



**A2A Ambiente S.p.A.**  
Ingegneria Ambiente



**ISTITUTO DI RICERCHE  
FARMACOLOGICHE  
MARIO NEGRI · IRCCS**

Titolo progetto <i>Project title</i>	<b>Impianto per la produzione di energia elettrica e termica mediante combustione di rifiuti speciali non pericolosi sito in Comune di Cavaglià (BI)</b>
Titolo documento <i>Document title</i>	<b>Risultati Preliminari relativi all'accumulo di inquinanti in coltivazioni tipo esposte alle ipotetiche deposizioni atmosferiche generate dall' Impianto per la produzione di energia elettrica e termica mediante combustione di rifiuti speciali non pericolosi in progetto presso il Comune di Cavaglià (BI)</b>
Estensore <i>Editor</i>	<b>F. Teoldi</b>
Verificatore <i>Approved by</i>	<b>M. Valli</b>
Approvazione <i>Approved by</i>	<b>L. Gamba</b>
Proponente - Legale rappresentante	<b>F. Roncari</b>
Numero documento <i>Document number</i>	<b>CAVP09O10000PET1400101</b>


### Tabella delle revisioni / Table of revisions

Revisione <i>Revision</i>	Data <i>Date</i>	Descrizione <i>Description</i>	Pagina <i>Page</i>	Redazione <i>Created by</i>
<b>00</b>	<b>Novembre 2022</b>	<b>Prima emissione</b>	-	<b>F. Teoldi</b>

Versione per Fornitore / Supplier version

E' vietato consegnare a terzi o riprodurre questo documento, utilizzarne il contenuto o renderlo comunque noto a terzi senza autorizzazione. Ogni infrazione comporta il risarcimento dei danni subiti. Sono riservati tutti i diritti derivanti dalla concessione di brevetti per invenzioni, di modelli industriali di utilità e di disegni o modelli.

*The reproduction, distribution and utilization of this document as well the communication of its contents to others without express authorization is prohibited. Offenders will be held liable for the payment of damages. All rights reserved in the event of the grant of patent, utility model or design.*

	Codice documento	Titolo
	CAVP09O10000PET1400101	Studio accumulo inquinanti coltivazioni

Rapporto a cura del personale dell'Unità di Igiene Industriale e Ambientale dell'Istituto di Ricerche Farmacologiche Mario Negri – IRCCS – sede di Milano.

**Autore:**

Federico TEOLDI

**Dott. Andrea COLOMBO**

*Capo Unità di Igiene Industriale e Ambientale*

Responsabile delle attività Analitiche e di elaborazione dati e risultati e coordinatore delle attività analitiche svolte da laboratori a supporto

e-mail: [andrea.colombo@marionegri.it](mailto:andrea.colombo@marionegri.it)

**Dott. Federico TEOLDI**

*Unità di Igiene Industriale e Ambientale*

Responsabile delle attività di Monitoraggio e coordinatore delle attività svolte *in situ* da laboratori a supporto

e-mail: [federico.teoldi@marionegri.it](mailto:federico.teoldi@marionegri.it)

**Dott. Simone MAIORANA**

*Unità di Igiene Industriale e Ambientale*

Responsabile attività e analisi ecotossicologiche

e-mail: [simone.maiorana@marionegri.it](mailto:simone.maiorana@marionegri.it)

**P.I. Marco LODI**

*Consulente Unità di Igiene Industriale e Ambientale*

Coordinatore delle attività di Monitoraggio e Analitiche dell'Unità di Igiene Industriale e Ambientale

e-mail: [marco.lodi@marionegri.it](mailto:marco.lodi@marionegri.it)



Codice documento

CAVP09O10000PET1400101

Titolo

Studio accumulo inquinanti coltivazioni

## Indice

PREMESSA.....	5
1 SIMULAZIONE DELLA CONTAMINAZIONE NEI SUOLI .....	6
1.1 LA STRUTTURA DEL TOOL MODELLISTICO <i>SOIL</i> .....	6
1.2 PARAMETRIZZAZIONE DEL MODELLO .....	7
1.2.1 Le colture considerate e le proprietà pedologiche dei suoli ad uso agricolo .....	7
1.2.2 Deposizioni atmosferiche totali .....	10
1.2.3 Parametri meteorologici .....	11
1.2.4 Parametri colturali-agronomici .....	11
1.2.5 Proprietà degli inquinanti .....	12
1.3 RISULTATI .....	12
2 STIMA DELLA CONTAMINAZIONE NELLE COLTURE .....	19
3 CONCLUSIONI SULLA CONTAMINAZIONE DEI SUOLI AGRICOLI E DELLE COLTURE ...	23

## PREMESSA

Il presente documento costituisce analisi di approfondimento dell'impatto indiretto sulla salute legato alle emissioni dell'impianto per la produzione di energia elettrica e termica mediante combustione di rifiuti speciali non pericolosi nel Comune di Cavaglià (BI), proposto dalla società A2A Ambiente S.p.A..

Il documento è stato redatto con la finalità di rispondere alle specifiche richieste di approfondimento emesse dalla Provincia di Biella - Area "Tutela e valorizzazione ambientale" - Servizio "Rifiuti, V.I.A., energia qualità dell'aria, acque reflue e risorse idriche" (Reg. Ufficiale 0002243 del 04/02/2022), rispetto ai contenuti dello Studio di Impatto Ambientale (S.I.A.) precedentemente presentato per il progetto in oggetto.

Con l'obiettivo di preservare la qualità dei suoli e di aumentare la sicurezza alimentare, gli enti preposti hanno proposto dei valori limite di concentrazione per i suoli e le colture relativamente ad alcune sostanze la cui presenza può rappresentare un elemento di pericolo.

Più precisamente in questa relazione si fa riferimento ai limiti proposti per i suoli ad uso agricolo dal DM 46/2019 e dai regolamenti europei CE 1881/2006 (per coltivazione ad uso alimentare umano) e DE 2002/32/CE (per coltivazioni ad uso foraggero). Il rispetto dei valori limite proposti dalla vigente normativa è un primo, importante e necessario elemento di valutazione. È bene però sottolineare che un processo complessivo di valutazione (ex-ante e/o ex-post) di una possibile contaminazione di un target ambientale (come, ad esempio, suolo e colture agricole), si riferisce all'impatto dell'insieme di tutte le sorgenti inquinanti che insistono sull'area oggetto di valutazione. Questo da un lato consente di dimensionare in modo appropriato il problema, dall'altro di ipotizzare o realizzare possibili interventi di mitigazione della contaminazione.

Considerate queste premesse e l'esigenza di rispondere ai quesiti specifici riguardanti l'impatto che un impianto per la produzione di energia elettrica e termica mediante combustione di rifiuti speciali non pericolosi (di seguito: Impianto) potrebbe avere sulla circostante area agricola, è stato realizzato uno studio modellistico preliminare atto a valutare la possibile contaminazione di alcune delle principali colture presenti sul territorio comunale di Cavaglià (BI). Più precisamente a questo livello dello studio sono stati valutati, in via conservativa, gli effetti dei valori massimi di deposizione totale al suolo di un gruppo di inquinanti tossicologicamente rilevanti sia a livello umano che ecologico e teoricamente emetibili in aria dall'Impianto che raggiunge il terreno agricolo coltivato ad Erba medica (*Medicago Sativa*, in rappresentanza delle colture foraggere), Granturco o Mais (*Zea Mays*) e Riso (*Oryza Sativa*). La determinazione preliminare della contaminazione di suoli e colture è stata effettuata in due fasi successive: in una prima fase sono state simulate mediante un modello matematico avanzato le concentrazioni degli inquinanti in diversi livelli del suolo, con un dettaglio

doveroso alla zona di sviluppo delle radici (*root zone*); nella seconda fase sono state calcolate le concentrazioni degli inquinanti nelle colture considerate, mediante un approccio semplificato, ma comunque utilizzato a livello internazionale e proposto dall'Agenzia di Protezione dell'Ambiente Statunitense (US EPA) che prevede l'applicazione dei BAF (*Bioaccumulation Factors*) coltura-specifici reperiti in letteratura scientifica.


Infine, le concentrazioni ottenute sono state messe a confronto con i limiti normativi.

