

# VALIDAZIONE DEL SOFTWARE "RISK-NET 3.0 PRO"



RECONnet

Rete Nazionale sulla gestione e  
la Bonifica dei Siti Contaminati



# VALIDAZIONE DEL SOFTWARE "RISK-NET 3.0 Pro"

Giugno 2018 (Rev. 0)

*Il presente documento riporta i criteri e i risultati della validazione del software di analisi di rischio sanitario-ambientale Risk-net 3.0 (2018). Per la validazione del software è stata adottata la stessa metodologia e gli stessi casi studio utilizzati per la "Validazione del software Risk-net 1.0" (Reconnet, 2012), per lo "Studio comparativo di software di analisi di rischio sanitario-ambientale" (Reconnet, 2013) e per la "Validazione del software Risk-net 2.0" (Reconnet, 2015). Per maggiori dettagli sulla metodologia applicata si rimanda a tali documenti.*

## **Gruppo di lavoro RECONnet:**

Renato Baciocchi, Università degli studi di Roma "Tor Vergata"  
Simona Berardi, Istituto Nazionale Assicurazione contro gli Infortuni sul Lavoro (INAIL)  
Andrea Forni, Ordine degli Ingegneri della Provincia di Bologna  
Iason Verginelli, Università degli studi di Roma "Tor Vergata"  
Igor Villani, ARPAE Emilia Romagna

## **Coordinamento del GdL:**

Simona Berardi, Istituto Nazionale Assicurazione contro gli Infortuni sul Lavoro (INAIL)

**RECONnet**, Rete Nazionale sulla gestione e la Bonifica dei Siti Contaminati

Viale del Politecnico, 1  
00133 Roma  
www.reconnet.net

## **DISCLAIMER**

*Il presente prodotto è il risultato del lavoro coordinato in seno alla rete RECONNET "Rete Nazionale sulla gestione e la Bonifica dei Siti Contaminati". I prodotti elaborati dalla Rete sono tutelati dalle norme sul copyright e sono di esclusiva proprietà di tutte le parti coinvolte nell'Accordo. A tal riguardo i "Prodotti RECONnet" possono essere modificati e/ o revocati da RECONNET in qualsiasi momento e senza preavviso. Tutte le indicazioni e i dati presenti nei "Prodotti RECONnet" costituiscono una semplice guida di carattere informativo, finalizzata a conseguire un corretto orientamento per la valutazione e la diffusione di tecnologie e tematiche ambientali. Di conseguenza, la Rete RECONnet e i suoi membri non rilasciano alcuna garanzia e declinano ogni responsabilità in merito alla completezza e all'utilità delle informazioni, dei prodotti o dei processi divulgati, nonché agli eventuali danni derivanti dall'utilizzo degli stessi da parte degli utenti. Il riferimento e i richiami presenti nei documenti RECONNET relativi a tecnologie e prodotti offerti da terze parti non costituiscono un riconoscimento di garanzia e di qualità degli stessi. Le opinioni espresse dagli autori non rappresentano necessariamente quelle degli Enti di Controllo.*

# INDICE

1	METODOLOGIA DI VALIDAZIONE .....	4
2	CRITERI DI CALCOLO.....	6
2.1	Modello concettuale.....	6
2.2	Fattori di trasporto .....	10
3	RISULTATI DELLA VALIDAZIONE.....	17
3.1	Differenze rispetto alla versioni precedenti .....	17
3.2	Verifica delle equazioni governanti .....	18
3.3	Individuazione degli errori di implementazione .....	18
3.4	Controllo con altre soluzioni.....	18
3.4.1	Software analizzati .....	18
3.4.2	Casi studio e opzioni di calcolo.....	19
3.4.3	Risultati .....	19
4	CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE.....	27
	BIBLIOGRAFIA.....	28

# 1 METODOLOGIA DI VALIDAZIONE

---

Esistono in letteratura numerose definizioni per i termini validazione, verifica e taratura di un software. Questi termini comunque sono spesso utilizzati in modo intercambiabile con riferimento allo stesso concetto: il complesso di procedure necessarie per individuare le carenze di correttezza, completezza e affidabilità di un software. La validazione quindi consiste nel controllo di qualità del prodotto rispetto ai requisiti dello stesso, ossia nel controllo che il prodotto finito abbia funzionalità e prestazioni conformi con quelle stabilite all'inizio del processo di sviluppo.

La pianificazione e la realizzazione del processo di validazione sono attività che possono essere realizzate seguendo diversi approcci e metodologie (UNICHIM 2002, Cignoni et. al. 2009) che si differenziano in funzione delle caratteristiche e della complessità del software da validare e delle finalità che si intendono raggiungere.

La procedura di analisi di rischio comprende un insieme di formule analitiche e di modelli matematici che permettono di ricostruire determinati fenomeni reali. In particolare i modelli matematici utilizzati in un livello 2 di analisi, così come le formule, sono di tipo prettamente analitico. Con ciò è possibile affermare che l'analisi di rischio è supportata dall'utilizzo di modelli estremamente semplificati, tale aspetto è comunque compensato dalla conservatività che caratterizza i risultati della procedura e quindi gli output delle simulazioni.

La validazione del software "Risk-net" è stata quindi condotta applicando alcune specifiche metodologie, selezionate in funzione della semplicità che caratterizza la procedura di analisi di rischio, che sono riportate di seguito:

- Verifica del modello: La verifica del modello ha come obiettivo quello di stabilire l'adeguatezza del modello a rappresentare il sistema reale che deve essere simulato. Il modello implementato nel software "Risk-net" ricalca il modello concettuale del sito descritto nel documento (APAT, 2008) e per tale ragione non necessita di verifica.
- Verifica delle equazioni governanti: La correttezza della formattazione in termini matematici dello schema fisico corrisponde alla necessità che le equazioni governanti prescelte descrivano i processi in modo adeguato. Nell'analisi di rischio sanitario-ambientale, le equazioni governanti sono molteplici e riguardano essenzialmente la stima dei fattori di trasporto, della portata effettiva di esposizione, del rischio e/o dell'indice di pericolo. Come per il modello, anche le equazioni di governo contenute nel software in oggetto ricalcano quelle contenute nel documento (APAT, 2008) e per tale ragione non si pone dubbio alla loro validità. Unica eccezione riguarda l'introduzione di alcune opzioni di calcolo esplicitate nei paragrafi successivi.
- Individuazione degli errori di implementazione: A tal fine è stato effettuato un controllo interno e statico (Cignoni et. al. 2009), ossia un controllo proveniente dallo stesso soggetto impegnato nel processo di sviluppo del software e basato sulla analisi del codice di calcolo. I risultati di tale controllo sono riportati nei paragrafi successivi.

Nella fase di "Controllo con altre soluzioni" i risultati sono stati confrontati in termini di rapporto tra gli output di "RBCA Tool Kit" e quelli dell'"altra soluzione". L'RBCA Tool Kit è stato selezionato quale software di riferimento, in virtù dell'elevato grado di validazione e attendibilità dello stesso. Pertanto da tale confronto risulta che se:

- "Risultato = 1": i due valori sono coincidenti;
- "Risultato < 1": il valore restituito dall'RBCA Tool Kit è inferiore a quello dell'"altra soluzione";

- “Risultato > 1”: il valore restituito dall’RBCA Tool Kit è superiore a quello dell’“altra soluzione”;
- “Risultato = 2” (*oppure* “Risultato = 0,5”): il valore restituito dall’RBCA Tool Kit è il doppio (*oppure la metà*) rispetto a quello dell’“altra soluzione”;
- “Risultato = 10” (*oppure* “Risultato = 0,1”): il valore restituito dall’RBCA Tool Kit è di un ordine di grandezza superiore (*oppure inferiore*) rispetto a quello dell’“altra soluzione”.

E’ stato inoltre fissato il seguente limite di accettabilità per la differenza tra i due risultati:

$$0,9 \leq \text{“Risultato”} \leq 1,1$$

## 2 CRITERI DI CALCOLO

In questo capitolo vengono confrontati i criteri di calcolo implementati nel software Risk-net 3.0 Pro (2018) con quelli previsti nel doc APAT (2008) e nei software già oggetto di valutazione nello “Studio comparativo di software di analisi di rischio sanitario-ambientale” (Reconnet, 2013):

- RISC (Risk-Integrated Software for Cleanups) ver. 5.0, Spence Engineering (2011, USA).
- RBCA (Risk Based Corrective Action) Tool Kit for Chemical Releases ver. 2.5, Groundwater Service, Inc. Houston (2009, USA)
- GIUDITTA (Gestione Informatizzata Di Tollerabilità Ambientale) ver. 3.2, Provincia di Milano e URS Dames & Moore (2008, Italia)
- RACHEL (Risk Analysis Calculation Handbook for Environmental and Living-beings) ver. 1.1.5, Politecnico di Torino e Dream S.r.l. (2012, Italia)

In particolare il confronto è stato effettuato in termini di:

- modello concettuale attivabile nei diversi software;
- fattori di trasporto implementati nei diversi software;
- criteri utilizzati per il calcolo del rischio e degli obiettivi di bonifica.

### 2.1 MODELLO CONCETTUALE

Nel presente paragrafo sono evidenziate le sorgenti di contaminazione, le vie di esposizione, le modalità di esposizione e i bersagli presi in considerazione dai software esaminati. Nel seguito sono riportati i principali elementi che differenziano i software stessi.

#### Sorgenti di contaminazione

In Tabella 1 sono riportate le sorgenti di contaminazione prese in considerazione dai 5 software esaminati. È possibile osservare che tutti i software prevedono, come sorgente secondaria, il suolo superficiale (SS), il suolo profondo (SP) e la falda (GW). I due software RISC e RISK-NET considerano anche il soil gas, mentre GIUDITTA e RISK-NET considerano come sorgente anche l'eluato.

Tabella 1 - Modello concettuale: Sorgenti di contaminazione.

SORGENTE DI CONTAMINAZIONE	APAT (rev. 2)	RBCA Tool Kit ver. 2.5	RISC ver.5.0	GIUDITTA ver. 3.2	RACHEL ver. 1.1.5	RISK-NET ver. 3.0 Pro
Suolo superficiale	X	X	X	X	X	X
Suolo profondo	X	X	X	X	X	X
Falda	X	X	X	X	X	X
Soil gas	---	---	X	---	---	X
Eluato	---	---	---	X	---	X

Per l'inserimento della concentrazione rappresentativa alla sorgente, l'RBCA Tool Kit e RISC5 non differenziano tra suolo superficiale e suolo profondo. L'RBCA Tool Kit prevede l'utilizzo della legge di Raoult nel caso di presenza, accertata o presunta, di prodotto libero (NAPLs).

Per quanto riguarda il RISC5, inoltre, in sede di inserimento delle CRS del terreno (per percorso

volatilizzazione indoor) permette due opzioni in merito a tale sorgente: costante e in diminuzione. Per volatilizzazione outdoor da terreno, invece, la sorgente è considerata sempre in diminuzione mentre la volatilizzazione indoor/outdoor da falda la sorgente è sempre costante.

Nel caso in cui siano stati effettuati test di cessione, Giuditta permette di inserire in input, come concentrazione rappresentativa alla sorgente, la concentrazione nell'eluato. In alternativa, il software permette di calcolare l'eluato teorico a partire dalla concentrazione sul tal quale. Il software permette nella stessa simulazione di differenziare le dimensioni della sorgente di contaminazione in funzione sia della tipologia di comparto ambientale contaminato (SS, SP, GW) che della specie chimica contaminante.

Per quel che riguarda la volatilizzazione, RACHEL consente di inserire in input direttamente le concentrazioni misurate in aria in corrispondenza del bersaglio, in aggiunta a quanto proposto dal doc. APAT 2008. In tal caso non si ha trasporto.

In Risk-net, qualora disponibili, è possibile inserire le concentrazioni misurate nel soil-gas, nelle camere di flusso o in aria ambiente (outdoor e indoor) che vengono utilizzate per il calcolo dei rischi di inalazione di vapori indoor ed outdoor (opzione aggiuntiva rispetto a quanto previsto nelle linee guida APAT, 2008).

### Vie di esposizione

In Tabella 2 sono riportate le vie di esposizione prese in considerazione dai 5 software. Tutti prevedono i contatti diretti per il suolo superficiale (SS), l'aria outdoor on-site, l'aria indoor on-site e la falda (GW). Solo GIUDITTA non contempla l'aria indoor off-site, mentre RBCA, RACHEL e RISK-NET considerano anche l'aria outdoor off-site. RBCA e RISC tengono conto della catena alimentare.

