



Gruppo di Lavoro 2
– Tecnologie e buone pratiche –

P5
***Le buone pratiche esistenti e casi studio del recupero e
gestione del fosforo***

[Pagina lasciata intenzionalmente bianca]

Indice

Indice	3
Premessa.....	9
1. L'ufficio Europeo per la Prevenzione e il Controllo Integrati dell'Inquinamento e le Migliori Tecniche Disponibili	10
2. Introduzione	16
Parte I Fosforo nei suoli, applicazione di microrganismi ed effluenti zootecnici	18
3. Fosforo nei suoli: criticità ed opportunità (S. Motta, ERSAF)	19
4. Recupero del fosforo in suoli agricoli: potenziale applicativo di microrganismi che solubilizzano il fosfato (Bevivino A., Brunori A., Dalmastrì C., Nobili P. – ENEA).....	21
4.1. Applicazioni biotecnologiche di microrganismi fosfato-solubilizzanti per il recupero del fosforo (A. Bevivino, C. Dalmastrì, ENEA)	28
4.1.1. PSM per il recupero di suoli agricoli contaminati.....	29
4.1.2. Biolisciviazione del P da rocce	29
4.1.3. Utilizzo di PSM per la solubilizzazione di composti fosforici inorganici insolubili da rifiuti e scarti	31
5. Recupero di Fosforo dagli effluenti zootecnici (Piccinini S., CRPA)	34
5.1. L'azoto ed il fosforo negli effluenti zootecnici.....	36
Parte II Analisi degli esempi di casi di recupero di fosforo applicate a livello nazionale ed internazionale (Fatone F., Eusebi A.L., Foglia A., Radini S, UNIVPM)	38
6. Recupero e riuso del fosforo: generalità, limiti e criticità.....	39
7. Approcci gestionali ottimali	41
7.1. Recupero da attività umane	42
7.1.1. Gestione decentralizzata dei reflui urbani	42
7.1.1.1. DESAR – Opzioni per il trattamento separato delle urine	43
7.1.1.2. Run4Life.....	47
7.1.1.3. Olanda ed Amsterdam (circular city)	50
7.1.1.4. Edifici governativi nei Paesi Bassi.....	53
7.1.1.5. Pilsner beer	53
7.1.1.6. SaNiPhos.....	54
7.1.1.7. Sustainable Sanitation Alliance	54
7.1.2. Gestione centralizzata dei reflui urbani	56

7.1.2.1.	Progetti studio di gestione degli impianti di trattamento delle acque reflue	57
7.1.2.2.	Commercializzazione dei prodotti di recupero	61
7.2.	Gestione integrata acque-rifiuti.....	67
7.2.1.	Impianto di Käppala: fanghi di depurazione e reflui zootecnici.....	68
7.2.2.	Acqua & Sole: fanghi di depurazione e rifiuti dell'industria agroalimentare	68
7.2.3.	Acque reflue urbane e reflui della lavorazione delle patate	69
7.2.4.	Ecophos: ceneri di depurazione e rocce di basso livello	70
7.3.	Recupero da attività agro-industriali	70
7.3.1.	EFPRA.....	71
7.3.2.	Cooperativa Wipptal.....	72
7.3.3.	Associazione Led Rural Initiatives.....	72
7.3.4.	Cooperativa Cooperl.....	73
7.3.5.	Romerike.....	74
7.3.6.	Storms Farm di Bladenboro.....	75
7.3.7.	BMC Moerdijk.....	75
7.3.8.	Nutri2Cycle	76
7.3.9.	Alghe per il recupero di nutrienti	76
7.3.10.	KalFos	77
7.3.11.	Fibrophos UK.....	78
7.3.12.	Fertikal	79
7.3.13.	Soilfood	80
7.3.14.	Pizzoli	81
7.4.	Recupero da altre attività industriali	81
7.4.1.	Metsä e Biolan	81
7.4.2.	EasyMining - LKAB	82
7.4.3.	ProPHOS Chemicals	83
7.5.	Ottimizzazione delle risorse.....	83
7.5.1.	Fonti alternative di Mg	84
7.5.2.	Miglioramento assorbimento del fosforo: CCS Aosta	86
7.5.3.	Miglioramento assorbimento del fosforo: Italtollina	87

7.5.4. Miglioramento assorbimento del fosforo: Collaborazione Agrisystem – Terra Più – ENEA.....	88
7.5.5. Miglioramento assorbimento del fosforo: Enzima Fitasi	89
7.5.6. Miglioramento dosaggio del fosforo e riduzione sprechi: SyreN	89
7.5.7. Miglioramento dosaggio del fosforo e riduzione sprechi: Yara	90
7.5.8. Miglioramento dosaggio del fosforo e riduzione sprechi: Veolia	91
8. Meccanismi di incentivazione: cenni	92
8.1. Inquadramento generale	92
8.2. Metodo tariffario idrico per il terzo periodo regolatorio MTI-3.....	95
9. Considerazioni conclusive degli esempi di progetti, casi reali e casi studio di gestione e recupero del fosforo	97
10. Conclusioni finali degli esempi di casi di gestione e recupero del fosforo da fonti non convenzionali.....	99
Riferimenti bibliografici	101
Sitografia.....	105

Indice delle figure

Figura 1. Schema del ciclo del fosforo e dei meccanismi coinvolti (Arif et al., 2017). ...	21
Figura 2. Accumulo di P nei suoli agricoli in Europa (Van Dijk et al., 2015)	22
Figura 3. Rappresentazione schematica dei meccanismi di solubilizzazione e mineralizzazione del P e immobilizzazione da parte dei PSM (Sharma et al. 2013).	24
Figura 4. Metodi di applicazione dei PSM (Saeid A., 2018).	26
Figura 5. Disegno sperimentale del processo di solubilizzazione(Saeid A, et al., 2018).	30
Figura 6. Contenuto di P ₂ O ₅ (anidride fosforica) in alcune materie prime rinnovabili. (Saeid A., 2018).	32
Figura 7. Schema generale degli stadi nel processo di produzione di microorganismi fosfato solubilizzanti (Saeid A., 2018).	33
Figura 8. - Maps of Soil Chemical properties at European scale based on LUCAS 2009/2012 topsoil data (Ballabio, C., Lugato, E., Fernández-Ugalde, O., Orgiazzi, A., Jones, A., Borrelli, P., Montanarella, L. and Panagos, P., 2019. Mapping LUCAS topsoil chemical properties at European scale using Gaussian process regression. Geoderma, 355: 113912).	35
Figura 9: tipologia reflui domestici (Kujawa-Roeleveld et Zeeman, 2006)	42
Figura 10: Distribuzione dei contaminanti nei reflui domestici	43
Figura 11: Trattamento separato feci-urine-acque grigie	44
Figura 12: Processo integrato IntWUT	45
Figura 13: RUN4LIFE	48
Figura 14: Siti dimostrativi Run4Life.....	49
Figura 15 Risorse prioritarie da recuperare nel ciclo urbano delle acque (fonte: STOWA al meeting SMART-Plant).....	50
Figura 16 Ciclo del fosforo nella catena del valore delle acque reflue di Amsterdam nel 2013 (in ton P)	51
Figura 17: FosVaatje	52
Figura 18: Pisner beer	54
Figura 19: Applicazione urina diluita	55
Figura 20 Rappresentazione grafica dell'azione di innovazione SMART-Plant	57
Figura 21: materiale granulare rivestito, IWA Resource Recovery Conference, Venice 2019	60
Figura 22: Berliner Pflanze.....	63
Figura 23: PhosphorCare	64
Figura 24: Physiostart P Plus.....	65
Figura 25: Schema di processo impianto di Amsterdam, IWA conference, Venice 2019	66
Figura 26: VitalPhos	70
Figura 27: Test fitostimolanti, IWA conference, Venice 2019.....	77
Figura 28: Fertikal	80
Figura 29: Prodotto Istutus-Multa.....	82

Figura 30: CleanMap.....	82
Figura 31: Rese di recupero di fosforo (SW = acqua marina), IWA conference, Venice 2019	84
Figura 32: Purezza della struvite, IWA conference, Venice 2019.....	84
Figura 33: Formati MICOSAT F.....	86
Figura 34: Italpollina (fonte ENE3 ad ECOMONDO 2018)	88
Figura 35: Prodotti P-Force e Biophos.....	89
Figura 36: Utilizzo combinato SoilDiag e SoilAdvisor	91
Figura 37: Common Agricultural Policies	93

Indice delle tabelle

Tabella 1. Descrizioni delle tecniche per le emissioni nelle acque secondo Decisione di esecuzione UE 2019/2031.	13
Tabella 2. Dettaglio di una specifica tecnica che fa riferimento al fosforo come riportato nella BAT 19 della Decisione 2017/302.	14
Tabella 3. Tecniche per il monitoraggio dell'azoto e del fosforo totali escreti negli effluenti di allevamento come da BAT 24 della Decisione 2017/302.	14
Tabella 4. Elenco non esaustivo di riassunto delle BAT attinenti la rimozione e il recupero del fosforo in diversi settori industriali.....	15
Tabella 5. Biodiversità dei PSM (Sharma et al. 2013).....	24
Tabella 6. Esempi di fertilizzanti microbici disponibili sul mercato (Saeid A., 2018).	27
Tabella 7. Fertilizzanti microbici prodotti dell'azienda CCS Aosta S.r.l., Italy	28
Tabella 8. Relazione tra la concentrazione totale di acidi organici e del P ₂ O ₅ in soluzione (Saeid A, et al., 2018).....	31
Tabella 9: Fertiliser consumption per hectare of fertilised UAA, EU-28, 2007 and 2017	41
Tabella 10: Caratteristiche flussi domestici separati (Capodaglio 2017)	43
Tabella 11: Produzione di metano e recupero di nutrienti a Sneek (BW: Black Water; KW: Kitchen Waste).....	46
Tabella 12: Primi risultati del progetto RUN4LIFE	49
Tabella 13: Progetti Sustainable Sanitation Alliance con riutilizzo delle urine come fertilizzante	56
Tabella 14 Caratteristiche Polonite	60
Tabella 15: Contenuto di metalli nel Crystal Green	62
Tabella 16 Composizione Berliner Pflanze	63
Tabella 17 Formati di vendita e prezzi.....	63
Tabella 18: Caratteristiche Phosphorcare	64
Tabella 19: Parametri operativi, IWA conference, Venice 2019	66
Tabella 20: Costi/Benefici, IWA Resource Recovery conference, Venice 2019	66
Tabella 21: Composizione dei prodotti recuperati (dati di Ottobre 2017)	69
Tabella 22: Contenuto di metalli pesanti nel fosfato dicalcico recuperato dalle ossa animali	71
Tabella 23: Requisiti fertilizzanti organici francesi	74
Tabella 24: Biofertilizzante di Romerike.....	75
Tabella 25: Dati operativi BMC del 2014	76
Tabella 26 Nutrienti in KalFos.....	78
Tabella 27: Caratteristiche Fertilizzante organico Fertikal.....	79
Tabella 28: Trattamento Pizzoli	81
Tabella 29: Recupero dall'effluente da MFC	85
Tabella 30: Recupero dall'effluente da MEC	86
Tabella 31: Batteri selezionati da Italpollina	87

Premessa

Il presente report è costituito da due parti, che seguono una breve introduzione.

La **Parte I** e la **Parte II** descrivono *degli esempi di casi di gestione e recupero del fosforo da fonti non convenzionali*. Si specifica che le due Parti sono distinte perché associate ad autori diversi. La Parte 1 contiene i contributi su specifici aspetti elaborati da alcuni partecipanti al Tavolo tematico mentre la Parte 2 (capitoli 6 e 9 inclusi) è il prodotto finale affidato attraverso un incarico esterno ad un esperto altamente qualificato, così come previsto dall'Accordo di collaborazione per la realizzazione di iniziative dirette a garantire il funzionamento della Piattaforma italiana del fosforo siglato tra MATMM ed ENEA.

Occorre sottolineare che alcuni partecipanti al Tavolo tematico hanno espressamente chiesto di "citare la fonte" del materiale utilizzato per la redazione del presente documento.

L'elenco di casi di gestione e recupero del fosforo raccolti è frutto di indagine bibliografica di materiale di letteratura e di pagine web. Il Tavolo tematico, in questa prima fase dei lavori, non è entrato nel merito dei contenuti del materiale raccolto, **né ha espresso una opinione tecnico-scientifica o una verifica della veridicità inerente le informazioni contenute nel materiale di letteratura e pagine web**. Per queste ragioni, laddove possibile (ovvero sia ben identificabile chi ha prodotto la parte di documento, ad esempio nella descrizione di una esperienza di recupero del fosforo) è stata mantenuta la "fonte" del paragrafo che costituisce il presente documento. Il Gruppo di Lavoro del Tavolo Tematico non si assume alcuna responsabilità per informazioni raccolte e non ancora soggette a verifica tecnica; **non si può ritenere, quindi, che la PIF attraverso questa prima versione del rapporto abbia avallato o selezionato progetti, esperienze, casi reali o casi studio a discapito di altri eventualmente non ancora intercettati, citati o descritti nel presente documento**. Ne consegue, **che i contenuti indicati nei progetti, esperienze, casi reali o casi studio non possono ancora essere considerati come "certificati" dalla PIF**.

1. L'ufficio Europeo per la Prevenzione e il Controllo Integrati dell'Inquinamento e le Migliori Tecniche Disponibili

L'ufficio europeo per la prevenzione e il controllo integrati dell'inquinamento (EIPPCB, European Integrated Pollution Prevention and Control (IPPC) Bureau) è stato istituito nel 1997 a Siviglia per organizzare lo scambio di informazioni tra gli Stati membri, l'industria e le organizzazioni non governative che promuovono la protezione ambientale sulle Migliori Tecniche Disponibili (Best Available Techniques, BAT), il monitoraggio e gli sviluppi a questi associati. Con l'entrata in vigore della direttiva sulle emissioni industriali (IED –Industrial Emissions Directive, 2010/75/UE del Parlamento Europeo e del Consiglio del 24/11/2010 relativa alle emissioni industriali (prevenzione e riduzione integrate dell'inquinamento)), l'EIPPCB organizza e coordina lo scambio di dati e informazioni che portano all'elaborazione e alla revisione dei documenti di riferimento delle BAT in accordo con le disposizioni della Commissione Europea (Decisione di Esecuzione della Commissione 2012/119 / UE).

L'Ufficio europeo IPPC produce i documenti di riferimento sulle migliori tecniche disponibili chiamati BREF (Best Available Techniques reference documents). I BREF sono i principali documenti di riferimento utilizzati dalle autorità competenti degli Stati membri per il rilascio di autorizzazioni per gli impianti che presentano un potenziale di inquinamento (<https://eippcb.jrc.ec.europa.eu/about>).

Un BREF è il veicolo attraverso il quale le migliori tecniche disponibili (BAT) e le tecniche emergenti sono determinate in modo trasparente, sulla base di informazioni tecnico-economiche. Ogni BREF è il risultato di un processo pluriennale che coinvolge un gruppo di lavoro tecnico (TWG, technical working group) di solito composto da 100 a 200 esperti. La procedura utilizzata per elaborare o rivedere un BREF comprende riunioni plenarie del TWG, riunioni di sottogruppi, visite agli impianti e discussione di bozze di BREF per eventuali commenti (https://eippcb.jrc.ec.europa.eu/about/more_information).

La Direttiva 2010/75/UE è recepita nell'ordinamento italiano attraverso il (c.d. Decreto emissioni) D.Lgs. n. 46/2014 del 4 marzo 2014.

Riferimenti e definizioni delle migliori tecniche disponibili era già presente in diversi documenti normativi come ad esempio nelle Direttive 96/61/CE e 2008/1/CE, conosciute come direttive IPPC (Integrated Pollution Prevention and Control), volte a garantire un approccio integrato ambientale, cioè una disciplina delle attività industriali e agricole mirante a ridurre al minimo le emissioni inquinanti nell'atmosfera, nelle acque e nel suolo, oltre che per migliorare la gestione dei rifiuti, per raggiungere un elevato livello di protezione dell'ambiente e della salute.

Già nella Direttiva 96/61/CE si faceva riferimento alle “migliori tecniche disponibili” nelle definizioni dell’articolo 2:

“11) «migliori tecniche disponibili», la più efficiente e avanzata fase di sviluppo di attività e relativi metodi di esercizio indicanti l'idoneità pratica di determinate tecniche a costituire, in linea di massima, la

base dei valori limite di emissione intesi ad evitare oppure, ove ciò si riveli impossibile, a ridurre in modo generale le emissioni e l'impatto sull'ambiente nel suo complesso. Per:

- «tecniche», si intende sia le tecniche impiegate sia le modalità di progettazione, costruzione, manutenzione, esercizio e chiusura dell'impianto;
- «disponibili», qualifica le tecniche sviluppate su una scala che ne consenta l'applicazione in condizioni economicamente e tecnicamente valide nell'ambito del pertinente comparto industriale, prendendo in considerazione i costi e i vantaggi, indipendentemente dal fatto che siano o meno applicate o prodotte nello Stato membro di cui si tratta, purché il gestore possa avervi accesso a condizioni ragionevoli;
- «migliori», qualifica le tecniche più efficaci per ottenere un elevato livello di protezione dell'ambiente nel suo complesso.

Nel determinare le migliori tecniche disponibili, occorre tener conto in particolare degli elementi di cui all'allegato IV”.

Per quanto riguarda il Fosforo, esso è previsto come BAT nella Decisione di Esecuzione (UE) 2016/902 della commissione del 30 maggio 2016 che stabilisce le conclusioni sulle migliori tecniche disponibili (BAT), a norma della direttiva 2010/75/UE del Parlamento europeo e del Consiglio, sui sistemi comuni di trattamento/gestione delle acque reflue e dei gas di scarico nell'industria chimica. Precisamente, alla BAT 10 la precipitazione chimica è riportata generalmente applicabile per “l'eliminazione del fosforo” dalle acque reflue.

Nel dettaglio, alla BAT 10 (per il trattamento delle acque reflue) riporta:

“Al fine di ridurre le emissioni nell'acqua, la BAT consiste nell'utilizzare una strategia integrata di gestione e trattamento delle acque reflue che comprenda un'adeguata combinazione delle tecniche riportate qui di seguito, nell'ordine indicato.

<i>Tecnica</i>	<i>Descrizione</i>
<i>a) Tecniche integrate con il processo</i>	<i>Tecniche per prevenire o ridurre la produzione di sostanze inquinanti.</i>
<i>b) Recupero di inquinanti dalla sorgente</i>	<i>Tecniche per recuperare inquinanti prima di scaricarli nel sistema di raccolta delle acque reflue</i>
<i>c) Pretrattamento delle acque reflue</i>	<i>Tecniche per ridurre gli inquinanti prima del trattamento finale delle acque reflue. Il pretrattamento può essere effettuato alla sorgente o nei flussi combinati.</i>
<i>d) Trattamento finale delle acque reflue</i>	<i>Trattamento finale delle acque reflue mediante, ad esempio, trattamento preliminare e primario, trattamento biologico, denitrificazione, rimozione del fosforo e/ o tecniche di eliminazione finale delle materie solide prima dello scarico in un corpo idrico ricettore.”</i>

Attualmente, quindi, **l'unica tecnologia che coinvolge il fosforo nelle acque reflue definita come "adeguata" dalla Decisione 2016/902 è quella della precipitazione chimica** (BAT 12, lettera g). Si noti che (naturalmente) il documento sulle BAT non menziona nessun impianto in particolare, ma indica la sola tecnologia, in quanto tale, che si è ritenuta migliore per assicurare un buon livello di protezione ambientale (almeno per quanto riguarda le acque reflue). Sebbene la rimozione biologica del fosforo sia valutata all'interno del BREF del 2016 che include le acque reflue, non è poi inserita nella tabella di riferimento alle BAT n. 12.

Il fosforo è ancora incluso nelle BAT descritte per i **rifiuti** (Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Waste, 2018; Decisione di Esecuzione (UE) 2018/1147), dove alla lettera f della BAT 20 per ridurre le emissioni nelle acque è riportata la precipitazione come tecnologia appropriata per la rimozione dell'inquinante.

Occorre sottolineare che, per quanto riguarda il fosforo, la Decisione 2016/902, così come gli altri BREF (qui valutati) si riferisce al trattamento delle acque reflue o da rifiuti per l'eliminazione degli inquinati, mentre invece non fa riferimento a nessuna tecnologia per quanto riguarda il suo recupero. Allo stesso tempo, però, è anche vero che la rimozione del fosforo dalle acque reflue e dai rifiuti è il primo processo che dovrebbe essere considerato per il recupero dell'elemento. La rimozione, però, se non prevede anche la separazione di altre fonti di inquinamento eventualmente presenti, non assicura la possibilità di recuperare il fosforo.

Il **recupero del fosforo da fanghi di depurazione inceneriti** (Phosphorus recovery from sewage sludge incineration ashes, 2019) è inserito all'interno del paragrafo sulle **"Tecnologie Emergenti"** nel documento di riferimento per l'incenerimento dei rifiuti (JRC Science for Policy Report, Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Waste Incineration, 2019). Nonostante tra i benefici ambientali ottenibili sia riportata la riduzione della produzione di fanghi, la possibilità di recuperare fosforo eventualmente da immettere sul mercato e la rimozione simultanea di altri inquinati eventualmente presenti, nessuna informazione è invece proposta per la reale applicabilità ed economicità dei processi e su eventuali "effetti collaterali". **Il documento però, non riporta alcuna tecnologia per il recupero del fosforo da tale matrice nell'elenco delle BAT**. Quindi, **il recupero del fosforo da fanghi di depurazione non è inserito nella Decisione di Esecuzione (UE) 2019/2010 del 12 novembre 2019** che stabilisce le conclusioni sulle migliori tecniche disponibili (BAT), a norma della direttiva 2010/75/UE del Parlamento europeo e del Consiglio per l'incenerimento dei rifiuti.

Il **recupero del fosforo come struvite è inclusa nella BAT 10** della Decisione di esecuzione UE 2019/2031 del 12 novembre 2019 che stabilisce le conclusioni sulle migliori tecniche disponibili per le **industrie degli alimenti, delle bevande e del latte**. Qui, nella BAT 10 ("Al fine di aumentare l'efficienza delle risorse, la BAT consiste nell'utilizzare una o una combinazione delle tecniche indicate"), il recupero di fosforo

come struvite viene riportato come “Applicabile solo a flussi di acque reflue con un elevato contenuto totale di fosforo (ad esempio superiore a 50 mg/l) e un flusso significativo”. La stessa decisione riporta il recupero di fosforo come struvite, la precipitazione e la rimozione biologica del fosforo intensificata come tecnologie applicabili all’interno della BAT 12 per la rimozione e/o recupero del fosforo “Al fine di ridurre le emissioni nelle acque, la BAT consiste nell’utilizzare un’opportuna combinazione delle tecniche”. Per le tre tecniche di rimozione/recupero del fosforo come struvite la Decisione riporta la seguente descrizione sintetica:

Tabella 1. Descrizioni delle tecniche per le emissioni nelle acque secondo Decisione di esecuzione UE 2019/2031.

Tecnica	Descrizione
Precipitazione	Trasformazione degli inquinanti disciolti in composti insolubili mediante l’aggiunta di precipitanti chimici. I precipitati solidi formati vengono poi separati per sedimentazione, flottazione ad aria o filtrazione. Ioni metallici polivalenti (ad esempio calcio, alluminio, ferro) sono utilizzati per la precipitazione del fosforo .
Rimozione biologica del fosforo intensificata	Una combinazione di trattamento aerobico e anaerobico per arricchire in modo selettivo i microorganismi accumulatori di polifosfato nella comunità batterica all’interno dei fanghi attivi. Questi microorganismi assorbono più fosforo di quanto necessario per una crescita normale.
Recupero del fosforo come struvite	Il fosforo viene recuperato per precipitazione in forma di struvite (fosfato di ammonio magnesiac).

Attenzione per il fosforo è anche inclusa nella Decisione di Esecuzione (UE) 2017/302 della Commissione del 15 febbraio 2017 che stabilisce le conclusioni sulle migliori tecniche disponibili (BAT) concernenti **l'allevamento intensivo di pollame o di suini**. “Per ridurre il fosforo totale escreto rispettando nel contempo le esigenze nutrizionali degli animali, la BAT (N. 4) consiste nell'usare una formulazione della dieta e una strategia nutrizionale che includano una o una combinazione” di differenti tecniche. La BAT 19 fa invece riferimento al trattamento in loco degli effluenti di allevamento volto alla riduzione delle emissioni, che, per quanto riguarda il fosforo, riporta quanto descritto nella Tabella 2.

Tabella 2. Dettaglio di una specifica tecnica che fa riferimento al fosforo come riportato nella BAT 19 della Decisione 2017/302.

Tecnica	Applicabilità
Separazione meccanica del liquame. Ciò comprende per esempio: — separatore con pressa a vite, — separatore di decantazione a centrifuga, — coagulazione-flocculazione, — separazione mediante setacci, — filtro-pressa.	Applicabile unicamente se: — è necessaria una riduzione del contenuto di azoto e fosforo a causa della limitata disponibilità di terreni per applicare gli effluenti di allevamento, — gli effluenti di allevamento non possono essere trasportati per lo spandimento agronomico a costi ragionevoli. L'uso di poliacrilammide come flocculante può non essere applicabile a causa del rischio di formazione di acrilammide.

La BAT 20 della Decisione 2017/302 fa invece riferimento allo spandimento agronomico degli effluenti di allevamento al fine di ridurre le emissioni (tra cui il fosforo). Oltre a tecniche volte a regolamentare lo spandimento per il contenimento dell'inquinamento (incluso il fosforo) alla lettera "d" della BAT 20 è specificamente riportato tra le tecniche l' **"adattare il tasso di spandimento degli effluenti di allevamento tenendo in considerazione il contenuto di azoto e fosforo dell'effluente e le caratteristiche del suolo (per esempio il contenuto di nutrienti), i requisiti delle colture stagionali e le condizioni del tempo o del campo suscettibili di causare un deflusso"**.

Alla sezione 1.15 della Decisione 2017/302, sul monitoraggio delle emissioni e dei parametri di processo, è riportata la BAT 24, che consiste nel monitoraggio dell'azoto e del fosforo totali escreti negli effluenti di allevamento utilizzando una delle seguenti tecniche come riportata in Tabella 3 con cadenza di almeno una volta l'anno per ciascuna categoria di animali. Le tecniche di monitoraggio delle escrezioni sono anch'esse contenute nello stesso documento (Alla sezione 4.9.1., Decisione 2017/302).

Tabella 3. Tecniche per il monitoraggio dell'azoto e del fosforo totali escreti negli effluenti di allevamento come da BAT 24 della Decisione 2017/302.

Tecnica
Calcolo mediante il bilancio di massa dell'azoto e del fosforo sulla base dell'apporto di mangime, del contenuto di proteina grezza della dieta, del fosforo totale e della prestazione degli animali. Stima mediante analisi degli effluenti di allevamento per il contenuto totale di azoto e fosforo.

Nella Tabella 4 di seguito è riportato un elenco di riassunto (non esaustivo) delle BAT attinenti alla rimozione e al recupero del fosforo in vari settori industriali.

Tabella 4. Elenco non esaustivo di riassunto delle BAT attinenti la rimozione e il recupero del fosforo in diversi settori industriali

Tecnologia	Settore	riferimento BAT
Precipitazione	Rimozione di P dalle acque reflue e rifiuti	Decisione di esecuzione UE 2016/902, BAT 10, lett. d)
		Decisione di esecuzione UE 2018/1147, BAT 20, lett. f)
Recupero di P come Struvite	Recupero di P dalle acque reflue	Decisione di esecuzione UE 2019/2031, allegato: BAT 12, lett. g), h), i)
Rimozione biologica del P intensificata	Riduzione emissioni nelle acque	
Separazione meccanica del liquame. Ciò comprende per esempio: - separatore con pressa a vite, - separatore di decantazione a centrifuga, - coagulazione-flocculazione, - separazione mediante setacci, - filtro-pressa.	Trattamento degli effluenti di allevamento di suini e pollame	Decisione di esecuzione UE 2017/302, BAT 19, lett. a)

Concludendo, le BAT al momento prodotte dall'IPPC **fanno riferimento alla rimozione del fosforo dalle acque reflue e dai rifiuti in previsione del contenimento dell'inquinamento**. La rimozione del fosforo, però, non assicura la possibilità del suo recupero se questo non è separato con sufficiente purezza. Allo stesso tempo, BAT sono prodotte per il contenimento dell'inquinamento (con riferimenti al fosforo) concernenti l'allevamento intensivo di pollame o di suini. Le tecnologie suggerite per la rimozione del fosforo, diverse per settore industriale, fanno soprattutto riferimento alla precipitazione. **L'unica BAT al momento disponibile prodotta dalla EIPPCB che faccia esplicitamente riferimento al recupero di P si riferisce alla precipitazione come struvite nelle industrie degli alimenti, delle bevande e del latte** (Decisione di esecuzione UE 2019/2031 del 12 novembre 2019 che stabilisce le conclusioni sulle migliori tecniche disponibili (BAT) per le industrie degli alimenti, delle bevande e del latte).

È possibile trovare elenchi delle BAT ai seguenti indirizzi web:

<https://va.minambiente.it/en-GB/ps/DatiEStrumenti/ConclusioniBAT>

<https://eippcb.irc.ec.europa.eu/reference/>

2. Introduzione

Negli ultimi anni si è assistito allo sviluppo di tecnologie per il recupero di fosforo da rifiuti e reflui; molte di tali tecnologie sono già state applicate in piena scala dimostrando la fattibilità del processo (tra numerosi altri riferimenti si veda: Canziani e Di Cosmo, 2018; Egle et al., 2015). Ciononostante, il recupero di fosforo a livello europeo non ha ancora trovato applicazione su larga scala (Hukari et al., 2015).

I liquami zootecnici rappresentano una frazione importante del flusso di fosforo a livello europeo, in quanto questi sono sostanzialmente distribuiti sul terreno, ad esclusione di casi isolati di allevamenti particolarmente intensivi dove non c'è disponibilità sufficiente di terreno per lo spandimento (Van Dijk et al., 2016).

I fanghi di depurazione in Europa subiscono diversi fini a seconda delle specifiche politiche di gestione applicate nei rispettivi Paesi Membri. Una parte consistente viene distribuita sui terreni, contribuendo al recupero di una frazione del fosforo, mentre lo smaltimento in discarica rappresenta una perdita della risorsa (Hukari et al., 2015; Van Dijk et al., 2016). Contraddittorio il caso dell'incenerimento dei fanghi: nonostante le ceneri rappresentino una matrice promettente per l'applicazione di tecnologie per il recupero di fosforo, queste sono solitamente smaltite in discarica o inertizzate in cementi contribuendo alla perdita della risorsa (Hukari et al., 2015; Nattorp et al., 2019).

Le maggiori criticità dello spandimento diretto di fango di impianti di depurazione includono le preoccupazioni legate alla eventuale presenza di sostanze inquinanti (ad esempio metalli pesanti e inquinanti organici o organismi patogeni) che potrebbero comprometterne un corretto utilizzo agronomico. Ampia discussione è anche rivolta alla disponibilità di nutrienti (fosforo in particolare) per l'assimilazione delle piante. Ancora, occorre prevedere la disponibilità di terreni con caratteristiche idonee per ricevere i fanghi in (ragionevole) prossimità della loro produzione.

Occorre però sottolineare che studi recenti stanno evidenziando come anche nei liquami di origine zootecnica possono essere presenti metalli pesanti o antibiotici in grado di impattare sulle comunità microbiche autoctone del suolo (tra gli altri: Du and Liu, 2012; Guo et al., 2018; Holzel et al., 2012).

I fanghi sono ritenuti presentare sostanze ad azione fertilizzante (azoto fosforo e potassio) e di miglioramento delle caratteristiche dei suoli e di conseguenza possono assumere un importante significato di ritorno al terreno di sostanze sottratte attraverso le pratiche agricole (Masotti, 2011).

Le criticità legate alla gestione dei fanghi di depurazione sono state sottolineate anche dalla situazione emergenziale originata dalla posizione espressa dalla Corte di

Cassazione penale nella sentenza n. 27958 del 6 giugno 2017, che ha determinato una profonda crisi tra i gestori degli impianti di trattamento reflui.

Laddove lo spandimento diretto di fanghi, digestati e altre matrici organiche possa incontrare criticità di varia natura, il recupero del fosforo (come di altre sostanze) può rappresentare un opportuno metodo complementare per il riciclo di sostanze essenziali.

E' opportuno sottolineare che una frazione importante del fosforo (oltre il 30% del flusso totale) applicato ai terreni non è assimilata dalle piante e viene accumulata nei suoli (CE, 2013; Van Dijk et al., 2016) concorrendo alla formazione di condizioni critiche della qualità delle acque interne soggette ai fenomeni di eutrofizzazione. Per questa ragione, buone pratiche e tecnologie di recupero e gestione del fosforo non possono esulare da valutazioni ambientali e delle condizioni agronomiche dei suoli e della qualità delle acque.

Parte I

Fosforo nei suoli, applicazione di microrganismi ed effluenti zootecnici

3. Fosforo nei suoli: criticità ed opportunità (S. Motta, ERSAF)

L'uso eccessivo di fertilizzanti minerali, effluenti di allevamento e matrici organiche in generale contenenti fosforo in agricoltura, ha contribuito negli ultimi decenni a generare un processo di accumulo di questo elemento nei suoli con conseguenti impatti sull'ambiente ed in particolare sullo stato di qualità delle acque.

