

Allegato A

-

**Matrice di valutazione
multicriterio delle
tecnologie di
risanamento dei terreni**

Tecnologie ex-situ

TECNOLOGIE EX-SITU	ON-SITE/OFF-SITE	BREVE DESCRIZIONE TECNOLOGIA	GRADO DI MATURITA' (COMMERCIALE/ SCALA PILOTA/ LABORATORIO/ TEORICO)	EFFICACIA	PFAA CATENA LUNGA	PFAA CATENA CORTA	PRECURSORI	ZONA INSATURA	ZONA SATURA	FINE/BASSA PERMEABILITA'	GROSSOLANO/ ALTA PERMEABILITA'	COSTI	TEMPI a=anni m=mesi s=settimane	RESIDUI S=solidi L=liquidi G=gassosi	ENERGIA/CO ₂ S=scavo T=trasporto C=combustibile E=elettricità	ALTRO/COMMENTI
Smaltimento in discarica	off-site	Escavazione e conferimento in discariche adatte per lo smaltimento	grande difficoltà nel trovare una discarica che accetti rifiuti con PFAS	non distrugge inquinanti, li sposta					- problema percolato durante trasporto			300-500 CHF/t	s	S+L	S+T	in futuro sempre meno utilizzabile
Incenerimento ad alta temperatura > 1100 °C	off-site	Escavazione e conferimento a impianti per l'incenerimento di rifiuti pericolosi dove il terreno è trattato in forno rotante ad alta temperatura + camera di post-combustione dei fumi e i PFAS completamente mineralizzati (distrutti). L'impianto ha un adeguato sistema di trattamento fumi	pochi impianti, tutti all'estero (Germania, Francia)						- problema percolato durante trasporto - aumento consumi combustibile per evaporazione acqua			400 CHF/t	s	S+L+G	S+T+C	impianti allo stato dell'arte, una delle poche tecnologie che distrugge i contaminanti
Desorbimento termico (ex-situ) 400-950 °C	on-site/off-site	Invece di incenerirlo, il terreno viene riscaldato in appositi reattori (on o off-site) a temperature inferiori (400-950 °C) in assenza di ossigeno, in modo tale da desorbire e trasferire i PFAS in fase gas e poi ossidare tali gas a temperature elevate (>1100°C) in un post-combustore, distruggendo i PFAS. Il suolo trattato può teoricamente essere riciclato	pochi test pilota, pochi o nessun impianto commerciale	studi contrastanti su T per desorbimento completo	alte T per desorbili		?		- se off-site: problema percolato durante trasporto - aumento consumi combustibile per evaporazione acqua			500? CHF/t	s	L+G (terreno riutilizzabile)	S(+T)+C	se disponibili impianti mobili on site, OK per piccole quantità zone sorgenti
Cementificio additivo nella produzione di cemento	off-site	Il terreno contaminato è usato come additivo nella miscela di farina grezza che verrà cotta nel forno rotante per la produzione del clinker (e successivamente del cemento). I PFAS sono distrutti alle temperature del forno (ca. 1400°C) e/o inglobati nella matrice minerale del clinker	metodo già usato per altri contaminanti, ma non ancora testato per i PFAS ma teoricamente possibile con modifiche impiantistiche	- non provata - necessarie modifiche impiantistiche			?		- problema percolato durante trasporto - aumento consumi combustibile per evaporazione acqua		? Pre-macinazione	350-500 CHF/t ?	s	G	S+T(+C)	potenzialmente interessante al posto di incenerimento (specialmente perché cementifici sono presenti in Svizzera)
Pump&Treat (P&T)	on-site/off-site	Classico metodo di contenimento idraulico, per cui l'acqua di falda viene pompata in superficie e qui trattata con diverse tecnologie e poi in genere scaricata in fognatura	- commerciale con trattamento su GAC/nessuna scambio ionico; - altre tecnologie di trattamento sono in fase di sperimentazione più o meno avanzata				?			?		4-5 CHF/m ³ acqua falda trattata	a	L	E	OK per confinamento idraulico, costoso su lungo periodo
Soil Washing Impianto di lavaggio terre	on-site/off-site	Lavaggio del terreno in impianto on/off-site con acqua (+ eventuali additivi) per desorbire i contaminanti dalla frazione grossolana (che può essere riciclata) e portarli in soluzione e/o sulla frazione fine (che andrà a incenerimento)	impianti per PFAS in Svizzera aperti recentemente (in Ticino sarà operativo dal 2024)	- 80-90%+ - meglio con basso f _{oc} e bassa % fine	desorbono più difficilmente	sono più problematici da trattare dalle acque di lavaggio	?		se off-site: problema percolato durante il trasporto	applicabile se fini < 20-35%		300-400 CHF/t	m/a	S(+L) - recupero ghiaia/sabbia per ad es. CLS - fanghi a incenerimento	S+E(+T)	- OK per economia circolare e ridurre costi/invi a incenerimento - predisporre test su trattamento dei composti a catena corta dalle acque
Soil Flushing Lisciviazione ex-situ	on-site/off-site	Il terreno scavato viene disposto su una vasta area in una struttura speciale sigillata e si lascia che l'eluzione dei PFAS avvenga grazie alle precipitazioni atmosferiche naturali. Il percolato deve essere raccolto e trattato	teorico	? Tempi lunghissimi	?	?	?					?	a	L	S(+T)	improbabile utilizzo
Degradazione mediante enzimi funghi	on-site/off-site	Alcuni funghi formano enzimi lignolitici (che degradano il legno) in condizioni aerobiche, che avviano la degradazione delle sostanze attraverso la formazione di radicali non specifici e dovrebbero quindi essere in grado di degradare i PFAS	lab	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	studi in corso, difficile arrivare a completa distruzione
Processo Ball-Mill (mulino a sfere)	on-site/off-site	Il suolo viene aggiunto in un mulino a sfere nel quale si verificano un gran numero di collisioni ad alta velocità delle sfere d'acciaio indeformabili con il terreno deformabile da trattare. La deformazione della fase solida porta a un aumento della temperatura a breve termine che, insieme alla eventuale aggiunta di agenti ausiliari che portano alla produzione di radicali, possono portare a una degradazione termica/chimica dei PFAS	lab, improbabile sviluppo futuro	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	E?	volumi orari trattati molto ridotti