**Tabella 2 - Modello concettuale: Vie di esposizione.**

VIA DI ESPOSIZIONE	APAT (rev. 2)	RBCA Tool Kit ver. 2.5	RISC ver.5.0	GIUDITTA ver. 3.2	RACHEL ver. 1.1.5	RISK-NET ver. 3.0 Pro
Suolo superficiale	X	X	X	X	X	X
Aria outdoor on-site	X	X	X	X	X	X
Aria outdoor off-site	X	X	---	---	X	X
Aria indoor on-site	X	X	X	X	X	X
Aria indoor off-site	---	X	X	---	X	X
Falda	X	X	X	X	X	X
Acqua superficiale	---	X	X	---	---	---
Catena alimentare	---	X	X	---	---	---

### Modalità di esposizione

In Tabella 3 sono riportate le modalità di esposizione prese in considerazione dai 5 software. Tutti i software comprendono:

- l'ingestione e il contatto dermico con suolo per bersagli on-site;
- l'inalazione di polveri outdoor da SS per bersagli on-site;
- l'inalazione di polveri indoor da SS per bersagli on-site (ad eccezione di RBCA e RISC);
- l'inalazione di vapori outdoor da SS, SP e GW per bersagli on e off-site (in tal caso fa eccezione GIUDITTA che considera solo il bersaglio on-site),
- l'inalazione di vapori indoor da SS, SP e GW per bersagli on e off-site (ad eccezione di

GIUDITTA che considera solo il bersaglio on-site per i valori da falda);

- l'ingestione di acqua di falda ad uso umano (ad eccezione di GIUDITTA).

Inoltre, tutti i software, ad eccezione di RISC permettono di stimare il rischio per la falda al punto di conformità.

Solo il software RISC prevede, come modalità di esposizione il contatto dermico e l'inalazione durante la doccia, l'ingestione, il contatto dermico e l'inalazione di vapori da acqua ad uso irrigazione.

Riguardo il confronto con valori limite di riferimento, tale opzione è attivabile solo con RBCA nei casi di inalazione outdoor e indoor, e nel caso di acque superficiali ad uso ricreativo.

RBCA, RISC e RACHEL comprendono anche l'ingestione e il contatto dermico con acqua durante il bagno in acque superficiali.

Infine riguardo la catena alimentare, RBCA e RISC prevedono l'ingestione di vegetali che crescono su terreno contaminato; RBCA comprende anche il consumo di pesce, mentre RISC l'ingestione di vegetali irrigati con acque contaminate.

**Tabella 3 - Modello concettuale: Modalità di esposizione.**

MODALITA' DI ESPOSIZIONE		APAT (rev. 2)	RBCA Tool Kit ver. 2.5	RISC ver.5.0	GIUDITTA ver. 3.2	RACHEL ver. 1.1.5	RISK-NET ver. 3.0 Pro
<b>CONTATTO DIRETTO CON SUOLO</b>							
Ingestione di suolo	on-site	X	X	X	X	X	X
Contatto dermico	on-site	X	X	X	X	X	X
<b>ESPOSIZIONE OUTDOOR</b>							
Inalazione di polveri da SS	on-site	X	X	X	X	X	X
Inalazione di vapori da SS	on e off-site	X	X	X	X (no off-site)	X	X
Inalazione di vapori da SP	on e off-site	X	X	X	X (no off-site)	X	X
Inalazione di vapori da GW	on e off-site	X	X	X	X (no off-site)	X	X
Confronto con valore limite di riferimento	on e off-site	---	X	---	---	---	---
<b>ESPOSIZIONE INDOOR</b>							
Inalazione di polveri da SS	on-site	X	---	---	X	X	X
Inalazione di vapori da SS	on-site	X	X	X	X	X	X
Inalazione di vapori da SP	on-site	X	X	X	X	X	X
Inalazione di vapori da GW	on e off-site	X (no off-site)	X	X	X (no off-site)	X	X
Confronto con valore limite di riferimento	on-site	---	X	---	---	---	---
<b>ACQUA DI FALDA AD USO UMANO</b>							
Ingestione	on e off-site	---	X	X	---	X	X
Rischio per la falda al punto di conformità	on e off-site	X	X	---	X	X	X
Contatto dermico durante la doccia	on e off-site	---	---	X	---	---	---
Inalazione durante la doccia	on e off-site	---	---	X	---	---	---
<b>ACQUA SUPERFICIALE AD USO RICREAZIONALE</b>							
Ingestione durante il bagno	on e off-site	---	X	X	---	X	---
Contatto dermico durante il bagno	on e off-site	---	X	X	---	X	---
Confronto con valore limite di riferimento	on e off-site	---	X	---	---	---	---
<b>ACQUA AD USO IRRIGAZIONE (DA FALDA SOTTERRANEA)</b>							
Ingestione accidentale	on e off-site	---	---	X	---	---	---
Contatto dermico	on e off-site	---	---	X	---	---	---
Inalazione di vapori	on e off-site	---	---	X	---	---	---
<b>CATENA ALIMENTARE</b>							
Consumo di pesce	on e off-site	---	X	---	---	---	---
Ingestione di vegetali che crescono su terreno contaminato	on e off-site	---	X	X	---	---	---
Ingestione di vegetali irrigati con acque contaminate	on e off-site	---	---	X	---	---	---

L'RBCA Tool Kit, Giuditta, RISK-NET e RACHEL permettono di confrontare la concentrazione in falda al punto di conformità con una concentrazione limite di riferimento, il cui valore può essere inserito dall'utente.

L'RBCA Tool Kit permette inoltre di confrontare la concentrazione, stimata dal software, nelle acque superficiali e nell'aria (outdoor e indoor) con una concentrazione limite di riferimento, il cui valore può essere inserito dall'utente.

Nel caso di inalazione di vapori, l'RBCA Tool Kit non richiede l'inserimento in input del tasso di inalazione indoor e outdoor poiché nella sua banca dati anziché lo SF Inal. e la RfD Inal. sono richiesti i valori di UCR (Unit Cancer Risk) e di RfC Inal (Reference Concentration). Quindi nel caso in cui fosse necessario modificare il tasso di inalazione si deve intervenire su tali parametri tossicologici.

In RACHEL vengono utilizzati gli SF e RfD senza necessità di conversione alcuna.

In Risk-net, in accordo con le linee guida APAT, i parametri tossicologici richiesti nel caso di inalazione di vapori sono le Reference dose (RfD) e gli Slope Factor (SF). Tuttavia, in accordo con quanto previsto nella nuova versione della Banca Dati ISS-INAIL (2018), è possibile effettuare il calcolo del rischio e degli obiettivi di bonifica utilizzando le Reference Concentration (RfC) e gli Unit Risk factor (URF).

Nell'ambito residenziale/ricreativo per le sostanze cancerogene, la portata effettiva di esposizione viene calcolata:

- da RBCA Tool Kit mediando tra esposizione bambino/adolescente/adulto;
- da Giuditta, RISK-NET, RISC5 e RACHEL mediando tra esposizione bambino/adulto.

Riguardo l'ingestione di vegetali il RISC5 differenzia tra vegetali coltivati su terreno contaminato e vegetali irrigati con acque contaminate, mentre l'RBCA tiene conto soltanto della prima opzione. Inoltre, riguardo all'acqua contaminata da falda il RISC5 calcola anche il rischio per contatto dermico da acqua nella doccia e per inalazione di vapori d'acqua nella doccia.

RACHEL prevede tra le modalità di esposizione anche il contatto dermico e l'ingestione di acqua nuotando per la destinazione d'uso ricreativa e l'ingestione di acqua potabile (come da criteri metodologici nella prima revisione del 2006).

### Bersagli

Nella Tabella 4 sono riportati i bersagli presi in considerazione dai 5 software. Tutti prevedono un uso del suolo residenziale (bambino e/o adulto) e industriale/commerciale (adulto). Solo l'RBCA contempla anche un bersaglio residenziale adolescente. RBCA e RISC considerano anche l'operaio (construction worker). Infine, il bersaglio "risorsa idrica al punto di conformità" può essere attivato in tutti i software, ad eccezione di RISC.

**Tabella 4 - Modello concettuale: Bersagli.**

BERSAGLIO	APAT (rev. 2)	RBCA Tool Kit ver. 2.5	RISC ver.5.0	GIUDITTA ver. 3.2	RACHEL ver. 1.1.5	RISK-NET ver. 3.0 Pro
Residenziale Bambino	X	X	X	X	X	X
Residenziale Adolescente	---	X	---	---	---	---
Residenziale Adulto	X	X	X	X	X	X
Industriale/Commerciale Adulto	X	X	X	X	X	X
Operaio edile (Construction worker)	---	X	X	---	---	---
Risorsa idrica al punto di conformità	X	X	---	X	X	X

L'RBCA ToolKit prevede due ulteriori tipologie di bersaglio rispetto a quanto descritto nel doc. APAT (2008):

- **Residenziale Adolescente:** In tal modo, nel caso di uso del suolo residenziale, si tiene conto di un bersaglio avente valori della durata di esposizione (12 anni), del peso corporeo (35 kg) e della superficie della pelle (8100 cm<sup>2</sup>) intermedi tra quelli assunti come default per il bambino e l'adulto.
- **Operaio edile (Construction worker):** Questa opzione permette la stima del rischio per un operaio edile sulla base di una esposizione a breve termine (Durata di esposizione = 1 anno, Frequenza di esposizione = 180 giorni), in relazione alle modalità espositive: contatto dermico e ingestione di suolo e inalazione di vapori e polveri outdoor, durante le attività di scavo. Tale tipologia di ricettore la si ritrova anche nel RISC5 (durata di esposizione 6 mesi).

Il RISC5 oltre a permettere l'inserimento di profili personalizzati (anche più di uno) di recettori (ma lo stesso si può fare sia con il database delle sostanze ma anche con il database dei suoli) presenta per tutte le tipologie di ricettori di default (residenziale, ricreativo, lavoratore, costruttore edile) la possibilità di scegliere tra due opzioni: esposizione media "mean" ed esposizione "upper percentile" (di fatto assimilabile alla RME del RISC4)".

## 2.2 FATTORI DI TRASPORTO

Nel presente paragrafo sono riportati in forma sintetica i criteri di calcolo, ossia i modelli di fate & transport, implementati in ciascun software per la stima dei fattori di trasporto. Per approfondimenti riguardo tali modelli è possibile fare riferimento a quanto contenuto nel doc. APAT (2008) o ai manuali dei diversi software.

Nelle tabelle seguenti sono posti a confronto i modelli di fate & transport adottati dai cinque software analizzati. A valle di ogni tabella sono inoltre riportati i principali elementi che differenziano i software stessi.

Come detto in precedenza il software RISC5, diversamente dalla precedente versione, non permette di attivare le due opzioni TIER1 e TIER2, ma solamente il TIER 2. In tal modo, i FT vengono calcolati a mezzo di modelli di trasporto, analitici o numerici a seconda dei casi, spesso diversi da quelli proposti dal doc. APAT (2008).

I software RACHEL e RISK-NET sono stati sviluppati sulla base di quanto contenuto nel doc. APAT (2008), a parte alcune eccezioni che saranno poste in evidenza di caso in caso.

### Fattore di lisciviazione in falda da suolo (LF)

Tabella 5 - Fattore di lisciviazione (LF).

FATTORE DI TRASPORTO	APAT (rev. 2)	RBCA Tool Kit ver. 2.5	RISC ver.5.0	GIUDITTA ver. 3.2	RACHEL ver. 1.1.5	RISK-NET ver. 3.0 Pro
k <sub>sw</sub>	X	X	---	X	X	X
LDF	X	X	---	X	X	X
SAM	X	X	---	X	X	X
BDF	---	---	---	---	---	X(*)
TAF	---	---	---	---	---	---
Unsaturated zone model (numerico)	---	---	X	---	---	---

(\*) Modello attivabile nelle opzioni di calcolo

Il doc. APAT (2008) propone di calcolare tale fattore di trasporto a mezzo di tre termini:

- Coefficiente di partizione suolo-acqua ( $k_{sw}$ )
- Coefficiente di attenuazione del suolo (Soil Attenuation Model - SAM)
- Fattore di diluizione in falda (Leachate Dilution Factor - LDF)

L'RBCA Tool Kit, Giuditta, RISK-NET ricalcano quanto contenuto nel doc. APAT (2008), con attivazione del termine SAM opzionale.

