



fondazione
cariplo



Consorzio Parco Lombardo
della Valle del Ticino

GLI ECOSISTEMI FILTRO IN AREE PROTETTE: INDIRIZZI PROGETTUALI



G · R · A · I · A



GESTIONE E RICERCA AMBIENTALE
ITTICA ACQUE



**fondazione
cariplo**

Progetto finanziato dalla Fondazione Cariplo nell'ambito del Bando Cariplo 2006 "Gestione sostenibile delle acque: promuovere forme di gestione integrata e partecipata delle acque superficiali"

PROPONENTE DEL PROGETTO

Consorzio Parco Lombardo della Valle del Ticino



PARTNERS DEL PROGETTO

Comune di Vigevano



ASM Vigevano e Lomellina S.p.A.



GRAIA srl

G · R · A · I · A



Associazione di Irrigazione EST-SESIA



CIRF - Centro Italiano per la Riqualficazione Fluviale



REALIZZAZIONE TESTO E PROGETTO GRAFICO

GRAIA srl

G · R · A · I · A



INDICE

1	Premessa	3
2	Gli ambienti umidi naturali	6
2.1	Piccoli ambienti umidi	7
2.2	Microrganismi	8
2.2.1	<i>I batteri</i>	9
2.2.2	<i>Il fitoplancton</i>	9
2.2.3	<i>Lo zooplancton</i>	11
2.3	La flora	12
2.3.1	<i>Idrofite emergenti</i>	12
2.3.2	<i>Idrofite galleggianti</i>	13
2.3.3	<i>Idrofite sommerse</i>	14
2.4	La fauna	15
3	Gli ecosistemi filtro	19
3.1	Principi generali	19
3.2	Normativa di riferimento	20
3.3	Valenza naturalistica paesaggistica e ricreativa	22
3.4	Campi di applicazione	24
3.5	I meccanismi di rimozione degli inquinanti	25
3.6	Trattamento degli scarichi	29
3.6.1	<i>Tipologie impiantistiche</i>	29
3.6.2	<i>Sistemi a flusso superficiale</i>	31
3.6.3	<i>Sistemi a flusso sub-superficiale</i>	32
3.6.4	<i>Criteri di progettazione di un sistema integrato</i>	36
3.6.5	<i>Costi di realizzazione</i>	38
4	Esempi applicativi	40
4.1	L'esperienza di Vizzola Ticino	41
4.1.1	<i>Specifiche progettuali del sistema di fitodepurazione impiegato</i>	43
4.1.2	<i>Documentazione fotografica della realizzazione ed evoluzione dell'impianto</i>	46
4.2	La gestione	50
4.2.1	<i>Le aree esterne agli impianti</i>	51
4.2.2	<i>L'area dei trattamenti primari</i>	51
4.2.3	<i>Il sistema a flusso sub-superficiale orizzontale</i>	52
4.2.4	<i>Il sistema a flusso sub-superficiale verticale</i>	52
4.2.5	<i>Il laghetto finale di affinamento</i>	53
4.2.6	<i>Costi di gestione</i>	54
5	Letteratura consultata	55

1 PREMESSA

La Carta Europea dell'Acqua, approvata dal Consiglio d'Europa nel maggio 1968, enuncia i principi fondamentali per la tutela e l'uso ecosostenibile di questo bene prezioso, validi e attuali oggi come allora:

- Non c'è vita senza acqua. L'acqua è un bene prezioso, indispensabile a tutte le attività umane.
- Le disponibilità di acqua dolce non sono inesauribili. E' indispensabile preservarle, controllarle e, se possibile, accrescerle.
- Alterare la qualità dell'acqua significa nuocere alla vita dell'uomo e degli altri esseri viventi che da essa dipendono.
- La qualità dell'acqua deve essere tale da soddisfare le esigenze delle utilizzazioni previste; ma, in particolare, deve soddisfare le esigenze della salute pubblica.
- Quando l'acqua, dopo essere stata utilizzata, viene restituita al suo ambiente naturale, essa non deve compromettere i possibili usi, tanto pubblici che privati, che di questo ambiente potranno essere fatti.
- La conservazione di un manto vegetale, di preferenza forestale, è essenziale per la salvaguardia delle risorse idriche.
- Le risorse idriche devono formare oggetto di un inventario.
- La buona gestione dell'acqua deve formare oggetto di un piano stabilito dalle autorità competenti.
- La salvaguardia dell'acqua implica un notevole sforzo di ricerca scientifica, di formazione di specialisti e di informazione del pubblico.
- L'acqua è un patrimonio comune il cui valore deve essere riconosciuto da tutti. Ciascuno ha il dovere di economizzarla e di utilizzarla con cura.
- La gestione delle risorse idriche deve essere inquadrata nel bacino naturale, piuttosto che entro frontiere amministrative e politiche.
- L'acqua non ha frontiere. Essa è una risorsa comune che necessita di una cooperazione internazionale.

La salvaguardia delle acque dolci superficiali riveste una delle principali sfide odierne: alla notevole ricchezza naturalistica e ambientale a cui dà vita questa preziosa risorsa, è contrapposta una drammatica pressione antropica dovuta al suo indispensabile utilizzo e all'elevato rischio di contaminazione, quale recettrice finale di fonti di inquinamento puntuali e diffuse provenienti dal territorio circostante all'interno del bacino idrografico.

A sostenere e spronare la realizzazione di interventi di salvaguardia dell'ambiente e nello specifico di tutela dell'integrità della risorsa idrica, in Regione Lombardia, grande contributo viene dato dalla Fondazione Cariplo.

La Fondazione Cariplo rappresenta la continuazione storica della Cassa di Risparmio delle Provincie Lombarde, istituita a Milano il 12 giugno 1823. Sin dagli inizi, la Cassa di Risparmio ha operato al servizio dell'economia del territorio e ha sostenuto la crescita sociale e culturale della comunità lombarda, conformando la propria attività ai principi di autorganizzazione e di sussidiarietà. Nell'ambito delle proprie attività la Fondazione propone dunque, bandi con

l'obiettivo di sostenere iniziative a favore della comunità non solo nel settore ambientale, ma anche nei settori arte e cultura, ricerca scientifica e tecnologica, e servizi alla persona.

L'attività specifica della Fondazione come istituzione che sostiene lo sviluppo delle realtà territoriali, riguarda il supporto a progetti e organizzazioni capaci di rispondere alle esigenze della collettività, evitando modelli tradizionali e desueti.

La finalità principale del presente lavoro è quello di costituire una guida per la progettazione di ecosistemi filtro in ambiti territoriali di particolare pregio, quali le realtà dei parchi. La realizzazione di tali sistemi, adattandosi e inserendosi in modo naturale in contesti anche di pregio ambientale, rappresentano, non solo una soluzione valida e ormai ampiamente consolidata da numerose esperienze internazionali e nazionali per l'affinamento di acque che presentano un carico inquinante residuo (acque di scarico di depuratori civili ed industriali, acque di dilavamento superficiale di aree urbane ed agricole, etc.), ma offrono inoltre un'occasione di grande interesse scientifico poiché realizzano veri e propri habitat e ambienti acquatici assolvendo a tutte le molteplici funzioni che caratterizzano gli ecosistemi acquatici e palustri in particolare: siti di sosta e rifugio per l'avifauna migratoria, habitat colonizzabili dalle numerose e preziose comunità di anfibi (molte delle quali oggetto di tutela a livello europeo) oltre che da altre biocenosi locali legate agli ambienti acquatici e palustri.

Nell'ambito delle diverse applicazioni e situazioni di impiego, gli ecosistemi filtro possono venir localizzati a valle di impianti di depurazione prima del recapito finale delle acque nei corsi idrici recettori; passando attraverso tali sistemi le acque vengono filtrate e affinate attraverso le diverse componenti (dal substrato, alla vegetazione, alla comunità batteriche) che partecipano, in diverso modo, a svolgere un'ulteriore rimozione del carico inquinante ancora presente nelle acque di scarico (affinamento). Nonostante, il rispetto dei limiti di legge, i sistemi di trattamento tradizionali di depurazione mantengono, livelli di inquinamento residuo spesso non idonei comunque all'ottenimento di elevati livelli di qualità nei corpi idrici recettori (es. nitrati, fosfati, colibatteri).

Anche l'inquinamento di tipo diffuso veicolato dalla rete idrografica minore (rogge e fossi di scolo agricoli) oppure proveniente dal dilavamento superficiale può essere ridotto attraverso la realizzazione di ecosistemi filtro, mediante la sistemazione, il modellamento e la diversificazione degli alvei dei canali irrigui, oppure mediante la realizzazione di bacini naturaliformi colonizzati dalla tipica vegetazione acquatica (idrofiti).

Grandi protagoniste e componenti fondamentali di un ecosistema filtro sono le **idrofiti**: esse possono essere emergenti, sommerse o galleggianti, diversificando così le sponde e l'ambiente palustre. In tale caso il carico organico presente nelle acque viene trasformato in nutrienti e successivamente in biomassa vegetale, tramite assimilazione a livello radicale. Di seguito si riportano alcune immagini delle principali macrofite acquatiche fitodepuranti; le prime specie riportate (*Phragmites sp.* e *Typha sp.*) sono le più importanti specie impiegate nei sistemi di fitodepurazione per le elevate efficienze depurative; le idrofite sommerse hanno importanti funzioni di ossigenazione delle acque, mentre le altre specie, oltre alle funzioni di depurazione, contribuiscono a diversificare l'ambiente acquatico, arricchendolo inoltre di fioriture variopinte.



Phragmites australis



Typha latifolia



Iris pseudoacorus



Nymphaea alba



Nymphoides peltata

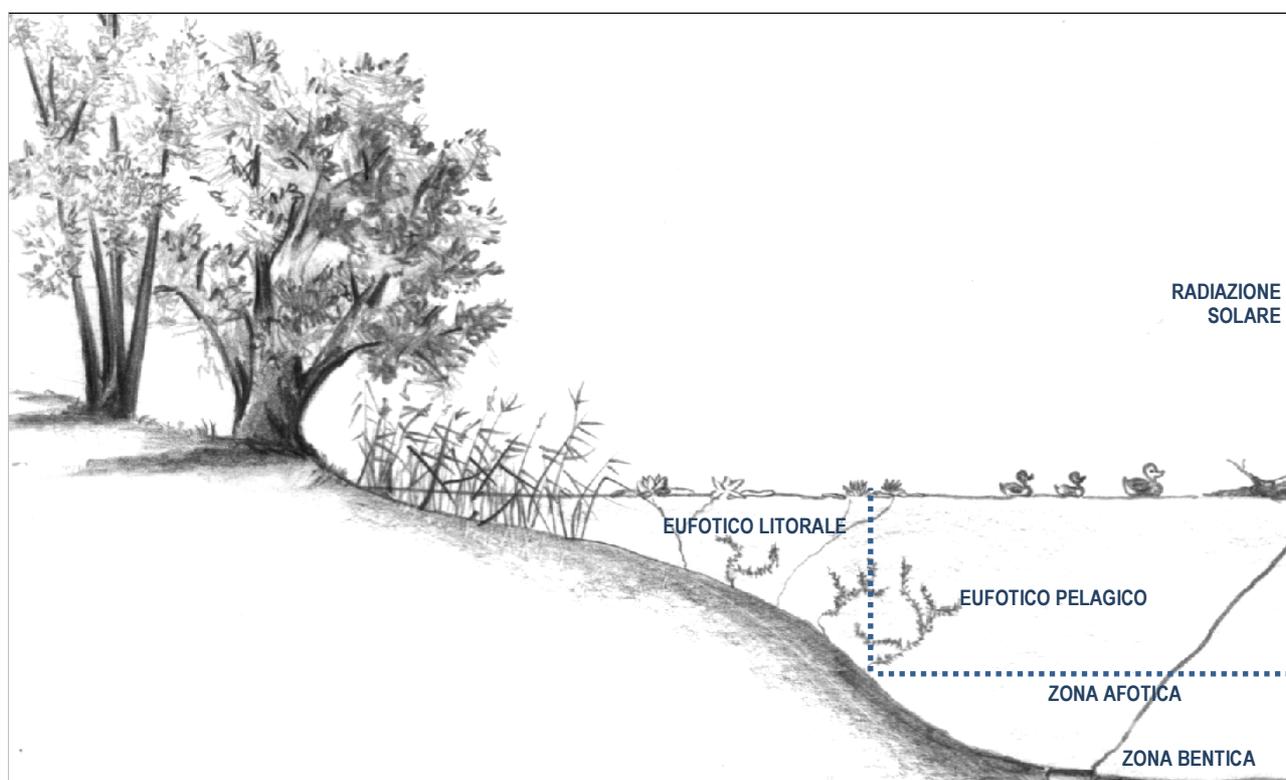


idrofitte sommerse

2 GLI AMBIENTI UMIDI NATURALI

Gli ambienti umidi naturali possono essere considerati tra gli ecosistemi più complessi, oltre che non omogenei in tutte le loro parti. In essi, infatti, le comunità biologiche, attraverso interazioni con le componenti chimiche e fisiche dell'ambiente, assumono differenti configurazioni e funzioni nelle differenti zone dello specchio d'acqua.

A grandi linee, in un ambiente lacustre si possono fondamentalmente riconoscere: una **zona litorale** e una **zona pelagica** (vedi immagine seguente). Quest'ultima può essere a sua volta suddivisa in uno **strato eufotico** (strato d'acqua superficiale nel quale si ha la penetrazione della radiazione luminosa) ed uno **strato afotico** (sottostante al precedente, non interessato dalla luce). Infine, la **zona bentonica** è quella a diretto contatto col fondo. A causa delle profonde differenze ambientali che le caratterizzano (principalmente differenze di illuminazione), queste zone ospitano comunità biologiche diverse tra loro ed altamente specializzate.



Profilo di un lago e identificazione delle zone in cui si suddivide

Nello strato eufotico sono comprese, sia la zona litorale che quella pelagica. La zona litorale si sviluppa lungo le rive lacustri ed è delimitata al largo dalla medesima profondità cui arriva lo strato eufotico. In questa zona si insediano diverse tipologie di piante, da quelle emergenti fino alle piante acquatiche sommerse che possono costituire una vera e propria fascia lungo la costa. Al largo della zona litorale si trova la zona pelagica, che si estende su tutta la restante superficie del lago con uno spessore uguale a quello dello strato eufotico.

In laghi sufficientemente profondi, in cui la radiazione solare non giunge sino alle massime profondità, abbiamo poi una zona afotica dalla quale è esclusa la vita vegetale.

2.1 Piccoli ambienti umidi

Una delle caratteristiche peculiari propria di ambienti umidi naturali di limitata estensione è legata soprattutto alla profondità dell'acqua che risulta mediamente bassa determinando importanti fluttuazioni dei livelli idrici nell'arco dell'anno, fino a essere anche occasionalmente asciutti. La limitata profondità dell'acqua risulta forse l'elemento che più incide sulla dinamica di tali ambienti andando dunque a caratterizzarne in modo distintivo e peculiare la fisionomia e, a livello globale, l'assetto ecosistemico che li contraddistingue.

Le dinamiche idrologiche portano all'identificazione e alla definizione di diverse tipologie di ambiente umido. A seconda delle dimensioni e della profondità del bacino, si distinguono, per esempio, gli **stagni** (battenti idrici superiori al metro e fino a 3-5 metri), le **paludi** (battenti idrici oscillanti tra mezzo metro e un metro) e le **pozze** (battenti idrici che raggiungono al massimo 50 cm).



Palude Pollini (Varese)



Torbiera Lago di Ganna (Varese)

In questi piccoli ambienti, l'acqua ricopre la superficie del terreno per gran parte dell'anno determinando una prolungata saturazione del substrato che dunque risulta in genere asfittico. La povertà e/o la mancanza di ossigeno creano delle condizioni che rendono possibile l'insediamento di **specie vegetali** specificatamente adattate a tollerare tali condizioni di asfissia.

La varietà di habitat a cui partecipa tutta la componente vegetale contribuisce a realizzare un ambiente ricco che a sua volta è in grado di accogliere e ospitare una **varietà di fauna**, stanziale e di passo.

Da un punto di vista della dinamica interna dell'acqua, la presenza di ridotti battenti idrici comporta una **limitata o assente stratificazione termica** che sovente, favorisce il rimescolamento completo degli strati più superficiali dell'acqua con quelli più profondi, e quindi la distribuzione dei nutrienti lungo l'intera colonna d'acqua. La messa in sospensione del materiale depositato, soprattutto in presenza di acque molto basse, avviene anche con venti deboli, con effetti sulla trasparenza e dunque sull'attività fotosintetica anche di tutto il bacino.

Data l'assenza di stratificazione termica, il regime termico delle acque segue in genere quello dell'aria, con temperature che presentano circa 1-2 gradi in meno rispetto a quelle atmosferiche. Le profondità mediamente basse delle acque rendono inoltre trascurabili le possibilità di immagazzinamento del calore per irraggiamento durante le ore più calde del giorno con escursioni termiche marcate, sia giornaliere che stagionali. In presenza di bacini

piccoli aventi acque particolarmente basse, si alternano dunque, gelate invernali a periodi di forte riscaldamento estivo con temperature che possono oltrepassare i 30°C, con conseguenze sulla possibilità di vita degli organismi che, in simili situazioni, devono presentare adattamenti specifici.

Un altro aspetto importante riguarda il **chimismo** delle acque. Negli ambienti alimentati solo da acque piovane, ad esempio, si osserva in genere una minore concentrazione di sali. Tuttavia, l'apporto di sostanza organica, l'accumulo di materiale vegetale in decomposizione e l'abbassamento dei livelli idrici (ad es. nel periodo estivo) concorrono ad aumentare la quantità di **sali disciolti**. I sali disciolti di fosforo e di azoto, assimilati a livello radicale dalle idrofite, generano diverse condizioni di trofia: si parla di bacini **oligotrofi**, in presenza di ridotti contenuti di sali disciolti, passando da bacini **mesotrofi** a **eutrofi**, che in genere sono anche ricchi di sostanza organica (spesso colonizzati da specie vegetali nitrofile), fino ad arrivare a condizioni di **distrofia** degli stagni umici.

