

**INDICAZIONI PER L'APPLICAZIONE DELL'ANALISI
DI RISCHIO ALLE MATRICI MATERIALI DI
RIPORTO ALL'INTERNO DEI SITI OGGETTO DI
PROCEDIMENTO DI BONIFICA**

INDICE

1	PREMESSA.....	4
2	INQUADRAMENTO TECNICO SULL'APPLICABILITÀ AI MATERIALI DI RIPORTO DELL'ALLEGATO 1 E DEI DOCUMENTI TECNICI DI RIFERIMENTO PER L'ANALISI DI RISCHIO DELLE BONIFICHE	4
3	CONDIZIONI PER L'APPLICABILITÀ DELL'ANALISI DI RISCHIO AI MATERIALI DI RIPORTO	6
4	ADR DIRETTA PER LA MATRICE SOLIDA	7
	4.1 Percorsi di migrazione e vie di esposizione	7
	4.1.1 <i>Percorsi diretti</i>	7
	4.1.2 <i>Inalazione vapori e polveri.....</i>	8
	4.1.3 <i>Lisciviazione in falda</i>	8
	4.2 Parametri di input per la AdR diretta	9
	4.2.1 <i>Geometria delle sorgenti</i>	9
	4.2.2 <i>Concentrazione rappresentativa della sorgente.....</i>	11
	4.2.3 <i>Kd per i metalli e speciazione MADEP.....</i>	11
	4.2.4 <i>Parametri della zona insatura</i>	11
	4.2.5 <i>Parametri della zona satura</i>	13
	4.2.6 <i>Indicazioni per alcuni parametri dei materiali antropici costituenti i MdR</i>	14
	4.2.7 <i>Valutazione dell'infiltrazione delle precipitazioni in caso di presenza di materiali di riporto.....</i>	15
5	VALUTAZIONE DI RISCHIO DALL'ELUATO.....	16
6	PUNTI DI CONFORMITÀ PER LE ACQUE SOTTERRANEE.....	16
7	CALCOLO DEL RISCHIO SANITARIO ED AMBIENTALE.....	17
	7.1 Portata effettiva di esposizione	17
	7.2 Calcolo del rischio e dell'indice di pericolo.....	17
	7.3 Calcolo del rischio per la falda	17
8	DEFINIZIONE DEI VALORI DI RIFERIMENTO (CSR) PER LA MATRICE SOLIDA E PER GLI ELUATI A SEGUITO DELLA ADR DIRETTA	17
	ALLEGATO – MODELLISTICA.....	A-1
A 1	PERCORSI DI INALAZIONE VAPORI E POLVERI	A-1
A 2	LISCIVIAZIONE IN FALDA	A-1
	A 2.1 Fattore di Lisciviazione.....	A-1
	A 2.1.1 <i>Equazioni di riferimento Manuale APAT.....</i>	A-1
	A 2.1.2 <i>Aggiornamento del Soil Attenuation Model per i MdR.....</i>	A-2
	A 2.1.3 <i>Fattore di lisciviazione a partire dalla matrice solida</i>	A-4
	A 2.1.4 <i>Fattore di lisciviazione a partire dall'eluato</i>	A-4
	A 2.2 Trasporto laterale in falda.....	A-5
A 3	FATTORE DI LISCIVIAZIONE PER LE SOSTANZE RICERCATE NELL'ELUATO PREVISTE DAL D.M. 05 FEBBRAIO1998 E NON INCLUSE NELLA NORMA BONIFICHE E/O NORMATE SOLO PER LE ACQUE SOTTERRANEE.....	A-5
	A 3.1 Valutazione degli effetti sul pH e sul COD del trasporto e della diluizione in falda dell'eluato	A-7

ACRONIMI, ABBREVIAZIONI E SIGLE

AdR – Analisi di rischio sito-specifica

APAT – Agenzia per la Protezione dell’Ambiente e per i Servizi Tecnici

ASTM – American Society for Testing and Materials

CRS – Concentrazione Rappresentativa alla Sorgente

CSC – Concentrazioni Soglia di Contaminazione

CSR – Concentrazioni Soglia di Rischio

D.L – Decreto Legge

D.Lgs. – Decreto Legislativo

D.M. – Decreto Ministeriale

EA UK – Environment Agency United Kingdom

INAIL - Istituto Nazionale per l'Assicurazione contro gli Infortuni sul Lavoro

ISS – Istituto Superiore di Sanità

JRC – Joint Research Center

Kd – Coefficiente di distribuzione solido/liquido

LG – Linee Guida

MADEP - Massachusetts Department of Environmental Protection

MCA – Materiali contenenti amianto

MdR – Materiali di Riporto

RBCA – Risk Based Corrective Action

SAM – Soil Attenuation Model

SNPA –Sistema nazionale per la Protezione dell’Ambiente

TUA – Testo Unico Ambientale

UCL – Upper Confidence Limit

USDA – United States Department of Agriculture

USEPA – Unites States Environmental Protection Agency

USGS - United States Geological Survey

1 Premessa

Si premette che i materiali di riporto (nel seguito “Mdr”) hanno una propria specificità e vanno differenziati rispetto ai suoli insaturi, come visto ampiamente per le valutazioni in fase di classificazione, caratterizzazione ed analisi come indicato nel documento “*Criteri di valutazione dello stato qualitativo delle matrici materiali di riporto all’interno dei siti oggetto di procedimento di bonifica*” (nel seguito, “Criteri di valutazione Mdr”). Tale distinzione si rende necessaria anche per la fase di analisi di rischio per cui è necessaria una **valutazione separata** che si affiancherà a quella delle altre matrici ambientali (suolo superficiale, suolo profondo e falda) nella definizione dello stato di contaminazione di un sito.

2 Inquadramento tecnico sull’applicabilità ai materiali di riporto dell’Allegato 1 e dei documenti tecnici di riferimento per l’Analisi di Rischio delle bonifiche

I principali riferimenti normativi e tecnici consolidati ed utilizzati per l’applicazione dell’Analisi di Rischio sito-specifica (nel seguito “AdR”) nell’ambito delle bonifiche sono l’Allegato 1 alla Parte IV, Titolo V e il Manuale APAT “Criteri Metodologici” del 2008¹.

In particolare, si ricorda che l’Allegato 1 al Titolo V della Parte Quarta del D.Lgs. 152/2006 prevede che procedure da utilizzare nell’Analisi di Rischio “*dovranno essere condotte mediante l’utilizzo di metodologie quale ad esempio ASTM PS 104, di comprovata validità sia dal punto di vista delle basi scientifiche che supportano gli algoritmi di calcolo, che della riproducibilità dei risultati*”. I Criteri metodologici sono inoltre stati elaborati sulla base delle metodologie dello standard ASTM citato dalla norma, fornendo le indicazioni tecniche per l’applicazione di una AdR di Livello 2, secondo la procedura RBCA (Risk Based Corrective Action)

I riferimenti tecnici citati, primo tra tutti lo standard ASTM E 2081-00², prevedono, per il livello 2 di analisi, l’applicazione di modelli analitici semplificati di trasporto della contaminazione e di esposizione dei recettori (umani ed ecologici) che utilizzano parametri che caratterizzano alcune proprietà della matrice da cui vengono rilasciati i contaminanti e attraverso cui avviene la migrazione degli stessi. La “parametrizzazione” della sorgente secondaria di contaminazione³ e più in generale delle matrici oggetto di trasferimento della contaminazione avviene facendo riferimento a caratteristiche di tipo fisico (tessitura, porosità, ecc.) e chimico (interazione delle particelle solide e delle altre fasi liquida e gassosa con i contaminanti) che comunemente sono proprie dei suoli e non di miscele suolo/materiale antropico di varia natura, in cui la componente antropica può essere non solo rilevante quantitativamente, ma anche presentare caratteristiche non facilmente assimilabili a quelle comunemente osservate per il terreno naturale⁴.

Le caratteristiche dei Mdr possono sensibilmente variare da caso a caso e dipendono fortemente dal grado di eterogeneità della miscela terreno/materiale antropico; non è raro, infatti, trovare materiali di riporto con caratteristiche chimico-fisiche diverse dai terreni naturali (si pensi, a titolo d’esempio, ai valori estremamente

¹ <http://www.isprambiente.gov.it/files/temi/siti-contaminati-02marzo08.pdf>

² Si evidenzia che lo Standard ASTM PS-104 98 era un “provisional standard” (PS) che è stato poi sostituito dalla versione definitiva ASTM E 2081-00 “Standard Guide for Risk-Based Corrective Action” <https://www.astm.org/e2081-00r15.html>, a cui si fa riferimento nel prosieguo del documento. Tale standard è stato ripubblicato nel 2022 ma, ai fini del presente documento, senza sostanziali modifiche rispetto alla versione del 2000.

³ Intesa come la matrice ambientale oggetto dell’AdR, così come definita nel Manuale APAT “Criteri Metodologici”

⁴ In altre parole, tutta la modellistica di trasporto degli inquinanti, sviluppata negli anni nell’ambito dell’Analisi di Rischio a livello internazionale, fa riferimento esclusivamente ai terreni. Ciò vuol dire che le equazioni, i parametri, le correlazioni e la derivazione delle caratteristiche di trasporto della contaminazione sono state tarate, calibrate e validate per i suoli, seppure assumendo una serie di ipotesi semplificative.

alcalini di pH caratteristici delle ceneri, pesanti e leggere, degli impianti di incenerimento e delle scorie di acciaieria o ai diversi valori di densità che può assumere la miscela terreno/materiale antropico in funzione della tipologia di materiale antropico e della sua quantità relativa rispetto al terreno naturale ad esso miscelato).

Pertanto, a prescindere da tutte le considerazioni di carattere giuridico e di interpretazione della normativa in merito all'assimilabilità dei materiali di riporto ai suoli, che pure evidentemente hanno una notevole importanza come evidenziato in premessa, si ritiene doveroso precisare che, dal punto di vista tecnico, una miscela eterogenea di suolo e materiale antropico molto raramente avrà caratteristiche chimico/fisiche assimilabili con buona approssimazione a quelle di un terreno naturale.

