

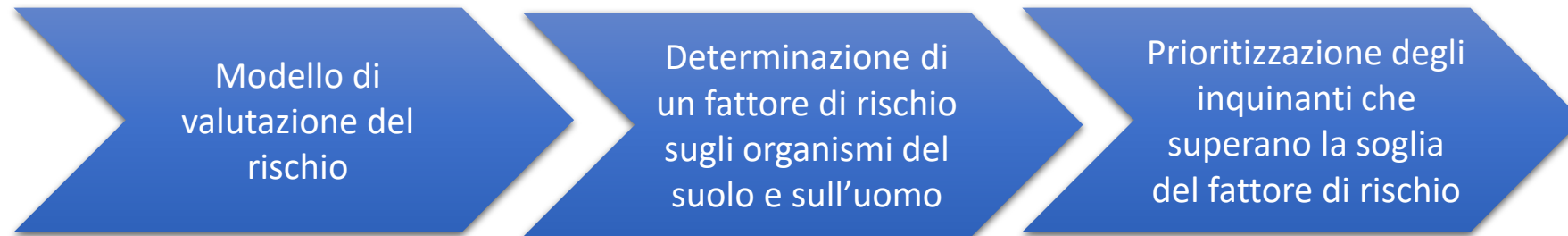
L'approccio modellistico nella definizione di un fattore di rischio per l'utilizzo di fanghi di depurazione su suoli agricoli

Filippo Robbiati (Progress S.r.l., Milano), Andrea Nicola Rossi (Progress S.r.l., Milano), Angelo Vittorio Berri (Consulente ambientale, Milano)

La necessità di uno studio specifico sui Modelli di Valutazione del Rischio

Una prima proposta di un modello di valutazione del rischio applicato ai fanghi di depurazione è stata formulata dal JRC, Centro Comune di Ricerca (Huygens D., García-Gutierrez P., Orveillon G., Schillaci C., Delre A., Orgiazzi A., Wojda P., Tonini D., Egle L., Jones A., Pistocchi A. & Lugato E, ***Screening risk assessment of organic pollutants and environmental impacts from sewage sludge management*** - Study to support policy development on the Sewage Sludge Directive (86/278/EEC), Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2022, doi:10.2760/541579, JRC129690).

Nel Rapporto citato sono stati presi in considerazione ben 1350 potenziali contaminanti dei fanghi di depurazione, per tutti questi composti è stata effettuata una valutazione preliminare, in base alla quale sono stati individuati i composti sui quali approfondire l'indagine mediante l'applicazione di un Modello di Valutazione del Rischio.



La necessità di uno studio specifico sui Modelli di Valutazione del Rischio

Tra tutti i composti considerati nel Rapporto, il JRC ne individua 29 prioritari, ovvero che potrebbero essere in grado di porre un rischio per la salute degli organismi del suolo o per la salute umana, questi composti possono essere classificati come segue:

- **i prioritari con RCR >> 1:**

1. Alcani policlorurati: (SCCPs e MCCPs)
2. Diossine/Furani e PCB DL
3. PFAS: (PFOA, PFHxS, PFNA e PFOS)
4. IPA: (BbFA, CHR, BaP, BaA)

- **i composti con RCR >1:**

1. Alchil fenoli: (4- nonilfenolo e 4 terzottilfenolo)
2. Esteri dell'Ac. Ftalico: (DEHP, DINP)

- **i composti con RCR <1**

Ritardanti di Fiamma, Policloronaftaleni, Composti organostannici e Polidimetil silossani

Il Modello utilizzato dal JRC

La valutazione dell'esposizione ambientale locale è stata effettuata sulla base di uno strumento sviluppato dall'**Associazione Europea per la Protezione delle Colture (ECPA)**, il quale è stato ulteriormente adattato e convalidato dal JRC.

Lo strumento per l'ambiente locale **LET, Local Environment Tool** viene menzionato nel documento di orientamento REACH R.16 per mettere a punto i modelli per la valutazione delle sostanze (EUSES), poiché questi non tengono conto dei rilasci intermittenti diretti nel suolo in una valutazione locale.