Il **pH** può essere soggetto a variazioni anche importanti a causa delle fioriture algali e della crescita delle macrofite che comportano un aumento dei valori, dunque pH alcalini, talvolta superiori a 8-9 unità. Negli ambienti torbidi con scarsa vegetazione, il pH è in genere prossimo alla neutralità o lievemente acido, mentre negli ambienti umidi di montagna, con sfagni, o a causa delle ormai note piogge acide, il pH si abbassa fino a valori prossimi al 4.

Infine, un ultimo parametro importante che condiziona gli organismi viventi è la concentrazione di **ossigeno disciolto**. Come noto i processi di decomposizione consumano l'ossigeno mentre i processi di fotosintesi lo producono. La temperatura dell'acqua agisce in modo inversamente proporzionale sulle concentrazioni che possono presentare oscillazioni marcate sia giornaliere che stagionali. In genere i valori più bassi si osservano in prossimità del fondo dove avvengono i processi di decomposizione e la sostanza organica si accumula, mentre aumentano nella fascia superficiale, a contatto con l'aria.

Tutti questi parametri condizionano la vita degli "abitanti" di questi ambienti, che a loro volta, influenzano e sono motivo anche di variazioni e alterazioni dei parametri stessi, come appena descritto. Di seguito vengono approfondite le conoscenze delle biocenosi che animano e contribuiscono a dar vita agli ambienti umidi.

2.2 *Microrganismi*

I microscopici abitanti che popolano le raccolte d'acqua possono essere raggruppati nella grande categoria dei **microrganismi**. Anche se spesso invisibili ai nostri occhi, la loro presenza e le loro attività vitali risultano indispensabili per lo svolgimento di alcuni processi biologici di grande importanza che avvengono negli ambienti acquatici.

Tra gli organismi più piccoli troviamo i **batteri**, che svolgono l'importante ruolo di demolire la sostanza organica rendendone nuovamente disponibili i costituenti minerali e di riciclare il carbonio organico disciolto nell'acqua, altrimenti sottratto all'ecosistema. **Il fitoplancton**, di cui fanno parte le alghe, è in grado di sintetizzare, mediante il processo di fotosintesi, la sostanza organica che serve al funzionamento di tutta la catena alimentare. Lo **zooplancton** è costituito da rappresentanti di moltissimi gruppi animali che nel complesso consentono di veicolare la sostanza organica prodotta dal fitoplancton e dai batteri verso i livelli trofici superiori (pesci). Inoltre, molti organismi zooplanctonici, come ad esempio le daphnie o pulci d'acqua (piccoli crostacei), nutrendosi delle alghe ne controllano lo sviluppo, contribuendo a mantenere l'acqua limpida.

I batteri, i minuscoli organismi vegetali (fitoplancton) e animali (zooplancton) che vivono liberi nella colonna d'acqua e che troviamo in tutti gli ambienti lentici fanno dunque parte del plancton. Il plancton solitamente viene suddiviso in diverse categorie dimensionali (comprese tra 0,2 μm e maggiori di 2 mm) alle quali spesso corrispondono anche caratteristiche funzionali differenti. In generale si distinguono organismi autotrofi ed eterotrofi a seconda che siano in grado o meno di sintetizzare sostanza organica da composti inorganici. Nel primo gruppo rientrano i cianobatteri e le alghe mentre tra gli eterotrofi si trovano i batteri, lo zooplancton e gli altri organismi animali.

2.2.1 I BATTERI

I batteri sono costituiti da organismi di piccole dimensioni che variano normalmente tra 0,2 e 2 μm . Non esiste quasi substrato organico che non possa essere utilizzato dai batteri. Essi fanno parte degli organismi eterotrofi e entrano in gioco nella fase finale della decomposizione della materia; i processi metabolici che compiono, principalmente la **respirazione aerobica** e la **respirazione anaerobica**, permettono la trasformazione delle sostanze organiche in ossigeno, ossido di carbonio ed elementi minerali.

La grande varietà di batteri specializzati garantisce la trasformazione di ogni composto organico naturale; i prodotti residui vengono spesso utilizzati da altri batteri fino a terminare con la completa mineralizzazione della sostanza di partenza.

In un ambiente acquatico, la sostanza organica presente e che si accumula sul fondo comporta lo sviluppo di batteri con un conseguente consumo di ossigeno che, negli strati più profondi tende a mancare. Nelle zone di fondale si insediano dunque batteri anaerobi e i processi di decomposizione prevalenti sono le fermentazioni. Una volta ridotte le sostanze e in presenza di ossigeno si sviluppano i batteri aerobi che provvedono all'ossidazione delle sostanze e dunque alla loro completa mineralizzazione.

La velocità con cui avvengono questi processi dipende da molti fattori. Ad esempio, le acque in movimento assorbono più ossigeno di quelle stagnanti, nell'acqua bassa l'ossigeno disciolto arriva più rapidamente al fondo e questo facilita i processi di ossidazione.

Quanto appena descritto dice di una capacità molto importante di un ambiente acquatico, che dipende principalmente dall'attività batterica e che viene espressa come **autodepurazione**.

2.2.2 IL FITOPLANCTON

Il fitoplancton è l'insieme di tutti gli organismi microscopici autotrofi, unicellulari o coloniali, di dimensioni comprese tra 2 e 200 μm che vivono in sospensione, trasportati passivamente dai movimenti delle acque. In questa categoria sono inclusi anche i cianobatteri che nonostante siano stati classificati come alghe azzurre per la presenza di *clorofilla a* oltre che di alcune xantofille e della ficocianina, da cui derivava il nome, sono in realtà degli organismi unicellulari procarioti come i batteri.

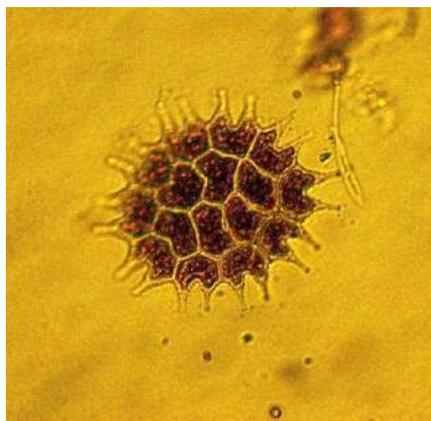
Il fitoplancton comprende numerosissime specie che si differenziano per dimensione, morfologia, fisiologia ed ecologia. Nel plancton lacustre i principali gruppi algali sono rappresentati da cianobatteri, clorofite (alghe verdi), bacillariofite (diatomee), dinofite e crisofite (alghe brune). La maggior parte di essi si trova libera nelle acque ma alcuni gruppi, fra cui le diatomee, vivono anche nel sedimento, sulla biomassa vegetale che si deposita sul fondale, sulla patina che copre i sassi (periphyton), tra i fiocchi cotonosi delle alghe e sugli apparati delle macrofite (vedi immagini riportate di seguito).

Gli organismi fitoplanctonici sono foto autotrofi e necessitano della presenza della luce per sopravvivere. Per tale motivo si distribuiscono nella zona eufotica, sia litorale che pelagica dei

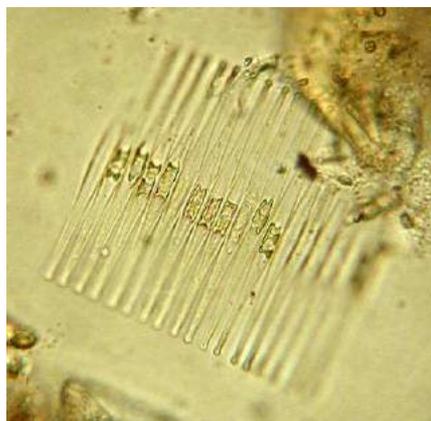
corpi idrici a profondità differenti a seconda dell'adattamento di ogni singolo gruppo alle diversa intensità luminosa e alla temperatura.

Negli ecosistemi acquatici le comunità fitoplanctoniche d'acqua dolce si trovano alla base della catena alimentare ricoprendo un ruolo fondamentale nella produzione primaria. Sintetizzando sostanza organica, il fitoplancton, garantisce il flusso di materia ed energia necessario per il mantenimento degli organismi eterotrofi, che si nutrono a spese di sostanze organiche già elaborate da altri organismi. Inoltre, il fitoplancton costituisce la principale fonte di cibo dello zooplancton erbivoro, il quale a sua volta è attivamente predato dallo zooplancton carnivoro e da pesci planctivori, questi ultimi, a loro volta, preda dei grandi piscivori. La pressione predatoria esercitata dallo zooplancton, nota come grazing, è estremamente selettiva nei confronti delle alghe di piccole dimensioni e ne costituisce un importante fattore di controllo.

La composizione (tipo di alghe presenti) e l'abbondanza del fitoplancton è regolata da numerosi fattori fra cui le condizioni idrologiche, la temperatura, la turbolenza delle acque e in particolare la concentrazione dei nutrienti (fosforo e azoto). Se le condizioni ambientali sono particolarmente favorevoli possono verificarsi delle fioriture o "bloom" algali, che consistono nella eccessiva proliferazione di una determinata specie algale, che in pochi giorni raggiunge densità così elevate da diventare l'elemento dominante di tutta la comunità. In queste occasioni la superficie dell'acqua tende ad assumere una intensa colorazione, che a seconda della specie coinvolta, può essere rossa, verde o bruna. In genere questo fenomeno si osserva nei laghi ad elevata trofia ricchi di nutrienti algali, ma se si verificano determinate condizioni può manifestarsi anche in ambienti oligotrofi.



Pediatrum boryanum



Fragilaria crotonensis



Euastrum didelta



Dinobryon sp



Peridinium sp



Staurastrum fucigerum

2.2.3 LO ZOOPLANCTON

Gli organismi zooplanctonici comprendono tutti gli organismi animali (eterotrofi) che vivono liberamente nelle acque, la cui capacità di muoversi non è sufficiente per rendersi indipendenti dai movimenti dell'acqua. I gruppi più frequenti nello zooplancton delle acque dolci sono: i Protozoi, i Rotiferi e i piccoli crostacei. I Protozoi sono organismi unicellulari di piccolissime dimensioni (da poche decine a centinaia di micron) che si spostano per mezzo di ciglia o flagelli, producendo movimenti impercettibili nella massa d'acqua. Si nutrono principalmente di batteri consentendo di trasformare la materia organica disciolta, quella assunta solo dai batteri, in cibo predabile anche dai zooplanctonti di maggiori dimensioni. I Rotiferi sono animali pluricellulari di dimensioni inferiori al millimetro. Il loro nome è dovuto alla presenza di una corona di "cilia" attorno alla bocca che muovendosi vorticosamente consente di aspirare il cibo (alghe, protozoi, batteri, e detrito) e di effettuare dei piccoli spostamenti. I rotiferi più diffusi nelle acque dolci appartengono ai generi *Keratella*, *Kellicottia*, *Asplanchna*, *Polyarthra*.

I Crostacei planctonici, sono invece formati da due gruppi principali, i Cladoceri e i Copepodi, che costituiscono i consumatori primari più importanti. Il tipico rappresentante dei Cladoceri è la *Daphnia* meglio nota come pulce d'acqua, per il rapido movimento a scatti provocato dal moto delle due lunghe antenne che adornano il capo. I Copepodi sono costituiti dai Calanoidi (*Diaptomus*) e dai Ciclopoidi (*Cyclops*). I primi sono generalmente fitofagi per tutto il corso della loro vita mentre i secondi da adulti diventano predatori. Spesso vivacemente colorati di rosso, giallo o bruno, a volte trasparenti sono frequenti ed abbondanti negli stagni e nelle pozze d'acqua.

La gran parte dello zooplancton si nutre di batteri e di fitoplancton, controllando dunque lo sviluppo delle comunità batteriche e delle alghe; alcuni gruppi si nutrono dello stesso zooplancton. Il grado di filtrazione effettuato dallo zooplancton dipende dalla temperatura ed è ad essa proporzionale fino a circa 20°-25°. Lo zooplancton, inoltre, assume un ruolo fondamentale nel veicolare la sostanza organica prodotta dal fitoplancton e dai batteri verso i livelli trofici superiori (pesci) e nel riciclo dei nutrienti algali.



Copepoditi di Ciclopoidi



Daphnia hyalina



Bosmina longirostris



Keratella quadrata



Daphnia sp.

2.3 La flora

Sono numerose le specie vegetali che colonizzano gli ambienti umidi. Una macro distinzione, in base alla disponibilità idrica nel terreno, individua specie tipicamente **idrofile**, che raggruppa le specie tipicamente acquatiche, specie **igrofile**, piante terrestri che vegetano bene in ambienti permanentemente umidi, fino a specie **mesofile** (erbacee, arbustive e arboree) che normalmente rivestono le fasce riparie e che in genere presentano terreni freschi ben approvvigionati d'acqua (ma non saturi), grazie alla prossimità all'ambiente acquatico.

A selezionare i gruppi di vegetazione, influiscono anche altri parametri ecologici, quali la permanenza e la velocità della corrente; la temperatura, ad esempio, è un altro parametro importante, dato che poche piante riescono a tollerare prolungate coperture di neve e ghiaccio mentre poche altre sono in grado di reggere un elevato riscaldamento dell'acqua. Altra selezione dipende dalla chimica delle acque, dunque dal pH e dal livello trofico.

Date le finalità del lavoro, particolare attenzione è rivolta alle specie idrofile, dunque alle piante acquatiche, che vengono qui distinte ulteriormente in tre gruppi "funzionali", in relazione alla presenza di parti aeree e al tipo di radicamento nel substrato. Verranno pertanto distinte le piante acquatiche in idrofite emergenti, idrofite galleggianti e idrofite sommerse.

La maggior parte delle idrofite riveste un ruolo fondamentale nello svolgimento dell'attività autodepurativa che caratterizza gli ecosistemi acquatici naturali; la suddivisione in gruppi funzionali intende evidenziare le caratteristiche specifiche della vegetazione acquatica in relazione alla loro capacità depurativa. Inoltre, le piante di questi ambienti, non solo hanno un ruolo attivo e indispensabile in tali processi, ma la loro presenza costituisce habitat e supporto per l'insediamento delle popolazioni batteriche che collaborano enormemente ai processi di degradazione della sostanza organica, come descritto in precedenza.

2.3.1 IDROFITE EMERGENTI

Le idrofite emergenti sono piante radicate al substrato e sono costituite da gambi, foglie e apparati riproduttivi aerei. Esse sono in genere perenni e dotate di un'estesa rete di radici di tipo rizomatoso (rizofite).

Le idrofite emergenti sono piante originariamente terrestri che hanno sviluppato buone capacità di sopravvivenza in ambienti acquatici o comunque su substrati saturi d'acqua. Pertanto, come le piante di habitat terrestri, sintetizzano in composti organici il carbonio atmosferico e i nutrienti assunti attraverso il proprio apparato radicale. A differenza delle specie terrestri le specie acquatiche possiedono un sistema di vuoti di volume pari al 50-70%

dell'intera pianta (detto aerenchima) attraverso il quale provvedono al trasporto dell'ossigeno atmosferico fino al livello delle radici e dei rizomi, tramite il quale creano le condizioni aerobiche nella rizosfera in cui avvengono i processi ossidativi ad opera dei batteri aerobi adesi agli apparati radicali. Al di fuori di tale zona ossidata, l'ambiente di fondale tende ad essere anossico, favorendo l'attività di popolazioni batteriche facoltative e/o anaerobiche.

Tra i più comuni generi si ricordano ad esempio *Eleocharis*, *Scirpus* e *Schoenoplectus* (fam. Cyperaceae), *Glyceria*, *Phragmites* e *Zizania* (fam. Graminaceae) e *Typha* (fam. Typhaceae).

Le idrofite emergenti particolarmente efficienti nei processi di depurazione appartengono ai generi *Phragmites*, *Scirpus* e *Typha*. Oltre a queste ci sono anche altre macrofite di particolare bellezza per le vistose fioriture che tingono le rive degli specchi d'acqua nel periodo primaverile ed estivo; tra di esse, il Giaggiolo (*Iris pseudoacorus*) e la Salcerella (*Lytrum salicaria*), specie che si osservano comunemente tra i canneti.



Phragmites australis



Typha latifolia



Iris pseudoacorus

2.3.2 IDROFITE GALLEGGIANTI

Negli ambienti lentici, l'assenza di acque turbolente, rende possibile la presenza e la crescita di vegetazione galleggiante.

In questa categoria sono comprese idrofite che vivono radicate nel substrato con acque la cui altezza è compresa tra 25 e 350 cm. Si caratterizzano per avere foglie galleggianti ed organi riproduttivi aerei o galleggianti. Alcune sono rizomatose/cormose mentre altre sono stolonifere. Non mancano casi di piante, come quelle che solitamente vivono in ambienti particolarmente popolati, che sono caratterizzate da foglie sommerse od emergenti.

Vi sono poi anche idrofite non radicate, dunque fluttuanti sulla superficie dell'acqua e quindi non vincolate dall'altezza dell'acqua.

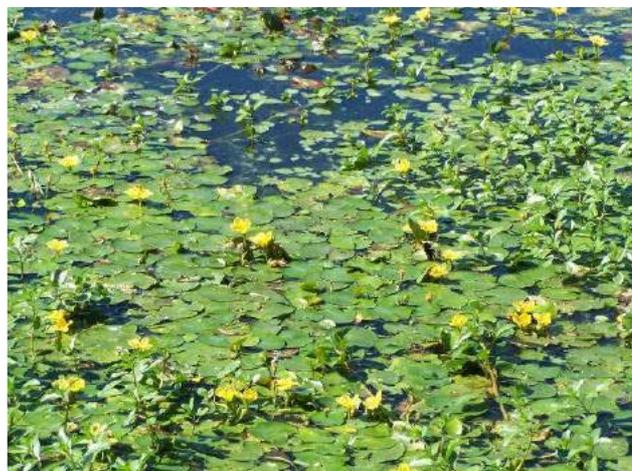
La loro attitudine è quella di tendere a coprire la superficie dello specchio d'acqua, impedendo in tal modo la filtrazione della luce solare e quindi riducendo indirettamente lo sviluppo di numerose alghe.

Tra i generi e le famiglie più conosciute e più diffuse nelle nostre zone, si ricordano *Nymphaea alba* e *Nuphar lutea* della famiglia delle Nymphaeaceae; *Nymphoides peltata* della famiglia delle

Menyanthaceae e *Potamogeton natans* della famiglia delle Potamogetonaceae. Tra le idrofite liberamente galleggianti si ricordano *Eichhornia crassipes* della famiglia delle Pontederiaceae, *Hydrocharis morsus-ranae* della famiglia Hydrocharitaceae e *Lemna minor* della famiglia delle Lemnaceae.