Facendo poi riferimento ai Criteri metodologici APAT ed in particolare ai parametri di esposizione al suolo contaminato per contatti diretti (es. tasso di ingestione e fattore di aderenza dermica), si fa presente che gli stessi sono determinati per il contatto con particelle di terreno e non per il contatto con materiali antropici (se pur miscelati al suolo) e quindi sono, in linea di principio, applicabili solo al terreno naturale, o, nel caso specifico, alla componente naturale (terreno) della miscela suolo/materiali antropici.

Una ulteriore considerazione riguarda la valutazione delle CSR per i materiali di riporto. Infatti, in generale, l'applicabilità dei fattori di trasporto "costanti" e quindi della condizione di "linearità" (ovvero diretta proporzionalità) tra la concentrazione nella sorgente, la concentrazione all'esposizione/punto di conformità ed il rischio ad essa associato si ritiene tecnicamente non percorribile in situazioni di forte eterogeneità del contesto⁵. Ciò è particolarmente vero per i MdR in funzione di quantità e tipologia di materiale di natura antropica presente. In questi contesti è difficilmente applicabile la condizione di omogeneità e isotropia della matrice che è alla base dei modelli analitici indicati dal Manuale APAT "Criteri Metodologici", utilizzati per il calcolo delle CSR.

Per altro, non è superfluo notare che i riferimenti tecnici di cui sopra (standard ASTM E 2081-00, Allegato 1, Criteri metodologici APAT) non prevedono metodologie specifiche per condurre valutazioni sul rischio a partire dai dati di concentrazione riscontrati nell'eluato a seguito di test di cessione, ossia l'eluato non è incluso tra le matrici ambientali definite dall'art. 240 del D.Lgs 152/2006.

Tutto ciò premesso, nelle more della definizione di una metodologia specifica finalizzata all'applicazione dell'Analisi di Rischio sito-specifica ai materiali di riporto, il presente documento propone, **in via provvisoria, di utilizzare parte dei parametri e della modellistica prevista dal Manuale APAT**, indicandone allo stesso tempo le limitazioni nonché, in casi specifici, i valori da adottare applicando il principio di cautela, al fine di fornire comunque uno strumento con una valenza operativa e che sia di supporto alle decisioni.

In particolare, lo strumento proposto è una **Analisi di Rischio in modalità diretta**⁶(di seguito "AdR diretta"), ossia la stima del rischio associato alle concentrazioni riscontrate nella matrice solida e/o nell'eluato.

⁵ La condizione di omogeneità della matrice è invece ritenuta dai documenti di riferimento (Standard ASTM, Manuale APAT) un'approssimazione percorribile nel caso dei suoli/sottosuoli anche in contesti eterogenei, in quanto trattasi della stessa matrice (suolo) e non di matrici differenti (suolo e materiale antropico). Ovviamente, per il suolo/sottosuolo questa approssimazione dei modelli può essere sempre verificata in contesti geologici eterogenei mediante indagini mirate e/o monitoraggi (es. campionamento dei gas interstiziali e/o monitoraggio delle acque sotterranee).

⁶ Il Titolo V della parte quarta del D.Lgs 152/06 dà alle CSR la finalità primaria di definizione dello stato di contaminazione del sito, ovvero la definizione dei "livelli di accettabilità per il sito" (Art.240).

Nei successivi paragrafi verranno comunque proposti anche dei criteri per la definizione delle CSR applicabili a tali materiali nel caso di interventi di bonifica.

3 Condizioni per l'applicabilità dell'analisi di rischio ai materiali di riporto

Secondo le indicazioni del documento "Criteri di valutazione Mdr", analisi di rischio sito-specifica non è contemplata nelle linee di evidenza per la valutazione degli esiti della caratterizzazione dei Mdr, bensì rientra nelle opzioni di gestione b), c) e d) delineate nel Cap. 5, ossia:

- Mdr con **valutazione non favorevole** del test di cessione/linee di evidenza e **conformi** alle CSC;
- Mdr con **valutazione favorevole** del test di cessione/linee di evidenza e **non conformi** alle CSC;
- Mdr con **valutazione non favorevole** del test di cessione/linee di evidenza e **non conformi** alle CSC.

Tuttavia, la possibilità o meno di applicare la procedura di AdR ai sensi della Parte Quarta, Titolo V del D.Lgs 152/2006 è in primo luogo subordinata a identificare la matrice in esame come "materiale di riporto", secondo l'interpretazione autentica fornita dal co.1 art. 3 del D.L. 2/2012 nonché secondo le ulteriori indicazioni delineate nei "Criteri di valutazione Mdr", inclusi i criteri per la selezione delle più idonee modalità di gestione.

Ciò detto, in presenza di materiali di natura antropica nell'insaturo, qualora gli stessi siano identificabili come Mdr in conformità alle indicazioni precedenti, tali matrici saranno gestite nell'ambito del procedimento di bonifica, con possibilità di applicazione di una AdR diretta. Il presente documento intende fornire indicazioni specifiche su tale modalità di applicazione dell'AdR⁷.

Tuttavia, in alcuni casi, benché l'utilizzo (o il recupero) di materiali di natura antropica sia stato regolarmente autorizzato (si pensi ad esempio alle procedure semplificate di recupero di cui al D.M. 5 febbraio 1998), la natura specifica degli stessi o il riscontro di evidenze di potenziale contaminazione successivamente alla messa in posto non consentono l'applicazione della metodologia di AdR attualmente utilizzata in ambito bonifiche. Si pensi, ad esempio, al rinvenimento di fase separata in seguito a contaminazione da idrocarburi successiva all'abbancamento del materiale. In tali casi, e per gli specifici orizzonti interessati, è esclusa l'applicazione dell'AdR in conformità al Manuale APAT "Criteri Metodologici"⁸ e andranno previste specifiche azioni atte a contenere o interrompere la migrazione dei contaminanti dalla "sorgente primaria" verso le

L'Allegato 1 al Titolo V della parte quarta del D.Lgs 152/06, che definisce i criteri per l'AdR sito-specifica fa riferimento all'applicazione dell'AdR in modalità inversa solo per il calcolo delle CSR intese come obiettivi di bonifica. Tuttavia, sempre l'Allegato 1 indica tra gli obiettivi dell'AdR quelli di "definire in modo rigoroso e cautelativo per l'ambiente gli obiettivi di bonifica aderenti alla realtà del sito, che rispettino i criteri di accettabilità del rischio cancerogeno e dell'indice di rischio assunti nei punti di conformità prescelti", comprendendo anche la definizione di valori obiettivo non necessariamente "calcolati", ma verificati in modalità diretta imponendo solo il criterio della "accettabilità del rischio". Né l'articolato normativo, né l'Allegato 1, inoltre, danno indicazioni specifiche su come definire i "livelli di accettabilità" per il sito ai fini della definizione dello "stato di contaminazione" dell'area e neppure su come effettuare l'AdR nel caso in cui non si agisca sulla sorgente di contaminazione (bonifica), ma si adottino strategie di riduzione/gestione del rischio (messa in sicurezza operativa, messa in sicurezza permanente, limitazioni d'uso, ecc.).

⁷ Dagli scenari riportati è esclusa la fattispecie dei rifiuti (es. abbancamenti effettuati in assenza di autorizzazione), che andranno gestiti ai sensi nella normativa vigente in materia di rifiuti e che pertanto esulano dalle finalità del presente documento.

⁸ Tale esclusione trova riscontro anche nell'Allegato 2 al Decreto Direttoriale DG RIA n. 269/2021 "Contenuti ed indicazioni tecniche minimi da fornire per la presentazione dell'analisi di rischio sito specifica nell'ambito dei procedimenti relativi ai Siti di Interesse Nazionale".

matrici ambientali suolo/sottosuolo, materiali di riporto e acque sotterranee. Nel prosieguo del documento non si farà pertanto riferimento a questa fattispecie.

Infine, si specifica che il presente documento non è applicabile ai casi in cui la frazione antropica del MdR sia costituito da MCA.

Ciò premesso, i materiali di riporto, hanno una propria specificità che, come meglio riportato nel seguito del documento, determina l'esigenza di una valutazione *ad hoc*, separata da quella riguardante i suoli insaturi.

Pertanto, ai fini dell'AdR, le sorgenti "materiali di riporto" saranno considerate in maniera distinta rispetto alle altre sorgenti secondarie della contaminazione eventualmente individuate nel sito (suolo superficiale, suolo profondo e falda), ossia dovrà prevedersi una **trattazione separata**.

Di seguito sono riportate indicazioni per l'applicazione dell'AdR diretta alla matrice solida MdR e all'eluato.

4 AdR diretta per la matrice solida

Sono riportate di seguito le indicazioni relative ai percorsi attivabili e ai parametri da utilizzare per la AdR diretta dei materiali di riporto a partire dai dati di concentrazione misurati nella matrice solida.

4.1 Percorsi di migrazione e vie di esposizione

4.1.1 Percorsi diretti

Tali percorsi non prevedono l'applicazione di modelli di trasporto ma solo una valutazione dell'esposizione dei recettori di interesse e quindi si esaminerà l'applicabilità dei modelli e dei valori dei parametri di esposizione. La modellistica di esposizione è in generale dipendente dalla matrice di riferimento. Occorre pertanto valutare se i parametri utilizzati nell'ambito dell'AdR dei suoli siano idonei o meno per i materiali di riporto.

Alcuni dei parametri di esposizione riportati nel Manuale APAT "Criteri Metodologici" non dipendono dalla matrice e quindi sono agevolmente applicabili ai materiali di riporto; altri invece sono strettamente legati alla matrice e si ritiene di poterli applicare secondo quanto riportato nel Manuale APAT solo in via provvisoria (vedi Tabella 4.1).