Infatti, l'eutrofizzazione dei corpi idrici superficiali ha come causa principale l'eccessivo arricchimento delle acque di nutrienti. L'elevata concentrazione di P è la causa più comune di eutrofizzazione nelle acque dolci e in altri corpi idrici (Correll, 1998). Nel sistema acquatico il fosforo inorganico e organico viene rilasciato come miscela di input disciolti e particolati di diverse specie di forma pentavalente di P. Il P particolato è molto dinamico e biologicamente attivo poiché, a seconda delle condizioni ambientali, può essere convertito in ortofosfato disciolto. L'applicazione a lungo termine di matrici contenenti P sui terreni agricoli ha portato all'accumulo nel suolo e ad un massiccio trasferimento di fosforo ai corpi idrici (Sims et al., 2000), sia in forma colloidale che disciolta (Borda et al., 2011). In letteratura vengono riportati numerosi esempi di compromissione dello stato di qualità delle acque associati all'inquinamento da fosforo causato dalla non corretta gestione di liquami zootecnici (Boesch et al., 2001).

Nel 2013 la Commissione europea ha pubblicato una comunicazione consultiva sull'uso sostenibile del fosforo (CE, 2013) che ha messo in evidenza per la prima volta a livello dell'UE le questioni relative alla sostenibilità dell'uso del fosforo, sia in termini di perdite per l'ambiente che di approvvigionamento per le colture.

Nell'ultimo decennio, l'attuazione della direttiva nitrati (Direttiva 91/676/CEE, 1991) ha contribuito a migliorare la gestione degli effluenti ma con un'attenzione mirata soprattutto alla gestione dell'azoto. È interessante notare a questo proposito che la direttiva quadro acque (Direttiva CE, 2000) dell'Unione Europea (Chave, 2001) ha imposto la rimozione di entrambi gli elementi nutritivi (azoto e fosforo).

Negli effluenti di allevamento (soprattutto quelli suinicoli e avicoli) e generalmente nelle matrici organiche che contengono N e P (fanghi di depurazione, compost, ecc.) il rapporto N/P_2O_5 è squilibrato e non corrisponde al fabbisogno delle colture (ad esempio, nel liquame suino il rapporto N/P_2O_5 può spesso essere 1:1, mentre il mais assorbe con un rapporto 2,5-3:1). Ne consegue che le asportazioni medie delle colture non sono sufficienti a prevenire l'accumulo di questo nutriente nel suolo. E ancora, la "calibrazione" delle dosi di utilizzazione dei fertilizzanti che contengono sia N che P viene effettuata attraverso piani di concimazione basati unicamente sul bilancio dell'azoto portando quindi ad un crescente accumulo di fosforo nei suoli. Pertanto i

trattamenti a cui vengono sottoposti questi materiali dovrebbero andare nella direzione di un riequilibrio di tale rapporto.

Il fosforo in eccesso, come noto, non si disperde in aria, ma tende ad accumularsi nel suolo e a seconda delle caratteristiche intrinseche del suolo stesso (pH, contenuto di sostanza organica, carbonati e quello che viene definito come grado di saturazione del suolo di P) può essere mobilizzato e rilasciato verso le acque di falda. Il P infatti non è mobile nel suolo e tende ad accumularsi, perché viene legato e quindi trattenuto da ioni calcio: in presenza di pH elevati (sub alcalini ed alcalini), tende a formare sali insolubili (retrogradazione) e a pH fortemente acidi sali altrettanto insolubili con il ferro e l'alluminio, mentre la maggiore solubilità e di conseguenza anche disponibilità per le piante si ha a pH subacidi. La contaminazione delle acque da P di origine agricola può, in teoria, avvenire per lisciviazione verso le acque sotterranee quando il complesso di scambio del suolo risultasse saturato e verso le acque superficiali per scorrimento superficiale e trasporto solido di particelle terrose contenenti P verso il reticolo idrico superficiale.

I cambiamenti attesi nel clima globale, in particolare l'aumento delle temperature e dell'intensità degli eventi piovosi, avranno effetti a cascata sul ciclo del P e, di conseguenza, sull'ambiente acquatico (Jeppesen et al., 2009).

In termini quindi di "tecnologie" che attuano un recupero del P da diverse matrici e il riuso in campo agricolo, e al fine di prevenire o attenuare il surplus di P e l'impatto sull'ambiente, risulta essenziale tenere in considerazione diversi fattori:

- i) la biodisponibilità dell'elemento nelle matrici utilizzate;
- ii) i fabbisogni propri di ciascuna coltura che sia essa erbacea o arborea;
- iii) il rapporto di N/P_2O_5 ;
- iv) la dotazione di P del suolo dove tali matrici vengono utilizzare,
- v) le caratteristiche intrinseche dei suoli, quindi il grado di potenziale vulnerabilità del territorio nei confronti del P.

Va comunque ricordato che la Commissione Europea, attraverso il nuovo regolamento fertilizzanti (Regolamento UE, 2019), si è spinta verso la graduale riduzione della soglia attuale di cadmio nei fertilizzanti fosfatici, dando quindi una nuova "spinta" verso il recupero di tale nutriente da diverse matrici.

4. Recupero del fosforo in suoli agricoli: potenziale applicativo di microrganismi che solubilizzano il fosfato (Bevivino A., Brunori A., Dalmastrì C., Nobili P. – ENEA)

Il fosforo (P) è uno dei macroelementi fondamentali per la crescita equilibrata delle piante in generale, e delle colture agrarie in particolare, contribuendo a regolare diversi aspetti quali la crescita dei germogli e dell'apparato radicale, la fioritura e la fruttificazione, dunque per lo sviluppo e il metabolismo delle piante, ed è secondo solo all'azoto tra i nutrienti minerali che più comunemente limitano la crescita delle colture (Azziz et al., 2012; Tak et al., 2012). Il P entra nella composizione di tutte le cellule viventi, e svolge importanti funzioni plastiche, energetiche e biochimiche in quanto componente degli acidi nucleici, delle membrane e delle molecole di ATP; interviene quindi in molteplici processi vitali, tra cui la fotosintesi, la respirazione, le reazioni di sintesi degli acidi nucleici e i processi di accumulo e trasferimento di energia (Rengel and Zhang, 2011). Le piante non sono autosufficienti per quanto riguarda l'apporto di P e necessitano di prelevarlo dal suolo attraverso l'apparato radicale (Figura 1).

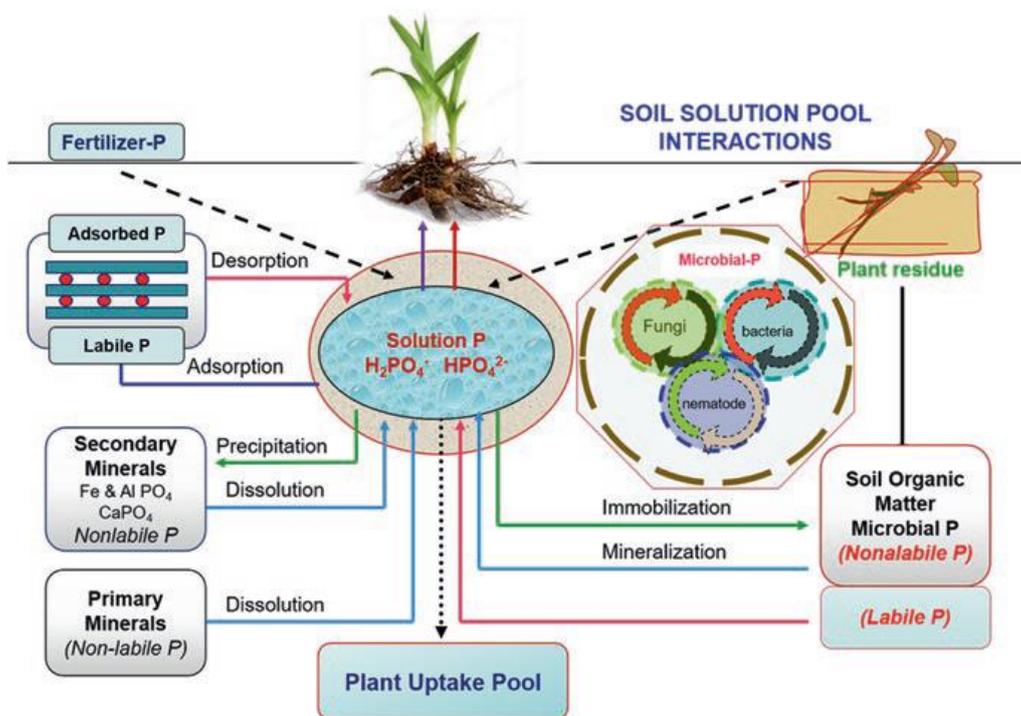


Figura 1. Schema del ciclo del fosforo e dei meccanismi coinvolti (Arif et al., 2017).

Il P nel terreno si trova sotto forma organica e minerale; è presente naturalmente nei suoli e si calcola che nello strato superficiale (fino a 50 cm di profondità) si ritrovino quantità che variano da meno di 500 kg/ha nei terreni fortemente esposti all'azione degli agenti atmosferici delle zone tropicali umide, fino a 10.000 kg/ha nei suoli

“giovani” tipici di alcune regioni montuose o desertiche (Weil and Brady, 2017). In media, il contenuto di P del suolo è di circa 0,05% (peso / peso); tuttavia, solo lo 0,1% di questo P è disponibile per un uso immediato (Figura 2).

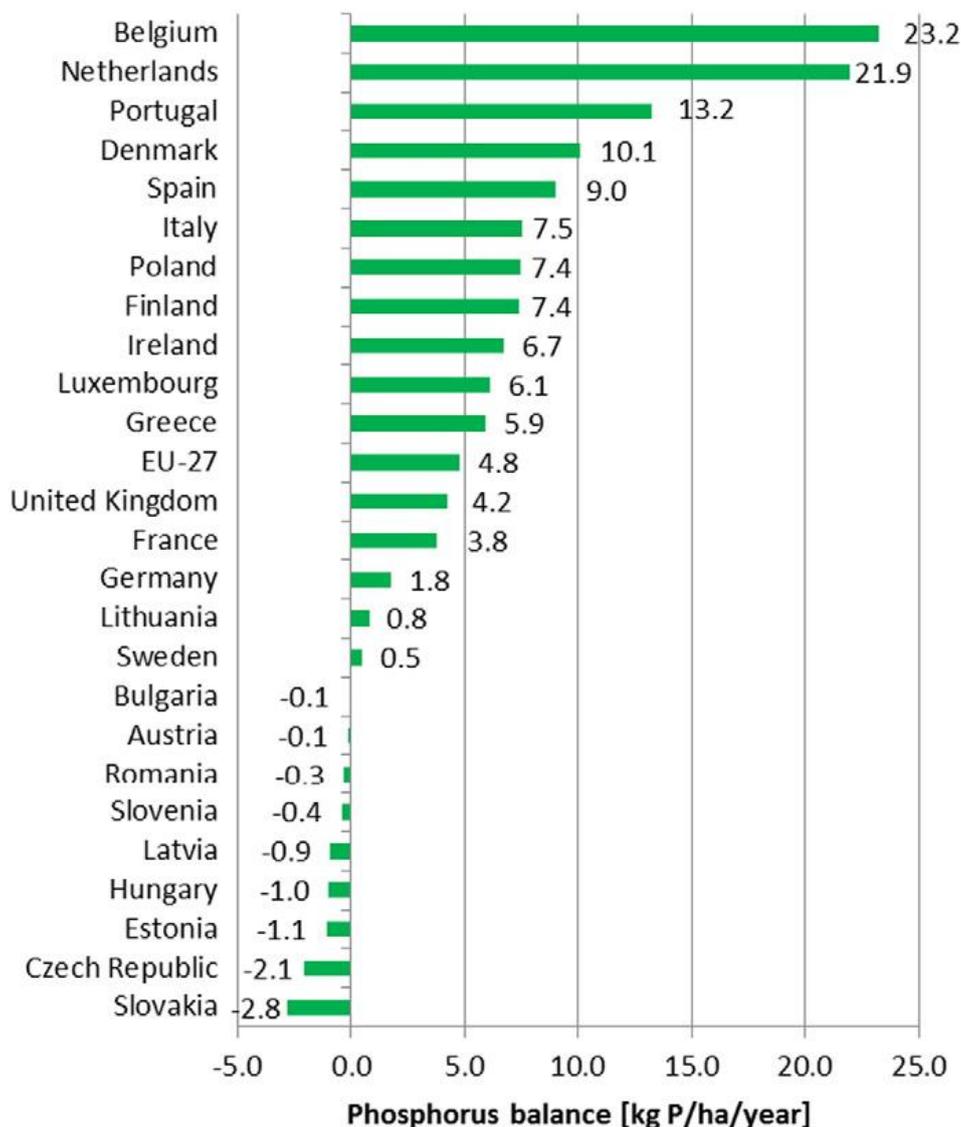


Figura 2. Accumulo di P nei suoli agricoli in Europa (Van Dijk et al., 2015)

La soluzione del suolo, che è la principale fonte di P per le radici delle piante, presenta un contenuto non superiore a 10 μM anche in condizioni di pH favorevole pari a 6,5 e in terreni fertili. Il P inorganico presente nel suolo, unica forma utilizzabile dalle piante, è in gran parte indisponibile per l'assorbimento da parte delle radici e viene sottratto sotto forma di complessi insolubili con cationi di Al e Fe nei terreni acidi e di Ca nei terreni a pH elevato (Zhu et al., 2011). La frazione di P biodisponibile e la sua concentrazione nella soluzione del suolo non sono in genere in grado di soddisfare le

normali esigenze colturali di un sistema agricolo intensivo, di fatto ponendo una limitazione alla crescita e alla produttività delle colture. Si stima che circa il 70% dei terreni, compresi quelli acidi e alcalini, destinati all'agricoltura soffra di carenza da P, con potenziale riduzione della produzione agricola di circa il 30 - 40%. Per sopperire a tale situazione, tradizionalmente si ricorre all'applicazione di fertilizzanti contenenti P. Il bilancio delle asportazioni di P dal terreno risente dell'influenza di molteplici fattori come il tipo di coltura, le rese unitarie, la destinazione dei sottoprodotti (se lasciati in campo o asportati), gli avvicendamenti colturali, ma anche di fattori ecologici come le caratteristiche geografiche, e l'andamento climatico. Le esigenze nutritive delle colture variano anche in funzione delle fasi del ciclo vegetativo: germinazione del seme, risveglio vegetativo, maturazione, oltreché del prodotto utile (semi, frutti, foglie, tuberi, ecc.). E' evidente, quindi, che i criteri che dovrebbero guidare gli agricoltori nelle scelte di concimazione sono complessi e le dosi dei concimi andrebbero valutate oculatamente, per evitare inutili eccessi. Troppo spesso invece tali prodotti vengono somministrati in quantità notevolmente eccedenti il reale fabbisogno delle colture, questo perché una larga parte viene rapidamente tolta dalla disponibilità delle piante e sequestrata nelle forme insolubili precedentemente menzionate. In aggiunta, attraverso processi di lisciviazione ed erosione superficiale, quote significative di P vengono perse contribuendo sia alla contaminazione delle falde acquifere che all'eutrofizzazione dei corsi d'acqua. È quindi di grande interesse studiare le strategie di gestione, tese a favorire l'aumento delle rese produttive e a ridurre l'inquinamento ambientale.

E' possibile utilizzare al meglio il P presente/accumulato nel suolo agricolo, in un'ottica di tecnologie agricole e di economia circolare, sfruttando le capacità metaboliche di diversi microorganismi (microflora presente nel suolo e associata alle radici), che permettono di incrementare la biodisponibilità di P per il nutrimento delle piante. Nel suolo vivono numerosi e diversi microorganismi che intervengono nei cicli degli elementi (C, N, S, P, altri) e che contribuiscono in maniera sostanziale al benessere dell'ecosistema, sia a livello di salute dei suoli stessi che di sviluppo delle piante (Arif et al., 2017). La comprensione dell'influenza dei microrganismi sulle piante e sull'ambiente è pertanto essenziale per l'innovazione in agricoltura.

I microorganismi che solubilizzano il P (Phosphate-Solubilizing Microorganisms, PSM), svolgono un ruolo essenziale per trasformare composti del P insolubili in fosfati assimilabili dalle piante (Sharma et al., 2013; Zhu et al., 2011; Bhattacharyya e Jha, 2012). Tra questi vi sono diverse specie di batteri (Phosphate-Solubilizing Bacteria, PSB) e funghi (Tabella 5). In particolare i funghi micorrizici traslocano il P che intercettano nel suolo con le loro cellule filiformi (ife).

La solubilizzazione di P da parte dei PSM si verifica attraverso diversi meccanismi come schematizzato nella Figura 3.

Tabella 5. Biodiversità dei PSM (Sharma et al. 2013)

Bacteria	<i>Alcaligenes sp., Aerobacter aerogenes, Achromobacter sp., Actinomadura oligospora, Agrobacterium sp., Azospirillum brasilense, Bacillus sp., Bacillus circulans, B.cereus, B.fusiformis, B. pumils, B. megaterium, B. mycoides, B. polymyxa, B. coagulans B., chitinolyticus, B. subtilis, Bradyrhizobium sp., Brevibacterium sp., Citrobacter sp., Pseudomonas sp., P putida, P. striata, P. fluorescens, P. calcis, Flavobacterium sp., Nitrosomonas sp., Erwinia sp., Micrococcus sp., Escherichia intermedia, Enterobacter asburiae, Serratia phosphaticum, Nitrobacter sp., Thiobacillus ferroxidans, T. thioxidans, Rhizobium melloti, Xanthomonas sp.</i>
Fungi	<i>Aspergillus awamori, A. niger, A. terreus, A. flavus, A. nidulans, A. foetidus, A. wentii. Fusarium oxysporum, Alternaria teneius, Achrothcium sp. Penicillium digitatum, P lilacinium, P balaji, P. funiculosum, Cephalosporium sp. Cladosporium sp., Curvularia lunata, Cunninghamella, Candida sp., Chaetomium globosum, Humicola inslens, Humicola lanuginosa, Helminthosporium sp., Paecilomyces fusisporous, Pythium sp., Phoma sp., Populospora mytilina, Myrothecium roridum, Morteirella sp., Micromonospora sp., Oideodendron sp., Rhizoctonia solani, Rhizopus sp., Mucor sp., Trichoderma viridae, Torula thermophila, Schwanniomycetes occidentalis, Sclerotium rolfsii.</i>
Actinomycetes	<i>Actinomycetes, Streptomyces.</i>
Cyanobacteria	<i>Anabena sp., Calothrix braunii, Nostoc sp., Scytonema sp.,</i>
VAM	<i>Glomus fasciculatum.</i>

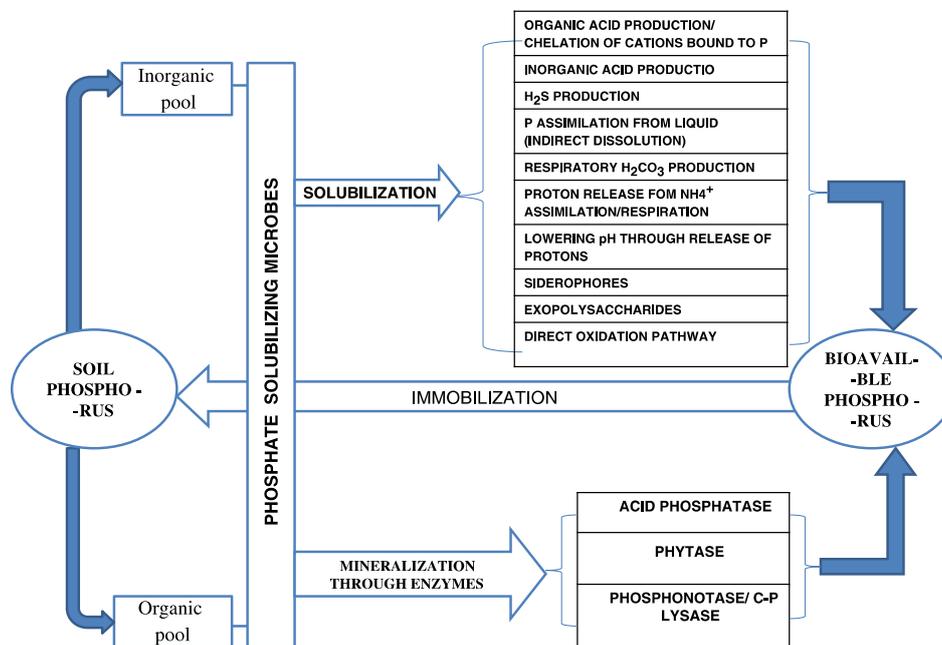


Figura 3. Rappresentazione schematica dei meccanismi di solubilizzazione e mineralizzazione del P e immobilizzazione da parte dei PSM (Sharma et al. 2013).

I principali meccanismi di solubilizzazione includono:

- (1) rilascio di composti complessanti o minerali di dissoluzione, ad es. anioni di acidi organici, siderofori, protoni, ioni ossidrilici, CO₂ che possono solubilizzare alcuni fosfati insolubili;
- (2) liberazione di enzimi extracellulari (mineralizzazione biochimica del P), e
- (3) rilascio di P durante la degradazione del substrato (mineralizzazione biologica del P).

Nei terreni neutri le condizioni per la mineralizzazione microbica del P organico sono migliori, mentre nell'humus si hanno complessi di P organico assolutamente resistenti alle azioni microbiche.

L'attività di solubilizzazione dei PSB consiste sostanzialmente nel produrre e rilasciare acidi organici nell'ambiente circostante, che vanno a chelare cationi quali Ca^{2+} , Fe^{3+} , Al^{3+} formando dei complessi stabili, consentendo quindi la mobilitazione del P dai fosfati di Fe, Ca, Al.

L'acidificazione del suolo che porta alla solubilizzazione del P fissato, permette di aumentare la disponibilità di questo elemento per l'assorbimento da parte delle piante. I PSB producono diversi enzimi coinvolti nel ciclo del P, tra cui enzimi non specifici (non-specific acid phosphatases, NSAPs) che defosforilano gli esteri fosforici o le fosfoanidridi legati ai composti organici; i più noti tra questi NSAPs sono le fosfomonoesterasi, o fosfatasi. Il P organico è reso disponibile grazie anche all'enzima fitasi dei PSM, soprattutto da parte di micorrize.

La funzione di solubilizzazione può essere implementata mediante opportune pratiche agricole utilizzando biofertilizzanti e biostimolanti, ovvero ceppi batterici selezionati e consorzi microbici costituiti da PSB, PGPR (Plant Growth-Promoting Rhizobacteria), e AMF (Arbuscular Mycorrhizal Fungi). Questi ultimi sono simbionti obbligati, colonizzano le radici ospiti per ottenere zuccheri mentre forniscono alla pianta nutrienti minerali, tra cui il P, che vengono assorbiti e trasportati attraverso una estesa rete di micelio extraradicale (ERM), fino a 25 m per g-1 di suolo (microbiota micorrizosferico); in parte sono endosimbionti (endomicorrize). I PGPR sono batteri benefici presenti nel suolo, che vanno a concentrarsi nella porzione di suolo vicina alle radici (rizosfera), dove traggono nutrimento dagli essudati radicali, e rappresentano elementi chiave per la promozione della crescita delle piante attraverso molteplici meccanismi quali fissazione dell'azoto, solubilizzazione di P, produzione di acido indolacetico (IAA), siderofori e antibiotici.

I PSB appartengono a diversi generi, principalmente *Pseudomonas* e *Bacillus*, e in particolare specie quali *Pseudomonas fluorescens*, *Bacillus amyloliquefaciens*, *Bacillus megaterium*, *Burkholderia gladioli*, *Klebsiella* sp., *Serratia* sp., *Xanthomonas* sp.

Le applicazioni prevedono l'inoculo nei suoli agricoli di preparati microbici, in grado di solubilizzare il P presente nel terreno in forma insolubile, in alternativa ai tradizionali fertilizzanti a base di fosfati.

L'allestimento di questi inoculanti prevede diverse fasi di studio e analisi microbiologiche oltre che chimico-fisiche dei suoli: isolamento di microrganismi capaci di solubilizzare il P, caratterizzazione biochimica e funzionale, selezione di ceppi a provata efficienza, allestimento di inoculanti, test in laboratorio, serra e prove in campo; valutazione dell'efficienza e di impatto ambientale. Aspetti importanti riguardano la caratterizzazione dei microrganismi e la valutazione dell'impatto ambientale a seguito dell'inoculo in campo. Infatti, anche se si tratta di microrganismi

naturalmente presenti nell'ambiente in cui si prevede di utilizzarli, la loro reintroduzione in quantità superiori a quelle naturali potrebbe causare perturbazioni alla struttura dell'ecosistema. Per quanto riguarda la funzionalità in situ, è necessario focalizzarsi su approcci che prevedano il co-inoculo di ceppi diversi capaci di cooperare metabolicamente. Infine, poiché possono essere presenti differenze tra popolazioni microbiche adattate a diversi ambienti (suoli), va valutata l'efficienza metabolica di ceppi selezionati in contesti diversi.

Applicazioni sono già in uso, e tra i prodotti presenti sul mercato, sotto forma di preparati microbici, vengono riportati i seguenti esempi:

1. P-FORCE, un complesso di batteri in grado di solubilizzare il fosforo insolubile accumulato nel terreno oltre che di promuovere la crescita delle piante mediante sintesi di auxine e citochinine.
 - Applicazione al terreno: 2 lt/ha di P-Force in fase di trapianto.
 - Trattamento dei semi: 10-15 ml per kg di seme.
 - Rendimento in comparazione con fertilizzante tradizionale: 65 kg di ammonium Phosphate (DAP) oppure 2 L. P-FORCE → 30 KG di fosforo

2. BIOPHOS, concime multifunzione a base di diversi microrganismi, permette di liberare naturalmente il P nel suolo rompendo i legami chimici dei composti che lo bloccano. Composizione:
 - Contenuto in micorrize (% in peso) 0,005%
 - Contenuto in batteri della rizosfera 5×10^8 U.F.C./g

I metodi di utilizzo dei PSM sono illustrati in Figura 4.

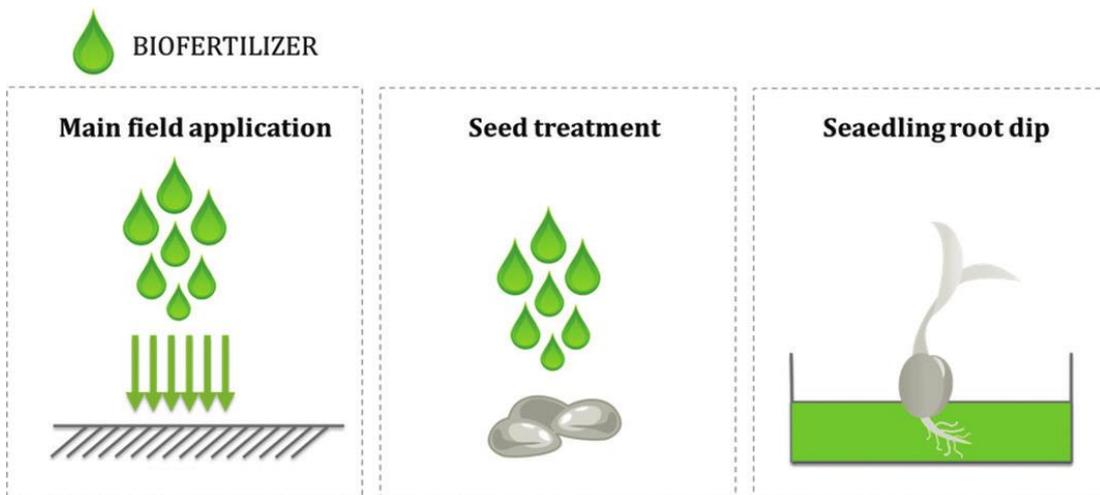


Figura 4. Metodi di applicazione dei PSM (Saeid A., 2018).

In Tabella 6 sono elencati alcuni fertilizzanti microbici attualmente disponibili, con riferimento alla composizione ed agli effetti sulla pianta.

Tabella 6. Esempi di fertilizzanti microbici disponibili sul mercato (Saeid A., 2018).

No.	Product	Producer	Content	Effect
1	Bactim receptor	Intermag, Poland	<i>Glomus coronatum</i> , <i>Glomus caledonium</i> , <i>Glomus mosseae</i> , <i>Glomus viscosum</i> , <i>Rhizophagus irregularis</i> , <i>Streptomyces</i> spp., <i>Streptomyces avernichilis</i> , <i>Pochonia chlamydosporia</i>	7.2×10^6 CFU/g <ul style="list-style-type: none"> • It limits damage to the root system through nematodes. • Increases plant resistance to root system diseases. • Limits the accumulation of harmful substances in plants.
2	Bactim vigor	Intermag, Poland	<i>Glomus coronatum</i> , <i>Glomus caledonium</i> , <i>Glomus mosseae</i> , <i>Glomus viscosum</i> , <i>Rhizophagus irregularis</i> , <i>Bacillus subtilis</i> , <i>Streptomyces</i> spp., <i>Trichoderma harzianum</i> , <i>Trichoderma viride</i> , <i>Pichia pastoris</i>	10.2×10^7 CFU/g <ul style="list-style-type: none"> • Increases the resistance of field vegetables and fruit trees and bushes to abiotic and biotic stresses. • It improves soil structure and increases the availability of nutrients from the soil. • It improves the quality and postharvest life of crops.
3	Bactim starter	Intermag, Poland	<i>Azospirillum brasilense</i> , <i>Azotobacter chroococcum</i> , <i>Bacillus subtilis</i> , <i>Bacillus megaterium</i> , <i>Pseudomonas fluorescens</i>	2.5×10^{10} CFU/g <ul style="list-style-type: none"> • Supports seed germination, ensures faster and better plant emergence. • Improves the supply of nitrogen seedlings. • Provides better phosphorus uptake by the young root system.
4	Acetobacter spp. fertilizers	Jay Ambe Agro Products, India	<i>Gluconacetobacter diazotrophicus</i>	1×10^9 CFU/ml <ul style="list-style-type: none"> • Produces growth promoting substances such as indole acetic acid (IAA) and gibberellins that promote root proliferation and increase the rootlet density and root branching which resulting in increased uptake of mineral and water which promotes cane growth and sugar recovery from the cane.
5	Azospirillum fertilizer	Jay Ambe Agro Products, India	<i>Azospirillum brasilense</i>	1×10^9 CFU/ml <ul style="list-style-type: none"> • Actively fix atmospheric nitrogen through asymbiotic relation with the leguminous plants.

Analogamente a quanto riportato in Tabella 6, vengono riportate in Tabella 7 le caratteristiche dei prodotti dell'azienda italiana CCS Aosta S.r.l. Come si vede, sono costituiti da combinazioni di diverse specie sia fungine che batteriche.

Tabella 7. Fertilizzanti microbici prodotti dell'azienda CCS Aosta S.r.l., Italy

Prodotto	Microrganismi contenuti	Concentrazione	Effetti
Micosat F UNO	<i>Azospirillum brasilense</i> , <i>Azotobacter chroococcum</i> <i>Bacillus subtilis</i> , <i>Bacillus megaterium</i> , <i>Pseudomonas fluorescens</i>	2.5x10 ¹⁰ CFU/g	It supports seed germination, ensures faster and better plant emergence, improves the supply of nitrogen seedlings, provides better phosphorus uptake by the young root system
Micosat F LEN	<i>Glomus coronatum</i> , <i>Glomus caledonium</i> , <i>Glomus mossae</i> , <i>Glomus viscosum</i> , <i>Rhizofagus irregularis</i> , <i>Streptomyces spp.</i> , <i>Streptomyces avernichilis</i> , <i>Pochonia clamydosporia</i>	7.2 x 10alla6 CFU/g	It limits damage to the root system through nematodes, increases plant resistance to root system diseases, limits the accumulation of harmful substances in plants
Micosat F TAB PLUS	<i>Glomus coronatum</i> , <i>glomus caledonium</i> , <i>Glomus mossae</i> , <i>Glomus viscosum</i> , <i>Rhizofagus irregularis</i> , <i>Bacillus subtilis</i> , <i>Streptomyces spp.</i> , <i>Trichoderma harzianum</i> , <i>Trichoderma viride</i> , <i>Pichia pastoris</i>	10,2x10 alla7 CFU/g	It increases the resistance of field vegetables and fruit trees and bushes to abiotic and biotic stresses, it improves soil structure and increases the availability of nutrients from the soil. It improves the quality and postharvest life of crops
Micosat F BRA	<i>Pichia pastoris</i> , <i>Plectosphaerella cucumerina</i> , <i>Pseudomonas fluorescens</i> , <i>Agrobacterium radiobacter</i> , <i>Trichoderma arzianum</i>	2.5x10 alla7 CFU/g	It contains <i>Plectosforella cucumerina</i> which is a phosphor-solubilizing fungus of great efficacy

4.1. Applicazioni biotecnologiche di microrganismi fosfato-solubilizzanti per il recupero del fosforo (A. Bevivino, C. Dalmestri, ENEA)

Le capacità metaboliche dei microrganismi, in particolare batteri, che solubilizzano il fosforo (Phosphate solubilizing microbes, PSM; Phosphate solubilizing bacteria, PSB) possono essere sfruttate per il recupero dell'elemento da numerose fonti ambientali attraverso diverse strategie tecnologiche. Di queste, alcune sono già operative, mentre altre sono ancora in via di studio o sperimentazione.