Nymphaea alba



Nymphoides peltata



Lemna minor



Potamogeton natans

2.3.3 IDROFITE SOMMERSE

Le idrofite sommerse vivono in bacini idrici di altezza variabile fino a 10-11 metri e hanno la caratteristica di essere completamente sommerse. Tra le più comuni tipologie di idrofite sommerse si possono citare il *Potamogeton crispus*, *Myriophyllum spicatum* e *Ceratophyllum demersum*. Diversamente dalle piante di habitat terrestri e alla stregua delle microalghe, le idrofite sommerse sintetizzano il carbonio e i nutrienti assumendoli direttamente dalla colonna d'acqua.



Fondale lacustre con idrofite sommerse

2.4 La fauna

Gli ambienti umidi ospitano un'ampia varietà di fauna, dagli invertebrati di diverso tipo che compiono in parte o interamente il ciclo vitale in acqua (Oligocheti, Crostacei, Molluschi, Insetti ecc.), ai vertebrati quali pesci, anfibi, uccelli e mammiferi.

Partendo nella descrizione dagli elementi di minore dimensione (ad esclusione dello zooplancton, trattato precedentemente), troviamo in primo luogo i numerosi invertebrati che:

- popolano il fondo del corpo idrico, quali p.e. i Molluschi Gasteropodi (cui appartengono le lumachine che brucano incessantemente le alghe sulle superfici sommerse) o Bivalvi (filtratori), le larve degli Odonati (cioè gli stadi acquatici delle libellule, temibili predatori di altri invertebrati, girini e avannotti) e dei Chironomidi (i cui adulti sono i piccoli e innocui moscerini che formano grandi sciame); nelle zone fangose è inoltre facile rinvenire gli Oligocheti Tubificidi, sottili vermetti rossi che si agitano incessantemente in folti gruppi.
- Nuotano liberamente, come p.e. gli adulti dei Coleotteri Ditiscidi o gli Eterotteri Notonectidi, che si muovono tra il fondo e la superficie a caccia delle loro prede, andando a prendere ogni tanto una "boccata d'aria", in quanto respirano dall'atmosfera.
- Si muovono sulla superficie, come i Gerridi, che pattinano sulla superficie dell'acqua o stazionano immediatamente al di sotto di essa, come le larve di zanzara che respirano aria atmosferica con il loro sifone e fuggono verso il fondo se minacciati.

Per quanto riguarda i vertebrati, nelle zone umide troviamo una ricca fauna anfibia, rappresentata da Anuri (rane, rospi, raganelle) e Urodeli (tritone crestato, tritone punteggiato e, in quota, il tritone alpestre); alcuni di essi, p.e. rospi, rane rosse e tritoni, frequentano gli specchi lacustri solo per il periodo riproduttivo, conducendo il resto della vita adulta sulla terra (o sugli alberi, nel caso delle raganelle). Le rane verdi invece restano legate all'ambiente acquatico anche dopo il completamento della metamorfosi. I girini di rana e rospo si nutrono di alghe e sostanza organica che raccolgono dal fondo, mentre i girini di tritone predano piccoli invertebrati. Gli Anfibi adulti si cibano di insetti, vermi, piccoli molluschi.

Nell'ambito dell'erpetofauna che frequenta gli ambienti palustri non possono essere dimenticati i Rettili, anche se presenti con un ridotto numero di specie; in particolare è facile rinvenire la comune "biscia d'acqua" o natrice dal collare (*Natrix natrix*), mentre meno comune è la natrice tessellata (*Natrix tessellata*), entrambe del tutto innocue per l'uomo. Ormai molto rara, purtroppo, è la tartaruga palustre europea (*Emys orbicularis*).



Rana verde



Raganella



Natrix natrix



Tritone crestato

I corpi d'acqua stagnanti possono ospitare anche numerose specie di pesci tipiche di acque lacustri; si possono rinvenire Ciprinidi di dimensioni piccole, come il triotto o l'alborella, medie, come la scardola e il carassio o di grosse, come la tinca e la carpa (quest'ultima in grado di arrivare anche a 25 kg di peso). I Ciprinidi sono pesci molto prolifici, dalla dieta estremamente adattabile (dai piccoli invertebrati alla sostanza organica e alle alghe) e piuttosto tolleranti anche a condizioni ambientali degradate (in particolare la carpa e il carassio sopportano elevate temperature e basse concentrazioni di ossigeno). Tra i predatori troviamo invece il luccio, quello di maggiore taglia (oltre 20 kg di peso), il pesce persico (di taglia assai più modesta, solitamente non oltre il kg, ma che inizia a cibarsi di pesci già da piccolo) e il persico trota (di provenienza nordamericana, ormai ospite frequente nelle acque italiane, che non disdegna gli anfibi, oltre ai pesci). Altri pesci caratteristici delle zone palustri sono:

- il piccolo cobite, dal corpo anguilliforme, che vive infossato nel sedimento fine ed è in grado di utilizzare l'aria atmosferica per respirare.

- Il persico sole (anch'esso nordamericano, come il persico trota), Centrachide di modesta taglia, il cui maschio nel periodo di frega assume una livrea dai colori sgargianti e manifesta un comportamento spiccatamente territoriale; costruisce un nido per la deposizione delle uova da parte delle femmine, che poi difende attivamente dai predatori e dall'intrusione di altri maschi.
- Il ghiozzo, altro piccolo pesciolino che vive a stretto contatto del fondo, dove si ciba di invertebrati; le uova, adesive, sono deposte all'interno di una tana custodita dal maschio.



Persico reale



Carassio



Ghiozzo



Cobite

I biotopi umidi costituiscono inoltre un importante sito di sosta, di alimentazione o di nidificazione per un'ampia varietà di specie ornitiche, in particolare per quelle più tipicamente legate agli ambienti acquatici quali limicoli, anatidi e ardeidi. In molti casi si tratta di presenze del tutto sporadiche per le quali le zone umide costituiscono occasionali aree di sosta nel corso della migrazione; alcuni esempi, per quanto riguarda la regione lombarda, sono costituiti dal piovanello (*Calidris ferruginea*), dalla pantana (*Tringa nebularia*) o dal combattente (*Philomachus pugnax*), le cui zone di svernamento comprendono in parte le coste settentrionali del Mediterraneo. Altre specie possono invece utilizzare le aree umide quali siti di nidificazione, come, sempre in ambito lombardo, la pavoncella (*Vanellus vanellus*), il piro-piro piccolo (*Actitis hypoleucos*), il corriere piccolo (*Charadrius dubius*), la gallinella d'acqua (*Gallinula chloropus*), la folaga (*Fulica atra*), il cannareccione (*Acrocephalus arundinaceus*), l'airone cinereo (*Ardea cinerea*). Tra le specie svernanti, quelle che più facilmente si possono osservare presso le zone umide sono lo svasso maggiore (*Podiceps cristatus*), il germano reale (*Anas platyrhynchos*) e la folaga, che spesso sono presenti per tutto l'arco dell'anno. Nell'ambito dei predatori, questo tipo di ambienti può essere frequentato anche da diversi rapaci quali il falco di palude (*Circus aeruginosus*), il falco pescatore (*Pandion haliaetus*), il nibbio bruno (*Milvus migrans*), il gufo di palude (*Asio flammeus*).

Anche diverse specie di mammiferi possono utilizzare le zone umide quale sito di rifugio o per alimentarsi. Tra i mammiferi di piccole dimensioni si possono citare l'arvicola terrestre (*Arvicola terrestris*), che costruisce le sue tane negli argini di paludi, corsi d'acqua, canali o risaie, e il topolino delle risaie (*Micromys minutus*), che si arrampica agilmente con la coda su arbusteti ed erbe alte ai margini dei canneti; entrambe queste specie appartengono alla stessa famiglia di topolini e ratti, mentre nell'ambito dei soricidi (piccoli mammiferi a dieta insettivora che vivono in ambienti non troppo secchi), si segnala il toporagno d'acqua (*Neomys fodiens*), che si nutre di larve e adulti di insetti, sia sott'acqua sia sulla terraferma. Le aree umide rappresentano inoltre importanti luoghi di abbeverata e zone di caccia per i chirotteri, poiché spesso in tali ambienti vi è la presenza di un maggior numero e diversità di insetti di cui essi si nutrono. Un altro mammifero che predilige gli ambienti umidi è la puzzola (*Mustela putorius*). Nell'ambito dei mammiferi di taglia maggiore, si possono infine menzionare la volpe (*Vulpes vulpes*), il capriolo (*Capreolus capreolus*) e il cervo (*Cervus elaphus*), che possono utilizzare le aree umide per abbeverarsi.



Gallinella d'acqua



Folaga



Svasso maggiore



Airone cenerino

3 GLI ECOSISTEMI FILTRO

Tutte le proprietà e le componenti che costituiscono un ambiente umido naturale, delle quali si è data una panoramica nei precedenti capitoli, possono essere “copiate” e ricostituite appositamente, e in modo tale da ottimizzare alcune funzioni biologiche e fisiche in essi presenti (Constructed Wetlands). Ricerche svolte ed esperienze ormai acquisite a livello internazionale hanno messo in evidenza (portando a definirne anche una stima quantitativa) di come tali ambienti svolgono un importantissimo ruolo di depuratori naturali delle acque.

Acque con presenza di un certo carico inquinante, percorrendo queste zone colonizzate da vegetazione e microorganismi, si depurano. Questo particolare e naturale sistema di depurazione prende il nome di **fitodepurazione**.

3.1 Principi generali

La fitodepurazione è dunque un naturale processo di depurazione che avviene nelle aree umide naturali dove, ad opera di organismi animali e/o vegetali presenti nel suolo e nelle acque, che costituiscono il filtro biologico, si attuano meccanismi di depurazione naturale attraverso processi fisici, chimici e biologici (filtrazione, assorbimento, assimilazione da parte degli organismi vegetali e degradazione batterica).

Trattasi dunque di una capacità intrinseca che possiedono tutti gli ecosistemi acquatici i quali, attraverso le proprie componenti, svolgono in modo naturale la depurazione delle acque, evitando dunque l'impiego di sostanze chimiche.

Negli ultimi decenni si sono approfondite notevolmente le conoscenze delle dinamiche naturali di tali ambienti fino a determinarne in modo molto realistico le efficienze depurative e poterli così ricreare sfruttandone e ottimizzandone la capacità depurativa, nel contempo creando habitat acquatici di elevato pregio naturalistico.

Negli ecosistemi filtro, le varie componenti costitutive quali, ad esempio, il substrato, le piante acquatiche, la presenza di zone con più elevati battenti idrici, assumono importanti compiti nella trasformazione e rimozione del carico inquinante residuo presente nelle acque che vi vengono recapitate.

In linea generale le principali componenti dell'ecosistema acquatico e i relativi processi depurativi che avvengono sono i seguenti:

- Il **substrato** (argilla, sabbia e ghiaia), oltre a costituire il supporto della vegetazione, svolge attivamente un'azione di filtrazione meccanica e chimica. Esso rappresenta un complesso sistema di competizione biologica nei confronti delle cariche batteriche presenti nei reflui; inoltre componenti quali le argille hanno una grande capacità di adsorbimento di alcuni composti quali il fosforo e l'azoto ammoniacale.
- La **microfauna** del terreno degrada il carico organico presente (processi quali rimozione del carbonio, nitrificazione dell'azoto ammoniacale, denitrificazione dell'azoto nitrico) trasformandolo in nutrienti disponibili per le specie vegetali del sistema.
- La **vegetazione**, attraverso l'apparato radicale, apporta ossigeno in profondità (permettendo lo svolgersi dei processi degradativi ossidativi), assorbe nutrienti dal terreno, riducendone la concentrazione nelle acque in uscita, e, attraverso i meccanismi di evapotraspirazione, riduce il quantitativo totale delle acque che comunque vengono scaricate nell'ambiente esterno.

3.2 Normativa di riferimento

Il decreto legislativo 152/99 introduce per la prima volta indicazioni in merito all'adozione di sistemi naturali di depurazione delle acque. Stabilisce che per impianti di depurazione con meno di 2.000 Abitanti Equivalenti debbano essere adottati "sistemi appropriati di depurazione", facendo esplicito riferimento all'impiego del lagunaggio e della fitodepurazione.

Successivamente tali concetti vengono ripresi dal D.Lgs. 152/2006, con l'indicazione che "per tutti gli insediamenti con popolazione equivalente compresa tra 50 e 2.000 abitanti equivalenti, si ritiene auspicabile il ricorso a tecnologie di depurazione naturale quali il lagunaggio o la **fitodepurazione**, ...".

L'impiego di tali tecniche "naturali" risulta quindi attuabile per la depurazione dei reflui di piccoli centri abitati, con particolare riferimento a piccoli nuclei abitativi, case sparse, agriturismi, ristoranti, campeggi, ecc., aventi fluttuazioni delle utenze settimanali e/o stagionali.

La Regione Lombardia disciplina lo scarico di acque reflue tramite il **Regolamento Regionale del 24 marzo 2006 n.3** "Disciplina e regime autorizzatorio degli scarichi di acque reflue domestiche e di reti fognarie" e la **D.G.R del 5 aprile 2006 n.8/2318** "Norme tecniche regionali in materia di trattamento degli scarichi di acque reflue".

Con il **Regolamento Regionale del 23 marzo 2006 n.3** "Disciplina e regime autorizzatorio degli scarichi di acque reflue domestiche e di reti fognarie" vengono regolamentati:

- gli scarichi di acque reflue domestiche e di acque reflue ad esse assimilabili;
- gli scarichi delle reti fognarie;
- il regime autorizzatorio degli scarichi di acque reflue domestiche, di acque reflue assimilate e di reti fognarie;
- i campionamenti e gli accertamenti analitici.

Il regolamento regionale prevede regimi diversi per gli scarichi delle pubbliche fognature secondo la potenzialità dello scarico e il recapito, e individua le aree sensibili (bacini idrografici dei laghi) e le aree vulnerabili da nitrati, imponendo per queste limiti più severi.

La tabella che segue riassume la disciplina degli scarichi civili della Regione Lombardia. Si rilevano maggiori prescrizioni se le acque trattate sono recapitate in corsi d'acqua utilizzati a scopo potabile (per le quali si rende necessario un trattamento di abbattimento della carica batterica).

	N. abitanti equivalenti	Tipo di trattamento	Valori limite
Pubbliche fognature	50 < A.E. ≤ 100	Fossa Imhoff	Materiali sedimentabili ≤ 0.5 ml/l
	100 < A.E. ≤ 400	Fossa settica o fossa Imhoff seguita da fitodepurazione o lagunaggio; oppure trattamento biologico (D.G.R. n 8/2318 del 2006)	BOD ≤ 60 mg/l COD ≤ 160 mg/l SST ≤ 80 mg/l Grassi e oli ≤ 20 mg/l
	400 < A.E. ≤ 2000 In acque superficiali	Trattamento secondario	BOD ≤ 40 mg/l COD ≤ 160 mg/l

			SST ≤ 60 mg/l Grassi e oli ≤ 20 mg/l NH₄⁺ ≤ 25 mg/l Tot-N ≤ 40 mg/l in aree vulnerabilità
	400 < A.E. ≤ 2000 Nel suolo (vietato in aree vulnerabili)	Trattamento secondario che assicurano il rispetto della tabella 3 Legge Regionale	BOD ≤ 25 mg/l COD ≤ 125 mg/l SST ≤ 35 mg/l Grassi e oli ≤ 30 mg/l Fosforo totale ≤ 4 mg/l
	2000 < A.E. ≤ 10000 In acque superficiali		BOD ≤ 25 mg/l COD ≤ 125 mg/l SST ≤ 35 mg/l Fosforo totale ≤ 2 mg/l (laghi)
	2000 < A.E. ≤ 10000 Nel suolo (vietato in aree vulnerabili)		BOD ≤ 20 mg/l COD ≤ 100 mg/l SST ≤ 25 mg/l NH₄⁺ ≤ 5 mg/l Tot-N ≤ 15 mg/l in aree vulner Fosforo totale ≤ 2 mg/l (laghi)
Insed. isolati	< 50 A.E.	Fosse settiche o Imhoff, subirrigazione	Materiali sedimentabili ≤ 0.5 ml/l
	≥ 50 A.E.	Come disciplina degli scarichi fognari della stessa potenzialità	

Per gli insediamenti isolati, nel L. R. 3/2006 art. 8 comma 1, si legge "... I nuovi scarichi degli insediamenti isolati di carico inferiore a cinquanta A.E. non possono essere recapitati":

- in corpi d'acqua superficiale;
- sul suolo o negli strati superficiali del sottosuolo, nelle zone appartenenti al bacino idrografico dei laghi delimitate dalla fascia di un chilometro dalla linea di costa.

I vecchi scarichi d'insediamenti isolati devono essere adeguati alle prescrizioni del *comma 1* entro 3 anni dalla data di entrata in vigore del regolamento.