## 1 SIMULAZIONE DELLA CONTAMINAZIONE NEI SUOLI

### 1.1 LA STRUTTURA DEL TOOL MODELLISTICO *SOIL*

La simulazione del destino ambientale degli inquinanti oggetto di valutazione è stata effettuata mediante il tool *Soil* fornito dal contenitore modellistico Merlin EXPO che utilizza ed integra una serie di modelli matematici in grado di simulare la dispersione degli inquinanti nelle varie matrici ambientali (aria, acqua e suolo). Più in particolare il tool *Soil* (la cui struttura è illustrata in **Figura 1**) considerando le variabili meteorologiche (precipitazioni, temperatura dell'aria, radiazione globale, durata giornaliera di soleggiamento), pedologiche (proprietà tessiturali e idrauliche del suolo), agronomiche (proprietà colturali, irrigazione) e gli input di inquinanti atmosferici (concentrazioni atmosferiche e deposizioni secche/umide), contenuti negli ammendanti (fertilizzazione) e nelle acque irrigue (irrigazione) è in grado di simulare la concentrazione degli inquinanti in tre porzioni del suolo:

- a. Suolo superficiale (o *Top Soil*): è la porzione di suolo con profondità  $z = 0 - 7$  cm.
- b. *Root zone*: è la zona nella quale crescono e si sviluppano gli apparati radicali della pianta e per questa ragione è coltura-specifica. Il risultato fornito dal modello è rappresentativo della concentrazione media in una porzione di suolo con  $Z_{root} \leq Z_{root-max}$ .
- c. Suolo profondo (o *Deep Soil*): è la porzione di suolo che si estende sotto la *root zone*. I risultati della simulazione si riferiscono alle concentrazioni calcolate nello strato infinitesimale immediatamente sottostante la *root zone*.

	Codice documento	Titolo
	CAVP09O10000PET1400101	Studio accumulo inquinanti coltivazioni

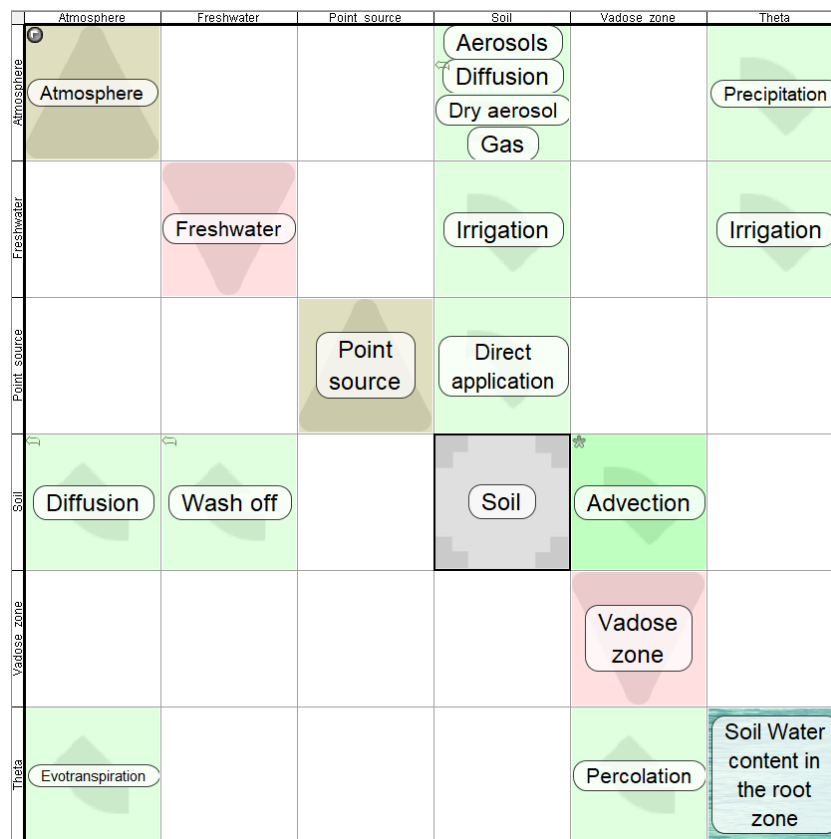



Figura 1: struttura concettuale del funzionamento del tool Soil elaborato in ambiente Merlin EXPO.

## 1.2 PARAMETRIZZAZIONE DEL MODELLO

### 1.2.1 Le colture considerate e le proprietà pedologiche dei suoli ad uso agricolo

La prima fase di analisi e valutazione ha riguardato l'identificazione delle colture maggiormente rappresentate nel comune di Cavaglià (in termini di Superficie Agricola Utilizzata – SAU – relativa alla singola coltura, rispetto alla SAU totale del comune). I risultati, ottenuti mediante elaborazioni in ambiente GIS (Geographic Information System) e riportati in **Figura 2** e in **Tabella 1**, mostrano che il riso (*Oryza Sativa*) è la coltura che occupa la maggior superficie agricola nel comune di Cavaglià (2.2 km<sup>2</sup> complessivi, corrispondenti a circa il 22% della SAU comunale totale, pari a 10.1 km<sup>2</sup>), seguita da Prati permanenti e altri prati avvicendati (che non sono vere e proprie colture agricole e quindi non sono state considerate dal presente studio) e dal Granturco (*Zea Mays*: 1.76 km<sup>2</sup>/17.4% SAU totale) che complessivamente, considerando anche le qualità *in erba* e a *maturazione cerosa*, mostra una superficie paragonabile a quella del riso. Questa analisi trova riscontro con la richiesta di valutare il possibile impatto dell'Impianto "con particolare riguardo al riso e al granturco". L'erba medica (*Medicago Sativa*) pur essendo poco rappresentata fra le colture agricole del Comune di Cavaglià (9° posto, circa 1% della SAU comunale) è stata scelta

	Codice documento	Titolo
	CAVP09O10000PET1400101	Studio accumulo inquinanti coltivazioni

perché rappresentativa di una potenziale destinazione d'uso (coltivazione foraggera) diversa da quella di riso e mais (colture per alimenti ad uso umano) e perché coltura strutturalmente diversa perché appartenente ad una classe (dicotiledoni) differente rispetto a riso e mais (monocotiledoni).