4.1.1. PSM per il recupero di suoli agricoli contaminati

I PSM convertono il P non disponibile per le cellule (sia P inorganico, P_i , che organico, P_o) in P disponibile per soddisfare le richieste nutrizionali delle piante attraverso solubilizzazione e assorbimento. In base ai vari metodi di solubilizzazione, i PSM si possono suddividere in due classi: (1) PSM che producono e secernono acidi organici responsabili della solubilizzazione dei composti di P_i , e (2) microrganismi che secernono fosfatasi che mineralizzano enzimaticamente i composti di P_o . L'applicazione di entrambe queste classi microbiche nei suoli ne aumenta la disponibilità del P a livello della rizosfera promuovendo l'attività di microrganismi benefici e l'assorbimento di ioni nutrienti. Tale strategia è stata pertanto proposta anche per il recupero di suoli contaminati. Un esempio recente è riportato da Chen e Liu (2019) relativamente ad una sperimentazione in Cina, nella provincia di Shanxi, una zona mineraria altamente contaminata da metalli pesanti. Qui sono stati isolati ceppi batterici PS, tra cui un ceppo di *Pantoea* sp. particolarmente efficiente, che, reintrodotti nel suolo, hanno stimolato significativamente lo sviluppo di piante di riso.

4.1.2. Biolisciviazione del P da rocce

L'approccio biologico alla liberazione del fosfato dai materiali contenenti P, attraverso l'acido organico prodotto dai microrganismi del suolo, è stato proposto come tecnica meno costosa e a energia più bassa rispetto alla sua controparte chimica convenzionale (Wyciszkievicz et al. 2017c; Gupta et al. 2012). La produzione di acidi organici è riconosciuta come un importante meccanismo per il rilascio di P dall'idrossiapatite. In un recente articolo (Saeid et al. 2018), ceppi batterici appartenenti al genere *Bacillus* sono stati utilizzati per la solubilizzazione di fosforo da tre risorse di fosforo rinnovabili e da una non-rinnovabile (roccia fosfatica) grazie alla loro capacità di produrre acidi organici, quali l'acido gluconico, lattico, acetico, succinico e propionico (Figura 5). Gli autori hanno evidenziato una forte correlazione tra le concentrazioni totali di acido organico e le quantità di fosforo P_2O_5 rilasciato (Tabella Tabella 8).

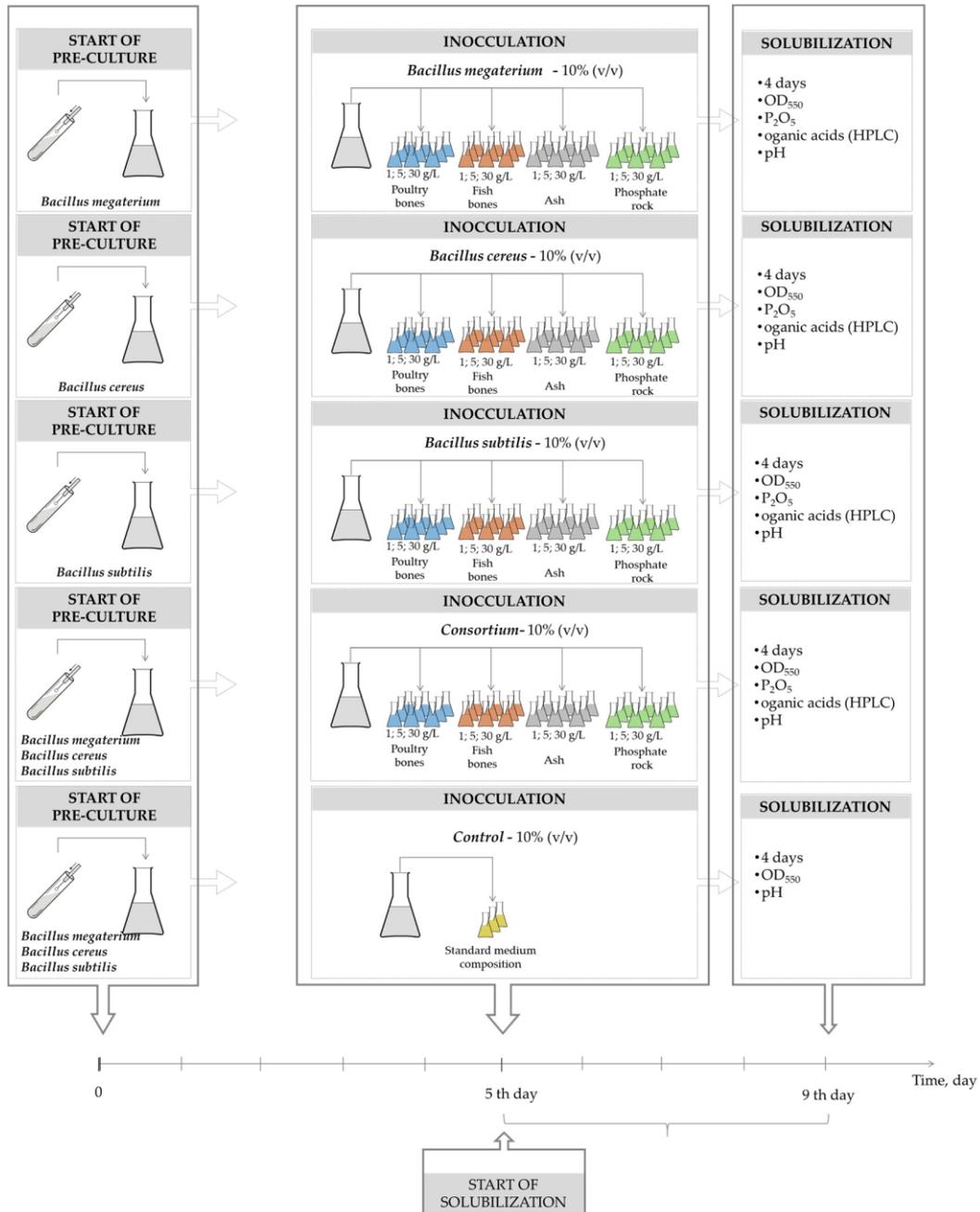


Figura 5. Disegno sperimentale del processo di solubilizzazione(Saied A, et al., 2018).

Tabella 8. Relazione tra la concentrazione totale di acidi organici e del P₂O₅ in soluzione (Saeid A, et al., 2018).

Bacteria	Dose (g/L)	$C_{P_2O_5} = f(C_{organic\ acids}^{total})$	R	p-Value	R ²
<i>B. cereus</i>	1	$C_{P_2O_5} = -11.2 + 10.7 \cdot C_{acids}$	0.985	0.014	0.971
	5	$C_{P_2O_5} = -76.3 + 22.7 \cdot C_{acids}$	0.936	0.064	0.876
	30	$C_{P_2O_5} = -31.6 + 6.6 \cdot C_{acids}$	0.688	0.312	0.473
<i>B. megaterium</i>	1	$C_{P_2O_5} = -40.3 + 22.1 \cdot C_{acids}$	0.982	0.0177	0.965
	5	$C_{P_2O_5} = -77.1 + 21.6 \cdot C_{acids}$	0.922	0.0777	0.851
	30	$C_{P_2O_5} = -88.2 + 11.9 \cdot C_{acids}$	0.953	0.0468	0.909
<i>B. subtilis</i>	1	$C_{P_2O_5} = -98.6 + 47.1 \cdot C_{acids}$	0.647	0.353	0.419
	5	$C_{P_2O_5} = -224 + 28 \cdot C_{acids}$	0.787	0.213	0.619
	30	$C_{P_2O_5} = -13.4 + 6.4 \cdot C_{acids}$	0.663	0.337	0.439

L'utilizzo di PMS isolati dal suolo nei processi di biolisciviazione è già una realtà, che però necessita di essere maggiormente implementata. Per quanto riguarda le specie microbiche, oltre a ceppi fungini appartenenti ai generi *Aspergillus*, *Streptomyces* e *Penicillium*, produttori di diversi acidi organici (acido citrico, gluconico, ossalico e formico, che contribuiscono alla solubilizzazione del P), si è proposta l'applicazione di PSB appartenenti al genere *Acidithiobacillus*, quali *A. ferrooxidans*, *A. thiooxidans*, *A. caldus* e *Leptospirillum ferrooxidans* (Calle-Castaneda et al., 2017). Questi ossidano lo zolfo elementare (S), riducono composti dello S e minerali solforati per produrre acido solforico e solfati di metalli solubili, risultando in una biolisciviazione dei metalli. Poiché gli acidi inorganici sono più forti di quelli organici, queste specie batteriche acidofile risultano più promettenti ai fini della solubilizzazione del P a livello industriale. Nella sperimentazione condotta da Calle-Castaneda e colleghi (Calle-Castaneda et al., 2017), è stato utilizzato *A. ferrooxidans*. Colture di questo erano già applicate con zolfo elementare e rocce fosfatiche ("Biosuper®"), attraverso inoculo *in-situ* per ottenere la solubilizzazione del P direttamente nel suolo (Zapata and Roy, 2004). La novità è consistita nel mettere a punto un processo in due step, bioleaching-two-step "growing-then-recovery", che ha permesso di solubilizzare il 100% del P, rispetto al 56% ottenuto con il metodo single-step "growing-and-recovery".

4.1.3. Utilizzo di PSM per la solubilizzazione di composti fosforici inorganici insolubili da rifiuti e scarti

L'utilizzo di microrganismi per la solubilizzazione dei composti del fosforo in alcune materie prime secondarie rappresenta una possibile strategia per il recupero di P.

Gli scarti più promettenti che potrebbero potenzialmente fornire fosforo sono descritti in Figura 6. Tra essi, sono di particolare interesse le ceneri derivanti dall'incenerimento dei fanghi nel trattamento delle acque reflue e le lische di pesce e ossa, che sono caratterizzate da un alto contenuto di fosforo (Wyciszkievicz et al. 2016). La

valorizzazione biotecnologica di vari tipi di materie prime secondarie è possibile attraverso l'applicazione della capacità naturale del microbiota del suolo di trasformare il fosforo da non disponibile a disponibile, come riportato ampiamente in letteratura (Saeid et al. 2014; Wyciszkievicz et al. 2015a; Wyciszkievicz et al. 2015b; Wyciszkievicz et al. 2017a; Wyciszkievicz et al. 2017b; Wyciszkievicz et al. 2015c). Uno schema riassuntivo è riportato in Figura 7.

La combinazione di *Bacillus megaterium* a 5 g/L con le lische di pesce determina il rilascio di un'alta concentrazione di fosforo pari a 483 ± 5 mg / L.

Il progetto di ricerca *Phosphorus Renewable Raw Materials – A Resource Base for the New Generation of Fertilizers* (National Center for Research and Development of Poland), i cui risultati sono stati pubblicati in Chojnacka e Saeid (2019), ha valutato l'efficacia del processo di solubilizzazione di sottoprodotti e ha proposto due strategie di utilizzo dei fertilizzanti microbici: *ex-situ* e *in-situ*.

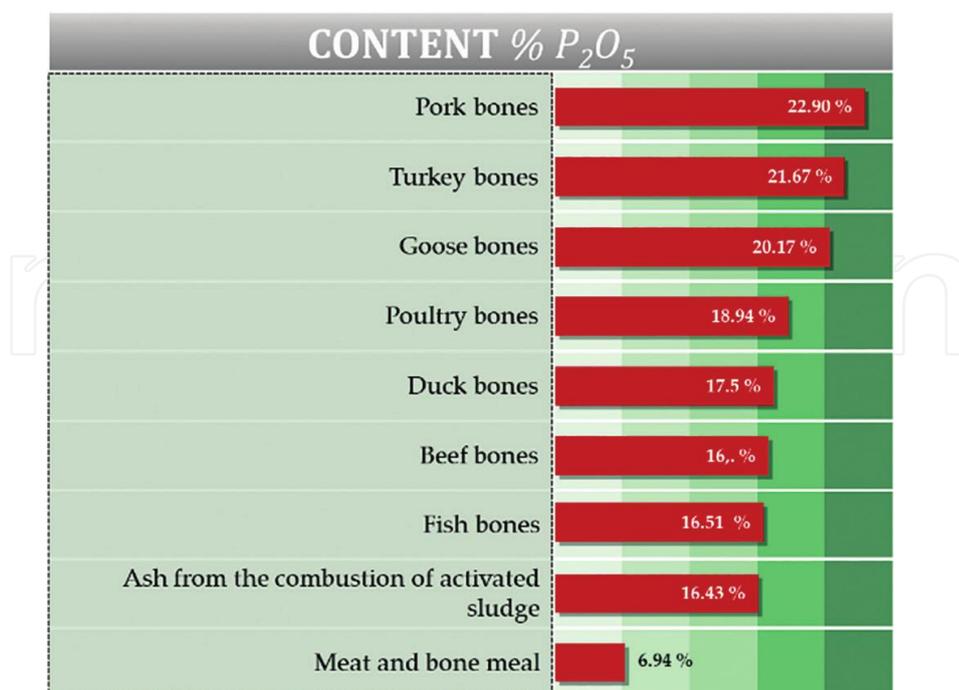


Figura 6. Contenuto di P_2O_5 (anidride fosforica) in alcune materie prime rinnovabili. (Saeid A., 2018).

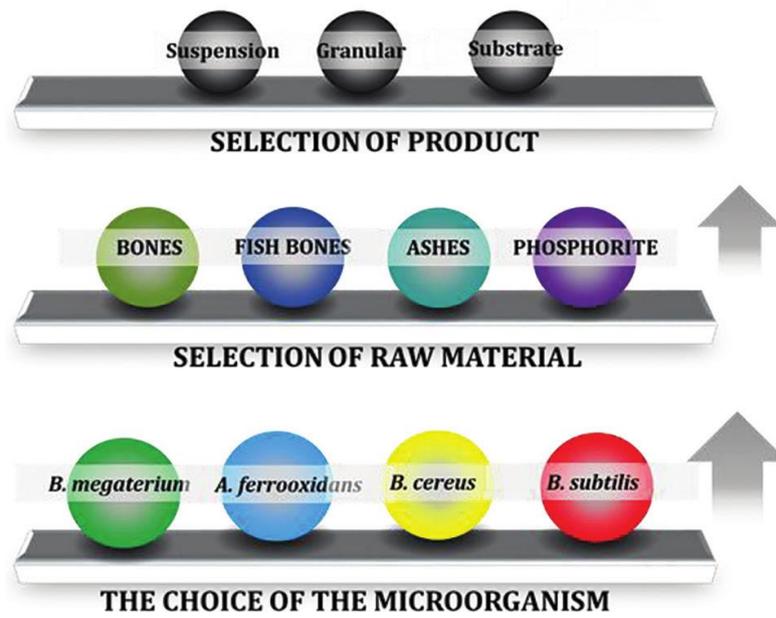


Figura 7. Schema generale degli stadi nel processo di produzione di microorganismi fosfato solubilizzanti (Saeid A., 2018).

5. Recupero di Fosforo dagli effluenti zootecnici (Piccinini S., CRPA)

Dallo studio proposto da Van Dijk (Van Dijk et al., 2016), si può estrapolare un bilancio annuo generale europeo (EU27) del fosforo: le perdite dovute alla produzione vegetale si verificano principalmente a causa dell'accumulo di P nei suoli (924 kt P/anno), di ruscellamento ed erosione (45 kt P/anno) e di lisciviazione nei corpi idrici (40 kt P/anno). Il P accumulato nei suoli per certi aspetti non è perso, ma quando il suo tenore supera un valore limite, regolato da parametri geo-chimici-climatico-pedologici, si innescano meccanismi di cessione che comportano inquinamento delle acque, specialmente di quelle superficiali con fenomeni di eutrofizzazione. In Figura 8 si riporta il contenuto di fosforo nei terreni europei e dalla cartografia si evince come i suoli del bacino padano riscontrino un elevato tenore in P.

Soluzioni sempre più efficaci e convenienti per il trattamento dei liquami e digestati zootecnici, per il recupero dei nutrienti e per ridurre gli impatti ambientali, dovranno divenire sempre più diffuse. Questo approccio può contribuire a migliorare la sostenibilità dei sistemi agricoli (Buckwell e Nadeu, 2016).

La produzione zootecnica, specialmente quella intensiva, dovrà essere in grado di rispondere alla crescente domanda di sostenibilità ambientale avanzata dal mondo sociale e dei consumatori. Ricerca ed innovazioni tecnologiche, anche provenienti da altri settori, dovranno sempre più essere di aiuto alla zootecnia italiana, in particolare nella Pianura Padana, a ridurre gli impatti su acqua e suolo.

In Pianura Padana e non solo, sono presenti zone ad elevata presenza zootecnica caratterizzate da surplus di nutrienti quali azoto e fosforo e spesso classificate come zone vulnerabili ai nitrati. Al contrario altre aree del Paese prive di zootecnia necessitano di nutrienti per fertilizzare le colture.

La gestione non ottimale delle fertilizzazioni con effluenti zootecnici e digestati, ed un apporto eccessivo di nutrienti (azoto e fosforo) rispetto al fabbisogno colturale, possono comportare inquinamento delle risorse idriche sotterranee e dei corpi idrici superficiali dovuto a lisciviazione/runoff di nitrati e fosfati.

Nelle aree ad elevata presenza zootecnica potrebbe convenire ridurre il tenore di azoto (N) e fosforo (P) negli effluenti zootecnici per diminuire i possibili rilasci di nitrati e fosfati verso le acque superficiali e di falda in seguito agli spandimenti. L'azoto ed il fosforo recuperato dagli effluenti produrrebbero fertilizzanti di recupero che potrebbero sostituire i fertilizzanti di sintesi nelle aree invece caratterizzate da deficit di nutrienti, in raccordo coi principi del *Nutrient Recovery and Reuse* e dell'*Economia Circolare*.

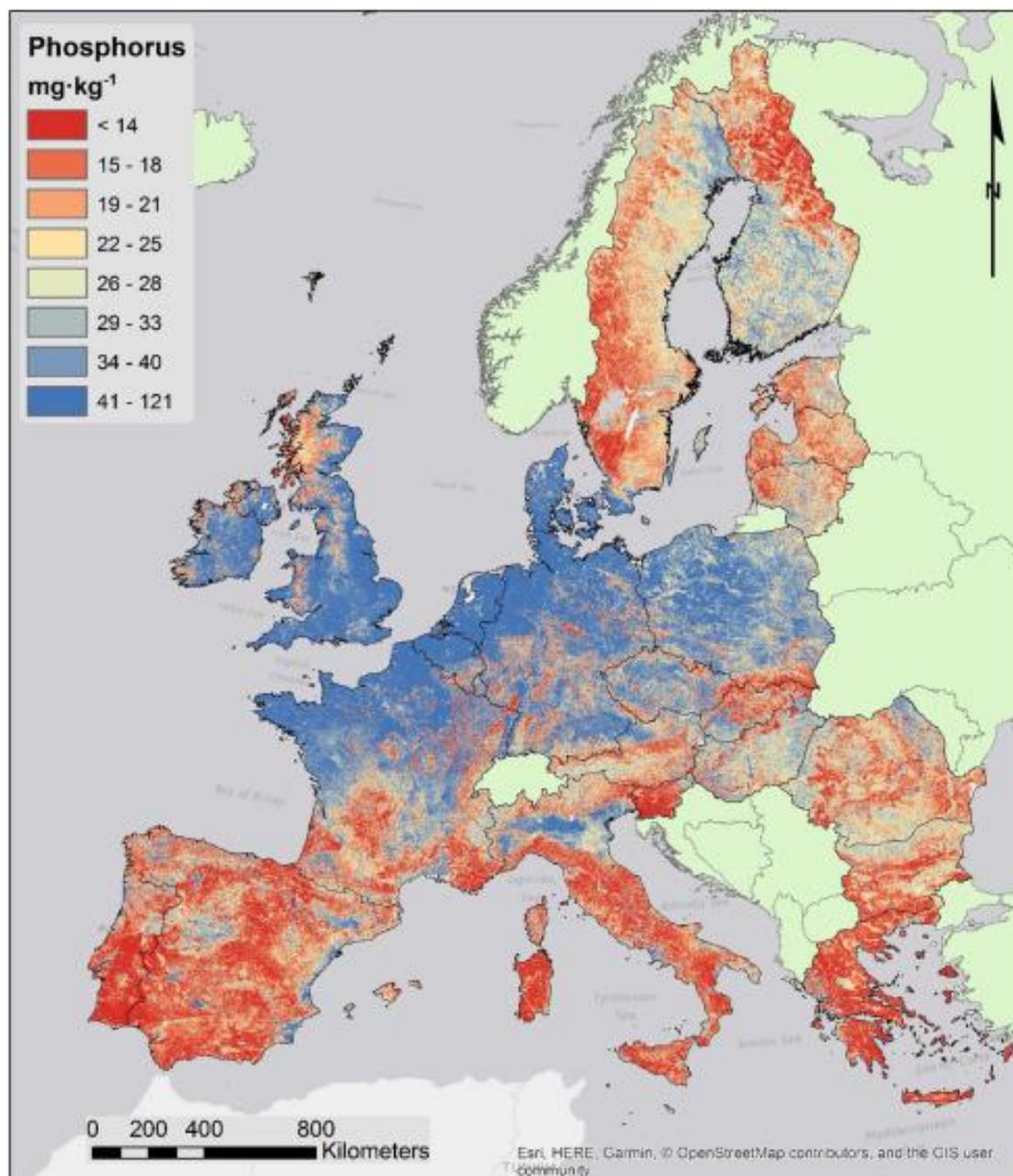


Figura 8. - Maps of Soil Chemical properties at European scale based on LUCAS 2009/2012 topsoil data (Ballabio, C., Lugato, E., Fernández-Ugalde, O., Orgiazzi, A., Jones, A., Borrelli, P., Montanarella, L. and Panagos, P., 2019. Mapping LUCAS topsoil chemical properties at European scale using Gaussian process regression. *Geoderma*, 355: 113912).

Tale pratica soddisferebbe appieno, ad esempio, le priorità del Piano di Sviluppo Rurale per quanto riguarda le tematiche della Focus Area 4B, in particolare:

Riduzione dei rilasci di sostanze inquinanti e miglioramento della qualità delle acque e del suolo: L'azoto ed il fosforo verrebbero recuperati dagli effluenti zootecnici producendo un fertilizzante di recupero; diminuirebbero il tenore di N e P negli

effluenti zootecnici e di conseguenza i rilasci di nitrati e fosfati verso le acque nelle aree con surplus di nutrienti e vulnerabili ai nitrati. L'uso agronomico degli effluenti zootecnici a ridotto tenore di N e P garantirebbe comunque il ritorno della sostanza organica al suolo anche in quelle aree in cui occorre ridurre il carico di nutrienti.

Verifica e adattamento dei sistemi colturali agricoli ai cambiamenti climatici:

l'utilizzazione agronomica di N e P recuperati dagli effluenti zootecnici (fonti rinnovabili) ridurrebbe la sintesi di fertilizzanti industriali, l'utilizzo di combustibili fossili e/o rocce minerali e si eviterebbero le emissioni di CO₂eq generate per produrli. La sostenibilità ambientale dei sistemi colturali agricoli sarebbe incrementata nell'ottica di uno sviluppo dell'economia circolare in agricoltura, si razionalizzerebbe l'input di nutrienti in un sistema agricolo che non solo si adatta, ma che limita i cambiamenti climatici.

Sarebbero perseguiti, inoltre, altri obiettivi presenti nelle priorità del PSR e del PEI-AGRI, quali la sostenibilità e giustificabilità sociale degli allevamenti zootecnici.

5.1. L'azoto ed il fosforo negli effluenti zootecnici

Le fertilizzazioni minerali hanno permesso di incrementare sia le rese che le qualità delle produzioni agricole. Il rovescio della medaglia è costituito dall'eccesso di nutrienti disperso in natura, specialmente in quelle aree ad elevata presenza zootecnica, che compromette la qualità delle acque e riduce la biodiversità (Carpenter, 2008; Carpenter and Bennett, 2011; Steffen et al., 2015; Suttun et al., 2011).

Gli alti costi di trasporto dei liquami zootecnici, caratterizzati da volumi elevati, ma basse concentrazioni di nutrienti e basso tenore di sostanza secca, possono determinare dosaggi sbagliati di N e P sul suolo. La Direttiva Nitrati (91/676/CEE) limita indirettamente il ritorno di P al terreno, limitando la quantità di N zootecnico che può essere applicato sul suolo agrario. Comunque, i rapporti N/P ideali per la biologia di microrganismi e piante del suolo (circa 6-8; Cleveland e Liptzin, 2007) sono superiori ai rapporti N/P della maggior parte degli effluenti zootecnici (mediamente 4). Ciò indica che gli effluenti sono sbilanciati in eccesso di fosforo, ed anche gli effluenti zootecnici applicati al terreno agrario in linea con la Direttiva Nitrati possono contribuire in modo significativo agli accumuli di P negli ecosistemi agricoli. Si consideri inoltre che la normativa fissa dei coefficienti di efficienza per l'azoto zootecnico distribuito alle colture, che possono variare da bassi a elevati a seconda delle modalità e periodo di applicazione. Nelle distribuzioni a bassa efficienza è consentito eccedere negli apporti di totali di azoto e di conseguenza anche in quelli di fosforo ai terreni.

Per comprendere le possibili ricadute dell'applicazione di tecniche di recupero di N e P agli effluenti zootecnici, possiamo prendere a titolo d'esempio l'Emilia-Romagna, dove sono operativi circa 205 impianti di biogas agricoli (Fonte BiometherGIS 2019 -

www.biometer.it) che utilizzano effluenti zootecnici, biomasse agricole e sottoprodotti agroalimentari. Certamente la disponibilità di energia rinnovabile e calore in questi impianti può favorire la messa in funzione di impianti di recupero dei nutrienti. Oltre alle aziende agricole con impianto di biogas, le tecniche di recupero dei nutrienti possono essere applicabili anche agli allevamenti suinicoli con dimensioni tali da essere soggetti ad Autorizzazione Integrata Ambientale (AIA), che in Emilia Romagna risultano circa 120 (Registro AIA) e dei quali già diversi avviano i loro liquami suinicoli al processo di digestione anaerobica.

Supportati da tali dati, in Emilia-Romagna si possono ipotizzare almeno 4,2 milioni di m³ all'anno di effluenti suini e digestati agricoli a cui poter applicare le tecniche di recupero nutrienti. Ipotizzando che il 20% di tale quantità possa essere effettivamente avviata al trattamento, si tratterebbero circa 840.000 m³ all'anno di effluenti, caratterizzati da un tenore in azoto pari a 3,5 – 4 kg N/m³ e da un tenore in fosforo pari a 0,6 – 1,2 kg P/m³ (Fonte CRPA e Mantovi P. IA n.9/2012); a trattamento sarebbero pertanto avviati circa 3.150 t N/anno e 760 t P/anno. Valutando, in via cautelativa, l'efficienza di recupero per N pari al 50% e del P pari al 60%, si recupererebbero 1.570 t/anno di N e 455 t/anno di P e le stesse quantità risulterebbero come minor input nelle aree con surplus di nutrienti e/o aree vulnerabili ai nitrati. Non solo, ma delocalizzando il fertilizzante recuperato in aree con richiesta di nutrienti, si eviterebbe una pari produzione di concimi N-P e le relative emissioni di CO₂eq che la loro sintesi industriale comporterebbe: 7.760 t CO₂eq/anno. Questo senza considerare i benefici ambientali e sociali nelle aree ove N e P sono stati recuperati.

Parte II

Analisi degli esempi di casi di recupero di fosforo
applicate a livello nazionale ed internazionale

(Fatone F., Eusebi A.L., Foglia A., Radini S, UNIVPM)

6. Recupero e riuso del fosforo: generalità, limiti e criticità

Nonostante i principi di economia circolare siano comunemente condivisi, l'attuazione pratica è a volte ostacolata dagli adeguamenti normativi e regolatori, che dovrebbero avere approccio olistico e considerare l'intera catena del valore. La legislazione ed i regolamenti non sempre, o più lentamente, si innovano in linea con i progressi tecnologici che consentono recuperi di materia sempre più efficienti, e che possono essere applicati a un numero di matrici di scarto sempre più vasto. Inoltre, il mercato comune e transfrontaliero imporrebbe un'armonizzazione delle normative nazionali, che devono recepire le direttive comunitarie per permettere il libero scambio dei prodotti tra i Paesi dell'Unione. La regolamentazione normativa è comunque essenziale per assicurare la presenza nel mercato esclusivamente di prodotti di qualità e sicuri, stabilendo regole per uniformare gli standard di accettabilità. Le disposizioni comuni agevolano il libero commercio tra gli Stati Membri e favoriscono l'accettabilità dei prodotti di recupero da parte degli utilizzatori, tutelati sia da un punto di vista di conformità delle prestazioni con quelle dei prodotti tradizionali, che di sicurezza in termini di tutela della salute e salvaguardia dell'ambiente.

Per rientrare nei cicli produttivi, i materiali recuperati da rifiuti devono essere processati secondo approccio e protocollo End-of-Waste, mediante il quale non sono più considerati rifiuti. Affinché si possa attribuire la cessazione di rifiuto, devono essere soddisfatti specifici criteri, definiti nella Direttiva 2008/98/CE. In particolare, il prodotto recuperato deve essere già applicato in ambiti noti, deve chiaramente esistere una domanda o un mercato, deve soddisfare gli standard e le norme tecniche specifiche e l'utilizzo non deve comportare impatti negativi sull'ambiente o sulla salute umana. In assenza di criteri stabiliti a livello comunitario, la normativa europea affida agli Stati membri la valutazione del processo di End of Waste. La legislazione italiana ha recepito la Direttiva Quadro Rifiuti 2008/98 con il Decreto Legislativo n. 205 del 3 dicembre 2010 e, successivamente, con l'introduzione dell'Articolo 184-ter, denominato "Cessazione della qualifica di rifiuto". L'articolo demanda alle Autorità competenti il rilascio di provvedimenti autorizzativi relativi all'esercizio di impianti di gestione dei rifiuti con la possibilità di definire i criteri di cessazione della qualifica di rifiuto, valutando caso per caso. Le Regioni e gli enti competenti nazionali hanno quindi il compito di valutare la cessazione di qualifica di rifiuto e la sua regolamentazione, laddove non siano presenti indicazioni comunitarie.

Tuttavia, la sentenza n. 1229 del 28 febbraio 2018 del Consiglio di Stato, attribuisce allo Stato in via esclusiva il potere di determinare i criteri per la cessazione della qualifica di rifiuto, impedendo di fatto alle Regioni la possibilità di rinnovare le autorizzazioni rilasciate agli impianti di gestione dei rifiuti che praticano il riciclo o il recupero di risorse. Non essendo regolamentato da normative europee o nazionali

specifiche che ne disciplinino la cessazione della qualifica di rifiuto, anche il recupero del fosforo viene di fatto interessato da questa sentenza.

Un processo regolatorio solido affianca il recupero del fosforo nei diversi cicli produttivi e l'accesso al mercato secondo standard di qualità e di sicurezza che superino possibili resistenze ed incertezze dovute all'origine del prodotto. Ogni nuova immissione, infatti, deve generalmente affrontare l'inerzia del mercato, spesso diffidente nei confronti di prodotti non convenzionali. A ciò si possono aggiungere reticenze causate dall'origine del fosforo recuperato in impieghi particolarmente sensibili, come il settore agroalimentare e l'allevamento, e le incertezze sull'efficacia del fosforo recuperato rispetto alla materia prima.

7. Approcci gestionali ottimali

In Europa nel 2017 sono state utilizzate 1.3 milioni di tonnellate di fosforo nei fertilizzanti. In Italia nel 2018 è stato stimato un consumo pari a 270690 tonnellate (fonte Eurostat).

Tabella 9: Fertiliser consumption per hectare of fertilised UAA, EU-28, 2007 and 2017

	2007			2017			Difference between 2007 and 2017	
	Fertilised UAA (1000 ha)	Nitrogen/Fertilised UAA (kg N/ha)	Phosphorus/Fertilised UAA (kg P/ha)	Fertilised UAA (1000 ha)	Nitrogen/Fertilised UAA (kg N/ha)	Phosphorus/Fertilised UAA (kg P/ha)	Nitrogen/Fertilised UAA (%)	Phosphorus/Fertilised UAA (%)
EU-28	157'739	67.9	9.4	152'648	75.9	8.8	11.9	-6.0
Belgium	1'346	106.0	7.4	1'320	118.2	3.7	11.6	-50.3
Bulgaria	4'968	35.8	2.6	4'352	80.7	6.8	125.3	161.1
Czechia	3'565	94.0	7.5	3'486	114.1	6.9	21.3	-7.5
Denmark	2'508	77.6	5.6	2'576	98.2	8.1	26.5	44.7
Germany	16'171	98.9	7.1	16'297	101.8	6.2	2.9	-13.3
Estonia	897	27.8	3.9	961	38.8	4.2	39.5	7.7
Ireland	3'831	83.9	8.5	3'583	103.0	11.7	22.7	38.2
Greece	3'226	73.2	10.2	3'133	61.3	9.0	-16.2	-12.1
Spain	16'745	58.9	14.5	16'743	64.0	11.4	8.8	-21.3
France	26'933	81.6	9.0	26'799	83.9	7.0	2.8	-22.4
Croatia	1'176	110.9	15.0	1'040	94.6	14.3	-14.7	-4.7
Italy	13'073	45.2	17.5	11'353	50.8	20.2	12.6	15.5
Cyprus	133	61.6	14.8	112	72.3	21.0	17.4	42.0
Latvia	1'240	37.2	5.9	1'472	52.6	7.7	41.5	30.8
Lithuania	2'588	49.1	6.6	2'833	59.0	8.3	20.2	26.2
Luxembourg	130	102.8	5.7	131	103.6	3.9	0.8	-31.9
Hungary	5'197	61.5	7.3	4'567	90.9	10.8	47.7	47.8
Malta	10	61.3	6.2	11	51.5	5.1	-16.0	-18.3
Netherlands	1'845	130.1	8.0	1'731	128.8	2.7	-1.0	-66.0
Austria	2'344	47.3	7.7	2'182	51.3	5.4	8.3	-30.3
Poland	14'954	70.6	12.0	14'021	82.1	10.7	16.2	-11.1
Portugal	2'069	54.6	14.4	2'001	50.7	11.2	-7.1	-21.8
Romania	12'551	21.2	3.6	12'450	30.6	5.1	44.8	41.4
Slovenia	448	66.0	12.4	417	64.9	9.6	-1.7	-23.0
Slovakia	1'868	60.6	5.9	1'844	66.5	5.5	9.6	-7.2
Finland	2'008	74.1	8.0	1'997	69.6	6.1	-6.1	-23.1
Sweden	2'794	59.8	4.9	2'800	70.9	5.2	18.5	5.6
United Kingdom	13'119	76.8	7.5	12'364	84.1	7.0	9.5	-6.2
Norway	881	120.8	13.6	823	120.7	10.5	-0.1	-22.6

Note: Fertilised UAA is calculated by excluding from UAA the hectares occupied by rough grazing and fallow land. As there are no data available for 2017 yet, 2013 was chosen as reference year for rough grazing and fallow land. EU28, Italy and Norway: 2016 values of UAA were used to calculate the fertilised area, because there are no data available for 2017.