In RACHEL il SAM è parte integrante dell'equazione calcolata. Non è opzionale.

Per la stima del fattore di lisciviazione in falda, nell'RBCA Tool Kit, RISK-NET e RACHEL sono implementati algoritmi che permettono di abbandonare l'ipotesi di sorgente a massa infinita, e quindi di tener conto dell'esaurimento della stessa nel tempo.

Per la lisciviazione in falda il RISC5 utilizza un modello numerico (Unsaturated Zone Model) che tiene conto, tra l'altro, della diminuzione nel tempo della sorgente, calcolando anche le perdite per volatilizzazione del composto oltre che la biodegradazione nel tempo (opzionale).

RACHEL effettua in modo automatico un controllo della presenza del prodotto libero che avviene nel seguente modo: le concentrazioni rappresentative inserite dall'utente vengono confrontate con le concentrazioni di saturazione  $C_{sat}$  [mg/kg] nel caso di suolo insaturo, e con la solubilità [mg/l] nel caso di suolo saturo. Tuttavia, qualora la presenza di prodotto libero non sia selezionata manualmente dall'utente, il software procede al calcolo del rischio seguendo il documento master dei criteri metodologici. Se invece l'utente seleziona la presenza di prodotto libero, il software implementa quanto suggerito dall'appendice P dei criteri metodologici e ne segue l'approccio a saturazione. In ogni caso laddove le  $C_{sat}$  o la solubilità vengano superate il software lo segnala nella schermata riassuntiva degli output, nello specifico nel tab "warnings". Nel caso di suolo saturo viene effettuato un ulteriore controllo basato sul valore di densità liquida per verificare che si tratti di LNAPL o DNAPL. Questo perché le linee guida in appendice P trattano le due situazioni in maniera distinta e con diverse formule per il trasporto. I dati relativi alle densità liquide (non presenti in banca dati ISS) servono esclusivamente per discriminare i NAPL più/meno densi dell'acqua. Sono dati indicativi e qualora l'utente abbia a disposizione dati più precisi può ad ogni modo editarli. In caso di presenza di prodotto libero (selezionata dall'utente in fase di impostazione del progetto) RACHEL calcola le concentrazioni in fase liquida  $C_w$  come proposto dall'Appendice P del doc. APAT (2008) e utilizza tale concentrazione nel successivo calcolo dei fattori di trasporto per lisciviazione e attenuazione laterale e conseguentemente della  $C_{poe}$ .

In Risk-net per il calcolo del rischio nel caso di condizioni di saturazione ( $CRS > C_{sat}$ ) è possibile utilizzare le equazioni previsti nel doc. APAT (2008) con l'unica differenza che per i contatti non diretti (volatilizzazione e lisciviazione) le CRS (Concentrazioni Rappresentative alla sorgente) vengono sostituite con la  $C_{sat}$  che corrisponde alla condizione per cui si raggiungono nell'acqua e nell'aria dei pori la solubilità e la tensione di vapore della sostanza. Per i contatti diretti (ad es. ingestione e contatto) tali concentrazioni, seppur superiori alla saturazione sono implementate tal quali nel software, in quanto il recettore può venire a contatto con il contaminante anche in fase separata. In Risk-net è inoltre implementato il modello proposto nello standard ASTM E2081-00 che permette di stimare le concentrazioni di screening per la zona satura ed insatura, oltre le quali è atteso che la fase separata presente diventi mobile. Infatti, in accordo con quanto descritto nello standard ASTM E2081, la fase separata che si forma al di sopra della  $C_{sat}$ , risulta immobile fino al raggiungimento della capacità di assorbimento meccanica del suolo (saturazione residua), oltre la quale può aver luogo la percolazione diretta come prodotto libero.

In RACHEL, per il calcolo del rischio nel caso di condizioni di saturazione ( $CRS > C_{sat}$ ), le CRS non

vengono sostituite con la  $C_{sat}$ . Tuttavia RACHEL calcola quest'ultima, lasciando all'utente la possibilità di inserire la CRS o la  $C_{sat}$ .

### Fattore di attenuazione in falda (DAF)

**Tabella 6 - Fattore di attenuazione laterale in falda (DAF).**

FATTORE DI TRASPORTO	APAT (rev. 2))	RBCA Tool Kit ver. 2.5	RISC ver.5.0	GIUDITTA ver. 3.2	RACHEL ver. 1.1.5	RISK-NET ver. 3.0 Pro
DAF(1)	---	X	---	X	---	X
DAF(2)	X	----	---	---	X	X
DAF(3)	X	X (*)	----	X (*)	X	X (*)
AT123D model (numerico)	---	---	X	---	---	---
Saturated Soil Model	---	---	X	---	---	---

(\*) Lo spessore della zona di miscelazione si pone coincidente con lo spessore dell'acquifero.

Il doc. APAT (2008) propone di utilizzare due delle tre equazioni analitiche ricavate dal modello di Domenico in condizioni stazionarie, e in particolare:

- DAF(2) quando l'altezza della sorgente di contaminazione in falda è inferiore allo spessore della falda (tale equazione considera la dispersione lungo gli assi x, y e solo nella direzione positiva dell'asse z);
- DAF(3) quando tutto lo spessore dell'acquifero è interessato dalla contaminazione (tale equazione considera la dispersione solo lungo gli assi x e y)

RACHEL ricalca quanto suggerito dal doc. APAT 2008 e implementa le suddette due equazioni (DAF(2) e DAF(3)).

L'RBCA Tool Kit e RISK-NET hanno implementata l'equazione di Domenico anche in condizione non stazionaria, dando la possibilità di visualizzare l'andamento della concentrazione in funzione del tempo e dello spazio.

Anche per la stima del fattore di attenuazione in falda, nell'RBCA Tool Kit sono implementati algoritmi che permettono di abbandonare l'ipotesi di sorgente a massa infinita, e quindi di tener conto dell'esaurimento della stessa nel tempo.

IL RISC5 utilizza un'equazione monodimensionale con dispersione nelle tre direzioni x,y,z (AT123 Model) con fattore di ritardo e biodegradazione (opzionale). L'equazione è in stato transitorio e i valori al POC variano in funzione del tempo (sorgente finita). Diversamente dall'RBCA Tool Kit, il RISC richiede il numero di punti nei quali calcolare la concentrazione del contaminante nel piezometro (n. minimo 2, max 10) per poi fare una media dei valori trovati.

### Fattore di volatilizzazione di vapori outdoor da suolo superficiale (VF<sub>ss</sub>)

**Tabella 7 - Fattore di volatilizzazione di vapori outdoor da suolo superficiale (VF<sub>ss</sub>).**

FATTORE DI TRASPORTO	APAT (rev. 2)	RBCA Tool Kit ver. 2.5	RISC ver.5.0	GIUDITTA ver. 3.2	RACHEL ver. 1.1.5	RISK-NET ver. 3.0 Pro
VFss(1)	X	X	X (*)	X	X	X
VFss(2)	X	X	X (*)	X	X	X
VFss(3)	---	---	----	----	---	----
VFss(4)	---	---	----	----	---	----
US EPA Q/C Model	---	X	---	----	---	----

(\*) Combinato con *Unsaturated zone model*.

Il doc. APAT (2008) propone di calcolare tale fattore di trasporto selezionando il valore minore tra:

- $VF_{ss}(1)$ : modello di Jury, modello a sorgente semi-infinita;
- $VF_{ss}(2)$ : modello a sorgente finita.

L'RBCA Tool Kit permette di selezionare rispetto a due opzioni:

- "Surface Soil Volatilization Only": In tal caso l'utente può scegliere se usare il "USEPA Q/C model", non previsto dal doc. APAT (2008), oppure le equazioni proposte dallo standard ASTM E1739-95, ossia  $VF_{ss}(1)$  e  $VF_{ss}(2)$ . In entrambe i casi le equazioni vengono applicate sia al SS che al SP.
- "Combination Surface Soil/Johnson-Ettinger Models": In tal caso per il SS sono selezionabili le due modalità di calcolo sopra esposte, mentre per il SP si utilizza il modello di Johnson-Ettinger.

I software Giuditta, RACHEL e RISK-NET ricalcano quanto contenuto nel doc. APAT (2008).

Il RISC5 utilizza la combinazione del *Unsaturated zone model* (modello numerico sopra brevemente descritto con le due equazioni sopra viste ( $VF_{ss}$ )).

Come noto per le specie chimiche volatili, può verificarsi la circostanza per cui, a parità di condizioni, risulti l'assurdo che  $VF_{samb} > VF_{ss}$ . In tale circostanza il doc. APAT (2008) propone di porre  $VF_{samb} = VF_{ss}$ . Per ovviare a tale inconveniente i software operano nel seguente modo:

- Con l'RBCA Tool Kit è necessario attivare la prima tra le due opzioni sopra esposte.
- RISK-NET e Giuditta fanno in modo automatico quanto proposto dal doc. APAT (2008).
- In RISC5 non è possibile attivare tale opzione in quanto l'equazione utilizzata è una sola.

#### Fattore di volatilizzazione di vapori outdoor da suolo profondo ( $VF_{samb}$ )

Tabella 8 - Fattore di volatilizzazione di vapori outdoor da suolo profondo ( $VF_{samb}$ ).

FATTORE DI TRASPORTO	APAT (rev. 2)	RBCA Tool Kit ver. 2.5	RISC ver.5.0	GIUDITTA ver. 3.2	RACHEL ver. 1.1.5	RISK-NET ver. 3.0 Pro
$VF_{samb}(1)$	X	X	X (*)	X	X	X
$VF_{samb}(2)$	X	X	----	X	X	X
$VF_{samb}(3)$	----	---	----	---	----	---

(\*) Combinato con *Unsaturated zone model*

Il doc. APAT (2008) propone di calcolare tale fattore di trasporto selezionando il valore minore tra:

- $VF_{samb}(1)$ : modello di Farmer, modello a sorgente semi-infinita;
- $VF_{samb}(2)$ : modello a sorgente finita.

I software RBCA Tool Kit, Giuditta, RACHEL e RISK-NET ricalcano quanto contenuto nel doc. APAT (2008).

Il RISC5 utilizza la combinazione del Unsaturated zone model con la sola equazione  $VF_{samb}(1)$  (con possibile sovrastima del rischio per composti molto volatili).

### Fattore di volatilizzazione di vapori outdoor da falda ( $VF_{wamb}$ )

**Tabella 9 - Fattore di volatilizzazione di vapori outdoor da falda ( $VF_{wamb}$ ).**

FATTORE DI TRASPORTO	APAT (rev. 2)	RBCA Tool Kit ver. 2.5	RISC ver.5.0	GIUDITTA ver. 3.2	RACHEL ver. 1.1.5	RISK-NET ver. 3.0 Pro
$VF_{wamb}$	X	X	X	X	X	X

Riguardo tale fattore di trasporto tutti i software ricalcano quanto contenuto nel doc. APAT (2008).

In caso di presenza di prodotto libero (selezionata dall'utente in fase di impostazione del progetto) RACHEL calcola le concentrazioni in fase gassosa come descritto in precedenza per il SS.

### Emissione di particolato outdoor da suolo superficiale (PEF)

**Tabella 10 - Fattore di emissione di particolato outdoor (PEF).**

FATTORE DI TRASPORTO	APAT (rev. 2)	RBCA Tool Kit ver. 2.5	RISC ver.5.0	GIUDITTA ver. 3.2	RACHEL ver. 1.1.5	RISK-NET ver. 3.0 Pro
PEF(1)	X	X	---	X	X	X
PEF(2)	---	---	---	---	---	---
PEF(3)	---	---	---	---	---	---
US EPA Q/C Model	---	X	X	---	---	---

Il doc. APAT (2008) propone l'utilizzo di PEF(1).

L'RBCA Tool Kit permette di selezionare tra due equazioni, e in particolare PEF(1) e il "USEPA Q/C model", non previsto dal doc. APAT (2008).

Il RISC5 presenta solamente il "USEPA Q/C model".

RISK-NET, RACHEL e Giuditta ricalcano quanto contenuto nel doc. APAT (2008).