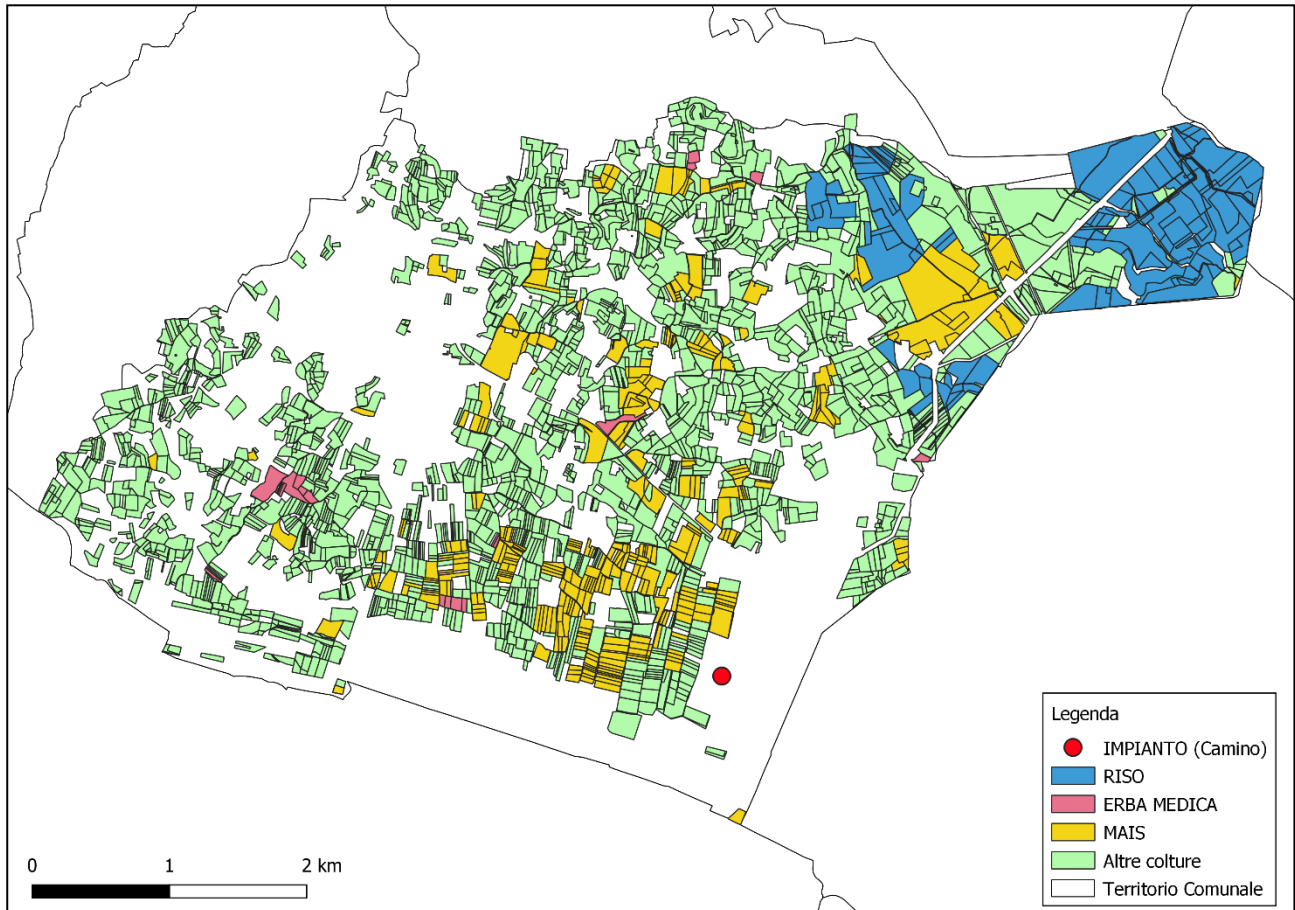


Figura 2: SAU (Superficie Agricola Utilizzata) del comune di Cavaglià (BI) con evidenziata la posizione del camino dell'Impianto e le superfici coltivate a riso (in blu), Granturco o mais (in giallo) ed Erba Medica (in rosa). In verde è evidenziata la restante SAU (fonte: Geoportale della Regione Piemonte; layer cartografici consultati: Carta dei Suoli 1:50000: Uso del suolo Agricolo aggiornato al 2021).




	Codice documento	Titolo
	CAVP09O10000PET1400101	Studio accumulo inquinanti coltivazioni


Tabella 1: colture praticate sui terreni agricoli del comune di Cavaglià (BI) classificate in ordine di SAU occupata con relativa assegnazione della tipologia tessiturale di suolo più rappresentata per la coltura in esame.

Coltura	Ranking rappresentatività SAU Cavaglià	Area Totale su SAU Cavaglià [km <sup>2</sup> ]	Tessitura rappresentativa della coltura per i suoli agricoli di Cavaglià	Tessitura		
				Sabbia	Limo	Argilla
				[%]	[%]	[%]
Riso	1°	2.2	Franco Limoso	20	70	10
Granturco	4°-8°-11° (*)	1.8	Franco Sabbioso	65	25	10
Erba Medica	9°	0.1	Sabbioso Franco	85	10	5

(\*): in dettaglio: 2°: Granturco 6°: Granturco in Erba; 9°: Granturco a maturazione cerosa.

Come evidenziato al par. 1.1, fra le variabili che il modello matematico utilizza per produrre i risultati della simulazione ci sono quelle pedologiche. Le informazioni pedologiche (i.e. tessitura dei suoli superficiali) sono state estratte dalla carta dell'uso del suolo 1:50000 messa a disposizione sul geoportale della Regione Piemonte (<https://www.geoportale.piemonte.it/>). Poiché il dettaglio relativo agli aspetti tessiturali del suolo sul quale vengono coltivati riso, mais e erba medica è minimo, è stato possibile definire soltanto la classe tessiturale di appartenenza dei suoli, senza avere la precisa composizione (percentuali di Sabbia, Limo, Argilla e Materia Organica presenti nel suolo di interesse). Le composizioni per i terreni Franco Limoso (FS), Franco Sabbioso (FS) e Sabbioso Franco (SF) riportati in **Tabella 1** si riferiscono ad un suolo ipotetico, ma rappresentativo poiché possiede una composizione “media” rispetto al range di valori della classe tessiturale di appartenenza secondo le definizioni dello United States Department of Agriculture (USDA, 1987).

Definita la classe tessiturale e la composizione delle classi di suolo si è proceduto con il calcolo delle proprietà idrauliche dei suoli (field capacity, wilting point, bulk density, saturazione) mediante le funzioni di pedotransfer definite in Saxton, 2006.

	Codice documento	Titolo
	CAVP09O10000PET1400101	Studio accumulo inquinanti coltivazioni

### 1.2.2 Deposizioni atmosferiche totali

La stima di contaminazione di suoli ad uso agricolo e relative colture è stata valutata in via conservativa considerando i valori massimi di deposizione totale al suolo simulata dal modello di dispersione, nel dominio di calcolo, per ognuno degli inquinanti considerati. In particolare, questi valori massimi si rilevano in direzione Nord, in una cella parzialmente ricompresa all'interno del confine dell'Impianto L'ipotesi, conservativa, è quella che i terreni agricoli sui quali vengono coltivati riso, mais ed erba medica siano tutti soggetti al massimo delle deposizioni atmosferiche indipendentemente dalla situazione reale che risulterà invece in una certa misura meno impattante. Tali valori sono riportati in **Tabella 2**. Si precisa che per ragioni legate al funzionamento del modello (il quale simula il destino ambientale di una singola sostanza definita e non di un gruppo di sostanze), il valore massimo delle deposizioni atmosferiche totali utilizzato per PCDD/F e PCB<sub>DL</sub>, espressi come tossicità equivalente al congenere maggiormente tossico (2-3-7-8-TCDD), coincide con il valore ( $1.30E-09 \text{ g m}^{-2} \text{ y}^{-1}$ ) calcolato per le deposizioni dei PCB<sub>DL</sub>, cioè la più conservativa fra le due alternative ipotizzate (i.e. considerare l'emissione del valore limite ipotizzato per le emissioni dell'Impianto come completamente generata da PCDD/F o, in alternativa, come completamente generata da PCB<sub>DL</sub>). Analogamente e per le stesse ragioni i valori delle deposizioni degli IPA sono espressi dal valore del BaP ( $2.60-05 \text{ g m}^{-2} \text{ y}^{-1}$ ): in questo caso il calcolo della concentrazione di tossicità equivalente è stato effettuato secondo le linee guida dell'Istituto Superiore di Sanità.

Tabella 2: Valori Massimi di Deposizioni Atmosferiche Totali prodotte dall’Impianto e simulate all’interno del dominio di calcolo.

Valori Massimi di Deposizioni Atmosferiche Totali prodotte dall’Impianto nel dominio di calcolo		
Sostanze	[g m <sup>-2</sup> y <sup>-1</sup> ]	[mg m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> ]
Sb	1.10E-02	3.01E-02
As	1.10E-02	3.01E-02
Cd	3.66E-04	1.00E-03
Cr	1.10E-02	3.01E-02
Co	1.10E-02	3.01E-02
Cu	1.10E-02	3.01E-02
Pb	1.10E-02	3.01E-02
Ni	1.10E-02	3.01E-02
V	1.10E-02	3.01E-02
Hg	4.05E-04	1.11E-03
Mn	1.10E-02	3.01E-02
Tl	3.66E-04	1.00E-03
TCDD*	1.30E-09	3.55E-09
BaP°	2.60E-05	7.13E-05

\*: è riportato il valore di deposizione totale massima al suolo di PCB<sub>DL</sub> calcolati come WHO-TEQ

°: corrispondente al valore della deposizione massima degli IPA BaP-equivalenti secondo le linee guida ISS

### 1.2.3 Parametri meteorologici

I valori delle variabili meteorologiche (temperatura atmosferica, umidità relativa, precipitazioni atmosferiche, pressione atmosferica, radiazione globale e velocità e direzione del vento) sono stati forniti dalla stazione meteorologica A2A Ambiente di Cavaglià (BI) (lat: 45.38°/8.12°). I valori di variabili come durata del soleggiamento, durata della copertura nuvolosa e temperatura del suolo superficiale (utilizzati dal tool *Soil*) sono invece stati acquisiti da database liberamente consultabili in rete. Per effettuare le simulazioni sono stati utilizzati i dati meteorologici relativi all’ anno 2020.