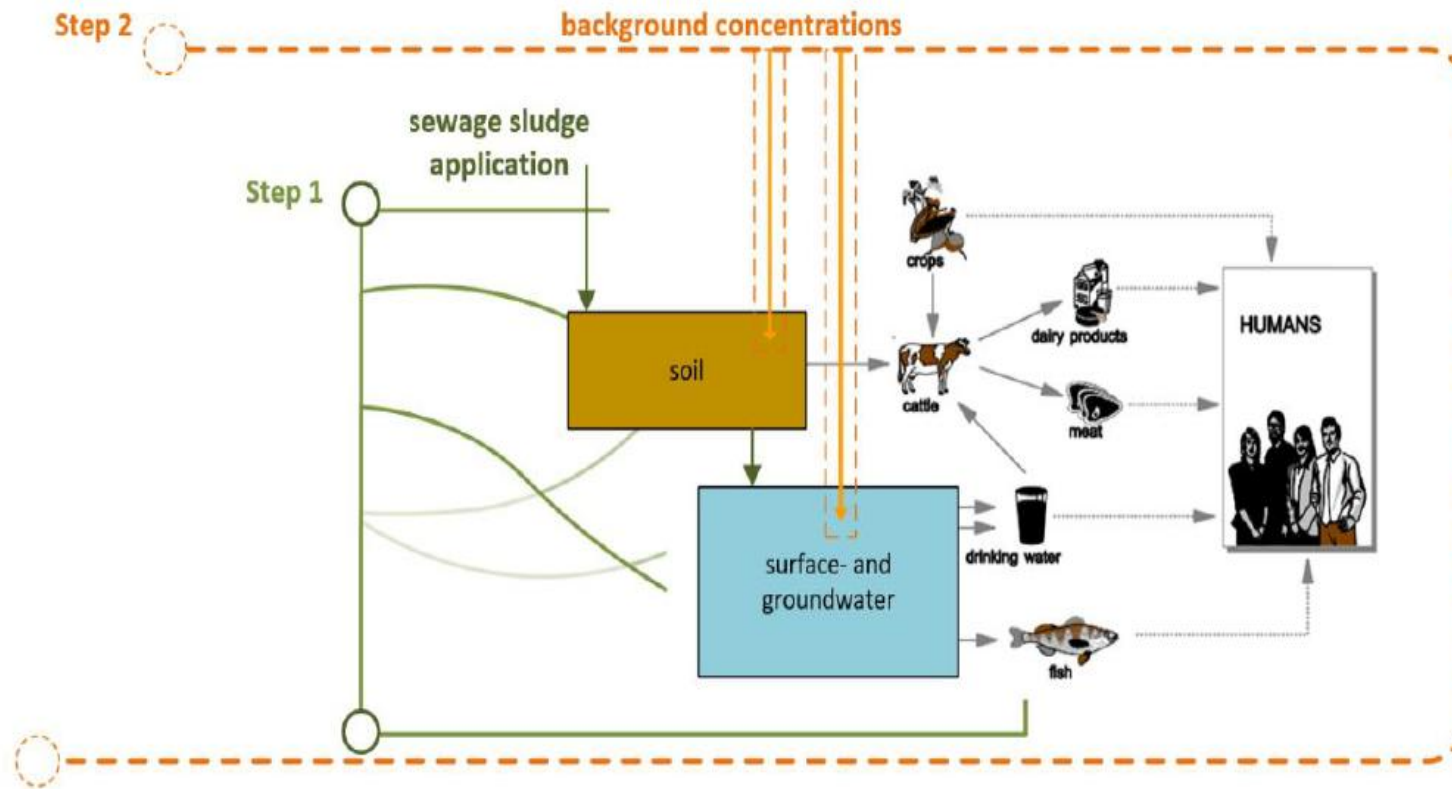
Espressione dei risultati

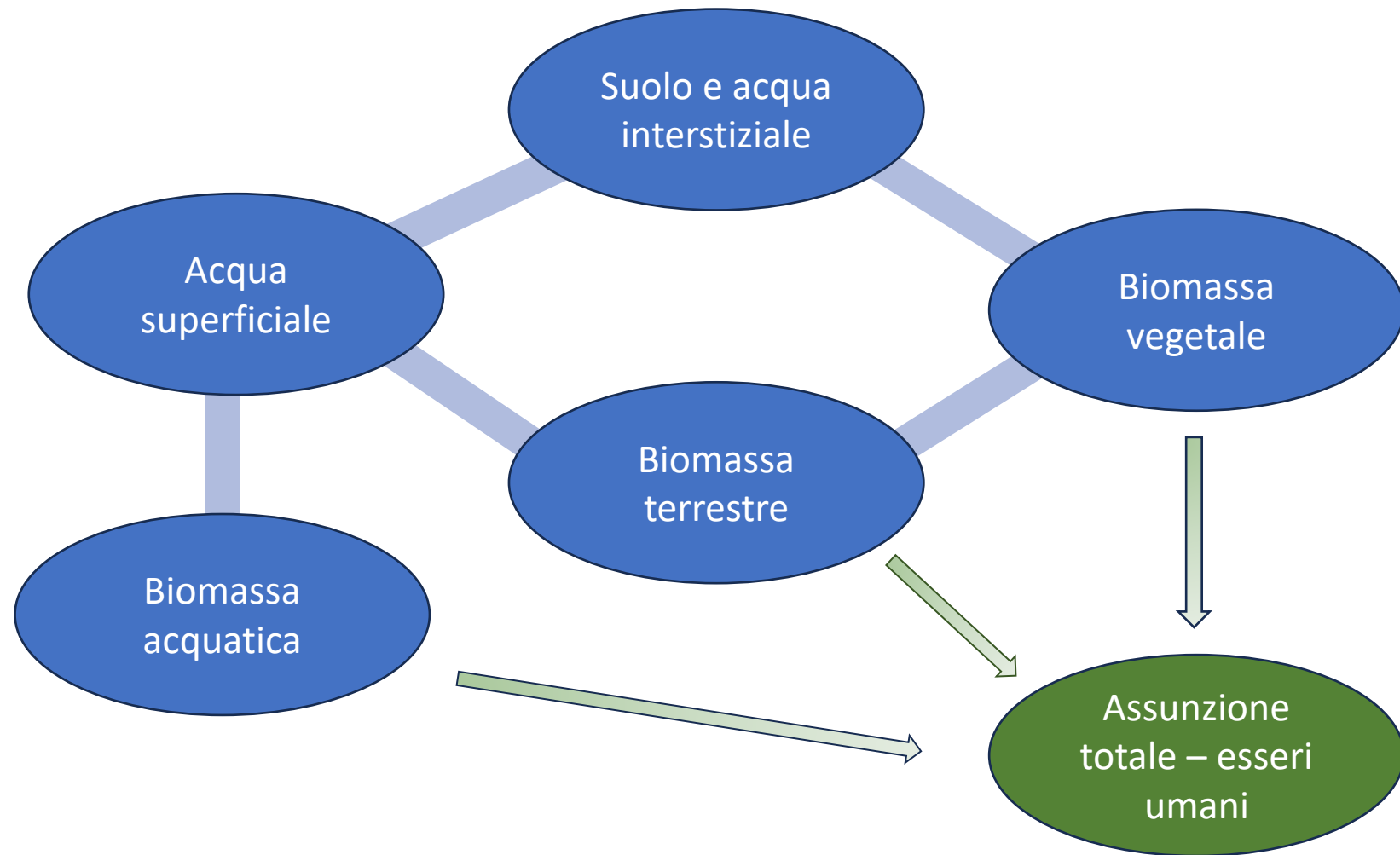
$$RCR_{soil} = \frac{PEC_{soil}}{PNEC_{soil}}$$

$$RCR_{human} = \frac{\left(\frac{TDI}{B_w}\right)}{SLHC}$$

In entrambi i casi il rapporto riflette il confronto tra il valore di concentrazione predetto dal modello e una soglia limite, $RCR > 1$, oltre la quale si potrebbero sviluppare effetti di tossicità.