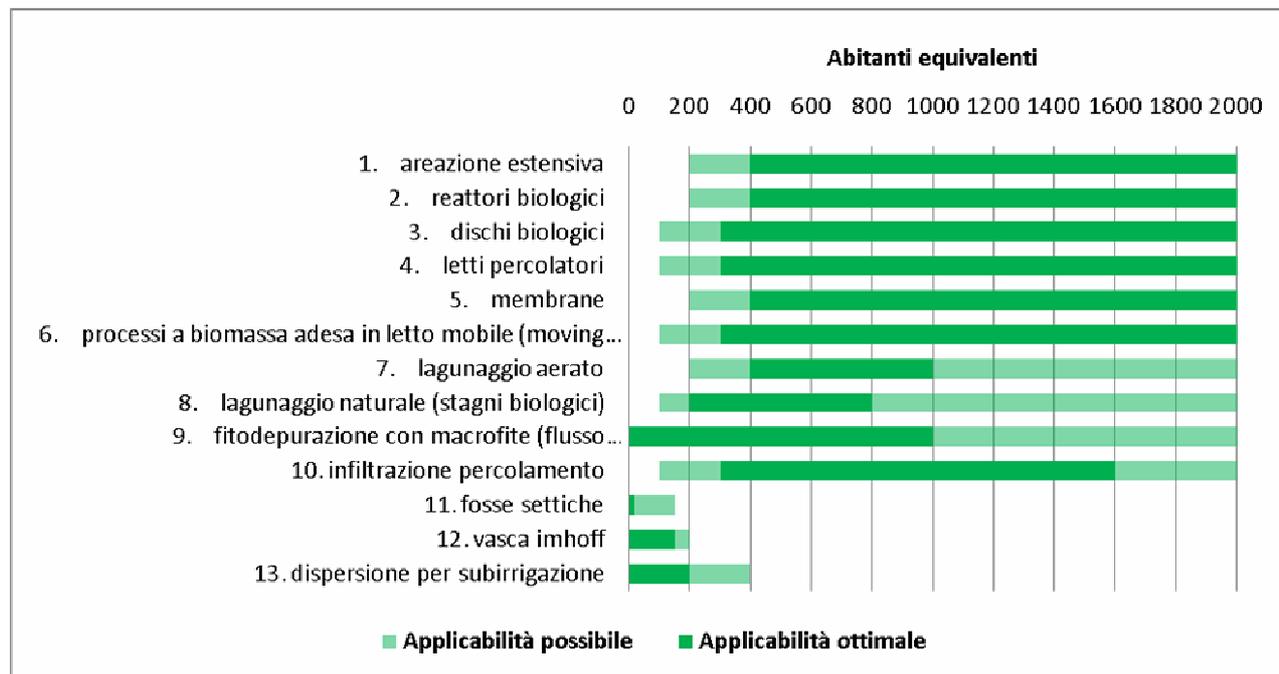
Con la **D.G.R del 5 aprile 2006 n.8/2318** "Norme tecniche regionali in materia di trattamento degli scarichi di acque reflue" la Regione individua i trattamenti appropriati cui devono essere sottoposti gli scarichi di acque reflue urbane provenienti da agglomerati con meno di duemila abitanti equivalenti.

Secondo quanto si legge nel regolamento "...il trattamento deve essere individuato con **l'obiettivo di rendere semplice la manutenzione e la gestione, di sopportare adeguatamente forti variazioni orarie del carico idraulico e organico e di minimizzare i costi gestionali**. In tale contesto è precisato che la tipologia di trattamento può equivalere a un trattamento primario o di un trattamento secondario a seconda della soluzione tecnica adottata e dei risultati depurativi raggiunti ed è auspicato il ricorso a tecnologie di depurazione naturali, quali il lagunaggio o la fitodepurazione, o a tecnologie con filtri percolatori o impianti di ossidazione totale.....".

Di seguito si riportano i trattamenti indicati dal regolamento:

1. areazione estensiva
2. reattori biologici
3. dischi biologici
4. letti percolatori;
5. membrane;
6. processi a biomassa adesa in letto mobile (*moving bed*);
7. lagunaggio aerato;
8. lagunaggio naturale (stagni biologici);
9. fitodepurazione con macrofite;
10. infiltrazione percolamento;
11. fosse settiche;
12. vasca imhoff;
13. dispersione per subirrigazione

Nella figura riportata sono individuati i campi di concreta applicabilità dei diversi trattamenti in termini di abitanti equivalenti serviti. Come indicato nel Regolamento "la valutazione riportata tiene conto degli aspetti gestionali ed economici, che rendono molti dei trattamenti intensivi non idonei a potenzialità molto limitate e, per contro, degli aspetti legali all'ingente impegno di spazio e al livello qualificativo raggiungibile, che rende alcuni trattamenti inadatti alle potenzialità più elevate".



Campo di concreta applicabilità dei diversi trattamenti (fonte: l.r. 5 aprile 2006 n.8/2318)

3.3 Valenza naturalistica paesaggistica e ricreativa

Un aspetto non secondario, proprio della natura di tali sistemi, è la loro multifunzionalità. Nell'attuare una tecnologia efficace di fitodepurazione, essi danno vita ad ambienti naturaliformi (come rappresentato nelle immagini seguenti), dunque caratterizzati da una ricca biodiversità, in parte costituita ex-novo, e nel tempo ulteriormente arricchita da una spontanea

colonizzazione vegetale e animale, citando in particolare la pregiata fauna anfibia, spesso minacciata per la povertà di ambienti umidi nel nostro territorio e oggetto di specifici progetti finanziati anche a livello europeo a fini della loro salvaguardia.

A seconda della finalità per cui essi vengono realizzati, tali sistemi possono pertanto assolvere a una molteplicità di funzioni: alla principale funzione depurativa, per la quale essi vengono in genere realizzati, è associata una funzione naturalistica, per la ricca biodiversità che ospitano, una funzione paesaggistica, nella trasformazione e caratterizzazione di un particolare ambito territoriale, e una funzione ricreativa, per l'interesse di fruizione (ad es. didattica) che suscitano e per cui sono oggetto anche di studio.



Impianto di fitodepurazione di Lonate Pozzolo (VA) (foto del Parco Ticino)



Impianto di fitodepurazione di Pianbosco (VA) – ottobre 2008

Questo ultimo aspetto, di tipo fruitivo e ricreazionale, può anche diventare il motivo principale dell'esistenza di un ecosistema filtro, realizzando un ambiente che mediante la propria capacità depurativa rende possibile la fruizione turistica e balneabile. In tale filone, si inseriscono tutte quelle esperienze nate e diffuse nella e dalla cultura anglosassone che riguardano i **biolaghi** e le **biopiscine**, un ramo che ultimamente si sta sviluppando anche nel nostro territorio, favorito da una maggiore coscienza ecologica che in un certo senso intende recuperare un autentico rapporto uomo-natura, pensiero che sottende la bioarchitettura.



Biolago comunale di Mercallo (VA)

3.4 Campi di applicazione

Lasciando da parte l'argomento particolare dei biolaghi e delle biopiscine, il campo d'impiego degli ecosistemi filtro riguarda principalmente il trattamento secondario di reflui già parzialmente depurati e/o l'affinamento finale delle acque per migliorare la qualità dell'effluente, e secondariamente il trattamento di acque provenienti dal dilavamento superficiale in ambito urbano.

L'impiego principale e più diffuso dei sistemi naturali costruiti (Constructed Wetlands) riguarda il trattamento delle acque reflue. Tali sistemi possono essere localizzati a valle degli scarichi di depuratori esistenti e trattare/affinare le acque depurate che presentano ancora un residuo di carico inquinante. Oppure, essi possono rappresentare dei sistemi di depurazione veri e propri, nei quali i reflui vengono immessi e depurati, successivamente ad una prima fase di decantazione che permette una separazione della componente più grossolana (sedimentabile) e degli oli.

Per tali finalità di trattamento e/o affinamento gli ecosistemi filtro costruiti, rispetto a quelli naturali, offrono un maggior grado di controllo, permettendo di giungere ad una precisa valutazione dei rendimenti depurativi che svolgono, grazie a numerose attività di ricerca ed esperienze ormai ampiamente comprovate degli ultimi decenni, da parte di università, enti europei e statunitensi e degli esempi presenti in varie realtà.

La definizione di criteri di progettazione, empirici e non, si avvale di conoscenze della natura dei substrati (*medium*) impiegati, delle specie di macrofite acquatiche maggiormente adatte e delle loro efficienze depurative, e dei flussi idraulici, questi ultimi opportunamente controllati e distribuiti nei sistemi nelle modalità e nei tempi stabiliti per consentire lo svolgimento ottimale delle attività di depurazione.

3.5 I meccanismi di rimozione degli inquinanti

I processi depurativi attivi nei trattamenti di fitodepurazione nei confronti delle diverse forme di inquinamento sono spesso complessi e variegati.

Essi avvengono attraverso una varietà di processi biologici, chimici e fisici che concorrono in diversa misura sul destino di ogni inquinante. Ogni processo, non solo costituisce il principale metodo di depurazione di un particolare inquinante, ma può svolgere un effetto secondario o incrementale su altri. Un esempio è la sedimentazione che ha un effetto primario sui solidi sedimentabili, uno secondario sui solidi sospesi ed uno incrementale sul BOD, sull'azoto, sul fosforo, sui metalli pesanti, sulle sostanze organiche refrattarie, sui batteri e virus (vedi tabella seguente).

Mechanismi di rimozione	Solidi sedimentabili	Solidi sospesi	BOD	Azoto	Fosforo	Metalli pesanti	Organiche refrattarie	Batteri e virus	Descrizione
FISICI									
Sedimentazione	P	S	I	I	I	I	I	I	Sedimentazione gravitazionale di solidi in stagni/paludi di sedimentazione
Filtrazione	S	S							Particolato rimosso meccanicamente dal passaggio dell'acqua attraverso il substrato, gli apparati radicali o i pesci
Adsorbimento	S								Forze d'attrazione interparticellare (forze di Van der Waals)
CHIMICI									
Precipitazione			P	P					Formazione di composti insolubili o coprecipitazione
Adsorbimento			P	P	S				Adsorbimento su substrato e sulla superficie radicale
Decomposizione						P	P		Decomposizione o alterazione de composti più stabili per ossidazione e riduzione
BIOLOGICI									
Metabolismo batterico	P	P	P				P		Rimozione di solidi colloidali e organici solubili da parte di batteri sospesi, bentici e aggregati alle piante. Nitrificazione e denitrificazione batterica
Matabolismo delle piante							S	S	Assunzione e metabolizzazione di composti organici da parte delle piante. La secrezione della radici può essere tossica per microrganismi di derivazione enterica
Assorbimento della pianta			S	S	S	S			In particolari condizioni, significative quantità di questi contaminanti saranno rimossi dalle piante
Decadimento naturale								P	Decadimento naturale di organismi in condizioni ambientali sfavorevoli

Legenda tabella: P = effetto primario ; S = effetto secondario ; I = effetto incrementale causato dalla rimozione di un altro inquinante

Meccanismi di rimozione degli inquinanti nelle zone umide delle acque reflue

Solidi sospesi

I solidi sospesi si distinguono in solidi sospesi sedimentabili e di natura colloidale. I primi vengono rimossi sostanzialmente mediante sedimentazione o per filtrazione, quindi mediante meccanismi di tipo fisico, mentre quelli colloidali sono soggetti a degradazione biologica (idrolisi) o rimossi per adsorbimento su altri solidi.

La sedimentazione dipende prevalentemente dalla gravità ma anche dalla viscosità nel fluido che li trasporta; essa è favorita da lunghi tempi di ritenzione idraulica, da bassi carichi idraulici e dalla riduzione degli effetti del vento sull'acqua e sui solidi accumulati sul fondo del bacino.

La filtrazione avviene grazie al passaggio del liquame tra il substrato (*medium*) e gli apparati radicali delle idrofite galleggianti o emergenti. Onde evitare un precoce intasamento del medium è importante verificare che il carico organico non sia eccessivamente elevato.

La degradazione biologica di tipo idrolitico comporta la rottura enzimatica delle macromolecole organiche necessaria poi ai microrganismi (batteri) che provvedono alla demolizione della struttura molecolare delle sostanze con formazione di sostanze minerali semplici.

L'adsorbimento riguarda l'azione chimico-fisica esercitata dalle piante e dal substrato sui solidi colloidali (adsorbimento di tipo fisico) e sui solidi disciolti (adsorbimento chimico).

BOD e COD

La modalità di rimozione della sostanza organica è misurata attraverso il consumo di ossigeno (BOD e COD). I meccanismi di rimozione si distinguono a seconda che si tratti della frazione disciolta, sospesa non sedimentabile e sospesa sedimentabile. La componente sospesa, associata ai solidi sospesi, viene rimossa secondo i meccanismi descritti in precedenza. La frazione disciolta è soggetta a degradazione biologica che, a seconda della presenza o meno di ossigeno, si distingue in:

- Aerobica: avviene nella porzione ossigenata della colonna d'acqua e della rizosfera.
- Anossica: si verifica nelle zone prossime a quelle ossigenate dove all'assenza di ossigeno molecolare è associata la presenza di una fonte di ossigeno combinato.
- Anaerobica: si ha nelle zone prive di ossigeno libero e combinato ed in particolare nei sedimenti.

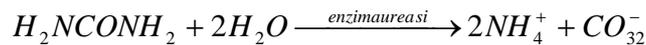
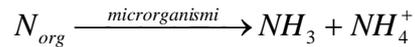
La rimozione di materia organica presente nel bacino di fitodepurazione non solo dipende dalla quantità in ingresso ma è influenzata anche dalla perdita di materiale organico da parte delle idrofite presenti all'interno del sistema, determinando la presenza di un carico residuo comunque sempre presente nell'effluente.

Azoto

La rimozione dell'azoto prevede una serie di processi che hanno inizio dall'ammonificazione biologica, seguita da nitrificazione e denitrificazione. I composti finali di questi processi possono avere due destini diversi: essere assunti dalle piante (in minima parte), oppure essere dispersi nell'ambiente tramite volatilizzazione dell'ammoniaca.

L'ammonificazione, che avviene prevalentemente in condizioni aerobiche e più difficilmente in quelle anaerobiche, dipende dal PH e dalla temperatura. Questa reazione si verifica in parte all'esterno del sistema depurativo e in parte nel bacino di fitodepurazione.

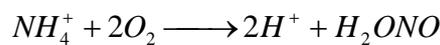
Durante questo processo l'azoto organico è trasformato in azoto ammoniacale durante la degradazione della materia organica catalizzata dai microrganismi.



La nitrificazione riguarda l'ossidazione biologica dei composti inorganici dell'azoto allo stato ridotto, svolta da batteri autotrofi, in grado cioè di utilizzare per la sintesi cellulare carbonio inorganico (CO₂) e di trarre l'energia necessaria alla crescita e al metabolismo dall'ossidazione dell'ammoniaca e poi dei nitriti.

Nel trattamento delle acque i batteri attivi in tale processo appartengono al genere *Nitrosomonas*, per l'ossidazione dell'ammoniaca NH₃ a nitriti NO₂⁻, e al genere *Nitrobacter* per l'ossidazione dei nitriti NO₂⁻ a nitrati NO₃⁻.

Il processo di nitrificazione avviene contestualmente al processo di ossidazione dei composti organici, quindi con rimozione di BOD da parte dei batteri eterotrofi.



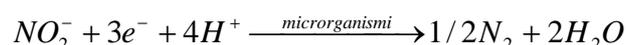
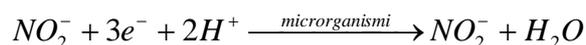
Dato che parte dell'azoto è anche richiesto per la sintesi batterica allora la reazione sarà la seguente:



Il processo di denitrificazione permette la rimozione dei composti dell'azoto presenti in soluzione sotto forma di NO₃⁻ (e in parte di NO₂⁻) ad opera di batteri eterotrofi facoltativi che, se posti in condizioni di anossia (cioè in assenza di ossigeno disciolto), sono in grado di ossidare il substrato carbonioso organico, che funziona da donatore di elettroni (generalmente sotto forma di detrito vegetale prodotto durante la degradazione dalle piante del bacino), utilizzando l'ossigeno legato ai nitrati NO₃⁻ invece dell'ossigeno libero O₂, e liberando azoto gassoso come catabolita.

Il processo di denitrificazione si deve svolgere in condizioni rigorosamente anossiche, almeno nel microambiente circostante i batteri.

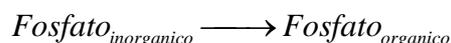
A differenza dei batteri nitrificanti che sono rappresentati principalmente da due soli ceppi batterici, i denitrificanti sono di diversi tipi: *Pseudomonas*, *Micrococcus*, *Archromobacter*, *Bacillus*, *Alcaligenes*; questi tipi di batteri sono in grado di attuare una conversione completa di NO₃⁻ a N₂ (intermedi di reazione sono i nitriti NO₂⁻). Durante la reazione, i nitrati e i nitriti liberi nella colonna d'acqua o nel sedimento sono trasformati in N₂ e N₂O i quali, essendo gassosi, subiscono il fenomeno della volatilizzazione e lasciano così il bacino di fitodepurazione.



Fosforo

I meccanismi principali di rimozione del fosforo sono l'assunzione diretta da parte delle piante (che vengono poi raccolte) e lo stoccaggio biologico e chimico nei sedimenti. Come per l'azoto, anche nel caso del fosforo, la rimozione per assunzione diretta da parte delle piante risulta di minima entità. Il meccanismo principale di rimozione è dunque lo stoccaggio biologico e chimico nei sedimenti.

Il fosfato organico si accumula nel bacino a causa di processi biologici o del tipo di scarico che spesso presenta residui di cibo. Il fosfato organico disciolto e quello insolubile di solito non sono disponibili alle piante finché non sono trasformati in forma inorganica. Questa trasformazione può avvenire nella colonna d'acqua.



Il fosforo inorganico può derivare da acque di scarico che spesso presentano varie forme colloidali di soluzioni. Il fosforo inorganico reagisce con gli idrossidi di ferro e alluminio originando fosfati insolubili di ferro trivalente e di alluminio con una successiva produzione di torba sul fondo del bacino.

Il fosforo può essere rimosso dalla colonna d'acqua mediante precipitazione oppure per assorbimento diretto da parte dei rizomi delle idrofite. Il processo di assorbimento del fosforo avviene durante la fase di crescita della pianta mentre il suo rilascio durante la senescenza, la morte e la decomposizione. Si tratta di meccanismi lenti che, con il passare del tempo, portano all'accrezione del substrato e quindi al suo innalzamento.

Quando il fosforo aumenta notevolmente sottoforma di sedimento, una parte di esso può addirittura essere rilasciata nel flusso in uscita del bacino di fitodepurazione. Esso può anche essere rimosso per via chimica in ambienti dove sono presenti substrati acidi.

Metalli pesanti

Se da un lato i metalli sono richiesti in quantità di traccia da animali e piante per il loro accrescimento (esempio: bario, berillio, boro, cromo, cobalto rame, iodio, ferro, magnesio, manganese, molibdeno, nichel, selenio, zolfo e zinco), dall'altro, gli stessi possono essere tossici ad alte concentrazioni. Altri metalli dei quali non è conosciuto alcun ruolo biologico sono letali anche a basse concentrazioni (esempio: arsenico, cadmio, mercurio e argento). Le acque in ingresso in un sistema di fitodepurazione possono portare all'accumulo di diverse specie di metalli solubili e insolubili.