### 1.2.4 Parametri colturali-agronomici

I parametri colturali ed agronomici (*Kc* – coefficiente colturale, evapotraspirazione reale - *ETc*, quantità e data di irrigazione dei campi e delle colture) sono stati utilizzati e calcolati come indicato nel paper56 FAO (*Irrigation and Drainage*). Per il calcolo di *ETc* e delle migliori condizioni teoriche di irrigazione delle colture in esame è stato utilizzato il tool *CropWat8.0* il quale fornisce i *Kc* teorici di un ampio numero di colture, fra le quali anche riso, mais e erba medica.

### 1.2.5 Proprietà degli inquinanti

La maggior parte delle proprietà chimico-fisiche delle sostanze sono note e sperimentalmente definite per lo meno all'interno di un range per quelle variabili che ne influenzano il comportamento in modo significativo. Alcune di queste proprietà però vengono calcolate mediante algoritmi e/o fornite solo in determinate condizioni sperimentali. È il caso del Coefficiente di Diffusione in acqua e il coefficiente di partizione acqua-suolo per i metalli. Poiché questi parametri (i cui valori sono stati reperiti in letteratura scientifica) influiscono sul passaggio degli inquinanti (metallici) dal suolo alla fase acquosa e di conseguenza poi agli apparati radicali delle piante, l'utilizzo di valori definiti in condizioni più simili possibili a quelle reali (pH, temperatura, etc.), migliora l'affidabilità della stima.


## 1.3 RISULTATI

Le concentrazioni degli inquinanti nei Suoli Superficiali dopo i 366 giorni del 2020, nelle ipotesi di:

- una concentrazione iniziale degli inquinanti nel suolo superficiale pari a  $0 \text{ mg kg}^{-1}$ ;
- una contaminazione giornaliera dovuta alle deposizioni atmosferiche totali prodotte dall'Impianto ugualmente ripartita nell'arco dell'anno;
- verificarsi delle condizioni meteorologiche registrate nel 2020 presso il comune di Cavaglià;
- verificarsi degli episodi irrigui così come calcolato per le diverse colture considerate coltivate sulla tipologia di suoli maggiormente rappresentativi;

sono riportate in **Tabella 3** e rappresentate in **Figura 3**. I risultati mettono in evidenza che per ognuno dei tre suoli le concentrazioni degli elementi seguono la tendenza (dall'elemento a concentrazione maggiore all'elemento a concentrazione più bassa)  $\text{Cr} > \text{Pb} > \text{Co} > \text{Ni} > \text{Cu} > \text{V} > \text{Sb} > \text{Mn} > \text{As} > \text{Hg} > \text{Cd}$ ; il TI mostra concentrazioni maggiori rispetto al BaP per i terreni superficiali coltivati a *mais* e *riso*, mentre il rapporto si inverte ( $\text{BaP} > \text{TI}$ ) per il terreno coltivato ad *erba medica*. Le concentrazioni di TCDD risultano le più basse fra quelle di tutti i contaminanti considerati per tutti i suoli superficiali.

Dal punto di vista quantitativo, le concentrazioni dei primi nove metalli (dal Cr all' As nel ranking decrescente sopra riportato) risultano confrontabili all'interno di ciascun terreno: la concentrazione del Cr rispetto a quella dell'As è al massimo 2.8 volte maggiore (terreno coltivato a *erba medica*). Le differenze maggiori si registrano per gli altri inquinanti: rispetto al contaminante più abbondante (Cr) le concentrazioni di Hg risultano da 30 (terreno coltivato a *erba medica*) a 40 (terreno coltivato a *riso*) volte inferiori, le concentrazioni di Cd risultano da 40 (terreno coltivato a *erba medica*) a 60 (terreno coltivato a *riso*) volte inferiori, le concentrazioni di TI risultano da 80 (terreno coltivato a *mais*) a circa 4000 (terreno coltivato a *erba medica*) volte inferiori, le concentrazioni di BaP risultano da 430 (terreno coltivato ad *erba medica* e *mais*) a 570 (terreno coltivato a *erba medica*) volte inferiori, mentre le concentrazioni di TCDD risultano essere più di  $10^9$  volte inferiori alle concentrazioni di Cr in tutti i suoli superficiali.

	Codice documento	Titolo
	CAVP09O10000PET1400101	Studio accumulo inquinanti coltivazioni

Fra i suoli superficiali, le concentrazioni maggiori di Co, Ni, Cu, Hg e BaP si prevedono per i terreni coltivati a *mais*, nei terreni coltivati a *riso* si prevedono le maggiori concentrazioni di Cr, Pb, V, Sb, Mn, As, Cd, TI e TCDD. Ne consegue che i terreni coltivati ad *erba medica* sono quelli con le concentrazioni minori di inquinanti: significative le differenze per il TI le cui concentrazioni nei terreni superficiali potrebbero essere fino a 90 volte inferiori rispetto a quelle previste nei terreni coltivati a *mais* e *riso*, nonostante i valori di deposizione siano gli stessi.

Come dimostra il confronto con i risultati della contaminazione negli strati di terreno sottostante (*root zone*: **Tabella 4**; suolo profondo: **Tabella 5**), l'accumulo delle deposizioni atmosferiche nello strato più superficiale dei suoli comporta una maggior contaminazione di questo strato rispetto ai sottostanti.

Fatte salve le ipotesi conservative sopra riportate, ipotizzando (a) l'Impianto come unica sorgente degli inquinanti considerati, (b) un livello nullo di contaminazione iniziale dei suoli superficiali e (c) condizioni meteorologiche identiche a quelle verificatesi nel 2020, anche dopo 30 anni, periodo di vita ipotizzato per un impianto come quello in esame, le concentrazioni nei suoli superficiali imputabili all'Impianto stesso risulterebbero da 8 (Sb nei campi coltivati a *riso*) a circa 85mila (TCDD nei campi coltivati a *erba medica*) volte inferiori alle Concentrazioni Soglia di Contaminazione (CSC) proposte nel DM 46/2019 per i suoli agricoli.


	Codice documento	Titolo
	CAVP09O10000PET1400101	Studio accumulo inquinanti coltivazioni

Tabella 3: stima della contaminazione relativa alle tre tipologie di suoli superficiali coltivati a erba medica, mais e riso e confronto con le Concentrazioni Soglia di Contaminazione (CSC) proposti dal DM 46/2019.

	SUOLO SUPERFICIALE			CSC DM 46/2019 [mg kg <sup>-1</sup> ]
	Erba Medica ( <i>Medicago Sativa</i> )	Mais ( <i>Zea Mays L.</i> )	Riso ( <i>Oryza Sativa L.</i> )	
	z=0-0.07 m [mg kg <sup>-1</sup> ]	z=0-0.07 m [mg kg <sup>-1</sup> ]	z=0-0.07 m [mg kg <sup>-1</sup> ]	
Sb	1.87E-02	3.21E-02	4.36E-02	10
As	1.79E-02	3.15E-02	4.21E-02	30
Cd	1.32E-03	1.38E-03	1.54E-03	5
Cr	5.01E-02	7.22E-02	9.38E-02	150
Co	4.82E-02	6.36E-02	5.76E-02	30
Cu	4.55E-02	5.39E-02	4.98E-02	200
Pb	4.99E-02	7.15E-02	8.65E-02	100
Ni	4.62E-02	5.64E-02	5.11E-02	120
V	3.29E-02	3.52E-02	4.51E-02	90
Hg	1.79E-03	2.43E-03	2.29E-03	1
Mn	1.85E-02	3.20E-02	4.35E-02	-
Tl	1.26E-05	9.10E-04	1.13E-03	1
TCDD	2.35E-12	3.45E-12	5.95E-12	0.000006
BaP	1.17E-04	1.68E-04	1.66E-04	0.1