Tabella 4.1 – Indicazione sull'utilizzo dei parametri di esposizione previsti per i percorsi diretti nel Manuale APAT (cfr. Tabella 3-4-3 del Manuale)

Parametro (Simbolo)	Applicabilità valori Manuale APAT ai MdR	Indicazioni
Durata di esposizione (ED)	Sì	
Frequenza di esposizione (EF)	Sì	
Tempo di Mediazione (AT)	Sì	
Tasso di Ingestione di Suolo (IR) ⁹	No	È possibile applicarli in via provvisoria

⁹ I valori parametri di esposizione "tasso di ingestione di suolo" e "fattore di aderenza dermica del suolo" sono determinati, in funzione dello scenario specifico (residenziale, ricreativo, commerciale/industriale), per il contatto con le particelle di terreno non grossolane. Infatti, USEPA (Soil Screening Guidance del 1996 ed Exposure Factor Handbook del 2011) fa riferimento alla frazione < 2mm per l'esposizione diretta a suolo. Pertanto, non sarebbero applicabili ai materiali di riporto

Frazione di suolo ingerita (FI) ¹⁰	No	È possibile applicarli in via provvisoria
Superficie di pelle esposta (SA)	Sì	
Fattore di aderenza dermica del suolo (AF) ⁹	No	È possibile applicarli in via provvisoria
Fattore di assorbimento dermico (ABS)	Sì	

4.1.2 Inalazione vapori e polveri

Tali percorsi prevedono l'utilizzo di modelli di trasporto della contaminazione dalla sorgente al recettore. Premettendo i limiti già citati, nei paragrafi seguenti si daranno indicazioni sui parametri da utilizzarsi partendo da quanto proposto nel Manuale APAT. Per quanto riguarda le equazioni si rimanda a quanto riportato in Allegato.

I parametri di esposizione per i percorsi di inalazione di vapori e polveri riportati nel Manuale APAT (cfr. Tabella 3-4-3 del Manuale) possono essere utilizzati in via provvisoria per la valutazione dei rischi ad essi associati.

Resta valida la possibilità di predisporre misure dirette sugli aeriformi seguendo le indicazioni delle LG SNPA 15/2018, 16/2018 con valutazione da effettuare secondo la LG SNPA 17/2018¹¹.

Per quel che concerne l'inalazione indoor di vapori, in aree fortemente antropizzate e nel caso di contesti fortemente eterogenei, si potrà prevedere la possibilità di attivare il percorso anche nel caso di edifici posti a oltre 50 m (30 m per gli idrocarburi) dalla sorgente per la presenza di vie preferenziali di migrazione dei vapori¹².

4.1.3 Lisciviazione in falda

La valutazione del percorso di lisciviazione in falda è prevista qualora siano state riscontrate eccedenze delle CSC nei Mdr o valutazione non favorevole del test di cessione/linee di evidenza. Possono verificarsi i seguenti casi:

- per i contaminanti non ricercati nel test di cessione la valutazione della lisciviazione in falda sarà effettuata a partire dalle concentrazioni riscontrate nella matrice solida;
- per i contaminanti ricercati nel test di cessione la valutazione della lisciviazione in falda sarà condotta a partire dalle concentrazioni rilevate nell'eluato¹³ (valutazione del rischio dall'eluato in modalità diretta).

¹⁰ Il parametro "frazione di suolo ingerita" si riferisce proprio al caso in cui vi siano altri elementi più grossolani per i quali non sono definibili i tassi di ingestione. Poiché, però, in molti casi, la componente antropica contaminata anche grossolana potrebbe essere oggetto di esposizione per ingestione con tassi diversi rispetto a quelli previsti per le particelle di terreno, il valore riportato dai Criteri Metodologici potrebbe essere non cautelativo.

¹¹ Progettazione del monitoraggio di vapori nei siti contaminati e relative Appendici (Linee Guida SNPA 15/2018); Metodiche analitiche per le misure di aeriformi nei siti contaminati (Linee Guida SNPA 16/2018); Procedura operativa per la valutazione e l'utilizzo dei dati derivanti da misure di gas interstiziali nell'analisi di rischio dei siti contaminati (Linee Guida SNPA 17/2018).

<https://www.isprambiente.gov.it/it/evidenza/pubblicazioni/no-homepage/le-linee-guida-sul-monitoraggio-degli-aeriformi-prodotte-dal-gruppo-di-lavoro-9-bis-del-snpa>

¹² Vedi Capitolo 4 - Linee Guida SNPA 15/2018.

¹³ Il test di cessione ai sensi della normativa vigente viene eseguito di prassi prevedendo un rapporto L/S di 10/1. Nelle condizioni reali dei Mdr in sito il rapporto L/S, pari a θ_T/ρ_b , è generalmente più basso, come indicato nel Report JRC del 2014 "Study on methodological aspects regarding limit values for pollutants in aggregates in the context of the

Nel caso in cui, secondo le indicazioni del documento “Criteri di valutazione MdR”, vi sia una valutazione favorevole delle linee di evidenza potrà essere valutata la possibilità di escludere il percorso di lisciviazione in falda¹⁴.

Le indicazioni relative alla valutazione del rischio per la falda a partire dai dati nell’eluato sono riportate nel par. 5.

4.2 Parametri di input per la AdR diretta

Si riportano di seguito le indicazioni per la selezione di alcuni parametri di input specifici per la AdR diretta dei materiali di riporto. Per tutti gli altri parametri non specificamente indicati nel documento si può far riferimento al Manuale APAT “Criteri Metodologici”.

4.2.1 Geometria delle sorgenti

Come anticipato in premessa, ai fini dell’AdR, le sorgenti “materiali di riporto” saranno considerate in maniera distinta rispetto alle altre sorgenti secondarie della contaminazione eventualmente individuate nel sito, ossia dovrà prevedersi una **trattazione separata**.

Nel caso della AdR diretta dalla matrice solida, occorrerà considerare la distinzione canonica tra sorgenti “superficiali” (0-1 m da p.c.) e sorgenti “profonde” (> 1 m da p.c.) al fine dell’attivazione dei percorsi di esposizione diretti, dell’inalazione di polveri e dell’inalazione di vapori, qualora i MdR interessino entrambi gli orizzonti.

Per quel che concerne la lisciviazione in falda, invece, sarà considerato l’intero orizzonte del MdR vista la previsione della norma di verificare l’eventuale rischio per la falda derivante dalla presenza di tali materiali e la necessità di valutare parallelamente anche gli esiti del test di cessione¹⁵ (per le indicazioni specifiche si rimanda al par. 5).

Si ritiene inoltre preferibile il raggruppamento in un’unica sorgente nel caso sia accertata la presenza di materiali di riporto della stessa natura (ovvero caratterizzati dalla stessa tipologia di materiale antropico) e che interessano i medesimi orizzonti (profondità e spessore del materiale). Viceversa, potranno essere identificate sorgenti distinte per i MdR aventi caratteristiche differenti in termini di tipologia di materiale antropico.

Nel caso in cui non sia possibile distinguere chiaramente specifici orizzonti/livelli di materiali di riporto, ai fini della definizione della geometria della sorgente MdR si farà riferimento a tutto l’orizzonte insaturo.

In linea generale potranno riscontrarsi i tre casi¹⁶ rappresentati in Figura 4.1. e descritti nel seguito:

possible development of end-of-waste criteria under the EU Waste Framework Directive - Final Report” EUR 26769 EN. Nelle condizioni indicate nel presente documento, esso può raggiungere valori anche di 0,4-0,5/1. Lo stesso report indica che questo aspetto può determinare una stima non realistica e potenzialmente non cautelativa dei picchi di concentrazione in acqua interstiziale per alcune sostanze, dato che “*nei test in colonna concentrazioni più elevate si registrano all’inizio nell’acqua interstiziale (ovverosia a bassi valori di rapporto L/S)*”. Per questo il rapporto suggerisce, per i casi giudicati potenzialmente critici, di eseguire il test batch anche a rapporti L/S più bassi (es. 2/1).

¹⁴ L’attivazione o meno della lisciviazione in falda deve tener conto sia della rappresentatività del dataset utilizzato per la valutazione delle linee di evidenza, sia delle eventuali azioni previste per limitare il trasferimento della contaminazione verso le acque sotterranee.

¹⁵ Limitatamente ai contaminanti ricercati nell’eluato.

¹⁶ Si fa riferimento ai materiali di riporto caratterizzati dalla stessa tipologia di materiale antropico

- Presenza della sola sorgente “Materiale di Riporto”: lo spessore dei materiali di riporto occupa l'intera zona insatura, fino alla frangia capillare; è invece assente suolo naturale tra il piano di falda e i materiali di riporto.
- Presenza della sorgente “Materiale di riporto” con suolo sottostante: tra il piano di falda e i materiali di riporto è presente terreno naturale. Qualora fossero riscontrati superamenti delle CSC nel suolo sottostante, dovranno essere condotte due valutazioni separate, una per il materiale di riporto e una per il terreno naturale sottostante.
- Presenza di suolo senza “Materiale di riporto”: in assenza di materiale di riporto, ogni valutazione sarà condotta ai sensi della Parte Quarta, Titolo V del TUA.

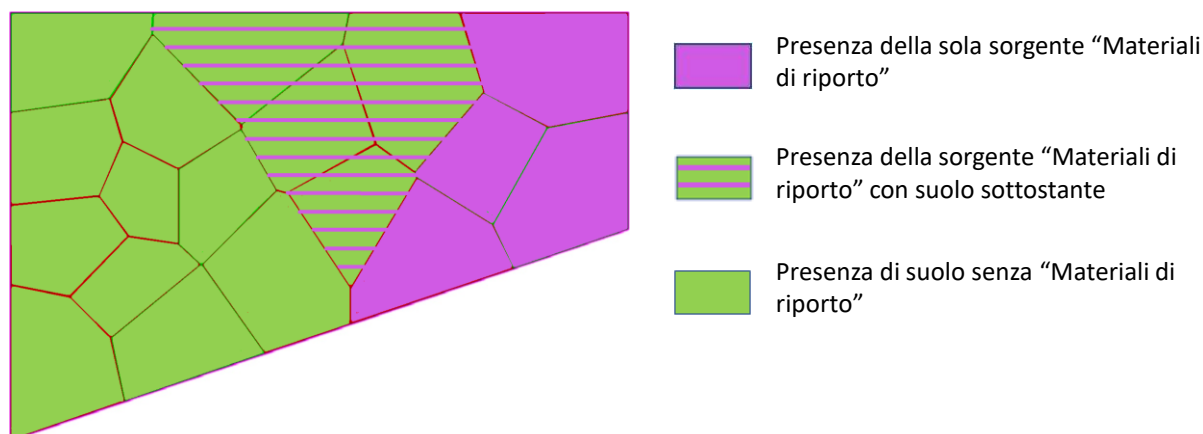


Figura 4.1 – Identificazione delle sorgenti in caso di presenza di materiali di riporto

La Tabella 4.2 riassume le indicazioni per la valutazione dei parametri geometrici delle sorgenti relativamente ai materiali di riporto.