Se il rapporto di caratterizzazione del rischio nello **Step 1** è > 1 si procede a integrare i calcoli con dati di letteratura, dove disponibili, e con concentrazioni ambientali di fondo. Questo passaggio costituisce il secondo step del modello **Step 2**. Nello Step 1 inoltre il RCR è calcolato sulla base di uno scenario di medio termine (10 anni di applicazione), mentre nello step 2 si considerano anche uno scenario a breve (1 anno) e lungo termine (100 anni).





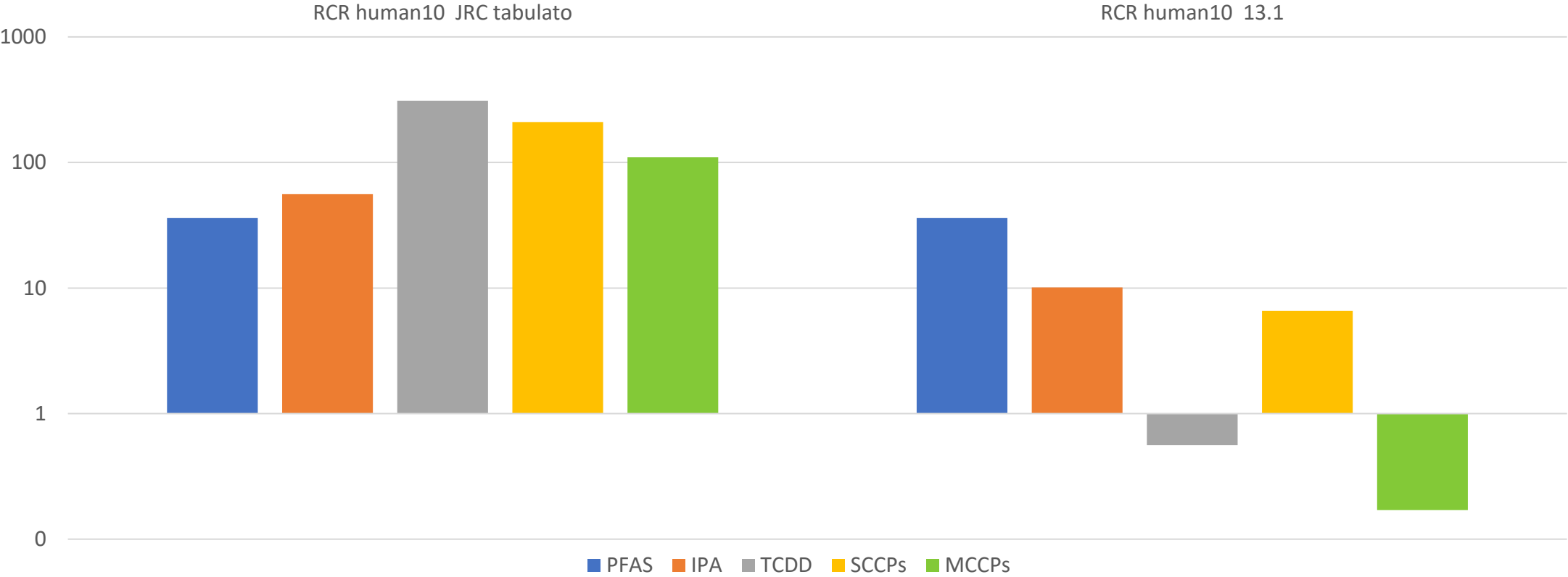
	A	B	C
1	Name	Value	U.M.
2	DEPTH _{soil}	0,2	m
3	Application rate (dw)	5	ton
4	Ka _l _{air}	90,72	//
5	F inf _{soil}	0,25	//
6	RAINrate	0,00192	m/d
7	Napp	10	//
8	t	180	d
9	R	8,314	(Pa*m ³)/(mol*K)
10	TEMP	285	K
11	Foc _{solid}	0,02	//
12	Fair _{soil}	0,2	//
13	Fwater _{soil}	0,2	//
14	Fsolid _{soil}	0,6	//
15	RHO _{solid}	2500	kg/m ³
16	RHO _{soil}	1700	kg/m ³
17	FW Ratio	10	//
18	Water Depth	30	cm
19	Eff Sed Depth	1	cm