### Emissione di particolato indoor da suolo superficiale ( $PEF_{in}$ )

**Tabella 11 - Fattore di emissione di particolato indoor ( $PEF_{in}$ ).**

FATTORE DI TRASPORTO	APAT (rev. 2)	RBCA Tool Kit ver. 2.5	RISC ver.5.0	GIUDITTA ver. 3.2	RACHEL ver. 1.1.5	RISK-NET ver. 3.0 Pro
$PEF(1) \times F_i$	X	---	---	X	X	X

Il doc. APAT (2008) propone l'utilizzo di PEF(1) moltiplicato per la frazione di polveri indoor ( $F_i$ ).

Giuditta, RACHEL e RISK-NET ricalcano quanto contenuto nel doc. APAT (2008).

L'RBCA Took Kit e il RISC5 non prevedono il calcolo di tale fattore di trasporto.

### Fattore di volatilizzazione di vapori indoor da suolo (VF<sub>seesp</sub>)

**Tabella 12 - Fattore di volatilizzazione di vapori indoor da suolo (VF<sub>seesp</sub>).**

FATTORE DI TRASPORTO	APAT (rev. 2)	RBCA Tool Kit ver. 2.5	RISC ver.5.0	GIUDITTA ver. 3.2	RACHEL ver. 1.1.5	RISK-NET ver. 3.0 Pro
VFseesp(1)	X	X	X (*), (**)	X	X	X
VFseesp(2)	---	X	X (*), (**)	X	---	X
VFseesp(3)	X	X	---	X	X	X
VFseesp(4)	---	---	---	---	---	---
Dominant Layer model	---	---	X (*), (**)	---	---	---
Oxygen-Limited model	---	---	X (*), (**)	---	---	X (***)

(\*) Combinato con *Unsaturated zone model*

(\*\*) Possibilità di scegliere tra utilizzo VF<sub>seesp</sub>, *Dominant Layer* o *Oxygen-Limited model*

(\*\*\*) Possibilità di tener conto della biodegradazione dei vapori nel sottosuolo

Il doc. APAT (2008) propone di calcolare tale fattore di trasporto selezionando il valore minore tra:

- VF<sub>seesp</sub>(1): modello di Johnson-Ettinger, modello a sorgente semi-infinita che tiene conto del solo contributo diffusivo;
- VF<sub>seesp</sub>(3): modello a sorgente finita;

escludendo l'utilizzo di VF<sub>seesp</sub>(2), ossia il modello di Johnson-Ettinger, modello a sorgente semi-infinita che tiene conto del contributo diffusivo e convettivo.

I software RBCA Tool Kit, Giuditta e RISK-NET hanno implementate le tre equazioni, tra le quali VF<sub>seesp</sub>(2) è attivabile a discrezione dell'utente.

Il software RISC5 ha implementato le due equazioni VF<sub>seesp</sub>(1) e (2), più altri due modelli (già presenti nel RISC4) chiamati *Dominant Layer* e *Oxygen-Limited model*.

Risk-net e RACHEL ricalcano quanto contenuto nel doc. APAT (2008) e implementano VF<sub>seesp</sub>(1) e VF<sub>seesp</sub>(3). In Risk-net è inoltre possibile tener conto della biodegradazione dei vapori nel sottosuolo.

### Fattore di volatilizzazione di vapori indoor da falda (VF<sub>wesp</sub>)

**Tabella 13 - Fattore di volatilizzazione di vapori indoor da falda (VF<sub>wesp</sub>).**

FATTORE DI TRASPORTO	APAT (rev. 2)	RBCA Tool Kit ver. 2.5	RISC ver.5.0	GIUDITTA ver. 3.2	RACHEL ver. 1.1.5	RISK-NET ver. 3.0 Pro
VFwesp(1)	X	X	X (*)	X	X	X
VFwesp(2)	---	X	X (*)	---	---	X
Dominant Layer model	---	---	X (*)	---	---	---
Oxygen-Limited model	---	---	X (*)	---	---	X (**)

(\*) Possibilità di scegliere tra utilizzo VF<sub>wesp</sub>, *Dominant Layer* o *Oxygen-Limited model*

(\*\*) Possibilità di tener conto della biodegradazione dei vapori nel sottosuolo

Il doc. APAT (2008) propone di calcolare tale fattore di trasporto a mezzo dell'equazione  $VF_{wesp}(1)$ , ossia il modello di Johnson-Ettinger, modello a sorgente semi-infinita che tiene conto del solo contributo diffusivo. Escludendo quindi l'utilizzo di  $VF_{wesp}(2)$ , che tiene conto del contributo diffusivo e convettivo.

Giuditta, RACHEL e RISC5 ricalcano quanto contenuto nel doc. APAT (2008). In più (novità del RISC5 rispetto alla versione precedente) è possibile scegliere anche l'utilizzo dei modelli *Dominant Layer* e *Oxygen-Limited model*

I software RBCA Tool Kit e RISK-NET hanno implementate le due equazioni, tra le quali  $VF_{wesp}(2)$  è attivabile a discrezione dell'utente. In Risk-net è inoltre possibile tener conto della biodegradazione dei vapori nel sottosuolo.

Inoltre, RBCA Tool Kit permette di selezionare una ulteriore equazione (Mass Flux Model), modello a sorgente finita ad oggi non contemplato nel doc. APAT (2008).

#### Fattore di dispersione in atmosfera (ADF)

**Tabella 14 - Fattore di dispersione in atmosfera (ADF).**

FATTORE DI TRASPORTO	APAT (rev. 2)	RBCA Tool Kit ver. 2.5	RISC ver.5.0	GIUDITTA ver. 3.2	RACHEL ver. 1.1.5	RISK-NET ver. 3.0 Pro
ADF	X	X	---	---	X	X

Il doc. APAT (2008) propone di calcolare tale fattore di trasporto a mezzo dell'equazione ADF, modello analitico gaussiano.

RBCA Tool Kit, RISK-NET e RACHEL ricalcano quanto contenuto nel doc. APAT (2008).

Giuditta e RISC5 non contemplano tale via di migrazione.

## 3 RISULTATI DELLA VALIDAZIONE

---

### 3.1 DIFFERENZE RISPETTO ALLA VERSIONI PRECEDENTI

Le principali differenze della versione di Risk-net 3.0 Pro (2018) rispetto alla versione di Risk-net 2.1 (2016) sono di seguito elencate.

**Multipiattaforma.** La versione 3.0 è stata sviluppata in Javascript e HTML. Pertanto rispetto alle versioni precedenti può essere utilizzato sia su piattaforme Windows che su piattaforme MacOS. Inoltre a differenza delle versioni precedenti non necessita di Excel.

**Utilizzo di dati soil-gas, camere di flusso e misure in aria.** In questa versione è possibile utilizzare i dati di soil-gas, camere di flusso e misure in aria outdoor e indoor. Tali valori possono essere utilizzati sia per il calcolo del rischio che, se attivato, per rimodulare le concentrazioni soglia di rischio in funzione dei fattori di attenuazione empirici calcolati a partire dai dati inseriti nelle diverse matrici.

**Utilizzo dei risultati di test di cessione.** In questa versione è possibile utilizzare i dati ottenuti da test di cessione per valutare il percorso di lisciviazione da suolo superficiale e profondo.

**Concentrazioni e Dosi di Riferimento.** Rispetto alle versioni precedenti con questa versione, l'utente può decidere se calcolare, per i percorsi di inalazione, i rischi e gli obiettivi di bonifica utilizzando le dosi di riferimento (RfD per gli effetti tossici e SF per gli effetti cancerogeni) o le concentrazioni di riferimento (RfC per gli effetti tossici e IUR per gli effetti cancerogeni).

**Bioaccessibilità.** In questa versione del software per il percorso di ingestione di suolo, il software permette di tener conto nel calcolo del rischio e degli obiettivi di bonifica della frazione di contaminante effettivamente bioaccessibile all'organismo.

**Modello di biodegradazione per la lisciviazione in falda.** In questa versione del software è stato implementato un modello che permette di valutare l'attenuazione subita dal contaminante legata a fenomeni di biodegradazione durante il percorso di lisciviazione.

**Modello di biodegradazione per la volatilizzazione da suolo e falda.** In questa versione del software è stato implementato un modello che permette di valutare l'attenuazione subita dal contaminante legata a fenomeni di biodegradazione durante il percorso di volatilizzazione outdoor e indoor.

**Dimensione delle sorgenti.** In questa versione del software nella stessa simulazione è possibile definire dimensioni diverse per ciascuna matrice selezionata nel modello concettuale.

**Telo in HDPE.** Per il percorso di lisciviazione è stato implementato un modello che permette di simulare la presenza di uno strato a bassa permeabilità o di un telo in HDPE.

**Report in PDF.** In questa versione del software è possibile creare in maniera rapida e semplice un report in PDF che riassume i principali input ed output della simulazione.

**Versione in Inglese.** Rispetto alla versione precedenti il software è disponibile sia in lingua italiana che inglese.

## 3.2 VERIFICA DELLE EQUAZIONI GOVERNANTI

Come anticipato nel capitolo precedente, in linea generale le assunzioni e le equazioni di governo contenute in "Risk-net" ricalcano quelle contenute nel documento (APAT, 2008). E' comunque necessario evidenziare la presenza nel software di alcuni elementi aggiuntivi, comunque selezionabili a discrezione dell'utente, che riguardano:

- L'introduzione di formule analitiche in grado di tener conto dell'esaurimento della sorgente di contaminazione anche in caso di lisciviazione, mentre il doc (APAT, 2008) ne tiene conto solo nel caso di volatilizzazione.
- Nel trasporto in falda, l'implementazione dell'equazione di Domenico anche in condizione non stazionaria, ossia in funzione del tempo, oltreché stazionaria, dando la possibilità di optare tra le tre possibilità: DAF1, DAF2 e DAF3.
- La possibilità di limitare la Concentrazione Rappresentativa alla Sorgente (CRS) alla concentrazione di saturazione ( $C_{sat}$ ) per volatilizzazione e lisciviazione nei casi in cui risulti  $CRS > C_{sat}$ .
- L'implementazione delle equazioni previste nel documento ASTM-E2081 (2000) che permettono di effettuare delle verifiche sulla mobilità del prodotto libero in zona satura ed insatura.
- Per volatilizzazione in ambienti confinati, l'implementazione del modello di Johnson & Ettinger che tiene conto anche del contributo convettivo, oltre che diffusivo.
- La possibilità di inserire concentrazioni nel soil-gas, nelle camere di flusso e in aria ambiente (outdoor e indoor) nel caso di inalazione di vapori outdoor ed indoor.
- La possibilità di inserire concentrazioni nell'eluato per la valutazione del percorso di lisciviazione.
- La possibilità di inserire la frazione bioaccessibile per la valutazione del percorso di ingestione di suolo.
- La possibilità di tener conto della biodegradazione dei contaminanti durante i percorsi di volatilizzazione, lisciviazione e trasporto in falda.
- La possibilità di simulare la presenza di una lente ad alto contenuto di acqua per la valutazione dei percorsi di volatilizzazione outdoor e indoor.
- La possibilità di simulare la presenza di un telo in HDPE o di uno strato a bassa permeabilità per determinare l'infiltrazione efficace nel suolo.

## 3.3 INDIVIDUAZIONE DEGLI ERRORI DI IMPLEMENTAZIONE

Il controllo riguardante l'individuazione degli errori di implementazione è stato condotto a mezzo di un'esecuzione manuale delle equazioni implementate nel software, i cui risultati sono stati posti a confronto con gli output intermedi e finali del software stesso. Tale attività ha permesso di scoprire difetti originati da errori algoritmici.

## 3.4 CONTROLLO CON ALTRE SOLUZIONI

### 3.4.1 Software analizzati

Tale controllo, finalizzato essenzialmente alla verifica della correttezza funzionale del sistema, si è basato sul confronto degli output del software Risk-net versione 3.0 Pro (2018) con quelli di software già esistenti e comunemente utilizzati a livello nazionale. In particolare, per lo studio sono

stati selezionati quei software la cui ultima versione è successiva all'entrata in vigore del D.Lgs 152/06, ed in particolare:

- RISC (Risk-Integrated Software for Cleanups) ver. 5.0, Spence Engineering (2011, USA).
- RBCA (Risk Based Corrective Action) Tool Kit for Chemical Releases ver. 2.5, Groundwater Service, Inc. Houston (2009, USA)
- GIUDITTA (Gestione Informatizzata Di Tollerabilità Ambientale) ver. 3.2, Provincia di Milano e URS Dames & Moore (2008, Italia)
- RACHEL (Risk Analysis Calculation Handbook for Environmental and Living-beings) ver. 1.1.5, Politecnico di Torino e Dream S.r.l. (2012, Italia)
- RISK-NET ver. 3.0 Pro, Università degli Studi di Roma Tor Vergata (2012, Italia).