Tabella 4.2 – Indicazioni sulla determinazione dei parametri geometrici della sorgente per i materiali di riporto

Parametro (simbolo)	Unità di misura	Applicabilità Manuale APAT ai MdR	Indicazioni
Superficie dell'area di interesse (A)	m ²	Si – valutazione sito specifica	Le aree interessate dai MdR devono in generale essere distinte dalle aree in cui vi è presenza di terreni, in quanto sono sub-aree diverse per caratteristiche della sorgente. Si possono raggruppare in un'unica sorgente i punti di indagine che interessano materiali di riporto della stessa natura (ovvero caratterizzati dalla stessa tipologia di materiale antropico) e i medesimi orizzonti (profondità e spessore del materiale). Viceversa, potranno essere identificate sorgenti distinte per i MdR aventi caratteristiche differenti in termini di tipologia di materiale antropico.
Dimensione caratteristica dell'area di interesse (W)	m		
Profondità minima della contaminazione rispetto al p.c. (Ls)	m		
Spessore della contaminazione nel suolo insaturo (d)	m	Si – valutazione sito specifica	I materiali di riporto potranno essere considerati separatamente nel caso in cui sia possibile individuare chiaramente specifici orizzonti/livelli interessati da materiali di riporto che possono essere valutati e gestiti separatamente rispetto ai terreni circostanti. Altrimenti si farà riferimento ad un unico orizzonte.
Spessore della contaminazione nella zona satura (dw)	m		

La definizione dei parametri geometrici delle sorgenti (utilizzo dei poligoni di Thiessen, analisi del vicinato, ecc.), tenendo conto delle indicazioni sopra riportate, dovrà seguire quanto indicato al par. 3.1.1 del Manuale APAT “Criteri Metodologici”.

4.2.2 *Concentrazione rappresentativa della sorgente*

Una volta determinata la geometria della sorgente, va valutata la concentrazione rappresentativa della sorgente (CRS). In analogia al Manuale APAT, se il numero di indagini riferite alla sorgente in esame, è pari o superiore a 10, si può procedere con l'utilizzo dell'UCL 95 di tutti i campioni anche quelli che non superano le concentrazioni di riferimento mentre nel caso in cui il numero di punti di indagine sia inferiore a 10 va scelta cautelativamente per ciascun analita la concentrazione maggiore riscontrata tra tutte le analisi.

Nel caso di utilizzo dell'UCL 95, va fatta infatti attenzione a che i campioni siano rappresentativi del materiale di riporto oggetto di valutazione, evitando così un effetto di diluizione con altri materiali di diversa natura.

4.2.3 *Kd per i metalli e speciazione MADEP*

La determinazione del Kd per i composti inorganici oggetto del test di cessione non si ritiene utile in quanto per la valutazione della lisciviazione in falda si utilizzeranno direttamente i dati dell'eluato¹⁷. Per i contaminanti inorganici non oggetto del test di cessione, si farà riferimento ai valori di Kd per la matrice solida riportati nella Banca Dati ISS-INAIL nella sua versione più aggiornata.

Anche nel caso di utilizzo dell'equazione modificata del SAM (vedi Allegato), si farà riferimento ai valori di Kd riportati nella Banca Dati ISS-INAIL¹⁸.

Viceversa, è opportuno effettuare su base sito-specifica la speciazione MADEP, qualora ci si trovi in presenza di Idrocarburi nei materiali di riporto.

4.2.4 *Parametri della zona insatura*

4.2.4.1 Valutazione dei parametri legati alla granulometria del suolo

Si premette che la determinazione della granulometria della zona insatura è prevista per la valutazione di alcuni parametri specifici del suolo (porosità totale, porosità efficace, contenuto volumetrico di aria e di acqua, spessore della frangia capillare) necessari alla determinazione del quantitativo di inquinante mobilizzabile in fase vapore e/o in soluzione. In alcuni casi è possibile determinare la classificazione granulometrica dei materiali di riporto (es. nel caso di ceneri/scorie miste a terreno), mentre in altri casi tale determinazione non è fisicamente possibile.

¹⁷ Si rammenta che per il Mercurio elementare, sostanza volatile, il parametro Kd interviene per la valutazione dell'emissione di vapori. Poiché sia il test di cessione previsto dalla norma per i MdR (rapporto solido-liquido 1:10) sia quello utilizzato per la determinazione del Kd (rapporto solido-liquido 1:2) non sono applicabili ai composti volatili, per il Mercurio elementare si utilizzerà il valore riportato nella Banca Dati ISS-INAIL.

¹⁸ Per l'utilizzo del SAM modificato, occorrerebbe valutare il “potenziale” assorbimento (rappresentato dal Kd) che l'insaturo non contaminato opera sui contaminanti nel corso della lisciviazione (effetto filtro). Tale potenziale non è determinabile con un test di cessione reale in quanto l'insaturo sotto la sorgente deve essere per definizione “non contaminato” ai fini dell'applicazione del SAM.

Tuttavia, a prescindere dalla possibilità o meno di effettuare prove granulometriche, le correlazioni proposte dal Manuale APAT, non sono applicabili a materiali diversi da terreni¹⁹. Per poter quindi effettuare la analisi di rischio per i materiali di riporto si propone di utilizzare i valori più conservativi riportati dal Manuale APAT e riportati nella Tabella 4.3.

Tabella 4.3 – Valori dei parametri della zona insatura legati alla granulometria da utilizzarsi per i materiali di riporto

Parametro (simbolo)	Unità di misura	Valore Manuale APAT	Indicazioni
Porosità totale (θ_T)	-	0,43	Valore massimo delle classi più permeabili
Porosità efficace (θ_e)	-	0,385	
Contenuto vol. acqua (θ_w)	-	0,068	Corrispondente alla classe più permeabile con il valore massimo di porosità efficace
Contenuto vol. aria (θ_a)	-	0,317	
Contenuto vol. acqua frangia capillare ($\theta_{w,cap}$)	-	0,33	Corrispondente alla classe più permeabile con il valore massimo di porosità efficace
Contenuto vol. aria frangia capillare ($\theta_{a,cap}$)	-	0,055	
Spessore della frangia capillare (h_{cap})	cm	30	Nel caso in cui il valore più conservativo sia il minimo e in caso di soggiacenza della falda non elevata (valore minimo delle classi meno permeabili)
		192	Nel caso in cui il valore più conservativo sia il massimo e in caso di soggiacenza della falda elevata (valore massimo delle classi meno permeabili)
Permeabilità a saturazione (K_{uns})	cm/anno	8,25E-03	Valore massimo
Permeabilità al vapore (K_v)	cm ²	1E-06	Valore massimo

4.2.4.2 Densità dei materiali di riporto

La densità dei materiali di riporto dipende fortemente dalla natura dei materiali antropici presenti nella miscela. Tenendo conto che per la maggior parte dei modelli utilizzati il valore più cautelativo è il massimo, si propongono i valori riportati nella Tabella 4.4.

¹⁹ Le correlazioni proposte dal Manuale APAT (Tabella 3.1-2 a pag. 30, Tabella 3.2-6 a pag.62 e Tabella 3.2-7 a pag.63) tra la classificazione granulometrica secondo USDA Textural Soil Classification e le proprietà del suolo, porosità totale, porosità efficace, contenuto volumetrico di aria e di acqua, oltre che lo spessore della frangia capillare, non sono applicabili a materiali diversi da terreni. Tali correlazioni sono determinate da funzioni di pedotrasferimento (*pedotransfer functions*) che si basano su prove sperimentali (curve di imbibizione e di essiccamento) condotte su terreni naturali a diversa tessitura e che consentono di determinare la capacità del suolo di trattenere o meno l'acqua al suo interno, oltre che le caratteristiche di permeabilità. È chiaro che in presenza di materiali diversi da terreni (anche se granulometricamente classificabili, ad esempio, come sabbie e/o limi e/o argille) le caratteristiche di idrofilicità e/o di idrofobicità della matrice solida possono essere notevolmente diverse.

Tabella 4.4 – Valori della densità da utilizzarsi per i materiali di riporto

Parametro (simbolo)	Unità di misura	Valore ²⁰	Indicazioni
Densità apparente (ρ_b)	g/cm ³	2	Nel caso in cui il materiale antropico sia costituito da residui da costruzione e demolizione e/o scorie
		1,0	Nel caso in cui il materiale antropico sia costituito da materie plastiche e/o legname e/o RSU
		1,7	In tutti gli altri casi (default Manuale APAT)

4.2.4.3 Frazione di carbonio organico e pH dei materiali di riporto

Il carbonio organico è un parametro che consente di valutare la naturale capacità del suolo di trattenere le sostanze organiche, soprattutto quelle maggiormente idrofobiche. Nel caso dei materiali di riporto la determinazione in campo di tale parametro può essere poco rappresentativa. Si ritiene quindi opportuno utilizzare un valore cautelativo di 0,001²¹.

Per il pH si propone la determinazione sito-specifica in quanto i MdR possono contenere materiale antropico fortemente alcalino che presenta valori rappresentativi superiori al default del Manuale APAT, pari a 6,8. In mancanza di dati sito-specifici si propongono i valori indicati nella Tabella 4.5.

Tabella 4.5 – Valori dei parametri frazione di carbonio organico e pH da utilizzarsi per i materiali di riporto zona insatura

Parametro (simbolo)	Unità di misura	Valore	Indicazioni
Frazione di carbonio organico (foc,uns)	-	0,001	Valore cautelativo
pHuns	-	8	Nel caso di materiali antropici costituiti da sostanze inorganiche alcaline (es. scorie e ceneri)
	-	4,9	Nel caso di materiali antropici costituiti da sostanze inorganiche acide
	-	6,8	Default Manuale APAT negli altri casi

4.2.5 Parametri della zona satura

Nel caso in cui i materiali di riporto siano presenti al di sotto del livello di falda ai fini dell'applicazione della modellistica presente nel Manuale APAT, andranno determinati i parametri specifici per tali materiali in maniera differente rispetto al materiale acquifero circostante.

