed eventuali trattamenti che riducano le concentrazioni dei metalli pesanti, ad esempio.

1.2 Il problema dell'inquinamento da nitrati

La tutela delle risorse idriche dall'inquinamento da fonti diffuse costituisce un problema rilevante, in campo ambientale, su tutto il territorio nazionale. (Salvati *et al.*, 2005)

L'inquinamento diffuso viene indentificato principalmente con quello provocato dalle attività agricole e dalle attività ed opere inerenti la viabilità.

I principali agenti inquinanti di origine agricola sono:

- I nutrienti delle piante (azoto e fosforo), responsabili del fenomeno dell'eutrofizzazione;
- Fitofarmaci, possono svolgere un'attività tossica nei confronti degli organismi non bersaglio;
- Sedimenti, prodotti dall'azione erosiva delle acque di runoff (Borin, 1999)

I nitrati di origine agricola rappresentano una componente rilevante di questo tipo di inquinamento, che interessa le acque interne e marine.

Il problema dei nitrati deriva, in maggior misura, dall'applicazione di fertilizzanti organici e chimici sui terreni coltivati e l'elevata solubilità di questa forma dell'azoto fa sì che si possa ritrovare facilmente sia nelle acque superficiali, che in quelle di falda.

Quando elevate quantità di nutrienti, in particolare N e P, contaminano i corpi idrici, possono causare il fenomeno dell'eutrofizzazione, ossia la crescita eccessiva di biomassa vegetale, la cui decomposizione da parte dei microorganismi richiede elevate quantità di ossigeno, che non è più disponibile per gli organismi acquatici.

Circa il 33 % delle stazioni di monitoraggio nei fiumi e nei laghi europei, come pure in alcune acque costiere, evidenziano segni di eutrofizzazione. (Report Unione Europea, 2010).

Oltre a rappresentare un problema dal punto di vista ambientale, i nitrati possono essere anche pericolosi per la salute umana, perché all'interno del nostro organismo possono essere trasformati in nitriti, composti pericolosi, che possono portare a serie complicanze (ad esempio la cosiddetta "Sindrome da sangue blu", malattia molto grave soprattutto per i neonati).

1.2.1 La "Direttiva Nitrati"

La questione relativa ai nitrati di origine agricola è iniziata, dal punto di vista normativo, con la direttiva 91/676/CEE.

L'Unione Europea, da oltre 20 anni, si è preoccupata di contrastare l'inquinamento da nitrati, ma mentre in passato ci si preoccupava solo della qualità dell'acqua ad uso umano, oggi invece l'attività legislativa si preoccupa soprattutto delle conseguenze ambientali derivanti dall'eccesso di azoto, legate ai processi di eutrofizzazione. (Defrancesco, 2007)

La direttiva 91/676/CEE (nel prosieguo «direttiva Nitrati») mira a proteggere la qualità delle acque in Europa, impedendo che i nitrati di origine agricola inquinino le acque sotterranee e di superficie, e incoraggiando il ricorso a buone pratiche agricole.

La direttiva «Nitrati» è parte integrante della direttiva quadro in materia di acque ed è uno degli strumenti chiave per la protezione delle acque dalle pressioni agricole. (http://europa.eu/legislation_summaries/agriculture/environment/l28013_it).

Il Veneto con il DCR n.62 del 17/05/2006 individua le seguenti zone vulnerabili all'interno del suo territorio:

- tutto il territorio della provincia di Rovigo e il comune di Cavarzere in quanto indicato come zona “a rischio di crisi ambientale”
- il bacino scolante della laguna di Venezia (alcuni comuni di Venezia, Padova e Treviso)
- le zone di alta pianura, ricadenti nell’area di ricarica degli acquiferi (cosiddetti “100 Comuni” compresi nelle province di Verona, Padova, Vicenza e Treviso)

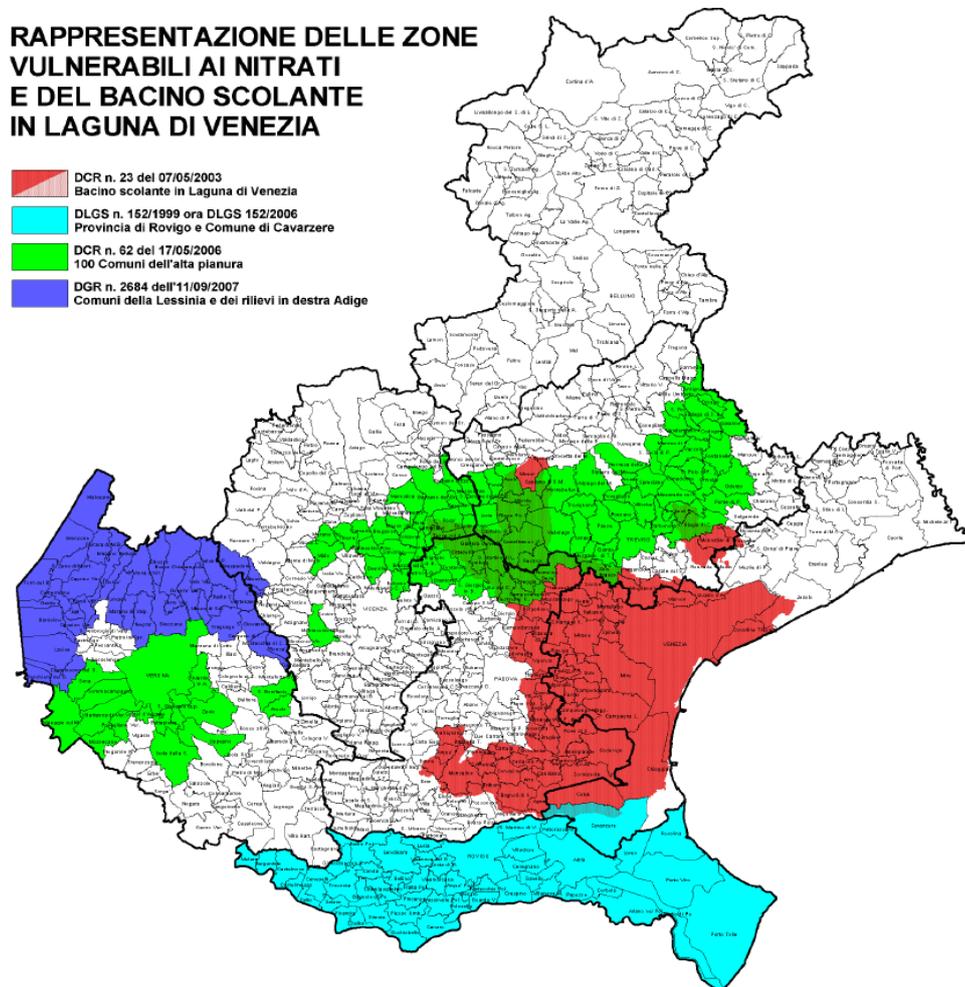


Fig.1.2 Rappresentazione delle zone vulnerabili ai nitrati della regione Veneto

Nelle zone vulnerabili è previsto un carico massimo di azoto proveniente dalla fertilizzazione organica di 170 kg di N/ha come quantitativo medio aziendale annuo, modificata recentemente con una deroga che stabilisce massimo di 250 kg di N/ha all'anno (decisione n. 2011/721/UE).

1.2.2 Le limitazioni per l'imprenditore agricolo

L'imprenditore agricolo che deve gestire grosse quantità di refluo si trova in difficoltà, visto che senza deroga può distribuire una ridotta quantità di reflui, e in deroga, si ritrova a sottostare a condizioni piuttosto restrittive.

In particolare, i reflui suini devono essere sottoposti a trattamento di separazione solido-liquido.

Può essere utilizzata solamente la parte chiarificata del refluo, che deve avere un rapporto N/P₂O₅ almeno pari a 2,5; la componente solida deve essere stabilizzata e trasportata fuori dall'azienda.

L'allevatore, di fronte a queste limitazioni, si ritrova a non sapere cosa fare del refluo in eccesso.

Una prima possibilità potrebbe essere la cessione a terzi di una parte del refluo e quindi il trasporto al di fuori della propria azienda agricola.

Questo però risulta essere piuttosto costoso (la normativa impone un controllo del trasporto tramite GPS), oltre al fatto che richiede una documentazione molto dettagliata sulle caratteristiche del refluo trasportato (quantità di effluente e analisi sul contenuto di N e P, fatte da laboratori riconosciuti) e sull'azienda di origine e di destinazione (estremi identificativi).

Un'alternativa al trasporto al di fuori dell'azienda, risulta essere l'utilizzo di trattamenti che permettano di ridurre l'azoto all'interno dell'effluente, in modo da riuscire a distribuire una quantità maggiore di refluo sulla superficie aziendale.

La rimozione di parte dell'azoto può avvenire all'interno dei "tradizionali" trattamenti che il refluo suino subisce prima della sua utilizzazione agronomica, ad esempio grazie alla creazione di un'alternanza di condizioni aerobiche/anaerobiche in cui i microorganismi trasformano l'azoto, permettendone la liberazione in atmosfera.

In alternativa ai tradizionali processi di trattamento, si potrebbe utilizzare la fitodepurazione, che permette una rimozione di parte dell'azoto grazie ad una serie di meccanismi di interazione tra piante e microorganismi.

Di questi due modalità di trattamento parlerò nei successivi paragrafi.

1.3 Trattamenti "tradizionali" del refluo suino

Abbiamo visto come il trattamento del refluo suino, così come quello degli altri effluenti zootecnici, risulti un passaggio necessario per la sua utilizzazione agronomica, in particolare dopo l'entrata in vigore della Direttiva Nitrati.

Alcuni accorgimenti sono necessari, anche se non sono direttamente finalizzati alla riduzione dell'azoto presente nel refluo.

Stoccaggio

Lo stoccaggio ha assunto un ruolo fondamentale per potere effettuare lo spandimento dei liquami nei momenti agronomicamente più utili (R. Chiumenti, 2000)

Secondo quanto previsto dalla normativa, il fondo e le pareti della vasca di stoccaggio devono essere impermeabili e ci deve essere un fosso di guardia perimetrale.

La capacità della vasca deve essere tale da consentire uno stoccaggio di almeno 180 giorni.

Lo stoccaggio consente un'areazione dell'effluente con conseguente abbattimento di una parte dei patogeni presenti.

Separazione solido/liquido

La separazione liquido/solido è un trattamento fisico che permette di ottenere dal liquame tal quale una frazione solida ed una frazione chiarificata liquida.

La separazione liquido-solido offre i seguenti vantaggi:

- migliora la pompabilità dei liquami, riducendo possibili intasamenti delle pompe e delle tubazioni;
- contribuisce a ridurre l'intasamento dei bacini di stoccaggio o dei canali di movimentazione dei liquami ad opera del materiale sedimentabile;
- riduce la spesa energetica per il funzionamento delle attrezzature di aerazione e omogeneizzazione del liquame.

Le due tecniche utilizzabili sono quelle della sedimentazione e della vagliatura meccanica. (Chiumenti, 2000)

Il trattamento aerobico

Il processo è attuato per via biologica ad opera di batteri aerobi: la sostanza organica è demolita essenzialmente in anidride carbonica ed acqua e l'azoto è liberato in forma gassosa come N₂.

Questo processo ha, solitamente, un'efficienza di rimozione dell'azoto intorno all'80-85%.

I trattamenti anaerobici

Si tratta di processi di digestione anaerobica, legati alla produzione di Biogas (una miscela di metano, anidride carbonica e altri gas minori).

Può essere operata una digestione "a freddo", senza riscaldare i reflui, oppure questi ultimi possono essere portati ad una temperatura di 35-37°C, per ottenere un maggior recupero di energia ed un elevato abbattimento della carica batterica.

Trattamenti oligolitici

Il trattamento oligolitico è un trattamento che permette la rimozione di ioni metallici, in particolare del rame (questo è utilizzato come antibatterico intestinale soprattutto nei suinetti e quindi si ritrova facilmente nelle deiezioni).

È un processo elettrolitico attivato tra coppie di elettrodi di rame, ed è stato dimostrato che, oltre ai metalli, è in grado di abbattere anche la carica patogena (principalmente coliformi e streptococchi).

Compostaggio

È una tecnica che si basa sulla distribuzione dei liquami su un “letto” di truciolo di legno (e/o di altri prodotti assorbenti con almeno il 40-50% di truciolo) dello spessore di almeno un metro, effettuando uno o più rivoltamenti giornalieri per l’inglobamento delle deiezioni nella massa e per il mantenimento della stessa nelle condizioni aerobiche necessarie per il processo. (Chiumenti, 2000)

1.4 La fitodepurazione nel trattamento dei reflui zootecnici

I trattamenti d’uso comune visti finora sono quelli maggiormente utilizzati per i liquami suini.

Questi necessitano di strutture e strumenti, la maggior parte delle volte, complessi e molto costosi, che richiedono un importante lavoro di installazione.

La fitodepurazione può rappresentare un’efficace alternativa a questi trattamenti, in particolare per quanto riguarda l’abbattimento dell’azoto.

La fitodepurazione ha ricevuto una considerevole attenzione nel trattamento dei reflui zootecnici, dopo il suo ampio successo nella depurazione delle acque reflue municipali, grazie ad alcune caratteristiche:

- Costi di installazione ridotti rispetto ai trattamenti convenzionali
- Richiede poca energia
- Poca manutenzione
- Buon controllo degli odori
- Naturale degradazione dei reflui (Tyson, 1996)

La fitodepurazione è considerato un complesso “bioreattore”; infatti all’interno di questi sistemi avvengono diversi processi chimici, fisici e biologici, in conseguenza all’interazione tra biomassa microbica, piante, suolo e sedimenti.

Molte forme dell’azoto possono essere rimosse, attraverso processi di nitrificazione-denitrificazione, assorbimento da parte delle piante e processi chimico-fisici come sedimentazione e scambio ionico. (Lee *et al.* 2009)

Per quanto riguarda il refluo suino, diversi studi hanno dimostrato che la fitodepurazione è in grado di rimuovere grandi quantità di azoto e fosforo.

In particolare studi effettuati in Mississippi, Alabama, e Carolina del Nord (USA) hanno evidenziato un’efficienza di rimozione per l’azoto di rispettivamente 95%, 89% e 90% e per il fosforo del 95%, 79% e 80% in un *marsh/pond/marsh constructed wetlands system* per la depurazione di effluenti suini precedentemente trattati per l’eliminazione della componente grossolana. (Tyson, 1996)

Altri studi mostrano una rimozione dell’azoto compresa tra 0,2 e 1 g/m² al giorno, con un’efficienza tra l’82 e il 99%, e una rimozione del fosforo compresa tra 0,2 e 0,6 g/m² al giorno, con efficienza tra 79 e 95%, sempre in sistemi di fitodepurazione che depurano reflui pretrattati per la rimozione della componente organica, o dopo lagunaggio in condizioni anaerobiche. (Cronk, 1996)

Anche la fitodepurazione, come i “tradizionali” impianti di trattamento, può richiedere una non esigua quantità di superficie, la quale è necessaria per ottenere un’adeguata rimozione dell’azoto presente nei reflui.

L'imprenditore agricolo, come precedentemente detto, si trova ad avere poco terreno su cui spargere e quindi non potrà destinarne molto per la costruzione di impianti che occupano una superficie elevata.

Per questo motivo è necessario trovare un'alternativa che abbia le stesse performances depurative di un tradizionale sistema di fitodepurazione, ma che occupi una superficie minore, come può essere un sistema di fitodepurazione verticale.