Tecnologie in-situ

TECNOLOGIE IN-SITU		BREVE DESCRIZIONE TECNOLOGIA	GRADO DI MATURITA' (COMMERCIALE/SCALA PILOTA/LABORATORIO/TEORICO)	EFFICACIA	PFAS CATENA LUNGA	PFAS CATENA CORTA	PRECURSORI	ZONA INSATURA	ZONA SATURA	FINEBASA PERMEABILITA'	GROESCLONALITA PERMEABILITA'	COSTI	TEMPI ANZICI MINIMI (settimane)	RESIDUI Solidi/Liquidi/Oggetti	ENERGIA/CO ₂ su LCA	ALTRO/COMMENTI		
IMMOBILIZZAZIONE IN-SITU (Stabilizzazione e/o Solidificazione)	Carbone attivo colloidale (CAC)	Carbone attivo colloidale (CAC) "liquid" da miscelare al terreno insaturo in zona sorgente (gli costi PFAS), eventualmente assieme a PAC, per immobilizzare gli inquinanti ed eliminare il rischio di lisciviazione, ossia di trasferimento in falda. SourceStop può essere anche applicato a spruzzo sul fondo dello scavo del terreno della zona sorgente per creare una barriera orizzontale adsorbente di CAC.	3 siti pilota	>99% nella riduzione della lisciviazione				SourceStop (+ PAC) miscelati in zona sorgente (in barriere orizzontale e spruzzo sul fondo nella zona sorgente prima di riposizionare il terreno)	in falda OK solo per iniezioni in zone soggette in falda/fangia capillare (non ancora provato su campo)	difficile miscelazione		300-500 CHF/1?	siti	/		blocca ma non rimuove la contaminazione		
	Carbone attivo colloidale (CAC)	Carbone attivo colloidale (CAC) "liquid" da iniettare in scavo come barriera permeabile (PB) in situ, formando un "libro" di CAC che elimini il propagarsi del plume di PFAS a valle, adsorbendo i PFAS in situ all'interno della PB.	commerciale, applicato su 41 siti	90-99% attenuazione del plume		effetto cronotopografico		PlumeStop ha eccessiva mobilità e trasporto lungo la verticale	iniettato come PB	difficile dispersione	difficoltà se velocità falda troppo elevata	-2 CHF/m ³ acqua sotterranea 10x-15x CHF/metro di barriera	siti	/	emissioni di CO ₂ 40-70 volte inferiori rispetto a P&T	blocca ma non rimuove la contaminazione. Da riepilare dopo alcuni anni (10 ⁺ ?)		
	Altre (argille modificate, resine, cemento...)																	
	Desorbimento termico (in-situ 300-400 °C)	Riscaldamento del suolo per conduzione termica (TCH) mediante pozzi termici (resistori) nel terreno per desorbire e volatilizzare i PFAS che saranno raccolti tramite un sistema di estrazione vapori (SVE) e adeguatamente trattati.	tecnologia consolidata, ma per i PFAS usati in pochi siti. Le T da raggiungere sono più elevate dei classici idrocarburi	>90% rimozione PFAS dal terreno	T maggiori per desorbire e volatilizzare		?	- maggior consumo di energia per vaporizzare acqua - maggior produzione di vapore da trattare in superficie - il continuo sovrappiombare delle acque di falda da molte abbassa le temperature		difficoltà SVE		energia elettrica - noleggio tecnologia (brevettata) - alta densità di riscaldatori necessaria	siti	G+SHL - deboli trattamenti vapori e condensati - GAC causato da incroste	CO ₂ da produzione di energia elettrica			
	Frazionamento della schiuma (Fo) (in-situ)	Pozzi speciali in situ con iniezione di aria compressa sul fondo che realizza sotto forma di bolle porta a "schiumare" i PFAS sensotivati, che vengono estratti dalla superficie del pozzo e trattati on-site, mentre la continua iniezione di aria crea una circolazione radiale dell'acqua da e verso i pozzi	- concettuale, esperimento in cabina in lab - un paio di aziende - la ricerca si sta concentrando sullo stesso principio ma applicato al trattamento delle acque everso i pozzi	- in lab: rimozione 90% PFQA/PPQS in soluzione - in situ: non provato. Probabile efficacia di modellazione ed efficienza ridotte (max ca. 90%)?	