La selezione dei valori caratteristici da assegnare complessivamente alla zona satura dovrà tener conto degli spessori saturi interessati dai MdR e dal materiale acquifero e delle caratteristiche di permeabilità degli stessi. Qualora non si riesca a discriminare quale delle due componenti sia maggiormente rappresentativa, allora si ritiene opportuna la selezione dei valori più cautelativi.

²⁰ Valore mediato tenendo conto della componente antropica in misura del 60% del volume totale e considerando per la parte antropica i parametri indicati nella Tabella 4.8 e per la parte suolo il default di 1,7 g/cm³

²¹ Valore minimo proposto da Connor J., Charles J. Newell C., Malander M., 1996. Parameter Estimation Guidelines for Risk-Based Corrective Action (RBCA) Modelling.

4.2.5.1 Conducibilità idraulica dei riporti in zona satura

Tale parametro, qualora possibile andrebbe determinato su base sito-specifica mediante prove in campo, che si ritengono significative anche per i materiali di riporto. In caso di mancanza di prove di campo, si riportano dei valori ragionevolmente cautelativi che possono essere utili.

Tabella 4.6 – Valori della conducibilità idraulica da utilizzarsi per i materiali di riporto

Parametro (simbolo)	Unità di misura	Valore ²²	Indicazioni
Conducibilità idraulica (Ksat)	m/s	5E-04	Valore rappresentativo della classe USGS GC- Ghiaie limose/argillose e della classe USGS SP- Sabbie ben pulite e ben gradate. Da utilizzarsi nel caso in cui il materiale antropico sia costituito da residui da costruzione e demolizione e/o scorie
		3E-05	Valore rappresentativo della classe USGS SM- Sabbie limose. Da utilizzarsi nel caso in cui il materiale antropico sia costituito da scorie.
		2E-06	Valore ragionevolmente cautelativo da utilizzarsi in tutti gli altri casi

4.2.5.2 Frazione di carbonio organico e pH dei materiali di riporto

Per quel che riguarda la zona satura, si ritengono valide le stesse considerazioni effettuate per l'insaturo. Anche per la zona satura si farà riferimento ai valori riportati nella Tabella 4.7.

Tabella 4.7 – Valori dei parametri frazione di carbonio organico e pH da utilizzarsi per i materiali di riporto zona satura

Parametro (simbolo)	Unità di misura	Valore	Indicazioni
Frazione di carbonio organico (foc,uns)	-	0,001	Valore cautelativo
pHuns	-	8	Nel caso di materiali antropici costituiti da sostanze inorganiche alcaline (es. scorie e ceneri)
	-	4,9	Nel caso di materiali antropici costituiti da sostanze inorganiche acide
	-	6,8	Default Manuale APAT negli altri casi

4.2.6 Indicazioni per alcuni parametri dei materiali antropici costituenti i MdR

Nel caso in cui vi siano specifici orizzonti costituiti quasi integralmente da materiale antropico, al fine di verificare la migrazione della contaminazione si ritiene maggiormente rappresentativo utilizzare parametri specifici delle componenti antropiche, piuttosto che dei terreni. In tali casi specifici, essendo alcuni parametri di difficile determinazione su base sito-specifica per le matrici MdR, è possibile utilizzare i valori riportati nella

²² Secondo le indicazioni dei documenti:

- SCS-USDA, 1991. Measurement and Estimation of Permeability of Soils for Animal Waste Storage Facility Design. Technical Note. Engineering Series No: 717.
- USGS, Water Supply Papers.

Tabella 4.8. Per i parametri non inclusi nella tabella si farà riferimento ai valori conservativi indicati in precedenza.

Tabella 4.8 – Valori di alcuni parametri specifici per alcune tipologie di materiale antropico

Parametro (simbolo)	Unità di misura	Ceneri leggere (Fly Ash) ²³	Ceneri pesanti (Bottom Ash) ²³	Scorie incenerimento ²³	Scorie ²³	C&D ^{23,24}
Porosità totale (θ_T)	-	0,541	0,578	0,45	0,375	0,397
Porosità efficace (θ_e)	-	0,494	0,553	0,401	0,355	0,384
Contenuto vol. acqua (θ_w)	-	0,187	0,076	0,116	0,055	0,032
Contenuto vol. aria (θ_a)	-	0,307	0,477	0,285	0,300	0,352
Densità apparente (ρ_b)	g/cm ³	0,7	1,2	1,0	1,5	2,4
Permeabilità a saturazione (Kuns) e Conducibilità idraulica nel saturo (Ksat)	cm/s	5E-05	4,1E-03	1E-02	4,1E-02	1E-02

È opportuno ribadire comunque che l'utilizzo di parametri specifici della componente antropica non può essere esteso alle matrici identificate come "sorgenti primarie" o come "rifiuti" che sono esclusi dall'applicazione dell'AdR in conformità alle norme tecniche e ai documenti di riferimento (Manuale APAT) relative alle bonifiche dei siti contaminati. Tali concetti sono stati già evidenziati anche nel presente documento (cfr. par 3).

4.2.7 Valutazione dell'infiltrazione delle precipitazioni in caso di presenza di materiali di riporto

In generale, in presenza di materiali di riporto, per il calcolo dell'infiltrazione delle precipitazioni si ritiene opportuno, in via cautelativa, utilizzare sempre la correlazione n. 325 prevista dal Manuale APAT a pag. 64 e relativa ai terreni più grossolani (sand) e riportata di seguito.

$$I_{ef} = 0,0018 \cdot P^2 \quad \text{per terreni sabbiosi (SAND)}$$

Si ricorda che sia i valori di precipitazione sia i corrispondenti calcolati di infiltrazione vanno espressi in cm/anno.

Qualora nell'insaturo vi siano orizzonti meno permeabili al di sopra e/o al di sotto dei materiali di riporto dotati di una certa potenza e continuità spaziale, si potranno utilizzare le correlazioni previste dal Manuale APAT per i materiali più fini (limi e/o argille).

Si potrà infine tener conto anche della presenza di pavimentazioni e/o impermeabilizzazioni qualora rilevanti ai fini della definizione del modello concettuale relativo allo scenario da valutare. Si ricorda che il Manuale

²³ USEPA (2020). Hydrologic Evaluation of Landfill Performance: HELP 4.0 User Manual. EPA/600/B-20/219. January 2020.; EA UK (2003). The Development of LandSim 2.5. NGWCLC Report GW03/09 September 2003; Golder&Associates (2011). GasSim 2.5 Users Manual.

²⁴ Norma UNI 11531-1

APAT prevede in linea generale una riduzione massima dell'infiltrazione per effetto della presenza di pavimentazioni pari al 10% del valore in assenza delle stesse²⁵.

5 Valutazione di rischio dall'eluato

La valutazione del rischio da eluato viene effettuata in modalità diretta (calcolo del rischio per le acque sotterranee) per il percorso di lisciviazione in falda relativamente ai contaminanti oggetto del test di cessione, secondo le indicazioni di cui al par. 4.1.3.

In linea teorica, è possibile inserire in input nei software normalmente utilizzati per l'elaborazione dell'AdR i dati dell'eluato ad alcune delle equazioni di trasporto previste dal Manuale APAT (tale applicazione è prevista sia dal software RBCA Toolkit, sia dal software Risknet con le limitazioni riportate nella nota tecnica approvata con Delibera SNPA n. 68/2020²⁶). L'utilizzo in input dei dati dell'eluato rispetto alla matrice solida consente di by-passare il modello di ripartizione all'equilibrio.

È possibile definire il fattore di lisciviazione in falda a partire dai dati nell'eluato come riportato in allegato al presente documento. Nell'Allegato sono anche riportate indicazioni tecniche in merito alla valutazione del rischio per i parametri previsti dal D.M. 05 febbraio 1998 ma non inclusi nella normativa sulle bonifiche, al fine di indirizzare un percorso di valutazione in casi specifici²⁷.

Per la determinazione del valore rappresentativo di concentrazione nell'eluato, ai fini dell'elaborazione statistica, si farà riferimento, come per i terreni, ai punti di indagine e non ai campioni prelevati. Per la stima dei parametri da inserire nelle equazioni di trasporto, si faccia riferimento a quanto riportato nei paragrafi precedenti.

6 Punti di conformità per le acque sotterranee

In conformità alla norma, il o i punti di conformità per le acque sotterranee andranno fissati al limite del sito. La AdR diretta prevederà il confronto tra le concentrazioni attese ai POC e le relative CSC.

²⁵ Occorre evidenziare che il grado di infiltrazione dipende dalla continuità spaziale delle pavimentazioni e dalle loro caratteristiche. Ogni discontinuità (es. tra pavimentazioni diverse, o tra pavimentazioni ed edifici o tra aree pavimentate e aree non pavimentate) può determinare un accumulo e conseguente ingresso di acqua al di sotto della pavimentazione. Considerando che la permeabilità orizzontale dei terreni è circa un ordine di grandezza più elevata della permeabilità verticale, l'ingresso di acqua dai limiti esterni della pavimentazione può contribuire in maniera importante alla lisciviazione. Da queste considerazioni nasce il valore proposto nel Manuale APAT. Pertanto, in analogia alla AdR dei suoli, andranno attentamente documentate e motivate (es. caratteristiche particolari delle pavimentazioni ai fini dell'impermeabilizzazione, elementi di sigillatura, continuità spaziale, presenza di confinamenti laterali, ecc.) le riduzioni inferiori al valore proposto dal Manuale APAT.

²⁶ https://www.isprambiente.gov.it/it/attivita/suolo-e-territorio/siti-contaminati/nota_tecnica.pdf

²⁷ Questo nei casi in cui l'Autorità Competente ritenga che tali parametri siano pertinenti al modello concettuale e quindi debbano essere valutati nell'ambito del procedimento di bonifica.