1.4.1 Sistema di fitodepurazione verticale

Con sistema di fitodepurazione verticale si intende un sistema che si sviluppa in altezza, che sfrutta il flusso gravitazionale dell'acqua.

L'obiettivo di questo sistema di depurazione è quello di avere la stessa capacità depurativa di un tradizionale sistema di fitodepurazione, occupando uno spazio molto ridotto.

Proprio per questo motivo questo impianto presenta più piani di trattamento; il refluo viene convogliato al piano più alto e poi per gravità scende in quelli sottostanti.

Nei sistemi di fitodepurazione verticale solitamente le piante vengono poste all'interno di vasche di dimensione contenute, in un medium che funge da supporto per la loro crescita.

Lo sviluppo in altezza dei sistemi di fitodepurazione verticale vincola le scelte sui materiali e le piante da utilizzare.

Le vasche sono collocate su più piani, sollevate da terra, e il loro peso non può essere, per questo motivo, troppo elevato.

Solitamente, infatti, si usano vasche in plastica, che siano leggere ma anche resistenti.

Così come le vasche, il medium non può essere costituito da un materiale troppo pesante, e allo stesso tempo deve creare un ambiente idoneo alla crescita e alla vita delle piante poste al suo interno.

Tra i media, l'argilla espansa può rappresentare un valido compromesso tra queste due esigenze; essa infatti è molto porosa all'interno e quindi leggera, ma la parte esterna è dura e permette alle piante di trovare un ambiente idoneo alla loro crescita, in quanto conferisce loro stabilità.

Le specie vegetali solitamente usate in fitodepurazione presentano dimensioni di crescita elevate ed infatti si espandono molto sia nella parte ipogea, che nella parte aerea.

Questo tipo di piante non è idoneo a crescere in vasche di dimensioni contenute come quelle utilizzate nei sistemi di fitodepurazione verticale e inoltre l'elevato sviluppo della parte aerea potrebbe interferire con la crescita delle piante vicine e di quelle sottostanti, creando fenomeni di ombreggiamento che possono ridurre la crescita.

È quindi necessario utilizzare delle specie che non presentino queste problematiche, come ad esempio delle piante cespitose o ricadenti, che siano comunque in grado di vivere in un ambiente umido come lo è quello della fitodepurazione.

1.5 Scopo della tesi

Lo scopo della mia tesi è quello di valutare le prestazioni di un sistema integrato filtri e fitodepurazione a cascata per il trattamento di un refluo suino, composto da deiezioni degli animali e acque di lavaggio della stalla.

In particolare nel mio studio mi sono concentrata sulla capacità di depurazione del sistema di fitodepurazione a cascata, un sistema costituito da sei diverse specie vegetali, adattate alla vita in ambienti salini.

L'utilizzo di questo tipo di sistema di fitodepurazione ha l'obiettivo di fornire una soluzione all'imprenditore agricolo che si trova a dover gestire grandi quantità di refluo e che ha a disposizione poco terreno su cui spargere, in particolare dopo i vincoli imposti dalla "Direttiva Nitrati".

2 MATERIALI E METODI

Nel caso di studio specifico, un sistema di fitodepurazione verticale è stato collocato a valle di un sistema di filtri, con lo scopo di pretrattare il refluo suino, in modo da eliminare, in particolare, particelle grossolane sospese che potrebbero disturbare il successivo trattamento di fitodepurazione.

Oltre all'eliminazione dei solidi sospesi, il sistema di filtri è in grado di operare già un abbattimento dei principali parametri chimici di interesse, grazie alla capacità di adsorbimento di alcuni dei materiali che lo costituiscono.

Le specie vegetali utilizzate nel sistema sono state scelte tra piante tolleranti la salinità, in quanto, nella precedente prova con piante non adattate ad ambienti salini, seguita da me per il progetto di tesi triennale (Carraro, 2012), queste necessitavano di una importante diluizione del refluo suino a causa dell'elevata salinità.

Le piante utilizzate sono quindi specie appartenenti al raggruppamento delle "alofite", ossia piante che presentano adattamenti morfologici o fisiologici che permettono il loro insediamento su suoli salini.

Tra le specie appartenenti a questo gruppo, sono state scelte specie che:

- Sono adattate a zone umide
- Si ritrovano abbastanza facilmente nelle nostre zone
- Non presentano un'eccessiva crescita di fusti sotterranei (devono crescere all'interno di vasche di dimensioni contenute) e parte aerea (non devono creare fenomeni di ombreggiamento)

2.1 Descrizione dell'impianto

Il sistema utilizzato per questa sperimentazione è collocato a Legnaro (PD), presso l'Azienda Sperimentale "Lucio Toniolo".

L'impianto è un sistema integrato, posizionato in prossimità di una stabulazione di suini, già nel 2012, e si compone di una serie di sei filtri e altrettante linee di fitodepurazione verticale.

Il refluo viene quindi pretrattato dal sistema di filtri, poi diluito, inviato al sistema di fitodepurazione verticale e raccolto in uscita da quest'ultimo.

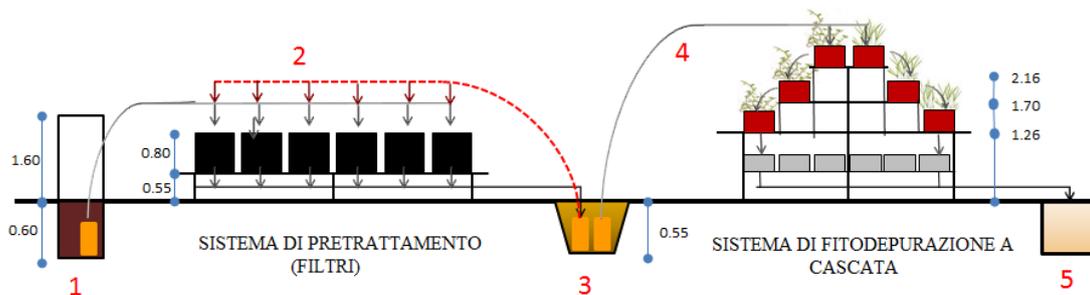


Figura 2.1 Schema del sistema integrato filtri-cascate in sezione laterale, con misure in metri. Vasca di stoccaggio del refluo(1), sistema filtrante (2), vasca raccolta refluo filtrato con diluizione (3), sistema di fitodepurazione (4), vasca raccolta refluo fitodepurato (5) (fonte: Tamiazzo, 2014)

2.1.1 Sistema di pretrattamento

I filtri consistono essenzialmente in sei contenitori cubici in lamiera di ferro saldata, con un volume di $0,64 \text{ m}^3$, ciascuno riempito con un materiale diverso (Tabella 2.1): misto di ghiaia e zeolite, zeolite, culmi di *Arundo donax* L., tappi misti di plastica, ghiaia, culmi di bambù.

Numero del filtro	Medium	Composizione	Granulometria/lunghezza media (mm)
1	Misto di ghiaia e zeolite	Zeolite 64% (1 strato), ghiaia 36% (2 strati)	4/8-ghiaia fine;12/20- ghiaia media-grossa;15/20- zeolite
2	Zeolite	-	12/20mm
3	<i>Arundo donax</i>	-	90 –lunghezza fusti;20- diametro fusti
4	Tappi misti di plastica	-	30/60 (diametro)
5	Ghiaia	-	4/8
6	Bambù	-	50 –lunghezza fusti; 25- diametro fusti

Tabella 2.1 Composizione e caratteristiche dei filtri

Il refluo (misto di feci e urine e acque di lavaggio della stalla) viene inviato automaticamente ai filtri dalla vasca di raccolta della stabulazione, situata adiacente all'edificio (Fig 2.1, fase 1).

La pompa entra in funzione una volta al giorno, per 45 secondi, portando quindi 90 L al sistema di distribuzione (15 L per ogni filtro).

Una volta raccolto il refluo viene fatto circolare nuovamente all'interno dei filtri per 5 volte (Fig 2.1, fase 2).

Il refluo in uscita dai sei filtri è scaricato in una vasca, con un volume di 285 L, che funge da vasca di alimentazione per il sistema di fitodepurazione verticale (Fig 2.1, fase 3).

2.1.2 Sistema di fitodepurazione a “cascata”

Il sistema di fitodepurazione verticale è stato definito “a cascata”, in quanto ha una forma piramidale, che sale verso l’alto con un profilo a gradoni.

È costituito da tre livelli, il più alto a circa 2,16 metri dal suolo, quello intermedio a 1,70 m e il più basso a 1,26 m (Fig 2.1).

La struttura è in ferro e ad ogni livello sono fissate delle tavole di legno su cui poggiano le vaschette contenenti le piante.

Sono presenti 6 linee di fitodepurazione, una per ogni specie vegetale, ogni linea è costituita da 3 vaschette di plastica, ognuna posta sui tre livelli. Queste hanno dimensioni pari a cm 50x29x39 e presentano due rubinetti: uno al fondo della vasca, che ne permette il completo svuotamento e l’altro ad un’altezza di circa 15 cm, che rappresenta il troppo pieno, l’altezza a cui il refluo fuoriesce dalla vasca.

All’interno della vasca sono presenti anche 2 tubi verticali di plastica, uno con un diametro di 10 cm posizionato a contatto con il lato della vasca che presenta i rubinetti, con un foro all’altezza del troppo pieno e l’altro con un diametro di 3,5 cm, utilizzato come punto di ispezione, collocato dalla parte opposta rispetto al precedente.

Il cilindro di 10 cm di diametro ha la funzione di evitare che si crei un flusso preferenziale all’interno della vasca e fa in modo che avvenga un rimescolamento tra il refluo in entrata e quello già presente all’interno (Fig. 2.2).

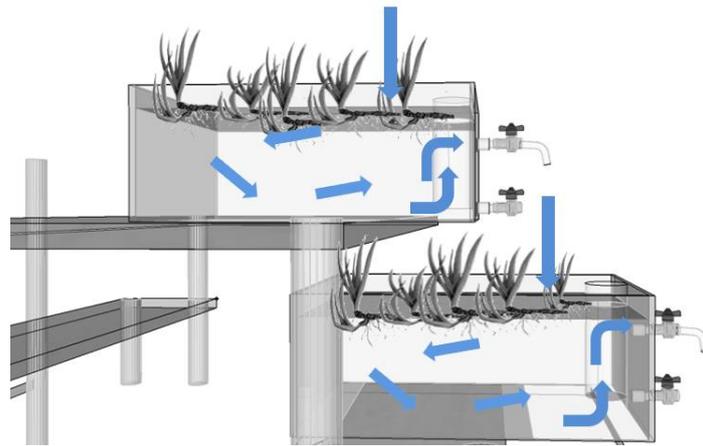


Figura 2.2 Movimento del refluo all'interno delle vaschette contenenti le piante
(fonte: Tamiazzo, 2014)

Questo è reso possibile dal fatto che il cilindro obbliga il refluo a raggiungere il fondo della vasca e risalire il tubo per poter uscire; il refluo entra così a contatto con la zona più profonda della vasca, in cui sono presenti le radici e dove avviene il vero e proprio processo depurativo.

Le vasche sono riempite di un medium costituito da sfere di argilla espansa (LECA = *light expanded clay aggregates*), con una porosità del 36%, in cui crescono le piante.

Dalla vasca di alimentazione del sistema di fitodepurazione verticale il refluo è convogliato ad un sistema di distribuzione (Fig 2.1, fase 4) costituito da un contenitore in plastica con capacità di 60L, in cui viene raccolto il refluo proveniente dalla vasca di ingresso, e da sei tubicini dotati di un rubinetto che permette di regolare il flusso in uscita, in modo da avere una portata costante.

Una volta ultimato il percorso attraverso i 3 livelli, il refluo, in uscita dalle vasche poste nel livello più basso, è raccolto in sei vaschette di plastica di dimensione 56x36,5x23 cm, chiuse con un coperchio e dotate di due rubinetti: uno collegato ad un tubo di PVC, che permette di scaricare

il refluo in una cisterna di raccolta e un altro libero che permette il prelievo di campioni di refluo (Fig 2.1, fase 5).

2.2 La vegetazione

Per questa sperimentazione sono state utilizzate sei specie vegetali diverse, una per ogni linea depurativa: *Puccinellia palustris* (Seen.) Hayek (PP), *Halimione portulacoides* (L.) Aellen (HA), *Sarcocornia fruticosa* (L.) A.J. Scott (SA), *Artemisia caerulescens* L. (AR), *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud. (PH), e *Cynodon dactylon* (L.) Pers. (CY).

Le prime quattro specie appartengono alla categoria delle alofite, mentre PH e CY non sono tipiche specie alofite, ma la prima è stata scelta in quanto è una delle piante maggiormente utilizzate in fitodepurazione, la seconda è una specie molto diffusa nel nostro territorio; nonostante ciò esse riescono a crescere in ambienti salini.

La scelta di utilizzare le specie vegetali sopra indicate è derivata da una precedente sperimentazione, in cui è stato utilizzato un sistema di fitodepurazione a flusso superficiale con elementi flottanti del tipo Technia, per il trattamento della frazione liquida del digestato derivante dalla produzione di biogas (Pavan, 2014) e si era visto che erano in grado di tollerare una salinità elevata, simile a quella che presenta il refluo suino.

2.2.1 Descrizione botanica delle piante

Genere	<i>Puccinellia</i>
Specie	<i>palustris</i>
Famiglia	Poaceae
Classificazione	(Seen.) Hayek
Nome Comune	G.marittimo

- **Distribuzione:** specie steno-mediterranea.
- **Habitat:** Paludi saline del litorale in stazioni periodicamente inondate dal mare. Coste dell'alto Adriatico dal Triestino alla laguna Veneta e alla Romagna. Nelle Marche fino ad Ancona anche se è scomparsa quasi ovunque; segnalata anche in altre zone costiere della Penisola ed Isole.
- **Morfologia:** Emicriptofita cespitosa. Fusti eretti, alla base un po' ingrossati, rivestiti dalle guaine disseccate, getti sterili abbondanti. Foglie spesso un po' glauche, carnose, con lamina larga 2-4 mm, ma convoluto-giunchiforme (diametro 1,0-1,5 mm); ligula acuta, nelle foglie basali 0,9-1 mm, nelle superiori 1,5-3 mm. Pannocchia piramidata 1-2 dm; rami con infiorescenza alla fioritura patenti, prima e dopo spesso eretti; spiglette 7-11 fiore, lunghe 10-12 mm; gluma infiorescenza acuta 3,2-3,5 mm, la superiore ottusa 4,0-4,4 mm; lemma screziato di violaceo in alto, 3,5-4,2 mm.
- **Fenologia:** la fioritura compare da Giugno ad Agosto. (S. Pignatti, 1982)



Genere	<i>Halimione</i>
Specie	<i>portulacoides</i>
Famiglia	Chenopodiaceae
Classificazione	(L.) Hayek
Nome Comune	Obione

- **Distribuzione:** specie circumboreale (alofila).
- **Habitat:** Suoli salati del litorale generalmente con salinità prossima a quella marina.
- **Morfologia:** camefite fruticose, fanerofite striscianti. Fusti legnosi prostrati, radicanti ai nodi. Foglie grassette, glauche, opposte, da lineari-

lanceolate a lanceolate (7-14 x 30-60 mm), raramente le superiori subastate e larghe fino a 25 mm, con un angolo ottuso su ciascun lato alla base della lamina. I fiori di piccole dimensioni sono sessili e si trovano raccolti in pannocchie talvolta miste a foglie. Possiede peli per eliminare i sali in eccesso accumulati nelle foglie. L'accumulo di peli morti e sale sulla superficie della foglia aumentano la riflessione della radiazione solare riducendo il calore ricevuto e limitando l'evaporazione.