Il modello è
stato replicato
mediante fogli
di calcolo

I dati che seguono non sono da assumersi come Valutazione di Rischio, sono da riferirsi unicamente al confronto tra i risultati pubblicati nelle conclusioni del documento JCR e a quelli da noi prodotti ricalcolando il modello. Questi ultimi sono da qui in poi nominati con la dicitura 13.1, dal numero del capitolo riservato alle conclusioni nel documento JRC.

Vengono inoltre riportate le variazioni di RCR applicando al modello 13.1 i valori di concentrazione degli inquinanti di cui alla ricerca prodotta da Claudio Minero (Università di Torino, relazione al Convegno “Nuovi orizzonti per il recupero sostenibile dei fanghi biologici in agricoltura” 9 maggio 2025, EFAR, Palazzo Lombardia, Regione Lombardia).

Confronto grafico tra quanto pubblicato dal JRC ed i risultati del Modello 13.1 a 10 anni



Confronto tra i risultati conseguiti dal JRC e quanto è emerso compilando il Modello 13.1

I risultati riportati sono riferiti a 4 classi di composti, ovvero PFAS, IPA, D/F e PCB DL, SCCPs /MCCPs, che gli Autori della ricerca hanno individuato come **inquinanti organici prioritari presenti nei fanghi**.

Il confronto tra i risultati riportati nel Rapporto ed i risultati conseguiti con la compilazione del Modello descritto al punto 13.1 della pubblicazione (che chiameremo Modello 13.1) **non convergono tra loro nel dare un risultato univoco:**

- Il valore di RCR_{human} risulta per i PFAS coerente tra quanto riportato nella pubblicazione e quanto emerge dall'applicazione del modello 13.1. Per gli IPA l' RCR_{human} risulta circa 5 volte inferiore nel Modello 13.1 rispetto al valore riportato nella pubblicazione. Per le diossine/furani e alcani policlorurati la differenza è di 2-3 ordini di grandezza inferiore nel Modello 13.1 rispetto agli RCR_{human} pubblicati.
- **Di queste discrepanze abbiamo dato tempestiva comunicazione agli Autori della ricerca fornendo loro anche il foglio di calcolo del Modello da noi compilato seguendo quanto riportato nel capitolo 13.1.**

Risultati della compilazione del Modello 13.1 utilizzando le concentrazioni proposte dal JRC



Risultati della compilazione del Modello 13.1 utilizzando le concentrazioni degli inquinanti determinati nella presente ricerca



Risultati della compilazione del modello

Occorre premettere che le concentrazioni effettivamente determinate nella ricerca che viene presentata oggi sono significativamente inferiori ai valori assunti dal JRC nella propria pubblicazione, ad eccezione del TCDD.

Applicando il Modello 13.1 rispettivamente con le concentrazioni indicate dal JRC e con le concentrazioni determinate nella ricerca attuale emerge che:

- Utilizzando i dati JRC si evidenziano tre superamenti ($RCR_{human} > 1$) per PFAS, IPA e SCCPs.
- Utilizzando i dati della ricerca si evidenzia un solo superamento ($RCR_{human} > 1$) per i PFAS.

Dai grafici risulta inoltre evidente che, nel modello 13.1 compilato, il fattore di rischio rimanga quasi costante. Nei PFAS si nota una variazione tra il corto e il medio scenario negli RCR suolo, che non si riflette negli RCR umani.

