UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA

DIPARTIMENTO DI SCIENZE CHIMICHE

DIPARTIMENTO DI AGRONOMIA ANIMALI ALIMENTI RISORSE NATURALI E AMBIENTE

CORSO DI LAUREA IN SCIENZE E TECNOLOGIE PER L'AMBIENTE

INDIVIDUAZIONE DI STRATEGIE PER LA VALORIZZAZIONE DI PHRAGMITES AUSTRALIS IN AMBITO AGRICOLO ED AMBIENTALE E COSTRUZIONE DI UN INVENTARIO PER L'APPLICAZIONE DELLA METODOLOGIA LIFE CYCLE ASSESSMENT

Relatore: Prof. Marco Schiavon

Laureanda: Giulia Daga

Matricola n.: 2043364

Anno accademico 2024/2025

Indice

1. **Introduzione** (descrizione degli obiettivi della tesi e sintesi dei contenuti dei capitoli successivi)……5

2. **Materiali e metodi – Ricerca bibliografica**..... 7

3. **Risultati e discussione**..... 9

3.1 Analisi della bibliografia (riassunto degli articoli individuati) 9

3.2 Costruzione dell'inventario per l'applicazione di un approccio LCA..... 20

4. **Conclusioni**..... 25

5. **Bibliografia**..... 27

1. Introduzione

La gestione sostenibile dei canneti rappresenta una sfida rilevante sia dal punto di vista ambientale che socio-economico, richiedendo un approccio integrato che coniughi tutela della biodiversità, qualità delle risorse idriche e opportunità di valorizzazione delle biomasse. Negli ultimi anni l'interesse verso soluzioni di valorizzazione delle biomasse vegetali è aumentato, anche in relazione agli obiettivi di economia circolare e riduzione dell'impatto ambientale, spingendo la ricerca verso metodi innovativi di raccolta, trattamento e riutilizzo che consentano di trasformare le specie emergenti in risorse utili per scopi agricoli, energetici e ambientali.

La tesi si propone di:

- raccogliere e analizzare in modo sistematico la letteratura scientifica disponibile sul tema, selezionando studi chiave che trattano la gestione sostenibile di *Phragmites australis*, i flussi di biomassa e le potenziali applicazioni;
- sviluppare un approccio metodologico per applicare successivamente la metodologia Life Cycle Assessment (LCA) a queste problematiche, utilizzando strumenti di supporto come SimaPro e altri software di analisi del ciclo di vita, al fine di costruire un inventario affidabile di dati ambientali e di impatto;
- identificare possibili sviluppi futuri e sinergie con politiche ambientali, agronomiche e di gestione territoriale che possano supportare decisioni evidence-based.

Il lavoro è articolato come segue: nel secondo capitolo sono descritti i materiali e i metodi utilizzati nella ricerca bibliografica, includendo la descrizione delle banche dati consultate (es. Web of Science, Scopus, Google Scholar, PubMed), le parole chiave impiegate (es. "Phragmites australis", "reed management", "biomass valorization", "LCA", "environmental impacts" e variabili correlate), e una sintesi del numero di articoli individuati per ciascun ambito di ricerca; nel terzo capitolo vengono presentati e discussi i risultati, suddivisi in due sezioni (analisi della bibliografia, approccio LCA e impiego del software SimaPro). Infine, nel quarto capitolo sono riportate le conclusioni, con un focus su come i risultati ottenuti possano essere integrati in pratiche gestionali e politiche di sostenibilità.

In particolare andremo ad analizzare i problemi ambientali che la canna palustre (*Phragmites australis*) può provocare, come si possono risolvere e/o come andrebbero gestite queste piante. Verranno utilizzati tre casi studio per poter

analizzare meglio le problematiche e soprattutto per avere dati di riferimento da poter eventualmente inserire in un database per un software commerciale come SimaPro per l'applicazione di LCA. In particolare, verrà illustrato come la gestione della canna palustre possa influire su parametri ambientali quali la biodiversità, la qualità dell'acqua, la gestione del carbonio e l'impronta ecologica complessiva degli scenari di utilizzo. I tre casi studio proposti permetteranno di confrontare diverse strategie di controllo, valorizzazione e riutilizzo della biomassa, nonché di evidenziare criticità e opportunità legate all'applicazione della metodologia Life Cycle Assessment (LCA) e di fornire un quadro metodologico strutturato per la fase di raccolta, elaborazione e interpretazione dei dati ambientali. L'approccio è orientato a offrire una visione integrata delle dinamiche ecologiche e socio-economiche associate alla gestione delle canne palustri, evidenziando i limiti metodologici e proponendo soluzioni pratiche per migliorare l'accuratezza e l'utilità delle analisi LCA nei contesti agricoli ed ambientali.

2. Materiali e metodi – Ricerca bibliografica

La ricerca bibliografica è stata condotta tramite una raccolta sistematica di fonti provenienti da banche dati nel panorama scientifico, tra cui Scopus, Google Scholar e Web of Science, al fine di garantire una copertura ampia e affidabile della letteratura pertinente al tema di studio. In particolare, sono state impiegate una serie di parole chiave mirate e complementari, tra cui “Phragmites australis”, “reeds management”, “biomass valorization”, “Life Cycle Assessment”, “bioenergy” e “phytoremediation”, per intercettare articoli che trattino sia aspetti ecologici legati alla gestione dei canneti sia potenziali applicazioni della biomassa ricavata in ambiti energetici e ambientali, nonché studi di valutazione ambientale tramite approcci LCA.

Per assicurare la selezione di materiale rilevante e di qualità, sono stati fissati criteri di inclusione ed esclusione: sono stati considerati articoli pubblicati negli ultimi anni, privilegiando studi che discutono temi di sinergia tra gestione ecosistemica dei canneti e potenziale valorizzazione della biomassa, casi di studio concreti incentrati su valutazioni ambientali e metodologie LCA. Inoltre, sono state consultate review e articoli di riferimento riportati nelle bibliografie di studi principali per captare eventuali lavori non indicizzati direttamente nelle ricerche iniziali ma pertinenti al contesto di ricerca.

La restituzione dei risultati è stata strutturata per aree tematiche, includendo: (i) aspetti ecologici e gestionali della gestione dei canneti (ecologia delle popolazioni, dinamiche di crescita, impatti sulla biodiversità e sulla qualità delle acque, metodi di controllo e riuso sostenibile della biomassa), (ii) potenziali applicazioni della biomassa di *Phragmites australis* in ambito energetico e ambientale (biomassa come fonte rinnovabile, processi di conversione, impatti ambientali positivi e negativi), (iii) casi di studio relativi a valutazioni ambientali tramite LCA (metodologia, confidenza dei dati, sistema di prodotto, confini di sistema, scenari di valorizzazione). Ogni segmento è stato annotato con riferimenti bibliografici chiave, anno di pubblicazione, paese di provenienza e tipo di studio, al fine di facilitare l’estrazione mirata delle informazioni per la creazione dell’inventario LCA e per l’analisi critica nella sezione 3.1., facilitando l’individuazione rapida dei parametri necessari per l’engineering del dataset e per la definizione dei confini di sistema nelle valutazioni LCA. In particolare, l’insieme di fonti è stato selezionato per coprire sia contributi interdisciplinari sia studi specifici su *Phragmites australis*, con attenzione a dati empirici e metodologici riutilizzabili nell’inventario LCA. In questa sezione si espongono in modo strutturato i criteri di selezione e le fonti principali che hanno guidato l’elaborazione dell’inventario per l’applicazione della

metodologia Life Cycle Assessment, nonché le procedure adottate per la codifica dei parametri e l’organizzazione del dataset destinato all’analisi LCA.