- **Fenologia:** la fioritura compare da Giugno a Luglio. (S. Pignatti, 1982)



Genere	<i>Sarcocornia</i>
Specie	<i>fruticosa</i>
Famiglia	Chenopodiaceae
Classificazione	(L.) A. J. Scott
Nome Comune	Salicornia

- **Distribuzione:** specie molto polimorfa. Su tutti i litorali del territorio italiano, isole comprese.
- **Habitat:** Suoli salati del litorale generalmente con salinità prossima a quella marina.
- **Morfologia:** Terofita scaposa, pianta annuale succulenta con fusto eretto, ramoso, piramidato, verde, più o meno giallastro. Fusto semplice o molto ramificato, più o meno glauco, talvolta diffusamente gialliccio o più spesso rossastro nei segmenti fertili. Spighe terminali lunghe 1-5 cm, fiori color violetto. Le foglie assai ridotte, carnose e cilindriche come il fusto, opposte, sono fuse assieme a formare un articolo avvolgente il fusto. I fiori assai modesti e poco visibili sono disposti a tre a tre con quello centrale più grande e sono disposti all'ascella di particolari foglie e sembrano collocati in piccole nicchie. Fiori ermafroditi, impollinati dal vento.
- **Fenologia:** la fioritura compare da Agosto a Settembre. (S. Pignatti, 1982)



Genere	<i>Phragmites</i>
Specie	<i>australis</i>
Famiglia	Poaceae
Classificazione	(Cav.) Trin.
Nome Comune	Cannuccia di palude

• **Distribuzione:** specie subcosmopolita. Si ritrova ad altitudini tra 0 e 1200, max 2000 m.

• **Habitat:** suoli ad umidità variabile, sabbiosi, limosi e ricchi di humus e elementi nutritivi. Zone di interrimento dei laghi, fangose e permanentemente bagnate, in acqua poco profonda, stagnante o corrente e in torbiere basse concimate. Paludi, sponde, argini, ambienti umidi (anche salmastri).

• **Morfologia:** Elofite/geofite rizomatose. Rizoma sotterraneo orizzontale, generalmente con stoloni allungati (fino a 6- 10 m), talora epigei e radicanti ai nodi; culmo eretto, robusto, foglioso fino all'infiorescenza. Foglie lanceolate, larghe fino a 2-3 cm, ma spesso convoluto-pungenti all'apice, glaucescenti e di consistenza cartilaginea, sul bordo con aculei rivolti verso il basso ligula nulla, sostituita da due orecchiette o talora da peli. Pannocchia ricca, generalmente unilaterale, lunga 1-4 dm; spighe 3-9 flore lunghe 6- 10 (17) mm, spesso screziate di violaceo; glume diseguali, di 3-4 e 5-7 mm rispettivamente; lemma 8-10 mm o più, acuto e mucronato all'apice; l'interno della spigetta completamente riempito di peli bianco-setosi lunghi 5-10 mm.

• **Fenologia:** la fioritura compare da Giugno ad Ottobre. (S. Pignatti, 1982



Genere	<i>Artemisia</i>
Specie	<i>caerulescens</i>
Famiglia	Asteraceae
Classificazione	L.
Nome Comune	Assenzio litorale

- **Distribuzione:** specie euri-mediterranea.
- **Habitat:** ambienti salini del litorale.
- **Morfologia:** Cenerino-tormentosa con scarsi peli crespi, alla fine più glaucescente. Fusti eretti, legnosi in basso, ramosi nell'infiorescenza. Foglie dei getti sterili intere, lineari-spatolate a obovate, di 3-9 (-14) x 50-90 mm, raramente 1-2 pennatosette con segmenti estremi di (2-)3-7 x 20-40 mm, subspatolati ed arrotondati all'apice; foglie cauline semplici (1-3 x 8-20 mm), raramente 1-2 pennatosette. Pannocchia ampia, piramidale; capolini più o meno eretti, fusiformi (1,5 x 5 mm); squame lineari, le maggiori di 0,6-0,7 x 3,8-4,2 mm, crenate, scarsamente pelose sul dorso; fiori generalmente 1-2, di 4,0-4,2 mm.
- **Fenologia:** la fioritura compare da Settembre ad Ottobre. (S. Pignatti, 1982)



Genere	<i>Cynodon</i>
Specie	<i>dactylon</i>
Famiglia	Poaceae
Classificazione	(L.) Pers.
Nome Comune	Gramegna

- **Distribuzione:** specie termo cosmopolita. Altitudine tra 0 e 800 m.
- **Habitat:** incolti, siepi, terreni calpestati e di qui infestante i coltivi.
- **Morfologia:** Geofita rizomatosa. Emicriptofita reptante. Rizoma tenace, strisciante e radicante ai nodi, con foglie distiche; culmi

ascendenti, avvolti dalle guaine fino all'infiorescenza. Si propaga principalmente per rizomi e stoloni, e solo raramente attraverso i semi. Foglie con lamina larga 3-3.5 mm. Le foglie sono arrotolate nel germoglio, hanno una ligula che è composta da una frangia di peli lunghi all'incirca 1-2 millimetri. Questi peli si trovano anche sui margini delle foglie nella regione dove la lamina si unisce alla guaina. Spighe digitate a 3-5, sottili, generalmente violette.

• **Fenologia:** la fioritura compare da Giugno a Settembre. (S. Pignatti, 1982)



2.3 Gestione dell'impianto:

La messa a dimora è avvenuta a Maggio 2013; le piante alofite provenivano da un vivaio e sono state private del substrato in cui erano radicate, lavate e pesate prima di essere poste all'interno delle vaschette. PH, invece, proveniva da un impianto sperimentale di fitodepurazione a flusso superficiale, localizzato a Legnaro (PD) presso l'azienda agraria sperimentale "Lucio Toniolo" e CY è stata raccolta nella zona marginale l'impianto di fitodepurazione.

Per ogni specie è stato messo a dimora un numero di piantine tale che coprisse all'incirca la stessa superficie delle vaschette poste sui 3 livelli.

La seguente tabella riassume il numero di piante posto all'interno di ciascuna vaschetta e la specie di riferimento, con relativa sigla.

SPECIE	Sigla	Vaschetta	N° piante/vasca
<i>Puccinellia palustris</i> (Seen.) Hayek	PP	1A	4
		1B	5
		1C	4
<i>Halimione portulacoides</i> (L.) Hayek	HA	2A	4
		2B	3
		2C	2
<i>Sarcocornia fruticosa</i> (L.) A. J. Scott	SA	3A	2
		3B	1
		3C	3
<i>Phragmites australis</i> (Cav.) Trin.	PH	4A	5
		4B	6
		4C	4
<i>Cynodon dactylon</i> (L.) <i>Pers.</i>	CY	5A	5
		5B	5
		5C	5
<i>Artemisia caerulescens</i> L.	AR	6A	3
		6B	3
		6C	2

Tabella 3.1 Sintesi delle specie utilizzate, sigla e vaschetta di riferimento, numero di piante a dimora per ciascuna vasca

Con A, B, C sono indicati i livelli dell'impianto, dal più alto al più basso; i numeri indicano invece la linea di depurazione: 1, 2, 3 poste al lato ovest, mentre 4, 5, 6 poste al lato est.

Le vaschette sono state poi posizionate nell'impianto, portate a regime e alimentate con acqua fino al 29/05/2013, quando è cominciata l'alimentazione con il refluo suino.

Il refluo, in uscita dai filtri dopo i 5 ricircoli, viene diluito con acqua di acquedotto per ridurre la salinità ed ottenere un valore di conducibilità elettrica (EC) tra 7 e 8 mS/cm.

Vengono quindi aggiunti ai circa 60 L di refluo in uscita dai filtri, circa 24 L di acqua (diluizione 1:2), grazie ad un sistema automatico, sempre regolata da un timer, in funzione per 2 minuti (capacità di 12 L/min).

Il refluo diluito viene pompato alle sei linee di fitodepurazione per 1 minuto, tramite una pompa con capacità di 50 l/min, in modo da far arrivare a ciascuna linea di depurazione tra gli 8 e i 10 litri al giorno.

Dal 19/08/2013 è stato necessario raddoppiare i volumi in ingresso, in quanto non si è trovato più refluo nella vaschetta di raccolta in uscita alla linea di depurazione di CY, in modo che ogni linea ricevesse così dai 15 ai 20 litri al giorno.

È stata, quindi, impostata una seconda alimentazione di 50 L, a distanza di un'ora dalla prima, per evitare che le vaschette poste al primo livello ricevessero una quantità eccessiva di refluo nello stesso momento, con il rischio che questo trasbordasse.

Questo regime è durato fino al 30/09/2013 quando si è visto che le esigenze idriche delle specie sono diminuite ed erano sufficienti gli 8-10 litri al giorno che ricevevano all'inizio.

2.4 Metodi di monitoraggio

Il periodo di sperimentazione è durato dai primi giorni di Luglio 2013, quando è stato effettuato il primo ciclo di monitoraggio, agli ultimi di Novembre 2013 quando è stata raccolta la biomassa vegetale, il giorno 25/11/2013.

In questo periodo sono stati rilevati volumi in entrata e in uscita dal sistema e i principali parametri fisici e chimici di interesse.

2.4.1 I volumi

I volumi in ingresso alle linee di fitodepurazione sono stati misurati una volta a settimana, con dei secchi graduati posti all'uscita del sistema di distribuzione.

I volumi in uscita invece sono stati rilevati, ogni due giorni, misurando l'altezza del refluo all'interno delle vaschette di raccolta in uscita ad ogni linea, dalla quale poi si giunge ad un volume conoscendo l'area della vaschetta.

Il bilancio tra i volumi in entrata, dati da alimentazione e precipitazioni e volumi in uscita, dati dalla quantità di refluo presente nelle vaschette di raccolta, permette di calcolare l'evapotraspirazione di ciascuna specie vegetale e quindi il suo consumo idrico.

È importante conoscere il consumo di ciascuna specie, anche in base a ciò che si vuole ottenere dal sistema di fitodepurazione.

Se, ad esempio, l'obiettivo è l'utilizzazione agronomica del refluo trattato, si preferiranno delle piante che non abbiano consumi idrici eccessivi; al contrario, invece, se si punta ad avere uno scarico zero (no refluo in

uscita), le specie che consumano la maggior quantità di refluo saranno da preferire.

Per ciascuna specie vegetale sono stati anche da me calcolati i coefficienti colturali mensili, sulla base dei dati di evapotraspirazione.

È possibile calcolare i coefficienti colturali conoscendo ET, che è calcolata come differenza tra volumi in entrata e in uscita, e ET₀ calcolata con il metodo Penman-Monteith mod.FAO (Allen *et al.* 1998):

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)}$$

Dove

ET₀ = evapotraspirazione di riferimento [mm day⁻¹],

R_n = radiazione netta alla superficie della coltura [MJ m⁻² day⁻¹],

G = energia che si accumula nel terreno sotto forma di calore [MJ m⁻² day⁻¹],

T = temperatura giornaliera a 2 m di altezza [°C],

u₂ = velocità del vento a 2 m di altezza [m s⁻¹],

e_s - e_a = deficit di saturazione del vapore nell'aria [kPa],

Δ = pendenza della curva che correla la pressione di vapore saturo alla temperatura dell'aria [kPa °C⁻¹],

γ = costante psicrometrica [kPa °C⁻¹].

I dati per il calcolo dell' ET₀ sono quelli forniti dall'ARPAV, ottenuti presso la stazione agrometeorologica di Legnaro (PD).

Con questo metodo si ricavano i valori di ET₀ giornalieri, che devono essere poi sommati per ottenere un valore mensile.

Il rapporto tra ET mensile e ET₀ mensile permette di ottenere, per ciascuna specie vegetale, i coefficienti colturali (Kc) a scala mensile.

2.4.2 Analisi sul refluo

Sul refluo in entrata e in uscita dal sistema di fitodepurazione a cascata sono stati analizzati sia parametri fisici che chimici.

I parametri fisici rilevati sono:

- pH
- Conducibilità elettrica (EC, mS/cm),
- Ossigeno disciolto (OD, mg/l)
- Temperatura (°C)
- Torbidità (NTU)

Ad eccezione della torbidità, misurata in laboratorio insieme ai parametri chimici, i parametri sopra elencati sono stati misurati 2 volte alla settimana, in campo, con uno strumento portatile chiamato HQd, che presenta tre diverse sonde per la misura di pH, EC e OD; tutte e tre rilevano anche la temperatura, quella da me considerata è riferita a quella trovata con la sonda dell'OD.

Le misure sono state effettuate direttamente all'interno della vasca di alimentazione, dopo la diluizione, per valutare il refluo in ingresso e all'interno delle vaschette di raccolta delle sei linee di depurazione, per valutare il refluo in uscita da ciascuna linea.

Saltuariamente, sono state effettuate anche delle misure dei parametri fisici del refluo all'interno di ciascuna vaschetta contenente le piante per vedere le variazioni tra i vari livelli e le differenze di temperatura tra un lato e l'altro dell'impianto.

La torbidità (NTU) dei campioni in entrata e in uscita dal sistema è stata invece misurata in laboratorio, con un torbidimetro portatile Hanna instruments HI 83414, che si basa sul principio nefelometrico di misura della torbidità, che correla l'intensità della luce diffusa, misurata a 90° rispetto alla radiazione incidente, con la concentrazione della sospensione.

I parametri chimici rilevati (mg/l) sono:

- N tot (azoto totale)
- N-NH₄ (azoto ammoniacale)
- N-NO₃ (azoto nitrico),
- P tot (fosforo totale)
- P-PO₄ (fosforo solubile)
- COD (domanda chimica di ossigeno)
- BOD₅ (domanda biochimica di ossigeno, misurata al 5° giorno)

Le analisi chimiche sono state eseguite 2 volte nel corso del mese di Luglio ed una volta nei mesi seguenti, per un totale di 6 cicli di monitoraggio, prelevando dei campioni in ingresso e in uscita dal sistema di fitodepurazione verticale.

Numero ciclo	Periodo di analisi
1	9-10 Luglio 2013
2	16-19 Luglio 2013
3	7-9 Agosto 2013
4	4-6 Settembre 2013
5	15-18 Ottobre 2013
6	19-22 Novembre 2013

Tabella 3.2 Durata del periodo di analisi corrispondente a ciascun ciclo di monitoraggio

Le analisi sono state effettuate, in laboratorio, con degli appositi kit per i test in cuvetta Hach Lange specifici per ogni parametro chimico e rivelazione con spettrofotometro portatile VIS (lunghezza d'onda compresa tra 340 e 900 nm) DR 2800 Hach Lange.

Questo è stato fatto per tutti i parametri ad eccezione del BOD che prevede una tecnica diversa, con valutazione al 5° giorno dell'ossigeno richiesto per la degradazione biologica della sostanza organica.

La misura del BOD₅ viene effettuata tramite Oxytop system® IS 6, IS 12 che è basato su una misura di pressione in un sistema chiuso: i microorganismi nel campione consumano l'ossigeno e formano CO₂ che è assorbita dall'NaOH presente nel tappo, creando un vuoto che può essere misurato come valore di BOD in mg/l.

2.4.3 Raccolta della biomassa

Il giorno 25/11/2013 è stata effettuata la raccolta della biomassa vegetale.