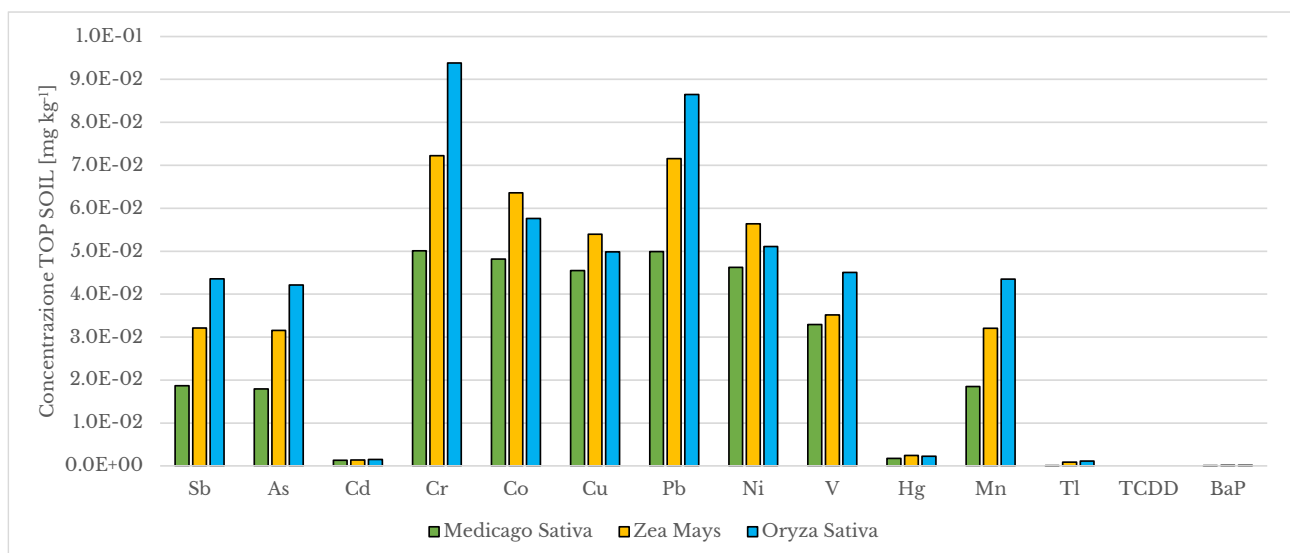


Figura 3: rappresentazione grafica della stima della contaminazione relativa alle tre tipologie di suoli superficiali coltivati a erba medica, mais e riso.

Le concentrazioni degli inquinanti nella *root zone* (profondità variabile a seconda della coltura considerata) dopo i 366 giorni del 2020, nelle stesse ipotesi illustrate per lo strato superficiale dei suoli agricoli sono riportate in **Tabella 4** e rappresentate in **Figura 4**.

Le concentrazioni degli inquinanti diminuiscono con la profondità: rispetto alle concentrazioni nei suoli superficiali, nei terreni coltivati ad *erba medica* si verificano riduzioni da un minimo di 3 volte (Mn) ad un massimo di 10 volte (TCDD), nei terreni coltivati a *mais* le riduzioni vanno da un minimo di 5 volte (V) ad un massimo di 10 volte (TCDD), mentre nei terreni coltivati a *riso* le diminuzioni vanno da un minimo di 4.5 volte (Co) ad un massimo di 10 volte (TCDD).

Contrariamente a quanto evidenziato nei suoli superficiali non c'è una evidente somiglianza nell'andamento delle abbondanze relative dei contaminanti all'interno dello stesso terreno, anche se Co, Cu, Ni, V, Cr e Pb mostrano concentrazioni fra loro confrontabili ( $5.05E-3 - 5.04E-3 \text{ mg kg}^{-1}$ , nella *root zone* del terreno coltivato ad *erba medica*;  $7.41E-3 - 7.40 E-3 \text{ mg kg}^{-1}$ , nella *root zone* del terreno coltivato a *mais*;  $1.28E-2 - 9.38E-3 \text{ mg kg}^{-1}$ , nella *root zone* del terreno coltivato a *riso*).

Anomala rispetto alle concentrazioni degli altri inquinanti la concentrazione del Mn nella *root zone* dei soli suoli coltivati ad *erba medica*: non solo il Mn risulta l'elemento più abbondante in questo livello, ma la sua concentrazione ( $6.47E-3 \text{ mg kg}^{-1}$ ) è maggiore di quella del Mn simulata per le *root zone* dei suoli coltivati a *mais* e *riso* (rispettivamente  $3.58E-3$  e  $4.61E-3 \text{ mg kg}^{-1}$ ).

Dal punto di vista quantitativo, le concentrazioni di Hg, Cd, BaP, TI e TCDD nei rispettivi suoli sono significativamente più basse (almeno 30 volte) rispetto alle concentrazioni del contaminante più abbondante (rispettivamente Mn, Cu e Pb per i terreni coltivati ad *erba medica*, *mais* e *riso*).

Le concentrazioni maggiori di Mn e Sb si prevedono nelle *root zone* dei terreni coltivati ad *erba medica*, nelle *root zone* dei terreni coltivati a *mais* si prevedono le maggiori concentrazioni di Cd e V, mentre nelle *root zone* dei terreni coltivati a *riso* si concentrano maggiormente As, Cr, Co, Cu Pb, Hg, TI, TCDD e BaP.

In questo caso anche dopo 30 anni, periodo di vita ipotizzato per un impianto come quello in esame, le concentrazioni nella *root zone* imputabili all'impianto stesso risulterebbero da 70 (Sb nei campi coltivati a *erba medica*) a circa 850mila (TCDD nei campi coltivati a *erba medica*) volte inferiori alle CSC proposte nel DM 46/2019 per i suoli agricoli.


	Codice documento	Titolo
	CAVP09O10000PET1400101	Studio accumulo inquinanti coltivazioni

Tabella 4: stima della contaminazione nella root zone per le tre tipologie di suoli coltivati a erba medica, mais e riso.

	ROOT ZONE		
	Erba Medica ( <i>Medicago Sativa</i> )	Mais ( <i>Zea Mays L.</i> )	Riso ( <i>Oryza Sativa L.</i> )
	z=0.07-1.0 m	z=0.07-1.0 m	z=0.07-0.6 m
	[mg kg <sup>-1</sup> ]	[mg kg <sup>-1</sup> ]	[mg kg <sup>-1</sup> ]
Sb	4.78E-03	3.67E-03	4.63E-03
As	3.03E-03	3.45E-03	4.55E-03
Cd	1.68E-04	2.47E-04	2.36E-04
Cr	5.04E-03	7.41E-03	1.28E-02
Co	5.05E-03	7.41E-03	1.24E-02
Cu	5.05E-03	7.41E-03	9.38E-03
Pb	5.04E-03	7.41E-03	1.28E-02
Ni	5.05E-03	7.41E-03	1.00E-02
V	5.05E-03	7.40E-03	5.76E-03
Hg	1.84E-04	2.71E-04	4.66E-04
Mn	6.47E-03	3.58E-03	4.61E-03
Tl	2.36E-06	1.08E-04	1.52E-04
TCDD	2.36E-13	3.45E-13	5.95E-13
BaP	1.19E-05	1.75E-05	3.02E-05