I metalli entrano nel bacino come solidi sospesi insolubili e mediante la precipitazione e l'adsorbimento si separano dall'acqua. Essi sono assimilati direttamente dalle piante e rilasciati nel sedimento in seguito alla morte e alla lenta decomposizione delle idrofite (stoccaggio biologico) e ai processi di adsorbimento, precipitazione a scambio ionico nei sedimenti (stoccaggio chimico). Il processo dipende dal PH e dal potenziale redox, infatti queste specie di metalli possono risolubilizzarsi e ritornare alla fase liquida. Importanti processi per la rimozione dei metalli includono lo scambio cationico e la chelazione con i sedimenti del bacino, il legame con l'humus, la precipitazione sottoforma di sali sulfidrici, carbonati, idrossidi e l'assimilazione da parte delle piante, delle alghe e dei batteri.

L'efficacia di rimozione è generalmente migliore nei bacini di fitodepurazione a flusso subsuperficiale rispetto quelli a flusso superficiale poiché le opportunità di contatto tra il liquame e il sedimento sono più frequenti nel primo caso. Inoltre, i cationi bivalenti si legano in modo molto stabile ai composti umici che costituiscono i sedimenti.

Sostanze organiche refrattarie

Alcuni composti organici sono caratterizzati da una molecola molto complessa e ramificata che è difficilmente biodegradabile in tempi brevi.

Questo tipo di molecole non sono trasformate in composti inorganici facilmente, ma necessitano di popolazioni di microrganismi che, funzionando da catalizzatori specifici, velocizzano la reazione di mineralizzazione. A loro volta i microrganismi sfruttano la sostanza

organica come fonte di energia per svolgere le loro funzioni vitali e la riproduzione. Le reazioni tipiche mediante le quali essi operano questa trasformazione sono i processi di ossidazione e riduzione, l'idrolisi e la fotolisi.

Durante il metabolismo aerobico, la trasformazione della sostanza organica in inorganica richiede ossigeno disciolto e porta alla formazione di prodotti mineralizzati, gas e biomassa. La reazione richiede, invece, i nitrati, i carbonati o i solfati come accettori terminali di elettroni i quali sono poi ridotti a ossidi di azoto, azoto libero, solfuri, tiosolfuri ecc. Nel caso in cui si ha un metabolismo di tipo anaerobico, la materia organica funziona sia come accettore sia da donatore terminale di elettroni.

Un secondo meccanismo di rimozione delle sostanze organiche refrattarie consiste nell'adsorbimento degli inquinanti stessi da parte delle particelle argillose. Questo processo è successivamente seguito dalla precipitazione dei prodotti originatisi.

Batteri e virus

I batteri patogeni ed i virus sono rimossi attraverso meccanismi aspecifici (come la sedimentazione, filtrazione ed adsorbimento) oppure per morte naturale dovuta alla prolungata esposizione a fattori fisici, chimici e biologici ostili, meccanismi quindi per nulla diversi da quelli tipici degli stagni biologici.

La radiazione ultravioletta ha un effetto significativo nei sistemi a flusso superficiale. Un altro effetto significativo è il rilascio da parte degli apparati radicali delle piante di metabolici (biocidi) che esercitano un effetto antibiotico sui batteri.

3.6 Trattamento degli scarichi

Da esperienze ormai consolidate presenti in ambito internazionale, il più largo impiego di tali sistemi avviene per il trattamento di acque reflue derivanti da:

- **Reflui di origine civile:** rappresenta il trattamento ideale per piccole comunità aventi potenzialità inferiore a 2000 Abitanti Equivalenti e con carichi fluttuanti stagionalmente;
- **Aziende zootecniche:** trattamento adatto per i reflui di lettiera e sala mungitura;
- **Utenze con reflui assimilabili ai civili** (di natura organica) ubicate in aree non servite da pubblica fognatura: bar, ristoranti, agriturismi, campeggi, sale da ballo.

Con il termine *abitante equivalente* viene indicato il carico organico biodegradabile recapitato in fognatura in un giorno, per la normale attività di una particolare utenza civile (o similare). La quantità di sostanze organiche biodegradabili viene misurata indirettamente tramite il quantitativo di ossigeno necessario affinché i batteri possano modificare le sostanze organiche biodegradabili presenti, rendendole innocue nell'arco di 5 giorni (BOD₅).

Il valore di riferimento è indicato dal Decreto Legislativo n. 152 del 3 aprile 2006, "Norme in materia ambientale" all'art. 74, per cui ad ogni abitante equivalente equivale un carico di 60 grammi di ossigeno al giorno. Tale parametro è alla base del dimensionamento e dunque dell'estensione che un ecosistema filtro deve avere per poter garantire un efficiente abbattimento del carico inquinante che vi viene immesso.

3.6.1 TIPOLOGIE REALIZZATIVE

L'adozione di tali sistemi trova applicazione tramite diverse tipologie di realizzazione, in cui vengono ricreati artificialmente habitat naturali. In base alla **modalità ed alla direzione di scorrimento dell'acqua** esse si possono suddividere in:

- sistemi a flusso superficiale (SF, *Surface Flow*);

- sistemi a flusso sub-superficiale orizzontale (H-SSF, *Horizontal Sub-Surface Flow*);
- sistemi a flusso sub-superficiale verticale (V-SSF, *Vertical Sub-Surface Flow*);
- sistemi integrati che prevedono l'impiego delle diverse tipologie combinate.

Tra i sistemi elencati, quelli maggiormente impiegati sono i sistemi a flusso superficiale e, ancor di più, i sistemi a flusso sub-superficiale. Questi ultimi vengono largamente impiegati per i trattamenti secondari. Rispetto ai primi occupano uno spazio più limitato e realizzano un'efficienza depurativa nettamente superiore.

Tali sistemi consistono in bacini opportunamente impermeabilizzati, dove il pelo libero dell'acqua è mantenuto poco al di sopra del substrato (flusso superficiale), mentre sempre al di sotto della superficie del terreno (flusso sub-superficiale), in modo tale che il *medium*, materiale inerte a diversa granulometria (pietrisco, ghiaia, sabbia), sia saturo d'acqua.

Nel substrato vengono coltivate le **macrofite acquatiche**. La messa a dimora delle piante viene effettuata tramite segmenti di rizomi, piantine in zolla o cespi di piante mature.

Un'altra e ulteriore suddivisione riguarda appunto l'impiego delle diverse **idrofito** utilizzate:

- sistemi a macrofite galleggianti;
- sistemi a macrofite radicate sommerse;
- sistemi a macrofite radicate emergenti;
- sistemi a microalghe.



Sistema a flusso superficiale



Letto a flusso sub-superficiale orizzontale



Letto a flusso sub-superficiale verticale

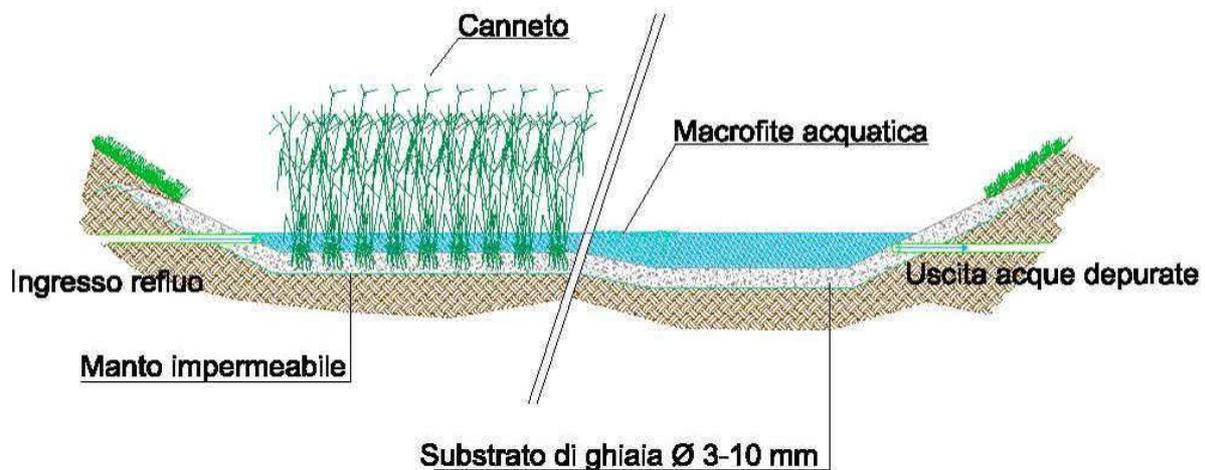


Sistema combinato

3.6.2 SISTEMI A FLUSSO SUPERFICIALE

I sistemi a flusso superficiale rappresentano la tipologia prevalente, maggiormente applicata in ambito internazionale. Sono costituiti da un sistema di lagune (bacini, canali a bassa profondità) ad estensione variabile, in cui vengono coltivate le macrofite acquatiche. I bacini vengono colonizzati da una grande varietà di organismi, originando un sistema di comunità con un discreto grado di efficienza autodepurativa, allo stesso tempo, operando una riqualificazione dell'ambiente.

Tali sistemi vengono impiegati, sia come trattamento secondario, che come sistema di affinamento/stoccaggio di impianti convenzionali.



Sistema a flusso superficiale - schema di funzionamento



Sistema a flusso superficiale dell'impianto di Vizzola Ticino (VA)

Tali sistemi hanno come scopo principale quello di migliorare la qualità globale degli effluenti biologici; in particolare, nonostante per quanto concerne BOD₅ e COD è possibile non si ottengano sempre ottimi rendimenti (specialmente per effluenti già in partenza di buona qualità), sono sempre garantiti ottimi risultati nella rimozione dei solidi sospesi, con concentrazioni negli effluenti inferiori a 20 mgSS/l, e della carica microbica (disinfezione). Quando associato anche ad uno bacino con acque libere (tipo il laghetto come rappresentato nelle figure riportate), tale sistema opera un affinamento ulteriore delle acque, in quanto in grado di garantire elevate efficienze di abbattimento della carica microbica, e dunque

riducendo al minimo il rischio igienico-sanitario associato, ad esempio, all'utilizzo agricolo come acque di irrigazione.

Il dimensionamento spesso si basa su criteri empirici. Riguardo la rimozione della sostanza organica, un metodo progettuale di tipo razionale considera il sistema depurativo come un reattore con flusso a pistone (che significa con dispersione solo trasversale alla direzione del moto) in cui si realizza una reazione biologica del primo ordine. Ciò porta alla seguente espressione:

$$BOD_e/BOD_i = F \times e^{-0,7k_T A_V^{1,75} t}$$

Dove:

BOD_e = concentrazione di BOD affluente [mgBOD l⁻¹]

BOD_i = concentrazione di BOD influente [mgBOD l⁻¹]

F = frazione del BOD che non sedimenta nelle parti iniziali del sistema [-]

k_T = costante della cinetica del primo ordine alla temperatura T [d⁻¹]

A_V = superficie specifica per la popolazione epifittica [m² m⁻³]

t = tempo di ritenzione idraulica effettivo [d]

Altri criteri empirici riguardano il carico idraulico superficiale, il carico organico superficiale, il tempo di ritenzione idraulica effettivo ed il rapporto lunghezza/larghezza. L'U.S. EPA (1988) consiglia di applicare carichi idraulici superficiali di 15-50 l/m² al giorno, variabili in funzione del tipo di liquame e delle condizioni idrologiche locali.

Queste tecniche di depurazione, di carattere estensivo, hanno alcuni vantaggi ma anche delle limitazioni di seguito elencate:

Vantaggi:

- costi ridotti;
- affinamento complessivo del refluo, oltre alla disinfezione;
- particolarmente adatti per inquinanti fluttuanti nel tempo;
- impatto ambientale ridotto.

Svantaggi:

- necessità di superfici vaste soprattutto nel caso in cui il sistema assolva il compito di trattamento secondario dei reflui;
- importanza del tempo di residenza dei reflui nei bacini;
- possibile necessità di impermeabilizzazione del fondo con costosi teli artificiali (per es. manti in HDPE e PVC);
- rendimenti depurativi variabili nell'arco dell'anno.

3.6.3 SISTEMI A FLUSSO SUB-SUPERFICIALE

I sistemi a flusso sub-superficiale sono maggiormente impiegati per i trattamenti secondari. Rispetto ai precedenti occupano uno spazio più limitato e realizzano un'efficienza depurativa nettamente superiore.

Consistono in bacini opportunamente impermeabilizzati, dove il pelo libero dell'acqua è mantenuto sempre al di sotto della superficie del terreno in modo che il *medium*, materiale

inerte a diversa granulometria (pietrisco, ghiaia, sabbia), sia saturo d'acqua. Mantenendo l'acqua sotto il livello del letto si riducono notevolmente i cattivi odori, i rischi igienici e lo sviluppo di colonie di insetti. Nel substrato poroso vengono coltivate le **idrofitte** radicate emergenti appartenenti essenzialmente ai generi *Phragmites*, *Scirpus* e *Typha*. La messa a dimora delle piante viene effettuata tramite segmenti di rizomi, piantine in zolla o cespi di piante mature. Tali specie svolgono la fondamentale funzione di trasferimento dell'ossigeno atmosferico attraverso le foglie e gli steli, fino alle radici, creando delle zone aerobiche necessarie ai batteri durante i processi ossidativi.

L'applicazione di queste tipologie di sistemi di trattamento, sia su scala internazionale che nazionale, ha dato dei risultati molto positivi:

- Impatto ambientale e igienico-sanitario nullo (non si ha scorrimento superficiale);
- Richiesta di superficie inferiore ai sistemi SF;
- Richiesta di gestione e manutenzione, dell'impianto, estremamente ridotte;
- Efficienza depurativa durante tutto l'arco dell'anno soprattutto per quanto riguarda l'abbattimento della componente organica.

Gli svantaggi sono invece riferiti a:

- necessità di impermeabilizzazione del fondo con costosi teli artificiali (per es. manti in HDPE e PVC);
- rendimenti depurativi ridotti nella stagione invernale.

SISTEMI A FLUSSO SUB-SUPERFICIALE ORIZZONTALE (H-SSF, HORIZONTAL SUB-SURFACE FLOW)

Nei trattamenti a flusso sub-superficiale orizzontale il refluo scorre costantemente nel medium. Diversamente dai sistemi a flusso superficiale, le acque reflue vengono mantenute all'interno del substrato. Affinché tale flusso sia uniforme è necessario che l'influente venga distribuito su tutta la larghezza del letto, al fine di utilizzare pienamente l'intero sistema depurativo, con l'accortezza di non originare uno scorrimento superficiale. L'influente percorre tutta l'altezza del letto, scorrendo in senso orizzontale attraverso il substrato.

L'evacuazione del refluo depurato avviene tramite una tubazione drenante posta sul fondo, all'estremità opposta del letto.

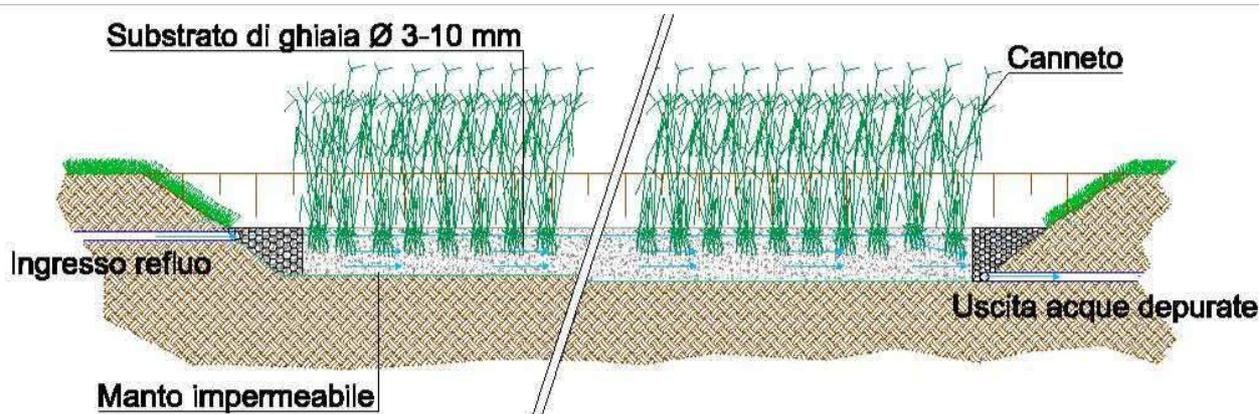
Il *medium*, costituito da sabbia, ghiaia e pietrisco, svolge un'importante azione di filtrazione meccanica, oltre a rappresentare, insieme agli apparati radicali delle idrofitte, il substrato di adesione delle colonie batteriche, funghi e protozoi, fattori della depurazione biologica.

Entrando nello specifico del processo depurativo, l'abbattimento degli inquinanti avviene nel modo seguente:

INQUINANTE	ABBATTIMENTO / RIMOZIONE
BOD₅	<ul style="list-style-type: none"> - Processi di filtrazione attraverso il medium - Degradazione organica da parte dei microrganismi
SST	<ul style="list-style-type: none"> - Processi di filtrazione attraverso il medium (soprattutto in prossimità dell'immissione dello scarico)
N	<ul style="list-style-type: none"> - Assunzione da parte delle piante (in minima parte) - Nitrificazione (microrganismi aerobici) - Denitrificazione (microrganismi anaerobici)
P	<ul style="list-style-type: none"> - Adsorbimento e precipitazione a carico del medium - Assunzione da parte delle piante (in minima parte)

L'efficienza di abbattimento e rimozione degli inquinanti si mostra particolarmente importante nei riguardi del **BOD₅**. Anche la rimozione dei **solidi sospesi** è ottima. La rimozione dell'**azoto** è invece contenuta: il processo di nitrificazione del refluo è limitato dalla carenza di ossigeno (soprattutto con BOD₅ molto elevato) e inoltre il tempo di ritenzione idraulica del refluo non è sufficientemente prolungato rispetto al tempo necessario alla reazione di nitrificazione che avviene con velocità ridotta (mentre la denitrificazione è sempre abbastanza veloce).