3. Risultati e discussione

3.1 Analisi della bibliografia

Dalla revisione degli articoli emergono diversi approcci alla gestione e valorizzazione dei canneti. Alcuni studi si sono focalizzati sugli aspetti ecologici e di biodiversità, altri sulle potenzialità energetiche della biomassa ricavata.

L'obiettivo di questo lavoro è quello di analizzare il ruolo dei canneti e della loro biomassa una volta rimossi dall'ambiente in ambito economico ambientale. In particolare andremo ad analizzare il possibile utilizzo in bacini di fitodepurazione, nella produzione di biogas e come accumulo di azoto.

Il primo caso di studio analizzato [1] riguarda la *Phragmites australis* nel lago Dongting in Cina, che conduce un'analisi completa del valore ecologico e dei percorsi di utilizzo multifunzionale della pianta nell'ecosistema lacustre, chiarisce le motivazioni alla base delle posizioni sia dei "mietitori" che dei "conservatori". La canna palustre, o *Phragmites australis*, è una pianta erbacea rizomatosa appartenente alla famiglia delle Poaceae. Essa è considerata una specie elofita, in quanto l'apparato radicale e la parte basale rimangono quasi sempre sommersi, con fiori e foglie emergenti dalla lama d'acqua. *P. australis* occupa la zona palustre della wetland, colonizzando le sponde di fiumi e laghi, ed è in grado di crescere in paludi sia dolci sia salmastre. Questa elofita è considerata praticamente cosmopolita, essendo presente in tutti i continenti tranne l'Antartide [2], dalle regioni temperate fino ai tropici [3]. La sopravvivenza e l'invasività della *Phragmites* dipende fortemente dalle sue strutture rizomatose [4], responsabili di meccanismi di traslocazione di nutrienti e fotosintati che ne garantiscono la riproduzione. I rizomi inoltre danno supporto strutturale, riforniscono di O_2 le radici e ancorano la pianta al substrato [5]. La *P. australis* sviluppa germogli densi fino a 200 unità/m^2 [6], che mediamente raggiungono 2-4 m di altezza e nelle regioni più calde possono arrivare fino a 6 m. L'espansione incontrollata della vegetazione emergente in habitat acquatici può causare l'accumulo di spessi strati torbosi nel corso degli anni [7] e dunque minacce agli ecosistemi lacustri, che necessitano di attività di ripristino [8]. In questo senso le minacce recate da un mancato controllo della *P. australis* sono, a breve termine, l'invecchiamento" dei canneti (ingresso di specie ruderali e maggiormente xeriche) e, a lungo termine, l'interramento naturale della palude (con la scomparsa della *Phragmites*). Altri motivi di preoccupazione sono: l'elevata plasticità e la molteplicità di biotipi consentono alla *P. australis* di adattarsi a numerose condizioni ambientali (clima, nutrienti, suolo, acqua, ecc.) [9] e a fattori di stress. Ciò la rende una specie fortemente aggressiva, talvolta infestante e difficile da rimuovere. La progressiva espansione della popolazione di

P. australis, indice di scarsa stabilità della comunità palustre, rappresenta una minaccia per le altre specie tipiche.

La *Phragmites australis* può essere una risorsa utilizzata in diversi ambiti come l'utilizzo energetico (produzione di biocarburanti e biogas), produzione di truciolato, produzione di carta. Ci sono due scuole di pensiero diverse riguardo la gestione dei canneti: i "conservativi" e i "mietitori". I primi sono dell'idea che la gestione artificiale dei canneti possa compromettere l'ecosistema in cui si trovano mettendo in pericolo numerose specie che vivono in queste zone umide. I mietitori invece sono a favore della raccolta e del trasporto della *Phragmites australis* in quanto, se non gestita durante il periodo autunnale in cui avviene la decomposizione, tutte le sostanze assorbite grazie alla sua funzione di depuratore naturale ritorneranno nell'ambiente. Inoltre la biomassa in decomposizione aumenterà ancora di più le attività dei batteri e quindi le emissioni di carbonio e i fenomeni di eutrofizzazione. Come ultimo punto in favore della loro tesi, la *Phragmites australis*, quando si secca, rappresenta un alto rischio di incendio, annullando così il suo valore economico e, anzi, aggiungendo spese per la bonifica ambientale. In particolare possiamo andare ad analizzare il suo ruolo come depuratore naturale di inquinamento: infatti, la *Phragmites australis* funziona come un filtro biologico critico che svolge un ruolo chiave nel mantenimento degli ecosistemi acquatici. Durante il suo processo di crescita, le radici assorbono N, P e altri nutrienti dall'ambiente delle zone umide per sintetizzare la materia organica. La ricerca che quantifica la distribuzione dei nutrienti rivela distinti modelli di accumulo tessuto-specifici: le punte (TN 29,38 mg/g; TP 3,82 mg/g) contengono le concentrazioni più elevate, seguite dalle foglie (TN 17,33 mg/g; TP 2,09 mg/g) e dagli steli (TN 4,41 mg/g; TP 0,99 mg/g). Dati i rapporti di allocazione della biomassa (spighe 5,7%, foglie 14,13% e steli 80,17%), la raccolta annuale di un milione di tonnellate di *Phragmites australis* potrebbe teoricamente rimuovere 16.160 tonnellate di N e 2.020 tonnellate di P dal sistema acquatico. Inoltre, la *Phragmites australis* sopprime la proliferazione algale attraverso due meccanismi:

1. assorbimento competitivo dei nutrienti che causano l'eutrofizzazione (N/P);
2. attenuazione della luce attraverso l'ombreggiamento della chioma, limitando così l'attività fotosintetica nel fitoplancton.

La biodiversità delle zone umide è altamente suscettibile di compromissione a causa della contaminazione da metalli pesanti, tra cui Cd, Cu, Fe, Ni, Pb e Zn, che provengono principalmente da effluenti industriali, deposizione atmosferica e acque reflue domestiche nelle periferie lacustri. La *Phragmites australis* dimostra eccezionali capacità di fitodepurazione, funzionando come un accumulatore biologico, assorbendo metalli pesanti attraverso rizofiltrazione, fitovolatilizzazione e fitoaccumulo.