Source: Eurostat (online data codes: aei_fm_usefert, apro_cpsh1 and ef_oluf1)

La condivisione di tecnologie fornisce un supporto fondamentale per una gestione sostenibile delle risorse. Per l'agricoltura la corretta gestione comprende attività quali la selezione del tipo di colture e dei periodi di applicazione dei fertilizzanti, l'utilizzo di metodi di spandimento mirati, sistemi di rotazione delle coltivazioni e utilizzo controllato dei fertilizzanti nelle zone più sensibili. Sono, inoltre, da tenere in considerazione le diverse caratteristiche dei fertilizzanti applicati anche in termini di rapporto N/P per un corretto bilancio di nutrienti e il contenuto di sostanza organica, oltre alle modalità e i tempi di rilascio.

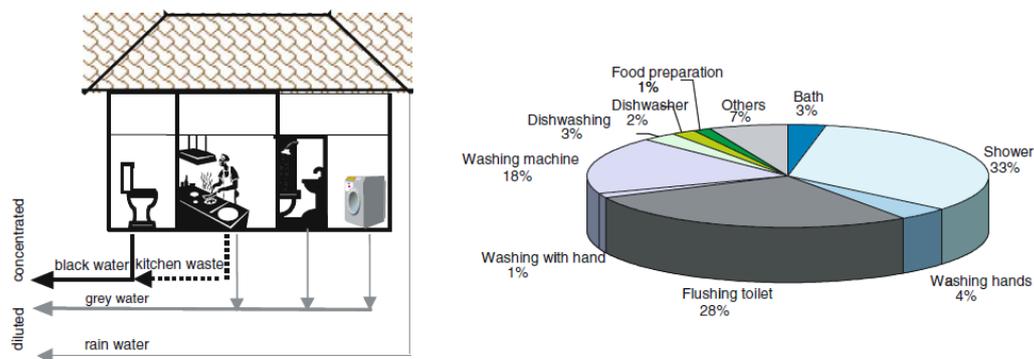
Di seguito si riportano tecnologie di gestione e valorizzazione del fosforo, applicate in esempi pratici di storie di successo, per dimostrare la fattibilità e la sostenibilità dei sistemi non convenzionali per il recupero del fosforo.

7.1. Recupero da attività umane

In questo capitolo vengono raccolte le storie di successo che riguardano il recupero di fosforo dai flussi delle acque reflue urbane. Gli esempi applicativi riportati sono suddivisi in base all'approccio gestionale tra sistemi decentralizzati, che prevedono la separazione a monte dei reflui, e quelli centralizzati, che convogliano i flussi negli impianti di trattamento.

7.1.1. Gestione decentralizzata dei reflui urbani

I principali flussi reflui provenienti dagli ambienti domestici possono essere suddivisi in acque nere, ossia le acque di scarico dei servizi igienici, acque grigie, derivanti dalle attività quotidiane che necessitano il consumo di acqua per l'igiene personale e la pulizia, e i reflui dalla cucina.



General types of wastewater streams from household. Water usage per activity in average Dutch household leading to generation of a specific wastewater stream (NIPO/VEWIN 2002). Similar water consumption and distribution per household activity was measured in other EU countries (EEA 2001). In general drinking water consumption will vary depending on geographic location. To give some examples in US daily indoor consumption of water is around 280 L capita⁻¹ day⁻¹ (AWWA 2005), in Europe around 140 (EEA 2001) and in sub-Saharan Africa 52 L capita⁻¹ day⁻¹ (IFPRI 2002).

Figura 9: tipologia reflui domestici (Kujawa-Roeleveld et Zeeman, 2006)

Le acque nere a loro volta possono essere ulteriormente suddivise, separando le urine dalle feci.

L'urina umana contiene circa il 40-50% del fosforo totale in ingresso agli impianti di trattamento delle acque reflue urbane, sebbene rappresenti meno dell'1% del volume totale delle acque reflue (Larsen and Gujer, 1996).

La separazione delle urine pertanto, rappresenta un'alternativa non trascurabile per la corretta gestione dei flussi contenenti fosforo.

Tabella 10: Caratteristiche flussi domestici separati (Capodaglio 2017)

Source	Volume (L/cap/d)	TSS Range (mg/L)	COD Range (mg/L)	N Range (mg/L)	P Range (mg/L)	Metals & Micropollutants	Pathogens
Blackwater	1–7	16,000–125,000	5000–93,000	1500–16,000	500–3000	High (~10 mg/cap/d)	High
Greywater	70–150	100–800	200–450	6–22	0.4–8	Very High (10 mg/cap/d)	Low
Urine	0.5–2.5	15,000–30,000	4000–11,000	1800–18,000	200–4000	Very low (<1 mg/cap/d)	Medium–Low

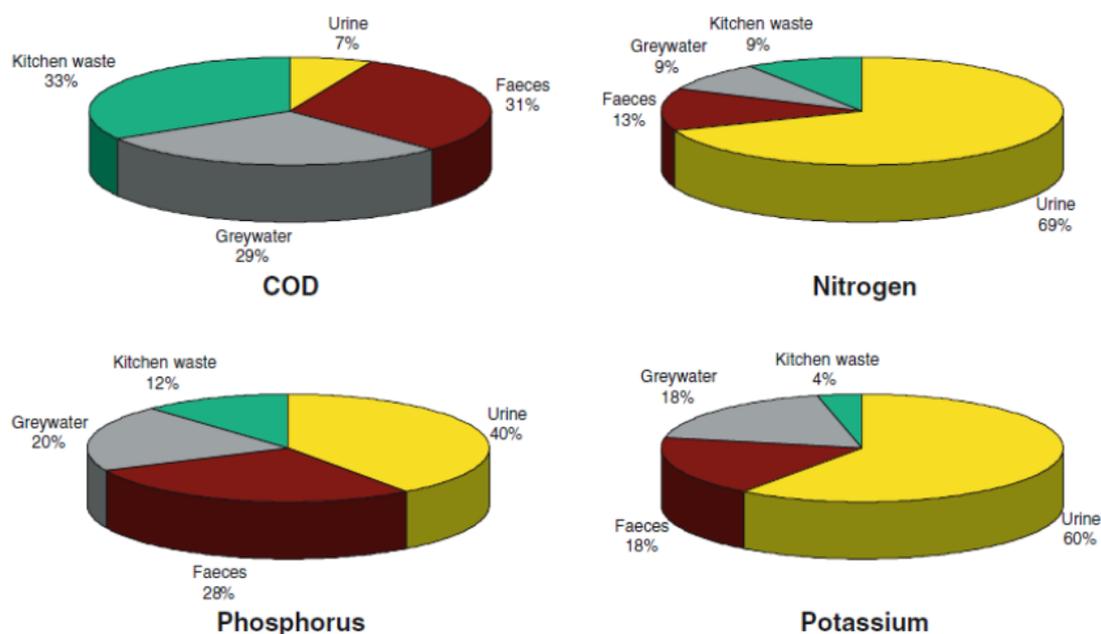


Figura 10: Distribuzione dei contaminanti nei reflui domestici

7.1.1.1. DESAR – Opzioni per il trattamento separato delle urine

L'Institute of Applied Water Research (STOWA) è una piattaforma di ricerca per i gestori delle risorse idriche e degli impianti di depurazione delle acque reflue domestiche olandesi. Nel 2005 è stato pubblicato il rapporto del progetto DESAR, Decentralised Sanitation and Reuse, nel quale vengono analizzate diverse opzioni per il trattamento separato delle urine. Il trattamento sul liquido concentrato dell'urina permette di recuperare fosforo in forma minerale, riducendo gli oneri di trasporto e garantendo sul mercato un prodotto più facilmente commercializzabile, rispetto al flusso non trattato. Sono valutate diverse forme di recupero, attraverso la precipitazione di $MgNH_4PO_4 \cdot 6H_2O$ (MAP) o di $KMgPO_4 \cdot 6H_2O$ (KMP), in diversi scenari di

processo, che comprendono il trattamento separato delle urine o la loro integrazione nei processi per le acque reflue.

Ipotizzando il trattamento separato di acque nere, grigie e urina, queste ultime possono essere miscelate al liquido surnatante dalla digestione anaerobica delle acque nere e dei fanghi di quelle grigie, ottenendo così un flusso estremamente concentrato in nutrienti e garantendo di conseguenza efficienze di recupero più elevate. Tale sistema può essere ulteriormente ottimizzato integrando anche i rifiuti alimentari domestici con il trattamento delle acque nere per la produzione di biogas.

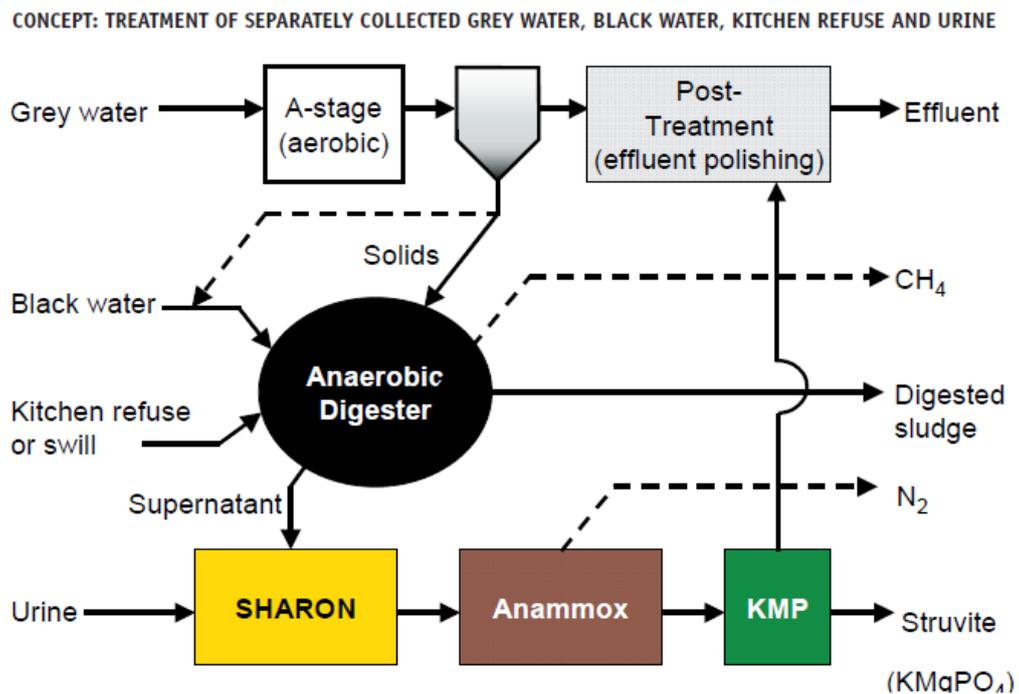


Figura 11: Trattamento separato feci-urine-acque grigie

Le urine, avendo un elevato contenuto di fosforo, possono anche essere trattate a parte per la cristallizzazione di dicalcio fosfato o struvite. Applicare i processi di precipitazione per il recupero del fosforo sull'urina non pretrattata può comportare fenomeni di sovrasaturazione e la conseguente precipitazione di grani fini non cristallizzati. Se invece l'urina viene prima trattata biologicamente, la rimozione dell'azoto ammoniacale causa la riduzione dell'alcalinità e del pH, che può essere successivamente regolato per un maggior controllo della precipitazione della struvite. I processi di precipitazione sono stati testati con diverse condizioni di pH, temperatura, velocità di miscelazione, dosaggio di MgO o MgCl e rapporti molari Mg:P, per determinare le condizioni operative ottimali.

Viene, inoltre, proposta la configurazione di processo IntWUT per il trattamento integrato delle urine con le acque reflue. In questo processo le urine vengono

miscelate al surnatante della digestione anaerobica, per massimizzare il contenuto di nutrienti. Il flusso concentrato viene, quindi, inviato ad un'unità per il recupero del fosforo sotto forma di struvite.

PROCESS FLOW DIAGRAM OF THE REFERENCE SCENARIO AND INTEGRATED WASTEWATER AND URINE TREATMENT (INTWUT) PROCESS
(FLOW NUMBERS REFER TO THE NUMBERS IN TABLE 2 AND THE SUBSCRIPTS IN THE TEXT, Q_1 , Q_2 , Q_3 , ETC.)

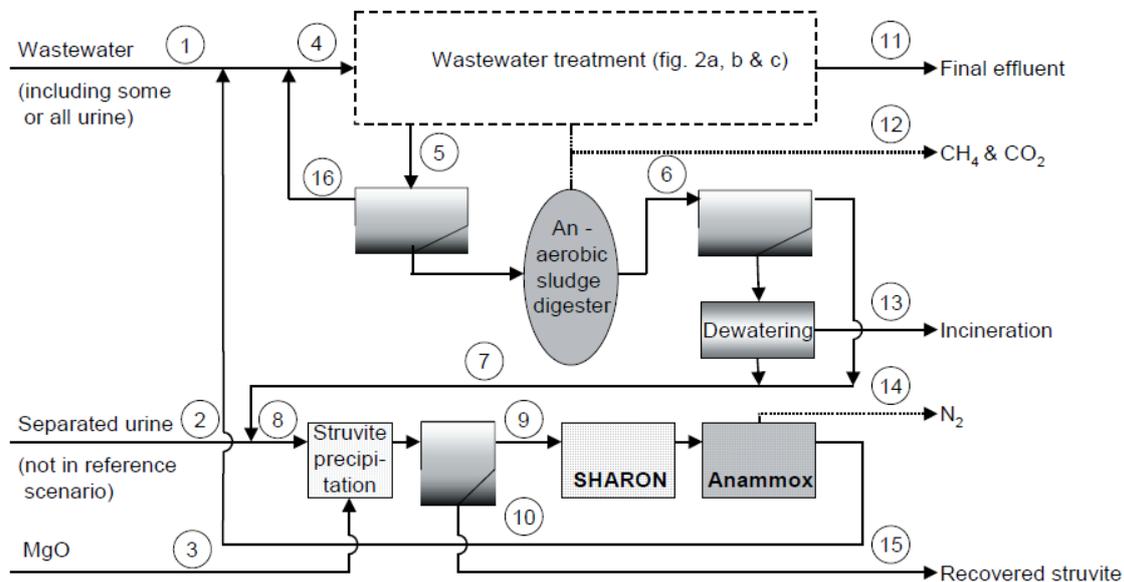


Figura 12: Processo integrato IntWUT

Sono state valutate diverse configurazioni di processo per il trattamento delle acque reflue a monte, integrando per ognuno di essi diversi quantitativi di urine separate:

- BCFS: configurazione di riferimento senza dosaggio di urine;
- IntWUT-BCFS: configurazione BCFS dopo pre-precipitazione e aggiunta del 50% delle urine separate.
- IntWUT-A: trattamento delle acque reflue con solo reattore aerobico.

Lo studio ha dimostrato che integrando il trattamento delle acque reflue con il flusso separato delle urine, anche parziale, vengono migliorate le prestazioni di rimozione e le efficienze energetiche, in impronte più compatte.

Il progetto DeSaR è stato applicato nel 2006 a Sneek, nei Paesi Bassi, in un quartiere di 32 abitazioni nel quale utilizzano servizi igienici con sistemi di aspirazione per la raccolta separata delle acque nere, che vengono trattate per la produzione di biogas ed il recupero dei nutrienti tramite la precipitazione di struvite.

Ogni abitazione è dotata di due servizi igienici a vuoto, da cui le acque nere vengono coltate verso una stazione centrale esterna, costituita da una pompa a vuoto, un serbatoio di raccolta e da una pompa per il trasporto al sistema di trattamento. Le acque nere subiscono un trattamento anaerobico per la produzione di biogas in due

serbatoi UASB da 6 m³ ciascuno, un post-trattamento per la rimozione del COD residuo ed il recupero dei nutrienti N-NH₄⁺ e fosfati, tramite precipitazione di struvite, ed un successivo trattamento nel reattore OLAND (Oxygen-Limited Autotrophic Nitrification–Denitrification) per la rimozione dell’azoto rimanente.

I risultati dell’applicazione a Sneek (Elzinga et al. 2009) e ricerche di laboratorio in Svizzera (Larsen et Lienert, 2007) hanno dimostrato che il 95-98% del fosfato totale, presente rispettivamente nell’effluente dai reattori UASB e nell’urina, può essere recuperato sottoforma di struvite. Dall’effluente al reattore UASB possono essere recuperati 7.6 gN/p/d e 0.63 gP/p/d, equivalenti rispettivamente al 69 e al 48% dell’azoto e del fosforo prodotto negli ambienti domestici.

Tabella 11: Produzione di metano e recupero di nutrienti a Sneek (BW: Black Water; KW: Kitchen Waste)

Nutrients and CH ₄	Unit	UASB 32	Theoretical	Theoretical
		houses (without KW)	(without KW)	(with KW)
BW volume	L/p/d	6	7.5	
CH ₄	L/p/d	13–19.5	15	27
N _{total}	(gN/p/d)	7.6*	11	12.5
NH ₄ ⁺ -N		6.2**		
P _{total}	gP/p/d	0.63***	1.3	1.6
PO ₄ -P		0.46****		

Data are obtained from the demonstration project in Sneek (Elzinga *et al.* 2009) and compared with theoretical values.

*1,260 mg total-N/l; **1,034 mg NH₄⁺-N/l; ***105 P_{total}/l; ****77 mg PO₄-P/l in the UASB effluent.

Inoltre, una parte del fosforo contenuta nelle acque nere precipita nel reattore UASB e diventa parte del fango stabilizzato. Le ricerche di STOWA (2005) suggeriscono che il fango anaerobico può essere conforme alle normative olandese per le applicazioni in agricoltura, incrementando ulteriormente il recupero di fosforo dai reflui.

7.1.1.2. Run4Life

Il progetto europeo Run4Life (Recovery and Utilization of Nutrients 4 Low Impact Fertilizer), del programma Horizon 2020, propone l'approccio decentralizzato della gestione dei reflui urbani. Le acque nere (acque reflue dei servizi igienici), le acque grigie (altre acque reflue domestiche) e i rifiuti organici alimentari vengono raccolti separatamente. Ogni flusso riceve un trattamento dedicato per il recupero delle risorse contenute. Le principali tecnologie utilizzate sono:

- Servizi igienici a flusso ridotto con sistema di aspirazione;
- Digestione anaerobica ipertermofila (HTAD);
- Sistema bio-elettrochimico per il recupero dei nutrienti.

I siti dimostrativi si trovano a Gand (Belgio), Helsingborg (Svezia), Sneek (Paesi Bassi) e Vigo (Spagna). In ognuno dei siti pilota le acque nere, a volte accoppiate ai rifiuti organici domestici, sono inviate al trattamento di digestione anaerobica, seguito dalla fase di recupero dei nutrienti dalla fase liquida del digestato.

Il sito di Lemmerweg (Sneek, Paesi Bassi) dispone di quattro aree con sistemi di separazione dei reflui, che comprendono abitazioni, uffici e un ospedale. Il recupero del fosforo avviene tramite la precipitazione di struvite. Lemmerweg è un'applicazione inserita nel progetto Nieuwe Sanitatie, sviluppato nei Paesi Bassi e che prevede la separazione a monte dei reflui urbani. Le tecnologie applicate sono i servizi igienici aspirati a basso flusso e il processo di digestione anaerobica ipertermofila.

La Zona Franca de Vigo (Vigo, Spagna) comprende un edificio per uffici situato nel parco industriale di Porto do Molle (Nigran, Spagna) dotato di sistemi separati per la raccolta delle acque nere e grigie. Le tecnologie utilizzate sono la configurazione MBR aerobica per il trattamento ed il riutilizzo delle acque grigie ed il trattamento AnMBR con recupero di nutrienti tramite sistemi bio-elettrochimici per le acque nere.

Il quartiere Nieuwe Dokken di Ghent, in Belgio attua il trattamento dei reflui e il recupero delle risorse per circa 1200 abitanti equivalenti. Nell'impianto vengono recuperati struvite e azoto. La città è inoltre inserita tra i progetti promossi dall'European Green Capital EGCA (<https://ec.europa.eu/environment/europeangreencapital/>), grazie al suo innovativo approccio ZAWENT (Zero Waste Water with Energy and Nutrient Recovery).

Il pilota situato a Helsingborg, in Svezia si estende nelle aree portuali e industriali. Nel progetto H+ verranno raccolti e trattati separatamente acque nere, rifiuti di cucina e acque grigie di 320 appartamenti e diversi uffici, per un totale di 1800 abitanti equivalenti. Le acque nere e gli scarti delle cucine saranno trattati in digestori anaerobici separati e dal digestato delle acque nere verranno estratti struvite e solfato di ammonio, da miscelare in diversi rapporti con fanghi igienizzati dalla digestione dei rifiuti della cucina per ottenere prodotti fertilizzanti su misura.

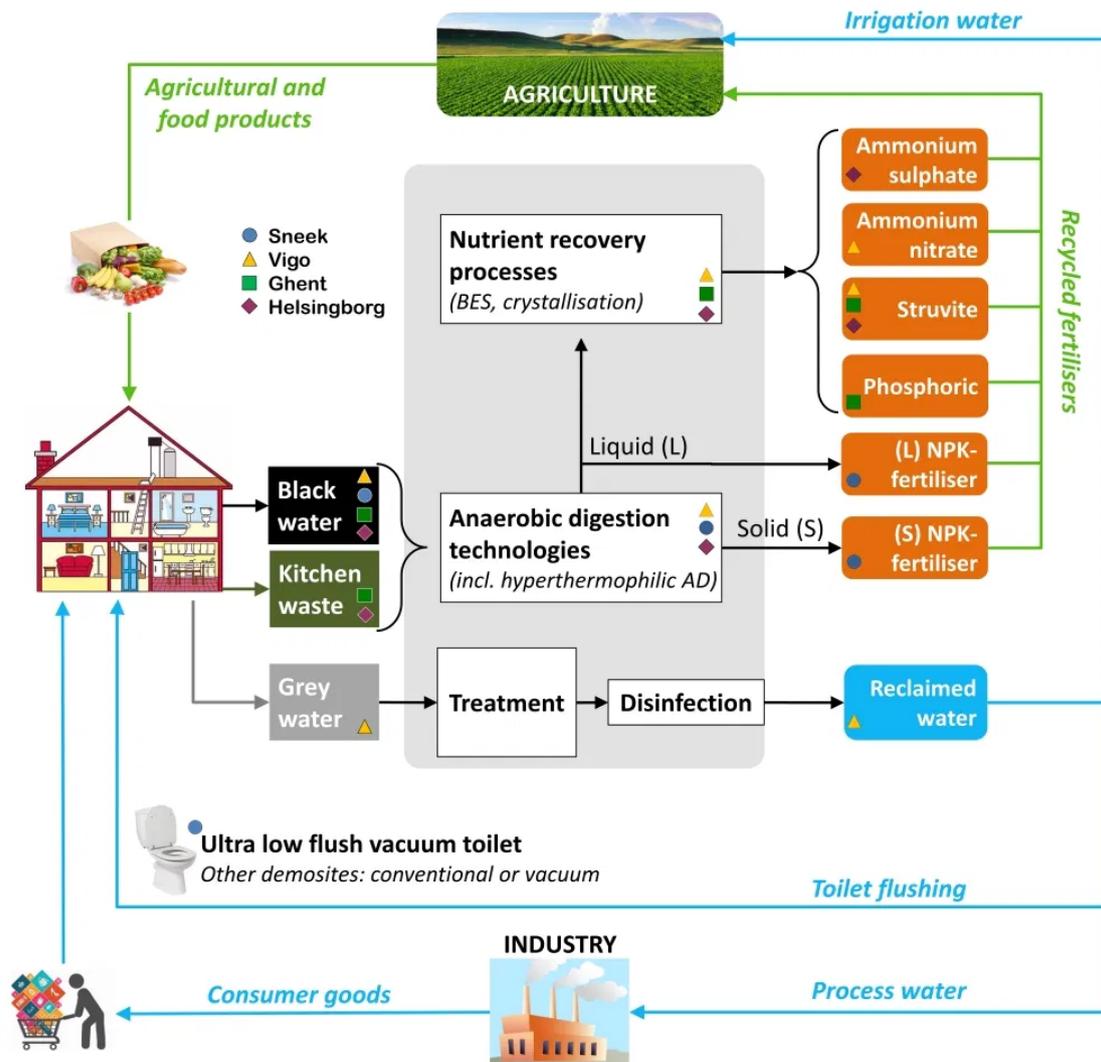


Figura 13: RUN4LIFE

Nei siti pilota è previsto un recupero fino al 90-100% di nutrienti NPK, di molto maggiore rispetto agli attuali tassi di recupero in Europa, che restano in media inferiori al 20% per i sistemi centralizzati. Inoltre, vengono sviluppate tecnologie per il riutilizzo dell'acqua fino al 90%.

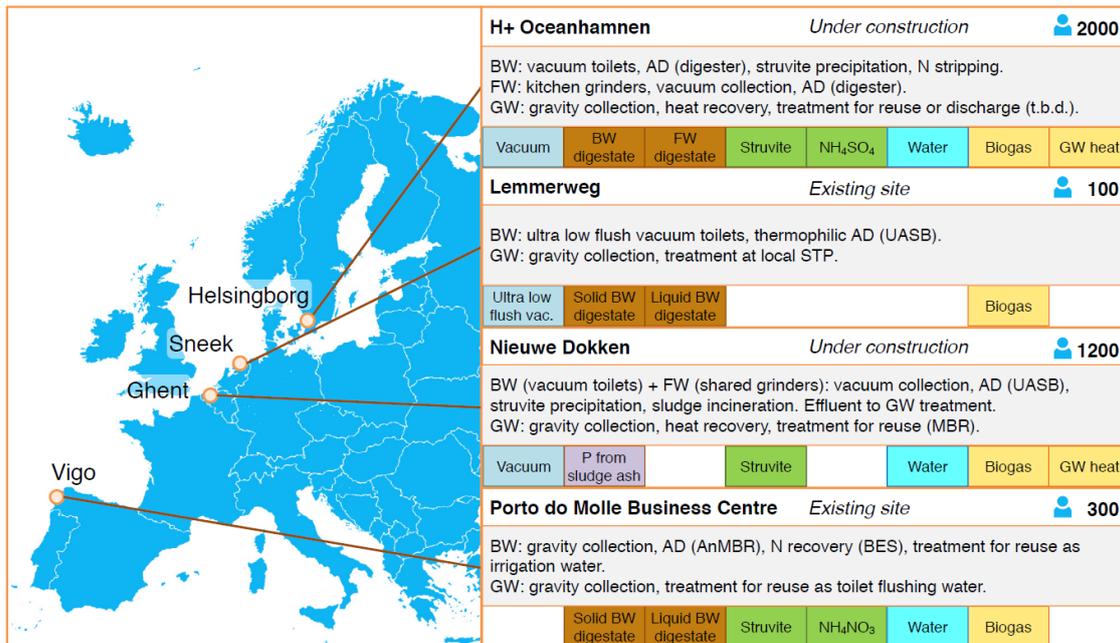


Figura 14: Siti dimostrativi Run4Life

Tabella 12: Primi risultati del progetto RUN4LIFE

Table 1. Results and forecasted impacts of each transition site on key environmental parameters based on previous experience.

	Conventional WWT	Sneek	Vigo	Ghent	Helsingborg
People equivalent	100	70 ^a	150	1280	1650
Greywater flow (m ³ /d)	20		7.5	120	
Blackwater flow (m ³ /d)		0.50 ^a	7.5	15	20
Kitchen waste flow (m ³ /d)					6.5
Water saving (%)	0	>90	50-100 ^b	35	35
Water reuse (%)	0	0	60-80	>80	>80
N recovery (%)	0-20	90	35	>5	35
P recovery (%)	0-20	60 ^a	40	35	60
K recovery (%)	0	90	50	0	0
Biogas (m ³ CH ₄ /capita/year)	6.0	8.0 ^a	6.7	15.6	13.0

a) Results to date. b) Water saving in toilets.

7.1.1.3. Olanda ed Amsterdam (circular city)

Secondo le agende nazionali di transizione verso l'economia circolare presentate nel 2018, l'economia olandese dovrebbe essere completamente circolare entro il 2050, utilizzando il 50% in meno di materie prime primarie entro il 2030. Oltre 325 portatori di interesse hanno approvato questa ambizione firmando l'accordo sulle risorse. Sono state sviluppate cinque catene di valore prioritarie e ciascuna agenda prevede misure concrete che contribuiscono alla realizzazione di queste ambizioni. Oltre alle agende di transizione, la legge ambientale e di pianificazione (Omgevingswet) (che entrerà in vigore nel 2021) offre nuove opportunità per la realizzazione di ambizioni circolari. Questo perché dovrebbe allineare meglio i piani nei settori della pianificazione territoriale, dell'ambiente e della natura. Inoltre, i progetti sostenibili dovrebbero essere stimolati e ai comuni, alle province e ai consigli idrici dovrebbe essere data più libertà per raggiungere i loro obiettivi specifici. Nel settore idrico sono state anche individuate le risorse prioritarie su cui focalizzare l'attenzione, dove il fosforo ha primaria rilevanza

stowa

Top 5 resources

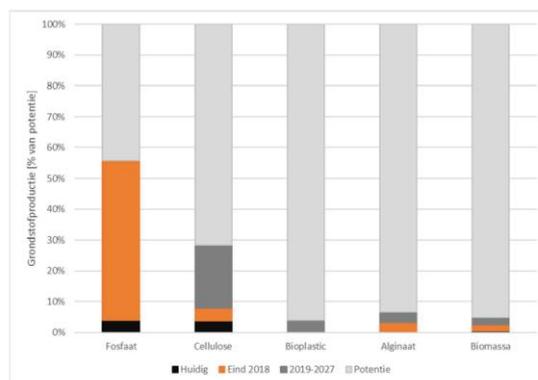


Figura 15 Risorse prioritarie da recuperare nel ciclo urbano delle acque (fonte: STOWA al meeting SMART-Plant)

Ratificando le ambizioni nazionali a livello locale, la città di Amsterdam prevede di spostarsi verso un'economia circolare il più rapidamente possibile - e al più tardi entro il 2050. Un sotto-obiettivo rilevante che la città ha fissato è: entro il 2030 si consegnerà una riduzione del 50% dell'uso delle materie prime primarie. Per passare a un'economia circolare, il comune ha adottato programmi circolari, tra cui Amsterdam Circular: Learning by doing, e Circular Innovation Program. Il focus sui nutrienti è esplicitamente previsto per la chiusura del ciclo dei nutrienti puntando sulla gestione dei servizi idrici e dei rifiuti/scarti organici.

Già ad oggi, ad ogni modo, nella città di Amsterdam si recuperano ben oltre 110 tonnellate all'anno di fosforo dalle acque reflue.

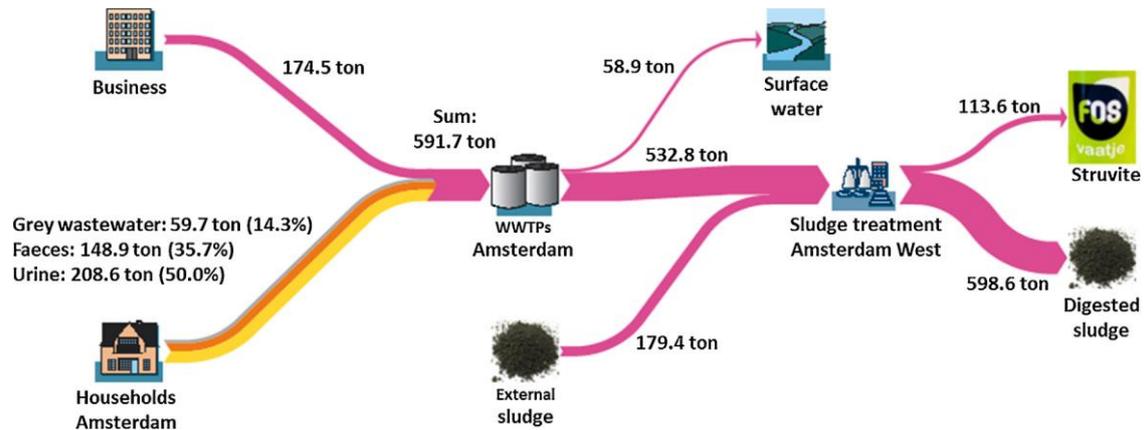


Figura 16 Ciclo del fosforo nella catena del valore delle acque reflue di Amsterdam nel 2013 (in ton P)

Tali prestazioni sono previste crescere nell'ambito di un programma integrato che considera un recupero di oltre 130 tonnellate all'anno di fosforo dalle acque reflue al 2040, insieme ad altre risorse organiche ed inorganiche che sono state valutate con pro- e contro.