7 Calcolo del rischio sanitario ed ambientale

7.1 Portata effettiva di esposizione

L'esposizione è data dal prodotto tra la concentrazione al punto di esposizione e nella matrice di esposizione (C_{POE}) e la portata effettiva di esposizione (EM) che dipende dalle differenti vie di esposizione valutate (ingestione, contatto dermico, inalazione indoor e outdoor di vapori e polveri), ovvero:

$$E = C_{POE} \cdot EM$$

Le equazioni per il calcolo delle portate effettive di esposizione per tutti i percorsi attivabili dai materiali di riporto sono riportate nel Manuale APAT (cfr. par. 3.4.1 e 3.4.2)

7.2 Calcolo del rischio e dell'indice di pericolo

Per quel concerne il calcolo del rischio cancerogeno e dell'indice di pericolo anche in riferimento al cumulo dei percorsi e delle sostanze si faccia riferimento alle equazioni riportate ai par. 4.1 e 4.2 del Manuale APAT.

7.3 Calcolo del rischio per la falda

Per quel che concerne il calcolo del rischio per la falda si può far riferimento alle equazioni riportate al par. 4.3 del Manuale APAT.

8 Definizione dei valori di riferimento (CSR) per la matrice solida e per gli eluati a seguito della AdR diretta

Stante l'inidoneità delle equazioni riportate nello Standard ASTM e nel Manuale APAT al calcolo matematico in modalità inversa delle CSR per i Mdr (vedi par. 3) nonché dei valori obiettivo per gli eluati oggetto di test di cessione, si propone una metodologia alternativa che sia basata sugli esiti della AdR diretta.

Leggendo in maniera coordinata le indicazioni dell'articolato normativo e dell'allegato tecnico, si può definire una ulteriore accezione tecnica che identifica le CSR come "*livelli di accettabilità della contaminazione*", intesi come qualunque valore di concentrazione a cui è associato un valore di rischio accettabile (non necessariamente la soglia massima di accettabilità del rischio) e che non determina la necessità di interventi.

Il concetto di "*livello di accettabilità*" può essere, inoltre, esteso all'analisi di rischio post-intervento per la verifica dell'accettabilità dei rischi associati ai livelli di contaminazioni presenti in sito in base alle nuove condizioni (nuovo modello concettuale) successive agli interventi²⁸.

Nel caso in cui la AdR diretta condotta sui materiali di riporto determini la non accettabilità dei rischi, così come previsti dalla norma, si propone di identificare i valori obiettivo (livelli di accettabilità) per i materiali di riporto in base agli interventi da effettuare sulla matrice solida e/o sull'eluato e verificando in modalità diretta i rischi ad essi associati, anche tenendo conto del Modello Concettuale Definitivo associato agli interventi stessi. L'AdR diretta post-intervento sarà effettuata anch'essa secondo le indicazioni riportate nel presente documento (Figura 8.1)

²⁸ Tale modalità di valutazione è prevista dalla Linea Guida SNPA 17/2018 "Procedura operativa per la valutazione e l'utilizzo dei dati derivanti da misure di gas interstiziali nell'analisi di rischio dei siti contaminati".
https://www.snpambiente.it/wp-content/uploads/2018/11/Linee_guida_SNPA_17_2018.pdf

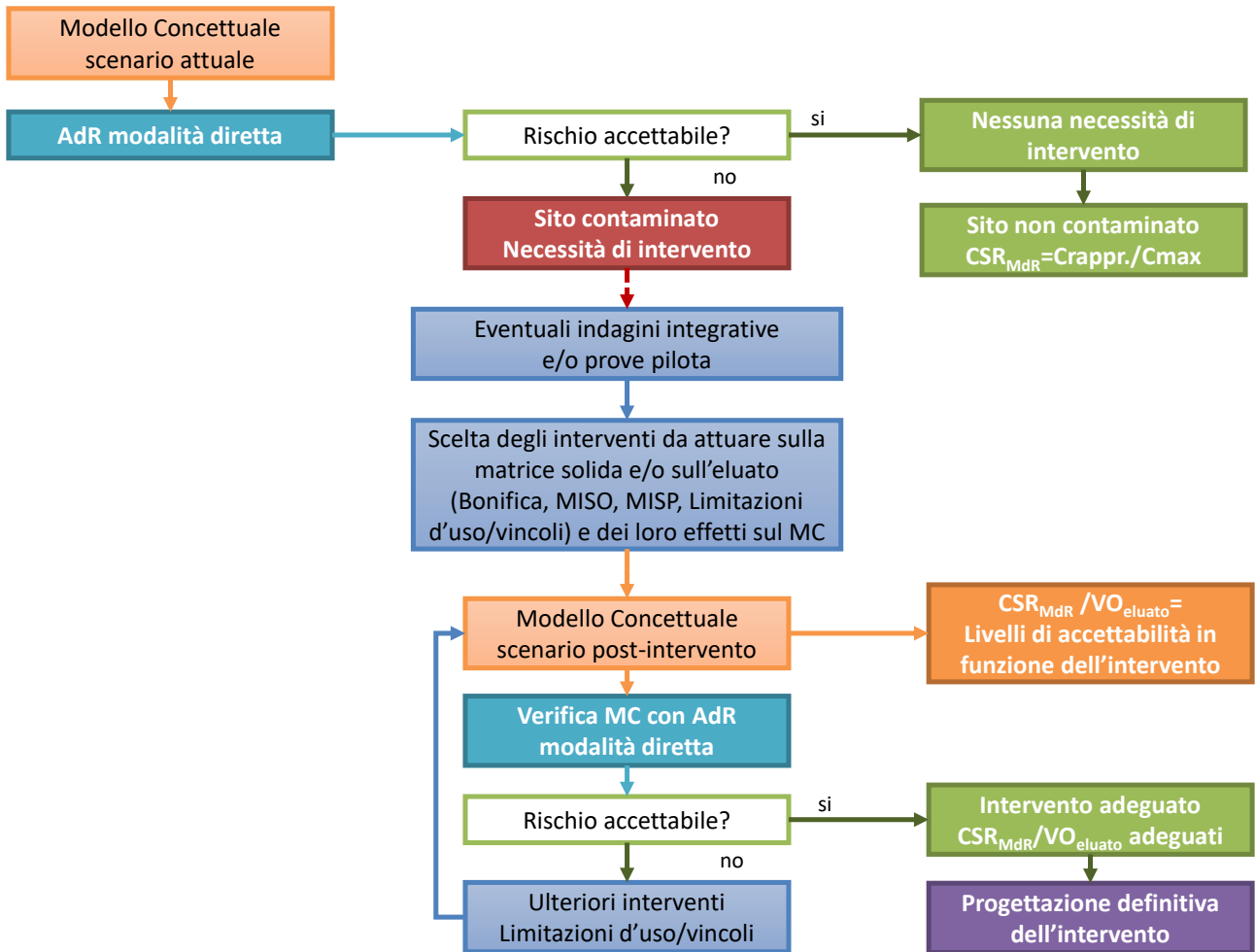


Figura 8.1 – Step della AdR diretta ai MdR e definizione dei valori obiettivo proposti nel presente documento.

Allegato – Modellistica

Si ricorda che i modelli riportati nello Standard ASTM e ripresi dal Manuale APAT “Criteri Metodologici” sono stati sviluppati e testati per i suoli e, pertanto, non potrebbero essere applicati in altri contesti. In attesa di sviluppare idonea modellistica specifica per i Mdr, si forniscono indicazioni per l’applicazione in via provvisoria dei modelli usualmente adottati in ambito bonifiche.

I parametri da utilizzare all’interno dei modelli sono quelli indicati nel presente documento. Per ciò che non è esplicitamente previsto, si rimanda al Manuale APAT “Criteri Metodologici”

A 1 Percorsi di inalazione vapori e polveri

Si riportano di seguito i modelli per la stima dell’emissione di vapori e polveri da suolo previsti dal Manuale APAT:

- VF_{ss} = fattore di volatilizzazione di vapori outdoor da suolo superficiale (par. 3.3.2a);
- VF_{samb} = fattore di volatilizzazione di vapori outdoor da suolo profondo (par. 3.3.2b);
- VF_{sest} = fattore di volatilizzazione di vapori indoor da suolo (par. 3.3.3a);
- PEF = emissione di particolato outdoor da suolo superficiale (par. 3.3.4);
- PEF_{in} = emissione di particolato indoor da suolo superficiale (par. 3.3.4);

Per la corretta applicazione di tali equazioni, si rimanda alle indicazioni del documento sull’utilizzo dei software approvato con Delibera SNPA n. 68/2020¹

Vista le possibili criticità legate all’applicazione di tali modelli in contesti fortemente eterogenei e con rilevante presenza di materiale antropico diverso dal suolo, si suggerisce, ove possibile, di sostituire parte della modellistica di riferimento con misure dirette in campo, ovvero:

- monitoraggi dei gas interstiziali, in conformità alle Linee Guida SNPA², per la valutazione dell’inalazione di vapori;
- monitoraggi delle polveri sottili in aria ambiente e/o utilizzo di deposimetri per la valutazione dell’inalazione di polveri.

A 2 Lisciviazione in falda

A 2.1 Fattore di lisciviazione

A 2.1.1 Equazioni di riferimento Manuale APAT

Il fattore di lisciviazione indicato dal Manuale APAT corrisponde al rapporto tra la concentrazione attesa in falda al limite della sorgente di contaminazione nell’insaturo (C_{gw} [mg/L]) e la concentrazione totale nella sorgente (C_s [mg/Kg]) ed è dato dalla seguente equazione:

¹ https://www.isprambiente.gov.it/it/attivita/suolo-e-territorio/siti-contaminati/nota_tecnica.pdf

² Progettazione del monitoraggio di vapori nei siti contaminati e relative Appendici (Linee Guida SNPA 15/2018); Metodiche analitiche per le misure di aeriformi nei siti contaminati (Linee Guida SNPA 16/2018); Procedura operativa per la valutazione e l’utilizzo dei dati derivanti da misure di gas interstiziali nell’analisi di rischio dei siti contaminati (Linee Guida SNPA 17/2018).
<https://www.isprambiente.gov.it/it/evidenza/pubblicazioni/no-homepage/le-linee-guida-sul-monitoraggio-degli-aeriformi-prodotte-dal-gruppo-di-lavoro-9-bis-del-snpa>

$$LF = \frac{C_{gw}}{C_s} = \frac{k_{ws} * SAM}{LDF}$$

dove:

- k_{ws} [Kg/L] è il coefficiente di ripartizione all'equilibrio che consente di stimare la concentrazione in acqua interstiziale a partire dalla concentrazione totale nella sorgente;
- SAM è il coefficiente di distribuzione nella colonna di suolo insaturo al di sotto della sorgente (Soil Attenuation Model) che tiene conto dell'attenuazione della contaminazione per l'effetto "filtro" del suolo insaturo non contaminato presente tra la sorgente e il livello di falda;
- LDF è il coefficiente di diluizione in falda (Leachate Dilution Factor) che tiene conto della diluizione delle concentrazioni negli eluati provenienti dall'insaturo all'interno del flusso di falda.