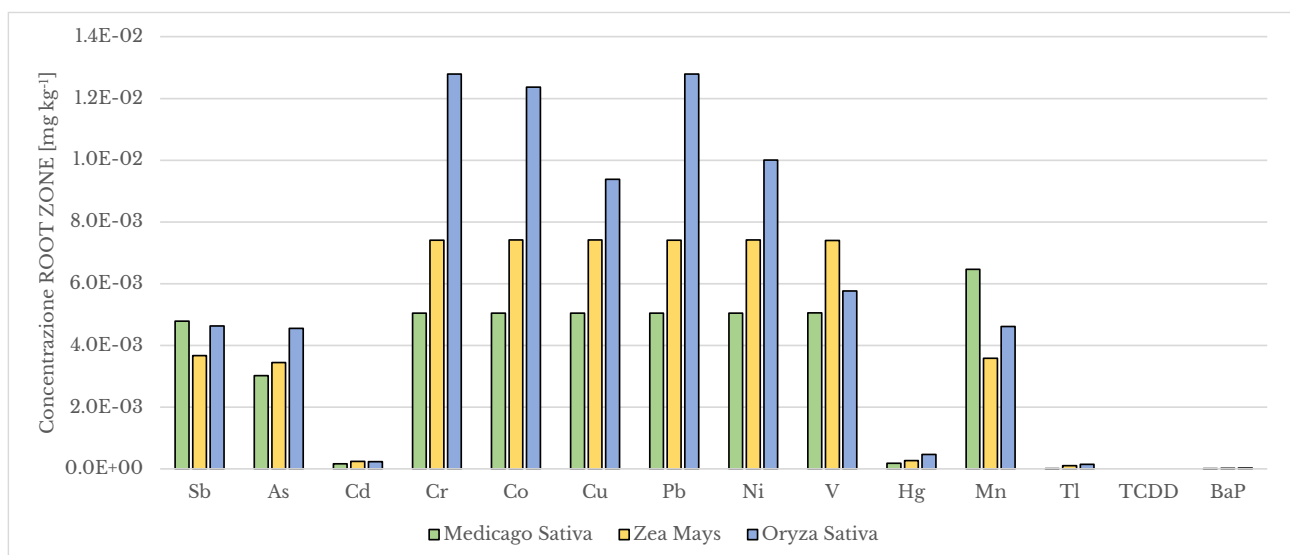


Figura 4: rappresentazione grafica della stima della contaminazione nella root zone per le tre tipologie di suoli coltivati a erba medica, mais e riso.



Le concentrazioni degli inquinanti nel Suolo profondo (profondità variabile a seconda della coltura considerata) dopo i 366 giorni del 2020, nelle stesse ipotesi illustrate per lo strato superficiale dei suoli agricoli sono riportate in **Tabella 5** e rappresentate in **Figura 5**.

Le concentrazioni degli inquinanti diminuiscono con la profondità: rispetto alle concentrazioni nelle rispettive *root zone*, nei terreni coltivati ad *erba medica* si verificano riduzioni contenute per Sb (2.7 volte), As (1.8) e Mn (invariato), le concentrazioni di Cd, Cr, Co, Cu, Pb, Ni, V, Hg e Tl simulate sono tutte inferiori a  $10^{-7}$  mg kg<sup>-1</sup> e trascurabili rispetto alle concentrazioni nella *root zone*, mentre TCDD e BaP non raggiungono gli strati del suolo al di sotto della *root zone*. Riduzioni più contenute delle concentrazioni di inquinanti rispetto alla *root zone* si evidenziano per il terreno coltivato a *mais*: con concentrazioni intermedie fra quelle dei suoli profondi dei terreni coltivati ad *erba medica* e *riso* per tutti gli inquinanti, riduzioni relativamente contenute sono state simulate solo per Sb e Mn (5 volte), As (13) e V (25), concentrazione pari a circa un centesimo rispetto a quella della *root zone* per il Tl (86), più di 1000 volte inferiori per Cd, Cr, Co, Cu, Pb, Ni e Hg, mentre anche per questi suoli profondi TCDD e BaP non penetrano al di sotto della *root zone*. Nei suoli profondi del terreno coltivato a *riso* si evidenziano diminuzioni più contenute per Ni (2.6 volte inferiore), Cd (2.6), Cu (2.9), V (3.9) e Co (4.1), intermedie per Hg (13.2), Sb (17.9), Mn (19.0), As (35.5) e Tl (73.2), le concentrazioni di Pb, Cr e BaP sono trascurabili mentre la TCDD non penetra oltre la *root zone* ( $z=0.6$  m).

Le concentrazioni maggiori di Sb, As e Mn si prevedono nei livelli profondi dei terreni coltivati ad *erba medica*, nei livelli profondi dei terreni coltivati a *riso* si concentrano maggiormente Cd, Cr, Co, Cu Pb, Ni, V, Hg, Tl e BaP, mentre i suoli profondi dei terreni coltivati a *mais* mostrano sempre concentrazioni intermedie fra quelle dei terreni coltivati ad *erba medica* e *riso*.

Estendendo il confronto con le CSC proposte nel DM 46/2019 per i suoli agricoli anche ai suoli profondi, anche dopo 30 anni, periodo di vita ipotizzato per un impianto come quello in esame, le concentrazioni imputabili all'impianto stesso risulterebbero, per le sole concentrazioni non trascurabili ( $>10^{-9}$  mg kg<sup>-1</sup>: 4 per i terreni coltivati ad *erba medica*, 7 per i terreni coltivati a *mais*, 13 per i terreni coltivati a *riso*) da 192 (Sb nei campi coltivati a *erba medica*) a miliardi (Cr nei campi coltivati ad *erba medica*) di volte inferiori alle CSC.

Tabella 5: stima della contaminazione nel suolo al di sotto della root zone (suolo profondo) per le tre tipologie di suoli coltivati a erba medica, mais e riso.

	SUOLO PROFONDO		
	Erba Medica ( <i>Medicago Sativa</i> )	Mais ( <i>Zea Mays L.</i> )	Riso ( <i>Oryza Sativa L.</i> )
	z>1.0 m	z>1.0 m	z>0.6 m
	[mg kg <sup>-1</sup> ]	[mg kg <sup>-1</sup> ]	[mg kg <sup>-1</sup> ]
Sb	1.74E-03	7.25E-04	2.58E-04
As	1.65E-03	2.74E-04	1.28E-04
Cd	3.29E-12	1.20E-07	9.08E-05
Cr	1.08E-24	2.77E-19	3.53E-08
Co	2.86E-17	3.18E-12	3.06E-03
Cu	4.35E-14	3.27E-09	3.24E-03
Pb	1.70E-23	4.41E-18	4.66E-07
Ni	8.76E-15	7.34E-10	3.84E-03
V	2.83E-08	2.97E-04	1.46E-03
Hg	3.05E-21	2.01E-13	3.53E-05
Mn	6.38E-03	6.97E-04	2.42E-04
Tl	4.86E-10	1.25E-06	2.08E-06
TCDD	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
BaP	0.00E+00	0.00E+00	5.54E-08

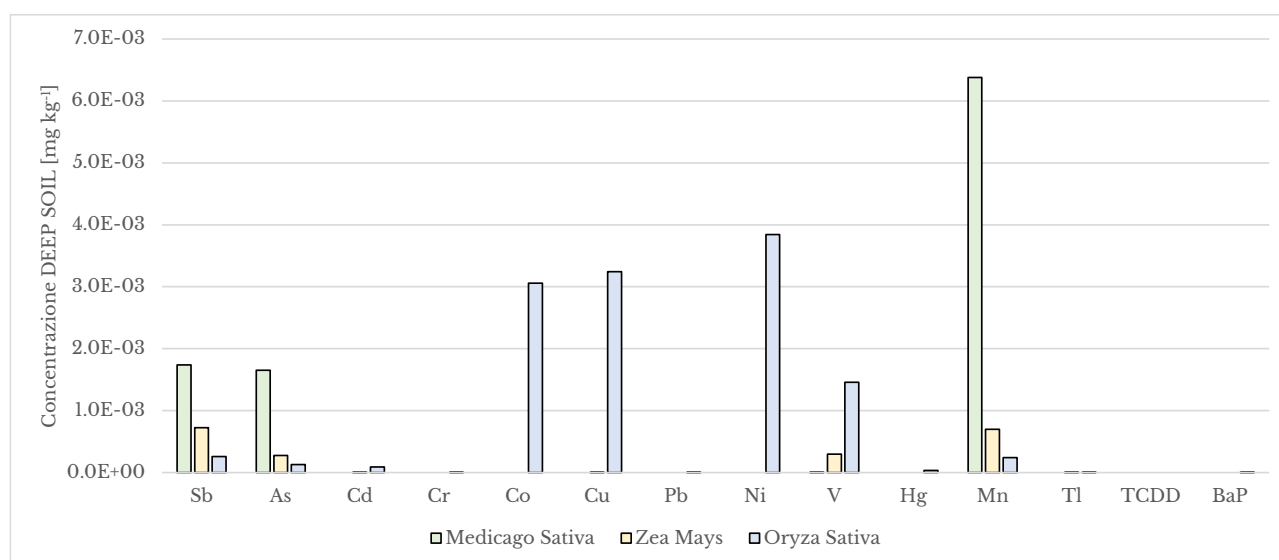


Figura 5: rappresentazione grafica della stima della contaminazione nel suolo al di sotto della root zone (suolo profondo) per le tre tipologie di suoli coltivati a erba medica, mais e riso.