### 3.4.2 Casi studio e opzioni di calcolo

In linea con gli studi effettuati dallo stesso gruppo di lavoro (Reconnet 2012, Reconnet 2013, Berardi et al. 2012, Baciocchi et al. 2012, Verginelli et al. 2013, Reconnet 2015), tali software sono stati applicati a 9 distinti casi studio, estrapolati da casi reali.

Al fine di rendere possibile la riproduzione delle simulazioni, si riportano in Appendice A le tabelle relative a tutti i parametri di input utilizzati, relativamente a:

- scenari di calcolo dei 9 casi studio;
- valori delle Concentrazioni Rappresentative alla Sorgente (CRS);
- valori dei parametri sito-specifici;
- valori dei fattori di esposizione.

Sebbene attualmente sia disponibile la banca dati ISS-INAIL di Marzo 2018, al fine di un confronto omogeneo tra i diversi software selezionati, per le proprietà chimico-fisiche e tossicologiche degli inquinanti indicatori sono stati utilizzati i valori contenuti nella Banca dati ISS-ISPEL (Maggio 2009).

Inoltre, per dare la massima trasparenza all'attività svolta, in allegato al presente documento sono riportati i file delle nove simulazioni per ciascuno dei software utilizzati.

Per permettere il confronto si è proceduto come di seguito indicato:

- Sono stati resi omogenei tutti i parametri di input.
- Per rendere possibile il confronto, per alcuni software sono state attivate/disattivate alcune specifiche opzioni in modo da permettere, ove possibile, di utilizzare gli stessi criteri di calcolo. Nelle tabelle riportate in appendice sono esplicitate le opzioni di calcolo attivate in ciascun software.

### 3.4.3 Risultati

Nelle tabelle seguenti sono riportati i risultati ottenuti per i diversi casi studio analizzati. Come descritto in precedenza, gli output restituiti da ciascun software sono stati confrontati in termini di rapporto tra quelli di "RBCA Tool Kit" e quelli dell'"altra soluzione". L'RBCA Tool Kit è stato selezionato quale software di riferimento, in virtù dell'elevato grado di validazione e attendibilità dello stesso.

## Risultati “Caso studio 1”

**Tabella 15 - OUTPUT: Rischio  
(Caso1 - INGESTIONE DI SUOLO, Suolo Superficiale Industriale)**

Inquinante indicatore	Rischio							Rapporto RBCA con					
	RBCA	RISC	GIUDITTA	RACHEL	RISK-NET 1.0	RISK-NET 2.0	RISK-NET 3.0	RISC	GIUDITTA	RACHEL	RISK-NET 1.0	RISK-NET 2.0	RISK-NET 3.0
Fenolo	-	-	-	-	-	---	-	-	-	-	-	-	-
Piombo	-	-	-	-	-	---	-	-	-	-	-	-	-
Tricloroetilene	5.8E-08	5.8E-08	5.8E-08	5.8E-08	5.8E-08	5.8E-08	5.8E-08	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00
Etilbenzene	-	-	-	-	-	---	-	-	-	-	-	-	-
Alifatici C9-18	-	-	-	-	-	---	-	-	-	-	-	-	-
Crisene	1.8E-07	1.8E-07	1.8E-07	1.8E-07	1.8E-07	1.8E-07	1.8E-07	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00

**Tabella 16 - OUTPUT: Indice di pericolo  
(Caso1 - INGESTIONE DI SUOLO, Suolo Superficiale Industriale)**

Inquinante indicatore	Indice di pericolo							Rapporto RBCA con					
	RBCA	RISC	GIUDITTA	RACHEL	RISK-NET 1.0	RISK-NET 2.0	RISK-NET 3.0	RISC	GIUDITTA	RACHEL	RISK-NET 1.0	RISK-NET 2.0	RISK-NET 3.0
Fenolo	2.9E-04	2.9E-04	2.9E-04	2.9E-04	2.9E-04	2.9E-04	2.9E-04	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00
Piombo	4.2E-01	4.2E-01	4.2E-01	4.2E-01	4.2E-01	4.2E-01	4.2E-01	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00
Tricloroetilene	2.4E-03	2.5E-03	2.4E-03	2.5E-03	2.4E-03	2.4E-03	2.5E-03	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00
Etilbenzene	7.3E-04	7.3E-04	7.3E-04	7.3E-04	7.3E-04	7.3E-04	7.3E-04	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00
Alifatici C9-18	1.1E-02	1.1E-02	1.1E-02	1.1E-02	1.1E-02	1.1E-02	1.1E-02	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00
Crisene	2.4E-03	2.5E-03	2.4E-03	2.5E-03	2.4E-03	2.4E-03	2.5E-03	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00

**Tabella 17 - OUTPUT: Rischio  
(Caso1 - CONTATTO DERMICO, Suolo Superficiale Industriale)**

Inquinante indicatore	Rischio							Rapporto RBCA con					
	RBCA	RISC	GIUDITTA	RACHEL	RISK-NET 1.0	RISK-NET 2.0	RISK-NET 3.0	RISC	GIUDITTA	RACHEL	RISK-NET 1.0	RISK-NET 2.0	RISK-NET 3.0
Fenolo	-	-	-	-	-	---	-	-	-	-	-	-	-
Piombo	-	-	-	-	-	---	-	-	-	-	-	-	-
Tricloroetilene	7.6E-08	7.6E-08	7.6E-08	7.6E-08	7.6E-08	7.6E-08	7.6E-08	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00
Etilbenzene	-	-	-	-	-	---	-	-	-	-	-	-	-
Alifatici C9-18	-	-	-	-	-	---	-	-	-	-	-	-	-
Crisene	3.2E-07	3.2E-07	3.2E-07	3.2E-07	3.1E-07	3.1E-07	3.2E-07	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00

**Tabella 18 - OUTPUT: Indice di pericolo  
(Caso1 - CONTATTO DERMICO, Suolo Superficiale Industriale)**

Inquinante indicatore	Indice di pericolo							Rapporto RBCA con					
	RBCA	RISC	GIUDITTA	RACHEL	RISK-NET 1.0	RISK-NET 2.0	RISK-NET 3.0	RISC	GIUDITTA	RACHEL	RISK-NET 1.0	RISK-NET 2.0	RISK-NET 3.0
Fenolo	3.9E-04	3.9E-04	3.9E-04	3.9E-04	3.9E-04	3.9E-04	3.9E-04	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00
Piombo	5.5E-02	5.5E-02	5.5E-02	5.5E-02	5.5E-02	5.5E-02	5.5E-02	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00
Tricloroetilene	3.2E-03	3.2E-03	3.2E-03	3.2E-03	3.2E-03	3.2E-03	3.2E-03	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00
Etilbenzene	9.7E-04	9.7E-04	9.7E-04	9.7E-04	9.7E-04	9.7E-04	9.7E-04	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00
Alifatici C9-18	1.5E-02	1.5E-02	1.5E-02	1.5E-02	1.5E-02	1.5E-02	1.5E-02	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00
Crisene	4.2E-03	4.2E-03	4.2E-03	4.2E-03	4.2E-03	4.2E-03	4.2E-03	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00

Riguardo le modalità di esposizione “contatto dermico” e “ingestione di suolo”, dall’esame delle tabelle sopra riportate è possibile constatare che i risultati dei cinque software sono praticamente coincidenti. In tale ambito è opportuno sottolineare che essendo modalità di esposizione dirette, per la stima del rischio (e dell’indice di pericolo) ad esse associato, non entra in gioco alcun fattore di trasporto (FT).

**Tabella 19 - OUTPUT: Rischio  
(Caso1 - RISCHIO RISORSA IDRICA, Suolo Superficiale Industriale)**

Inquinante indicatore	Rischio Risorsa Idrica							Rapporto RBCA con					
	RBCA	RISC	GIUDITTA	RACHEL	RISK-NET 1.0	RISK-NET 2.0	RISK-NET 3.0	RISC	GIUDITTA	RACHEL	RISK-NET 1.0	RISK-NET 2.0	RISK-NET 3.0
Fenolo	1.8E+05	1.8E+05	4.7E+04	1.8E+05	1.8E+05	1.8E+05	1.8E+05	9.7E-01	3.7E+00	9.9E-01	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00
Piombo	1.1E+03	8.0E+02	1.3E+03	1.1E+03	1.1E+03	1.1E+03	1.1E+03	1.3E+00	8.4E-01	9.9E-01	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00
Tricloroetilene	3.6E+03	4.2E+02	9.6E+02	3.6E+03	3.6E+03	3.6E+03	3.6E+03	8.5E+00	3.7E+00	9.9E-01	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00
Etilbenzene	2.7E+02	6.8E+01	7.2E+01	2.7E+02	2.7E+02	2.7E+02	2.7E+02	3.9E+00	3.7E+00	9.9E-01	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00
Alifatici C9-18	1.8E-01	2.1E-43	6.7E-03	1.9E-01	1.8E-01	1.8E-01	1.9E-01	8.9E+41	2.8E+01	9.9E-01	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00
Crisene	1.5E+00	1.3E-08	7.5E-02	1.5E+00	1.5E+00	1.5E+00	1.5E+00	1.1E+08	2.0E+01	9.9E-01	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00

Riguardo il rischio per la risorsa idrica sotterranea risulta che:

- I risultati di RBCA Tool Kit, RACHEL e RISK-NET (1.0 e 2.0 e 3.0 Pro) sono perfettamente coincidenti.
- Giuditta, invece evidenzia delle differenze rispetto all'RBCA ToolKit che, in termini di rapporto tra fattori, oscillano tra 0,9 e 28. Tali differenze presumibilmente sono riconducibili al fatto che in Giuditta per il percorso di lisciviazione si tiene conto, a differenza degli altri software, dell'esaurimento della sorgente.
- Anche RISC5 evidenzia delle differenze rispetto all'RBCA ToolKit. Tali differenze sono sostanzialmente imputabili all'utilizzo di un diverso modello di trasporto per la lisciviazione in falda (Unsaturated Zone Model) e per il trasporto in falda (Groundwater Model). In particolare, il primo è un modello abbastanza complesso che tiene conto, tra l'altro, della diminuzione nel tempo della sorgente, calcolando anche le perdite per volatilizzazione del composto oltre che la biodegradazione nel tempo (opzionale). Tale modellistica, di livello, fornisce quindi in termini di rischio dei valori inferiori, quindi meno cautelativi, rispetto agli altri software. In particolare, le discrepanze maggiori sono relative alle specie chimiche con alti valori di Koc e/o di Costante di Henry (Crisene e Alifatici C9-18, rispettivamente).