In conclusione: le problematiche emerse

- **La necessità di una condivisione completa e digitale degli algoritmi che compongono il modello per permettere una sua immediata replicabilità e per contenere il più possibile il rischio di errori nel suo utilizzo.**
- Migliorare il database ecotossicologico, tossicologico e dei parametri chimico-fisici dei contaminanti prioritari.
- Affrontare l'incertezza sulle concentrazioni reali degli inquinanti organici presenti nei fanghi di depurazione.
- Individuare quali parametri in input al modello abbiano un peso maggiore nella definizione del risultato finale, in modo da ottimizzare le risorse spese per affinare il modello

In conclusione: le potenzialità

- **Validazione del Modello:** Il modello fornisce una concentrazione presunta degli inquinanti nei diversi comparti ambientali, il che dovrebbe essere verificato con dati sperimentali, conferendo attendibilità al modello stesso, in modo tale di poter disporre di un modello robusto, affidabile e di ampio utilizzo.
- L'utilizzo di un modello di calcolo standardizzato potrebbe fornire un ulteriore indice della qualità dei fanghi ad uso agricolo e potrebbe rappresentare uno strumento di pronto impiego per la valutazione preliminare di nuovi inquinanti emergenti.
- A seconda delle proprietà chimico-fisiche e tossicologiche delle sostanze organiche presenti nei fanghi si potrebbero individuare eventuali strategie di mitigazione del rischio.

Classe di Composti	Conc. presente nel rapporto JRC ng kg ss-1 TCDD WHO TEQ	Modello JRC RCR ₁ , RCR ₁₀ , RCR ₁₀₀	Modello 13.1 RCR ₁ , RCR ₁₀ , RCR ₁₀₀	Conc. media della ricerca ng kg ss-1 TCDD WHO TEQ	SD
PCDD/F PCB DL	10	2,7	0,47	6,4	5,3
		310	0,57		
		350	0,80		

Legge 16 novembre 2018 n. 130

PCDD/ PCDF + PCB DL
≤25 (ng WHO-TEQ/kg ss

D.Lgs. 152/2006

Diossine /Furani concentrazione soglia nel suolo

Residenziale 10 ng TE/kg ss
Industriale 100 ng TE/kg ss

Ecotoxicological assessment of waste-derived organic fertilizers and long-term monitoring of fertilized soils using a multi-matrix and multi-species approach

Federica Carraturo ^{a,b,1}, Antonietta Siciliano ^{a,b,1}, Andrea Giordano ^{c,*}, Francesco Di Capua ^d,
Federica Barone ^c, Elisa Casaletta ^e, Flavia Cicotti ^a, Marco Guida ^{a,b,1}, Fabrizio Adani ^{f,1}

Composto		Urea	Liquami Suinicoli	Compost da rifiuti organici	Letame Bovino	Digestato anaerobico termofilo da fanghi
PCDD/PCDF +PCB DL	ng/kg ss	5,26	13,4	8,23	8,77	9,3

Gli ultimi sviluppi

Nel luglio del 2025 è stato pubblicato dal JRC un avviso per un bando di gara, con scadenza al 03/11/2025, dal titolo ***“Risk assessment of organic priority substances contained in sewage sludge and derived mineral-like materials applied on EU agricultural land”*** (numero di riferimento della procedura: EC-JRC/SVQ/2025/MVP/3526), per un totale d’acquisto di 104'000 €.

Le richieste del bando si inseriscono nell’ambito della Direttiva 86/278/CE e della Direttiva 2024/3019/UE (particolarmente articolo 20 in merito al recupero di fosforo) e fanno diretto riferimento al lavoro svolto dal già discusso Rapporto JRC.

I suoi obiettivi dichiarati coincidono con quelli del precedente Rapporto e sono i seguenti:

- Lo sviluppo di un modello di valutazione del rischio
- La creazione di un inventario di dati chimico-fisici ed ecotossicologici, in particolare ma non esclusivamente provenienti da letteratura scientifica
- Valutazione dei risultati in esito al modello, anche alla luce dell’obiettivo del recupero del fosforo.

Gli ultimi sviluppi

I requisiti richiesti per la partecipazione al bando lasciano supporre che molte delle criticità di cui abbiamo discusso siano condivise dal JRC. Viene anche richiesto di approfondire con maggiore grado di dettaglio alcuni processi in essere al precedente Rapporto. Tra queste, citiamo:

- Che l'analisi dei dati di letteratura, in particolare sulla concentrazione nei fanghi, sia preferibilmente riferita agli ultimi 5 anni;
- Una scalabilità del modello sia a livello regionale → locale che viceversa;
- Includere ulteriori eventuali apporti o perdite di massa, quali deposizione atmosferica o addizione di ulteriori prodotti fertilizzanti;
- Stimare gli impatti sinergici e antagonisti dei diversi contaminanti contenuti nei fanghi;
- Quantificare l'incertezza nelle variabili chiave nell'algoritmo di calcolo (es.: pH).