Il secondo articolo preso in analisi [10] tratta di uno studio che mira ad esaminare gli effetti del cadmio sulla crescita della *Phragmites australis* (altezza, biomassa, lunghezza delle radici e contenuto di clorofilla), sull'anatomia, sull'accumulo di Cd nella biomassa e sulla capacità di rimuovere Cd, N e P. Si tratta quindi della capacità di queste piante di attuare processi di fitodepurazione. La fitodepurazione è un metodo di bonifica per suoli e acque inquinati ecologicamente sostenibile, accessibile al pubblico ed economicamente vantaggiosa, nonché per garantire l'uso circolare dei metalli e garantirne l'approvvigionamento [11]. In questo contesto, la tecnologia delle zone umide ha ricevuto notevole attenzione come soluzione alternativa ai sistemi convenzionali di trattamento delle acque reflue, grazie al minor consumo energetico, alla minima manutenzione richiesta e al costo di capitale contenuto [12]. La fitodepurazione galleggiante (FTW) è un metodo basato sulla natura utilizzato per bonificare diverse acque reflue. Le macrofite emergenti naturalmente sviluppano i loro apparati radicali idroponicamente per eliminare i metalli dall'acqua/acque reflue [13]. Inoltre, l'FTW è stato utilizzato per ridurre i carichi di nutrienti provenienti dal deflusso municipale, industriale, agricolo e delle acque piovane [14]. L'FTW è stato anche riconosciuto come un miglioramento del paesaggio, un habitat per uccelli e pesci, nonché una barriera per la fascia costiera [15]. Allo stesso tempo, questa tecnologia è facilmente applicabile a corpi idrici preesistenti, come le vasche di ritenzione delle acque piovane nelle aree urbane. È stato ampiamente dimostrato che la *Phragmites australis* è in grado di bonificare Cu, Ni, Zn, Cr, Cd e Pb [16]. La *P. australis* è una specie comune in quasi tutti i continenti. Il suo habitat comprende zone climatiche che vanno dal freddo al tropicale e all'arido. Per tutti i paesi europei, questa specie è riconosciuta come nativa. È stata piantata in zone umide artificiali per la bonifica di acque reflue ed effluenti [17] e in aree urbane per la creazione di zone verdi, grazie alla crescente consapevolezza delle tecniche sostenibili [18]. Le specie di *Phragmites* sono state inoltre evidenziate come potenziale materia prima per la produzione di bioenergia, in termini di vigorosa produzione di biomassa su terreni incolti degradati o marginali [19].

Per calcolare la capacità di fitodepurazione della *P. australis* sono stati utilizzati dei calcoli matematici. Infatti l'efficienza della fitoestrazione, come il fattore di traslocazione, è stata calcolata dividendo la concentrazione di Cd nei germogli per la concentrazione di Cd nelle radici.

$$fattore\ di\ traslocazione = \frac{concentrazione\ di\ Cd\ in\ ABW\ (\frac{mg}{kg}\,dw)}{concentrazione\ di\ Cd\ nel\ BWP}$$

Il fattore di bioconcentrazione invece è stato determinato dividendo la concentrazione di Cd nelle radici per la concentrazione di Cd nella soluzione idroponica.

$$fattore\ di\ bioconcentrazione = \frac{concentrazione\ di\ Cd\ in\ BWP\ (\frac{mg}{kg}\ dw)}{concentrazione\ di\ Cd\ in\ soluzione\ idroponica\ (mg/l)}$$

Per svolgere questo esperimento le piantine di *Phragmites australis* sono state coltivate in serra per 50 giorni in acqua piovana preparata artificialmente e arricchita con Cd, N e P e successivamente analizzate. In particolare i dati raccolti riguardavano la quantità di elementi presenti nelle piante e la loro crescita in rapporto ad essi.

I parametri di crescita della *P. australis* tra cui altezza di crescita media, lunghezza delle radici e CCI (contenuto di clorofilla) sono mostrati in Tabella 1. Da quest'ultima possiamo vedere come variano i valori in base alle quantità di Cd aggiunte rispettivamente in Cd_1 (1 mg/L), Cd_2 (2 mg/L) e Cd_4 (4 mg/L). La *P. australis* non ha mostrato differenze significative per l'altezza di crescita nei trattamenti di controllo, Cd_2 e Cd_4, escludendo Cd_1 che ha mostrato un lieve calo nell'altezza di crescita, mentre per BWP (below water parts) la crescita massima della lunghezza delle radici è stata osservata nel trattamento Cd_2 seguito da controllo, Cd_1 e Cd_4. Il valore di CCI più basso è stato osservato nel controllo per P. australis (0,5). Tuttavia è sato riscontrato un aumento lineare del valore di CCI sotto trattamenti con Cd rispetto al controllo.

Tabella 1. Parametri di crescita della *P. australis* misurati nello studio di Mohsin et al. [10]

Trattamento	Altezza dell'impianto di trattamento (cm) AWP	Lunghezza della radice (cm) BWP	Valore di CCI
controllo	56.29 ± 3.26	9.40 ± 1.01	0.50 ± 0.04
Cd_1	49.40 ± 1.47	7.30 ± 0.48	1.40 ± 0.12
Cd_2	57 ± 1.30	9.70 ± 1.11	2.30 ± 0.20
Cd_4	55.80 ± 1.11	6.90 ± 1.46	3.30 ± 0.29

Nel caso della produzione di biomassa secca possiamo osservare la Figura 1 da cui si può vedere che la *P. australis* ha prodotto la biomassa secca totale più elevata (6,80 g) nel trattamento con Cd a dose media (Cd_2), che ha mostrato un

aumento del 43% rispetto al controllo. La biomassa secca totale più bassa (3,05 g) è stata osservata nel trattamento con Cd ad alta dose (Cd_4), che era relativamente inferiore del 36% rispetto al controllo.

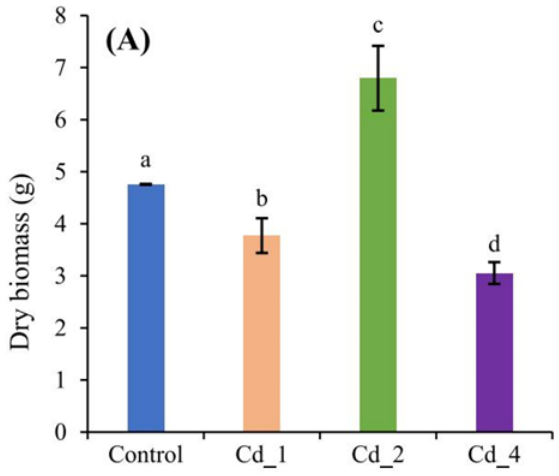

Figura 1. Produzione media totale di biomassa secca (somma di germogli + radici) di P. australis coltivati con diverse dosi di Cd. [10]

La rimozione di azoto totale (N_{tot}) da parte della *P. australis* sotto quantità di Cd entro intervalli di giorni (0, 10, 20, 35 e 50) è mostrata nella Figura 2 Possiamo infatti vedere che la rimozione di N_{tot} più elevata (81%) è stata osservata nel reattore con *P. australis* il giorno 35 nel controllo rispetto alla dose iniziale di N_{tot} (7,5 mg/L). Inoltre, la rimozione di N_{tot} in diversi trattamenti in 10-50 giorni è stata del 57-81% (controllo), 37-48% (Cd_2), 21-33% (Cd_1) e 20-24% (Cd_4) rispetto alle dosi iniziali di N_{tot}.