## Risultati “Caso studio 2” e “Caso studio 3”

**Tabella 20 - OUTPUT: Rischio  
(Caso2 - INALAZIONE DI VAPORI OUTDOOR, Suolo Profondo Residenziale)**

Inquinante indicatore	Rischio							Rapporto RBCA con					
	RBCA	RISC	GIUDITTA	RACHEL	RISK-NET 1.0	RISK-NET 2.0	RISK-NET 3.0	RISC	GIUDITTA	RACHEL	RISK-NET 1.0	RISK-NET 2.0	RISK-NET 3.0
Cloruro di vinile	3.6E-09	3.7E-09	4.4E-09	3.6E-09	3.6E-09	3.6E-09	3.6E-09	9.7E-01	8.3E-01	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00
Benzene	3.2E-08	1.9E-08	3.9E-08	3.2E-08	3.2E-08	3.2E-08	3.2E-08	1.7E+00	8.3E-01	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00
Mercurio	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2-Clorofenolo	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
PCB	1.3E-10	8.4E-11	1.6E-10	1.3E-10	1.3E-10	1.3E-10	1.3E-10	1.6E+00	8.3E-01	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00

**Tabella 21 - OUTPUT: indice di pericolo  
(Caso2 - INALAZIONE DI VAPORI OUTDOOR, Suolo Profondo Residenziale)**

Inquinante indicatore	Indice di pericolo							Rapporto RBCA con					
	RBCA	RISC	GIUDITTA	RACHEL	RISK-NET 1.0	RISK-NET 2.0	RISK-NET 3.0	RISC	GIUDITTA	RACHEL	RISK-NET 1.0	RISK-NET 2.0	RISK-NET 3.0
Cloruro di vinile	1.2E-05	3.9E-05	1.2E-05	1.2E-05	1.2E-05	1.2E-05	1.2E-05	3.1E-01	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00
Benzene	4.0E-04	4.9E-04	4.0E-04	4.0E-04	4.0E-04	4.0E-04	4.0E-04	8.3E-01	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00
Mercurio	1.3E-02	8.4E-03	1.3E-02	1.3E-02	1.3E-02	1.3E-02	1.3E-02	1.5E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00
2-Clorofenolo	8.8E-05	5.3E-05	8.8E-05	8.8E-05	8.8E-05	8.8E-05	8.8E-05	1.7E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00
PCB	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

**Tabella 22 - OUTPUT: Rischio  
(Caso3 - INALAZIONE DI VAPORI INDOOR, Falda Residenziale)**

Inquinante indicatore	Rischio							Rapporto RBCA con					
	RBCA	RISC	GIUDITTA	RACHEL	RISK-NET 1.0	RISK-NET 2.0	RISK-NET 3.0	RISC	GIUDITTA	RACHEL	RISK-NET 1.0	RISK-NET 2.0	RISK-NET 3.0
Cloruro di vinile	2.4E-10	2.4E-10	2.9E-10	2.5E-10	2.4E-10	2.4E-10	2.4E-10	1.0E+00	8.4E-01	9.6E-01	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00
Benzene	1.1E-09	1.6E-09	1.4E-09	1.2E-09	1.1E-09	1.1E-09	1.1E-09	7.3E-01	8.3E-01	9.6E-01	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00
Mercurio	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2-Clorofenolo	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
PCB	7.1E-10	9.9E-10	8.9E-10	7.7E-10	7.1E-10	7.1E-10	7.1E-10	7.2E-01	8.0E-01	9.2E-01	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00

**Tabella 23 - OUTPUT: Indice di pericolo  
(Caso3 - INALAZIONE DI VAPORI INDOOR, Falda Residenziale)**

Inquinante indicatore	Indice di pericolo							Rapporto RBCA con					
	RBCA	RISC	GIUDITTA	RACHEL	RISK-NET 1.0	RISK-NET 2.0	RISK-NET 3.0	RISC	GIUDITTA	RACHEL	RISK-NET 1.0	RISK-NET 2.0	RISK-NET 3.0
Cloruro di vinile	7.9E-07	7.8E-07	7.6E-07	8.2E-07	7.9E-07	7.9E-07	7.9E-07	1.0E+00	1.0E+00	9.6E-01	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00
Benzene	1.4E-05	2.0E-05	1.4E-05	1.5E-05	1.4E-05	1.4E-05	1.4E-05	7.3E-01	1.0E+00	9.6E-01	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00
Mercurio	9.2E-04	1.3E-03	8.8E-04	9.6E-04	9.2E-04	9.2E-04	9.2E-04	7.3E-01	1.0E+00	9.6E-01	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00
2-Clorofenolo	3.4E-03	4.7E-03	3.5E-03	3.8E-03	3.4E-03	3.4E-03	3.4E-03	7.3E-01	9.9E-01	9.1E-01	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00
PCB	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Riguardo le modalità di esposizione inalazione outdoor da suolo profondo (Caso 2) e inalazione indoor da falda (Caso 3), dall'esame delle tabelle è possibile constatare che:

- I risultati dei software RBCA Tool Kit, RACHEL e RISK-NET (1.0, 2.0 e 3.0 Pro) risultano estremamente allineati.
- Le differenze tra gli output di RBCA Tool Kit e Giuditta sono comprese tra 0,8 e 1.
- Le differenze tra gli output di RBCA Tool Kit e RISC sono comprese tra 0,3 e 1,7 nel caso di inalazione outdoor da suolo profondo (Caso 2), e tra 0.7 e 1 nel caso di inalazione indoor da falda (Caso 3).

## Risultati “Caso studio 4”

**Tabella 24 - OUTPUT: Indice di pericolo  
(Caso 4 - INGESTIONE DI SUOLO, Suolo Superficiale Industriale)**

Inquinante indicatore	Indice di pericolo							Rapporto RBCA con					
	RBCA	RISC	GIUDITTA	RACHEL	RISK-NET 1.0	RISK-NET 2.0	RISK-NET 3.0	RISC	GIUDITTA	RACHEL	RISK-NET 1.0	RISK-NET 2.0	RISK-NET 3.0
Alifatici C5-C8	9.2E-03	9.2E-03	9.2E-03	9.2E-03	9.2E-03	9.2E-03	9.2E-03	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00
Alifatici C9-C18	1.1E-02	1.1E-02	1.1E-02	1.1E-02	1.1E-02	1.1E-02	1.1E-02	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00
Alifatici C19-C36	5.5E-04	5.5E-04	5.5E-04	5.5E-04	5.5E-04	5.5E-04	5.5E-04	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00
Aromatici C9-C10	1.2E-02	1.2E-02	1.2E-02	1.2E-02	1.2E-02	1.2E-02	1.2E-02	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00
Aromatici C11-C22	3.7E-02	3.7E-02	3.7E-02	3.7E-02	3.7E-02	3.7E-02	3.7E-02	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00

**Tabella 25 - OUTPUT:Indice di pericolo  
(Caso 4 - CONTATTO DERMICO, Suolo Superficiale Industriale)**

Inquinante indicatore	Indice di pericolo							Rapporto RBCA con					
	RBCA	RISC	GIUDITTA	RACHEL	RISK-NET 1.0	RISK-NET 2.0	RISK-NET 3.0	RISC	GIUDITTA	RACHEL	RISK-NET 1.0	RISK-NET 2.0	RISK-NET 3.0
Alifatici C5-C8	6.1E-02	6.1E-02	6.1E-02	6.1E-02	6.1E-02	6.1E-02	6.1E-02	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00
Alifatici C9-C18	7.3E-02	7.3E-02	7.3E-02	7.3E-02	7.3E-02	7.3E-02	7.3E-02	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00
Alifatici C19-C36	3.6E-03	3.6E-03	3.6E-03	3.6E-03	3.6E-03	3.6E-03	3.6E-03	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00
Aromatici C9-C10	8.1E-02	8.1E-02	8.1E-02	8.1E-02	8.1E-02	8.1E-02	8.1E-02	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00
Aromatici C11-C22	2.4E-01	2.4E-01	2.4E-01	2.4E-01	2.4E-01	2.4E-01	2.4E-01	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00

**Tabella 26 - OUTPUT: Rischio  
(Caso 4 - RISCHIO RISORSA IDRICA, Suolo Superficiale Industriale)**

Inquinante indicatore	Rischio Risorsa Idrica							Rapporto RBCA con					
	RBCA	RISC	GIUDITTA	RACHEL	RISK-NET 1.0	RISK-NET 2.0	RISK-NET 3.0	RISC	GIUDITTA	RACHEL	RISK-NET 1.0	RISK-NET 2.0	RISK-NET 3.0
Alifatici C5-C8	1.5E+01	-	5.7E+00	1.5E+01	1.5E+01	1.5E+01	1.5E+01	-	2.7E+00	9.9E-01	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00
Alifatici C9-C18	1.8E-01	-	5.2E-03	1.9E-01	1.8E-01	1.9E-01	1.9E-01	-	3.5E+01	9.9E-01	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00
Alifatici C19-C36	-	-	3030 (*)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Aromatici C9-C10	2.3E+01	1.2E+00	2.2E+01	2.4E+01	2.3E+01	2.3E+01	2.3E+01	2.0E+01	1.1E+00	9.9E-01	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00
Aromatici C11-C22	2.5E+01	5.8E+00	3.0E+00	2.5E+01	2.5E+01	2.5E+01	2.5E+01	4.3E+00	8.3E+00	9.9E-01	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00

(\*) Per gli Alifatici C19-C36 che risultano immobili (Banca Dati ISS-ISPESL non definisce Koc) sembrerebbe che Giuditta consideri Koc = 0 (che corrisponde alla condizione in cui il contaminante è tutto in soluzione) mentre si dovrebbe considerare Koc infinito (che corrisponde invece alla condizione in cui tutto il contaminante è adsorbito al suolo).

In linea con quanto riscontrato per il caso studio 1, riguardo le modalità di esposizione “contatto dermico” e “ingestione di suolo” i risultati dei cinque software sono praticamente coincidenti.

Riguardo il rischio per la risorsa idrica sotterranea, anche per il presente caso studio, è possibile osservare che:

- I risultati di RBCA Tool Kit, RACHEL e RISK-NET (1.0, 2.0 e 3.0 Pro) sono perfettamente coincidenti.
- Giuditta, evidenzia invece delle differenze rispetto all’RBCA ToolKit che, in termini di rapporto tra fattori, oscillano tra 1 e 35. Tali differenze presumibilmente sono riconducibili al fatto che in Giuditta per il percorso di lisciviazione si tiene conto, a differenza degli altri software, dell’esaurimento della sorgente. Tuttavia questo risulta difficilmente identificabile, principalmente a causa dell’impossibilità di visionare gli output intermedi di Giuditta.
- Anche il RISC5 evidenzia delle differenze rispetto alla RBCA ToolKit comprese tra 19 e 4,3 in termini di rapporto tra gli output. Come discusso in precedenza, tali differenze sono sostanzialmente imputabili all’utilizzo di un diverso modello di trasporto per la lisciviazione in falda e per il trasporto in falda.

## Risultati “Caso studio 5”

**Tabella 27 - OUTPUT: Indice di pericolo  
(Caso 5 - INALAZIONE DI VAPORI OUTDOOR, Suolo Profondo Residenziale)**

Inquinante indicatore	Indice di pericolo							Rapporto RBCA con					
	RBCA	RISC	GIUDITTA	RACHEL	RISK-NET 1.0	RISK-NET 2.0	RISK-NET 3.0	RISC	GIUDITTA	RACHEL	RISK-NET 1.0	RISK-NET 2.0	RISK-NET 3.0
Alifatici C5-C8	6.0E-03	2.9E-02	5.8E-03	6.1E-03	6.0E-03	6.0E-03	6.1E-03	2.1E-01	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00
Alifatici C9-C18	2.5E-03	1.0E-03	2.4E-03	2.5E-03	2.5E-03	2.5E-03	2.5E-03	2.5E+00	1.1E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00
Alifatici C19-C36	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Aromatici C9-C10	3.6E-03	3.1E-03	3.4E-03	3.6E-03	3.6E-03	3.6E-03	3.6E-03	1.2E+00	1.1E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00
Aromatici C11-C22	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

## Risultati “Caso studio 6”

**Tabella 28 - OUTPUT: Indice di pericolo  
Caso 6 - INALAZIONE DI VAPORI INDOOR, Falda Residenziale)**

Inquinante indicatore	Indice di pericolo							Rapporto RBCA con					
	RBCA	RISC	GIUDITTA	RACHEL	RISK-NET 1.0	RISK-NET 2.0	RISK-NET 3.0	RISC	GIUDITTA	RACHEL	RISK-NET 1.0	RISK-NET 2.0	RISK-NET 3.0
Alifatici C5-C8	6.0E-03	4.8E-03	5.7E-03	6.0E-03	6.0E-03	6.0E-03	6.0E-03	1.3E+00	1.1E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00
Alifatici C9-C18	5.9E-03	4.3E-03	5.7E-03	5.9E-03	5.9E-03	5.9E-03	5.9E-03	1.4E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00
Alifatici C19-C36	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Aromatici C9-C10	3.1E-03	4.2E-03	3.0E-03	3.1E-03	3.1E-03	3.1E-03	3.1E-03	7.3E-01	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00
Aromatici C11-C22	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

## Risultati “Caso studio 7”

**Tabella 29 - OUTPUT: Rischio  
(Caso 7 - INALAZIONE DI VAPORI INDOOR, Falda Industriale)**

Inquinante indicatore	Rischio							Rapporto RBCA con					
	RBCA	RISC	GIUDITTA	RACHEL	RISK-NET 1.0	RISK-NET 2.0	RISK-NET 3.0	RISC	GIUDITTA	RACHEL	RISK-NET 1.0	RISK-NET 2.0	RISK-NET 3.0
Benzene	2.7E-09	2.6E-09	2.6E-09	2.8E-09	2.7E-09	2.7E-09	2.7E-09	1.0E+00	1.0E+00	9.6E-01	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00
Toluene	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Alifatici C9-C18	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
MTBE	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