Un esempio di valutazione del rischio nel caso di contaminazione da metalli pesanti

Successivamente allo studio portato in esempio in data odierna, abbiamo visionato un'altra relazione prodotta dal JRC (Yunta, F., Schillaci, C., Panagos, P., Van Eynde, E., Wojda, P., & Jones, A. (2024). **Ecological risk assessment of heavy metals from application of sewage sludge on agricultural soils in Europe**. European Journal of Soil Science, 75, e13562.

Lo scopo dello studio è introdurre un approccio metodologico alla quantificazione dell'impatto di alcuni metalli pesanti di particolare interesse, provenienti da fanghi di depurazione. A tale fine, la ricerca propone un metodo di calcolo per stimare le quantità massime di fanghi applicabili per ciascun Paese UE, nonché un fattore di rischio ecologico, il cui valore può ricadere in 5 categorie di rischio.

Cd

Cu

Ni

Pb

Zn

Hg

Un esempio di valutazione del rischio nel caso di contaminazione da metalli pesanti

L'algoritmo, di più rapida applicazione rispetto a quello contenuto nel Rapporto JRC del 2022, dipende dalle concentrazioni iniziali campionate nel suolo dal database LUCAS (Land Use/Land Cover Area Frame Survey 2009). Altri database utilizzati sono il WorldClim - <http://www.worldclim.org/> - per i dati pluviometrici e il Corine Land Cover 2012 per la copertura e uso del suolo.

Abbiamo provato a replicarne i risultati, impiegando dati in input più aggiornati e rappresentativi di un territorio specifico e definito, e in cui l'apporto di fanghi di depurazione è di sicura rilevanza, ovvero la Provincia di Pavia. Abbiamo inoltre provato a ricalcolare i valori di Kd (coefficiente di ripartizione solido-liquido) tramite un metodo proposto dall'Università di Wageningen (J.E. Groenenberg, P.F.A.M. Romkens, R.N.J. Comans, J. Luster, T. Pampura, L. Shotbolt, E. Tipping & W. De Vries, ***Transfer functions for solid-solution partitioning of cadmium, copper, nickel, lead and zinc in soils: derivation of relationships for free metal ion activities and validation with independent data*** - Journal compilation © 2009 British Society of Soil Science.)

Un esempio di valutazione del rischio nel caso di contaminazione da metalli pesanti

Abbiamo ricompilato il modello impiegando i seguenti scenari, entrambi di medio termine (10 anni di accumulo):

- Valori massimi di concentrazione di metalli pesanti nei fanghi - Allegato 1B del D. Lgs 99/1992;
- Valori derivanti da una campagna di monitoraggio straordinaria promossa dalla Provincia di Pavia in seguito a convenzione con Ditte del territorio operanti con impianti R10 (utilizzo agronomico dei fanghi di depurazione), in attuazione del D.P. 45/2018 (<https://www.provincia.pv.it>).

Utilizzando le concentrazioni di fondo proposte dalla ricerca del JRC e modificando gli input come descritto in questa presentazione, l'indice di rischio ecologico potenziale ricade, in entrambi gli scenari, nella classe più bassa.

Conclusioni

Disporre di un modello accurato e robusto per la valutazione del rischio connesso con l'utilizzo agricolo dei fanghi è senz'altro un'ipotesi affascinante che potrà fornirci in futuro preziosi elementi di conoscenza.

Molto rimane ancora da fare: scegliere le equazioni che meglio descrivano i fenomeni considerati, incrementare le informazioni chimico-fisiche delle molecole di interesse e ampliare ulteriormente le conoscenze tossicologiche ed ecotossicologiche dei diversi composti.