Per ciascuna specie vegetale è stata tagliata la parte aerea, lasciando invece la parte ipogea all'interno nel medium, per permettere così alla pianta di svilupparsi nuovamente con la nuova stagione vegetativa.

Il corrispettivo di ciascuna vaschetta è stato pesato e registrato; della biomassa raccolta è stata separata una porzione più piccola per poter essere posta successivamente in stufa per il calcolo della sostanza secca.

La porzione prelevata è stata quindi posta in stufa a 65°C per due giorni; una volta tolti dalla stufa i campioni sono stati pesati e macinati, ed è stata presa un'ulteriore porzione di circa 10 grammi per calcolare l'umidità residua (UR), ponendo il campione in stufa a 130°C.

Il campione ottenuto dopo la seccatura è mandato in laboratorio, dove viene valutata la percentuale di azoto e fosforo sulla sostanza secca, in modo da calcolare poi la quantità dei due elementi chimici che le specie vegetali sono state in grado di asportare.

2.5 Elaborazione dei dati

L'elaborazione dei dati ottenuti in campo e in laboratorio è stata da me effettuata con Microsoft Excel 2010 per il sistema operativo Windows 7, strumento che mi ha permesso il calcolo elettronico, l'analisi dei dati e la creazione di grafici e tabelle.

Per i parametri chimici è stato calcolato l'abbattimento di massa, come percentuali dell'uscita rispetto all'ingresso:

$$\% \text{ Abbattimento di massa} = [(Q \text{ IN} - Q \text{ OUT}) * 100] / Q \text{ IN}$$

Dove:

Q IN = quantità in ingresso (g/m^2), ottenuta dal prodotto tra concentrazione (mg/l) e volumi in ingresso (l/m^2), il tutto moltiplicato per 1000;

Q OUT = quantità in uscita (g/m^2), ottenuta dal prodotto tra concentrazione (mg/l) e volumi in uscita (l/m^2), il tutto moltiplicato per 1000.

È stata poi fatta anche un'analisi statistica utilizzando "Statistica, 8" per Windows, sui parametri chimici del refluo, per vedere se ci fossero differenze significative nelle concentrazioni in uscita dal sistema di fitodepurazione a cascata, tra le specie vegetali.

I dati raccolti sono stati confrontati tramite il test Kruskal-Wallis, un metodo non parametrico per verificare l'uguaglianza delle mediane di diversi gruppi, per vedere quindi se questi gruppi appartengono ad una stessa popolazione.

Le differenze tra le mediane sono state considerate statisticamente significative per un *p-value* inferiore o uguale a 0,05.

Per quanto riguarda la vegetazione, conoscendo la quantità di azoto e fosforo che le piante hanno ricevuto dall'alimentazione, è stato possibile ricavare la percentuale di asportazione, come rapporto tra la quantità di N e P presente nella biomassa (Q BIOMASSA, g/m^2) e la quantità in entrata (Q IN, g/m^2):

$$\% \text{ ASPORTAZIONE} = (Q \text{ IN} * 100) / Q \text{ BIOMASSA}$$

3 RISULTATI

3.1 Condizioni meteorologiche

Come detto in precedenza, il periodo di sperimentazione è durato dai primi giorni di Luglio 2013, agli ultimi di Novembre 2013.

Durante questi mesi la temperatura ambientale è variata da un massimo di 29°C ad un minimo di 1,3°C, come è possibile vedere in figura 3.1.

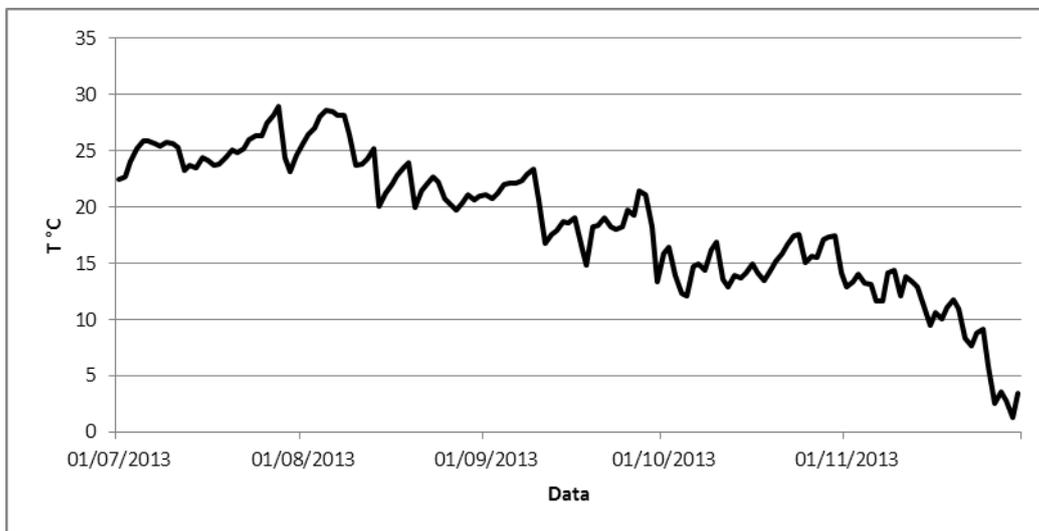


Figura 3.1 Andamento della temperatura dell'aria, rilevata a 2 m di altezza, presso la stazione agrometeorologica dell'ARPAV di Legnaro (PD)

Si nota come, da inizio Luglio alla prima metà del mese di Settembre, la temperatura si sia mantenuta sempre al di sopra dei 20 °C, oscillando tra i 29°C registrati il 28/07/2013 e i 20°C registrati il 20/08/2013, fatta eccezione per il giorno 27/08/2013 in cui la temperatura è scesa a 19,7°C, in corrispondenza di un'abbondante pioggia (28,8 mm).

Da metà settembre la temperatura subisce una rapida diminuzione, rimanendo tra i 15°C e i 20°C per poi subire un'ulteriore diminuzione nei mesi di Ottobre e Novembre giungendo al minimo di 1,3°C.

Le precipitazioni sono state sporadiche durante il periodo estivo, e sono state invece più frequenti durante il periodo invernale, come si può vedere in figura 3.2.

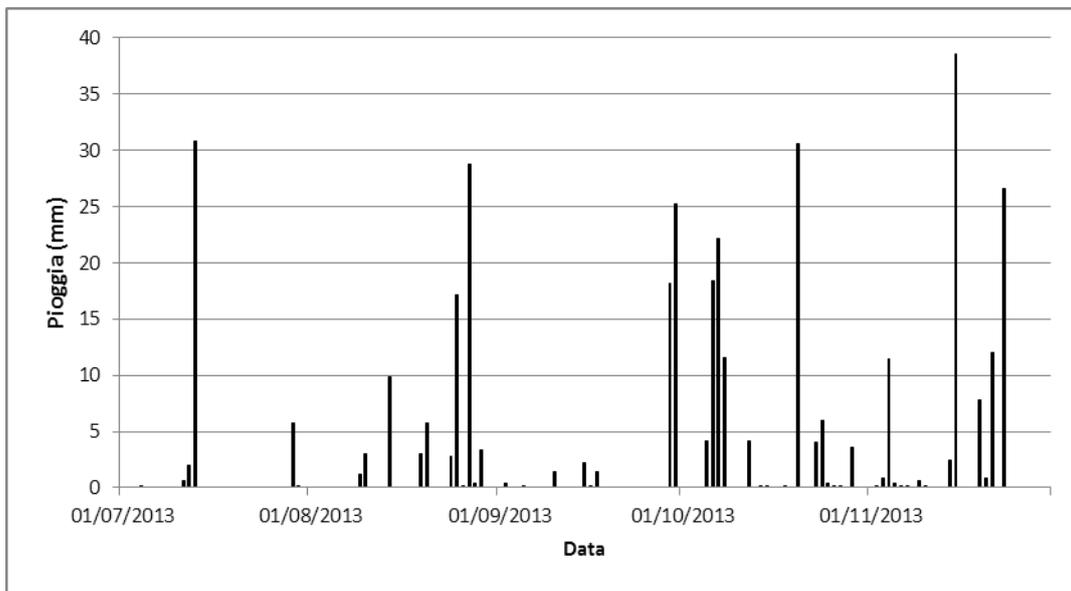


Figura 3.2 Dati giornalieri delle precipitazioni, registrati presso la stazione agrometeorologica ARPAV di Legnaro (PD).

Si nota come gli eventi di precipitazione durante il periodo estivo siano stati pochi, ma intensi (ad esempio: 30,8 mm caduti il 13/07/2013 e 28,8 mm caduti il 28/08/2013) con una media di 1,5 mm al giorno.

Le precipitazioni sono diventate più frequenti e più intense con l'inizio della stagione autunnale, con una media di 3,6 mm al giorno; si è registrato un evento di pioggia particolarmente abbondante (38,6 mm), il 15/11/2013.

3.2 Bilancio idrico

Di seguito riporto, per ciascuna specie vegetale, l'andamento cumulato dei volumi in ingresso, dei volumi in uscita e dell'evapotraspirazione.

I volumi in ingresso, seppur simili tra di loro, differiscono per le sei specie vegetali in quanto il sistema di distribuzione del refluo non assicurava una portata omogenea per ciascuna linea.

PP non è stata in grado di attecchire all'interno della vaschetta, e quindi i dati riportati fanno riferimento alla sola azione del medium e da qui in seguito verrà indicata con la sigla PP/Nudo.

In figura 3.3 sono riportati gli andamenti cumulati, in millimetri (mm), dei volumi in ingresso, dei volumi in uscita e dell'evapotraspirazione per le sei specie vegetali nei diversi mesi di sperimentazione: Giugno (G), Luglio (L), Agosto (A), Settembre (S), Ottobre (O), Novembre (N) e vale la seguente legenda:

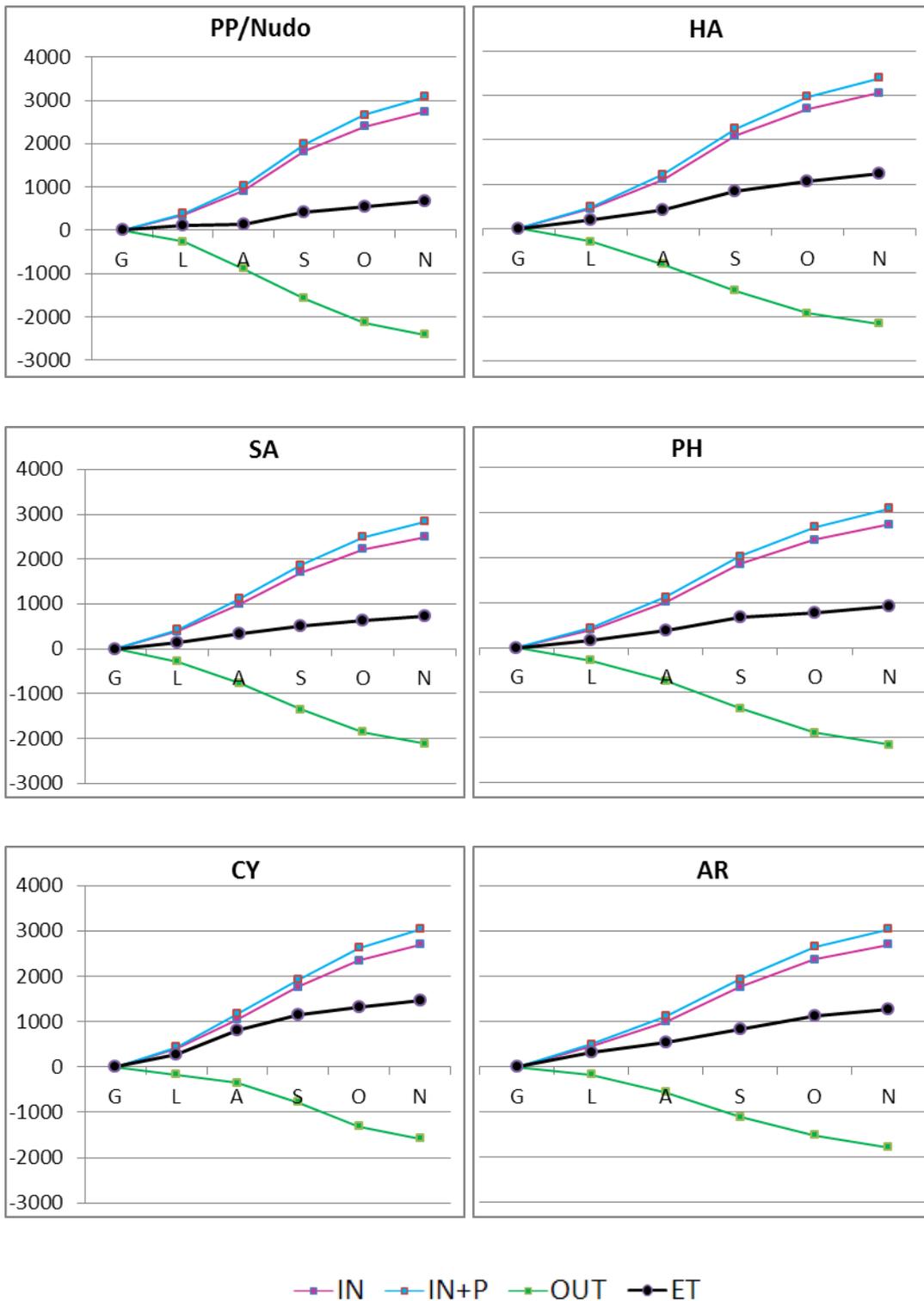


Figura 3.3 Andamento cumulato volumi in ingresso (alimentazione, IN e alimentazione e pioggia, IN+P), volumi in uscita (OUT) ed evapotraspirazione (ET), espressi in millimetri (mm), per le sei specie vegetali PP, HA, SA, PH, CY, AR

I volumi in ingresso totali per ciascuna specie sono stati simili, sull'ordine dei 3000 mm, in particolare: PP/Nudo 3087 mm (circa 22 mm/giorno), HA 3402 mm (circa 24 mm/giorno), SA 2834 mm (circa 20 mm/giorno), PH 3084 mm (circa 22 mm/giorno), CY 3041 mm (circa 21 mm/giorno) e AR 3044 mm (circa 21 mm/giorno).

I volumi in uscita, invece, differiscono tra loro, in base a quanto ciascuna specie ha consumato, in particolare: PP/Nudo 2419 mm (78% dell'IN), HA 2154 mm (63% dell'IN), SA 2114 mm (75% dell'IN), PH 2154 mm (70% dell'IN), CY 1573 mm (52% dell'IN), AR 1786 mm (59% dell'IN).

Dai risultati sull'ET risulta evidente come la specie vegetale che ha consumato la maggior quantità di refluo sia CY (1468 mm), seguita da AR (1258 mm), HA (1248 mm), PH (930 mm), SA (720 mm) e PP/Nudo (668 mm).

Il consumo così basso da parte di PP/Nudo può essere facilmente spiegato al fatto che la pianta non ha attecchito, e quindi il valore fa riferimento alla sola traspirazione del substrato.

Al contrario, CY è stata la specie che è cresciuta più velocemente e in maggior misura tra tutte le specie e ciò giustifica la sua elevata esigenza idrica.