Nei riguardi del **fosforo** tale sistema raggiunge efficienze contenute rispetto alla rimozione della sostanza organica; l'assunzione radicale non è generalmente rilevante; le piante che presentano un maggior contenuto di fosforo sono l'*Eichornia crassipes* e *Pistia strationes* due idrofite galleggianti, mentre tra quelle emergenti, la più efficiente è la *Typha latifolia*, con assunzione giornaliera che oscilla tra 0,02-0,11 g/m²d⁻¹. Il meccanismo più efficace di abbattimento del nutriente risulta dal processo di precipitazione e successivo stoccaggio nei sedimenti. La sua rimozione può essere valutata in proporzione alla rimozione di sostanza organica, considerando che nei processi batterici è ipotizzabile che per 100 g di BOD rimosso venga eliminato 1 g di fosforo. I valori di efficienza del fosforo riportati in letteratura sono particolarmente variabili, principalmente in relazione alle caratteristiche del substrato impiegato come *medium*. Possono essere incrementati additivando un coagulante (cloruro ferrico).



Sistema a flusso sub-superficiale orizzontale - schema di funzionamento



Estate (agosto)



Inverno (gennaio)

Sistema a flusso sub-superficiale orizzontale dell'impianto di Vizzola Ticino (VA)

In merito al dimensionamento di tali sistemi, oltre a criteri di tipo empirico, come per i sistemi a flusso superficiale si applica il medesimo modello di progettazione di tipo razionale che considera il sistema depurativo come un reattore con flusso a pistone, per cui vale la seguente equazione:

$$BOD_e/BOD_i = e^{-k_T t}$$

Dove:

BOD_e = concentrazione di BOD affluente [$mgBOD\ l^{-1}$];

BOD_i = concentrazione di BOD influente [$mgBOD\ l^{-1}$];

k_T = costante della cinetica del primo ordine alla temperatura T [d^{-1}];

t = tempo di ritenzione idraulica effettivo [d];

la costante della cinetica k_T dipende dalla temperatura.

La relazione mostra come l'abbattimento del carico organico cresce al crescere del tempo di ritenzione idraulica effettivo del refluo nel sistema depurativo che, oltre ad essere condizionato dalla portata trattata e dal volume occupato dal medium, dipende anche dalla sua porosità, che stabilisce il volume realmente occupabile dal refluo.

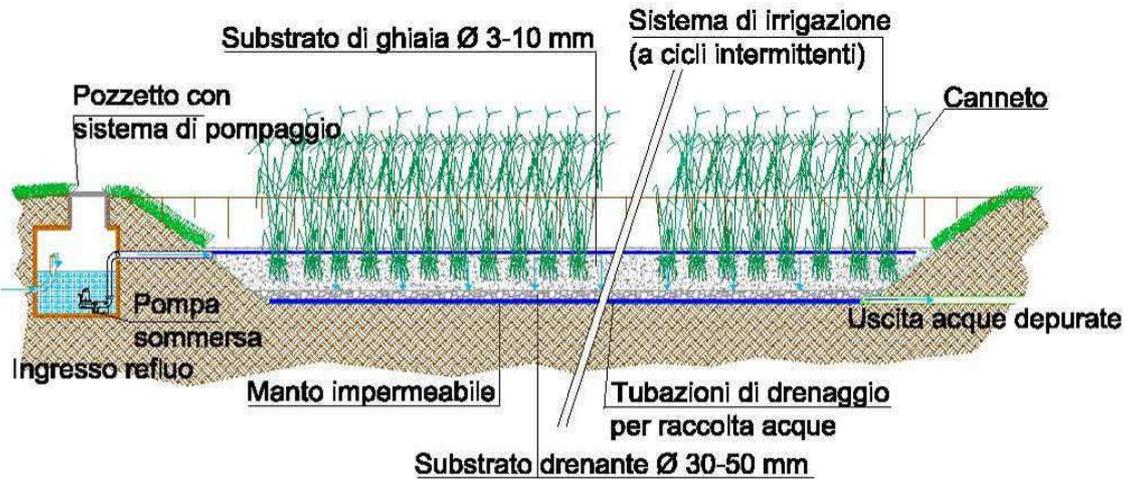
SISTEMI A FLUSSO SUB-SUPERFICIALE VERTICALE (V-SSF, VERTICAL SUB-SURFACE FLOW)

Rispetto al precedente, i sistemi a flusso sub-superficiale verticale sono caratterizzati da un flusso intermittente, alternando nel letto periodi di saturazione con periodi di esposizione all'atmosfera che favoriscono l'aerazione del medium. Il refluo, distribuito sull'intera superficie del letto impiegando una rete di tubazioni disperdenti, filtra gradatamente lungo il substrato verso il fondo, dove viene raccolto da un sistema di tubi drenanti che poi ne operano l'evacuazione (figura seguente). La periodica aerazione del substrato consente un'elevata ossidazione e degradazione della sostanza organica anche durante il periodo di riposo vegetativo e soprattutto incrementa notevolmente la capacità nitrificante. L'abbattimento e la rimozione degli inquinanti sono elevati. Questi sistemi sono particolarmente utilizzati per l'ottima efficienza nella rimozione dell'azoto ammoniacale e pertanto possono essere combinati con:

- sistemi a flusso sub-superficiale orizzontale (posti a monte);

- sistemi a flusso superficiale denitrificanti (posti a valle).

In particolare i 3 sistemi posti in serie permettono, oltre che l'elevata rimozione della sostanza organica, anche la rimozione di parte dell'azoto presente, grazie al processo di nitrificazione e denitrificazione.



Sistema a flusso sub-superficiale verticale schema di funzionamento



Estate (giugno)



Inverno (gennaio)

Sistema a flusso sub-superficiale verticale dell'impianto di Vizzola Ticino (VA)

Il dimensionamento si basa su criteri empirici ed, in particolare, sulla definizione dei carichi superficiali idraulici o inquinanti, oppure definendo un'opportuna superficie di trattamento per abitante servito.

3.6.4 CRITERI DI PROGETTAZIONE DI UN SISTEMA INTEGRATO

I criteri di progettazione di seguito esposti, riguardano un sistema integrato di fitodepurazione per il trattamento di reflui urbani, in cui sono presenti, i pretrattamenti, seguiti da un sistema combinato di tipologie di sistemi di fitodepurazione.

La quantificazione della produzione di acque reflue è espressa in Abitanti Equivalenti. Nel caso di un uso domestico, di tipo residenziale, è stimata una produzione giornaliera per ogni A.E. di BOD₅ di 60 g/d, che corrisponde alla produzione media giornaliera di un adulto, e una portata unitaria di circa 250 l/(ab * d).

A livello progettuale occorre tener conto dei seguenti aspetti:

- carico idraulico in ingresso e sue fluttuazioni;
- caratteristiche del refluo (concentrazione inquinanti e temperatura del refluo);
- superfici disponibili;
- condizioni climatiche.

Le acque nere o miste provenienti dall'abitato vengono convogliate, attraverso le condotte di recapito, alla zona in cui avvengono i trattamenti primari. Qui vengono sottoposti ad una **grigliatura fine** (spaziatura in genere di 1-2 cm) che permette di separare la componente più grossolana. Successivamente a tale processo il refluo viene immesso all'interno delle vasche "Imhoff". La **vasca Imhoff** costituisce un sistema fondamentale di trattamento primario dei reflui, impiegato principalmente per evitare fenomeni indesiderati di intasamento precoce dei letti fitoassorbenti. In essa avvengono contemporaneamente il processo di sedimentazione del liquame, che quello di digestione anaerobica fredda dei fanghi. Dal punto di vista costruttivo, esse sono composte da due comparti sovrapposti, connessi idraulicamente; il comparto superiore è destinato alla decantazione dei solidi sospesi, quello inferiore opera la digestione del fango costituito dalle particelle provenienti dalla parte superiore.

Il **sistema combinato di fitodepurazione**, prevede la presenza di stadi in serie. Gli impianti che danno i migliori risultati di abbattimento del carico di inquinanti sono composti da una successione a partire da:

- un primo stadio costituito da un letto di fitodepurazione a flusso sub-superficiale orizzontale, che riceve, a gravità, le acque dalla fossa imhoff;
- un secondo stadio costituito da un letto a flusso sub-superficiale verticale, funzionante mediante un sistema automatizzato che prevede il pompaggio del refluo (con cicli intermittenti), uscente dal letto a flusso orizzontale;
- un terzo stadio (che può risultare di affinamento di acque ormai depurate) costituito da un bacino a flusso superficiale che, può essere realizzato in continuità con bacino finale di affinamento, dando vita anche ad un ambiente acquatico naturaliforme.

Le acque depurate, in uscita dall'impianto, vengono poi recapitate mediante tubazioni, a un corpo idrico recettore o direttamente al suolo, secondo quanto previsto dalla normativa vigente. In alternativa, esse possono essere stoccate e reimpiegate successivamente a scopo irriguo.

Le superfici da adibire ai diversi stadi, oltre a dipendere ovviamente dal numero di utenti serviti (abitanti equivalenti), dipendono dalle concentrazioni degli inquinanti in ingresso e dai valori limite degli stessi in uscita.

La superficie specifica da adottare in climi temperati è di 4-5 m²/A.E., ripartibili nel caso di adozione di un sistema integrato in: 1,5-2,5 m²/A.E a flusso sub-superficiale orizzontale, 1-2 m²/A.E a flusso sub-superficiale verticale, 1 m²/A.E a flusso superficiale orizzontale. Per servire un nucleo abitativo di 400 residenti (corrispondenti a 400 A.E.) serve dunque una superficie utile di circa 2.000 m², cui vanno sommate le superfici da adibire ai trattamenti primari e alle aree perimetrali ai bacini (rilevati, percorsi di servizio,..) che portano ad un incremento di almeno il 50% dell'area necessaria.

3.6.5 COSTI DI REALIZZAZIONE

La definizione dei costi di realizzazione dei sistemi di trattamento naturali è determinata da una serie di fattori che, solo in parte, sono in funzione delle caratteristiche stazionali dell'area di ubicazione. Escludendo costi relativi all'acquisizione dei terreni, che possono variare anche notevolmente in funzione dell'uso del fondo e i costi del collettamento dalla rete fognaria all'impianto (che dipendono dalla distanza e dall'eventuale necessità di impiego di stazioni di sollevamento), le principali voci di costo sono ascrivibili a:

- operazioni di scavo e modellazione dei bacini,
- impermeabilizzazione con manti sintetici (HDPE, teli anti punzonanti, ecc.),
- riempimento con idonei substrati;
- impianto di idrofite;
- trattamenti primari (griglia, vasche Imhoff) e le varie tubazioni di recapito all'impianto, di collegamento tra i letti e le tubazioni di scarico al corpo idrico recettore.

Entrando maggiormente nel dettaglio, la realizzazione di letti a flusso sub-superficiale prevede:

- operazioni di scavo e di riporto con modellazione delle scarpate;
- eventuale posa di teli antipunzonanti a salvaguardia del manto impermeabile che vi viene posato sopra (HDPE, PVC con spessore di 2 mm);
- nello specifico, nei letti a flussi sub-superficiale orizzontale, posa di substrato di sabbia grossolana o ghiaia lavata (con matrice tra i 4 e i 7 mm di diametro), sistema di distribuzione del refluo lungo tutta la larghezza del letto con tubazioni disperdenti in PVC, tubazione drenante di raccolta del refluo lungo il lato opposto all'immissione, condotta di recapito al pozzetto di raccolta con sistema di pompaggio che immette il refluo (a pressione) al secondo stadio in modo intermittente e impianto dell'intera superficie del letto con piantine di Cannuccia di palude (*Phragmites australis*);
- nello specifico, nei letti a flussi sub-superficiale verticale, materiale di riempimento del letto costituito da uno strato medio di ghiaia a granulometria tra 3-10 mm e uno strato di fondo drenante a granulometria di 16-30 mm, sistema di distribuzione in pressione del refluo tramite una rete di tubi in PEAD posti su tutta la superficie del letto, sistema di raccolta dell'effluente costituito da tubazioni drenanti poste in uno strato di ghiaia grossolana su tutta la superficie del fondo del letto, condotta di recapito acque al pozzetto del terzo stadio, impianto dell'intera superficie del letto con piantine di Cannuccia di palude (*Phragmites australis*);
- nello specifico, nei letti a flussi superficiale, materiale di riempimento del letto (ghiaioso con matrice tra i 16 e i 30 mm di diametro), sistema di distribuzione del refluo lungo tutta la larghezza del letto, piantumazione di macrofite acquatiche.

Per impianti semplici, a servizio di un numero limitato di utenze, che sono composti da fossa Imhoff, un letto di fitodepurazione (in genere a flusso sub-superficiale orizzontale) e sistema di dispersione nel suolo, i costi di riferimento per la realizzazione sono indicativamente:

- per utenze fino a 10 A.E., un costo medio di circa € 1.200 per A.E.;
- per utenze fino a 25 A.E., un costo medio di circa € 900 per A.E.;
- per utenze fino a 50 A.E., un costo medio di circa € 750 per A.E.;

Esiste dunque un fattore di scala, per cui, per impianti di medie dimensioni, con utenze fino a 800/1.000 A.E., che sono costituiti da un sistema multistadio (con letti a flusso sub-superficiale

orizzontale e verticale, letti a flusso superficiale), si può stimare un costo compreso tra € 400-500 per A.E.

A tali importi vanno poi aggiunti, oltre ai costi relativi all'acquisizione delle aree, i costi relativi alle spese tecniche per indagini di dettaglio (rilievi topografici, indagini geologiche) e per la progettazione e la direzione lavori.

4 ESEMPI APPLICATIVI

La realizzazione di ecosistemi filtro, quali soluzioni alternative per il trattamento secondario di reflui urbani, oppure per l'affinamento di acque contenenti un certo carico inquinante residuo, costituisce una soluzione molto valida soprattutto in ambiti territoriali oggetto di particolare tutela. Come argomentato in precedenza, una caratteristica intrinseca in tali ambienti, è la loro multifunzionalità: nello svolgimento delle funzioni di depurazione per cui vengono principalmente realizzati, assolvono anche ad altre funzioni che, in contesti ambientali di pregio ambientale, diventano parimenti importanti.

In questi casi, la scelta del tipo di trattamento e le soluzioni tecniche possibili, tengono in grande considerazione anche gli aspetti ambientali, naturalistici, paesaggistici e di tipo fruizionale, optando per soluzioni tipologiche che meglio permettono di inserirsi in modo naturale ed ecologicamente corretto nel contesto territoriale presente.

In linea generale, le aree più idonee all'impiego di tali sistemi sono quelle agricole, quelle marginali e quelle seminaturali. In tali zone è infatti possibile attuare una buona integrazione con le funzioni autodepurative dell'ambiente naturale e inserirsi in modo armonioso nello specifico contesto presente.

La realizzazione di tali sistemi costituisce anche un'importante occasione per la riqualificazione e il ripristino di zone umide degradate, per il recupero di zone abbandonate, o per la nuova costituzione di piccole zone umide, partecipando all'importante e frammentata rete di aree umide nel nostro territorio. Una volta che l'ecosistema acquatico si sarà sviluppato, la presenza di un idoneo habitat ripariale permetterà l'insediamento spontaneo di vegetazione igrofila e idrofila, di microrganismi, di anfibi e anche di uccelli tipici di ambienti palustri.

Tutti questi aspetti diventano rilevanti soprattutto nel momento in cui si opera in ambiti territoriali particolari, come appunto le realtà dei parchi, in cui le problematiche ambientali sono particolarmente sentite e rivestono un ruolo fondamentale nella programmazione dei diversi interventi sul territorio.

In tali contesti, le scelte progettuali sono dunque rivolte ad analisi preliminari del contesto ambientale oltre che all'identificazione di soluzioni tecniche che favoriscano l'impiego di tecnologie ecocompatibili: dalle tecniche di ingegneria naturalistica per gli interventi di consolidamento dei versanti, all'impiego, ove possibile, di manti bentonitici per l'impermeabilizzazione dei bacini, all'impiego specie vegetali reperite tra la vegetazione autoctona locale, e alla scelta di aree che possano eventualmente valorizzare, riqualificare un particolare ambito territoriale.

Nel seguente capitolo viene raccontata l'esperienza di un lavoro svolto all'interno del Parco Lombardo della Valle del Ticino, nel territorio comunale di Vizzola Ticino, che ha riguardato la realizzazione di un sistema di fitodepurazione per la risoluzione di problematiche inerenti la rete fognaria, di cui la frazione dell'abitato di Castelnuovate era sprovvisto, nel contempo dando vita ad un ambiente umido, attualmente arricchito e frequentato da biocenosi naturali, dalla vegetazione acquatica che ha colonizzato gli ambienti, alla fauna locale, soprattutto la fauna anfibia che svolge gran parte del proprio ciclo vitale all'interno di aree umide e lacustri.