Nella Figura 3, invece, possiamo osservare l'andamento della rimozione di fosforo P_{tot} sempre per le 4 diverse concentrazioni di Cd negli intervalli di tempo indicati (0, 10, 20, 35, e 50 giorni). La *P. australis* ha mostrato una tendenza di rimozione di P_{tot} simile nei trattamenti a basso e medio dosaggio di Cd (Cd_1 e Cd_2) in 10-35 giorni, invece si discosta di più quella del controllo e del trattamento ad alto dosaggio di Cd (Cd_4). Tuttavia, la rimozione di P_{tot} è stata netta al giorno 50.

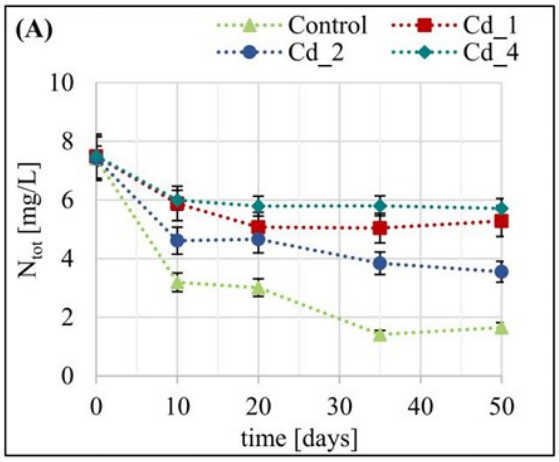

Figura 2. Fluttuazione della concentrazione totale di azoto (N_{tot}) in *P. australis* durante 50 giorni di esperimento [10]

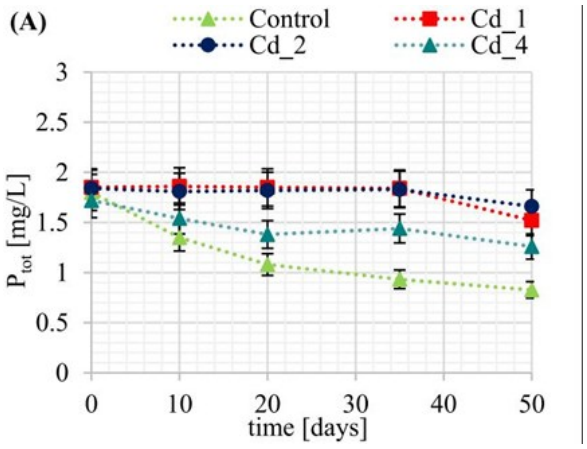

Figura 3. Fluttuazione della concentrazione totale di fosforo (P_{tot}) in *P. australis* durante 50 giorni di esperimento [10]

È stato osservato che le concentrazioni di metalli risultano maggiori nelle radici rispetto ai germogli. I motivi potrebbero essere diversi: la ricerca rivela che la disponibilità di P in condizioni di esposizione a Cd potrebbe aumentare la produzione di polisaccaridi e l'affinità della parete cellulare per il Cd, nonché promuovere lo sviluppo dello xilema attraverso la stimolazione della divisione cellulare, che potrebbe infine migliorare l'accumulo di Cd. Per quanto riguarda il Cd, i livelli fitotossici nelle radici e il basso movimento pianta/radice potrebbero indicare che le radici sono integralmente tolleranti al Cd e agiscono come filtri per prevenire la distribuzione tossica nella pianta [20]. Le concentrazioni di metalli

pesanti nelle piante delle zone umide sono comunemente più elevate nelle radici e nei rizomi rispetto a steli, foglie e fiori poiché le radici sono i siti primari per l'assorbimento dei metalli pesanti e l'ulteriore traslocazione ai germogli può essere limitata. Un'altra probabile ragione dell'immobilizzazione del Cd nella soluzione nutritiva e/o all'interno delle radici potrebbe essere dovuta alla formazione di complessi Cd-P nei vacuoli e nelle pareti cellulari delle piante, che possono ridurre l'assorbimento di Cd nelle piante. In conclusione i risultati indicano che la *P. australis* ha mostrato risposte produttive per tutti i parametri di crescita (altezza di crescita, produzione di biomassa, lunghezza delle radici) a diverse dosi di Cd. Le fluttuazioni complessive nella rimozione di Cd sono state di circa il 76-86% per la *P. australis* in un periodo di 0-50 giorni. Il maggiore accumulo di Cd nella *P. australis* è stato osservato nelle radici (BWP) rispetto ai germogli (AWP) durante il trattamento ad alto dosaggio (Cd_4). La specie ha quindi il suo potenziale di immobilizzare i metalli in BWP come fitostabilizzanti. Osservazioni anatomiche hanno rivelato che la tossicità del Cd ha ridotto significativamente le dimensioni delle cavità aeree delle radici della *P. australis*, aumentando al contempo le dimensioni delle cellule nel parenchima corticale. Ma hanno anche dimostrato la capacità di mettere in atto meccanismi di resistenza che riflettono l'interazione di parti e organi nell'intero sistema vegetale. I risultati quindi indicano che la *P. australis* potrebbe essere utilizzata per la bonifica di corpi idrici arricchiti di Cd.

Il terzo studio analizzato [21] riguarda la gestione dei canneti nelle valli del Mincio. In tali contesti, l’espansione non controllata della vegetazione emergente nelle aree idriche può provocare l’accumulo di spessi strati torbosi nel tempo e mettere a rischio gli ecosistemi lacustri, che richiedono interventi di ripristino. Le ripercussioni negative legate alla gestione passiva di tali sistemi richiedono che la *P. australis* sia soggetta a pratiche gestionali pianificate per evitarne la scomparsa a lungo termine a causa di processi di interramento, garantire la ricrescita dei culmi e una crescita controllata durante la stagione vegetativa e tutelare la biodiversità di questi habitat.

I parametri di crescita e, quindi, la produttività della *Phragmites australis* (misurata come sostanza secca) dipendono dal gradiente geograficamente legato alla temperatura. Una gestione accurata delle foltoie palustri nelle zone umide naturali deve considerare anche la variabile temporale, ossia il periodo di raccolta della canna palustre, che incide sull’umidità e sulla qualità della biomassa. Per applicazioni energetiche, ad esempio, è cruciale valutare il contenuto di lignina. Pur non essendo noti studi dettagliati sui meccanismi e sui tempi di formazione di questa componente, sembra che la lignina aumenti con l’età della pianta e che la lavorazione della biomassa possa modificarla [22].