Per ciascuna specie sono stati calcolati anche i coefficienti colturali (K_c), sulla base dei consumi idrici mensili e sul calcolo dell'evapotraspirazione di riferimento ET_0 , riportati nella seguente tabella (Tab 3.3)

	Kc						ET₀ (mm)
	PP/Nudo	HA	SA	PH	CY	AR	
Luglio	0,44	0,76	0,56	0,58	1,04	1,23	258,6
Agosto	0,05	0,98	0,89	1,09	2,45	1,05	220,1
Settembre	1,87	2,87	1,11	1,92	2,21	1,80	151,6
Ottobre	1,60	2,80	1,62	1,34	2,19	3,95	78,2
Novembre	2,40	3,23	1,48	2,59	2,74	2,25	56,4
media	1,27	2,13	1,13	1,50	2,13	2,06	

Tabella 3.3 Coefficienti colturali (Kc) a scala mensile per le sei specie vegetali PP, HA, SA, PH, CY, AR e valori di ET₀ (mm) mensili

L'ET₀ fa riferimento all'evapotraspirazione da una superficie a prato, alta 8-15 cm, uniforme e completamente ombreggiante il terreno, non sottoposta a stress idrico (Borin, 1999).

Il fatto che, in media, i coefficienti colturali delle specie vegetali utilizzate per questa prova siano molto superiori a 1, indica che la loro capacità di disperdere acqua è molto elevata.

In particolare, le due specie che presentano i coefficienti colturali più elevati sono CY e HA (2,13), seguite da AR (2,06), PH (1,50), PP/Nudo (1,27) e SA (1,13)

Dai dati di ET₀ si nota come la traspirazione maggiore si registri a Luglio e come diminuisca nei mesi successivi.

3.3 Efficienza depurativa del sistema

Per valutare le prestazioni del sistema di fitodepurazione verticale, sono stati analizzati sia parametri fisici che chimici, e in particolare la variazione di questi parametri tra refluo in ingresso e refluo in uscita per le sei specie vegetali e, per i parametri chimici, anche la capacità di rimozione.

3.3.1 Parametri fisici

I parametri fisici presi in considerazione sono pH, conducibilità elettrica (EC, mS/cm), ossigeno disciolto (OD, mg/l), temperatura (T, °C) e torbidità (TORB, NTU).

Di seguito riporto i grafici che riassumono i valori riscontrati nel refluo in entrata e in uscita dalle sei linee di depurazione.

Il refluo in ingresso presenta dei valori di pH compresi tra un massimo di 8,3 ed un minimo di 7; il refluo in uscita ha un andamento simile per le sei specie vegetali ed è compreso tra un massimo di 8,4 a un minimo di 7,5 (Figura 3.4).

L'eccezione è rappresentata da CY che presenta un andamento diverso rispetto alle altre specie, in particolare durante il 3° ciclo di monitoraggio, in cui in refluo in uscita dalle altre linee presenta un valore di pH superiore o simile a quello del refluo in entrata, mentre il refluo in uscita dalla linea di CY ha un pH inferiore.

Risulta evidente come durante i primi due cicli di monitoraggio il pH del refluo in ingresso fosse più alto rispetto all'uscita delle linee di depurazione, mentre dal 3° ciclo di monitoraggio in poi la situazione si inverte.

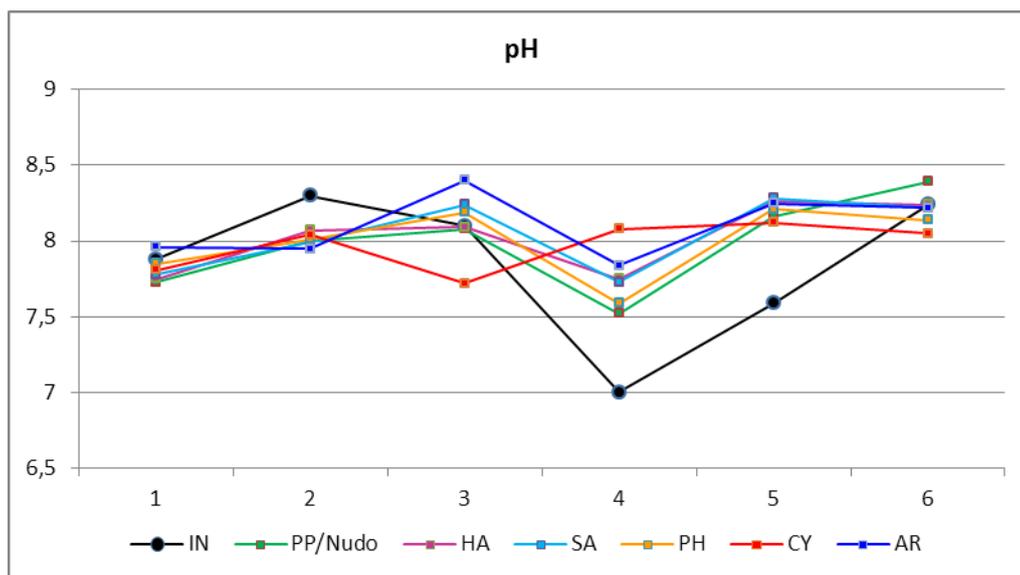


Figura 3.4 Distribuzione dei valori di pH del refluo in ingresso (IN) e in uscita per le sei specie vegetali PP, HA, SA, PH, CY, AR

La conducibilità elettrica dà un'indicazione sulla salinità del refluo, in quanto cresce all'aumentare dei sali disciolti; l'EC in ingresso varia tra un massimo di 7,84 mS/cm ad un minimo di 5,68 mS/cm (Figura 3.5).

L'EC in uscita ha un andamento simile per il refluo in uscita dalle linee di depurazione (massimo di 8,97 e minimo di 5,7 mS/cm), fatta eccezione per CY e AR, in cui ritroviamo picchi di conducibilità elettrica molto elevati (21 mS/cm per CY e 13 mS/cm per AR), in corrispondenza del 3° ciclo di monitoraggio.

Questo può essere spiegato dalla temperatura elevata del periodo di analisi e dal fatto che queste due specie sono risultate essere quelle con le più grandi esigenze idriche; in conseguenza ad un'elevata evapotraspirazione delle due specie, i sali presenti all'interno del refluo si sono concentrati e hanno fatto quindi registrare valori elevati di conducibilità elettrica.

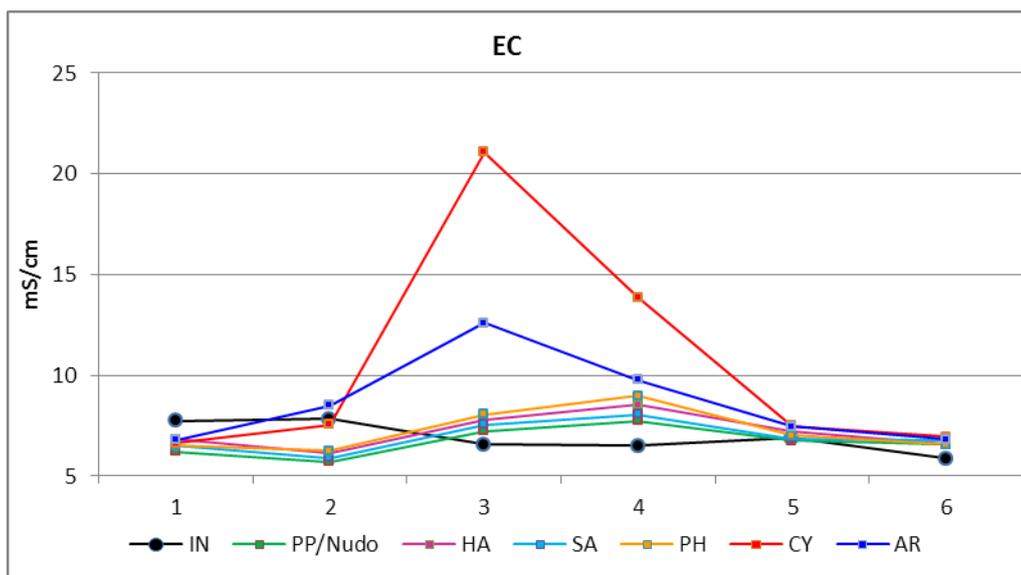


Figura 3.5 Distribuzione dei valori di EC del refluo in ingresso (IN) e in uscita per le sei specie vegetali PP, HA, SA, PH, CY, AR

Non è stato possibile rilevare l'ossigeno disciolto durante il 4° e il 5° ciclo di monitoraggio, a causa di un malfunzionamento della sonda che rilevava questo parametro; i valori riportati sono quindi quelli rilevati negli altri cicli.

L'OD nel refluo in entrata oscilla tra un massimo di 7,88 mg/l ad un minimo di 1,59 mg/l e dalla figura 3.6 è evidente come aumenti nei mesi più freddi; questo è dovuto al fatto che la solubilità dell'ossigeno nell'acqua diminuisce con l'aumentare della temperatura e quindi con temperature ambientali più basse registriamo concentrazioni maggiori di ossigeno disciolto.

L'OD del refluo in uscita dalle linee di depurazione, ha un andamento simile per tutte le specie vegetali (tra un massimo di 3,62 mg/l ad un minimo di 0,54 mg/l), fatta sempre eccezione per CY che presenta un picco di OD di 4,59 mg/l durante il 2° ciclo di monitoraggio.

È possibile vedere come durante i primi due cicli di monitoraggio i valori del refluo in entrata erano minori o simili a quello in uscita, mentre durante gli altri cicli l'OD del refluo in ingresso è di molto superiore a quello in uscita dalle linee di depurazione (Figura 3.6).

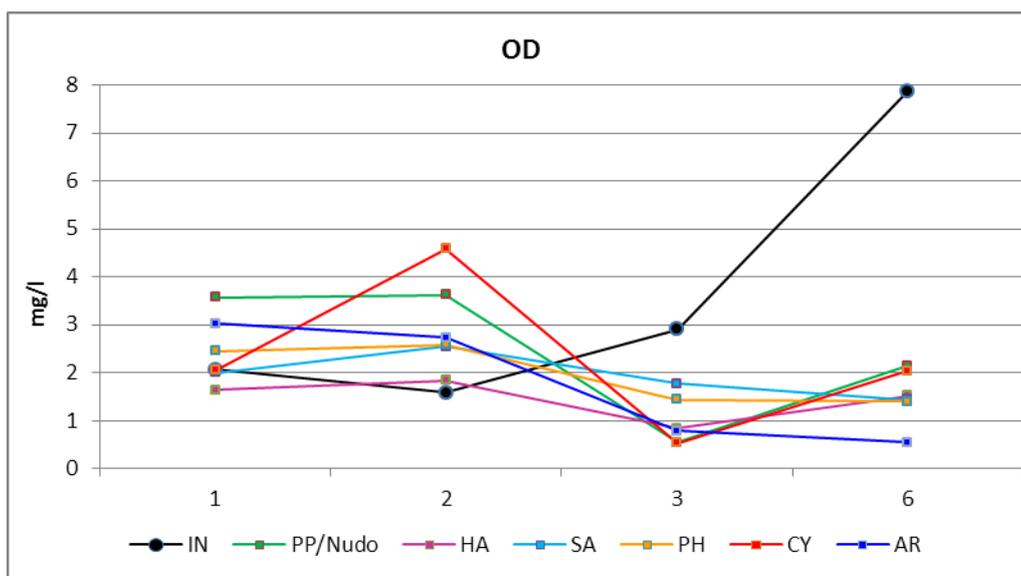


Figura 3.6 Distribuzione dei valori di OD del refluo in ingresso (IN) e in uscita per le sei specie vegetali PP, HA, SA, PH, CY, AR

Il refluo in ingresso presenta una temperatura compresa tra un massimo di 27,8°C e un minimo di 13°C (Figura 3.7); si vede come il valore massimo sia riscontrato durante il 3° ciclo di monitoraggio (durante il mese di Agosto), dopo di che la temperatura scende gradualmente i mesi successivi, fino al minimo misurato durante il 6° ciclo di monitoraggio (a Novembre).

La temperatura del refluo in uscita dalle linee di fitodepurazione presenta un massimo più elevato rispetto all'ingresso (31°C) e un minimo più basso (7,3°C).

Questo è dovuto al fatto che, mentre la vasca di alimentazione è coperta e al riparo da condizionamenti esterni, il sistema di fitodepurazione a cascata e in conseguenza anche il refluo che lo attraversa, è esposto alle condizioni esterne e risente in maggior misura della temperatura ambientale.

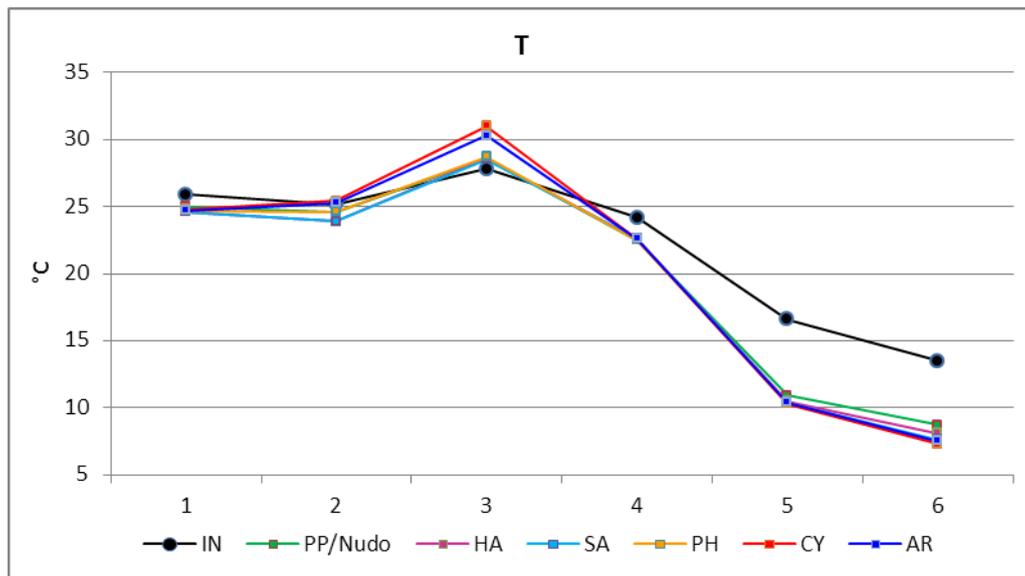


Figura 3.7 Distribuzione dei valori di T del refluo in ingresso (IN) e in uscita per le sei specie vegetali PP, HA, SA, PH, CY, AR

La torbidità del refluo in ingresso oscilla tra un massimo di 923 NTU, rilevata durante il 2° ciclo di monitoraggio e un minimo di 250 NTU, rilevata durante il 4° ciclo di monitoraggio.

L'andamento della torbidità del refluo in uscita è simile per tutte le specie vegetali, ed è compreso tra un massimo di 119 e un minimo di 37 NTU (Figura 3.8).

Risulta evidente come i valori di torbidità in ingresso siano molto maggiori rispetto a quelli in uscita, con una percentuale di riduzione media del 81,8 per PP/Nudo, 78,1% per HA, 84,4% per SA, 84,9% per PH, 78,7 per CY e 78,4 per AR; questo perché il sistema di fitodepurazione ha rimosso una grande quantità di solidi sospesi e particelle colloidali che danno valori elevati di torbidità.