Nel caso della valutazione della lisciviazione dalla matrice solida (organici e inorganici non inclusi nel set analitico del test di cessione) il coefficiente k_{ws} può essere valutato utilizzando i parametri di input adattati ai MdR.

Nel caso della valutazione della lisciviazione dall'eluato (inorganici inclusi nel set analitico del test di cessione), il coefficiente k_{ws} viene by-passato utilizzando in input direttamente i risultati del test di cessione.

Il coefficiente LDF dipende dalle proprietà della zona satura e, in caso di presenza di MdR al di sotto del piano di falda, può essere valutato tenendo conto sia delle proprietà dei MdR nel saturo sia delle caratteristiche del materiale acquifero circostante.

Il coefficiente SAM , nella versione riportata dal Manuale APAT, presenta alcune criticità applicative in contesti fortemente eterogenei come quelli relativi ai MdR.

Di seguito si propone una versione aggiornata del Soil Attenuation Model per l'applicazione ai MdR.

A 2.1.2 Aggiornamento del Soil Attenuation Model per i MdR

Il modello SAM^3 , nella versione riportata dal Manuale APAT, parte dalle seguenti ipotesi principali:

- 1) lo strato di suolo insaturo al di sotto della sorgente ha le medesime proprietà chimico/fisiche (tessitura, permeabilità, carbonio organico, pH, ecc.) della sorgente;
- 2) all'interno dello strato di suolo insaturo al di sotto della sorgente vi è assenza di contaminazione⁴.

La condizione n. 1 è difficilmente riscontrabile nel caso dei MdR in quanto ci si trova in presenza di una rilevante eterogeneità del contesto e, pertanto, il coefficiente SAM non sarebbe applicabile.

Tuttavia, è possibile modificare l'equazione proposta dal Manuale APAT per tener conto della disomogeneità nelle caratteristiche della sorgente e dello strato di insaturo sottostante, come di seguito specificato. Il SAM parte dalla stima della massa totale del generico contaminante M_T all'interno del volume della sorgente V_s , data dalla seguente espressione:

$$M_T = C_{Ls} * (\theta_{ws} + K_{ds} * \rho_{bs} + H * \theta_{as}) * V_s$$

³ Connor, J A, Bowers, R L, Paquette, S M, and Newell, C J. Soil Attenuation Model (SAM) for derivation of risk-based soil remediation standards.

⁴ In realtà la semplice conformità alle CSC non garantirebbe tale condizione, ma occorrerebbe che i valori di concentrazione siano al di sotto della rilevabilità analitica.

dove:

- C_{LS} [mg/L] è la concentrazione nell'acqua interstiziale in corrispondenza della sorgente;
- ρ_{bs} [g/cm³] è la densità apparente della matrice (Mdr) che costituisce la sorgente;
- θ_{ws} e θ_{as} [adim.] sono rispettivamente il contenuto volumetrico di acqua e di aria interstiziale della matrice (Mdr) che costituisce la sorgente;
- K_{ds} [cm³/g] è il coefficiente di distribuzione sulla fase solida che costituisce la sorgente. Il K_{ds} per i metalli è derivato dalla Banca Dati ISS-INAIL nella versione più aggiornata in funzione del pH della sorgente, mentre gli organici è funzione del K_{oc} , anch'esso presente in Banca Dati e dalla frazione di carbonio organico f_{oc} presente nella sorgente ($K_{ds} = K_{oc} * f_{oc}$)⁵;
- H [adim.] è la costante di Henry che indica l'affinità alla fase gassosa. Viene derivata dalla Banca Dati ISS-INAIL nella versione più aggiornata;
- V_s [m³] è il volume della sorgente, che può essere approssimato dal prodotto tra la superficie A_s [m²] e lo spessore della sorgente d_s [m] ($V_s = A_s * d_s$).

Nell'ipotesi che il contaminante si "distribuisca" nella colonna di insaturo (in cui non vi sia presenza di contaminazione) con una concentrazione uniforme (C'_L [mg/L]) la massa totale a seguito della lisciviazione verso la falda si esprime come segue:

$$M_T = C'_L * [(\theta_{ws} + K_{ds} * \rho_{bs} + H * \theta_{as}) * V_s + (\theta_{wuns} + K_{duns} * \rho_{buns} + H * \theta_{auns}) * V_{uns}]$$

$$= C'_L * A' * [(\theta_{ws} + K_{ds} * \rho_{bs} + H * \theta_{as}) * d_s + (\theta_{wuns} + K_{duns} * \rho_{buns} + H * \theta_{auns}) * (L_F - d_s)]$$

dove:

- ρ_{buns} [g/cm³] è la densità apparente dell'insaturo al di sotto della sorgente;
- θ_{wuns} e θ_{aunss} [adim.] sono rispettivamente il contenuto volumetrico di acqua e di aria interstiziale dell'insaturo al di sotto della sorgente;
- K_{duns} [cm³/g] è il coefficiente di distribuzione sulla fase solida dell'insaturo al di sotto della sorgente. Il K_{duns} per i metalli è derivato dalla Banca Dati ISS-INAIL nella versione più aggiornata in funzione del pH dell'insaturo al di sotto della sorgente, mentre gli organici è funzione dalla frazione di carbonio organico f_{oc} presente nell'insaturo sotto la sorgente;
- L_F [m] è la distanza tra il top della sorgente e il livello di falda

Imponendo la legge di conservazione della massa, ed ipotizzando che la distribuzione avvenga attraverso la medesima superficie ($A_s = A'$)⁶ si ottiene:

$$C_{LS} * (\theta_{ws} + K_{ds} * \rho_{bs} + H * \theta_{as}) * d_s =$$

$$= C'_L * [(\theta_{ws} + K_{ds} * \rho_{bs} + H * \theta_{as}) * d_s + (\theta_{wuns} + K_{duns} * \rho_{buns} + H * \theta_{auns}) * (L_F - d_s)]$$

Pertanto, il coefficiente $SAM_{modificato}$ sarà:

⁵ Occorre evidenziare che mentre il parametro K_{oc} è una caratteristica intrinseca della sostanza e della sua relazione con il carbonio organico indipendente dalla matrice, il K_d è funzione della matrice solida con cui il contaminante interagisce. I valori di K_d riportati dalla Banca Dati ISS-INAIL si riferiscono ai suoli.

⁶ In realtà per via del fatto che la permeabilità orizzontale è circa un ordine di grandezza più elevata di quella verticale, questa condizione difficilmente si verifica nella realtà.

$$SAM_{\text{modificato}} = \frac{C'_L}{C_{Ls}} = \frac{d_s}{d_s + \frac{(\theta_{wuns} + K_{duns} * \rho_{buns} + H * \theta_{auns})}{(\theta_{ws} + K_{ds} * \rho_{bs} + H * \theta_{as})} * (L_F - d_s)}$$

Si può facilmente verificare che l'equazione precedente risulta equivalente a quella riportata nel Manuale APAT, imponendo che le caratteristiche θ_w , θ_a , ρ_b e K_d della sorgente e dell'insaturo al di sotto di essa siano equivalenti⁷.

Per poter applicare questa modifica all'equazione del SAM negli applicativi software di riferimento, occorrerà operare come segue.

$$SAM_{\text{criteri}} = \frac{C'_L}{C_{Ls}} = \frac{d_s}{L_F}$$

Sostituendo L_F con l'espressione $d_s + \frac{(\theta_{wuns} + K_{duns} * \rho_{buns} + H * \theta_{auns})}{(\theta_{ws} + K_{ds} * \rho_{bs} + H * \theta_{as})} * (L_F - d_s)$, si ottiene proprio il $SAM_{\text{modificato}}$.

È chiaro che andranno differenziate le caratteristiche θ_w , θ_a , ρ_b e K_d tra i MdR e il suolo insaturo sottostante. Qualora l'intero orizzonte insaturo sia costituito da MdR, allora si potrà utilizzare l'equazione del SAM riportata nel Manuale APAT.

A 2.1.3 Fattore di lisciviazione a partire dalla matrice solida

L'equazione di riferimento sarà la seguente:

$$LF = \frac{C_{gw}}{C_s} = \frac{k_{ws} * SAM_{\text{modificato}}}{LDF}$$

dove:

- k_{ws} [Kg/L] è il coefficiente di ripartizione all'equilibrio che consente di stimare la concentrazione in acqua interstiziale a partire dalla concentrazione totale nella sorgente;
- $SAM_{\text{modificato}}$ è il coefficiente di distribuzione nella colonna di suolo insaturo al di sotto della sorgente (Soil Attenuation Model) che tiene conto delle disomogeneità delle caratteristiche dei MdR rispetto ai suoli naturali sottostanti;
- LDF è il coefficiente di diluizione in falda (Leachate Dilution Factor) che tiene conto della diluizione delle concentrazioni negli eluati provenienti dall'insaturo all'interno del flusso di falda.

A 2.1.4 Fattore di lisciviazione a partire dall'eluato

L'equazione di riferimento sarà la seguente:

$$LF_{\text{eluato}} = \frac{C_{gw}}{C_{\text{eluato}}} = \frac{SAM_{\text{modificato}}}{LDF}$$

dove:

⁷ Ovviamente questo modello può essere utilizzabile anche nei casi in cui vi sia eterogeneità delle proprietà chimico/fisiche tra una sorgente nel suolo e il suolo insaturo sottostante.