Tra i progetti specifici circolari, il Nieuwe Stroming prevede il recupero del fosforo dal flusso di urine raccolte separatamente. Le urine vengono raccolte in occasione di alcuni dei maggiori festival cittadini, come il King's Day, e vengono convogliate all'impianto di trattamento delle acque di Amsterdam Westpoort, gestito dalla società Waternet, che dal 2013 recupera fosfati mediante la precipitazione di struvite.

Il sistema di recupero è stato sviluppato all'interno del progetto FosVaatje, che prevede la costruzione di servizi igienici che permettano la raccolta separata delle urine per il recupero del fosforo. Attualmente sono già operativi presso l'AFAS Live, precedentemente noto come Heineken Music Hall. Nel 2016 sono stati raccolti 80000 litri di urina in occasione di diversi eventi cittadini. Le urine subiscono un pretrattamento di fermentazione prima di essere inviate al reattore FosVaatje, nel quale viene aggiunto cloruro di magnesio per la precipitazione di struvite. Le urine vengono raccolte in un serbatoio da 13000 litri, che vengono successivamente inviate all'impianto di trattamento. Con 1 litro di urina pura vengono prodotti circa 2 grammi di struvite.

	Products unit	Biogas 10^6 Nm^3	Cellulose kton	PHA kton	Phosphorus ton	Alginic acid kton
2013 Current situation		11	0	0	$1.1 \cdot 10^2$	0
2040 Ceteris paribus		12	0	0	$1.3 \cdot 10^2$	0
Measure						
Green waste disposal		1.1	0	0	4.1	0
Water use reduction		0	0	0	0.0	0
Separate urine collection		0.13	0	0	0.9	0
Separate urine treatment		0	0	0	8.5	0
Pharmafilter		3.5	0	0	-8.4	0
More separated sewers		0	0	0	0.0	0
Reduced groundwater infiltration		0	0	0	0.0	0
Primary settling tank		0	0	0	0.0	0
Bioplastic production		-3.3	0	0.47	>0.0	0
Cellulose recovery from primary sludge		-1.4	5.5	0	-1.0	0
Fine-mesh sieve & cellulose recovery		-2.1	7.9	0	-1.0	0
mUCT		0	0	0	0.0	0
Nereda		0.52	0	0	5.2	0
Alginic acid production		-1.4	0	0	5.2	9.5
Thermal hydrolysis		4.2	0	0	>0.0	0
Mesophilic digestion		0	0	0	0.0	0
Thermophilic digestion		2.4	0	0	>0.0	0
Struvite precipitation ('Fosvaatje')		0	0	0	0.0	0
Sludge incineration at waste plant		0	0	0	0.0	0
Mono-incineration		0	0	0	0.0	0
Phosphorus recovery from sludge ashes		0	0	0	$6.4 \cdot 10^2$	0

LEGEND

	Large increase
	Increase
	No change
	Decrease
	Large decrease



Figura 17: FosVaatje

Il reattore FosVaatje viene utilizzato anche per il recupero del fosforo dai fanghi di depurazione delle acque reflue di Amsterdam, con una produzione di 2500 kg di struvite al giorno. I fanghi in uscita dalla digestione anaerobica vengono alimentati al reattore di precipitazione con tecnologia Airprex®, nel quale si aggiunge cloruro di magnesio per favorire la precipitazione dei cristalli di struvite e si fornisce aerazione per lo strippaggio della CO₂ e la regolazione del pH.

7.1.1.4. Edifici governativi nei Paesi Bassi

I sistemi di separazione delle urine non sono di semplice integrazione nelle aree già urbanizzate, soprattutto per quanto riguarda la loro installazione nelle abitazioni private, ma possono essere più facilmente applicabili per i luoghi pubblici, come negli ospedali, negli edifici per uffici o negli stadi sportivi.

Il governo olandese ha previsto l'ammmodernamento dell'edificio destinato al Ministero delle Infrastrutture e dell'Ambiente e al Ministero degli Affari Economici a Rijksgedouw (L'Aia), integrando il sistema di collettamento dei reflui per il trattamento separato dell'urina e delle feci. Il progetto prevede l'installazione di servizi igienici a basso flusso, in modo tale da minimizzare il consumo idrico e concentrare il flusso di urine, per massimizzare i recuperi. L'urina sarà trattata per il recupero di fosforo e la produzione di energia elettrica, attraverso un impianto per il recupero di struvite integrato con cella a combustibile; le feci invece, insieme ai rifiuti organici alimentari saranno convogliati a un digestore per la produzione di biogas. È previsto un sistema per il riutilizzo delle acque reflue, in modo tale da minimizzare i consumi di acqua e ottenere d'altra parte un flusso da trattare concentrato, massimizzando le rese di produzione di struvite.

7.1.1.5. Pisner beer

La birreria danese Nørrebro Bryghus ha prodotto una linea di birre, denominate "Pisner beer", prodotte con orzo fertilizzato usando 54000 litri di urine umane, raccolte durante il festival Roskilde Music, nei pressi di Copenhagen, uno dei più grandi eventi musicali del Nord Europa con una partecipazione di 100000 persone. L'urina è stata applicata nei campi nella primavera 2016 in sostituzione dei fertilizzanti minerali. Il progetto, denominato "beercycling" è stato supportato dal Consiglio dell'alimentazione e dell'agricoltura danese DAFC, con l'obiettivo di rivoluzionare il concetto di rifiuto. Sono state fertilizzate 11 tonnellate di malto, con le quali sono state prodotte 60000 bottiglie di birra Pisner.



Figura 18: Pilsner beer

7.1.1.6. SaNiPhos

L'azienda olandese GMB BioEnergie ha installato nel 2010 impianto in Europa per il recupero del fosforo dalle urine, attraverso la tecnologia SaNiPhos. Le urine vengono raccolte separatamente da eventi sportivi, concerti, progetti di interesse sanitario e farmaceutici. L'installazione può trattare 5000 m³ di urina e recupera azoto come solfato di ammonio e fosforo sottoforma di struvite. SaNiPhos è il primo impianto di trattamento delle urine su larga scala in Europa ed è operativo dal 2010. SaNiPhos collabora con la società farmaceutica MSD nel programma "Moeders voor Moeders", un progetto pilota per il recupero dell'ormone hCG presente in alcuni medicinali per la fertilità. L'ormone viene rimosso da MSD e l'urina risultante trattata con SaNiPhos.

7.1.1.7. Sustainable Sanitation Alliance

La Sustainable Sanitation Alliance è una rete di organizzazioni fondata dal Ministero della cooperazione economica e dello sviluppo tedesco per promuovere azioni a favore dell'Obiettivo di Sviluppo Sostenibile n. 6, che riguarda la diffusione di acqua e servizi igienici su scala mondiale. L'associazione ha fornito una piattaforma per sviluppare collaborazioni e progetti volti alla distribuzione dei servizi igienico-sanitari in modo sostenibile.

Il programma Ecosan ha sperimentato nella provincia cinese di Shaanxi, l'installazione di una serie di water a risparmio idrico, che consentono di migliorare le condizioni sanitarie nelle zone rurali e recuperare nutrienti. Le urine e le feci vengono separate per essere applicate in agricoltura, in funzione dei tempi di ritenzione necessari e dei

fabbisogni del terreno. La soluzione proposta dal progetto Ecosan si adatta bene alla società rurale del territorio, composta da agricoltori con piccoli appezzamenti di terra vicino alle loro abitazioni.

In occasione dei Giochi Olimpici di Pechino del 2008, il parco Olympic Forest Park è stato attrezzato con 33 bagni pubblici con collettamento separato di feci e urine, riutilizzate come materiale fertilizzante all'interno dell'area del parco. Le urine vengono raccolte in un serbatoio e applicate per la fertirrigazione, mentre le feci sono destinate al compostaggio.

Nelle Filippine, il progetto Periurban Vegetable ha previsto l'installazione nelle comunità rurali della città di Cagayan de Oro di una serie di servizi igienici con separazione di urine e feci, per migliorare le condizioni igienico-sanitarie e sfruttare i flussi per la fertilizzazione degli orti cittadini. I sanitari sono stati installati in scuole pubbliche e chiese.



Fig. 18: Urine is applied about 5 to 10 cm from plant base (source: Wafler, 2008)

Figura 19: Applicazione urina diluita

Le urine sono applicate direttamente come fertilizzanti, dopo diluizione con acqua, o usate per bilanciare il rapporto C/N del compost, mentre le feci subiscono prima un processo di compostaggio. La comunità è stata inoltre provvista di linee guida per l'applicazione specifica in base al tipo di coltivazione e alle condizioni del terreno.

Le comunità rurali delle città di Misamis Oriental Libertad, Initao and Manticao sono state dotate di 23 servizi igienici nei quartieri e presso le scuole elementari. L'urina viene diluita con acqua e utilizzata come fertilizzante negli orti domestici, nei frutteti e nei vivai. Le feci vengono compostate ed utilizzate come miglioratori del terreno.

Anche la città di Bayawan ha installato dal 2005 più di 40 servizi igienici con gestione separata delle urine e delle feci da utilizzare rispettivamente come fertilizzante e come compost.

Altri progetti analizzati dalla Sustainable Sanitation Alliance che prevedono la separazione a monte (UDD=urine-diverting dry toilet) ed il successivo riutilizzo delle urine come fertilizzante vengono riportati nella Tabella seguente.

Tabella 13: Progetti Sustainable Sanitation Alliance con riutilizzo delle urine come fertilizzante

APPLICAZIONE	LOCALITÀ
Programma comunitario per l'acqua Ecosan	Shaanxi, Cina
Servizi igienici separati nell' Olympic Forest Park	Pechino, Cina
Gestione decentralizzata delle acque reflue nel college di Adarsh	Badlapur
Sanitari a risparmio idrico con impianto di biogas nel DSK Training Institute	Gujarat
Sanitari UDD con riutilizzo negli orti cittadini	Cagayan de Oro
Servizi UDD nelle aree rurali	Bayawan City
Servizi UDD per comunità rurali e scuole	Misamis Oriental
Servizi UDD nelle scuole	Hayanist, Armenia
Servizi UDD per scuola secondaria femminile	Kalungu, Uganda
Servizi UDD nell'area periurbana	Koulikoro, Mali

7.1.2. Gestione centralizzata dei reflui urbani

Gli impianti di trattamento delle acque reflue devono gestire i carichi di fosforo che arrivano dalla fognatura per rispettare i limiti all'effluente ed evitare la formazione eventuale di fenomeni di scaling nelle condotte causate dalla precipitazione di sali fosfati. La rimozione del fosforo è, quindi, un'esigenza sia normativa che gestionale per il corretto funzionamento del sistema di trattamento. Essendo una materia prima critica non rinnovabile e dal potenziale di nutriente, nell'ottica dell'economia circolare l'inserimento di tecnologie innovative e la gestione dei flussi di fosforo all'interno degli impianti di depurazione possono diventare occasioni per il recupero della risorsa, garantendo la sostenibilità ambientale ma anche una adeguata valorizzazione economica del fosforo prodotto.

7.1.2.1. Progetti studio di gestione degli impianti di trattamento delle acque reflue

Alto Trevigiano Servizi

Alto Trevigiano Servizi (ATS) è il gestore del servizio idrico integrato in un'area comprendente 52 comuni del Veneto. Negli anni 2000 è stato realizzato e poi collaudato e validato a Treviso il primo impianto in Italia per il recupero del fosforo sottoforma di cristalli di struvite. Nello stabilimento di Carbonera sono attualmente installate due delle soluzioni innovative sviluppate nel progetto SMART-Plant H2020: SCENA e SCEPPHAR (SMARTech 4a e 5). ATS ha progettato una piattaforma per il trattamento centralizzato dei fanghi prodotti negli impianti della società, integrata con un sistema per il recupero di fosforo, che sarà realizzata nell'impianto di Salvatronda.

SMART-Plant

SMART-Plant è un'azione di innovazione del programma europeo Horizon 2020, che mira ad indirizzare il trattamento delle acque reflue verso l'economia circolare, con una serie di soluzioni innovative volte ad incrementare l'efficienza di trattamento e alla massimizzazione del recupero delle risorse ammodernando depuratori esistenti.



Figura 20 Rappresentazione grafica dell'azione di innovazione SMART-Plant

Nell'ambito di SMART-Plant il recupero del fosforo e dei nutrienti è validato e dimostrato sia in linea fanghi che in linea acque.

Il sistema SCENA (Short-Cut Enhanced Nutrient Abatement) tratta il surnatante della disidratazione a valle della digestione anaerobica, carico di nutrienti. È un trattamento biologico via nitrito che utilizza gli acidi grassi volatili prodotti dalla fermentazione dei fanghi di depurazione e, pertanto, non necessita di fonti esterne di carbonio. È applicato in piena scala nell'impianto di Carbonera, tratta 40-50 m³/d di surnatante e rimuove oltre il 75% di azoto e fosforo. Il fango prodotto ha un contenuto in solidi di P fino al 5% e può essere valorizzato in co-compostaggio. Le rese di produzione possono essere ulteriormente incrementate abbinando un pretrattamento di idrolisi termica a monte della digestione anaerobica, per incrementare la frazione disciolta del fosforo.

Il processo SCEPPHAR (Short Cut Enhanced Phosphorus and PHA Recovery) mainstream consiste in un doppio sistema SBR, che può essere applicato sia al flusso principale che a quelli secondari. Nella prima configurazione è possibile recuperare fino al 50% di fosforo e viene prodotto un fango con un contenuto del 30% di PHA, che possono essere trasformati in bioplastica o utilizzati per incrementare la produzione di metano durante la digestione anaerobica. I costi operativi sono inferiori ai sistemi a fanghi attivi tradizionali, con un risparmio che può raggiungere il 20% se applicato sui flussi secondari.

Il sistema SCEPPHAR (Short Cut Enhanced Phosphorus and PHA Recovery) sidestream è stato sviluppato tratta fermentato liquido di fanghi che è molto carico di nutrienti e sostanze organiche. Il processo consente la rimozione dei nutrienti N e P, consente il recupero del 50% di fosforo come struvite e produce un fango arricchito con biopolimero (PHA). Inoltre, riduce i costi energetici per il trattamento sidestream del 20-30%. Il sistema è testato su scala pilota presso il Carbonera WWTP (Italia), trattando 4-5 m³ di liquore di fanghi al giorno. La fonte di carbonio per una produzione ottimizzata di biopolimero viene prodotta in loco mediante fermentazione dei fanghi cellulosici, che viene estratto con un setaccio fine Salsnes dalle acque reflue grezze in arrivo nella linea principale.

Le due configurazioni sono applicate in piena scala rispettivamente nell'impianto di trattamento delle acque reflue di Manresa in Spagna, con una capacità di trattamento di 10 m³/d, e a Carbonera, dove vengono trattati 4-5 m³/d.

La Cranfield University ha sviluppato un trattamento terziario per il recupero dei nutrienti basato su processi di scambio ionico (IEX). I prodotti recuperati sono soluzioni concentrate di ammoniaca e sali di calcio fosfato, che possono essere riutilizzati nell'industria chimica e dei fertilizzanti.

L'Università di Vic ha sviluppato un sistema di bioessiccamento e successivo compostaggio per produrre combustibili e biofertilizzanti. Il biocarburante ha un'umidità inferiore al 40% e un potere calorifico inferiore compreso tra 9 e 12 MJ/kg,

mentre il biofertilizzante stabilizzato ha un elevato contenuto di fosforo e azoto, entrambi superiori al 5% TS.

Progetto RINEW

Rotterdam sta avviando un processo per una gestione della città in linea con i principi dell'economia circolare. Il trattamento delle acque reflue verrà gestito secondo il progetto RINEW, Rotterdam Innovative Nutrients, Energy and Water management, che prevede di integrare il trattamento delle acque con il recupero di energia e di risorse. Il fosforo verrà recuperato dal flusso liquido mediante un processo di nano-filtrazione su filtri ceramici e successiva pellettizzazione, per poter essere riutilizzato in agricoltura.

Aeroporto di Schiphol

L'aeroporto Schiphol di Amsterdam ospita oltre 50 milioni di viaggiatori all'anno e produce circa 60 m³/giorno di acque reflue provenienti dai servizi igienici degli aeromobili. Il suo impianto di trattamento ha una capacità di circa 45000 abitanti equivalenti, con un potenziale recupero di fosfato fino a 100 kg di struvite al giorno. È stato avviato un progetto pilota per il recupero del fosforo dalle acque reflue dell'aeroporto e degli aerei sottoforma di struvite. Durante il test sono stati prodotti circa 700 kg di struvite in forma cristallina al 96.8%, con granuli di dimensioni di circa 0.5 mm. Le concentrazioni di microinquinanti sono inferiori ai valori massimi consentiti dal regolamento sui fertilizzanti. La struvite prodotta è stata distribuita sulle piste di Schiphol.

Materiali assorbenti

La Polonite è un prodotto commerciale sviluppato dall'azienda svedese Bioptech (ora Ecofiltration Nordic AB) costituito da silicati di calcio e utilizzato come mezzo filtrante per il trattamento delle acque reflue e dei deflussi derivanti dalle attività agricole. La Polonite può essere impiegata sia per i trattamenti negli impianti di depurazione delle acque reflue, che per le applicazioni decentralizzate come i canali filtranti per il trattamento delle acque di dilavamento provenienti dalle aziende agricole, gli stagni di sedimentazione e le fitodepurazioni o per il trattamento dei corsi d'acqua inquinati. Quando il materiale filtrante è saturo può essere utilizzato come materiale ammendante per il terreno. La polonite usata, infatti, non contiene argento e cadmio e può essere applicata direttamente al terreno dopo un periodo di essiccamento. Il

fosforo catturato durante il trattamento viene rilasciato in maniera graduale al terreno, insieme al calcio e al silicio, fornendo l'apporto di nutrienti necessario alla crescita delle piante. Inoltre, il pH elevato migliora le caratteristiche di fertilità del terreno. Gli studi condotti hanno dimostrato un minore assorbimento dei metalli da parte dei terreni ammendati e un elevato grado di disponibilità del fosforo.

Tabella 14 Caratteristiche Polonite

Size of pellets	2-6 mm
Adsorption capability P	up to 12 %
Porosity	45 %
Dry density	730 g/dm ³
Initial pH outgoing water	>12

Anche il progetto INCOVER di HORIZON 2020 sta analizzando il recupero del fosforo tramite assorbimento nei materiali dei letti filtranti. Alle superfici dei materiali di riempimento sono stati applicati diversi rivestimenti per valutare quale elemento ottenesse il maggiore assorbimento da parte del fosforo. Filtri con i materiali di riempimento rivestiti sono stati utilizzati per il trattamento dell'acqua reflua in uscita dai trattamenti secondari, avente un contenuto medio di fosforo di circa 12 mg/l, riscontrando una capacità di assorbimento del 90%. È stata inoltre verificata la biodisponibilità del fosforo per applicare direttamente il materiale granulare come fertilizzante, una volta saturo.



Figura 21: materiale granulare rivestito, IWA Resource Recovery Conference, Venice 2019

Il progetto INCOVER sta studiando l'applicabilità delle colonne di assorbimento per il trattamento dei flussi di acque reflue agricole e urbane attraverso l'installazione di un pilota nell'impianto di Agropolis, in Spagna. Il sistema sviluppato tratta circa 2 m³/d con le colonne di assorbimento, per rimuovere il contenuto di fosforo da 10-15 mg/L a meno di 1 mg/L in uscita. 300 kg di materiale rivestito hanno la capacità di trattenere

7.2 kg di fosforo in un periodo di 3 mesi, con efficienze paragonabili ai metodi di rimozione chimica. Inoltre, il materiale saturo può essere utilizzato come fertilizzante a lento rilascio, dato che il fosforo rimosso può essere riassorbito dall'apparato radicale delle piante.

Un'ulteriore applicazione sviluppata nel progetto INCOVER consiste nella costruzione di filtri, nei quali vengono piantate specie vegetali come canneti (*Phragmites australis* e *Arundo donax*). Possono essere alimentati al sistema sia flussi provenienti da HRAP (High Rate Algae Pond) sia acque reflue non trattate. L'applicazione pilota nell'impianto di Almeria, in Spagna, verrà monitorata per analizzare le efficienze di recupero e la capacità di assorbimento del fosforo.

7.1.2.2. Commercializzazione dei prodotti di recupero

Per sviluppare le azioni di recupero è necessario che i prodotti finali trovino un mercato aperto dove poter essere commercializzati, rendendo tali pratiche sostenibili non solo da un punto di vista ambientale ma anche economico. Alcune delle principali aziende fornitrici delle tecnologie di recupero del fosforo si occupano anche di assicurare al prodotto finale uno status di qualità certificato, in modo tale da garantire la sua commercializzazione. In altri casi le società che gestiscono il servizio di depurazione hanno stretto accordi con aziende private per la vendita del fosforo recuperato.

Strategia di mercato Pearl – Crystal Green

Ostara si occupa del recupero di nutrienti dai flussi di trattamento delle acque reflue urbane, industriali e agricole. Nell'impianto di trattamento delle acque reflue urbane di Slough, nel Regno Unito è applicata la tecnologia Pearl di Ostara e ogni anno vengono prodotte 150 tonnellate l'anno di struvite ($MgNH_4PO_4 \cdot 6H_2O$), aventi un valore commerciale di £ 37000, oltre a permettere un risparmio di £ 100000 sul dosaggio di chemicals, £ 75000 per la riduzione della quantità di fango da trasportare e £ 31000 sui costi operativi di manutenzione dovuti alle incrostazioni. L'impianto di trattamento delle acque reflue di Amersfoort, gestito da Vallei en Veluwe, è il primo stabilimento dei Paesi Bassi che, dal 2016 recupera fosforo direttamente riutilizzabile in agricoltura. L'impianto è stato sviluppato anche mediante il sostegno dei progetti LIFE+ dell'Unione Europea. Utilizzando la tecnologia Pearl, vengono prodotte ogni anno circa 900 tonnellate di fertilizzanti di qualità. La tecnologia Pearl consente di ottenere un fertilizzante granulare a lento rilascio Crystal Green®, caratterizzato da un'elevata

purezza, con un contenuto del 5% di azoto, 28% di fosforo, 0% di potassio e 10% di magnesio.

Tabella 15: Contenuto di metalli nel Crystal Green

	EU Fertiliser Regulations		Rock phosphate 28%	MAP 52%	DAP 46%	TSP 46%	Crystal Green 28%
	Current	Proposed ²					
Arsenic	60	40	11	7-30	10-23	13-16	0.45
Cadmium	60*	40*	89	0-330	7-76	11-96	0.087
Chromium – hexavalent	2	2					<0.1
Chromium – total	N/A	100	188	17	55-196	89	1.03
Copper	N/A	600					1.60
Lead	150	120	10	0-10	1-10	4-13	0.16
Mercury	2	1	0.05				0.005
Nickel	120	100	29	7-350	14-48	15-118	0.39
Zinc	N/A	1,500	239	10-3,010	50-386	61-1,296	2.26

Rock phosphate data ref. Mortvedt, J.J. 2005
Crystal Green mean all sites 2016 QC data
*Cd is in mg/kg P₂O₅

¹ All values are in mg/kg product except cadmium
² Current proposal under the new EU Fertiliser Regulations; subject to change

Il prodotto migliora le rese delle coltivazioni e limita le dispersioni in ambiente. Il valore di mercato del prodotto è sostenuto non solo dalla qualità del Crystal Green®, ma anche dalla garanzia per le utilities che il prodotto finale sarà acquistato direttamente da Ostara, sottoscrivendo accordi a lungo termine. Il successo di Ostara quindi non si limita alla tecnologia di recupero, ma è determinato dalla strategia di mercato assicurata per il prodotto finale. Il Crystal Green® è venduto in Nord America, Europa e Asia come fertilizzante agricolo per tappeti erbosi, orticoltura e applicazioni speciali.

Strategia di mercato del Berlin Pflanze

La struvite prodotta mediante la tecnologia AirPrex® di CNP viene venduta sia direttamente agli agricoltori come prodotto finale, sia alle aziende produttrici di fertilizzanti come ingrediente nelle miscele.

La società Berliner Wasserbetriebe che gestisce il trattamento delle acque reflue di Wassmannsdorf a Berlino vende dal 2008 in scala territoriale nella regione di Brandeburgo la struvite prodotta nel suo impianto con il nome commerciale di Berliner Pflanze. Il Berliner Pflanze è il primo prodotto di AirPrex® ad aver ottenuto la registrazione REACH ed è riconosciuto dalla normativa tedesca come fertilizzante.

Il Berliner Pflanze ha vinto il premio Green Tec Award del 2015, viene venduto come prodotto fertilizzante a lento rilascio per l'orticoltura e l'agricoltura ed è disponibile in diversi formati.

Tabella 16 Composizione Berliner Pflanze

Azoto	N	7%
Fosfato	P ₂ O ₅	21%
Ossido di Magnesio	MgO	8%

Tabella 17 Formati di vendita e prezzi

FORMATO	PREZZO
0.5 kg	€ 2.50
2 kg	€ 4.00
5 kg	€ 10.00
16 kg (8x2kg)	€ 28.00



Figura 22: Berliner Pflanze

Strategia di mercato di PhosphorCare

La tecnologia Phosphogreen di Suez recupera struvite dal trattamento delle acque reflue. La struvite recuperata viene venduta alle aziende produttrici di fertilizzanti, come la compagnia Kongerslev, che la commercializza con il nome di Phosphorcare. Il fertilizzante è stato testato nel 2014 per valutare le rese di crescita nelle coltivazioni di mais e segale e la facilità di utilizzo del prodotto da parte degli agricoltori. Il PhosphorCare™ è stato approvato dall’Agenzia Danese EPA e dal Ministero dell’agricoltura e dell’alimentazione ed è stato registrato nell’elenco REACH. Kongerslev Kalk ha un accordo biennale con le aziende del servizio idrico Aarhus Vand e Herning Vand per la distribuzione e la vendita del PhosphorCare.

Tabella 18: Caratteristiche PhosphorCare

Total nitrogen (N)	5.6%
Ammonium nitrogen (N)	5.6%
Total phosphorus (P)	12.6%
Citrate- and water-soluble phosphorus (P)	0.7%
Total Magnesium (Mg)	10.0%



Figura 23: PhosphorCare

Accordi commerciali NuReSys – Timac Agro

La tecnologia Nuresys permette il recupero del fosforo sottoforma di struvite da impianti di trattamento delle acque reflue urbane e industriali. La struvite prodotta può essere utilizzata come prodotto o essere miscelata con i fertilizzanti minerali tradizionali, per ottenere un effetto combinato di lento e veloce rilascio di fosforo per le colture. NuReSys vende la struvite recuperata dai suoi impianti alle aziende produttrici di fertilizzanti. Nella regione belga delle fiandre circa 1/5 del P_2O_5 contenuto nei fertilizzanti è stato sostituito da struvite. L'azienda Timac Agro utilizza la struvite fornita da NuReSys per produrre un fertilizzante idoneo alla semina e alla coltivazione del mais, il Physiostart P Plus, che è stato testato in quattro campi prova e

ha dimostrato di incrementare le rese di produzione del 10% rispetto ai prodotti tradizionali. Lo sviluppo del prodotto è reso possibile dalla collaborazione con le autorità locali, in particolare l'Energy and Resources Factory (EFGF) e la Vallei and Veluwe Water Authority. Il fosfato recuperato Physiostart P Plus è stato approvato sulla base della ricerca scientifica di PPO / WUR. Oltre a essere utilizzato nelle aziende agricole in deroga nel settore zootecnico, il prodotto può essere utilizzato anche nell'agricoltura e nell'orticoltura.



Figura 24: Physiostart P Plus

Accordi commerciali Waternet – ICL

L'azienda Waternet, che gestisce l'impianto di trattamento di Amsterdam ha stretto un accordo con la compagnia olandese ICL, operante nel settore dell'industria chimica produttrice di fertilizzanti, per utilizzare la struvite recuperata come materiale per la produzione di fertilizzanti. L'inserimento della tecnologia AirPrex® nella filiera di trattamento ha inoltre incrementato la disidratabilità del fango ad un contenuto in secco del 20-23%.

Tabella 19: Parametri operativi, IWA conference, Venice 2019

	Prima della cristallizzazione	Dopo cristallizzazione
P-PO ₄	150	5
pH	7.2	7.8-8
NH ₄	680	630
%TS	22	25-26
Dosaggio polimeri (kg/tTS)	14-16	11-13

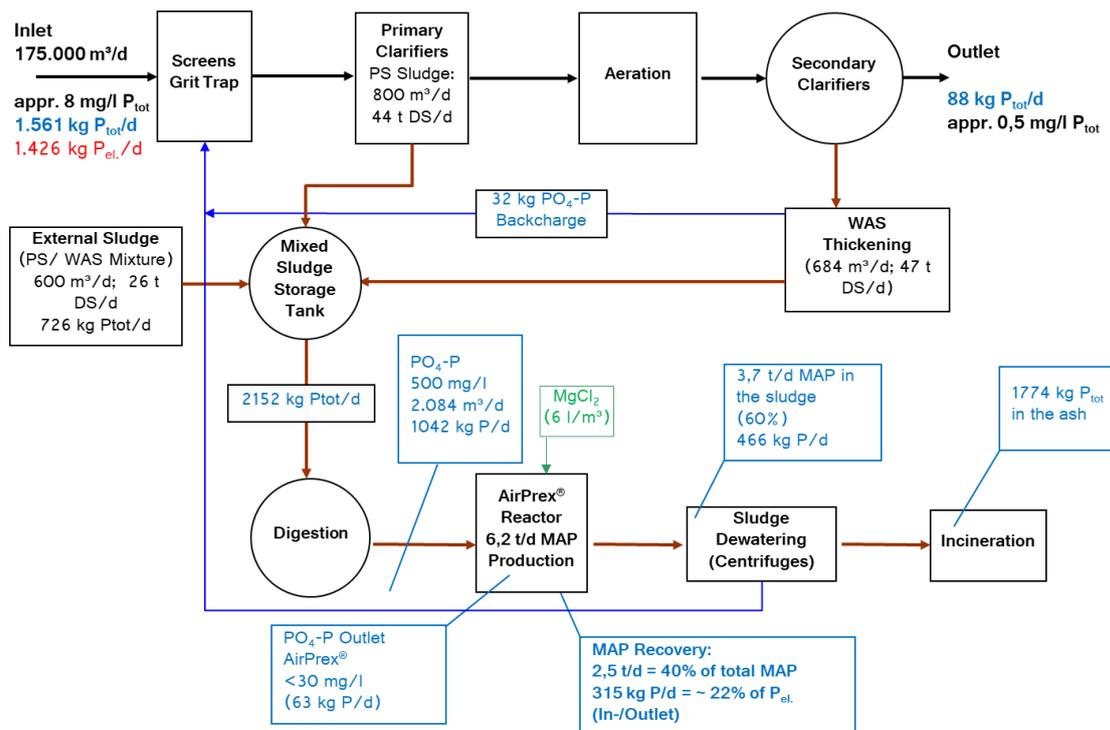


Figura 25: Schema di processo impianto di Amsterdam, IWA conference, Venice 2019

I risparmi ottenuti in totale, riportati anche nella Tabella seguente, sono dell'ordine di 500000 € all'anno, considerando anche i risparmi sulle tasse per l'incenerimento dei fanghi e il minore dosaggio di polimeri richiesto.

Tabella 20: Costi/Benefici, IWA Resource Recovery conference, Venice 2019

Benefits	€ 1200000/a
Costs	€ 700000/a
Annual savings	€ 500000
Investments costs	€ 3000000
ROI	6 years

Nel 2018 l'impianto ha prodotto 300 t di struvite, rimuovendo circa il 95% degli ortofosfati in ingresso. La struvite viene venduta alla ICL Fertilisers come materiale per la produzione di fertilizzanti. L'accordo è in linea con la serie di piani sviluppati dalla municipalità di Amsterdam, volti ad una transizione della gestione della città all'economia circolare, compresi nel quadro Circular Amsterdam.

L'accordo, inoltre, fa parte della serie di misure adottate da ICL per indirizzarsi verso un'economia sostenibile. La compagnia, infatti, mira a sostituire entro il 2025 l'utilizzo di 25000 tonnellate di fosfato minerale con il fosfato proveniente da ceneri dei fanghi di depurazione, farina di carne e ossa, legno e struvite. Le ceneri dei fanghi, aventi un contenuto di P_2O_5 di circa il 20-30%, subiscono un processo chimico per ottenere P_2O_5 e K_2O in forma solubile. Inoltre, ICL introdurrà la tecnologia RecoPhos per recuperare fosforo bianco o acido fosforico dalle acque reflue, in quattro installazioni su vasta scala in Europa e negli Stati Uniti.

Accordi commerciali Thermphos – Noord-Brabant

Thermphos International è stata una delle maggiori aziende mondiali fornitrici di fosforo, acido fosforico, fosfati, fosfonati e derivati del fosforo e l'unica produttrice di fosforo bianco nell'Europa occidentale. Thermphos ha scelto fonti alternative di recupero per l'approvvigionamento del fosforo da utilizzare come materia prima nei suoi prodotti, utilizzando le ceneri recuperate dal trattamento delle acque reflue.

Thermphos ha concluso una collaborazione con l'impianto di incenerimento dei fanghi di depurazione di Noord-Brabant (BNS) a Moerdijk nei Paesi Bassi dal 2007 al 2012 per la fornitura di 11000 tonnellate di ceneri l'anno, con un contenuto in fosforo di circa il 9%, con le quali sono state prodotte circa 11 ton/d di fosforo bianco P_4 .