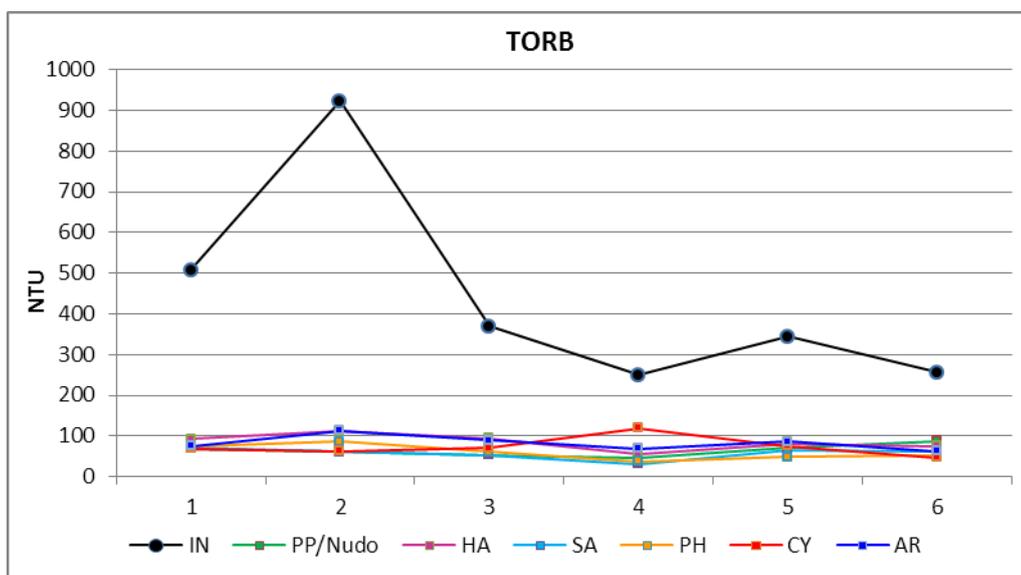


Figura 3.8 Distribuzione dei valori di T del refluo in ingresso (IN) e in uscita per le sei specie vegetali PP, HA, SA, PH, CY, AR

3.3.2 Parametri chimici

Di seguito sono riportati i grafici dell'andamento dei parametri chimici misurati durante le analisi in laboratorio, affiancati ai box plot, che riassumono i medesimi dati, evidenziando la distribuzione e la mediana per le varie specie vegetali.

I parametri analizzati (mg/l) sono: azoto totale (N tot), azoto nitrico (N-NO₃), azoto ammoniacale (N-NH₄), fosforo totale (P tot), fosforo solubile (P-PO₄), domanda chimica di ossigeno (COD) e domanda biochimica di ossigeno (BOD).

Forme Azotate

Nel refluo in ingresso al sistema, l'azoto totale è oscillato tra un massimo di 550 mg/l ad un minimo di 354 mg/l (Fig. 3.9)

Il refluo in uscita dalle linee di depurazione presenta un andamento piuttosto simile per tutte le specie vegetali, con oscillazioni tra i 350 mg/l e i 600 mg/l, fatta eccezione per CY e AR che presentano due picchi in corrispondenza del 3° ciclo di monitoraggio; come detto in precedenza questo può essere spiegato dall'elevata temperatura del periodo di analisi e dal grosso consumo di acqua di queste due specie, che porta ad un aumento delle concentrazioni del parametro.

Andando ad osservare le mediane, si può vedere come le uscite non differiscano molto dall'ingresso e per nessuna specie è possibile riscontrare una riduzione della concentrazione di questo parametro, infatti da un valore medio d'ingresso di 458 mg/l, i risultati all'uscita sono stati i seguenti: 569 mg/l per AR, 476 mg/l per CY, 469 mg/l per PP, 466 mg/l per HA, 458 per PH e 418 per SA.

Le concentrazioni di azoto nitrico (N-NO₃) nel refluo in ingresso al sistema di fitodepurazione oscillano tra un massimo di 409 mg/l e un minimo di 202 mg/l; le concentrazioni in uscita presentano un andamento molto simile a quello dell'N tot, il che suggerisce che la maggior parte dell'azoto è presente in forma nitrica.

Come già visto anche per l'N tot, le sei specie presentano andamento simile, in questo caso compreso tra 496 e 243 mg/l, fatta eccezione per CY e AR, che presentano sempre un picco in corrispondenza del 3° ciclo di monitoraggio (Fig. 3.9).

Osservando anche le mediane risulta evidente, come, per tutte le specie, le concentrazioni in uscita (457 mg/l per AR, 421 mg/l per CY, 396 mg/l per PH, 374 mg/l per PP, 364 mg/l per HA e 348 mg/l per SA) siano maggiori rispetto a quella in entrata (280 mg/l); il che vuol dire che non c'è riduzione per questo parametro, ma che parte dell'ammonio è stato convertito in nitrato.

L'azoto ammoniacale (N-NH₄) presente nel refluo in ingresso varia tra un massimo di 193 mg/l e un minimo di 34,4 mg/l; è evidente come le concentrazioni in ingresso siano sempre superiori a quelle in uscita dalle linee di depurazione, il cui andamento è molto simile tra le varie specie vegetali ed oscilla tra 57,2 mg/l e 0,8 mg/l (Fig. 3.9)

Analizzando le mediane è possibile vedere come, eccezione fatta per PP (59 mg/l), tutte le specie presentino valori molto inferiori rispetto all'ingresso (59 mg/l), in particolare CY (3,2 mg/l), SA (8,5 mg/l), PH (9,9 mg/l), AR (12,8 mg/l), HA (20,8 mg/l), il che indica un'importante riduzione del parametro.

L'analisi statistica effettuata con il test Kruskal-Wallis è risultato negativo per tutti i parametri, ad eccezione dell'azoto ammoniacale che presenta differenze significative tra la specie PP (nudo) e le due specie PH e CY.

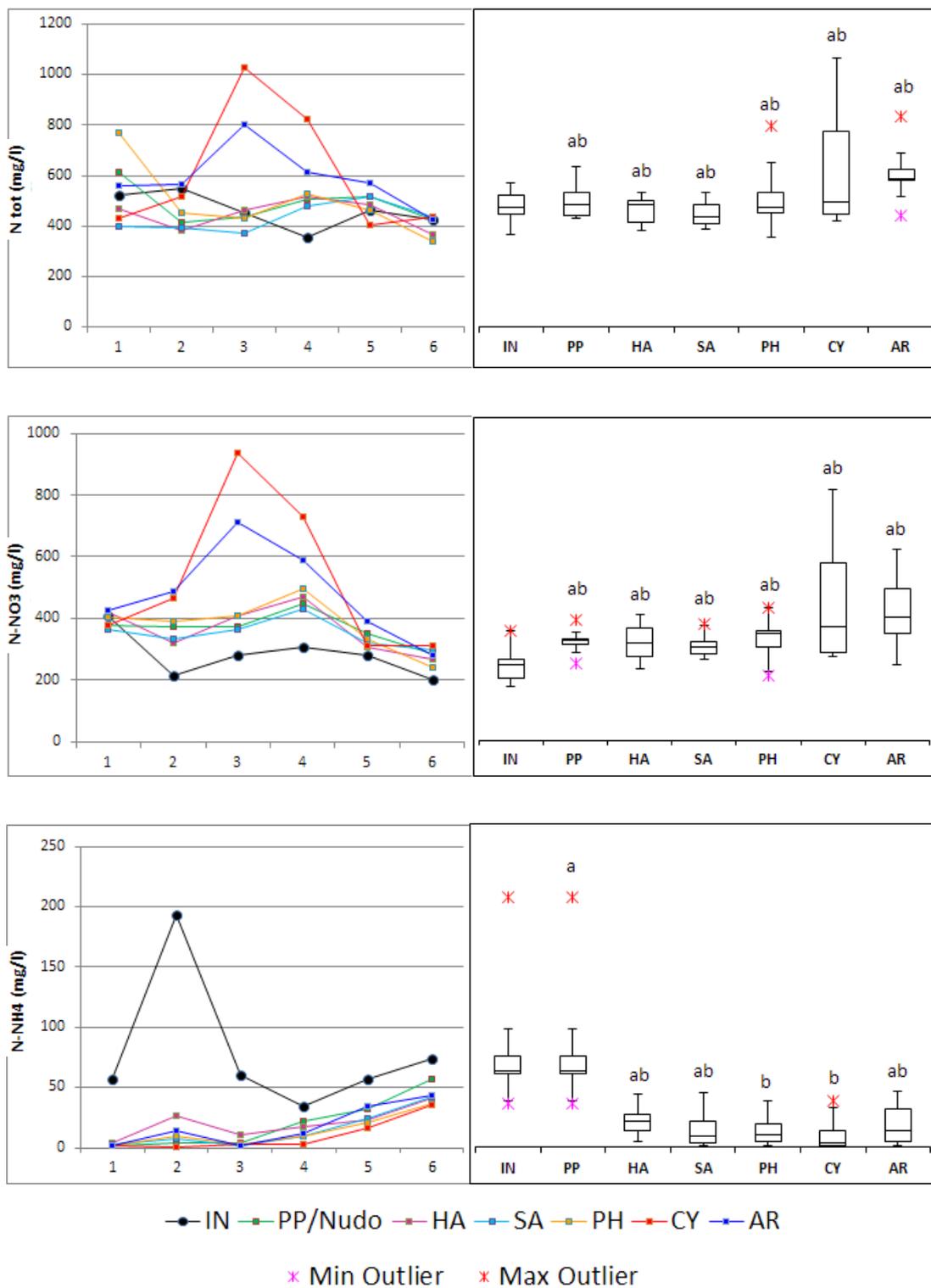


Figura 3.9 Andamenti della concentrazione nel tempo (mg/l) e relativi box plot dei valori di N tot, N-NO₃ e N-NH₄ del refluo in ingresso (IN) e in uscita per le sei specie vegetali PP, HA, SA, PH, CY, AR. L'acronimo "ab" indica che non ci sono differenze significative, mentre "a" e "b" indicano specie che differiscono statisticamente tra loro.

Fosforo

Nel refluo in ingresso troviamo dei valori di fosforo totale compresi tra un massimo di 30 mg/l e un minimo di 19 mg/l; questi valori sono sempre maggiori rispetto a quelli del refluo in uscita, fatta eccezione per il 6° ciclo di monitoraggio, in cui troviamo più fosforo totale in uscita che in entrata.

L'andamento delle concentrazioni in uscita è sostanzialmente simile per tutte le specie vegetali ed è compreso tra 26 e 9 mg/l (Figura 3.10).

Le mediane dei valori in uscita (13,4 mg/l per CY, 15 mg/l per SA, 15,4 mg/l per PH, 15,8 mg/l per PP, 16,3 mg/l per HA, 18,2 mg/l per AR) ci mostrano come ci sia stato un importante abbattimento di questo parametro, visto che si discostano molto dal valore in entrata (27,7 mg/l); in generale il sistema è stato in grado di ridurre questo parametro del 43%.

Dalla figura 3.10 è subito evidente come l'andamento di P-PO₄ sia molto simile a quello del fosforo totale; questo indica che la maggior parte del fosforo è, in realtà, presente in forma solubile.

Le concentrazioni in ingresso sono comprese tra 27 e 17 mg/l, mentre quelle in uscita tra 24 e 7 mg/l; anche in questo caso per le sei specie non c'è grande differenza tra le concentrazioni.

Si nota un incremento della concentrazione del fosforo in uscita andando verso l'autunno, questo perché le piante assorbono meno acqua e quindi, essendo la maggior parte del fosforo presente in forma solubile, assorbono anche meno nutriente.

Così come per il fosforo totale, anche quello solubile è stato ridotto efficacemente, come evidente dal box plot di riferimento; da un valore in ingresso di 24,5 mg/l si ottengono i seguenti valori in uscita: 10,6 mg/l per

CY, 13,4 mg/l per SA, 13,7 mg/l per PP, 13,8 mg/l per PH, 14,4 mg/l per HA e 15,9 mg/l per AR, con una riduzione media del sistema del 44,4%.

Il test di Kruskal-Wallis non ha evidenziato nessuna differenza significativa tra le sei specie vegetali, per questi due parametri.

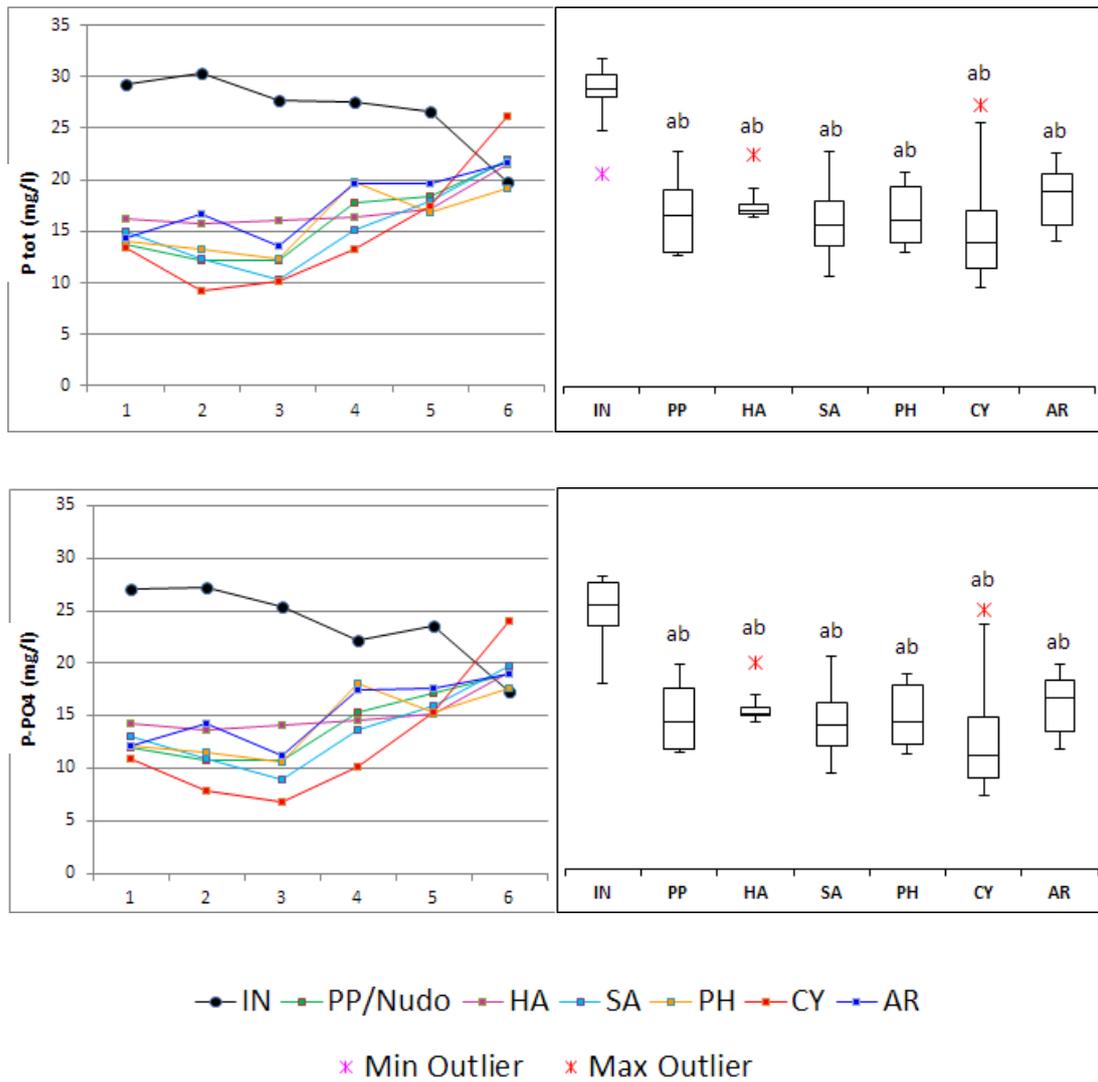


Figura 3.10 Andamenti della concentrazione nel tempo (mg/l) e relativi box plot dei valori di P tot e P-PO₄ del refluo in ingresso (IN) e in uscita per le sei specie vegetali PP, HA, SA, PH, CY, AR. L'acronimo "ab" indica che non ci sono differenze significative.