L'elevata produttività di *P. australis* è associata a una notevole capacità di assimilazione dei nutrienti e a una robusta produzione di carbonio organico che favorisce processi di denitrificazione. Considerando l'aumento progressivo dell'eutrofizzazione dei laghi, causato da dilavamenti agricoli e scarichi reflui civili, è opportuno orientare la gestione dei canneti verso una maggiore rimozione degli inquinanti. Ad esempio, letti vegetati e wetland costruite hanno dimostrato tassi di rimozione molto elevati, superiori al 90% [23]. In una zona umida naturale svedese, la *Phragmites* può accumulare negli organi epigei (culmi e foglie) 92 kg/ha di N; tale dato è confermato anche da uno studio su una wetland in Olanda [24]. Uno studio finlandese indica che in estate la sostanza secca di *Phragmites* contiene circa l'1% di N [25], mentre il contenuto di P risulterebbe pari a 0,9 g/kg DW [26]. Graneli (1990) [27] tentò di rappresentare in canneti svedesi il ciclo dei nutrienti (N, P, K) in due fasi fenologiche, agosto e febbraio. Egli stimò che il 55%, 75% e 80% rispettivamente di N, P e K presenti nella parte epigea ad agosto potessero essere potenzialmente riciclati dai rizomi. Se la biomassa viene rimossa in estate, si ottiene un aumento della rimozione degli inquinanti e il materiale raccolto potrebbe essere impiegato come fertilizzante naturale in ambito agricolo [26], ma è necessario pianificare gli interventi per evitare riduzioni di produttività negli anni successivi.

La *Phragmites australis* può essere impiegata in diversi ambiti e per diversi utilizzi come produzione di impagliature per sedie e ceste, aste di vario genere, flauti, parti di strumenti musicali. Nelle prime fasi della stagione vegetativa, poco dopo il ricaccio primaverile, essa rappresenta un foraggio di alta qualità per bovini e cavalli, che può essere adoperato come fieno (dopo essiccamento) o insilato [28]. Sono noti anche utilizzi della canna palustre come fertilizzante [29] e lettiera per il bestiame, ma tradizionalmente essa è adoperata in ambito edilizio come materiale da costruzione per tetti.

Uno degli ambiti più di interesse è quello della produzione di biogas, un processo che richiedere diversi passaggi preliminari:

1. Raccolta e preparazione della biomassa: per valutare il potenziale energetico della canna palustre, la biomassa è stata raccolta nei canneti delle Valli del Mincio in due momenti distinti: giugno e settembre. In dettaglio:

    - Giugno: raccolta prima della fioritura, quando i tessuti vegetali sono ancora verdi, con una minore lignificazione e contenuti energetici differiti. La biomassa è stata selezionata nelle zone umide descritte, evitando aree fortemente contaminanti o disturbate. È stato applicato

un taglio preciso per garantire una lunghezza uniforme dei residui e facilitare successivi processi di insilamento.

- Settembre: raccolta post-fioritura, periodo in cui la pianta ha accumulato una quantità maggiore di sostanza strutturale, con un incremento di cellulosa e lignina. La scelta di questa finestra temporale mira a confrontare due profili composizionali distinti, consentendo una valutazione differenziata del potenziale energetico legato al gradiente di maturità della biomassa.

2. Conservazione e preparazione:

   - Trinciatura: la biomassa è stata triturata per ridurne significativamente le dimensioni delle particelle, facilitando la gestione durante l'insilamento e aumentando l'area superficiale disponibile per i processi microbiologici durante la digestione anaerobica.

   - Insilamento: i materiali raccolti sono stati insilati per circa 40 giorni. Questo periodo è stato scelto per simulare condizioni di conservazione reali nelle quali il substrato può subire una prima fase di degradazione anaerobica, migliorando la disponibilità di composti facilmente digeribili al successivo processo di biogas.

   - Condizioni ambientali: durante l'insilamento si è monitorata la temperatura e l'umidità per mantenere condizioni ottimali di conservazione e minimizzare i rischi di muffe o ossidazioni indesiderate.

3. Analisi chimiche:

   - Solidi totali (TS) e solidi volatili (VS): determinano la frazione residua non volatile e la frazione organica degradabile, rispettivamente. Il TS è stato misurato tramite essiccazione a temperatura controllata, seguito dal calcolo di VS come differenza tra TS iniziale e residuo non volatile, per stimare la frazione organica che potrebbe contribuire al biogas.

   - Fibra detergente neutra (NDF) e fibra detergente acida (ADF): analisi fisiologico-nutrizionale che descrivono la quota di cellulosa, emicellulose e lignina presenti nella biomassa. Questi parametri aiutano a stimare la biodegradabilità in digestione anaerobica, con NDF che rappresenta la quota di componente fibrosa totale e ADF che riduce la quota di lignina e altre componenti facilmente degradabili.

- Azoto totale e rapporto C/N: misurazione della componente azotata complessiva presente nella biomassa. Il rapporto C/N fornisce indicazioni chiave sulla compatibilità con i processi microbiologici operanti durante la digestione anaerobica, influenzando la sintesi di biomassa microbica e la velocità di degradazione.

Le prove di produzione di biogas sono state condotte presso la piattaforma ERSAF di Mantova utilizzando una serie di mini-digestori automatizzati. Ogni digestore era in modalità batch (caricamento singolo), mantenuto a una temperatura controllata di 40°C per favorire la crescita della comunità microbiologica mesofila, con volume costante e assenza di agitazione meccanica per evitare gradienti di compartimentazione e stazioni di miscelazione indesiderate. Il periodo delle prove è stato di circa 40 giorni, durante i quali sono stati monitorati parametri come la produzione di biogas, la stabilità del pH e l'integrità strutturale del sistema. L'inoculo derivava da un digestore suinicolo attivo, filtrato e stabilizzato per garantire un consorzio microbico efficiente e stabile, capace di degradare la matrice in modo rapido e sostenuto. Il rapporto inoculo/matrice è stato mantenuto a 2:1, conforme agli standard di test per BMP (Biochemical Methane Potential), al fine di assicurare una disponibilità adeguata di microbi e influire positivamente sul rendimento metanogenico. Il biogas prodotto è stato accumulato in sacchetti gasometrici collegati ai digestori, consentendo una raccolta semplice e una successiva analisi analitica. L'analisi è stata eseguita con un sistema automatico in grado di determinare volume e composizione del gas (principalmente CH_4, CO_2, H_2S e altri gas in tracce), fornendo dati utili per calcolare il potenziale metanogenico e valutare l'efficienza del processo di digestione anaerobica. I risultati sono stati confrontati con altre matrici comunemente impiegate nella produzione di biogas.

La letteratura consultata segnala pochi studi sulla digestione anaerobica della canna palustre. Secondo Amon (2007) [22], la produttività di *P. australis* in biogas varia tra 315 Nm^3/t VS (materiale non insilato) e 421 Nm^3/t VS (insilato di canna palustre trattato con enzimi), con percentuali di CH_4 comprese tra 44,8% (insilamento/raccolta a novembre) e 48,3% (insilamento/trattamento enzimatico); i tempi di ritenzione idraulica sono stati di 33–35 giorni, con rese metaniche tra 141 e 203 Nm^3 di CH_4/t VS. Il lavoro di Hansson e Fredriksson [26] sembra confermare tali potenzialità di produzione per la *P. australis*, pari a circa 180 Nm^3 CH_4/t VS.