Thermphos inoltre ha acquistato la struvite recuperata nell'impianto di trattamento di Geesterambacht nei Paesi Bassi mediante il processo Crystalactor, che produce 200–300 tonnellate all'anno di fosfato in formato pellet, con un contenuto di fosforo di circa il 13%.

7.2. Gestione integrata acque-rifiuti

La gestione integrata del trattamento delle acque reflue e dei rifiuti organici consente di incrementare i recuperi e ridurre gli smaltimenti in discarica, ottenendo un prodotto utilizzabile in agricoltura avente proprietà nutrienti e con un adeguato apporto di sostanza organica.

7.2.1. Impianto di Käppala: fanghi di depurazione e reflui zootecnici

L'impianto di trattamento delle acque reflue di Käppala, in Svezia, è un esempio di buona gestione delle risorse. È il terzo impianto svedese per estensione, tratta una potenzialità di 500000 AE, con una produzione annuale di fango di 30000 tonnellate con un quantitativo di fosforo di 255 tonnellate, recuperato mediante il riutilizzo in agricoltura dei fanghi. Il materiale prodotto soddisfa i requisiti di qualità nazionali della Swedish Water & Wastewater Association per la certificazione REVAQ, che garantisce un fango ricco in nutrienti che può essere riutilizzato in agricoltura. L'obiettivo dell'azienda è di ottenere un prodotto di qualità in modo tale da destinare circa il 90% del fango ad uso agricolo e distribuire la quota restante alla sistemazione di terreno. In alcuni casi il fango è miscelato a reflui di origine zootecnica, per incrementare la degradazione delle sostanze organiche. Il processo, grazie ai trattamenti di digestione e ai frequenti monitoraggi, garantisce fanghi di qualità con un elevato contenuto di nutrienti azoto e fosforo permette di limitare la dispersione di inquinanti e di ridurre il quantitativo di fertilizzanti chimici impiegati. Inoltre, l'azoto e il fosforo vengono reimmessi in natura, chiudendo il ciclo dei nutrienti. Le tecnologie dell'impianto non si limitano solamente alla selezione di processi con elevate efficienze di rimozione per ottenere un fango di qualità, ma si rivolgono anche alla fonte dell'inquinamento, con attività di prevenzione di scarico di sostanze inquinanti indesiderate in fognatura. Käppala ha inoltre osservato una significativa degradazione delle sostanze organiche dannose, quali organofosfati e detersivi chimici, quando il fango è compostato insieme al letame.

7.2.2. Acqua & Sole: fanghi di depurazione e rifiuti dell'industria agroalimentare

Acqua & Sole è un'azienda lombarda che tratta ogni anno più di 120000 tonnellate di fango di depurazione e rifiuti dell'industria agroalimentare. Attraverso un processo di digestione anaerobica i rifiuti organici sono trasformati in fertilizzanti e ammendanti destinati agli agricoltori locali. Gli ammendanti prodotti da Acqua & Sole sono applicati nel territorio regionale, migliorano la qualità dei terreni e contribuiscono al sequestro di carbonio. Oltre alla produzione di biofertilizzanti, Acqua & Sole si occupa anche della loro corretta distribuzione nei terreni, sviluppando sistemi GPS, che permettono un'applicazione uniforme nel terreno, riducendo così le perdite. La compagnia sta testando in campo una tecnologia real-time di monitoraggio del contenuto di nutrienti durante lo spandimento nei terreni, per poterne bilanciare la distribuzione.

L'impianto di co-digestione di Vellezzo tratta 62000 tonnellate di fanghi di depurazione provenienti dagli impianti di trattamento delle acque reflue insieme alla frazione liquida e al digestato dei rifiuti alimentari domestici, rispettivamente pari a 6000 e 4000 tonnellate. La linea di processo può anche trattare reflui zootecnici, rifiuti alimentari e fanghi dell'industria agroalimentare. L'impianto è uno dei siti dimostrativi partecipanti al progetto Systemic, per la produzione di fertilizzante organico dal digestato. Il flusso proveniente dalla depurazione civile e i rifiuti organici subiscono un processo di co-digestione termofila, mediante la quale viene prodotto solfato di ammonio. Nel 2018 l'utilizzo di circa 90000 tonnellate di digestato ha consentito il recupero di 570 t di fosforo, 71 t di potassio e 715 t di azoto. Un valore aggiunto dei fertilizzanti prodotti rispetto a quelli chimici è costituito dall'apporto di sostanza organica, che contribuisce alla fertilità del terreno. L'applicazione dell'impianto su scala industriale ha verificato l'effettiva sostenibilità economica dell'iniziativa, che presenta un bilancio positivo.

Tabella 21: Composizione dei prodotti recuperati (dati di Ottobre 2017)

Characteristics	Digestate	Ammonium Sulphate
Dry matter (%)	10.5	
Organic carbon (% DM)	31.2	
N-total (g/kg DM)	77.0	~ 7,2% on wet weight
P ₂ O ₅ -total (g/kg DM)	57.6	-
K ₂ O-total (g/kg DM)	8.3	-

7.2.3. Acque reflue urbane e reflui della lavorazione delle patate

L'impianto di depurazione di Rijn e IJssel Water Board a Olburgen è stato implementato per consentire il recupero del fosforo dalle acque reflue industriali provenienti dalla lavorazione delle patate dell'azienda Aviko (parte di Royal Cosun). L'installazione per il recupero di struvite è operativa dal 2006 e dal 2014 è stata implementata per ottenere un prodotto fertilizzante, commercializzato con il marchio Vitalphos. Le acque reflue industriali vengono inizialmente trattate nei reattori UASB per la produzione di oltre 3 milioni di m³/anno di biogas. L'effluente dal reattore UASB viene miscelato con l'acqua reflua e alimentato in un reattore PHOSPAQ, per la precipitazione di struvite. Il fosfato recuperato viene disidratato ed essiccato a basse temperature, ottenendo un prodotto fertilizzante granulare di alta qualità, il Vitalphos. Nel 2015 sono state prodotte circa 1000 tonnellate di fertilizzante.

Marathon VitalPhos (analyse en specs)	
Nitrogen	4 %
ammoniacal nitrogen	4 %
phosphorus pentoxide total P2O5	20 %
soluble in water and neutral ammonium citrate	19 %
potassium oxide soluble in water K ₂ O	1 %
magnesium oxide total MgO	11 %
organic matter from potato water	10 %
Physical properties	
Grain size	2-4,5mm 90 %

Figura 26: VitalPhos

7.2.4. Ecophos: ceneri di depurazione e rocce di basso livello

Ecophos è un'azienda produttrice di alimenti animali a base di fosfati e fornitrice di tecnologie per il trattamento del fosforo. Lo stabilimento di Dunkerque è il più grande produttore di CaHPO_4 e nel 2018 ha sviluppato una linea che utilizza rocce fosfatiche di basso livello, che sarà abbinata a una linea che processa ceneri dei fanghi di depurazione. L'impianto produce 220000 tonnellate di CaHPO_4 . Inoltre, dalla lavorazione viene prodotto solfato di gesso come materiale secondario, contenente residui di fosfato e venduto come miglioratore di terreno. La nuova linea in progetto tratterà 10000 tonnellate/anno di ceneri prodotte dall'incenerimento dei fanghi di depurazione e altri sottoprodotti, producendo acido fosforico. Il prodotto finale, contenente fosforo sottoforma di CaHPO_4 o H_3PO_4 , è destinato alla produzione di fertilizzanti o per l'alimentazione animale. Nel 2015 è stato siglato un accordo con le società SNB e HVC, per trattare 60000 tonnellate all'anno di ceneri provenienti dall'incenerimento dei fanghi reflui urbani degli impianti di Dordrecht e Moerdijk per produrre 4000 tonnellate di fosforo.

7.3. Recupero da attività agro-industriali

Le attività agroindustriali sono un fonte importante di materie secondarie contenenti sostanza organica e nutrienti, adatte perciò al riutilizzo o al recupero delle risorse. Il fosforo può essere recuperato mediante il riutilizzo dei sottoprodotti o dei rifiuti in agricoltura o mediante trattamenti per la sua estrazione dalle matrici di scarto.

Il settore agroindustriale è caratterizzato da un elevato numero di piccole e medie imprese, il che rende operativamente difficile e non economicamente sostenibile applicare le tecnologie di trattamento ad ogni attività. Esempi di tecnologie di gestione sono pertanto rappresentati dai centri e dai consorzi che riuniscono più imprese, che permettono di applicare approcci più efficienti e di costituire un polo di produzione più facilmente inseribile nel mercato di vendita dei prodotti.

7.3.1. EFPRA

L'EFPRA (European Fat Processor and Rendering Association) rappresenta il settore di trasformazione dei sottoprodotti di origine animale in Europa ed è una delle principali autorità in materia di regolamentazione sull'utilizzo, la valorizzazione, la sicurezza e il potere nutritivo dei sottoprodotti dell'industria della carne.

Nell'UE ogni anno vengono prodotti circa 18 milioni di tonnellate di sottoprodotti di origine animale. L'EFPRA è presente in tutta Europa, con 450 impianti che recuperano grassi animali commestibili, proteine, risorse ed energia. I prodotti dell'industria di trattamento hanno un'ampia varietà di usi, tra cui la produzione di alimenti, carburanti, fertilizzanti e materiali per l'industria chimica. I prodotti industriali di recupero dal trattamento delle ossa animali trovano applicazione nell'industria della porcellana, nella produzione di gelatina alimentare e alimenti per animali domestici.

Nell'utilizzo alimentare, le ossa vengono schiacciate, sgrassate e demineralizzate con acido cloridrico diluito per la produzione di gelatina. Dal processo di trasformazione si ottiene fosfato bicalcico diidrato come coprodotto della lavorazione. Il composto finale è adatto per l'utilizzo in alimenti per animali domestici, pollami e maiali, poiché ricco di fosforo e calcio. Circa il 95% del fosforo contenuto inoltre è caratterizzato da un elevato livello di digeribilità.

Tabella 22: Contenuto di metalli pesanti nel fosfato dicalcico recuperato dalle ossa animali

Contaminant	Units	Maximum permitted in feed ¹	Recovered di-calcium phosphate ²	Processed rock phosphate ³
Arsenic	mg/kg	10	< 1	5
Cadmium	mg/kg	10	< 0.5	5
Fluorine	mg/kg	2,000	400	1,200
Lead	mg/kg	15	2.3	5
Mercury	mg/kg	0.1	< 0.01	< 0.01

1. Directive 2002/32/EC

2. Information from Gelita, PB Gelatins and Sonac/Rousselot

3. Based on database of contaminants of GMP+, The Netherlands

Il fosforo può anche essere riportato nella catena alimentare come fertilizzante, sottoforma di fosfato bicalcico o di idrossiapatite (TCP), anche detta farina ossea decalcificata. Le ossa possono subire processi di carbonizzazione ad alta temperatura, superiore a 600 °C per 20 min, per recuperare il fosfato di calcio ABC (Animal Bone bioChar), utilizzabile per la produzione di fertilizzanti organici e materiali adsorbenti. Il potenziale di sostituzione del fosfato minerale importato con il biofosfato prodotto dalle ossa animali nei Paesi dell'Unione Europea è stimato pari a circa il 20-27% entro il 2030. A livello italiano, l'EFRA rappresenta le associazioni ASSOGRASSI (www.assograssi.it) e UNAITALIA (www.unaitalia.com).

7.3.2. Cooperativa Wipptal

In Val di Vizze gli allevatori e i viticoltori si sono organizzati per installare un impianto di biogas per il trattamento dei liquami provenienti dall'allevamento del bestiame, ottenendo un digestato utilizzabile per la produzione di fertilizzanti nelle coltivazioni di vite. La Cooperativa è stata fondata nel 2008, l'impianto è stato realizzato nel 2012 all'interno del progetto Life+ ed è operativo dal 2016. Il problema della gestione dei liquami prodotti dalle aziende agricole è stato trasformato in una risorsa per i viticoltori, riuscendo a chiudere il ciclo del fosforo nel territorio. Oltre alla produzione di biogas e al recupero di nutrienti, è stato studiato un metodo innovativo per lo spandimento diretto del liquido digestato anche nei terreni più ripidi. Circa il 50% del digestato viene applicato direttamente al terreno, mentre il restante 50% viene trattato per produrre fertilizzanti.

7.3.3. Associazione Led Rural Initiatives

L'associazione Led Rural Initiatives (MIR) si occupa delle tematiche di sostenibilità ambientale nel settore dell'agricoltura. In questo contesto è stato sviluppato il progetto Geotexia che ha permesso la realizzazione di un impianto di digestione Saint Gilles du Mené per il trattamento di 70000 t/anno di reflui zootecnici, di cui 38000 t/anno provengono da 33 allevamenti suini. Oltre al substrato zootecnico vengono processate ogni anno 1000 t di letame di pollame, 25000 t di fango, oli e grassi e 11000 t di altri substrati agricoli. Il digestato ha ottenuto il riconoscimento di fertilizzante secondo il regolamento francese nel 2013. L'impianto produce 14000 MWh di energia elettrica e il digestato subisce processi di separazione liquido-solido e di osmosi inversa per ottenere circa 2500 t di fluido ricco di nutrienti (N, K) con il 20% di sostanza secca e 58000 m³/anno di acqua per l'irrigazione di 14 ha di terreno.

7.3.4. Cooperativa Cooperl

Un altro esempio di tecnologie per la valorizzazione dei nutrienti è costituito dalla cooperativa Cooperl a Brittany in Francia, che gestisce l'intero ciclo dei suini, dall'allevamento alla vendita dei prodotti, alla gestione dei rifiuti e degli scarti. Cooperl è un modello cooperativo per la gestione centralizzata in un numero ridotto di impianti industriali, ottimizzando i processi e riducendo i costi operativi per gli allevatori. La cooperativa si occupa del trattamento dei reflui zootecnici e del recupero dei nutrienti, mediante processi integrati e interconnessi. Gli allevatori di Brittany trattano ogni anno più di 400000 t di letame, con un contenuto di solidi del 50-90% e producono una serie di fertilizzanti organici specifici per la tipologia di coltura. Vengono processate 150000 t di letame e 150000 t di reflui compostati da allevamenti di pollame e 100000 t da allevamenti suini, il 30% delle quali proviene dal territorio di Brittany, servendo un totale di 1100 allevamenti. Nel letame sono presenti circa 200000 t di azoto e 120000 t di fosforo. Le tecnologie applicate permettono di ottimizzare l'utilizzo dei sottoprodotti alimentari e ridurre il quantitativo di rifiuti, rimuovere i nutrienti dalle acque reflue, recuperare risorse ed energia, producendo materiale fertilizzante, energia dalle biomasse e biocarburante dal grasso animale. La gestione delle attività della cooperativa viene ottimizzata attraverso l'utilizzo di soluzioni interconnesse per la valorizzazione dei sottoprodotti e dei rifiuti:

- Dénitral si occupa di processi di filtrazione (Filtramat) e disidratazione (Skimmat) per il trattamento dei liquami degli allevamenti suini.
- Impianto di trattamento delle acque reflue e dei fanghi, con processo di osmosi inversa Bioset
- Le Cedev produce energia termica per le attività della cooperativa e tratta termicamente i solidi prodotti dai trattamenti del Denitral e delle acque reflue, per ottenere materiali sterili utilizzabili nella produzione di fertilizzanti.
- Combioval tratta gli oli e i grassi per la produzione di biocarburante
- Fertilval si occupa della valorizzazione dei sottoprodotti delle attività della cooperativa per la produzione di fertilizzanti.

Vengono prodotte più di 400 formule diverse di fertilizzanti, specifiche per ogni coltivazione. La compagnia è certificata ISO 9001 -2015 e i prodotti rispettano i regolamenti francesi NFU 44051 e NFU 42001, che disciplinano gli ammendanti e i fertilizzanti organici.

Tabella 23: Requisiti fertilizzanti organici francesi

	NFU 42-001 n°5	NFU 42-001 n°7	NFU 42-001 n°6
Dry matter	> 75%	> 50%	> 40%
Nitrogen	> 3%	> 2%	> 1.5%
Phosphorus	> 2.5%	> 2%	> 3%
N+P+K	> 7%	> 7%	6%

In Brittany sono operativi 40 impianti di produzione. La vendita è affermata nel mercato francese e applicata in diversi settori, dalla viticoltura (comprese le produzioni di Champagne, Loire, Bordeaux e Bourgogne) al giardinaggio. L'offerta comprende anche una gamma di prodotti dedicati all'agricoltura biologica. I prodotti vengono anche esportati in Europa, Africa, Asia, Medio Oriente e India occidentale.

7.3.5. Romerike

L'impianto per la produzione di biogas di Romerike, a Oslo, è operativo dal 2012 e tratta scarti alimentari municipali e commerciali separati alla fonte e reflui delle industrie alimentari. L'impianto ha una capacità di trattamento di 50000 tonnellate di rifiuti alimentari l'anno. Lo schema di processo prevede una serie di pretrattamenti meccanici per la rimozione delle sostanze indesiderate, un processo di idrolisi termica, per incrementare la solubilizzazione delle sostanze nella fase liquida e la produzione di biogas, tramite un processo di digestione anaerobica in condizioni mesofile. Il biogas prodotto viene trasformato in biocarburante ed utilizzato dal servizio di autobus della città di Oslo. L'impianto di Romerike produce il biofertilizzante in tre diverse forme:

- Liquido: dalla filtrazione del digestato
- Solido: il digestato viene centrifugato, ottenendo un materiale organico ricco di fosforo adatto per migliorare le qualità del suolo.
- Bioconcentrato: il surnatante alla centrifugazione è acidificato ed evaporato. Il biofertilizzante concentrato è ricco di potassio e azoto.

I prodotti a base di biofertilizzante sono rivolti a un vasto target, come l'utilizzo in agricoltura, orticoltura, giardinaggio e come terreno per la costruzione di strade. L'istituto norvegese per l'agricoltura e ricerca ambientale Bioforsk ha realizzato una serie di prove di crescita usando questo tipo di fertilizzante. Sono stati condotti diversi test in serre e in campo su scala reale, in collaborazione con il Comitato consultivo agricolo Romerike Landbruksrådgivning.

Tabella 24: Biofertilizzante di Romerike

	LIQUIDO	BIOCONCENTRATO	SOLIDO
Annual production	90000 m3	12000 m3	15000 m3
Nutrient content (NKP)	2.2/0.2/1.0	Varies	Varies
Dry matter content	4.5 %	15-25 %	30-40 %
Characteristics	Liquid	Liquid	Solid
Fertilizer class	1	0	2
Suitable for	Organic and conventional	Conventional	Soil production

7.3.6. Storms Farm di Bladenboro

In Carolina del Nord a Bladenboro presso la Storms Farm è installato il più grande digestore di biogas dedicato al trattamento di letame proveniente dall'allevamento di 29000 suini e 444000 polli. Ogni giorno vengono processati circa 227 m3 di rifiuti zootecnici e organici, producendo 975 kWh di energia elettrica. Il processo è costituito dal Mixed Plug Flow™, un digestore mesofilo riscaldato a due stadi, e dal sistema DVO "Phosphorus Recovery", che utilizza un polimero biodegradabile per legare e rimuovere il fosforo, l'azoto organico e altri micronutrienti dalla sospensione di letame, concentrando il recupero nella fase solida. Il 90% del fosforo contenuto nel letame viene recuperato per la produzione di un fertilizzante organico.

7.3.7. BMC Moerdijk

La BMC Moerdijk è una centrale elettrica che incenerisce i rifiuti provenienti da oltre 600 allevamenti di pollame per la produzione di energia. Gli allevatori, riuniti nella cooperativa DEP, hanno firmato un accordo nel 2008 per la fornitura del letame di pollame per 10 anni alla società BMC. Il letame di pollame trattato termicamente in un forno a letto fluido, costituito da un letto di sabbia fine, attraverso il quale viene insufflata aria calda, ad una temperatura di circa 765 °C. L'impianto processa ogni anno 450000 tonnellate di letame di pollame e fornisce alla rete 245000 MWh di energia elettrica. Il processo di incenerimento produce come residuo circa 60000 tonnellate all'anno di ceneri di pollame, che contengono potassio e fosforo e possono essere utilizzate come miglioratori del terreno. BMC esporta le ceneri al di fuori dei Paesi Bassi, come il Regno Unito e la Francia.

Tabella 25: Dati operativi BMC del 2014

Capacità di lavorazione del letame di pollame	444000 tonnellate all'anno
Rendimento lordo (elettricità)	285000 MWh
Rendimento netto (elettricità)	243000 MWh = 70000 famiglie
Quantità di cenere	60000 tonnellate all'anno
P ₂ O ₅	7-8 milioni di kg

7.3.8. Nutri2Cycle

Nutri2Cycle è un progetto europeo focalizzato nella gestione dei nutrienti integrata nell'economia circolare, verificando l'efficienza delle attività agricole attraverso indicatori di performance e ambientali e mediante l'installazione di impianti pilota. L'obiettivo è individuare un modello efficiente e sostenibile per chiudere il ciclo dei nutrienti mediante il recupero e il riciclaggio e individuare uno spazio di mercato per la diffusione dei prodotti agli utilizzatori finali, attraverso la cooperazione sinergica del settore agricolo con quello dell'allevamento. Il progetto include anche l'utilizzo di sensori per valutare il corretto dosaggio di fertilizzante da applicare nei terreni, attraverso sonde infrarossi NIR o l'analisi delle colture. Il progetto prevede la realizzazione di un impianto pilota nelle Fiandre, in Belgio, dove il letame suino trattato in forma liquida sarà somministrato ad una piantagione di lenticchie d'acqua utilizzate per alimentazione animale. Un'altra sperimentazione sarà applicata in Irlanda, dove una piantagione sarà alimentata con i reflui delle industrie casearie, caratterizzati da un elevato contenuto di nutrienti azoto, magnesio e potassio. Verranno testati anche campioni di letame da allevamenti di pollame, acqua di processo della lavorazione delle patate e acque reflue urbane per trattamenti sulle coltivazioni destinate all'alimentazione animale e sul mais. Anche il Gruppo Ricicla dell'Università di Milano collabora al progetto, testando l'utilizzo del digestato come fertilizzante in coltivazioni di mais, frumento e riso.

7.3.9. Alghe per il recupero di nutrienti

Le alghe possono essere utilizzate per il trattamento biologico delle acque reflue e per il recupero dei nutrienti, che vengono inglobati nella biomassa. Le alghe prodotte possono essere a loro volta utilizzate per la produzione di biogas o per la produzione di fertilizzanti. Il sistema AlgaeBioGas, a Lubiana, è operativo dal 2014 accanto a un impianto di biogas per rifiuti alimentari. Inizialmente venivano processati circa 13000 m³/anno di rifiuti provenienti dalle industrie alimentari, oltre alla frazione organica dei rifiuti solidi urbani. Nel 2018 è stato convertito in SaltGae per il trattamento dei

percolati ad alta salinità derivanti dalle pelli di animali. La vasca per le alghe ha un'impronta di 100 m², con uno stagno di inoculazione di 10 m², ed è situata all'interno di una serra riscaldata. La raccolta delle alghe avviene mediante processi di sedimentazione, flottazione ad aria disciolta ed elettrocoagulazione/flocculazione. Il prodotto finale è stato testato dall'azienda Produmix, per valutare la possibilità di utilizzare le alghe Spirulina, Tetraselmis e Nanochloropsis, in sostituzione alla farina di pesce nella produzione di alimenti per maiali. Dai risultati è stato dimostrato che la spirulina potrebbe sostituire il 50% della farina di pesce, mentre la Tetraselmis può sostituire la neomicina. Le alghe sono state inoltre testate per la sintesi di poliuretani ibridi non isocianati (H-NIPU), utilizzabili per gli stucchi e i geopolimeri in ceramica, con applicazioni nelle stampe 3D.

Il progetto Water2REturn ha applicato il processo con le alghe per il trattamento delle acque reflue provenienti dalle attività del macello Matadero del Sur, a Siviglia, in Spagna. Le alghe sono state utilizzate per la produzione di fertilizzanti e biostimolanti-fitostimolanti.



Figura 27: Test fitostimolanti, IWA conference, Venice 2019

7.3.10. KalFos

Saria è un Gruppo che si occupa del riciclaggio di rifiuti animali, vegetali e agricoli, gestendo circa 1 milione di tonnellate all'anno di sottoprodotti, di cui la metà è di origine animale. Le materie seconde vengono sottoposte a diversi processi in base al livello di trattamento richiesto. I rifiuti possono subire diversi trattamenti di recupero:

- digestione anaerobica ReFood, che produce metano e permette l'utilizzo del digestato come fertilizzante;
- trattamento Starval, per far ritornare i sottoprodotti nella catena alimentare;

- incenerimento Secanim.

In quest'ultimo processo la farina di carne e ossa derivante dal trattamento dei sottoprodotti di origine animale di Categoria 1 viene inviata all'incenerimento. I processi rispettano la Direttiva sull'incenerimento dei rifiuti e il regolamento per i sottoprodotti di origine animale. Dal 2014 le ceneri hanno ottenuto lo status di End of Waste dall'Agenzia di Protezione Ambientale e sono vendute con il nome commerciale di Kalfos, utilizzabile da solo come prodotto fertilizzante e miglioratore del terreno o come elemento di una miscela. La produzione di KalFos permette una gestione sostenibile dei sottoprodotti di origine animale sia da un punto di vista ambientale che economico, nell'ottica dei principi dell'economia circolare. Il processo di incenerimento inoltre produce calore, vapore ed energia elettrica, che vengono utilizzati in impianto o immessi in rete. L'approvazione del prodotto da parte dell'EPA e del DEFRA garantisce la sicurezza e le proprietà fertilizzanti del prodotto, verificate anche attraverso numerosi controlli. Il Kalfos è un fertilizzante a lento rilascio contenente un elevato contenuto di calcio e fosfato (20% P₂O₅, 4% K₂O, 1% SO₃, 25% Neutralising Value). Il fosfato presente nel KalFos è solubile in ambiente acido, il che lo rende facilmente assimilabile per le radici delle piante e ne limita il dilavamento. Ogni anno Saria produce 12000 tonnellate di Kalfos, che possono essere impiegate nei terreni a uso agricolo e nei pascoli.

Tabella 26 Nutrienti in KalFos

Calcium (CaO)	37%
Phosphate (P205)	22%
Potash (K20)	4%
Magnesium (Mg)	1%
Sodium (Na)	5.5%
Sulphur (SO3)	4.5%
Copper (Cu)	160mg/kg
Zinc (Zn)	650mg/kg
Selenium (Se)	3mg/kg
Cobalt (Co)	4mg/kg
Manganese (Mn)	150mg/kg
Boron (B)	90mg/kg
Neutralizing value	22%

7.3.11. Fibrophos UK

Fibrophos è un fertilizzante derivato dal trattamento di lettiere per polli. Il prodotto è ricco in fosfato, potassio, zolfo, calcio e magnesio ed altri elementi nutritivi essenziali per la crescita delle piante. La produzione del Fibrophos permette di riciclare ogni anno 800000 tonnellate di lettiere per polli, che vengono utilizzate come combustibile nelle centrali elettriche. Le ceneri in uscita dal trattamento termico contengono nutrienti,

che vengono recuperati e reimmessi nel ciclo agricolo attraverso il Fibrophos. Il prodotto è classificato come un elemento per la produzione di fertilizzanti dal regolamento del Regno Unito.

7.3.12. Fertikal

Fertikal è un'azienda produttrice di fertilizzanti organici e organo-minerali derivanti da materiali riciclati. Le materie di scarto vengono compostate, pretrattate per rimuovere materiali indesiderati, essiccate, pastorizzate e pellettizzate. L'azienda garantisce la tracciabilità delle materie utilizzate per la produzione. Il fertilizzante organico è prodotto esclusivamente utilizzando liquami di polli e garantisce un apporto di nutrienti a rilascio graduale e di sostanza organica. Fertikal produce ogni anno circa 370000 tonnellate di fertilizzanti organici, il 99% dei quali vengono esportati in 55 paesi.

Tabella 27: Caratteristiche Fertilizzante organico Fertikal

Organic matter	68%
Dry matter	88%
Total nitrogen (N)	4%
Of which organic (N)	3,8%
Phosphorus (P ₂ O ₅)	3,0%
Potassium (K ₂ O)	3,0%
Magnesium (MgO)	1,0%
Calcium (CaO)	9,0%
Sulphate (SO ₄)	1,0%
Ratio C/N	>9
Cu	25 - 100 ppm
Mo	< 6 ppm
Zn	150 - 450 ppm
B	30 - 50 ppm
Fe	400 - 500 ppm
Mn	300 - 400 ppm



Figura 28: Fertikal

7.3.13. Soilfood

La Soilfood è un'azienda che produce dal 2016 fertilizzanti organici e ammendanti dai sottoprodotti del settore forestale e delle industrie di bio-energia. La compagnia fornisce ogni anno prodotti per circa 10000 ettari di terreno agricolo, riciclando più di 300000 tonnellate di materiale recuperato da 17 industrie, con un contenuto di fosforo pari a circa 260 tonnellate. La compagnia sta testando nuovi prodotti utilizzando le ceneri derivanti da sottoprodotti forestali e sta sviluppando ammendanti prodotti con fibre dell'industria cartiera. Riciclando sottoprodotti e sostanze nutritive industriali, inoltre, nel 2018 sono state risparmiate 24057 tonnellate di emissioni di anidride carbonica. Soilfood riceve circa 200000 tonnellate di sottoprodotti industriali all'anno, provenienti da industrie locali operanti nel settore cartiero, come le aziende Stora Enso e Metsä Group, nel settore forestale, come UPM, e nella produzione di gas come Gasum.

7.3.14. Pizzoli

L'impianto di trattamento di Pizzoli a Burdìo (BO) si occupa della depurazione dei reflui di processo e converte i prodotti di scarto della lavorazione delle patate in biogas, compost e acqua depurata. Il processo è integrato con la tecnologia ANPHOS® che recupera ogni anno 620-910 tonnellate di struvite.

Tabella 28: Trattamento Pizzoli

PRODOTTI	U.D.M.	QUANTITÀ
Energia elettrica	kWhe/y	8400000
Energia termica	kWht/y	8900000
Compost (80% SS)	Ton/y	1460
Struvite (30% SS)	Ton/y	620-910
Acqua riutilizzata	m3/y	57000
Acqua scaricata in fognatura	m3/y	120000

7.4. Recupero da altre attività industriali

7.4.1. Metsä e Biolan

Metsä è un'azienda cartiera che produce imballaggi di cartone. Più del 90% dei flussi secondari derivanti dal processo di produzione vengono riciclati per produrre energia o recupero di solidi. Il gruppo Metsä ha inoltre partecipato al progetto NSP Pulp per l'analisi dell'utilizzo di ammendanti per il terreno derivanti dalle fibre di legno, per ridurre la lisciviazione dei nutrienti nei corsi d'acqua.

Biolan è una compagnia finlandese che produce substrati per il giardinaggio, fertilizzanti, compost, sistemi di trattamento delle acque reflue e prodotti agricoli urbani. L'impianto di Eura produce ogni anno circa 100000 tonnellate all'anno di fertilizzanti organici da materie riciclate, 20000 m3 di terreni di coltura, utilizzando oltre 100000 m3 di sottoprodotti agricoli e industriali.

Biolan e Metsä collaborano all'interno del NSP-pulp project per trattare il 92% dei sottoprodotti dell'industria cartiera per la produzione di substrati di crescita e fertilizzanti. Biolan utilizza circa 2000 tonnellate/anno di sottoprodotti dall'azienda Metsä e il terreno di crescita Istutusmulta, che contiene circa il 10% di polpa e sottoprodotti dell'industria cartiera e il 25-50% di materia prima rinnovabile o riciclata, ha ricevuto il premio di Prodotto Finlandese per il Giardinaggio dell'anno 2018.



Figura 29: Prodotto Istutus-Multa

7.4.2. EasyMining - LKAB

EasyMining utilizza la tecnologia Ash2Phos per il recupero di fosfato di calcio dalle ceneri di incenerimento dei fanghi di depurazione, che può essere utilizzato per la produzione di mangimi o fertilizzanti per animali. La compagnia inoltre collabora con la società mineraria di estrazione del ferro LKAB per la produzione di fosfato mono ammonio CleanMAP e il recupero di elementi rari del terreno (Rare Earth Elements REE) dagli scarti della produzione di ferro minerale. Oltre al CleanMAP e ai REE il processo può produrre gesso, idrossido di magnesio e fluorosilicati.



Figura 30: CleanMap

7.4.3. ProPHOS Chemicals

La ProPHOS Chemicals è un'azienda chimica italiana produttrice di polvere antincendio, che ha sviluppato un'innovazione per recuperare nutrienti dalle polveri esauste degli estintori, che in Europa rappresentano un potenziale di recupero di 100000 tonnellate annue di nutrienti. Il processo consiste nella setacciatura iniziale, l'omogeneizzazione del materiale e la rimozione del silicone, attraverso diverse opzioni testate, come solventi organici, filtrazione, ultrasuoni o trattamenti biologici. Il progetto PHOSave è stato sviluppato con il supporto del programma Horizon2020 ed è operativo dal 2018 in piena scala, con un impianto a San Giovanni in Croce (Cremona) in Lombardia, che recupera 5000 tonnellate annue di fosfato-mono-ammonio e solfato di ammonio dagli estintori. Gli agenti chimici sono purificati e ridotti in micro-granuli. Il fosfato recuperato può essere riciclato nell'industria chimica o come fertilizzante.