Parametri caratterizzanti la sostanza organica

Il COD (Chemical Oxygen Demand) rappresenta la quantità di ossigeno necessaria per la completa ossidazione per via chimica dei composti organici ed inorganici presenti in un campione di acqua.

Insieme al BOD (Biochemical Oxygen Demand), da un'indicazione della sostanza organica presente nel refluo; maggiore è la quantità presente, più ossigeno sarà necessario per la sua degradazione.

Nel refluo in ingresso al sistema il COD è variato da un massimo di 2135 mg/l ad un minimo di 657 mg/l, mentre quello in uscita tra un massimo di 2550 mg/l e un minimo di 244 mg/l (Figura 3.11).

L'andamento del refluo in uscita ha seguito l'andamento di quello in ingresso, fatta eccezione per CY che presenta un picco in corrispondenza al 3° ciclo di monitoraggio, con un COD molto maggiore rispetto all'ingresso; dal grafico si nota anche come durante il 6° ciclo di monitoraggio il refluo in uscita dal sistema di fitodepurazione presenti COD maggiore rispetto all'ingresso, per tutte le specie vegetali.

Dal box plot si vede come, a parte CY (1063 mg/l), tutte le specie sono state in grado di abbattere una parte del COD in entrata (1044 mg/l), in particolare 654 mg/l per PP, 664 mg/l per SA, 712 mg/l per HA, 747 mg/l per PH, 903 mg/l per AR, con una riduzione media del 24,3%.

Il BOD del refluo in ingresso è variato da un massimo di 400 mg/l ad un minimo di 50 mg/l; i valori del refluo in uscita si sono mantenuti quasi sempre al di sotto del refluo in entrata, oscillando tra 0 e 100 mg/l; l'eccezione è rappresentata dal 6° ciclo di monitoraggio, in cui, a parte CY e AR, la specie hanno fatto registrare valori di BOD maggiori rispetto all'ingresso (Figura 3.11).

L'analisi delle mediane mostra come, in realtà, nell'intero periodo tutte le specie vegetali siano state in grado di abbattere questo parametro, da un ingresso di 120 mg/l in uscita si hanno 40 mg/l per SA, 45 mg/l per PH, 50 mg/l per CY, AR, PP e 55 mg/l per HA, con una riduzione media del 60%.

Il test di Kruskal-Wallis non ha evidenziato nessuna differenza significativa tra le sei specie vegetali, per questi due parametri.

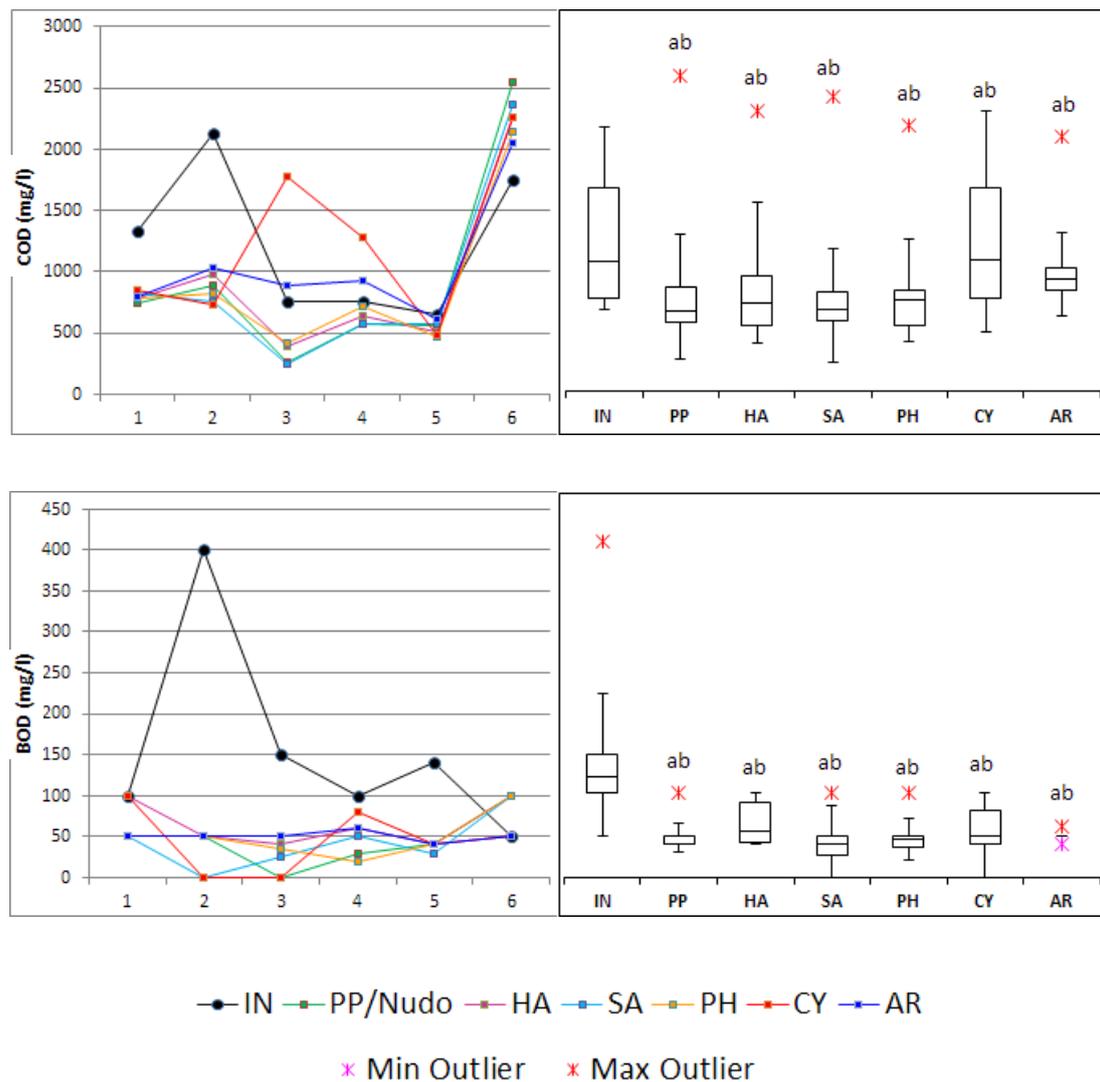
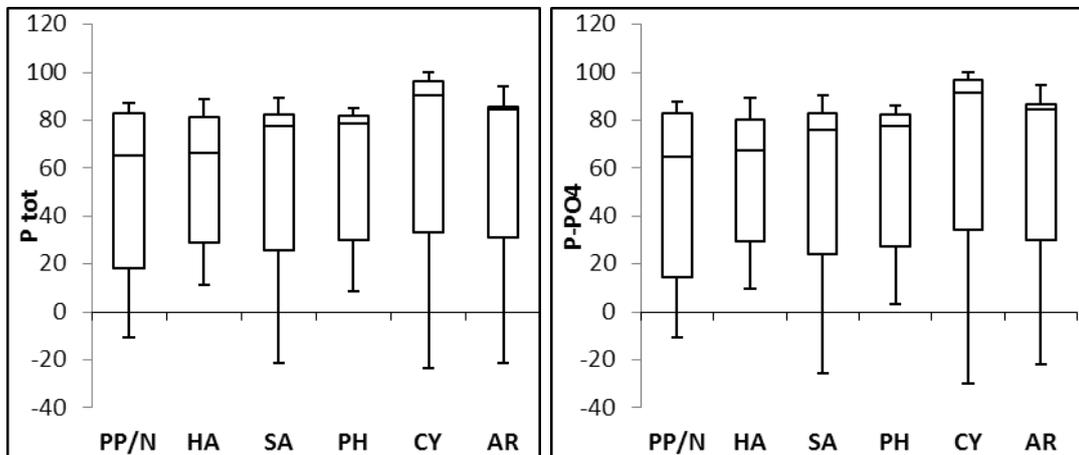
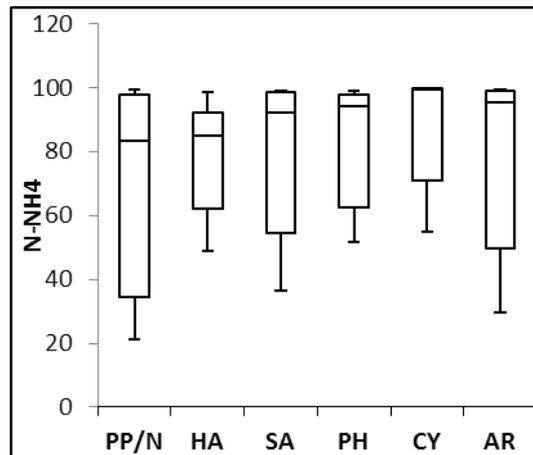
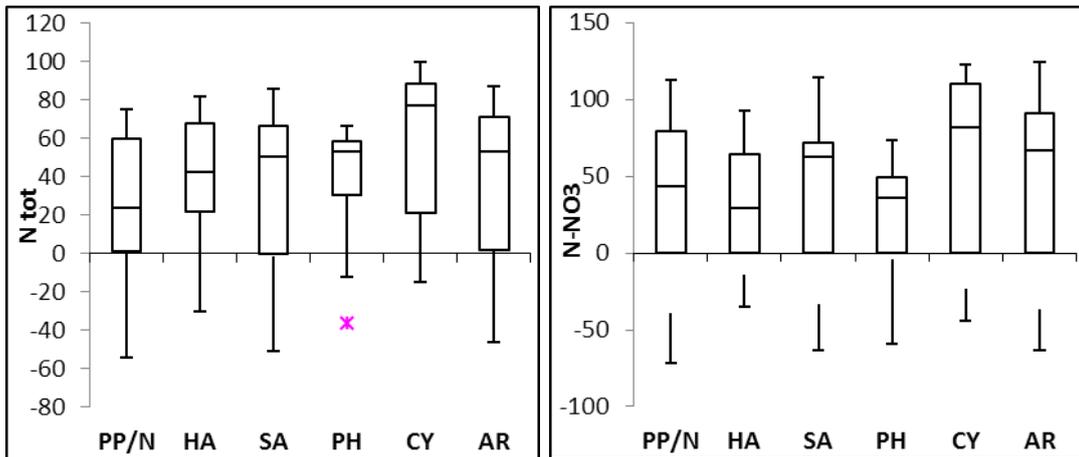


Figura 3.11 Andamenti della concentrazione nel tempo (mg/l) e relativi box plot dei valori di COD E BOD del refluo in ingresso (IN) e in uscita per le sei specie vegetali PP, HA, SA, PH, CY, AR. L'acronimo "ab" indica che non ci sono differenze significative.

3.3.3 Abbattimento di massa dei parametri chimici

Di seguito sono riportati i box plot che riassumono le percentuali di abbattimento di massa riscontrate nei vari cicli di monitoraggio, evidenziando la distribuzione e la mediana per le varie specie vegetali.



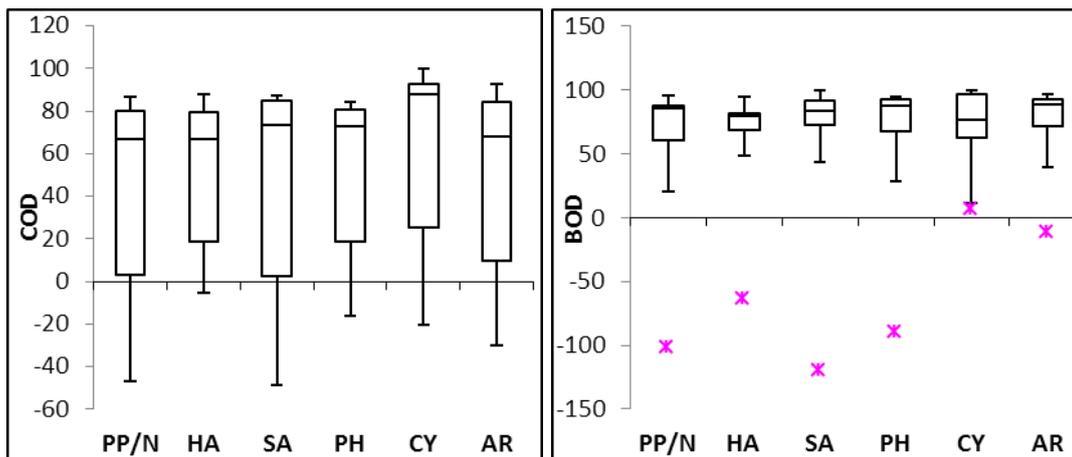


Figura 3.16 Box plot relativi alle percentuali di abbattimento di massa dei vari parametri chimici N tot, N-NH₄, N-NO₃, P tot, P-PO₄, COD, BOD da parte delle sei specie vegetali PP/N, HA, SA, PH, CY, AR

N tot è stato abbattuto tra il 24% e il 78%, N-NH₄ tra l'83% e il 99%, N-NO₃ tra il 5% e il 59%, P tot tra il 65% e il 91%, P-PO₄ tra il 65% e il 91%, COD tra il 67% e l'88%, BOD tra il 77% e l'88% (Figura 3.16).

Risulta evidente come CY sia la specie che presenta la percentuale di abbattimento di massa più alta per ogni parametro chimico, ad eccezione del BOD; questo è di sicuro collegato alla sua grande e rapida crescita.

Per contro la specie che presenta le percentuali di abbattimento di massa più basse è PP (nudo), che come detto in precedenza è la specie che non ha attecchito all'interno della vaschetta; questo mostra come la presenza di vegetazione giochi un ruolo fondamentale nei meccanismi di depurazione.

Il parametro che è stato rimosso più efficacemente da tutte le specie vegetali è stato l'azoto ammoniacale, mentre quello rimosso meno efficacemente è stato l'azoto nitrico; questo mostra, come detto in precedenza parlando in termini di concentrazioni, che una parte dell'azoto è stato trasformato dalla forma ammoniacale a quella nitrica.

3.4 Analisi del refluo all'interno delle vaschette

Alcuni parametri fisici, ossia pH, conducibilità elettrica (EC, mS/cm) e temperatura (T °C), sono stati misurati all'interno di ogni vaschetta contenente le piante per vedere come questi cambino in ciascun livello del sistema di fitodepurazione (figura 3.6)

Si nota come per il pH non ci siano sostanziali differenze tra le vaschette poste ai diversi livelli (tra 8,2 e 8 per PP/N, 8 per HA, 7,9-8 per SA, 7,7-8 per PH, 7,7-7,6 per CY e 7,9-8 per AR) e CY risulta la specie che presenta valori più bassi rispetto alle altre specie.

La conducibilità elettrica presenta lo stesso andamento per tutte le linee, con una diminuzione dell'EC dal livello più alto a quello più basso (da 7,3 mS/cm a 6,5 mS/cm per PP/N, da 7,4 mS/cm a 7 mS/cm per HA, da 7,2 mS/cm a 6,7 mS/cm per SA, da 7 mS/cm a 6,8 mS/cm per PH, da 7,5 mS/cm a 7,3 mS/cm per AR), fatta eccezione per CY che presenta comportamento opposto ed è anche la specie che presenta i valori più alti di salinità (da 7,7 mS/cm a 7,8 mS/cm).