## 2 STIMA DELLA CONTAMINAZIONE NELLE COLTURE

Per calcolare la concentrazione dei contaminanti nelle colture agricole considerate si è proceduto applicando un approccio semplificato, ma comunque scientificamente supportato che prevede di calcolare la concentrazione nella pianta  $C_p$  mediante la relazione:

$$C_p = C_i^{root-z (t=t_{harvest})} \cdot BAF$$

dove,

$C_i^{root-z (t=t_{harvest})}$  è la concentrazione del  $i$ -esimo inquinante nella *root zone* al tempo di raccolta ( $t_{harvest}$ );

BAF (*Bioaccumulation Factor*) definito come rapporto fra la concentrazione dell'inquinante nella pianta ( $C_p$ ) e la concentrazione dello stesso inquinante nel suolo ( $C_s$ ).


Il BAF è un parametro coltura-specifico, viene definito solitamente in maniera sperimentale, ma il valore è spesso influenzato da altre variabili come il grado di contaminazione del suolo, le proprietà del suolo, le condizioni ambientali e l'organo della pianta per il quale BAF viene quantificato. Spesso viene definito un BAF per l'apparato radicale delle piante, mentre le concentrazioni in altri organi della pianta vengono stimate utilizzando il *Transfer Factor* (TF) derivante dal rapporto fra la concentrazione dell'inquinante nell'organo di interesse ( $C_o$ ) e la concentrazione dello stesso inquinante nella radice ( $C_{root}$ ).

Le concentrazioni degli inquinanti nell'*erba medica*, *mais* e *riso* al momento della raccolta (rispettivamente al giorno 279, 230 e 241 del 2020), con le stesse ipotesi illustrate per lo strato superficiale dei suoli agricoli sono riportate in **Tabella 6** e rappresentate in **Figura 6**. Si precisa che questi risultati, dato anche il carattere preliminare della stima, si riferiscono in modo generico alla concentrazione dell'inquinante nella coltura, senza fare distinzioni fra le parti della pianta.

Per quanto riguarda l'*erba medica* le maggiori concentrazioni nei tessuti si rilevano per il Mn (nell'*erba medica* questo elemento raggiunge la concentrazione più alta fra tutti i contaminanti nelle colture considerate:  $1.19E-02 \text{ mg kg}^{-1}$ ), Cu, Co, Ni e V; le concentrazioni di As, Cr, Cd, Pb e Sb sono risultate da 60 volte a 300 volte inferiori alla concentrazione del Mn, l'elemento più abbondante, mentre le concentrazioni di Hg, BaP, TI e TCDD risultano invece inferiori a  $10^{-7} \text{ mg kg}^{-1}$ .

Le maggiori concentrazioni simulate nei tessuti del *mais* si riferiscono a Cu, Ni, Mn, Sb, Pb, Co e Cr (la concentrazione di quest'ultimo è risultata essere 68 volte inferiore alla concentrazione del Cu, elemento più abbondante nei tessuti del *mais*); le concentrazioni di V, As e Cd sono risultate da 190 a 230 volte inferiori alla concentrazione del Cu, mentre le concentrazioni di TI, Hg, BaP e TCDD risultano invece inferiori a  $10^{-6} \text{ mg kg}^{-1}$ .

Le concentrazioni più alte simulate nei tessuti del *riso* si riferiscono a Co, Hg, Pb, Cu, Mn, Ni e Sb (la concentrazione di quest'ultimo è risultata essere 47 volte inferiore alla concentrazione del Co,

	Codice documento	Titolo
	CAVP09O10000PET1400101	Studio accumulo inquinanti coltivazioni

elemento più abbondante nei tessuti del *riso*); le concentrazioni di Cd, Cr, Tl e As sono risultate da 90 a 320 volte inferiori alla concentrazione del Co, mentre le concentrazioni di V, BaP e TCDD sono risultate più basse (essendo almeno 600 volte inferiori alle concentrazioni di Co) fino ad essere inferiori a  $10^{-7}$  mg kg<sup>-1</sup> per BaP e TCDD.

A parità di esposizione, ma per effetto delle quantità di inquinanti accumulate nella *root zone* aventi caratteristiche tessiturali ed idrauliche differenti, si prevede che le maggiori concentrazioni (rispetto alle altre due colture) di As, Cd, Cr, Ni, V, Mn e TCDD si trovino nei tessuti di *erba medica*, si prevedono concentrazioni più elevate di Sb, Cu e BaP nei tessuti del *mais*, mentre nei tessuti del *riso* si concentrano preferibilmente elementi come Co, Pb, Hg e Tl.

Confrontando le stime ottenute con i valori limite proposti dai Regolamenti Europei DE 2002/32/CE e CE 1881/2006 (**Tabella 6**), nelle ipotesi già illustrate per i suoli superficiali (l'Impianto come unica sorgente degli inquinanti considerati, un livello nullo di contaminazione iniziale dei suoli superficiali e condizioni meteorologiche identiche a quelle verificatesi nel 2020), il contributo delle deposizioni imputabili all'Impianto rappresenterebbe, per ogni raccolto, al massimo una quantità circa 200 volte inferiore al limite (Pb nel *riso*) e fino a 6 milioni di volte inferiore (Hg nell'*erba medica*).

Tabella 6: stima della contaminazione di erba medica, mais e riso coltivati presso il Comune di Cavaglià ed interessati dalle deposizioni atmosferiche totali dell'Impianto e confronto con i valori di sicurezza alimentare proposti dai Regolamenti Europei DE 2002/32/CE e CE 1881/2006. I valori con i quali vengono confrontate le concentrazioni nel mais si riferiscono in modo generico alla categoria "cereali" e non in modo specifico alla coltura considerata.

	PIANTA - concentrazione al momento della raccolta			DE 2002/32/CE	Reg. CE 1881/2006	
	Erba Medica ( <i>Medicago Sativa</i> ) t=279	Mais ( <i>Zea Mays L.</i> ) t=230	Riso ( <i>Oryza Sativa L.</i> ) t=241	Erba Medica ( <i>Medicago Sativa</i> )	Cereali	Riso ( <i>Oryza Sativa</i> )
	[mg kg <sup>-1</sup> ]	[mg kg <sup>-1</sup> ]	[mg kg <sup>-1</sup> ]	[mg kg <sup>-1</sup> ]	[mg kg <sup>-1</sup> ]	[mg kg <sup>-1</sup> ]
Sb	3.82E-05	2.24E-04	1.05E-04	-	-	-
As	1.96E-04	3.22E-05	1.54E-05	2	-	0.25
Cd	8.85E-05	3.11E-05	5.58E-05	1	0.1	0.2
Cr	1.22E-04	1.03E-04	3.87E-05	-	-	-
Co	1.63E-03	1.19E-04	4.94E-03	-	-	-
Cu	5.10E-03	6.99E-03	6.27E-04	-	-	-
Pb	4.08E-05	1.91E-04	1.06E-03	40	0.2	0.2
Ni	1.22E-03	4.66E-04	2.22E-04	-	-	-
V	6.13E-04	3.73E-05	7.94E-06	-	-	-
Hg	1.64E-08	1.70E-07	2.12E-03	0.1	-	-
Mn	1.19E-02	3.59E-04	4.16E-04	-	-	-
Tl	1.90E-08	5.01E-06	1.63E-05	-	-	-
TCDD	8.08E-19	8.13E-20	7.34E-21	-	-	-
BaP	1.25E-08	9.81E-08	1.76E-08	-	-	-