7.5. Ottimizzazione delle risorse

Per diffondere le tecnologie e buone pratiche di recupero del fosforo è necessario non solo sviluppare sistemi innovativi, ma anche rendere tali processi economicamente sostenibili. Uno dei maggiori costi del recupero del fosforo tramite struvite è rappresentato dal consumo dei reagenti necessari come fonte di Magnesio per la precipitazione. Utilizzare fonti alternative e di recupero rende il processo di recupero del fosforo più sostenibile, sia da un punto di vista economico che di economia circolare.

Oltre al recupero del fosforo dai flussi reflui e di scarto, sono state inoltre sviluppate nuove tecnologie per ottimizzare il successivo utilizzo della risorsa nel settore agricolo, limitandone gli sprechi e le dispersioni in ambiente, mediante tecniche di agricoltura di precisione o tramite l'utilizzo di sostanze che ne favoriscano l'assorbimento da parte delle piante o degli animali.

Di seguito vengono presentati alcuni esempi di tecnologie per l'utilizzo di fonti alternative di Magnesio per la produzione di struvite. Vengono poi proposti alcuni dei prodotti diffusi in commercio utilizzati per ottimizzare l'assorbimento del fosforo nelle piante e nell'alimentazione degli animali di allevamento. Infine, vengono illustrate alcune soluzioni di agricoltura di precisione per l'applicazione mirata del fosforo in agricoltura ed il monitoraggio delle condizioni dei terreni.

7.5.1. Fonti alternative di Mg

Il processo di recupero del fosforo mediante precipitazione è molto diffuso negli impianti di depurazione delle acque reflue, ma necessita il dosaggio di reagenti per il controllo del pH e per fornire il giusto rapporto Mg:P. Una soluzione alternativa è stata studiata dai ricercatori dell'Università di NTNU e presentata in occasione della terza conferenza dell'International Water Association a Venezia nel 2019. È stato realizzato un impianto pilota per valutare l'uso di acqua marina come fonte di magnesio, in alternativa ai chemicals tradizionali. I risultati hanno mostrato una riduzione dei costi operativi del 30-50% per la produzione di struvite e una riduzione dell'impronta di carbonio dell'8-40%. La regolazione del pH permette, inoltre, di ottenere un prodotto puro, riducendo la precipitazione del calcio fosfato a contenuti inferiori all'1% di Ca^{2+} .

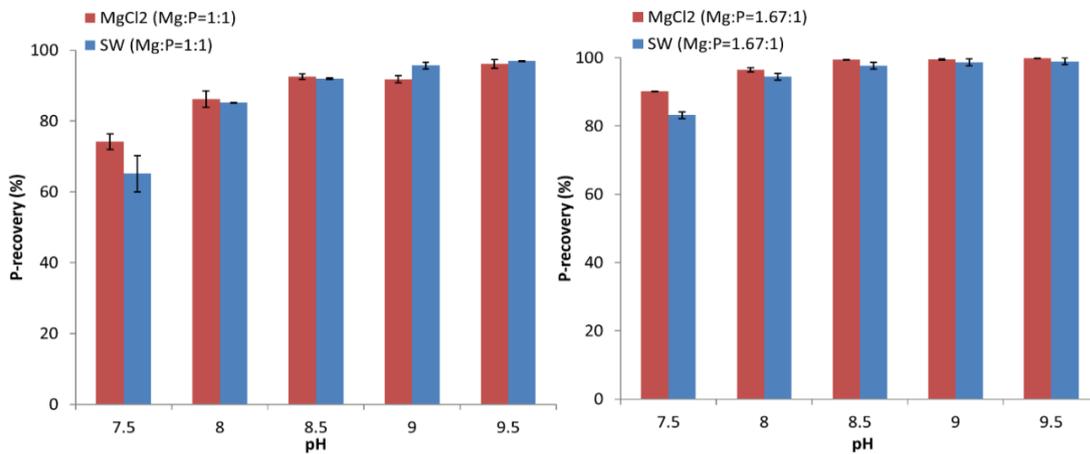


Figura 31: Rese di recupero di fosforo (SW = acqua marina), IWA conference, Venice 2019

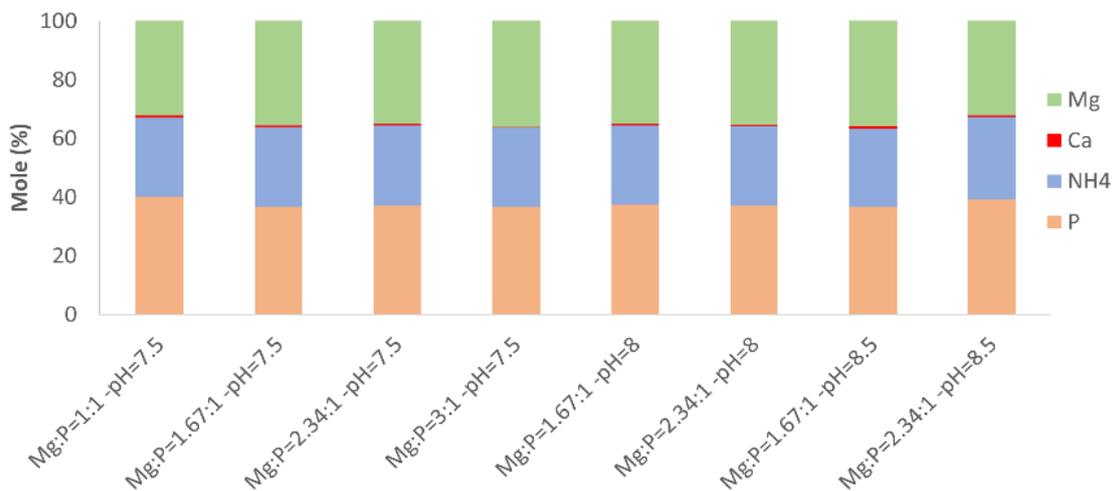


Figura 32: Purezza della struvite, IWA conference, Venice 2019

Anche il Gruppo Ricicla dell'Università degli Studi di Milano ha sviluppato un processo per l'utilizzo di una fonte di magnesio alternativa. In particolare, è stata studiata l'applicazione di un sottoprodotto della lavorazione del sale marino, il seawater bittern, per la precipitazione di struvite. Lo studio è stato condotto all'interno del progetto Power, acronimo di "Renewable P-fertilizer from livestock effluent to prevent water eutrophication" per studiare processi di recupero del fosforo. È stato valutato l'accoppiamento di tecnologie elettrochimiche microbiche (MET) con processi di cristallizzazione per il recupero del fosforo tramite precipitazione di struvite. Il digestato proveniente dalla digestione anaerobica è stato utilizzato come substrato di alimentazione per una cella combustibile microbica (MFC) e una cellula di elettrolisi microbica (MEC) per produrre elettricità e H₂, promuovendo inoltre il recupero di P attraverso la precipitazione di struvite come conseguenza dell'aumento del pH a livello del catodo. Gli effluenti provenienti dai MET sono stati successivamente trattati per favorire un'ulteriore precipitazione di P, confrontando le rese di recupero aggiungendo sale di Mg puro (MgCl₂) o il seawater bittern (SWB) derivato dalla lavorazione del sale marino nell'azienda Compagnia Italiana Sali, di Rovigo. I risultati ottenuti hanno mostrato rese di recupero equivalenti per entrambe le fonti di magnesio, dimostrando che l'utilizzo di fonti di recupero rappresentano una valida alternativa alle materie primarie, riducendo i costi per il recupero del fosforo, in linea con i principi della Circular Economy.

Tabella 29: Recupero dall'effluente da MFC

PO₄³⁻ and NH₄⁺ removal during the precipitation test conducted using SWB and MgCl₂ 6H₂O on Microbial fuel cell (MFC) effluent.

	SWB		MgCl ₂	
	PO ₄ ³⁻ (mg L ⁻¹)	NH ₄ ⁺ (mg L ⁻¹)	PO ₄ ³⁻ (mg L ⁻¹)	NH ₄ ⁺ (mg L ⁻¹)
IN	38.5 ± 1.2	1746 ± 8	38.5 ± 2.5	1746 ± 8
Ctrl.	50.4 ± 0.7	1750 ± 10	50.3 ± 0.7	1750 ± 10
Out liq. ^a	4.74 ± 0.23	1489 ± 5	6.4 ± 0.6	1491 ± 11
Ctrl.	10.56 ± 0.89	1701 ± 6	11 ± 0	1609 ± 6
Prec. ^b	9325 ± 6	n.d. ^c	5839 ± 12	n.d.
Ctrl.	3878 ± 0	n.d.	3785 ± 8	n.d.

^a liq: liquid fraction obtained after the precipitation test.

^b Prec.: precipitate powder obtained after the precipitation test.

^c n.d. = not detected.

Tabella 30: Recupero dall'effluente da MEC

PO_4^{3-} and NH_4^+ removal during the precipitation test conducted using $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ and SWB on Microbial electrolysis cell (MEC) effluent (IN).

		MgCl ₂		SWB	
		PO ₄ ³⁻ (mg L ⁻¹)	NH ₄ ⁺ (mg L ⁻¹)	PO ₄ ³⁻ (mg L ⁻¹)	NH ₄ ⁺ (mg L ⁻¹)
IN	SSM	47.2 ± 2.5	1751 ± 12	47.16 ± 2.47	1751 ± 12
	Pt	41.5 ± 2.1	1855 ± 5	41.5 ± 2.1	1855 ± 5
	Ctrl.	50 ± 6.1	1895 ± 20	50 ± 6	1895 ± 20
Out liq. ^a	SSM	14.9 ± 0.2	1589 ± 6	15.68 ± 0.46	1505 ± 11
	Pt	10.9 ± 0.1	1728 ± 18	10.32 ± 0.52	1526 ± 10
	Ctrl.	19.2 ± 0.5	1701 ± 17	18.56 ± 1.12	1701 ± 13
Out prec. ^b	SSM	12,356 ± 16	n.d. ^c	1,2314 ± 7	n.d.
	Pt	7487 ± 22	n.d.	11,367 ± 21	n.d.
	Ctrl.	3856 ± 9	n.d.	3878 ± 16	n.d.

^a liq.: liquid fraction obtained after the precipitation test.

^b prec.: precipitate powder obtained after the precipitation test.

^c n.d. = not detected.

7.5.2. Miglioramento assorbimento del fosforo: CCS Aosta

La CCS (Centro Colture Sperimentali) è un'azienda di biotecnologie e specializzata nella ricerca, la selezione e la commercializzazione di microrganismi utili per l'impiego nel campo dell'agricoltura. L'azienda produce biostimolanti a base di funghi micorrizici MICOSAT F. Il fungo micorrizico crea legami simbiotici con l'apparato radicale della pianta, detti micorrize, che favoriscono scambi di elementi nutritivi a vantaggio della pianta, insieme all'azione dei batteri della rizosfera promotori della crescita PGPR.



Figura 33: Formati MICOSAT F

7.5.3. Miglioramento assorbimento del fosforo: Italtollina

In Italia, l'azienda produttrice di fertilizzanti Italtollina supporta la gestione sostenibile delle risorse ed è partner dell'Associazione Italiana per lo Sviluppo dell'Economia Circolare.

Italtollina produce ogni anno circa 120000 t di fertilizzanti in formato pellet, 1000000 litri di soluzioni vegetali idrolizzate e 100000 litri di microrganismi benefici, utilizzando sottoprodotti di origine animale e vegetale. Vengono utilizzate come materie prime letame, farina di piume e guano, certificate CE dalla normativa 1069/2009. All'interno dell'azienda il gruppo di ricerca e sviluppo si occupa di analisi chimico-fisiche per i controlli di qualità dei prodotti e ricerca di nuove formule per massimizzare l'assorbimento dei nutrienti. Il fosforo presente nei concimi è di natura organica e pertanto garantisce una maggiore assimilazione da parte delle colture. L'azienda ha sviluppato inoltre una serie di prodotti a base di microrganismi ed ha partecipato al progetto MICROMAIS, per l'impiego di funghi micorrizici arbuscolari nel settore foraggero della Piana del Volturno. Questi ultimi, infatti, promuovono la crescita delle piante, aumentando la disponibilità e l'assorbimento di nutrienti, incrementando l'efficienza d'uso dei fertilizzanti applicati.

Italtollina attua processi in vivo per la selezione e la riproduzione dei batteri benefici per il terreno. Inoltre, l'azienda applica tecniche di essiccazione in ambiente controllato per la produzione di pellet privi di agenti patogeni, metalli pesanti o semi indesiderati, selezionando batteri utili e incrementando la concentrazione di nutrienti. I batteri vengono attivati al momento dell'applicazione sul terreno e lavorano nella rizosfera, la zona compresa tra l'apparato radicale e il terreno.

I reflui di origine animale vengono utilizzati principalmente per la loro elevata attività biologica e il contenuto di fosforo, mentre i sottoprodotti di origine vegetale sono stoccati come humus e utilizzati come miglioratori del terreno, per la loro ritenzione idrica e la capacità di fornire una struttura porosa al suolo.

Tabella 31: Batteri selezionati da Italtollina

Bacillus licheniformis	Solubilization of nutrients present in the soil.
Bacillus pumilus	PGPR bacteria: release of gibberellins and nitrogen fixation. Anti sclerotinia on rape (<u>Acapela</u> product)
Bacillus stearothermophilus	Bacteria from composting degradation of organic matter.
Paenibacillus polymyxa	PGPR bacteria: auxin and cytokinin Releasing. Solubilization of phosphorus, protection of the roo system.
Paenibacillus macerans	Nitrogen fixation, production of polysaccharides, help to soil aggregate formation.
Lactococcus lactis lactis 1	Solubilization of soil nutrients (phosphorus) Stimulating the development of other bacteria, soil aggregate formation.

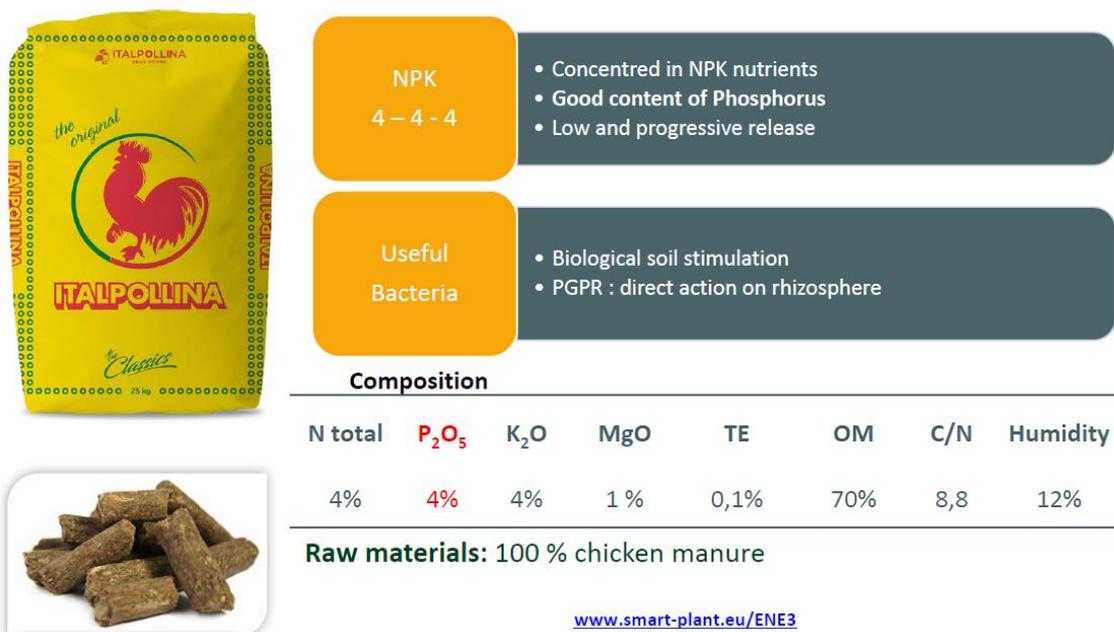


Figura 34: Italpollina (fonte ENE3 ad ECOMONDO 2018)

7.5.4. Miglioramento assorbimento del fosforo: Collaborazione Agrisystem – Terra Più – ENEA

ENEA ha sviluppato con le aziende produttrici di fertilizzanti Agrisystem e Terra Più prodotti che permettono l'inoculo di batteri in grado di solubilizzare il fosforo accumulato nel terreno. I microrganismi (Phosphate-Solubilizing Microorganisms, PSM) vengono isolati e selezionati per le loro capacità metaboliche. Questa tecnica permette il recupero del fosforo direttamente dal terreno, riducendo di conseguenza l'uso di concimi a base di fosfati, gli sprechi e gli effetti collaterali dovuti al loro accumulo nei suoli. I prodotti contenenti i microrganismi da inoculare sono commercializzati dalle due aziende rispettivamente con il nome di P-Force e Biophos, applicabili anche nell'agricoltura biologica.



Figura 35: Prodotti P-Force e Biophos

7.5.5. Miglioramento assorbimento del fosforo: Enzima Fitasi

I nutrienti sono presenti nei reflui animali perché l'organismo non riesce a metabolizzare tutti gli elementi presenti negli alimenti e parte di essi non viene assimilata. Una soluzione per la corretta gestione delle risorse è l'integrazione dell'enzima fitasi nell'alimentazione animale, che migliora la digeribilità del fosforo del 15-40% per i suini e del 20-30% nel pollame, incrementandone l'assorbimento. Aumentando la frazione assimilata da parte degli animali, diminuisce di conseguenza la quantità di fosforo nei reflui. Questo enzima è attualmente applicato in circa $\frac{3}{4}$ degli allevamenti europei. La compagnia DSM produce il Ronozyme dalla fermentazione di materiali organici, in cui la presenza dell'enzima fitasi permette di ridurre fino al 30% la presenza del fosforo nei reflui animali.

L'efficacia e la sicurezza della fitasi sono state studiate anche per la nutrizione in iticoltura dalla European Food Safety Agency (EFSA), analizzando l'applicazione dell'OPTIPHOS® all'alimentazione di trote e salmoni per incrementare l'assimilazione del fosforo da parte del sistema digestivo animale. L'OPTIPHOS® migliora l'assimilazione del fosforo nei pesci, espressa come capacità enzimatica, a 500 OTU/kg alimentato.

7.5.6. Miglioramento dosaggio del fosforo e riduzione sprechi: SyreN

SyreN di BioCover è un sistema modulare per l'ottimizzazione della gestione del letame nelle aziende agricole, attraverso tecnologie integrabili nelle attrezzature esistenti degli agricoltori. Il sistema è costruito all'interno delle autocisterne dei liquami e può operare con differenti modalità:

- acidificazione del letame durante lo spandimento mediante il dosaggio di acido solforico per ridurre le emissioni di ammoniaca nell'aria fino al 70%;
- dosaggio di additivi per facilitare la disponibilità di assorbimento da parte delle piante del letame, migliorare le proprietà del suolo e ridurre gli odori;
- dosaggio di ammoniaca e stabilizzazione dell'azoto, per ridurre le perdite e ottenere il rapporto N: P ottimale;
- sistemi software/mobile per ottimizzare l'applicazione del liquame;
- modulo di recupero del fosforo SyreN+, che precipita il fosfato come struvite all'interno dell'autocisterna di liquami e in seguito la dissolve usando acido solforico, ottenendo un fertilizzante liquido NPS commerciabile e trasportabile.

SyreN ha ricevuto numerosi riconoscimenti, tra cui il Baltic Manure Handling Award 2012, il premio Agromek 2010, l'European Corporate CSR nel 2013 e il premio US EPA Manure Nutrient Recovery Challenge nel 2016. Attualmente è in fase di analisi l'opzione di applicare il sistema al recupero della struvite come prodotto fertilizzante solido, il SyreN Crustal.

7.5.7. Miglioramento dosaggio del fosforo e riduzione sprechi: Yara

La società di fertilizzanti Yara si applica nella ricerca di soluzioni per ridurre gli sprechi e le dispersioni di nutrienti nei terreni e promuovere la collaborazione tra diversi settori industriali per chiudere il ciclo dei nutrienti. Yara sta sviluppando diverse soluzioni da fornire agli agricoltori per ottimizzare le applicazioni in agricoltura:

- Megalab è un sistema online che offre raccomandazioni nutrizionali, interpretando i risultati di analisi chimiche di campioni di colture e suolo.
- P-trap utilizza il gesso, che è un sottoprodotto del processo di estrazione dalle rocce fosfatiche, per ridurre il deflusso di fosforo dai campi. Le prove su campo in Finlandia documentano una riduzione del 60% delle perdite di fosforo.
- N-Sensor™ è un sensore che, installato sui mezzi agricoli, scansiona e analizza il fabbisogno di nutrienti delle colture e di conseguenza, regola le velocità di applicazione dei fertilizzanti azotati dal mezzo in movimento.

Yara si impegna a ridurre gli sprechi dalle attività estrattive: nella miniera di Lagamar in Brasile il fosforo viene estratto anche dai bacini di decantazione; a Siilinjärvi in Finlandia Yara ha stipulato un accordo con un'altra società mineraria per utilizzare la pirite minerale residua dalle loro operazioni come materia prima per agevolare l'estrazione del fosforo.

7.5.8. Miglioramento dosaggio del fosforo e riduzione sprechi: Veolia

Veolia sta sviluppando una serie di strumenti che consentono all'utente del prodotto finale una gestione ottimizzata delle risorse. SoilDiag è un sistema di analisi infrarosse NIR in situ, mentre SoilAdvisor è un'applicazione che fornisce agli agricoltori una pianificazione a supporto decisionale per definire la strategia di fertilizzazione più adatta ai loro terreni, in funzione del tipo di coltura, del terreno e del clima. Questo nuovo strumento viene sviluppato da "SEDE" e mira a limitare gli input chimici e ottimizzare la gestione delle risorse. Carbo Pro™ è un programma software in grado di prevedere le quantità di carbonio sequestrate nel terreno dopo l'applicazione di prodotti biologici come il compost. SUIVRA è un sistema di monitoraggio delle operazioni di spandimento dei prodotti fertilizzanti nel terreno. Il sistema di mappatura collegato a SUIVRA fornisce la visualizzazione dei terreni con le informazioni relative. SUIVRA organizza i dati analitici dei parametri agricoli, degli oligoelementi, dei microrganismi e dei metalli pesanti dei terreni mappati. Il sistema inoltre pianifica l'applicazione dei nutrienti e archivia i registri di spandimento e di tracciabilità dei prodotti.

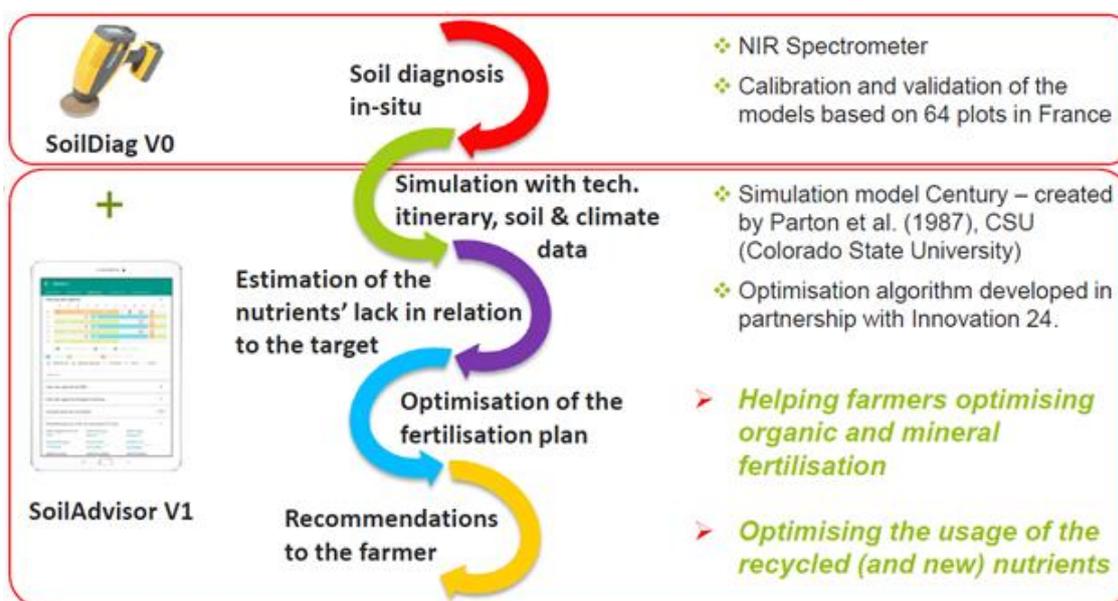


Figura 36: Utilizzo combinato SoilDiag e SoilAdvisor

8. Meccanismi di incentivazione: cenni

8.1. Inquadramento generale

Nonostante la sostenibilità tecnica ed ambientale di molte soluzioni di recupero fosforo sia dimostrata, quella economico-finanziaria spesso necessita di adeguate politiche e/o regolamenti incentivanti che possano, ad esempio, tenere in considerazione costi olistici ed ambientali della risorsa.

A livello comunitario è chiara la consapevolezza del ruolo fondamentale del fosforo, dal 2014 inserito tra le prime 20 materie prime critiche dell'UE. La tematica del recupero del fosforo si inserisce anche negli Obiettivi di Sviluppo Sostenibile, concordati nel 2015 e da realizzare per il 2030. In particolare, gli obiettivi:

- 6.3 - migliorare la qualità dell'acqua, ridurre la quantità di acqua non trattata e incrementare il riciclo;
- 12.2 - assicurare una gestione sostenibile ed efficiente delle risorse naturali;
- 12.3 - dimezzare i rifiuti alimentari;
- 12.4 - raggiungere una gestione sostenibile dei prodotti chimici e dei rifiuti;
- 12.5 - ridurre la produzione di rifiuti.

Gli obiettivi comprendono generalmente anche un'ottimizzazione della gestione del fosforo, sia dal punto di vista di potenziale inquinante, sia in un'ottica di salvaguardia delle risorse non rinnovabili, sia nel contesto di recupero e valorizzazione dei rifiuti.

L'Unione Europea ha, inoltre, adottato nel 2015 il pacchetto sull'economia circolare, attraverso la comunicazione "L'anello mancante - Piano d'azione dell'Unione europea per l'economia circolare", con cui si evidenzia la necessità di inserire i materiali di recupero nel regolamento sui fertilizzanti e di aggiornare la Direttiva Rifiuti, per incentivare la valorizzazione delle risorse e garantire un mercato alle materie prime seconde. In particolare, per quanto riguarda il recupero di nutrienti, si specifica la necessità di ridurre l'impatto derivante dall'importazione della roccia fosfatica, attraverso il riciclo dei nutrienti ed un uso sostenibile dei concimi in agricoltura.

La Commissione e il Parlamento europei hanno, inoltre, accolto le "Common Agricultural Policies", ovvero linee guida per politiche comunitarie con la finalità di una gestione e sviluppo del settore agricolo. Vengono individuate misure finanziarie, economiche e ambientali per supportare gli agricoltori e sviluppare un modello di produzione sostenibile sia dal punto di vista economico che ambientale, in linea con i principi dell'economia circolare. Vengono definite le BCCA, buone condizioni agronomiche e ambientali, che raggruppano un elenco di norme volte a migliorare la gestione del suolo e a ridurre il declino e l'erosione della materia organica, due elementi che altrimenti contribuirebbero alla lisciviazione del fosforo dal terreno nelle acque. Le politiche di sviluppo rurale prevedono l'incentivazione delle misure

agroambientali e climatiche, risarcendo gli agricoltori dei costi conseguenti all'applicazione di queste pratiche.



Figura 37: Common Agricultural Policies

In ambito ricerca e sviluppo, numerose sono le opportunità di finanziamento di progetti innovativi.

Ad esempio, attraverso il programma “Industry 2020 in the Circular Economy” di Horizon 2020, l’Unione Europea finanzia imprese che applicano i principi dell’economia circolare.

La tematica del recupero del fosforo viene affrontata nel piano “Food security, sustainable agriculture and forestry, marine, maritime and inland water research and the bioeconomy”, che comprende una serie di progetti volti ad un’agricoltura sostenibile e ad una corretta gestione delle risorse.

In particolare, il progetto “Closing nutrient cycles” mira al recupero dei nutrienti dai sottoprodotti dell’industria agroalimentare, del settore forestale o dalle acque e dai fanghi reflui, per la produzione di fertilizzanti. I finanziamenti sono dedicati ad attività innovative e di ricerca per fornire le conoscenze scientifiche e le tecnologie applicative per la produzione e la commercializzazione di fertilizzanti di nuova generazione derivati da sottoprodotti organici. Gli ambiti di applicazione interessano:

- A. Comprensione delle proprietà e degli impatti dei biofertilizzanti;
- B. Biofertilizzanti da reflui di origine animale;

- C. Biofertilizzanti da sottoprodotti dell'industria agroalimentare, ittica, acquacoltura o forestale;
- D. Biofertilizzanti da acque e fanghi reflui.

La Commissione Europea prevede un contributo di € 6.000.000 per i progetti A e D e di € 8.000.000 per i progetti B e C.

Altri progetti sviluppati nel programma "Food security, sustainable agriculture and forestry, marine, maritime and inland water research and the bioeconomy", che interessano il recupero del fosforo sono:

- "Integrated system innovation in valorising urban biowaste", che si occupa della valorizzazione dei rifiuti urbani, compreso il recupero di nutrienti;
- "Integrated water management in small agricultural catchments", che riguarda il recupero di nutrienti dai flussi dell'acqua utilizzata in agricoltura.

Per spingere l'Europa verso un'economia circolare è stata proposta anche una metodologia alternativa di tassazione. Il sistema attuale è incentrato sul lavoro, mentre l'utilizzo di materie prime non rinnovabili e l'inquinamento prodotto non vengono considerati. Il progetto Ex'tax si basa sulla proposta di spostare l'oggetto della tassazione, dal lavoro verso le risorse utilizzate. I ricavati derivanti dalla tassazione sull'utilizzo delle materie prime e sull'inquinamento potranno essere utilizzati per abbassare il costo del lavoro o incrementare gli investimenti sociali.

A livello dei singoli Stati Membri, i Paesi Bassi hanno attuato una serie di meccanismi di incentivazione per incoraggiare le imprese allo sviluppo di un'economia circolare, declinati attraverso la firma di contratti, definiti Green Deal, tra governo e aziende. Gli accordi riguardano nove temi: energia, bio-economia, mobilità, acqua, cibo, biodiversità, risorse, edilizia e clima. L'obiettivo dei Green Deal è di rimuovere gli ostacoli per incoraggiare le iniziative sostenibili e integra gli strumenti esistenti, come la legislazione e la regolamentazione, con incentivi di mercato e finanziari e misure per stimolare l'innovazione.

I Paesi Bassi ed il Regno Unito, attraverso il North Sea Resources Roundabout (NSRR), collaborano per supportare la cooperazione tra le attività commerciali internazionali di frontiera indirizzate all'economia circolare. L'accordo mira a sviluppare nuove soluzioni normative per superare le barriere che ostacolano i modelli di business dell'economia circolare.

L'NSRR è stato ufficialmente firmato all'inizio di marzo 2016, ha una durata di 5 anni e riguarda flussi di 10 tipologie di risorse secondarie. I temi attualmente in corso riguardano il compost, i metalli non ferrosi recuperati da ceneri pesanti, il PVC riciclato e la struvite.

In particolare, per quanto riguarda la risorsa del fosforo, i Paesi Bassi hanno varato un accordo sulla catena di valore del Fosfato, il Dutch Phosphate Value Chain Agreement, a cui partecipano 20 partners tra enti pubblici e imprese, che si impegnano per realizzare sinergie nelle loro attività e investimenti per creare un mercato sostenibile

per il fosforo recuperato. L'accordo sulla catena del valore interessa i flussi residui di fosfato dell'industria alimentare, delle attività domestiche, dell'allevamento di bestiame, del settore idrico (acque reflue, fanghi di depurazione) e dell'industria di trasformazione.

Relativamente alla Normativa Italiana, la legge 58/2019 n. 151 del 29 Giugno 2019 che attua il "Decreto Crescita" dispone le direttive per favorire la transizione delle attività economiche verso un modello di economia circolare, finalizzate alla riconversione produttiva del tessuto industriale.

In particolare, l'Articolo 26 disciplina le agevolazioni a sostegno di progetti di ricerca e sviluppo per la riconversione dei processi produttivi nell'ambito dell'economia circolare, cui fanno seguito L'Articolo 26 – bis, che regola le disposizioni in materia di rifiuti e di imballaggi, e l'Articolo 26 – ter che regola le agevolazioni fiscali sui prodotti da riciclo e riuso.

Le misure applicano agevolazioni finanziarie a sostegno di progetti di ricerca e sviluppo finalizzati ad un uso più efficiente e sostenibile delle risorse. Possono beneficiare delle agevolazioni le imprese ed i centri di ricerca che sviluppano innovazioni di prodotti e processi per l'utilizzo efficiente delle risorse, il trattamento e la trasformazione dei rifiuti, compreso il riuso dei materiali. Vengono anche finanziati progetti per la sperimentazione prototipale di modelli tecnologici integrati che permettono, ad esempio, la riduzione, il riciclo e riuso degli scarti alimentari, lo sviluppo di sistemi di ciclo integrato delle acque e il riciclo delle materie prime.

Vengono inoltre previste agevolazioni fiscali per l'acquisto di beni prodotti con rifiuti riciclati e vengono applicati incentivi per il riutilizzo degli imballaggi. Il bonus è destinato ai lavoratori autonomi o agli imprenditori e si applica tramite un credito di imposta pari al 25% sull'acquisto di prodotti finiti, materie prime o semi-lavorati derivanti almeno per il 75% da materiali di recupero o riciclati. Il bonus è riservato all'acquisto di beni utilizzati nell'esercizio dell'attività economica o professionale, fino ad un importo massimo annuale di € 10000. Rientra nei beni provvisti di agevolazione il compost di qualità derivante dal trattamento della frazione organica differenziata dei rifiuti.