Anche la temperatura, come il pH, non varia di molto all'interno delle vaschette poste su piani diversi, stando sempre intorno ai 17°C.

Ciò che si può facilmente notare è che in CY e AR la temperatura registrata è un po' più bassa rispetto a quella delle altre linee, in conseguenza al fatto che presentavano una quasi totale copertura delle vaschette.



Figura 3.17 Dati di pH, EC e T all'interno delle vaschette contenenti le piante

3.5 Sopravvivenza, produzione e asportazioni della vegetazione

La sopravvivenza delle piante è stata calcolata per ciascuna vaschetta contenente le piante come differenza tra il numero di piante poste in ciascuna vasca all'inizio della sperimentazione e il numero di piante presenti al momento della raccolta della biomassa.

Non è stato possibile calcolare la sopravvivenza di CY e PH (specie stolonifere/rizomatose), in quanto di queste due specie sono stati messi a dimora i rizomi di PH e stoloni di CY e non la pianta completa.

La tabella 3.5 riporta i dati della sopravvivenza delle piante, con la relativa percentuale: PP/N come precedentemente detto non ha attecchito all'interno della vaschetta, quindi di 13 piante messe a dimora inizialmente non ne sono sopravvissute (0%); per HA, di 9 piante messe a dimora ne sono sopravvissute 6 (72%); per SA, di 6 piante messe a dimora ne sono sopravvissute 3 (61%); per AR, di 8 messe a dimora ne sono sopravvissute 7 (89%).

SPECIE	Vaschetta	N° piante/vasca	Piante sopravvissute	% sopravvivenza
PP/N	A	4	0	0
	B	5	0	0
	C	4	0	0
HA	A	4	2	50
	B	3	2	67
	C	2	2	100
SA	A	2	1	50
	B	1	1	100
	C	3	1	33
AR	A	3	3	100
	B	3	2	67
	C	2	2	100

Tabella 3.4 Sopravvivenza delle specie vegetali, riferita a ciascuna vaschetta, con relativa percentuale

PP

HA

SA



a)



b)



c)



Figura 3.18 Le tre specie vegetali poste al lato ovest dell'impianto (PP, HA, SA):
a) Agosto 2013; b) Novembre 2013 visione frontale; c) Novembre 2013 visione dall'alto



Figura 3.19 Le tre specie vegetali poste al lato est dell'impianto (PH, CY, AR): a) Agosto 2013; b) Novembre 2013 visione frontale; c) Novembre 2013 visione dall'alto

Le immagini precedenti mostrano le specie vegetali durante i primi mesi di sperimentazione (Agosto 2013) e durante la raccolta della biomassa (Novembre 2013).

La produzione, per ciascuna specie vegetale, è stata valutata in termini di peso verde della parte aerea della pianta al momento della raccolta della biomassa e in termini di sostanza secca prodotta.

La specie che ha prodotto la maggiore quantità di biomassa aerea è CY (in media 7265 g/m²), seguita da HA (in media 4369 g/m²), AR (in media 2769 g/m²), SA (in media 2469 g/m²), PH (in media 550 g/m²) e PP, la quale, non avendo attecchito, non ha prodotto niente

Le vasche poste sul livello più alto sono quelle che ricevono per prime il refluo ed è quindi più ricco in nutrienti e sostanza organica; questo va a giustificare la maggiore produzione di biomassa nelle vaschette A di CY (10523 g/m²) e AR (3046 g/m²).

Tutte le altre specie presentano valori più elevati in B presumibilmente perché la quantità di nutrienti e sostanza del refluo è troppo elevata rispetto alla loro tolleranza e per questo presentano maggiore produzione nella vaschetta intermedia (5795 g/m² per HA, 4718 g/m² per SA e 851 g/m² per PH), che riceve un refluo più diluito e filtrato dal passaggio nella prima vasca.

Guardato i valori della sostanza secca, CY è sempre la specie che ha prodotto di più; se consideriamo la percentuale le specie hanno prodotto tra il 27% e il 46% di sostanza secca.

Anche un altro studio, effettuato su in un sistema di fitodepurazione a flusso sotto-superficiale orizzontale, ha mostrato la grande capacità di CY di produrre biomassa, con una resa media di 86,3 t/ha di sostanza secca

(sono stati operati 3 sfalci, con una produzione di circa 28,8 t/ha di sostanza secca per ogni sfalcio) (Matos *et al.*, 2010).

SPECIE	Vaschetta	P.V. (g/m ²)	SS (g/m ²)	SS %
PP/N	A	-	-	-
	B	-	-	-
	C	-	-	-
HA	A	4513	1211	27
	B	5795	1481	26
	C	2800	810	29
media		4369	1167	27
SA	A	472	172	36
	B	4718	1131	24
	C	2297	536	23
media		2496	613	28
PH	A	277	99	36
	B	851	240	28
	C	523	177	34
media		550	172	33
CY	A	10523	4504	43
	B	6236	2969	48
	C	5036	2408	48
media		7265	3294	46
AR	A	3046	1096	36
	B	2533	894	35
	C	2728	1001	37
media		2769	997	36

Tabella 3.5 Peso verde (P.V.) e quantità e percentuale di sostanza secca (SS) per le sei specie vegetali, relativamente alle vaschette che le contenevano e valori medi per specie

In tabella 3.6 sono riportati le quantità di N e P, espresse in g/m², in entrata e all'interno della biomassa, per ciascuna specie vegetale e la relativa percentuale di asportazione.

PP non è stata considerata, in quanto unica specie a non avere attecchito; l'asportazione è comunque bassa anche per le altre specie vegetali, compresa tra lo 0,5% e il 6% per l'azoto, e lo 0,7% e l'8% per il fosforo.

CY è la specie che è stata in grado di asportare di più (6,1% di N e 8,3% di P), seguita da AR (3% di N e 4% di P), HA (2% di N e 3% di P), SA (1% di N e 2% di P), PH (0% di N e 1% di P); in generale, osservando le percentuali, tutte le specie hanno asportato maggiormente il fosforo, rispetto all'azoto.

Nello studio su CY precedentemente citato, questa specie è stata in grado di asportare, come cumulata dopo 3 sfalci, 2044 kg/ha di azoto totale (803 kg/ha con il primo sfalcio, 612 kg/ha con il secondo, 629 kg/ha con il terzo), 1688 kg/ha di azoto ammoniacale (740 kg/ha con il primo sfalcio, 460 kg/ha con il secondo, 488 kg/ha con il terzo), 90,6 kg/ha di azoto nitrico (37,3 kg/ha con il primo sfalcio, 19,3 kg/ha con il secondo, 34 kg/ha con il terzo) e 322 kg/ha di fosforo totale (120 kg/ha con il primo sfalcio, 90 kg/ha con il secondo, 112 kg/ha con il terzo) (Matos *et al.*, 2010).

Specie	Quantità in entrata		Quantità biomassa		% asportazione N		% asportazione P	
	N (g/m ²)	P (g/m ²)	N (g/m ²)	P (g/m ²)	rispetto all'IN	rispetto alla Q rimossa	rispetto all'IN	rispetto alla Q rimossa
HA	1396	81,9	31,1	2,3	2,2	5,2	2,7	4,2
SA	1137	66,6	16,6	1,1	1,5	3,0	2,2	2,0
PH	1251	73,3	6,2	0,6	0,5	0,9	0,7	1,1
CY	1264	74,1	77,3	8,5	6,1	7,9	8,3	12,6
AR	1200	70,4	31,7	2,4	2,6	5,0	3,8	4,1

Tabella 3.6 Quantità di azoto (N) e fosforo (P) presenti nel refluo in ingresso, nella biomassa raccolta (g/m²) e le relative % di asportazione per ciascuna specie vegetale HA, SA, PH, CY e AR.

4 CONCLUSIONI

In questo studio sono state valutate le prestazioni di un sistema di fitodepurazione verticale “a cascata” per determinare la sua capacità di depurare un refluo suino, con una salinità elevata.

Come prima cosa era importante capire se le specie scelte per la sperimentazione fossero o meno in grado di tollerare la salinità del refluo, e così è stato, perché tutte le specie vegetali non hanno mostrato segni di stress in seguito all'alimentazione con refluo suino.

Un secondo punto fondamentale era la capacità depurativa del sistema, e quindi l'efficienza nella rimozione dei principali parametri chimici di interesse; il sistema è stato in grado di abbattere efficacemente i parametri chimici: 46% di azoto totale, 91% di azoto ammoniacale, 23% di azoto nitrico, 75% di fosforo totale, 75% di fosforo solubile, 70% di COD e 82% di BOD.

L'azoto nitrico è stato il parametro rimosso di meno, in quanto se ne è sviluppato molto all'interno del sistema, la sua concentrazione è quindi aumentata, facendo registrare un abbattimento più basso rispetto agli altri parametri chimici.

Tra le specie utilizzate, quella che ha dato risultati migliori è stata *Cynodon dactylon* (L.) Pers., che ha dimostrato essere la specie in grado di:

- svilupparsi maggiormente e più in fretta;
- produrre la maggiore quantità di sostanza secca (3294 g/m²);
- asportare le maggiori quantità di azoto e fosforo (77 g/m² di N e 8,5 g/m² di P);

- abbattere la un'elevata quantità dei principali parametri chimici (75% di N tot, 99,2% di N-NH₄, 54,6% di N-NO₃, 89,5% di P tot, 90,4% di P-PO₄, 85,4% di COD, 74,4% di BOD)

Questa specie, però, è stata anche quella che ha avuto il più grande consumo idrico, tanto da non far trovare più refluo in uscita dalla sua linea di depurazione, durante il periodo più caldo; questo ha fatto registrare dei picchi nelle concentrazioni dei parametri e la mancanza di refluo in uscita potrebbe essere un problema nel momento in cui lo scopo del trattamento sia quello di riutilizzare il refluo e non lo scarico zero.

Le altre specie hanno avuto dei risultati meno soddisfacenti rispetto a *Cynodon dactylon* (L.) Pers., con molta probabilità in conseguenza al fatto che la messa a dimora è avvenuta tardi, quando ormai il pieno della stagione vegetativa era passato e con temperature piuttosto elevate; per questo le altre specie hanno impiegato un tempo maggiore a crescere e si sono mostrate meno efficienti.

La specie che ha avuto i maggiori problemi in conseguenza al trapianto tardivo è stata *Puccinellia palustris* (Seen.) Hayek, che non è riuscita ad attecchire all'interno della vaschetta, probabilmente perché il substrato utilizzato era diverso rispetto a quelli in cui è abituata a vivere.

Questa specie, collocata in sistemi di fitodepurazione flottanti per il trattamento della frazione liquida del digestato derivante dalla produzione di biogas (Pavan, 2014) si era dimostrata una delle specie con sopravvivenza più alta, maggiore capacità di produrre biomassa e asportare azoto e fosforo.

Sulla base di questo studio, infatti, essa è stata una tra le specie vegetali a dare i risultati più soddisfacenti: peso verde massimo di 4164 g/m², e asportazione di N di circa 15 g/m² e di fosforo di circa 2 g/m².

Essa presenta quindi delle buone potenzialità per accrescersi in condizioni di elevata salinità, elevato carico organico e bassa ossigenazione.

Nonostante non abbia attecchito, la sua linea di depurazione ha mostrato una rimozione di tutti i parametri, ad eccezione dell'azoto nitrico; ciò sta a significare che il solo substrato svolge un'azione di depurazione, fornendo comunque un supporto per l'instaurarsi di una biomassa microbica, una dei maggiori responsabili dei meccanismi di depurazione all'interno dei sistemi di fitodepurazione.

Per il futuro si potrebbe valutare l'effettiva salinità che le specie utilizzate sono in grado di tollerare, in modo da ridurre o eliminare la diluizione del refluo e risparmiare i volumi di acqua utilizzati per questo scopo.

In particolare per *Cynodon dactylon* (L.) Pers. si può pensare l'utilizzo in sistemi più ampi, visto i buoni risultati ottenuti e il fatto che verso fine periodo di sperimentazione si è sviluppata talmente tanto da andare a rompere la vaschetta nella quale era posta; con molta probabilità lasciando a questa specie spazio per crescere di più si otterrebbero dei risultati ancora migliori soprattutto per quanto riguarda l'asportazione di azoto e fosforo con la biomassa, considerando anche l'eventualità di operare degli sfalci regolari, grazie alla sua grande capacità di svilupparsi in breve tempo.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

Allen R. G., Pereira L. S., Raes D. e Smith M. 1998. Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and drainage paper 56

Bocchi S., Tano F. e Vescovi F.D.. 1998. Influenza di letame, liquame e cruschello suini su alcuni parametri chimici del terreno. In "Rivista di Agronomia" (32), pp. 259-263

Borin M. 1999. Introduzione all'ecologia del sistema agricoltura, Padova: CLEUP

Carraro M. 2012. Valutazioni di specie vegetali potenzialmente idonee per la fitodepurazione. Relatore Borin M. Dipartimento di Agronomia, Animali, Alimenti, Risorse Naturali e Ambiente, Università degli Studi di Padova, Legnaro

Chiumenti R. 2000. Costruzioni rurali, Bologna: Edagricole – Edizioni Agricole della Calderini

Commissione Europea, Direzione generale per l'ambiente. 2010. La direttiva Nitrati dell'UE

Cronk J. K.. 1996. Constructed wetlands to treat wastewater from dairy and swine operation: a review. In "Agriculture, Ecosystems and Environment" (58), pp. 97-114

Defrancesco E. 2007. La filiera delle carni suine del Veneto. Pubblicazione di Veneto Agricoltura, pp. 68-86

Hatfield J. C., Brumm M. C., Melvin S. W. 1993. Swine manure management. Agricultural utilization of municipal, animal and industrial waste. Washington DC, USDA-ARS. Pp. 40-57.

ISTAT. 2003. Strutture e produzioni delle aziende agricole

Lee C-G., Fletcher T. D. e Sun G. 2009. Nitrogen removal in constructed wetland systems. In “Engineering in Life Sciences 9” (1), pp. 11-22

Matos A. T., Freitas W. S., Martinez M. A., Tótola M. R. e Azevedo A. A. 2010. Tifton grass yield on constructed wetland used for swine wastewater treatment. In “Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental” v.14, n.5, p.510–516

Pignatti S. 1982. Flora d'Italia, Bologna: Edagricole

Pavan F., Breschigliaro S. e Borin M. 2014. Screening of 18 species for digestate phytodepuration. In “Environment Science and Pollution Research”, doi: 10.1007/s11356-014-3247-3

Salvati S., Alessi R. e Licopodio E. 2005. L'inquinamento da nitrati di origine agricola nelle acque interne in Italia. APAT, Rapporti 50/2005. ISBN: 88-448-0153-1

Saggar S., Bolan N. S., Bhandral R., Hedley C. B. e Luo J. 2004. A review of emissions of methane, ammonia, and nitrous oxide from animal excreta deposition and farm effluent application in grazed pastures. In “New Zealand Journal of Agricultural Research” (47:4), pp. 513-544, doi: 10.1080/00288233.2004.9513618

Tamiazzo J. 2014. Report progetto Ager-Seespig

Tyson T. W. 1996. Constructed wetlands for animal waste treatment. Circular ANR-965, Alabama Cooperative Extension System, Auburn and Alabama A&M Universities

- 2011. Decisione 2011/721/UE. Deroga alla Direttiva Nitrati. Gazzetta ufficiale dell'Unione Europea L 287/36, 4 Novembre