- $SAM_{modificato}$ è il coefficiente di distribuzione nella colonna di suolo insaturo al di sotto della sorgente (Soil Attenuation Model) che tiene conto delle disomogeneità delle caratteristiche dei MdR rispetto ai suoli naturali sottostanti;
- LDF è il coefficiente di diluizione in falda (Leachate Dilution Factor) che tiene conto della diluizione delle concentrazioni negli eluati provenienti dall'insaturo all'interno del flusso di falda.

A 2.2 Trasporto laterale in falda

Per la valutazione delle concentrazioni attese nei Punti di Conformità (POC), il Manuale APAT prevede la determinazione del coefficiente DAF (Dilution Attenuation Factor), che esprime il rapporto tra la concentrazione del contaminante in falda in corrispondenza del limite della sorgente secondaria nel terreno e la concentrazione al punto di conformità situato ad una certa distanza ($x>0$) rispetto alla sorgente stessa.

$$DAF = \frac{C_{POC}}{C_{gw}}$$

Per le equazioni da utilizzare per il coefficiente DAF si rimanda al par. 3.3.1b del Manuale APAT "Criteri Metodologici".

A 3 Fattore di lisciviazione per le sostanze ricercate nell'eluato previste dal D.M. 05 febbraio 1998 e non incluse nella norma bonifiche e/o normate solo per le acque sotterranee

In questo paragrafo si forniscono indicazioni specifiche sulle modalità di applicazione dell'AdR diretta alle sostanze eventualmente ricercate nell'eluato in conformità al D.M. 05 febbraio 1998, ma non ricomprese nella norma bonifiche o generalmente non ricercate nella matrice solida (in quanto normate solo nella matrice acque sotterranee). Le indicazioni proposte intendono essere di supporto nei casi in cui l'Autorità Competente ritenga che tali parametri siano pertinenti al modello concettuale relativamente al percorso di lisciviazione in falda e quindi debbano essere valutate nell'ambito del procedimento di bonifica.

Nella Tabella A 3.1 sono riportati i parametri che possono essere ricercati nell'eluato e non sono normati in ambito bonifiche o normati solo per la matrice acque sotterranee con i limiti e/o valori di riferimento.

Tabella A 3.1 – Parametri ricercati nell'eluato e non normati in ambito bonifiche o normati solo per la matrice acque sotterranee – valori limite e di riferimento

Parametro ⁸	Unità di misura	Concentrazioni limite D.M. 05/02/1998	CSC D.Lgs. 152/06	Valori soglia acque sotterranee D.M. 165/2016
Nitrati	mg/L	50	-	50
Fluoruri	mg/L	1,5	1,5	1,5
Solfati	mg/L	250	250	250
Cloruri	mg/L	100	-	250
Cianuri	µg/L	50	50	50

⁸ Non è stato incluso il Vanadio nella lista perché in ambito bonifiche è normato nei terreni, sono state proposte da ISS le CSC relativamente alle acque di falda e ne sono indicate le caratteristiche chimico fisiche necessarie alla valutazione del percorso di lisciviazione nella Banca Dati ISS/INAIL nell'ultima versione di marzo 2018.

Non è stato, inoltre, considerato il parametro Amianto in quanto non sono disponibili in letteratura metodologie consolidate per la valutazione del percorso di lisciviazione in falda per questa tipologia di contaminazione. È pertanto esclusa l'applicazione dell'AdR diretta ai dati nell'eluato per tale parametro.

Bario	mg/L	1	0,7 ⁹	-
COD	mg/L	30	-	-
pH	-	5,5 < pH < 12	-	-

Considerando le equazioni di riferimento per la valutazione del rischio dall'eluato, si evidenzia che, ad eccezione di pH e COD, che non sono propriamente delle specifiche sostanze contaminanti, per tutti gli altri parametri è possibile adattare le equazioni esistenti per la valutazione del rischio a partire dall'eluato.

L'unica proprietà chimico/fisica che entra nella valutazione è il parametro K_d , ovvero il coefficiente di distribuzione suolo/acqua. Tale parametro è definibile esclusivamente per il Bario, mentre per gli altri parametri (inorganici e caratteristiche chimiche) non vi sono riferimenti in letteratura. Per questi ultimi, quindi, cautelativamente va ipotizzato che non vi sia nessuna interazione dell'eluato con la matrice solida e quindi è lecito imporre $K_d = 0$.

Nel caso di $K_d = 0$ il fattore di lisciviazione LF_{eluato} dipende esclusivamente dalle proprietà fisiche e idrauliche dell'insaturo e della falda e l'equazione diventa la seguente:

$$LF_{eluato} = \frac{C_{gw}}{C_{eluato}} = \frac{SAM_{modificato}}{LDF}$$

dove:

- $SAM_{modificato}$ tiene conto che per i parametri elencati in Tabella A 3.1 non può essere definita una costante di Henry:

$$SAM_{modificato} = \frac{C'_L}{C_{eluato}} = \frac{d_s}{d_s + \frac{\theta_{wuns}}{\theta_{ws}} * (L_F - d_s)}$$

- LDF è il coefficiente di diluizione in falda (Leachate Dilution Factor) che tiene conto della diluizione delle concentrazioni negli eluati provenienti dall'insaturo all'interno del flusso di falda.

I valori di riferimento per la valutazione del rischio per le acque sotterranee (rif. equazioni par. 4.3 del Manuale APAT) in ordine di priorità saranno:

- 1) le CSC per le acque sotterranee qualora disponibili
- 2) i valori soglia per le acque sotterranee di cui alla Parte III del D.Lgs. 152/06 integrata dal D.Lgs. 30/2009 (così come modificati dal D.M. 165/2016) che rappresentano i valori che discriminano il "buono stato chimico del corpo idrico sotterraneo"

Nella Tabella A 3.2 sono riportati i parametri ed i valori di riferimento per il calcolo del rischio per la falda secondo le indicazioni sopra riportate.

⁹ Rif. Parere ISS Prot. n. 48930 del 26/09/2007

Tabella A 3.2 – Parametri e valori di riferimento per il calcolo del rischio per la falda per alcuni parametri inclusi nel D.M 05/02/1998

Sostanza	Kd [Kg/L]	Indicazioni	Valori di riferimento acque sotterranee [mg/L]	Indicazioni
Nitrati	0	Scelta cautelativa. Assenza di indicazioni da letteratura.	50	Valori soglia acque sotterranee D.M. 165/2016
Fluoruri	0		1,5	CSC
Solfati	0		250	
Cloruri	0		250	Valori soglia acque sotterranee D.M. 165/2016
Cianuri	0		0,05	CSC
Bario	41	USEPA, Regional Screening Level (RSL) Chemical-specific Parameters Supporting Table November 2022	0,7	CSC (Definita da ISS)

È possibile effettuare queste valutazioni operando opportunamente nei software di riferimento.

A 3.1 Valutazione degli effetti sul pH e sul COD del trasporto e della diluizione in falda dell'eluato

Al fine di valutare l'attenuazione dei valori di pH per effetto della lisciviazione e della diluizione dell'eluato in falda, occorre in primo luogo convertire i valori rappresentativi di pH dell'eluato in concentrazione di ioni $[H^+]$ [mg/L], nel modo seguente:

$$[H^+] = \frac{10^{-pH} * PM(H^+)}{1000} = \frac{10^{-pH} * 1,01}{1000}$$

dove $PM(H^+)$ [g/mole] è la massa molecolare dello ione H^+ pari a 1,01 g/mole.

Inoltre, occorre evidenziare che anche l'acqua sotterranea ha un proprio valore di pH e quindi un valore di concentrazione di ioni $[H^+]_{falda}$ [mg/L] in ingresso alla zona di miscelazione. Pertanto, la concentrazione di ioni $[H^+]_{uscita}$ [mg/L] in uscita dalla zona di miscelazione avrà la seguente espressione:

$$[H^+]_{uscita} = \frac{I_{eff} * W}{I_{eff} * W + V_{gw} * \delta_{gw}} * SAM_{modificato} * [H^+]_{eluato} + \frac{V_{gw} * \delta_{gw}}{I_{eff} * W + V_{gw} * \delta_{gw}} * [H^+]_{falda}$$

dove:

- I_{eff} [m/anno] è l'infiltrazione delle precipitazioni
- W [m] è la dimensione della sorgente parallela al flusso di falda
- V_{gw} [m/anno] è la velocità di flusso della falda
- δ_{gw} [m] è lo spessore della zona di miscelazione in falda

Il pH finale derivante dalla miscelazione dell'eluato in falda sarà quindi pari a:

$$pH_{uscita} = -\log\left(\frac{[H^+]_{uscita} * 1000}{1,01}\right)$$

Pertanto, l'eventuale attenuazione dei valori di concentrazione di ioni $[H^+]$ nelle acque sotterranee dipenderà dalle condizioni di maggiore /minore acidità/basicità dell'eluato rispetto alla falda.

Anche per il COD in linea generale non si può assumere che la concentrazione in ingresso alla zona di miscelazione in falda sia nulla e pertanto si adotta una equazione simile a quella proposta per il pH, ovvero:

$$COD_{uscita} = \frac{I_{eff} * W}{I_{eff} * W + V_{gw} * \delta_{gw}} * SAM_{modificato} * COD_{eluato} + \frac{V_{gw} * \delta_{gw}}{I_{eff} * W + V_{gw} * \delta_{gw}} * COD_{falda}$$

Ovviamente tutto quanto sopra riportato necessita della conoscenza del pH e del COD nelle acque sotterranee a monte idrogeologico dei materiali di riporto.

Relativamente ai valori di riferimento per pH e COD ai fini della valutazione del rischio per le acque sotterranee (rif. equazioni par. 4.3 del Manuale APAT), non essendo ovviamente disponibili valori di CSC e/o valori soglia, visto che non si tratta di sostanze contaminanti specifiche, possono essere considerati i limiti del D.M. 05/02/1998.

La metodologia e le equazioni specifiche per COD e pH purtroppo, allo stato attuale non possono essere implementate nei software disponibili e si dovrà eventualmente procedere manualmente (es. in Excel).