- non schiumano come quelli a catena lunga: efficienza anche dello 0% - sperimentazioni in corso su aggiunte additivi per aumentare l'efficacia su PFAS catena corta		?	Da provare: - efficacia della circolazione dell'acqua sotterranea (contorcimenti)? - raggio di influenza? - efficacia della testa di estrazione della schiuma e rimozione acqua purificata?	difficile circolazione acque		?	Storicamente un costo importante lo iniezione i pozzi speciali, dipende dal loro numero ovvero dal raggio di influenza	?	in laboratorio la tecnologia è in sviluppo molto rapida, vale la pena schiumare la maggior parte dei PFAS in tempi brevi	L/S (fanghi)	?	- non è mai stato applicato in situ - blocco della circolazione per precipitati delle forme ossidate di Fe e Mn, o microorganismi - parte delle valutazioni sul rapporto si riferiscono al processo di frazionamento della schiuma applicato al trattamento delle acque ex-situ (jumble come concetto)	
	Soil Flushing (lavaggio in-situ)	Iniezione intensiva del terreno insaturo per forzare l'eluizione dei PFAS e trasportarli in falda, da cui sono raccolti da un sistema di P&T che tratta l'acqua in superficie e ne reusa una parte per proseguire l'irrigazione del terreno, spesso addizionando solventi (es. etanolo)	lab: 1 studio (PFOS)	- da dimostrare in campo - in lab: 98% per PFOS con soluzione al 50% etanolo - possibile scarsa efficacia alle basse concentrazioni - eterogeneità dei suoli non possono creare percorsi preferenziali	alcquanto meno		?	- max 5 m - basso f _{oc}	riduzione mediante P&T (o P&B)	lunghi tempi di infiltrazione		presumibilmente contenuti, se si considera la quantità della aria parte neutralizzante, ma complessivamente elevati dato P&T	?	S (GAC) +L	P&T + GAC	potenzialmente interessante, si attendono applicazioni pilota		
	Fitorisanamento (fitoestrazione)	Fitorisanamento dei PFAS del terreno mediante specie vegetali che li bioaccumulano nella loro biomassa. Tali piante una volta raccolte vengono raccolte e smaltite (incenerimento).	sperimentale per i PFAS	bassi di accumulo troppo bassi	più facilmente assorbiti dalle piante terrestri		?				?	?	?	S (GAC) +L S (GAC) +L S (GAC) +L		ricerche di specie utili in corso		
	Smoldering (combustione in-situ)	Miscelazione di un combustibile (es. carbone attivo esausto) al terreno e successivo innescio di una reazione di combustione senza fiamma (smoldering) mediante apporto di ossigeno, con il combustibile fonte di calore auto-sostenuta e il fronte di combustione che si allarga lentamente a tutta la zona da trattare degradando termicamente i PFAS e producendo fumi da prelevare e trattare adeguatamente. Il medesimo processo si può applicare in reattori ex-situ	testa per NAPL, idrocarburi petrololi, ma per PFAS è lab/concettuale (esperimenti pilota ex situ positivi)	ok in lab, ma difficile su scala tecnica (trattamento fumi pericolosi)	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	recupero e trattamento fumi
	Biodegradazione microbica	Sfruttamento di microrganismi adatti alla biodegradazione dei PFAS, eventualmente assistendo la biodegradazione mediante apporto di O ₂ , substrati ecc.	possibile disponibilità in una decina d'anni?	ad ora nessuna mineralizzazione completa dei PFAS	degradati a PFAS a catena corta	non degradati oltre	degradati a PFAS persistenti	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	Probabile necessità di grande "assistenza" alla biodegradazione