Per quanto riguarda la valorizzazione energetica della canna palustre, gli scenari proposti considerano due filiere: la categoria dei biocombustibili solidi (inclusi combustione, gassificazione e pirolisi) e la filiera del biogas. La canna palustre rientra tra le colture erbacee pluriennali candidate alla produzione di biocombustibili lignocellulosici; altre specie affini, come *Cynara cardunculus L.*

(cardo), *Miscanthus x giganteus* e *Arundo donax L.* (canna comune), sono anch'esse oggetto di studio per verificarne l'adattamento alle condizioni locali. Per le colture erbacee pluriennali destinate all'energia, le operazioni di campo costituiscono il primo anello della filiera biomassa-energia; l'analisi di tali pratiche è cruciale per valutare la sostenibilità complessiva, espressa in indicatori economici (€/t DW), energetici (MWh/t DW) e ambientali (kg CO_2 risparmiati per t DW) [30]. La letteratura evidenzia che la paludicoltura di *P. australis*, quando finalizzata alla combustione, può ridurre le emissioni di circa 30 t CO_{2eq}/ha all'anno, situazione non riscontrata per altre tipologie di bioenergie. Per questo motivo, la canna palustre è oggetto di studi per impieghi in impianti di cogenerazione (CHP), soprattutto nell'Europa centro-settentrionale [31]. In regioni come la Germania settentrionale, si stima che circa 200.000 ha possano essere impiegati per la paludicoltura di *P. australis*; con una resa ipotetica di 10 t DW/ha, si potrebbero sostenere 20 impianti da 20 MW ciascuno [32]. A livello nazionale mancano studi di questo tipo. Un aspetto chiave per determinare l'utilizzo finale della biomassa è la finestra temporale di raccolta, che influenza le caratteristiche del prodotto; nel caso della filiera biogas, la frazione fibrosa (cellulosa, emicellulosa, lignina, ecc.) è determinante per la fermentescibilità, poiché la presenza di leganti complessi può aumentare la recalcitranza e i tempi di degradazione [30]. In particolare, la lignina rappresenta la principale criticità, rendendo la frazione fibrosa meno accessibile alla microflora. Attualmente non esistono studi consolidati sulla formazione di lignina durante lo sviluppo di *P. australis* ; tuttavia, Amon (2007) [22] riportano contenuti di lignina in *P. australis* pari a 12,37% DW per materiale non insilato raccolto all'inizio dell'autunno, 14,73% DW all'inizio autunno dopo insilamento, e 14,84% DW per insilato di fine autunno. Nelle Valli del Mincio, la *P. australis* risulta lignificata nel periodo di raccolta consentito (da novembre in poi); la lignina non costituisce un ostacolo per la combustione, poiché può aumentare il potere calorifico della biomassa, ma potrebbe ostacolare il processo di digestione anaerobica. In questa prospettiva, la trasformazione termochimica appare l'opzione di valorizzazione più adeguata per i canneti delle Valli del Mincio, anche se resta necessario approfondire la fermentescibilità della biomassa nelle finestre di raccolta previste. Nonostante una vasta revisione bibliografica [29] [30], non sono disponibili dati definitivi sulla potenzialità energetica della *P. australis*, con valori oscillanti in funzione di condizioni ambientali, periodo di raccolta e localizzazione. Per tenere conto di tali variazioni, sono state formulate le seguenti assunzioni:

- potere calorifico inferiore (LHV) pari a 18 MJ/kg DW corrispondenti a 5 MWht/t DW;
- rendimento di una centrale a biomasse in cogenerazione (CHP): elettrico 20%, termico 70%;

- produzione di biogas pari a 320 Nm^3 BG/t DW;
- LHV del biogas (50% CH4): 5,3 kWh/Nm^3;
- rendimento elettrico del generatore del motore per l'impianto a biogas pari al 42%.

Con tali dati e con le stime di produttività dei canneti vallivi, è possibile ricavare l'energia termica E_t e l'energia elettrica E_{el} ottenibili per ettaro, offrendo una stima del potenziale energetico dell'area.

3.2 Costruzione dell'inventario per l'applicazione di un approccio LCA

A partire dalle informazioni raccolte, non è stato possibile estrarre dati utili alla costruzione di un inventario preliminare per una valutazione del ciclo di vita in quanto non sufficienti, ma possiamo considerarli una buona base per poi sviluppare un inventario completo. Degli esempi di dati che possono tornare utili sono:

- quantità di biomassa ottenuta per ettaro;

- tecniche di raccolta e trattamento;

- possibili utilizzi (bioenergia, materiali da costruzione, ecc.);

- emissioni associate ai processi di trasformazione.

La LCA (Life Cycle Assessment, Valutazione del Ciclo di Vita) è una metodologia scientifica standardizzata (ISO 14040 e 14044) che analizza l'impatto ambientale di un prodotto, processo o servizio lungo tutto il suo ciclo di vita, dalla culla alla tomba (from cradle to grave) [33]. Ovvero dal momento dell'estrazione delle materie prime, per passare alla produzione e poi alla distribuzione, all'uso e infine allo smaltimento/riciclo. In alcuni casi particolari, in base alla necessità dello studio, l'LCA può limitarsi alle fasi "dalla culla al cancello" (from cradle to gate), cioè fino all'uscita dalla fabbrica. L'LCA è regolamentata dalla serie ISO 14000, che riguarda la gestione ambientale.

- ISO 14040: "Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework". Contiene i principi generali e il quadro metodologico dell'LCA essa infatti definisce la cornice teorica senza entrare nel dettaglio operativo. Per esempio definisce le fasi dell'LCA (goal & scope, inventario, valutazione impatti, interpretazione) e ne stabilisce i principi base (trasparenza, completezza, coerenza)
- ISO 14044: "Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines". Questa norma può essere definita come il complemento pratico alla 14040. Essa infatti spiega come condurre

concretamente LCA, stabilisce i requisiti minimi da rispettare e inoltre fornisce linee guida per scelte metodologiche (allocazione, confini di sistema, qualità dei dati, peer review, ecc.).

Possiamo definire quattro principali obiettivi nell'utilizzo di LCA:

- Identificazione di hot spot ambientali, cioè individuare quali fasi o processi hanno maggiore impatto sull'ambiente, come per esempio la produzione energia, il trasporto, la produzione dei materiali.
- Confronto scenari/prodotti: utile per ricerca e sviluppo, progettazione ecocompatibile (eco-design), marketing ambientale, etichette verdi ed EPD (Environmental Product Declarations).
- Supportare decisioni aziendali e politiche, inserendo la sostenibilità nei processi strategici.
- Calcolare impronte specifiche, come ad esempio:
    - la carbon footprint, ovvero la misura delle emissioni nette di gas serra associate a un prodotto, servizio, organizzazione o attività (espresse in tonnellate di CO_2 equivalente);
    - la water footprint, ovvero il consumo di acqua dolce che include sia l'uso diretto che indiretto di acqua da parte di un consumatore o di un produttore. L'impronta idrica di un singolo, una comunità o di un'azienda è definita come il volume totale di acqua dolce utilizzata per produrre beni e servizi, misurata in termini di volumi d'acqua consumati, evaporati o incorporati in un prodotto, e inquinati per unità di tempo).