Trattasi di un intervento importante che ha trovato definizione finale tenendo in considerazione le migliori soluzioni tecnologiche, la tutela e la valorizzazione del contesto territoriale e ambientale di inserimento delle opere. Un ulteriore fattore che giustifica le scelte progettuali adottate, riguarda il contesto territoriale del Comune di Vizzola Ticino che, oltre a ricadere

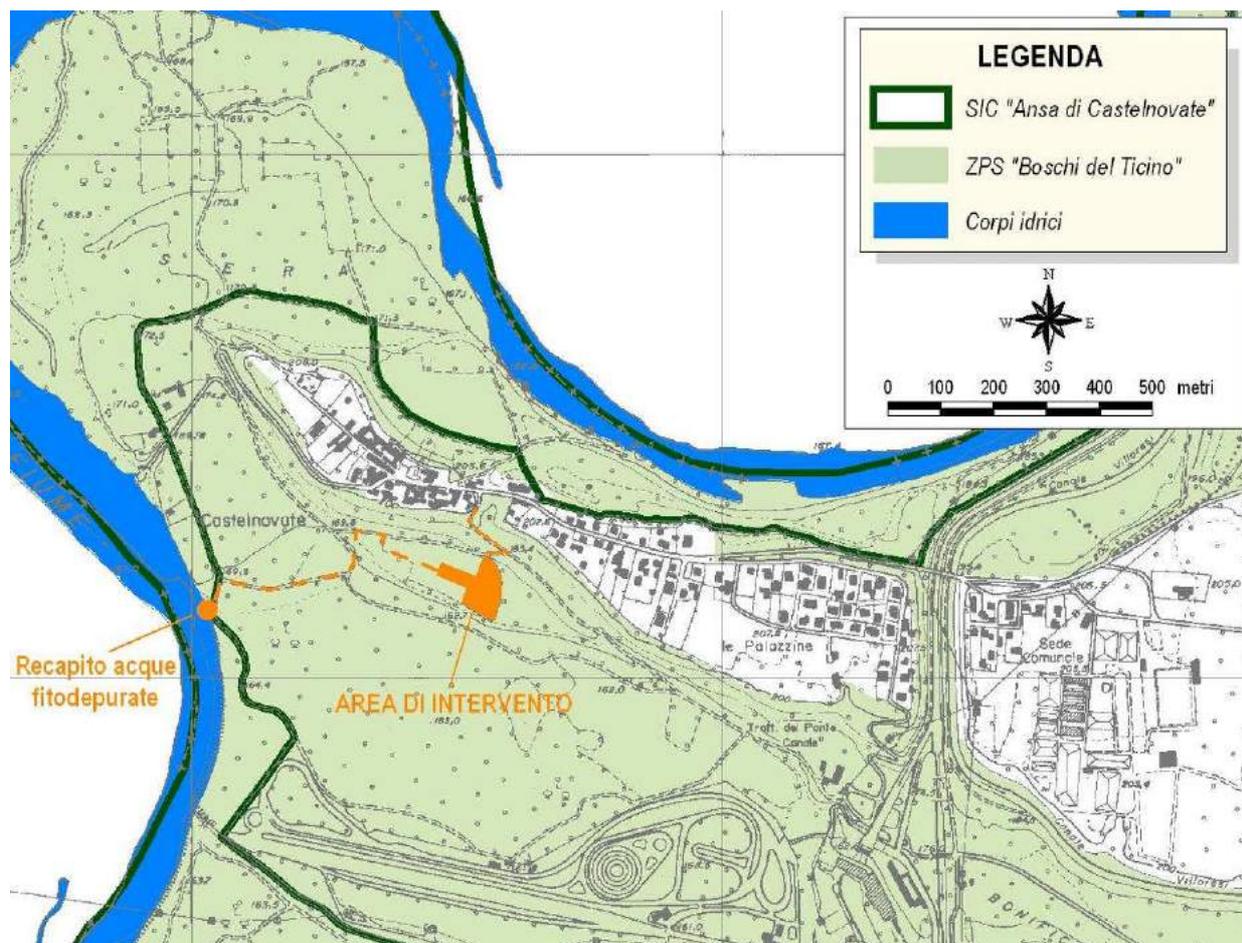
all'interno del territorio del Parco Lombardo della valle del Ticino, rientra anche nel Sito di Importanza Comunitaria (SIC) "Ansa di Castelnovate" e nella Zona di Protezione Speciale (ZPS) "Boschi del Ticino".

La presenza dei due siti di Rete Natura 2000 ha reso necessario anche la predisposizione di uno studio (Studio d'Incidenza) in cui sono stati individuati e valutati i principali effetti, diretti e indiretti, della realizzazione dell'intervento sulle componenti naturali presenti, accertando che non si pregiudichi la loro integrità, relativamente agli obiettivi di conservazione degli habitat e delle specie presenti nei siti.

4.1 L'esperienza di Vizzola Ticino

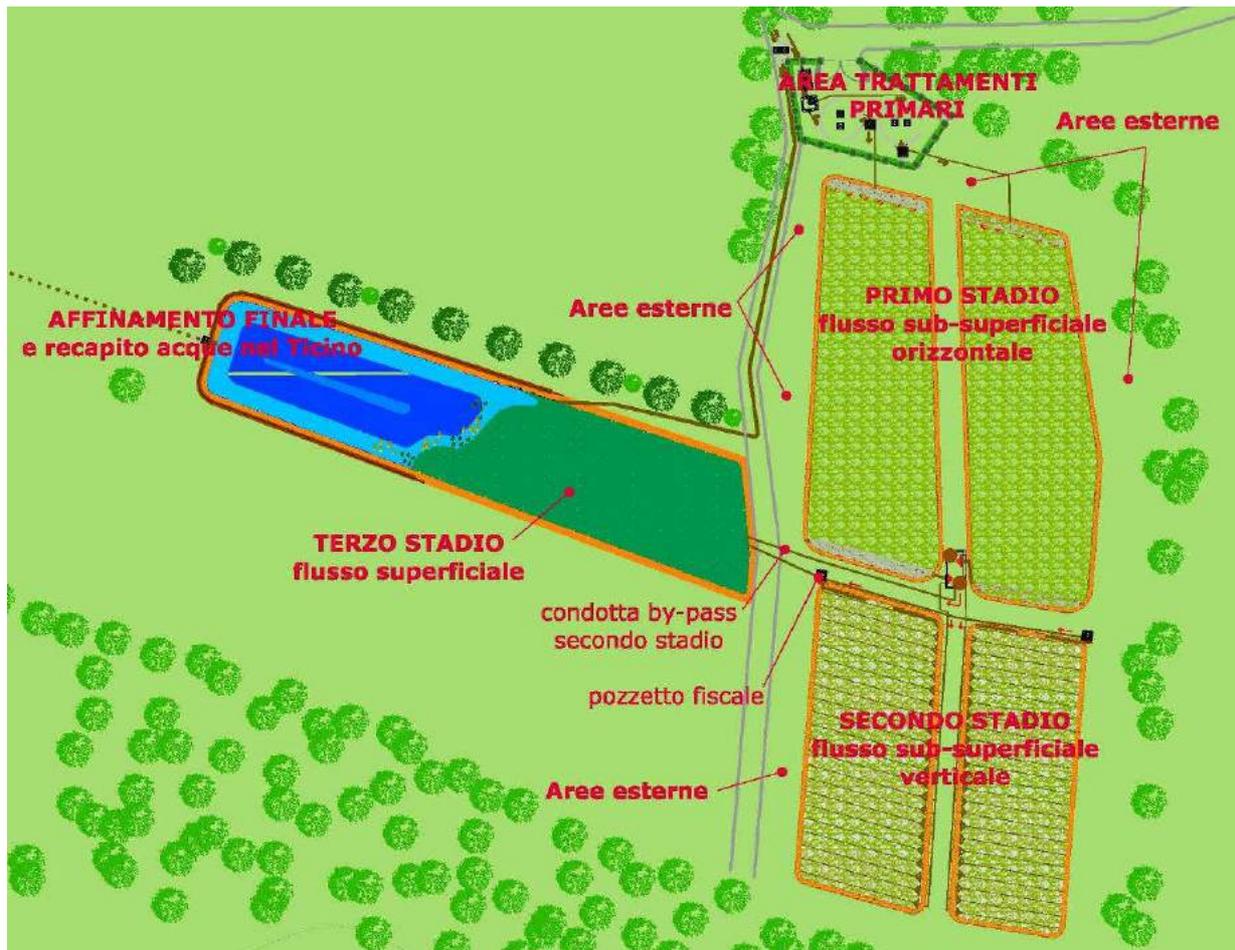
Il territorio comunale di Vizzola Ticino si trovava sprovvisto di un sistema fognario. La depurazione delle acque reflue (di origine civile e/o assimilabile a civile) veniva svolta a livello di ogni singola abitazione mediante dispositivi di tipo domestico (fosse Imhoff, fitodepurazione, sub-irrigazione, ecc.), con notevoli limitazioni di efficienza depurativa. Per risolvere tale situazione gli enti competenti si sono espressi favorevolmente in merito alla realizzazione della rete fognaria e alla tipologia depurativa adottata di un impianto di fitodepurazione.

La pertinenza del territorio di Vizzola Ticino nell'ambito del Parco Lombardo della Valle del Ticino e inoltre, la presenza e la vicinanza ad alcuni siti della Rete Natura 2000, hanno costituito fattori importanti che hanno giustificato le scelte progettuali adottate.



Localizzazione del sistema di fitodepurazione rispetto ai confini del SIC e della ZPS

Gli indirizzi del Parco infatti, laddove si debbano servire abitati di piccole dimensioni, prevede l'esecuzione di impianti di più facile e sicura gestione, quali quelli di fitodepurazione.



Schema del sistema integrato di fitodepurazione realizzato con laghetto finale di affinamento

L'ambito di ubicazione dell'intervento ha riguardato un'area, esterna all'abitato e circondata da un contesto boscato, caratterizzata da un uso agricolo dei fondi.



Situazione ante-operam: aree agricole

L'impianto di fitodepurazione realizzato è stato dimensionato per 800 Abitanti Equivalenti; attualmente tratta le acque reflue urbane dell'intera frazione comunale e le acque bianche di dilavamento superficiale di una parte dell'abitato. Con riferimento alla planimetria dell'impianto riportata, il sistema combinato di fitodepurazione è così costituito:

- collegamento della rete fognaria nera ad una grigliatura fine, tramite condotta adduttrice e successiva immissione delle acque in 2 vasche Imhoff dimensionate

ciascuna per 400 A.E., aventi la funzione di abbattimento dei solidi sedimentabili che altrimenti andrebbero ad intasare il medium del letto di fitodepurazione;

- Sistema combinato di fitodepurazione composto da:
 - 2 letti di fitodepurazione a flusso sub-superficiale orizzontale (1° stadio) posti in parallelo, che ricevono, a gravità, le acque dalla fossa Imhoff; ciascun letto è dimensionato con una superficie pari a 650 m², e sono seguiti da:
 - 2 letti di fitodepurazione a flusso sub-superficiale verticale (2° stadio) anch'essi posti in parallelo, funzionanti mediante un sistema automatizzato che prevede il pompaggio del refluo (con cicli intermittenti); ciascun letto è dimensionato con estensione pari a 525 m².
 - Un bacino a flusso superficiale (3° stadio) in continuità con un bacino finale di affinamento; nella parte a flusso superficiale verranno piantumate le macrofite acquatiche; i due bacini ricoprono complessivamente una superficie di 885 m², di aspetto naturaliforme con funzione, sia di affinamento finale delle acque depurate, che di riqualificazione paesaggistica del sito;
- Recapito finale delle acque al corpo idrico recettore, tramite condotta di scarico costituita da tubazioni in Calcestruzzo che, a partire dall'ultimo bacino di fitodepurazione, giungono fino al Ticino dopo circa 650 metri di percorso.

Le specie vegetali piantumate nel medium sono: *Phragmites australis* (1°, 2° e 3° stadio), *Typha latifolia*, *Juncus sp.* e *Iris pseudoacorus* (3° stadio). Tali specie sono innanzitutto note per l'ottima efficienza nei processi di fitoassorbimento, ed inoltre, appartengono alla flora acquatica tipica degli ambienti umidi presenti all'interno del Parco del Ticino. Per i primi tre stadi è stata valutata una superficie per A. E. pari a 4,1 m², che viene incrementata a 5,1 m²/A.E. in seguito all'affinamento nel laghetto naturale.

4.1.1 SPECIFICHE PROGETTUALI DEL SISTEMA DI FITODEPURAZIONE IMPIEGATO

I criteri impiegati per il dimensionamento del trattamento dei reflui hanno preso spunto dall'ampia trattazione internazionale esistente; in particolare si è fatto riferimento ai manuali¹ dell'Agenzia per la Protezione Ambientale degli Stati Uniti (U.S. EPA) in cui sono illustrate le linee guida per la progettazione degli impianti di fitodepurazione.

Il refluo uscente dai pretrattamenti di grigliatura e sedimentazione nelle vasche Imhoff, viene immesso nei 2 bacini a flusso sub-superficiale orizzontale posti in parallelo.

La scelta del medium, è stata oggetto di diversi studi in questi decenni; l'impiego di materiale pulito e lavato (sabbia e ghiaia) consente l'eliminazione di rischi di intasamento del letto con conseguente flusso superficiale.

¹ U.S. EPA, 1981. Process Design Manual – Land Treatment of Municipal Wastewater.

U.S. EPA, 1988. Design manual: Constructed Wetlands and Aquatic Plant Systems for Municipal Wastewater treatment.

U.S.EPA, 1993. Subsurface Flow Constructed Wetlands For Wastewater Treatment: A Technology Assessment.

U.S.EPA, 2000. Constructed Wetlands Treatment of Municipal Wastewaters, Manual, Cincinnati, Ohio, 154 pp.

Per quanto riguarda l'omogeneità dimensionale della miscela di inerte, è proposto che sia soddisfatta la condizione $G = \frac{D_{60}}{D_{10}} \leq 5$; altra condizione è che $D_{10} \geq 0,2[mm]$.

La scelta adottata è di **sabbia grossolana/ghiaia fine** con dimensione effettiva $D_{10} = 0,2[mm]$.

La scelta delle macrofite, è invece ricaduta sulle **cannucce di palude (*Phragmites australis*)**. Tale specie è quella maggiormente impiegata nei letti a flusso sub-superficiale, ciò a seguito sia della minore manutenzione necessaria, sia di una crescita più veloce rispetto ad altre specie. Inoltre l'apparato radicale della cannuccia raggiunge una profondità di 60 - 70 cm.

Il flusso idraulico è descritto dalla equazione di Darcy, che si applica nel caso di flusso in mezzi porosi:

$$Q = K_s \cdot A_T \cdot S$$

in cui:

- K_s = conducibilità idraulica (m/giorno)
- A_T = area trasversale (m^2)
- S = gradiente idraulico.

Dalla formula, fissati i valori, per singolo letto, di $Q = 59 m^3/d$, $K_s = 500 m/giorno$, valore tipico di sabbia grossolana e $S = 1,3 \%$, si ricava **l'area trasversale**, che nel caso specifico è risultata di $19 m^2$.

Determinata la A_T e imposta una **profondità minima** (d) del letto di $0,6 m$, si ottiene una **larghezza** di circa 16 metri, assunta come valore di progetto.

Il dimensionamento della superficie A_s del letto di macrofite, è stata effettuata con la formula che considera una cinetica di biodegradazione del primo ordine:

$$A_s = (\ln BOD_{IN} - \ln BOD_{US}) \cdot \frac{Q}{n \cdot K_T \cdot 0,95 \cdot d} [m^2]$$

in cui:

- BOD_{IN} e BOD_{US} = concentrazione del BOD in ingresso, di $263 mg/l$, ed uscita dall'impianto, di $80 mg/l$;
- n = porosità del letto, pari a $0,35$;
- d = profondità minima del letto di $0,6 m$;
- $K_T = K_{20} \cdot \theta^{(T-20)}$ (formula EPA, 1993) con $\theta = 1,06$ e $K_{20} = 1,104$

Dall'applicazione della formula si è ottenuta una superficie per singolo letto di $650 m^2$, che determina una lunghezza del letto di $43 m$. La superficie specifica per A.E. risulta di $1,7 m^2$. Tale valore specifico permette, durante la stagione invernale, la più limitante in termini di efficienze depurative, un buon abbattimento della sostanza organica che subirà un ulteriore degrado nelle fasi successive del processo.

Riassumendo, le caratteristiche dimensionali e costruttive di ciascun letto prevedono:

- Un pozzetto in ingresso e uno in uscita;

- Una larghezza di circa 16 m e una lunghezza di circa 43 m, per una superficie di circa 650 m² (di 1300 m² complessiva dei 2 letti);
- Sommergenza media nel medium di 0,6 m;
- Un sistema di distribuzione del refluo lungo tutta la larghezza del letto con tubazioni disperdenti in PEAD; le tubazioni prevedono lo scarico in una zona di dispersione in materiale grossolano (50-100 mm);
- Un sistema di raccolta dell'effluente costituita da una tubazione perforata lungo la larghezza del letto (sul lato opposto rispetto alla distribuzione) e immersa in una zona drenante di materiale grossolano (50-100 mm);
- Impermeabilizzazione del fondo con manto in PEAD ($K_s < 10^{-8}$ cm/s) per evitare la percolazione diretta nel suolo del refluo non ancora depurato;
- Materiale di riempimento del letto di sabbia ghiaiosa, con diametro medio di 8 -10 mm;
- Tempo di residenza medio dei reflui pari a 2 giorni.

Il dimensionamento dei 2 letti fitoassorbenti a flusso sub-superficiale verticale viene calcolato in base alla richiesta teorica di ossigeno necessario ai fini dell'ossidazione biologica del contenuto di azoto ammoniacale in ingresso, stimato in circa 45 mg/l e considerando un tasso di aerazione superficiale di Johansen di **25 g ossigeno disciolto/m²** giornalieri. Le caratteristiche dimensionali e costruttive di ciascun letto riguardano:

- Un pozzetto di ingresso, dotato di pompa, che immette il refluo (a pressione) a intermittenza di 15-20 cicli al giorno all'interno dei letti. Il volume del pozzetto è stimato di 7 m³, in base alla portata media e al numero dei cicli giornalieri; il manufatto è dotato di by-pass.
- Una larghezza di circa 15 m e una lunghezza di circa 35 m, per una superficie di circa 525 m² (di 1050 m² complessiva dei 2 letti);
- Un sistema di distribuzione in pressione del refluo tramite una rete di tubi in PEAD posti su tutta la superficie del letto, tali da determinarne il completo allagamento del bacino;
- Un sistema di raccolta dell'effluente costituito da tubazioni drenanti (diametro di circa 100 mm) poste in uno strato di ghiaia grossolana su tutta la superficie del fondo del letto;
- Impermeabilizzazione del fondo con manto in PEAD ($K_s < 10^{-8}$ cm/s) per evitare la percolazione diretta nel suolo del refluo non ancora depurato;
- Materiale di riempimento del letto costituito da uno strato medio di 65 cm di ghiaia a granulometria tra 3-10 mm e uno strato di fondo drenante di 15 cm a granulometria di 16-30 mm;

Il terzo stadio di fitodepurazione a flusso superficiale prevede la dispersione del refluo, già parzialmente depurato, all'interno di un bacino con idrofite emergenti che circondano, per la

maggior parte del perimetro il laghetto finale di affinamento, realizzando con esso un sistema integrato.