8.2. Metodo tariffario idrico per il terzo periodo regolatorio MTI-3

Nel Dicembre 2019 l'ARERA ha approvato il metodo tariffario idrico per il terzo periodo regolatorio (MTI-3) dove "La sostenibilità ambientale" è promossa attraverso una serie di incentivi che si basano sui seguenti criteri:

3. contenimento dei consumi di energia elettrica per fornire l'acqua,
4. riduzione dell'uso della plastica nel consumo di acqua potabile,

5. recupero di energia e materia (si pensi su tutti al tema del trattamento dei fanghi di depurazione)
6. riuso dell'acqua depurata a fini agricoli e industriali.

Nel MTI-3 è previsto “il riconoscimento nella componente a copertura dei margini derivanti dalle altre attività idriche, di uno sharing maggiore a favore del gestore in presenza di misure innovative, caratterizzate da multi settorialità, che rispondono agli obiettivi di sostenibilità energetica ed ambientale, elencati nel documento di consultazione 402/2019/R/IDR” dove è inclusa la “Promozione di misure per la sostenibilità energetica e ambientale del servizio idrico integrato” che specifica come “l’Autorità è orientata a valorizzare misure innovative che possano comportare benefici in termini di contenimento dei costi complessivi, coniugando obiettivi di tutela ambientale e di recupero efficiente di risorse pregiate ed energia (ad esempio quelli finalizzati al recupero di materia - nutrienti, quali Azoto e Fosforo, cellulosa, biopolimeri, ammendanti organici - ed energia dai fanghi di depurazione).”

9. Considerazioni conclusive degli esempi di progetti, casi reali e casi studio di gestione e recupero del fosforo

Gli esempi europei di approcci gestionali per il recupero e la valorizzazione del fosforo analizzati sono riferiti, in ordine di numerosità delle esperienze desunte e descritte, per valorizzare acque reflue municipali, sottoprodotti o rifiuti organici e zootecnici, e sugli scarti di lavorazione industriale.

Sulla base dei documenti analizzati, si riassume e quanto segue:

1. In Europa, la Svizzera, la Germania e l'Austria sostengono il recupero del fosforo attraverso l'introduzione di normative che impongono l'obbligo di recupero del fosforo per gli impianti di trattamento delle acque reflue di taglia superiore a 20.000/50.000 AE. Diversi altri Stati, invece, non hanno ancora adottato prescrizioni normative specifiche, ma promuovono politiche volte ad incentivare il recupero del fosforo, principalmente dalle acque reflue, anche tramite accordi tra governo e imprese per sostenere iniziative strategiche di economia circolare.
2. Relativamente alle acque reflue urbane, le evidenze possono essere distinte sulla base della modalità di gestione, principalmente decentralizzata o centralizzata, degli scarichi domestici:
 - casi decentralizzati interessanti includono la gestione separata delle urine, caratterizzate da un'elevata concentrazione di nutrienti (ma anche di contaminanti emergenti come i residui di farmaci) e da una ridotta presenza di agenti patogeni, dalle feci, utilizzabili come ammendanti del terreno dopo trattamenti di compostaggio. I potenziali di recupero sono molto elevati, poiché tali flussi non vengono diluiti dalle acque reflue provenienti dalle altre attività umane e/o da acque di pioggia nel caso di fognature miste. Tale soluzione tuttavia comporta è applicabile solo in determinati complessi urbani dove la separazione delle urine è più facilmente praticabile (e.g. centri direzionali e commerciali, aeroporti, nuovi centri residenziali);
 - la gestione centralizzata del trattamento delle acque reflue urbane permette, invece, altri tipi di recupero meno efficienti, perché operano su flussi più diluiti, da valutarsi caso per caso, ovvero depuratore per depuratore;
3. Alcuni fornitori di tecnologie di recupero offrono anche il servizio di ritiro e riutilizzo/commercializzazione dei prodotti recuperati, in modo tale da rendere meno rischioso e sostenibile il business circolare. I prodotti recuperati sono solitamente certificati, oltre che ben identificabili e tracciabili, per assicurare il rispetto dei regolamenti nazionali ed europei e il soddisfacimento dei requisiti di qualità. La brandizzazione assicura il valore commerciale dei prodotti nel mercato economico, garantendone la stabilità del potere di vendita in mercati più o meno di nicchia. In altri casi, invece, alcuni gestori del servizio di

depurazione hanno siglato accordi specifici con aziende industriali per la vendita del fosforo recuperato negli impianti come materia prima seconda da riutilizzare nel ciclo produttivo industriale, garantendo così una destinazione finale sicura a lungo termine.

4. Il trattamento combinato delle acque reflue e dei rifiuti organici consente di massimizzare il recupero del fosforo e di integrarlo con gli aspetti di produzione energetica.
5. Il settore agricolo in Italia e in Europa è caratterizzato, in alcune aree, da un elevato numero di piccole attività, cosa che incide negativamente sulle economie di scala, limitando anche i potenziali di recupero. In alcuni dei casi precedentemente riportati e discussi, gli agricoltori di Paesi, quali Italia e Francia, si sono riuniti in cooperative per costituire poli di trattamento dei reflui prodotti dalle loro attività, come nel caso di Wipptal GmbH, Cooperl e Geotexia.
6. Sebbene il settore agroalimentare e le acque reflue siano fonti considerevoli per il recupero dei nutrienti dai reflui e dai sottoprodotti, con l'avanzare del progresso tecnologico anche altre attività industriali possono costituire potenziali opportunità, per ora secondarie, per il recupero del fosforo. Soluzioni innovative, ma non sempre pienamente validate, consolidate o diffuse, possono essere applicate per il recupero del fosforo dai flussi secondari di attività industriali, quali il settore di produzione dei materiali antincendio, l'industria cartiera e le attività estrattive. In alcuni casi aziende operanti in settori diversi hanno stipulato accordi in ottica di simbiosi industriale, per utilizzare gli scarti di produzione di un'industria come materia prima per un'altra attività.
7. L'utilizzo di fonti alternative di Magnesio per la precipitazione di struvite può favorire la diffusione delle tecnologie di recupero del fosforo, rendendo tali applicazioni ulteriormente sostenibili, sia da un punto di vista ambientale che economico.
8. Un approccio innovativo per la gestione del fosforo è costituito dall'utilizzo di pratiche agricole per minimizzare le dispersioni nel terreno e nelle acque, attraverso strumenti di monitoraggio e tecniche di distribuzione più efficienti o per massimizzare l'assorbimento da parte delle colture tramite l'applicazione sul terreno di enzimi e funghi.
9. A fine 2019 non risultavano in essere meccanismi nazionali, legislativi e/o regolatori, specifici di incentivazione per il recupero e riutilizzo del fosforo. D'altra parte nuove bozze legislative per la gestione dei fanghi di depurazione o nuovi metodi tariffari potrebbero segnare, già dal 2020, un importante punto di svolta, in ottica di sostenibilità ed economia circolare.

10. Conclusioni finali degli esempi di casi di gestione e recupero del fosforo da fonti non convenzionali

Dall'analisi dei casi di gestione e recupero del fosforo da fonti non convenzionali emerge che sono oggi disponibili diverse tecnologie ed esperienze che dimostrano che il recupero del fosforo da fonti non convenzionali sia possibile.

Sfortunatamente, le quantità di fosforo "riciclate" sono ancora modeste e di difficile quantificazione se si escludono le pratiche di spandimento fanghi e i reflui zootecnici.

Le matrici che stanno riscuotendo il maggiore interesse per il recupero del fosforo sono costituite da fanghi e scarti agroalimentari.

Nonostante lo spandimento di fanghi e di reflui zootecnici su terreni agricoli costituisca una frazione importante del possibile recupero del fosforo, la quantità di nutriente che è disponibile all'assimilazione da parte delle piante a seguito di tali pratiche è piuttosto modesta. Questo causa un accumulo di fosforo nel suolo determinando una perdita della disponibilità della risorsa, e contribuisce ad incrementare i rischi dei fenomeni di eutrofizzazione delle acque interne. L'applicazione di tecnologie di gestione del fosforo in ambito agricolo sembrano quindi indispensabili per la corretta salvaguardia delle risorse. La salvaguardia dell'ambiente è infatti la principale attenzione da parte della EIPPCB (organo preposto a livello europeo alla definizione delle buone pratiche disponibili, BAT) nella Decisione di Esecuzione (UE) 2017/302 della Commissione del 15 febbraio 2017 che stabilisce le conclusioni sulle BAT concernenti l'allevamento intensivo di pollame o di suini. In queste, infatti, si raccomanda di verificare il contenuto di fosforo che viene immesso sul terreno (almeno concernenti l'allevamento intensivo di pollame e suini) e, nel caso, prevederne una sua eventuale rimozione per ridurre i carichi.

Le analisi dei documenti prodotti dall'EIPPCB evidenzia, nonostante la numerosità a livello internazionale di esperienze di recupero del fosforo, la carenza di tecnologie che al momento possano essere definite buone pratiche.

Concludendo, le BAT al momento prodotte dall'EIPPCB fanno riferimento alla rimozione del fosforo dalle acque reflue e dai rifiuti in previsione del contenimento dell'inquinamento. Le tecnologie suggerite per la rimozione del fosforo, diverse per settore industriale, fanno principalmente riferimento alla precipitazione; la rimozione biologica del fosforo (intensificata) viene contemplata nella Decisione di esecuzione UE 2019/2031 per le industrie degli alimenti, delle bevande e del latte. La rimozione del fosforo però non assicura la possibilità del suo recupero se questo non è separato con sufficiente purezza. Allo stesso tempo, BAT sono prodotte per il contenimento dell'inquinamento (tra l'altro) dal fosforo concernenti l'allevamento intensivo di pollame o di suini.

L'unica BAT al momento disponibile dall'EIPPCB che faccia esplicitamente riferimento al recupero di P si riferisce alla precipitazione come struvite nelle industrie degli alimenti, delle bevande e del latte (Decisione di esecuzione UE 2019/2031 del 12 novembre 2019 che stabilisce le conclusioni sulle migliori tecniche disponibili (BAT) per le industrie degli alimenti, delle bevande e del latte).

I casi reali, casi studio e progetti descritti nel presente documento costituiscono un primo lavoro di inquadramento di quanto applicato o in fase di studio a livello nazionale ed internazionale per migliorare la gestione del fosforo. Il presente documento è pertanto da considerarsi come un "open file" soggetto a modifiche e integrazioni derivanti da eventuali approfondimenti successivi e da ulteriori studi da parte di questo o altri gruppi di lavoro.

E' dunque necessario sottolineare che i lavori della PIF non si devono ritenere conclusi e che il presente lavoro non può costituire lo strumento tecnico attraverso il quale definire criteri di riconoscimento per incentivi a favore di una tecnologia e a discapito di un'altra

Altresì, le tecnologie recensite/intercettate e descritte nel presente rapporto (e dalla PIF in generale) non sono state esaminate in termini di effettiva rispondenza ai criteri stabiliti dalle direttive 1996/61/CE, 2008/61/CE e 2010/75/CE recepite con Dlgs n 46 del 4 Marzo 2014. Pertanto il fatto che una specifica tecnologia ed impianto siano stati inclusi nella reportistica della PIF non costituisce alcun titolo abilitativo e/o premiante per favorire l'autorizzazione degli impianti da parte delle autorità competenti (Regioni, Provincie, Comuni).

Riferimenti bibliografici

- Adnan et al. *Sci. Rep.* 7: 161. 2017. Phosphate-Solubilizing Bacteria Nullify the Antagonistic Effect of Soil Calcification on Bioavailability of Phosphorus in Alkaline Soils.
- Alori et al. *Front Microbiol.* 2017; 8: 971. Microbial Phosphorus Solubilization and Its Potential for Use in Sustainable Agriculture.
- Andersen M.S., 2016. Animal feed mineral phosphorus tax in Denmark.
- Arif et al. in M. Naeem et al. (eds.), *Essential Plant Nutrients*, Chapter 21, Improving Plant Phosphorus (P) Acquisition by Phosphate-Solubilizing Bacteria. 2017.
- Azziz G., Bajsa N., Haghjou T., Taulé C., Valverde A., Igual J., et al. (2012). Abundance, diversity and prospecting of culturable phosphate solubilizing bacteria on soils under crop–pasture rotations in a no-tillage regime in Uruguay. *Appl. Soil Ecol.* 61 320–326. 10.1016/j.apsoil.2011.10.004
- Babalola O. O., Glick B. R., 2012a. Indigenous African agriculture and plant associated microbes: current practice and future transgenic prospects. *Sci. Res. Essays* 7 2431–2439 Kang J., Amoozegar A., Hesterberg D., Osmond D. L. (2011). Phosphorus leaching in a sandy soil as affected by organic and incomposted cattle manure. *Geoderma* 161 194–201. 10.1016/j.geoderma.2010.12.019
- Bhattacharyya P. N., Jha D. K., 2012. Plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR): emergence in agriculture. *World J. Microbiol. Biotechnol.* 28 1327–1350. 10.1007/s11274-011-0979-9
- Boesch D.F., R.B. Brinsfield, R.E. Magnien (2001). Chesapeake Bay Eutrophication: Scientific understanding, Ecosystem Restoration, and Challenges for Agriculture. *J. Environ. Qual.*, 30, 303–320.
- Bisschops I. et al., 2019. Integrated nutrient recovery from source-separated domestic wastewaters for application as fertilisers. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 40:7–13.
- Borda T., Celi L., Zavattaro L., Sacco D., Barberis E. (2011). Effect of agronomic management on risk of suspended solids and phosphorous losses from soil to water. *J. Soils Sediments*, 11, 440-451.
- Buckwell, A. Nadeu, E. 2016. Nutrient Recovery and Reuse (NRR) in European agriculture. A review of the issues, opportunities, and actions. RISE Foundation, Brussels.
- Calle-Castaneda S. M., Marquez-Godoy M. A., Hernandez-Ortiz J. P. Solubilization of phosphorus from phosphate rocks with *Acidithiobacillus thiooxidans* following a growing-then-recovery process. *World Journal of Microbiology and Biotechnology* (2018) 34:17. <https://doi.org/10.1007/s11274-017-2390-7>.
- Canziani R., Di Cosmo R., 2018. Stato dell'arte e potenzialità delle tecnologie di recupero del fosforo dai fanghi di depurazione, *Ingegneria dell'Ambiente* Vol. 5 n. 3.
- CE, 2013. Commissione Europea. COMUNICAZIONE DELLA COMMISSIONE AL PARLAMENTO EUROPEO, AL CONSIGLIO, AL COMITATO ECONOMICO E SOCIALE EUROPEO E AL COMITATO DELLE REGIONI - Comunicazione consultiva sull'uso sostenibile del fosforo, 8.7.2013.
- Chave P. (2001) *The EU Water Framework Directive: An Introduction*. IWA Publishing
- Chojnacka and Saeid, 2019. Innovative Bio-Products for Agriculture: Innovative Phosphorus Bio-Fertilizers. *Agriculture Issues and Policies*. ISBN: 978-1-53614-779-7
- Cohen Y. et al., 2018. Presentazione Ash2Phos: clean commercial P products from sludge ash. ENE3.
- Collivignarelli M.C. et al., *Legislation for the Reuse of Biosolids on Agricultural Land in Europe: Overview*, MDPI 2019.
- Commissione Europea, 2015. L'anello mancante - Piano d'azione dell'Unione europea per l'economia circolare.
- Comunicazione consultiva sull'uso sostenibile del fosforo, Bruxelles, 8/7/2013.
- Correll D.L. (1998). The role of phosphorous in the eutrophication of receiving waters: a review. *J. Environ. Qual.*, 27, 261-266.
- Cucarella V. et al., Effect of Polonite used for phosphorus removal from wastewater on soil properties and fertility of a mountain meadow, *Environmental Pollution* 157 2147–2152, 2009.
- D.Lgs. 27 gennaio 1992, n. 99 Attuazione della direttiva 86/278/CEE concernente la protezione dell'ambiente, in particolare del suolo, nell'utilizzazione dei fanghi di depurazione in agricoltura, G.U. n.38 del 15 Febbraio 1992.
- D.M. 25 febbraio 2016. Criteri e norme tecniche generali per la disciplina regionale dell'utilizzazione agronomica degli effluenti di allevamento e delle acque reflue, nonché per la produzione e l'utilizzazione agronomica del digestato. *Gazzetta Ufficiale* n. 90, 18 aprile 2016.

- De Clercq L. et al., 2015. Legal framework of recovered phosphorus (struvite) as fertiliser in North-Western Europe. BIOREFINE – WP5 – A19 – P1 – D.
- Decreto Legislativo 29 aprile 2010, n. 75. Supplemento ordinario alla “Gazzetta Ufficiale”, n. 121 del 26 maggio 2010.
- Decreto Legislativo 3 dicembre 2010, n. 205. Disposizioni di attuazione della direttiva 2008/98/CE del Parlamento europeo e del Consiglio del 19 novembre 2008 relativa ai rifiuti e che abroga alcune direttive. G.U. n. 288 del 10 dicembre 2010.
- Desmidt E. et al., 2015. Global Phosphorus Scarcity and Full-Scale P-Recovery Techniques: A Review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 45:336–384.
- Desmidt et al., Global Phosphorus Scarcity and Full-Scale P-Recovery Techniques: A Review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 45:336–384, 2015.
- Direttiva (UE) 2018/851 del Parlamento europeo e del Consiglio del 30 maggio 2018 che modifica la direttiva 2008/98/CE relativa ai rifiuti, Gazzetta ufficiale dell’Unione europea L 150/109, 14.6.2018.
- Direttiva 2000/60/CE del Parlamento europeo e del Consiglio del 23 ottobre 2000 che istituisce un quadro per l’azione comunitaria in materia di acque, GU L 327 del 22.12.2000.
- Direttiva 2008/98/CE del Parlamento europeo e del Consiglio del 19 novembre 2008 relativa ai rifiuti e che abroga alcune direttive. Gazzetta ufficiale dell’Unione europea n. L 312/3 del 22-11-2008.
- Direttiva 86/278/CEE concernente la protezione dell’ambiente, in particolare del suolo, nell’utilizzazione dei fanghi di depurazione in agricoltura, Gazzetta ufficiale delle Comunità europee L 181 / 6, 4.7.1986.
- Direttiva 91/676/CEE del Consiglio, del 12 dicembre 1991, relativa alla protezione delle acque dell’inquinamento provocato dai nitrati provenienti da fonti agricole, Gazzetta ufficiale L 375 del 31/12/1991.
- Direttiva del Consiglio del 12 giugno 1986 concernente la protezione dell’ambiente, in particolare del suolo, nell’utilizzazione dei fanghi di depurazione in agricoltura. Gazzetta ufficiale delle Comunità europee Nr. L 181 / 6 del 4-7-86.
- Fatone F. e Guerrini A., Riutilizzo delle acque e servizi ecosistemici: un’analisi critica per una governance più sostenibile. Il Merito.org, 2017.
- Gupta M., Kiran S., Gulati A., Singh B., Tewari R. Isolation and identification of phosphate solubilizing bacteria able to enhance the growth and aloin-A biosynthesis of Aloe barbadensis Miller. *Microbiol. Res.* 2012;167:358–363. doi: 10.1016/j.micres.2012.02.004
- Hermann L., 2019. presentazione The European Sustainable Phosphorus Platform. Challenges – Framework – Circular Solutions.
- Huygens D, Saveyn HGM, Tonini D, Eder P, Delgado Sancho L, Technical proposals for selected newfertilising materials under the Fertilising Products Regulation (Regulation (EU) 2019/1009) - Process and quality criteria, and assessment of environmental and market impacts for precipitated phosphate salts & derivatives, thermal oxidation materials & derivatives and pyrolysis & gasification materials, EUR 29841 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2019, ISBN 978-92-76-09888-1, doi:10.2760/186684, JRC117856.
- Jeppesen E., B. Kronvang, M. Meerhoff, M. Søndergaard, K.M. Hansen, H. E. Andersen, T.L. Lauridsen, L. Liboriussen, M. Beklioglu, A. Özen, J.E. Olesen (2009). Climate Change Effects on Runoff, Catchment Phosphorus Loading and Lake Ecological State, and Potential Adaptations. *J. Environ. Qual.*, 38,1930–1941
- Kabbe C., 2016. Nutrient Recovery 2.0. *Water and Wastewater International*, Vol. 31.
- Kjerstadius H. et al., 2018. Full scale resource recovery from domestic wastewater in Europe. Abstract of poster presentation IWA World Water Congress and Exhibition.
- Langeveld C.P. et al., 2016. Phosphate recycling in mineral fertilizer production, 2. Kongress: Phosphor - Ein kritischer Rohstoff mit Zukunft.
- Legge 28 giugno 2019, n. 58. Conversione in legge, con modificazioni, del decreto-legge 30 aprile 2019, n. 34, recante misure urgenti di crescita economica e per la risoluzione di specifiche situazioni di crisi. Supplemento ordinario alla Gazzetta Ufficiale n. 151 del 29 giugno 2019.
- Nätörp et al., Phosphorus recovery in Europe - Results from the European P-REX project. P-REX documentation: <https://zenodo.org/record/242550#.Xd-OiOhKhPY>
- Qian Chen and Shanjiang Liu. Identification and Characterization of the Phosphate-Solubilizing Bacterium *Pantoea* sp. S32 in Reclamation Soil in Shanxi, China *Frontiers in Microbiology*, 2017, 10, doi: 10.3389/fmicb.2019.02171

- Regolamento (CE) n. 1069/2009 del Parlamento europeo e del Consiglio del 21 ottobre 2009 recante norme sanitarie relative ai sottoprodotti di origine animale e ai prodotti derivati non destinati al consumo umano e che abroga il regolamento (CE) n. 1774/2002 (regolamento sui sottoprodotti di origine animale). Gazzetta ufficiale dell'Unione europea L 300/1, 14.11.2009.
- Regolamento (CE) N. 1907/2006 del Parlamento europeo e del Consiglio del 18 dicembre 2006 concernente la registrazione, la valutazione, l'autorizzazione e la restrizione delle sostanze chimiche (REACH), che istituisce un'agenzia europea per le sostanze chimiche, che modifica la direttiva 1999/45/CE e che abroga il regolamento (CEE) n. 793/93 del Consiglio e il regolamento (CE) n. 1488/94 della Commissione, nonché la direttiva 76/769/CEE del Consiglio e le direttive della Commissione 91/155/CEE, 93/67/CEE, 93/105/CE e 2000/21/CE. Gazzetta ufficiale dell'Unione europea L 396 del 30 dicembre 2006.
- Regolamento (UE) 2019/1009 del Parlamento europeo e del Consiglio del 5 giugno 2019 che stabilisce norme relative alla messa a disposizione sul mercato di prodotti fertilizzanti dell'UE, che modifica i regolamenti (CE) n. 1069/2009 e (CE) n. 1107/2009 e che abroga il regolamento (CE) n. 2003/2003. Gazzetta ufficiale dell'Unione europea L 170/1, 25.6.2019.
- Rengel Z., Zhang F., 2011. Phosphorus sustains life. Springer
- REVAQ Certified Wastewater Treatment Plants in Sweden for Improved Quality of Recycled Digestate Nutrients, IEA Bioenergy Task 37, 2015.
- Saeid A., 2018. Phosphorus Microbial Solubilization as a Key for Phosphorus Recycling in Agriculture. 10.5772/intechopen.
- Saeid A., Labuda M., Chojnacka K., Górecki H. Valorization of bones to liquid phosphorus fertilizer by microbial solubilization. Waste Biomass Valoriz. 2014;5:265–272. doi: 10.1007/s12649-013-9238-7
- Saeid A, Prochownik E, Dobrowolska-Iwanek J. Phosphorus Solubilization by Bacillus Species. Molecules. 2018;23(11):2897. doi:10.3390/molecules23112897
- Sciarria T. P. et al, 2018. Nutrient recovery and energy production from digestate using microbial electrochemical technologies (METs). Journal of Cleaner Production 208-1022e1029.
- Sentenza n. 01229/2018 del Consiglio di Stato. 28/02/2018.
- Sharma S. B., Sayyed R. Z., Trivedi M. H., Gobi T. A., 2013. Phosphate solubilizing microbes: sustainable approach for managing phosphorus deficiency in agricultural soils. Springerplus 2 587–600. 10.1186/2193-1801-2-587
- Sims J.T., A.C. Edwards, O.F. Schoumans, R.R. Simard (2000). Integrating soil phosphorus testing into environmentally based agricultural management practices. J. Environ. Qual. 29, 60–71.
- Tak H. I., Ahmad F., Babalola O. O., Inam A., 2012. Growth, photosynthesis and yield of chickpea as influenced by urban wastewater and different levels of phosphorus. Int. J. Plant Res. 2 6–13. 10.5923/j.plant.20120202.02
- Thornton C., 2012. Large scale P recovery in the phosphorus industry – Experiences from practice. presentazione 3rd sustainable phosphorus summit.
- van Dijk K.C., Lesschen J.P., Oenema O., Sci Total Environ. 2016 Jan 15;542(Pt B):1078-93. doi: 10.1016/j.scitotenv.2015.08.048. Epub 2015 Oct 1. Phosphorus flows and balances of the European Union Member States.
- Weil R.R. and Brady N.C., 2017. The Nature and properties of soils, 15th Edition. Pearson
- Withers P.J. A. et al., 2015. Stewardship to tackle global phosphorus inefficiency: The case of Europe. Journal of the Human Environment.
- Wyciszkiwicz M., Saeid A., Chojnacka K., Górecki H. New generation of phosphate fertilizer from bones, produced by bacteria. Open Chem. 2015a;13:951–958. doi: 10.1515/chem-2015-0113
- Wyciszkiwicz M., Saeid A., Chojnacka K., Górecki H. Production of phosphate biofertilizers from bones by phosphate-solubilizing bacteria Bacillus megaterium. Open Chem. 2015b;13:1063–1070. doi: 10.1515/chem-2015-0123
- Wyciszkiwicz M., Saeid A., Dobrowolska-Iwanek J., Chojnacka K. Utilization of microorganisms in the solubilization of low-quality phosphorus raw material. Ecol. Eng. 2016;89:109–113. doi: 10.1016/j.ecoleng.2016.01.065.
- Wyciszkiwicz M., Saeid A., Samoraj M., Chojnacka K. Solid-state solubilization of bones by B. megaterium in spent mushroom substrate as a medium for a phosphate enriched substrate. J. Chem. Technol. Biotechnol. 2017a;92:1397–1405. doi: 10.1002/jctb.5135
- Wyciszkiwicz M., Saeid A., Chojnacka K. In situ solubilization of phosphorus bearing raw materials by Bacillus megaterium. Eng. Life Sci. 2017b;17:749–758. doi: 10.1002/elsc.201600191

- Wyciszekiewicz M., Saeid A., Malinowski P., Chojnacka K. Valorization of phosphorus secondary raw materials by *Acidithiobacillus ferrooxidans*. *Molecules*. 2017c;22:473. doi: 10.3390/molecules22030473
- Zapata F, Roy RN (2004) Use of phosphate rocks for sustainable agriculture, fertilizer and plant nutrition. FAO Land and Water Development Division and The International Atomic Energy Agency, Rome
- Zeeman G. and Kujawa-Roeleveld K., 2011. Resource recovery from source separated domestic waste(water) streams; full scale results. *Water Science & Technology*.
- Zhu F., Qu L., Hong X., Sun X., 2011. Isolation and characterization of a phosphate solubilizing halophilic bacterium *Kushneria* sp. YCWA18 from Daqiao Saltern on the coast of yellow sea of China. *Evid. Based Complement. Alternat. Med.* 2011:615032 10.1155/2011/615032
- Zhu H. J., Sun L. F., Zhang Y. F., Zhang X. L., Qiao J. J., 2012. Conversion of spent mushroom substrate to biofertilizer using a stress-tolerant phosphate-solubilizing *Pichia farinose* FL7. *Bioresour. Technol.* 11 410–416. 10.1016/j.biortech.2012.02.042

Sitografia

<http://easymining.se/>
<https://ec.europa.eu/environment/waste/sludge/>
<http://efpra.eu/>
<http://www.eip-water.eu/ARREAU>
<http://gwda.pl/pl/home#s3>
<http://phosave.com/>
<http://prophoschemicals.com/>
<http://terrapiu.agribiositaliana.it/prodotto/biophos/>
<http://users.unimi.it/ricicla/>
<http://www.biocover.dk/>
<http://www.biogas-wipptal.it/en/service.html>
<http://www.circulary.eu/project/north-sea-resources-roundabout/>
<http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:720771/FULLTEXT01.pdf>
<http://www.ecofiltration.se/en/>
<http://www.ecofiltration.se/wp/wp-content/uploads/2016/09/product-sheet-Polonite-v2-eng.pdf>
<http://www.hydroitalia.com/flex/cm/pages/ServeAttachment.php/L/IT/D/7%252Fb%252F7%252FD.e70e1078bb94c9fcb505/P/BLOB%3AID%3D114/E/pdf>
<https://incover-project.eu/>
<http://www.micosat.it/>
<http://www.nuresys.be/>
<http://www.nutrientplatform.org/succesverhalen>
<http://www.risefoundation.eu/projects/nrr>
<http://www.smart-plant.eu/ENE3>
<http://www.tkiwatertechnologie.nl/project/sustainable-airport-cities/>
<https://agrisystem.net/public/uploads/2018/10/p-force-agrisystem-scheda-prodotto.pdf>
<https://amsterdamsmartcity.com/projects/circular-innovation-program-dutch>
<https://aquaminerals.com/struvite/>
<https://biopiattaformalab.it/>
<https://cordis.europa.eu/docs/results/308/308645/final1-p-rex-final-report-final.pdf>
<https://crystalgreen.com/>
<https://ec.europa.eu/eip/agriculture/en/focus-groups/nutrient-recycling>
<https://ec.europa.eu/eip/agriculture/en/news/inspirational-ideas-agro-industrial-waste-put-good>
https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Agri-environmental_indicator_-_mineral_fertiliser_consumption
https://ec.europa.eu/info/food-farming-fisheries/key-policies/common-agricultural-policy_en
https://ec.europa.eu/research/participants/data/ref/h2020/wp/2018-2020/main/h2020-wp1820-food_en.pdf
<https://echa.europa.eu/it/regulations/reach/understanding-reach>
<https://edepot.wur.nl/118873>
<https://eu100ngo.net/partners-experts/>
<https://ex-tax.com/#home>
<https://geotexia.wordpress.com/>
<https://hollandcircularhotspot.nl/en/case/fosvaatje/>
<https://italpollina.com/IT/>
<https://kalfos.co.uk/>
<https://neorisorse.net/impianti/>
https://phosphorusplatform.eu/images/download/Meeting-organic/08-Daly-Ostara-ESPP-IFOAM-12_12_17.pdf
<https://rotterdamcirculair.nl/en/>
<https://run4life-project.eu/>
<https://soilfood.fi/in-english/>
<https://systemicproject.eu/plants/#tab-id-1>
https://www.academia.edu/24217529/I_ricercatori_si_attivano_per_salvare_le_acque?auto=download
<https://www.agv.nl/onze-taken/klimaatproblemen-aanpakken/struviet-uit-urine/>

<https://www.arera.it/it/index.htm>
<https://www.biolan.com/>
https://www.biorefine.eu/sites/default/files/publication-uploads/biorefine_legal_framework_of_recovered_phosphorus_struvite_as_fertiliser_in_north-western_europe.pdf
<https://www.bmcmoerdijk.nl/en/process.htm>
<https://www.bwb.de/de/6946.php>
https://www.cambi.com/media/1757/oslo-ege_-2019.pdf
<https://www.circle-economy.com/wp-content/uploads/2018/10/amsterdam-evaluation-EN-20180328.pdf>
<https://www.cooperl.com/en/>
https://www.dsm.com/markets/anh/en_US/products/products-feedenzymes/products-feed-phytases.html
<https://www.duurzaamoppodium.nl/water/de-nieuwe-stroming/>
<https://www.dvoinc.com/case-studies/Storms-Hog-Waste.pdf>
<https://www.ecophos.com/>
<https://www.eip-water.eu/sites/default/files/2017-12-19%20ARREAU%20review%20best%20practices.pdf>
<https://www.fertikal.be/en/>
<https://www.fibrofos.co.uk/>
<https://www.fieldmanager.nl/upload/artikelen/fm114fosfaat.pdf>
<https://www.green-alliance.org.uk/NSRR.php#accept>
<https://www.iclfertilizers.com/>
<https://www.iwarr2019.org/>
<https://www.kappala.se/>
<https://www.metsagroup.com/en/Pages/default.aspx>
<https://www.nutri2cycle.eu/>
<https://www.nutrientplatform.org/succesverhalen/waternet/>
<https://www.oslo.kommune.no/english/waste-and-recycling/romerike-biogas-plant/#gref>
<https://www.phosphorusplatform.eu/>
<https://www.piattaformaitalianafosforo.it/>
<https://www.saniwijzer.nl/projecten/fosfaatje/detail=87>
<https://www.saria.co.uk/index.html>
<https://www.suezwaterhandbook.com/degremont-R-technologies/sludge-treatment/recovery/recycle-phosphorus-from-effluent-to-produce-a-valuable-fertilizer-Phosphogreen>
<https://www.susana.org/en/>
<https://www.timacagro.com/>
<https://www.tkiwatertechnologie.nl/project/sustainable-airport-cities/>
<https://www.tuttoambiente.it/news>
<https://www.veolia.com/en>
<https://www.waternet.nl/en/>
<https://www.yara.com/>
https://www.yara.com/siteassets/sustainability/position-papers/247755_pp_circulareconomy.pdf/