Le quattro fasi principali secondo la ISO 14040 sono:

1. Goal & Scope definition (Obiettivo e Campo di applicazione): definisce perché si fa l'LCA, chi è il pubblico destinatario, cosa si confronta, quali confini del sistema si considerano, e l'unità funzionale
2. Life Cycle Inventory (LCI – Inventario): raccolta dati su input (materie, energia, acqua) e output (emissioni in aria, acqua, suolo, rifiuti). Si possono distinguere in:
    - Dati di *foreground*: dati specifici del caso studiato (es. fabbrica, impianto).
    - Dati di *background*: dati generici presi da database (es. produzione di acciaio, elettricità).

3. Life Cycle Impact Assessment (LCIA – Valutazione degli Impatti): vengono convertiti i dati inseriti input/output in indicatori ambientali (come per esempio CO_2 equivalente per cambiamento climatico, SO_2 equivalente per acidificazione, kg P equivalente per eutrofizzazione). Possiamo distinguere tre passaggi principali durante questa fase:
    - Classificazione: ogni emissione viene assegnata a una categoria di impatto
    - Caratterizzazione: si calcola il contributo di ciascun flusso (es. 1 kg di CH_4 = 25 kg CO_2eq).
    - Normalizzazione, raggruppamento, ponderazione: questo passaggio è necessario per rendere i risultati più chiari e leggibili a tutti.
4. Interpretazione: ultima fase in cui si fa un'analisi critica dei risultati ottenuti, per esempio verificandone la coerenza, la sensibilità del metodo e l'incertezza dei dati. Spesso viene aggiunta un'analisi di contributo per identificare i processi più impattanti del processo appena analizzato.

SimaPro è un software di Life Cycle Assessment (LCA), sviluppato dall'azienda olandese PRé Sustainability [33], che permette di studiare e quantificare gli impatti ambientali di prodotti, servizi o processi lungo l'intero ciclo di vita. È considerato il programma di LCA più diffuso al mondo, utilizzato sia da aziende che da università, enti di ricerca e istituzioni pubbliche.

Il suo scopo principale è tradurre la metodologia LCA in un modello pratico e calcolabile, rendendo possibile gestire in modo strutturato grandi quantità di dati e arrivare a risultati concreti e confrontabili. Grazie al suo utilizzo infatti si possono effettuare confronti tra prodotti, calcoli di carbon footprint e water footprint.

Il funzionamento di SimaPro si basa sulla costruzione di modelli di sistemi. Ogni prodotto o processo viene descritto attraverso elementi semplici, come:

- Input: materie prime, energia, acqua, materiali ausiliari.
- Output: emissioni in aria, acqua e suolo, rifiuti, prodotti intermedi.

Questi processi sono collegati tra loro a formare una rete che rappresenta l'intero ciclo di vita di un prodotto e sono collegati in un "product system", cioè un sistema che rappresenta il ciclo di vita completo.

Una delle caratteristiche fondamentali di SimaPro è la disponibilità di database molto estesi. Il più importante è Ecoinvent, che contiene decine di migliaia di processi reali relativi a energia, materiali, trasporti, agricoltura, chimica, rifiuti, ecc. Questa caratteristica è molto importante in quanto permette all'utente di non dover ricavare in modo manuale tutti i dati ma può sfruttare quelli generici presenti nel database e integrarli con quelli specifici del proprio caso di studio.

Una volta creato il modello, SimaPro è in grado di calcolare l'inventario del ciclo di vita (LCI), ovvero ottenere un bilancio dettagliato di tutte le risorse consumate e le emissioni prodotte. Una volta ottenuto questo bilancio, il programma è in grado di trasformare i dati grezzi in indicatori ambientali grazie a dei metodi di valutazione degli impatti ambientali. Degli esempi di questi indicatori ambientali possono essere: kg di CO_{2eq} (cambiamento climatico), kg SO_2 equivalente (acidificazione), consumo di risorse non rinnovabili, eutrofizzazione, tossicità umana ed ecotossicità.

4. Conclusioni

Il lavoro aveva come obiettivo la ricognizione della letteratura sulla valorizzazione della *Phragmites australis* in ambito agricolo ed ambientale e la costruzione di un inventario per l'applicazione della metodologia Life Cycle Assessment (LCA). Grazie ad approfondite ricerche, utilizzando fonti prese da database scientifici, è stata possibile la raccolta e l'analisi sistematica della letteratura relativa alla gestione e valorizzazione dei canneti, con particolare attenzione alle specie di *Phragmites australis* e alle loro potenzialità di impiego in contesti agricoli e ambientali. Sono state individuate le principali applicazioni proposte in letteratura, tra cui la gestione sostenibile degli impianti di canneti, il loro utilizzo come habitat e filtro ecologico, la produzione di biomassa per usi energetici o materiali, e i benefici ambientali associati, come la mitigazione delle emissioni di gas serra e la promozione della biodiversità. In particolare, sono stati analizzati tre lavori, i quali riportano tre diversi casi studio utili per la raccolta di dati da inserire successivamente in un database. Due di questi casi studio si concentrano maggiormente sulla fitodepurazione e sul ruolo che la *Phragmites australis* può svolgere in ambienti palustri, l'altro invece si concentra sull'utilizzo della biomassa in ambito energetico. È stato inoltre studiato e approfondito il software SimaPro, evidenziandone le opportunità di integrazione con i dati ricavati dalla revisione bibliografica per eseguire valutazioni di ciclo di vita (LCA) e per supportare decisioni orientate alla sostenibilità. In prospettiva, l'utilizzo di strumenti di analisi come SimaPro potrà consentire valutazioni più complete, assicurando una quantificazione accurata degli impatti ambientali lungo l'intero ciclo di vita dei sistemi di canneti e supportando la definizione di strategie di valorizzazione che massimizzino i benefici ecologici, economici e sociali.

Bibliografia

[1] Yu J., Li X., Zhou Y., Shao B., Pang Y., Tang J., Tang L., (2025). Phragmites australis in Dongting Lake: How to find a sustainable way out? Renewable and Sustainable Energy Reviews 223, 116062.

[2] Harrington, H.D. (1964). Manual of the plants of Colorado. Sage Books, Denver, CO. 666 p.

[3] Karunaratne S., Asaeda T., Yutani K. (2003). Growth performance of Phragmites australis in Japan: influence of geographic gradient. Environmental and Experimental Botany 50, 51–66.

[4] Chapin III, F. S., Schulze, E. D., & Mooney, H. A. (1990). The ecology and economics of storage in plants. Annual review of ecology and systematics 21, 423-447.