**Tabella 30 - OUTPUT: Indice di pericolo  
(Caso 7 - INALAZIONE DI VAPORI INDOOR, Falda Industriale)**

Inquinante indicatore	Indice di pericolo							Rapporto RBCA con					
	RBCA	RISC	GIUDITTA	RACHEL	RISK-NET 1.0	RISK-NET 2.0	RISK-NET 3.0	RISC	GIUDITTA	RACHEL	RISK-NET 1.0	RISK-NET 2.0	RISK-NET 3.0
Benzene	3.2E-05	3.1E-05	3.2E-05	3.3E-05	3.2E-05	3.2E-05	3.2E-05	1.0E+00	1.0E+00	9.6E-01	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00
Toluene	1.8E-06	1.7E-06	1.6E-06	1.9E-06	1.8E-06	1.8E-06	1.9E-06	1.1E+00	1.2E+00	9.7E-01	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00
Alifatici C9-C18	3.3E-02	2.8E-02	NC*	3.5E-02	3.3E-02	3.3E-02	3.3E-02	1.2E+00	-	9.6E-01	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00
MTBE	1.1E-05	1.1E-05	9.5E-06	9.9E-06	1.1E-05	1.1E-05	1.1E-05	9.6E-01	1.1E+00	1.1E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00

## Risultati “Caso studio 8”

**Tabella 31 - OUTPUT: Indice di pericolo  
(Caso 8 - INGESTIONE E CONTATTO DERMICO SUOLO, Suolo Superficiale Industriale)**

Inquinante indicatore	Indice di pericolo							Rapporto RBCA con					
	RBCA	RISC	GIUDITTA	RACHEL	RISK-NET 1.0	RISK-NET 2.0	RISK-NET 3.0	RISC	GIUDITTA	RACHEL	RISK-NET 1.0	RISK-NET 1.0	RISK-NET 3.0
Mercurio	9.6E-02	9.6E-02	9.6E-02	9.6E-02	9.6E-02	9.6E-02	9.6E-02	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00

**Tabella 32 - OUTPUT: Indice di pericolo  
(Caso 8 - INALAZIONE DI VAPORI OUTDOOR, Suolo Superficiale Industriale)**

Inquinante indicatore	Indice di pericolo							Rapporto RBCA con					
	RBCA	RISC	GIUDITTA	RACHEL	RISK-NET 1.0	RISK-NET 2.0	RISK-NET 3.0	RISC	GIUDITTA	RACHEL	RISK-NET 1.0	RISK-NET 1.0	RISK-NET 3.0
Mercurio	2.6E+00	4.6E+00	2.0E+00	2.6E+00	2.6E+00	2.6E+00	2.6E+00	5.5E-01	1.3E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00

**Tabella 33 - OUTPUT: Indice di pericolo  
(Caso 8 - INALAZIONE DI VAPORI INDOOR, Suolo Superficiale Industriale)**

Inquinante indicatore	Indice di pericolo							Rapporto RBCA con					
	RBCA	RISC	GIUDITTA	RACHEL	RISK-NET 1.0	RISK-NET 2.0	RISK-NET 3.0	RISC	GIUDITTA	RACHEL	RISK-NET 1.0	RISK-NET 1.0	RISK-NET 3.0
Mercurio	2.4E+01	2.4E+01	2.1E+01	2.4E+01	2.5E+01	2.5E+01	2.5E+01	1.0E+00	1.2E+00	1.0E+00	9.9E-01	9.9E-01	9.9E-01

## Risultati “Caso studio 9”

**Tabella 34 - OUTPUT: Rischio  
(Caso 9 - INALAZIONE DI VAPORI INDOOR, Falda Industriale)**

Inquinante indicatore	Rischio							Rapporto RBCA con					
	RBCA	RISC	GIUDITTA	RACHEL	RISK-NET 1.0	RISK-NET 2.0	RISK-NET 3.0	RISC	GIUDITTA	RACHEL	RISK-NET 1.0	RISK-NET 2.0	RISK-NET 3.0
Benzene	2.2E-08	2.1E-08	2.2E-08	2.4E-08	2.2E-08	2.2E-08	2.2E-08	1.0E+00	1.0E+00	9.3E-01	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00
Toluene	-	-	-	-	-	---	-	-	-	-	-	-	-
Benzo(a)antracene	4.6E-11	4.7E-11	3.7E-11	3.9E-11	4.6E-11	4.6E-11	4.6E-11	9.9E-01	1.2E+00	1.2E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00
Cloruro di vinile	5.0E-06	4.4E-06	5.0E-06	5.4E-06	5.0E-06	5.0E-06	5.0E-06	1.1E+00	1.0E+00	9.2E-01	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00
Triclorometano	3.7E-10	3.7E-10	3.7E-10	4.0E-10	3.7E-10	3.7E-10	3.7E-10	1.0E+00	1.0E+00	9.4E-01	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00
Dicloroetano, 1,2-	3.0E-09	3.2E-09	2.9E-09	3.2E-09	3.0E-09	3.0E-09	3.0E-09	1.0E+00	1.0E+00	9.3E-01	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00
Dicloroetilene - 1,1	3.0E-06	2.7E-06	2.9E-06	3.3E-06	3.0E-06	3.0E-06	3.0E-06	1.1E+00	1.0E+00	9.2E-01	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00
Tricloroetilene	3.9E-10	3.6E-10	3.8E-10	4.1E-10	3.9E-10	3.9E-10	3.9E-10	1.1E+00	1.0E+00	9.4E-01	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00
Dicloroetano, 1,1-	-	-	-	-	-	---	-	-	-	-	-	-	-
Dicloropropano, 1,2-	4.3E-07	4.4E-07	4.3E-07	4.6E-07	4.3E-07	4.3E-07	4.3E-07	9.9E-01	1.0E+00	9.3E-01	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00
Tricloroetano, 1,1,2-	1.9E-09	2.0E-09	1.8E-09	2.0E-09	1.9E-09	1.9E-09	1.9E-09	9.4E-01	1.0E+00	9.2E-01	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00

**Tabella 35 - OUTPUT: Indice di Pericolo  
(Caso 9 - INALAZIONE DI VAPORI INDOOR, Falda Industriale)**

Inquinante indicatore	Indice di pericolo							Rapporto RBCA con					
	RBCA	RISC	GIUDITTA	RACHEL	RISK-NET 1.0	RISK-NET 2.0	RISK-NET 3.0	RISC	GIUDITTA	RACHEL	RISK-NET 1.0	RISK-NET 2.0	RISK-NET 3.0
Benzene	2.6E-04	2.6E-04	2.6E-04	2.8E-04	2.6E-04	2.6E-04	2.6E-04	1.0E+00	1.0E+00	9.3E-01	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00
Toluene	2.9E-06	2.8E-06	2.9E-06	3.1E-06	2.9E-06	2.9E-06	2.9E-06	1.1E+00	1.0E+00	9.4E-01	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00
Benzo(a)antracene	7.6E-10	7.6E-10	6.1E-10	6.4E-10	7.6E-10	7.6E-10	7.6E-10	9.9E-01	1.2E+00	1.2E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00
Cloruro di vinile	1.6E-02	1.4E-02	1.6E-02	1.7E-02	1.6E-02	1.6E-02	1.6E-02	1.1E+00	1.0E+00	9.2E-01	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00
Triclorometano	9.3E-07	9.1E-07	9.2E-07	9.9E-07	9.3E-07	9.3E-07	9.3E-07	1.0E+00	1.0E+00	9.4E-01	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00
Dicloroetano, 1,2-	3.2E-05	3.4E-05	3.2E-05	3.5E-05	3.2E-05	3.2E-05	3.2E-05	9.5E-01	1.0E+00	9.3E-01	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00
Dicloroetilene - 1,1	8.4E-04	7.6E-04	8.4E-04	9.1E-04	8.4E-04	8.4E-04	8.4E-04	1.1E+00	1.0E+00	9.2E-01	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00
Tricloroetilene	3.0E-05	2.8E-05	3.0E-05	3.2E-05	3.0E-05	3.0E-05	3.0E-05	1.1E+00	1.0E+00	9.4E-01	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00
Dicloroetano, 1,1-	9.5E-05	9.2E-05	NC*	1.0E-04	9.5E-05	9.5E-05	9.5E-05	1.0E+00	-	9.5E-01	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00
Dicloropropano, 1,2-	1.6E-02	1.6E-02	1.6E-02	1.7E-02	1.6E-02	1.6E-02	1.6E-02	9.9E-01	1.0E+00	9.3E-01	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00
Tricloroetano, 1,1,2-	1.7E-06	1.8E-06	1.6E-06	1.8E-06	1.7E-06	1.7E-06	1.7E-06	9.4E-01	1.0E+00	9.2E-01	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00

I casi studio da 5 a 9 riguardano la volatilizzazione di vapori indoor o outdoor da suolo superficiale (SS), suolo profondo (SP) o falda (GW). Esaminando le tabelle degli output è possibile evidenziare che:

- Riguardo l'inalazione di vapori indoor da falda (casi 6, 7 e 9), tutti i software forniscono risultati pressoché coincidenti, ad eccezione del caso studio 6 in corrispondenza del quale

RISC evidenzia delle lievi differenze rispetto all'RBCA ToolKit comprese tra 0,7 e 1,4.

- Riguardo l'inalazione di vapori outdoor da suolo profondo (casi 2 e 5), i software RBCA Tool Kit, RACHEL e RISK-NET (1.0, 2.0 e 3.0 Pro) forniscono risultati pressoché coincidenti, mentre RISC e Giuditta evidenziano delle differenze rispetto all'RBCA ToolKit comprese rispettivamente tra 0,3 e 2,5 e tra 0,8 e 1,1.
- Riguardo l'inalazione di vapori outdoor da suolo superficiale (caso 8), i software RBCA Tool Kit, RACHEL e RISK-NET (1.0, 2.0 e 3.0 Pro) forniscono risultati pressoché coincidenti, mentre RISC e Giuditta evidenziano delle differenze rispetto all'RBCA ToolKit pari rispettivamente a 0,5 e 1,2.
- Riguardo l'inalazione di vapori indoor da suolo superficiale (caso 8), i cinque software forniscono risultati pressoché coincidenti.

## 4 CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

---

Dai confronti riportati in questo studio è possibile concludere quanto segue:

- Per le modalità di esposizione contatto dermico e ingestione tutti i cinque software forniscono output perfettamente coincidenti.
- Per tutte le altre modalità di esposizione esaminate, il software RISK-NET 3.0 restituisce risultati pressoché coincidenti a quelli ottenuti con RBCA Tool Kit, RACHEL e RISK-NET 1.0 e 2.0.
- Per la volatilizzazione in/outdoor da SS, SP e GW il software RISK-NET 3.0 può invece fornire risultati diversi rispetto a quelli ottenuti utilizzando RISC5 e Giuditta. In particolare i confronti effettuati in questo studio hanno messo in evidenza che delle differenze tra gli output forniti da RISC5 e Giuditta e quelli ottenuti con l'RBCA ToolKit comprese rispettivamente tra 0,3 e 2,5 e tra 0,8 e 1,1.
- Per il rischio per la risorsa idrica RISC5 e Giuditta forniscono dei risultati in alcuni casi significativamente diversi rispetto a quelli ottenuti con il software RISK-NET 3.0. In particolare, i confronti effettuati in questo studio hanno evidenziato delle differenze negli output del RISC5 e di Giuditta rispetto all'RBCA ToolKit in alcuni casi anche molto significative. Per quanto riguarda RISC5 tali differenze sono sostanzialmente imputabili all'utilizzo di un diverso modello di trasporto per la lisciviazione in falda (Unsaturated Zone Model) e per il trasporto in falda (AT123D Model). Per Giuditta tali differenze presumibilmente sono riconducibili al fatto che in Giuditta per il percorso di lisciviazione si tiene conto, a differenza degli altri software, dell'esaurimento della sorgente. Tuttavia questo risulta difficilmente identificabile, principalmente a causa dell'impossibilità di visionare gli output intermedi di Giuditta.