Le caratteristiche dimensionali e costruttive del terzo stadio riguardano:

- Due pozzetti che consentono di convogliare i reflui uscenti dal secondo stadio nel terzo stadio;
- la condotta che convoglia le acque bianche pretrattate nel laghetto finale;
- un by-pass che permette di convogliare le acque uscenti dal secondo stadio direttamente nella condotta delle acque bianche che, unitamente ai dispositivi idraulici di regolazione dei livelli inseriti nel pozzetto di recapito al corpo idrico recettore, consente di mettere in asciutta il terzo stadio, in caso si necessiti di manutenzione;
- La superficie complessiva di estensione di 445 m²;
- Un sistema di distribuzione del refluo lungo tutta la larghezza dei due letti; le tubazioni prevedono lo scarico in una zona di dispersione in materiale grossolano (50-100 mm);
- Impermeabilizzazione del fondo con manto in PEAD ($K_s < 10^{-8}$ cm/s) per evitare la percolazione diretta nel suolo del refluo non ancora depurato;
- Materiale di riempimento del letto di tipo ghiaioso (16-30 mm) con uno strato di 50 cm;
- Profondità dal pelo libero dell'acqua di 40 cm.

Il terzo letto è direttamente collegato con il laghetto di affinamento finale, le cui caratteristiche dimensionali e costruttive sono:

- Superficie complessiva di circa 440 m² in continuità con il bacino a flusso superficiale (terzo stadio) svolgendo, oltre un affinamento delle acque, un importante ruolo di riqualificazione paesaggistica del sito; per tale motivo la forma dei due bacini non è strettamente geometrica, nei limiti dello spazio a disposizione essi assumono una fisionomia naturaliforme;
- Il bacino è localizzato al di sotto del piano campagna con un franco di 70 cm; la profondità massima dal pelo libero è di 1,80 m, lungo il perimetro del laghetto, mentre presenta una striscia centrale di profondità di 1,40 m, al fine di diversificare l'habitat acquatico;
- Impermeabilizzazione del fondo con manto in PEAD ($K_s < 10^{-8}$ cm/s) per evitare la percolazione diretta nel suolo del refluo non ancora totalmente depurato;
- Copertura del fondo con uno strato di sabbia e ghiaia di 20 cm;
- Piantumazione delle aree spondali con vegetazione acquatica galleggiante e sommersa;

4.1.2 DOCUMENTAZIONE FOTOGRAFICA DELLA REALIZZAZIONE ED EVOLUZIONE DELL'IMPIANTO

Di seguito vengono riportate delle immagini che documentano la fase di cantiere dell'intervento (dall'autunno 2006 a marzo 2007) e l'evoluzione del sistema nei due anni successivi (2007-2008).

FASE DI CANTIERE:



Particolare della fase di realizzazione dei letti di fitodepurazione e del laghetto finale



Panoramiche area fitodepurazione e area trattamenti preliminari



Posa delle macrofite acquatiche (Phragmites australis)

EVOLUZIONE DELL'IMPIANTO – LETTI DI FITODEPURAZIONE:



Panoramiche sistema dei letti di fitodepurazione realizzati (Marzo 2007)



Letto a flusso sub-superf. orizzontale (giugno 2007)



Letto a flusso sub-superf. verticale (giugno 2007)



Letto a flusso sub-superf. orizzontale (sett. 2007)



Letto a flusso sub-superf. verticale (sett. 2007)



Letto a flusso sub-superf. orizzontale (feb. 2008)



Letto a flusso sub-superf. verticale (feb. 2008)



Letto a flusso sub-superf. orizzontale (giugno 2008)



Letto a flusso sub-superf. verticale (giugno 2008)

EVOLUZIONE DELL'IMPIANTO – TERZO STADIO E BACINO FINALE DI AFFINAMENTO:



Panoramiche terzo stadio e laghetto finale di affinamento (marzo 2007)



Panoramiche (inverno 2008)



Panoramiche (agosto 2008)

4.2 La gestione

La manutenzione dell'impianto di fitodepurazione, pur non essendo particolarmente complessa, necessita di interventi frequenti e regolari che riguardano:

- **le aree esterne all'impianto** che riguardano la gestione dei manti erbosi, delle essenze arboree e la sistemazione generale del verde circostante;
- **i trattamenti primari** che riguardano il controllo e la pulizia della griglia e delle vasche Imhoff;
- **i letti di fitodepurazione a flusso sub-superficiale orizzontale** che riguardano il controllo delle specie avventizie che potrebbero entrare in competizione col canneto e la gestione del canneto stesso;
- **i letti di fitodepurazione a flusso sub-superficiale verticale** che riguarda la gestione della vegetazione come al punto precedente e inoltre, il controllo del sistema di pompaggio e del sistema di distribuzione del refluo nei letti;
- **il letto di fitodepurazione a flusso superficiale** che riguarda il contenimento delle specie avventizie lungo le sponde e nel letto e inoltre, la gestione del canneto;
- **il bacino finale di affinamento** che riguarda il contenimento delle specie avventizie e l'eventuale contenimento delle piante acquatiche.

Di seguito sono descritte, in forma schematica, le attività previste in ciascuna delle aree che costituiscono l'impianto di fitodepurazione di Vizzola Ticino, valide per tutti gli impianti che adottano tipologie assimilabili a quelle realizzate.

4.2.1 LE AREE ESTERNE AGLI IMPIANTI

Le aree esterne agli impianti di depurazione necessitano interventi periodici, al fine di:

- garantire l'accessibilità ai sistemi di fitodepurazione con piccoli mezzi per la manutenzione degli stessi;
- contenere lo sviluppo di erbe e arbusti infestanti, potenziali competitori delle piante acquatiche
- contenere lo sviluppo e l'eccessiva crescita di arbusti spondali onde evitare un eccessivo ombreggiamento sui bacini.

Le operazioni di manutenzione sono relative a:

INTERVENTI	FREQUENZA	OSSERVAZIONI
<i>Taglio del cotico erboso</i>	4 tagli anno	È un'operazione di normale gestione di tappeti erbosi che inoltre può contenere la diffusione di sementi di erbacee all'interno dei letti.
<i>Decespugliamento delle scarpate dei letti e dei bacini</i>	4 tagli anno	Intervento da eseguire lungo le scarpate invase da rovi, arbusti e erbe infestanti eseguito con mezzi meccanici semoventi compreso l'onere per il trasporto a rifiuto e/o smaltimento del materiale di risulta in discariche idonee poste in un raggio di 10 km dal cantiere.

4.2.2 L'AREA DEI TRATTAMENTI PRIMARI

Nel trattamento primario il regolare svolgimento delle operazioni di manutenzione garantisce il buon funzionamento e rendimento depurativo negli stadi successivi. Tali operazioni sono finalizzate alla separazione e raccolta della frazione sedimentabile dei reflui (efficienza depurativa sui solidi presenti di circa il 30%) garantendo quindi, un ottimale funzionamento dello stadio successivo nei letti di fitodepurazione impendendone il precoce intasamento da parte della componente sedimentabile.

Le operazioni di seguito descritte riguardano le operazioni particolari di manutenzione che richiedono l'intervento di personale e/o l'intervento di mezzi.

INTERVENTI	FREQUENZA	PERSONALE	OSSERVAZIONI
<i>Controllo a vista dei pozzetti e delle tubazioni di distribuzione del refluo nel primo letto</i>	4 interventi anno	Addetto	Al fine di evitare l'accumulo di sedimenti sul fondo del pozzetto è necessario provvedere alla periodica rimozione dei fanghi di deposito e lavaggio con acqua a pressione. Tale operazione può interessare anche il tubo di distribuzione nel primo letto.
<i>Ispezioni da parte degli addetti alla manutenzione comprensiva di pulizia della grigliatura manuale</i>	Almeno ogni 7 giorni	Addetto	Durante i sopralluoghi verrà rimosso, raccolto e smaltito il materiale trattenuto dalla griglia a pulizia meccanica come previsto dalla normativa vigente.

<p><i>Interventi di ispezione e spurgo della vasca Imhoff per ripristinare la corretta capacità depurativa.</i></p>	<p>Ogni 6 mesi</p>	<p>Impresa specializzata</p>	<p>Tale operazione prevede la raccolta e lo smaltimento finale dei fanghi depositati nella fossa come previsto dalla normativa. Questa operazione periodica è di fondamentale importanza per evitare il trasporto di materiale sedimentabile nei letti di fitodepurazione ed il loro intasamento precoce.</p>
---	--------------------	------------------------------	---

4.2.3 IL SISTEMA A FLUSSO SUB-SUPERFICIALE ORIZZONTALE

Nei letti di fitodepurazione la manutenzione ha lo scopo principale di verificare periodicamente la regolare crescita e affermazione del canneto (coltura annuale) e il corretto deflusso delle acque all'interno dei letti. Sono dunque previsti interventi periodici, al fine di:

- Contenere lo sviluppo e la competizione di specie avventizie;
- Garantire nel tempo l'efficienza depurativa del canneto.

Le operazioni di manutenzione sono relative a:

INTERVENTI	FREQUENZA	OSSERVAZIONI
<p><i>Eliminazione della vegetazione avventizia</i></p>	<p>6 interventi/anno primi 3 anni; 3 interventi/anno dal quarto anno in poi</p>	<p>Tale operazione da svolgersi manualmente sulla superficie e lungo le sponde del letto, è necessaria soprattutto fino ai 3 anni dall'impianto, per eliminare la competizione di specie avventizie che ostacolerebbero la colonizzazione del canneto. Dal terzo anno, avvenuta l'affermazione e la diffusione del canneto, si potrà ridurre la frequenza degli interventi.</p>
<p><i>Gestione del canneto</i></p>	<p>Dal terzo anno in poi ogni 3 anni</p>	<p>La gestione del canneto comporta due operazioni da effettuare al termine della stagione vegetativa:</p> <ul style="list-style-type: none"> - la periodica raccolta dei culmi secchi, dato l'accumulo annuale dei culmi della graminacea, eliminando la biomassa che annualmente si deposita sulla superficie del letto; - diradare il canneto per mantenere una regolare copertura del canneto all'interno dell'intera superficie del letto (il canneto risulterà particolarmente denso in testata al letto per il maggior carico organico del refluo all'ingresso).

Specificatamente per tale stadio, quale operazione di manutenzione straordinaria, potrà risultare necessario una rimozione della prima parte del ghiaietto del letto ogni 7-10 anni, reimpiegando comunque sia il materiale inerte, previo lavaggio, sia parte dei rizomi del canneto presente, dato il maggior rischio e probabilità di intasamento della prima parte del letto, posto a valle dei trattamenti primari.

4.2.4 IL SISTEMA A FLUSSO SUB-SUPERFICIALE VERTICALE

Similmente allo stadio precedente, i letti a flusso sub-superficiale verticale necessitano di interventi periodici, al fine di:

- Verificare il corretto funzionamento del sistema di pompaggio all'ingresso dei letti;
- Pulizia del sistema di distribuzione dei reflui nei letti;
- Contenere lo sviluppo e la competizione di specie avventizie;
- Garantire nel tempo l'efficienza depurativa del canneto.

Le operazioni di manutenzione sono relative a:

INTERVENTI	FREQUENZA	OSSERVAZIONI
<i>Eliminazione della vegetazione avventizia</i>	6 interventi/anno primi 3 anni; 3 interventi/anno dal quarto anno in poi	Tale operazione, da svolgersi manualmente sulla superficie e lungo le sponde del letto, è necessaria soprattutto fino ai 3 anni dall’impianto, per eliminare la competizione di specie avventizie che ostacolerebbero la colonizzazione del canneto. Dal terzo anno, avvenuta l’affermazione e la diffusione del canneto, si potrà ridurre la frequenza degli interventi
<i>Gestione del canneto</i>	Dal terzo anno in poi ogni 3 anni	La gestione del canneto comporta due operazioni da effettuare al termine della stagione vegetativa: - la periodica raccolta dei culmi secchi , dato l’accumulo annuale, eliminando la biomassa che annualmente si deposita sulla superficie del letto; - diradare il canneto per mantenerne una regolare copertura sull’intera superficie del letto (il canneto risulterà particolarmente denso in testata al letto per il maggior carico organico del refluo all’ingresso).
<i>Controllo del sistema di pompaggio</i>	Settimanalmente	Tale operazione consiste nel verificare il funzionamento delle pompe ed eventualmente controllare il pozzetto di alloggiamento delle stesse verificandone il corretto funzionamento
<i>Gestione del sistema di distribuzione del refluo</i>	Controllo mensile Trattamento in funzione dell’intasamento	Le tubazioni che distribuiscono il refluo possono essere oggetto di parziale intasamento soprattutto nei primi anni rendendo necessario la verifica periodica del corretto funzionamento del sistema di dispersione. Nel caso si evidenzi l’intasamento anche parziale dello stesso potrà essere effettuato un trattamento di pulizia delle tubazioni di distribuzione. Nel periodo invernale (dicembre-gennaio), quando le temperature scendono ampiamente sotto lo zero, è possibile escludere il sistema di irrigazione soggetto a gelate, al fine di evitare problemi alle pompe. Il refluo viene comunque inviato al secondo stadio che sarà predisposto per funzionare come il letto a flusso sub-superficiale orizzontale, in modo analogo al primo.

4.2.5 IL LAGHETTO FINALE DI AFFINAMENTO

Il sistema di l’affinamento finale non è soggetto a tutte le operazioni di manutenzione effettuate normalmente. Essendo infatti posizionato a valle dei letti a flusso sub-superficiale non si avrà deposito di sedimenti apprezzabile sul fondo del bacino.

Le uniche operazioni interessano la rimozione dei residui vegetali eventualmente caduti e accumulatisi e lo sfolto della vegetazione acquatica che dovesse svilupparsi eccessivamente.

INTERVENTI	FREQUENZA	OSSERVAZIONI
<i>Gestione delle piante acquatiche</i>	Ogni anno	La vegetazione acquatica fitodepurante (ad es. lemnaee) deve essere periodicamente sfolto per prevenire l’eccessivo rilascio di sostanza organica e di nutrienti derivante dall’accumulo di biomassa sul fondale.

4.2.6 COSTI DI GESTIONE

In base alle operazioni descritte e sintetizzate nei precedenti paragrafi, vengono quindi definite le voci di costo principali della gestione del sistema. Riassumendole in sintesi tali attività riguardano:

- **Ispezioni settimanali dell'impianto:** il costo è relativo all'operatore che effettua il sopralluogo;
- **Trattamenti primari (vasche Imhoff):** il costo è relativo alle operazioni di spurgo e smaltimento del sedimento che si deposita sul fondo della vasca;
- **Gestione dei letti:** il costo è relativo agli operatori che effettuano il taglio e l'eliminazione della vegetazione, e la gestione del canneto;
- **Consumo di energia elettrica:** il costo è relativo al funzionamento della grigliatura e del sistema di pompaggio per il funzionamento a cicli intermittenti del secondo stadio (letto a flusso sub-superficiale verticale).

A seconda della dimensione dell'impianto realizzato possono essere pertanto stimati dei costi annuali di gestione, di seguito sintetizzati:

- **Per impianti inferiori ai 100 A.E.,** si stima un costo *circa € 50/A.E.*;
- **Per impianti con 100 - 300 A.E.,** si stimano complessivamente € 5.000/10.000, *che corrispondono a circa € 50-35/A.E.*;
- **Per impianti con 800 - 1.000 A.E.,** si stimano complessivamente € 20.000/25.000, *che corrispondono a circa € 25/A.E.*;

5 LETTERATURA CONSULTATA

- AA.VV., 2001.** *Sistemi di fognatura – Manuale di progettazione.* Hoepli
- Bonomo L. & Pastorelli G., 1996.** Processi di fitodepurazione: richiami teorici e rassegna delle principali applicazioni, in *Recenti tendenze nella depurazione delle acque reflue: innovazioni tecnologiche e di processo*, Vol.1, cap. XVII pp 1-78.
- Brix, 1994.** *Use of constructed wetlands in water pollution control: historical development, present status, and future perspectives.* Wat. Sci. Tech., 29 (4), 71-78.
- Consorzio Parco Ticino, 1983.** La flora acquatica del Parco Ticino. Gruppo Editoriale Fabbri.
- Fornasari L. & Vigorita V., 2004.** Scopri la fauna della Lombardia. Regione Lombardia – DG Agricoltura. Ramberti Arti Grafiche.
- Ghezzi P. F., Bonazzi G., 1981.** *I macroinvertebrati nella sorveglianza ecologica dei corsi d'acqua.* Consiglio Nazionale delle Ricerche.
- Giunta della Regione Lombardia - settore Ecologia e Ambiente, 1985.** *Piano Regionale di risanamento delle acque.*
- Provincia di Perugia - Centro Studi, International Association on Water Quality, 1995.** *International Seminary: Natural and constructed wetlands for waste water treatment and reuse.*
- Richardson C.J. & Craft C.B., 1993.** *Effective phosphorus retention in wetland: facts or fiction?*. In "Constructed Wetlands for Water Quality Improvement", Moshiri G.A. (ed.) Lewis Publisher, Boca Raton, FL, pp. 271-282.
- Stowell R., Ludwig R., Colt J., Tchobanoglous G. 1981.** *Concept in aquatic treatment system design.* J. Env. Div., ASCE, 107 (EE5), 919-940.
- U.S. EPA, 1988.** *Design manual: Constructed Wetlands and Aquatic Plant Systems for Municipal Wastewater treatment.*
- U.S. EPA, 1993.** *Handbook: Urban Runoff Pollution Prevention and Control Planning.*
- U.S. EPA, 1993.** *Seminar Publication: National Conference On Urban Runoff Management: Enhancing Urban Watershed Management at the Local, Country, and State Levels.*
- U.S. EPA, 1993.** *Guidance Specifying Management Measures For Sources Of Nonpoint Pollution In Coastal Waters.*
- U.S. EPA, 1993.** *Subsurface Flow Constructed Wetlands For Wastewater Treatment: A Technology Assessment.*
- U.S. EPA, 2000.** *Manual: Constructed Wetlands Treatment of Municipal Wastewater.* EPA/625/R-99/010, 154 pp.
- Vigorita V. & Cucè L., 2008.** La fauna selvatica in Lombardia. Rapporto 2008 su distribuzione, abbondanza e stato di conservazione di uccelli e mammiferi. Regione Lombardia – DG Agricoltura.
- Vismara R., 1982.** *Depurazione biologica – Teoria e processi.* Hoepli, 468 pp.
- Vismara R., Egaddi F., Garuti G., Pergetti M., Pagliughi A, 2000.** *Linee guida per il dimensionamento degli impianti di fitodepurazione a macrofite radicate emergenti: gli esempi internazionali ed una proposta.* IA Ingegneria ambientale vol. XXIX, pp 168-176.