[5] Graneli, W., Weisner, S.E.B., Sytsma, D.M. (1992). Rhizome dynamics and resource storage in Phragmites australis. Wetlands Ecology and Management 1, 239–247.

[6] Uchytil, R.J. (1992). Phragmites australis. In: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station, Fire Sciences Laboratory, Fire Effects Information System.

[7] Ostendorp W. (1995). Impact of winter reed harvesting and burning on the nutrient economy of reed beds. Wetlands Ecology and Management 3, 233–248.

[8] Toivonen, H., Nybom, C. (1989). Aquatic vegetation and its recent succession in the waterfowl wetland Koijaervi, S. Finland. Annales Botanici Fennici 26, 1–14.

[9] Clevering, O.A., Lissner, J. (1999). Taxonomy, chromosome numbers, clonal diversity and population dynamics of Phragmites australis. Aquatic Botany 64, 185–208.

[10] Mohsin, M., Nawrot, N., Wojciechowska, E., Kuittinen, S., Szczepańska, K., Dembska, G., Pappinen, A. (2023). Cadmium accumulation by Phragmites australis and Iris pseudacorus from stormwater in floating treatment wetlands microcosms: Insights into plant tolerance and utility for phytoremediation. Journal of Environmental Management 331, 117339.

[11] Mohsin, M., Kaipiainen, E., Md, M., Salam, A., Evstishenkov, N., Nawrot, N., Villa, A., Wojciechowska, E., Kuittinen, S., Pappinen, A. (2021). Biomass production and removal of nitrogen and phosphorus from processed municipal wastewater by salix schwerinii: a field trial. Water 13, 2298.

[12] Shahid, J.M., Shafaqat, A., Ghulam, S., Muhammad, S., Muhammad, R., Mahmoud, S.F., Muhammad, A. (2019). Comparing the performance of four macrophytes in bacterial assisted floating treatment

wetlands for the removal of trace metals (Fe, Mn,Ni, Pb, and Cr) from polluted river water. Chemosphere 243, 125353.
[13] Barco, A., Bona, S., Borin, M. (2021). Plant species for floating treatment wetlands: a decade of experiments in North Italy. Science of the Total Environment 751, 141666.
[14] White, S. (2021). Plant nutrient uptake in full-scale floating treatment wetlands in a Florida stormwater pond: 2016-2020. Water 13, 569.
[15] Afzal, M., Arslan, M., Müller, J.A., Shabir, G., Islam, E., Tahseen, R., Anwar-ul-Haq, M., Hashmat, A.J., Iqbal, S., Khan, Q.M. (2019). Floating treatment wetlands as a suitable option for large-scale wastewater treatment. Nature Sustainability 2, 863–871.
[16] Ghassemzadeh, F., Yousefzadeh, H., Arbab-Zavar, M.H. (2008). Arsenic phytoremediation by Phragmites australis: green technology. International Journal of Environmental Studies 65, 587–594.
[17] Anning, A.K., Korsah, P.E., Addo-Fordjour, P. (2013). Phytoremediation of wastewater with Limnocharis flava, Thalia geniculata and Typha latifolia in constructed wetlands. International Journal of Phytoremediation 15, 452–464.
[18] Nawrot, N., Wojciechowska, E., Matej-Łukowicz, K., Walkusz-Miotk, J., Pazdro, K. (2021). Heavy metal accumulation and distribution in Phragmites australis seedlings tissues originating from natural and urban catchment. Environmental Science and Pollution Control Series 28, 14299–14309.
[19] Young, S.L., Gopalakrishnan, G., Keshwani, D.R. (2011). Invasive plant species as potential bioenergy producers and carbon contributors. Journal of Soil and Water Conservation 66, 45A–50A.
[20] Liu, C., Lin, H., Dong, Y., Li, B. (2022). Increase of P and Cd bioavailability in the rhizosphere by endophytes promoted phytoremediation efficiency of Phytolacca acinosa. Journal of Hazardous Materials 431, 128546.
[21] Saetta, Y. (2013). Valutazione della produttività dei canneti nella riserva naturale valli del Mincio ai fini della trasformazione energetica. Tesi di Laurea Magistrale in Scienze e Tecnologie per l'Ambiente e il Territorio, Università degli studi di Padova.
[22] Amon, T., Bodiroza, V., Kryvoruchko, V., Machmüller, A., Bauer, A. (2007). Energetische Nutzung von Schilfgras von extensiven Naturschutzflächen des Nationalparks Neusiedler See und Makrophyten des Neusiedler Sees (Energy use of common reed from extensive conservation grassland in the National Parc Neusiedler See and of macrophytes in the lake Neusiedler See). Research Report, Vienna.
[23] Luederitz, V., Eckert, E., Lange-Weber, M., Lange, A., Gersberg, R. M. (2001). Nutrient removal efficiency and resource economics of vertical

flow and horizontal flow constructed wetlands. Ecological Engineering 18, 157–171.
[24] Meuleman, A., Beekman, J., Verhoeven, J. (2002). Nutrient retention and nutrient-use efficiency in Phragmites australis after wastewater application. Wetlands 22, 712–721.
[25] Kask, U. (2007). Reed as energy resource in Estonia. In I. Ikonen and E. Hagelberg, (eds). Read up on Reed! Southwest Finland Regional Environment Centre.
[26] Hansson, P.-A., Fredriksson, H. (2004). Use of summer harvested common reed (Phragmites australis) as nutrient source for organic crop production in Sweden. Agriculture, Ecosystems and Environment 102, 365–375.
[27] Graneli, W. (1990). Standing Crop and Mineral Content of Reed, Phragmites australis (CAV.) Trin. ex STEUDEL, in Sweden - Management of Reed Stands to Maximize Harvestable Biomass. Folia Geobotanica et Phytotaxonomica 25, 291–302.
[28] Aghashahi, A.R., Nikkhah, A. (2008). A comparison of silage and dried common reed (Phragmites australis) for finishing male calves. Department of Animal Science, Faculty of Agriculture, Tehran University, Karaj, Iran.
[29] Komulainen, M., Simi, P., Hagelberg, E., Ikonen, I., Lyytinen, S. (2008). Reed energy - Possibilities of using the Common Reed for energy generation in Southern Finland. Reports 67 Turku University of Applied Sciences.
[30] Castelli de Sannazzaro, S. (2011). Biomasse per la produzione di energia. Produzione, gestione e processi di trasformazione. Ambiente & Territorio. Maggioli Editore.
[31] Barz, M., Ahlhaus, M., Wichtmann, W. (2006). Energetic Utilization of Common Reed for Combined Heat and Power Generation. Use of Bioenergy in the Baltic Sea Region - Proceedings of the 2nd IBBC 2006, Stralsund, Germany p.168.
[32] Wichtmann, W., Timmermann, T. (2000). Restoration of fen peatlands with industrial plants. Millenium Wetland Event, Quebec, Canada, 2000. Program with Abstracts p. 488.
[33] Goedkoop, M., Oele, M., Leijting, J., Ponsioen, T., Meijer, E. (2016). Introduction to LCA with SimaPro. Pré Sustainability.