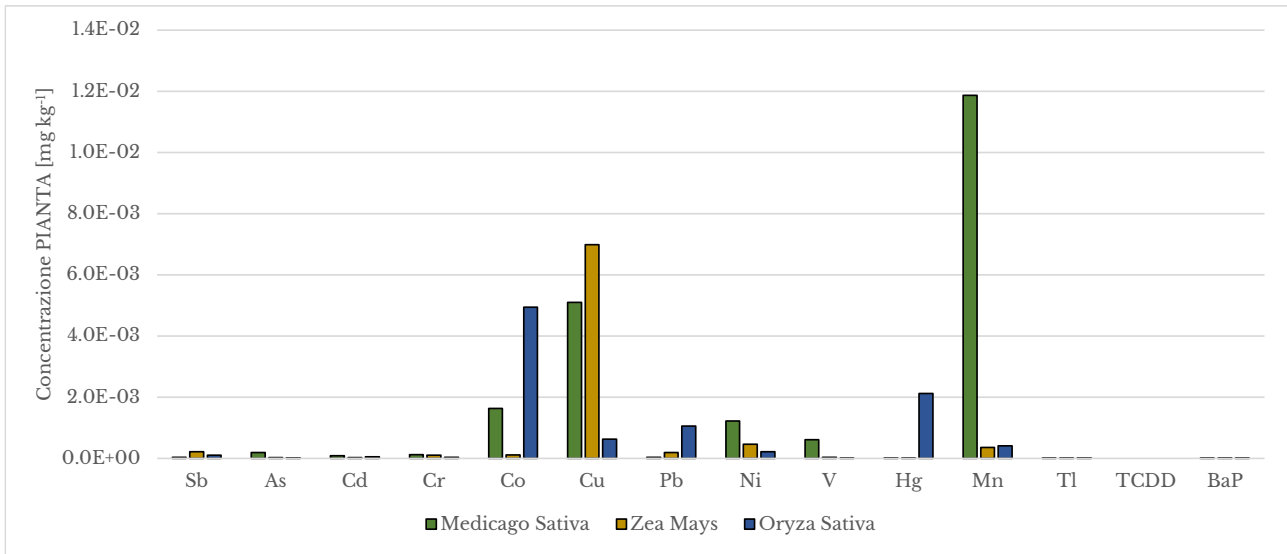



Figura 6: rappresentazione grafico della stima della contaminazione di erba medica, mais e riso coltivati presso il Comune di Cavaglià ed interessati dalle deposizioni atmosferiche totali dell’impianto.

### 3 CONCLUSIONI SULLA CONTAMINAZIONE DEI SUOLI AGRICOLI E DELLE COLTURE

I risultati delle simulazioni di contaminazione dei suoli agricoli e delle colture su di essi coltivate presso il Comune di Cavaglià (BI) e dovuta all'ipotetica esposizione alle deposizioni totali atmosferiche prodotte dall'Impianto nelle condizioni meteo-climatiche del 2020 mettono in evidenza che:

1. i terreni superficiali coltivati ad *erba medica* risultano, fra i tre considerati, i meno contaminati dalla sorgente in esame, probabilmente in funzione sia del carattere perenne della coltura, che degli effetti della coltivazione e delle proprietà tessiturali del suolo (Sabbioso Franco): in questi suoli sono state simulate le concentrazioni più basse per tutti i contaminanti considerati e anche dopo gli ipotetici 30 anni di attività dell'Impianto le concentrazioni imputabili alla sorgente in esame risulterebbero da 18 (Sb) a circa 85mila (TCDD) volte inferiori rispetto alle soglie di salvaguardia nello strato, quello superficiale, dove gli inquinanti si accumulano maggiormente. Con l'aumentare della profondità, all'interno della *root zone* (0-100 cm) si verifica una diminuzione delle concentrazioni (raggiungendo valori da un terzo ad un decimo rispetto alle concentrazioni simulate nel suolo superficiale). Nella *root zone* dei suoli coltivati ad *erba medica* gli inquinanti mostrano le concentrazioni più basse rispetto alle altre *root zone* dei suoli coltivati a *mais* e *riso*: solo Mn (in modo significativo) e Sb sembrano accumularsi preferibilmente in questi suoli rispetto agli altri. Con le concentrazioni della *root zone* appena descritte si stima che nella pianta vi sia un accumulo di As, Cd, Cr, Ni, V, Mn e TCDD maggiore rispetto alle altre due colture, ma comunque con valori assoluti almeno  $10^4$  volte inferiori ai valori soglia proposti per la salvaguardia alimentare. Al di sotto della *root zone* sono presenti in concentrazioni superiori a  $10^{-6}$  mg kg<sup>-1</sup> solo Sb, As e Mn.
2. I terreni superficiali coltivati a *mais* risultano, fra i tre considerati, quelli che mostrano le concentrazioni più alte di Co, Ni, Cu, Hg e BaP. Ad ogni modo, anche dopo gli ipotetici 30 anni di attività dell'Impianto queste concentrazioni risulterebbero da 10 (Sb) a circa 56mila (TCDD) volte inferiori rispetto alle soglie di salvaguardia nello strato, quello superficiale, dove gli inquinanti si accumulano maggiormente. Con l'aumentare della profondità, all'interno della *root zone* (0-100 cm) si verifica una diminuzione delle concentrazioni (raggiungendo valori da un quinto ad un decimo rispetto alle concentrazioni simulate nel suolo superficiale). Nella *root zone* dei suoli coltivati a *mais* si trovano valori più bassi di Mn e Sb rispetto alle *root zone* dei suoli coltivati a *erba medica*, ma concentrazioni di V e Cd più alte che in tutte le altre *root zone*. Con le concentrazioni della *root zone* appena descritte si stima che nella pianta un vi sia accumulo di Sb, Cu e BaP maggiore rispetto alle altre due colture, ma comunque con. valori almeno  $10^3$  volte

	Codice documento	Titolo
	CAVP09O10000PET1400101	Studio accumulo inquinanti coltivazioni

inferiori ai valori soglia proposti per la salvaguardia alimentare. Al di sotto della *root zone* sono presenti in concentrazioni superiori a  $10^{-6}$  mg kg<sup>-1</sup> solo Sb, As, V, Mn e TI.

3. i terreni superficiali coltivati a *riso* risultano, fra i tre considerati, quelli che mostrano le concentrazioni più alte di Cr, Pb, V, Sb, Mn, As, Cd, TI e TCDD. Ad ogni modo, anche dopo gli ipotetici 30 anni di attività dell'Impianto queste concentrazioni risulterebbero da 8 (Sb) a circa 34mila (TCDD) volte inferiori rispetto alle soglie di salvaguardia nello strato, quello superficiale, dove gli inquinanti si accumulano maggiormente. Con l'aumentare della profondità, all'interno della *root zone* (0-60 cm) si verifica una diminuzione delle concentrazioni (raggiungendo valori circa un quinto ad un decimo rispetto alle concentrazioni simulate nel suolo superficiale). Nella *root zone* dei suoli coltivati a *riso* si trovano valori più bassi di Mn e Sb rispetto al rispettivo strato dei suoli coltivati ad *erba medica* e di V e Cd rispetto ai suoli coltivati a *mais*, ma anche e probabilmente a ragione di una *root zone* meno profonda, si trovano concentrazioni più alte (da 1.3 a 2.5 volte) di As, Cr, Co, Cu, Pb, Hg, , TCDD e BaP e fino a 64 volte maggiore della concentrazione di TI simulata per la *root zone* del terreno coltivato ad *erba medica*. Con le concentrazioni della *root zone* appena descritta si stima che nella pianta vi sia un accumulo di Co, Pb, Hg e TI maggiore rispetto alle altre due colture, ma comunque con valori almeno 200 volte inferiori ai valori soglia proposti per la salvaguardia alimentare. Al di sotto della *root zone* sono presenti in concentrazioni inferiori (o uguali) a  $10^{-6}$  mg kg<sup>-1</sup> solo Cr, Pb, e BaP; la minor profondità della *root zone* (e quindi la maggior superficialità dello strato definito come suolo profondo) rende di fatto non direttamente confrontabili le concentrazioni più alte di Cd, Cr, Co, Cu Pb, Ni, V, Hg simulate per i suoli profondi relativi ai terreni coltivati a *riso*, rispetto ai suoli profondi dei terreni coltivati ad *erba medica* e *mais*.

Dott. Andrea Colombo



Dott. Federico Teoldi