## BIBLIOGRAFIA

---

- APAT (2008) 'Criteri metodologici per l'applicazione dell'analisi assoluta di rischio ai siti contaminati', rev. 2.
- ASTM (2000) 'Standard Guide for Risk-Based Corrective Action', Designation: E-2081-00.
- Baciocchi R., Berardi S., Forni A., Sconocchia A., Traversa A., Verginelli I., Villani I. (2012). 'Descrizione e validazione del nuovo software di Analisi di Rischio Risk-net'. ECO, tecnologie per l'ambiente bonifiche e rifiuti, 18, 30-33. DEA Edizioni.
- Berardi S., Villani I., Forni A., Verginelli I., Traversa A., Marescalco P. (2012). 'Confronto tra i diversi software disponibili sul mercato per la procedura di analisi di rischio'. Atti del convegno "Remediation Technologies conference" (REMTECH 2012). Ferrara (Italia), Settembre 2012. ISBN: 978-88-904428-6-5.
- Cignoni G.A., Montangero C., Semini L. (2009) 'Il controllo del software: verifica e validazione' Corso di Ingegneria del software, Laurea in Informatica e Informatica applicata, Dipartimento di Informatica, Università di Pisa.
- D.Lgs 04/08 (2008) 'Ulteriori disposizioni correttive ed integrative del decreto legislativo 3 aprile 2006, n. 152, recante norme in materia ambientale', Pubblicato nella Gazzetta Ufficiale n. 24 del 29 Gennaio 2008, Supplemento Ordinario n.24.
- D.Lgs 152/06 (2006) 'Norme in materia ambientale', Pubblicato nella Gazzetta Ufficiale N.88 del 14 Aprile 2006, Supplemento Ordinario n.96.
- ISS-ISPEL (2009) 'Banca dati ISS/ISPEL. Proprietà chimico-fisiche e tossicologiche dei contaminanti', aggiornata a maggio del 2009.
- ISS-INAIL (2018) 'Banca dati ISS/INAIL. Proprietà chimico-fisiche e tossicologiche dei contaminanti', aggiornata a marzo del 2018.
- RECONNET (2012) 'Validazione del software Risk-net', Disponibile su [www.reconnet.net](http://www.reconnet.net).
- RECONNET (2013) 'Studio comparativo di software di analisi di rischio sanitario-ambientale', Disponibile su [www.reconnet.net](http://www.reconnet.net).
- RECONNET (2015) 'Validazione del software Risk-net 2.0', Disponibile su [www.reconnet.net](http://www.reconnet.net).
- UNICHIM (2002) 'Suoli e falde contaminati: analisi di rischio sito-specifica, criteri e parametri' Manuale UNICHIM N. 196/1
- Verginelli I., Berardi S., Forni A., Marescalco P., Traversa A., Villani I. (2013). 'Benchmark di software di analisi di rischio applicata ai siti contaminati'. Atti del Workshop "Siti Contaminati. Esperienze negli interventi di risanamento" (SiCon 2013). Roma (Italia), Febbraio 2013. ISBN: 88-7850-013-5.

## **APPENDICE A**

Confronto tra output:  
Parametri di input utilizzati per i 9 casi studio

Tab. A.1 – Controllo con altre soluzioni: Scenari di calcolo dei 9 casi studio

DATI DI INPUT	Caso studio 1	Caso studio 2	Caso studio 3	Caso studio 4	Caso studio 5	Caso studio 6	Caso studio 7	Caso studio 8	Caso studio 9
Destinazione d'uso del sito	Industriale	Residenziale	Residenziale	Industriale	Residenziale	Residenziale	Industriale	Industriale	Industriale
Modalità di applicazione dell'AdR	diretta	diretta	diretta	diretta	diretta	diretta	diretta/inversa	diretta	diretta
Sorgenti di contaminazione	SS	SP	GW	SS	SP	GW	GW	SS	GW
Inquinanti indicatori	Fenolo, Piombo, Tricloroetilene, Etilbenzene, Alifatici C9 - C18, Crisene	Cloruro di vinile, Benzene, Mercurio, 2-Clorofenolo, PCB		Alifatici C5-C8 - Alifatici C9 - C18 - Alifatici C19 - C36, Aromatici C9-C10 - Aromatici C11-C22			Vedere "Tabella 3"		
CRS	CSC x 3			CSC x 3			Vedere "Tabella 3"		
Meccanismi di trasporto	- (Diretto) - Percolazione e trasporto in falda	- Volatilizzazione di vapori outdoor	- Volatilizzazione di vapori indoor	- (Diretto) - Percolazione e trasporto in falda	- Volatilizzazione di vapori outdoor	- Volatilizzazione di vapori indoor	- Volatilizzazione vapori outdoor - Volatilizzazione vapori indoor	- Volatilizzazione vapori - Sospensione particolato	- Volatilizzazione di vapori indoor
Modalità di esposizione	- Ing suolo e contatto dermico (ON-SITE) - Rischio risorsa idrica (OFF-SITE)	- Inalazione di vapori outdoor (ON-SITE)	- Inalazione di vapori indoor (ON-SITE)	- Ing suolo e contatto dermico (ON-SITE) - Rischio risorsa idrica (OFF-SITE)	- Inalazione di vapori outdoor (ON-SITE)	- Inalazione di vapori indoor (ON-SITE)	- Inalazione di vapori outdoor (ON-SITE) - Inalazione di vapori indoor (ON-SITE)	- Ing suolo e contatto dermico (ON-SITE) - Inalazione di vapori outdoor (ON-SITE) - Inalazione di vapori indoor (ON-SITE)	Inalazione di vapori indoor (ON-SITE)
Recettori	Lavoratori (adulti)	Residenti (adulti)	Residenti (adulti)	Lavoratori (adulti)	Residenti (adulti)	Residenti (adulti)	Lavoratori (adulti)	Lavoratori (adulti)	Lavoratori (adulti)
Tessitura terreno insaturo	SANDY LOAM	SILT LOAM	SILTY CLAY	SANDY LOAM	SILT LOAM	SILTY CLAY	SILT	SAND RBCA	SILT
Tessitura terreno saturo									
Parametri caratteristici del sito, diversi da default [ISPR, 2008]	Livello piezometrico dell'acquifero, Spessore frangia capillare, Infiltrazione efficace, Spessore della falda, Geometria della sorgente di contaminazione, Conducibilità idraulica del terreno saturo, Distanza dal punto di conformità, Caratteristiche dell'ambiente indoor			Livello piezometrico dell'acquifero, Spessore frangia capillare, Infiltrazione efficace, Spessore della falda, Geometria della sorgente di contaminazione, Conducibilità idraulica del terreno saturo, Distanza dal punto di conformità, Caratteristiche dell'ambiente indoor			---		
Punto di conformità per la falda	25 metri	---	---	25 metri	---	---	---	---	---

**Tab. A.2** – Concentrazioni rappresentative alla sorgente (CRS) per i casi studio 7, 8 e 9

CASO 7		CASO 8		CASO 9	
Inquinante indicatore	CRS (mg/l)	Inquinante indicatore	CRS (mg/kg)	Inquinante indicatore	CRS (mg/l)
Benzene	3.1E-3	Mercurio	5.2E+1	Benzene	2.6E-2
Toluene	2.8E-2			Toluene	4.5E-2
Alifatici C9-C18	1.5E-1			Benzo(a)antracene	2.1E-4
MTBE	7.3E-2			Cloruro di vinile	1.5E+0
				Triclorometano	1.7E-4
				Dicloroetano, 1,2-	2.1E-3
				Dicloroetilene - 1,1	1.7E-1
				Tricloroetilene	1.5E-3
				Dicloroetano, 1,1-	1.6E-1
				Dicloropropano, 1,2-	3.3E-1
				Tricloroetano, 1,1,2-	2.6E-3

Tab. A.3.a – Valori dei parametri sito-specifici per i casi studio da 1 a 6 (\*)

Documento [APAT, 2008]				Caso studio 1	Caso studio 2	Caso studio 3	Caso studio 4	Caso studio 5	Caso studio 6
Simbolo	Parametro	Unità di misura	Valore di default	Valore sito specifico					
<b>Geometria della zona insatura</b>									
$L_{GW}$	Livello piezometrico dell'acquifero	cm	300	200	450	450	200	450	450
$h_{cap}$	Spessore frangia capillare	cm	18.8	25	68.2	192	25	68.2	192
$h_v$	Spessore della zona insatura	cm	281.2	175	381.8	258	175	381.8	258
$D$	Spessore del suolo superficiale	cm	100	100	100	100	100	100	100
$\eta_{out}$	Frazione areale di fratture nel pavimento outdoor	adim.	1	1	1	1	1	1	1
<b>Geometria della sorgente di contaminazione in zona insatura</b>									
$L_s(SS)$	Profondità del top della sorgente nel suolo superficiale rispetto al p.c.	cm	0	0	---	---	0	---	---
$L_s(SP)$	Profondità del top della sorgente nel suolo profondo rispetto al p.c.	cm	100	---	100	---	---	100	---
$L_r(SS)$	Profondità della base della sorgente nel suolo superficiale rispetto al p.c.	cm	100	100	---	---	100	---	---
$L_r(SP)$	Profondità della base della sorgente nel suolo profondo rispetto al p.c.	cm	300	---	450	---	---	450	---
$d$	Spessore della sorgente nel suolo superficiale (insaturo)	cm	100	100	---	---	100	---	---
$d_s$	Spessore della sorgente nel suolo profondo (insaturo)	cm	200	---	350	---	---	350	---
	Spessore della sorgente nel suolo insaturo	cm	300	100	350	---	100	350	---
$L_F$	Soggiacenza della falda rispetto al top della sorgente	cm	300	200	---	---	200	---	---
<b>Caratteristiche fisiche del terreno in zona insatura</b>									
$\rho_s$	Densità del suolo	g/cm <sup>3</sup>	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7
$\theta_T$	Porosità totale del terreno in zona insatura	adim.	0.41	0.41	0.45	0.36	0.41	0.45	0.36
$\theta_e$	Porosità effettiva del terreno in zona insatura		0.353	0.345	0.383	0.29	0.345	0.383	0.29
$\theta_w$	Contenuto volumetrico di acqua	adim.	0.103	0.194	0.255	0.274	0.194	0.255	0.274
$\theta_a$	Contenuto volumetrico di aria	adim.	0.250	0.151	0.128	0.016	0.151	0.128	0.016
$\theta_{wcap}$	Contenuto volumetrico di acqua nelle frangia capillare	adim.	0.318	0.288	0.297	0.282	0.288	0.297	0.282
$\theta_{acap}$	Contenuto volumetrico di aria nelle frangia capillare	adim.	0.035	0.057	0.086	0.008	0.057	0.086	0.008
$f_{oc}$	Frazione di carbonio organico nel suolo insaturo	g-C/g-s	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
$I_{ef}$	Infiltrazione efficace	cm/anno	30	45	---	---	45	---	---
$pH$	pH del suolo insaturo	adim.	6.8	6.8	6.8	6.8	6.8	6.8	6.8
<b>Geometria della zona satura</b>									
$d_a$	Spessore della falda	cm	---	500	---	500	500	---	500
<b>Geometria della sorgente di contaminazione in zona satura</b>									
$W$	Estensione della sorgente in direzione parallela alla direzione del flusso di falda	cm	4500	3000	3000	3000	3000	3000	3000
$S_w$	Estensione della sorgente in direzione ortogonale alla direzione del flusso di falda	cm	4500	5000	5000	5000	5000	5000	5000
$A$	Area della sorgente rispetto alla direzione del flusso di falda	cm <sup>2</sup>	20250000	1.50E+07	1.50E+07	1.50E+07	1.50E+07	1.50E+07	1.50E+07
$\delta_{gw}$	Spessore della zona di miscelazione in falda	cm	200	da calcolare			da calcolare		

(\*) Per i casi studio da 7 a 9, i valori dei parametri sito specifici sono assunti pari a quelli proposti come default dal documento (APAT, 2008).

Tab. A.3.b – Valori dei parametri sito-specifici per i casi studio da 1 a 6 (\*)

Documento [APAT, 2008]				Caso studio 1	Caso studio 2	Caso studio 3	Caso studio 4	Caso studio 5	Caso studio 6
Simbolo	Parametro	Unità di misura	Valore di default	Valore sito specifico					
<b>Caratteristiche fisiche del terreno in zona satura</b>									
$V_{gw}$	Velocità di Darcy	cm/anno	2500	<b>388</b>			<b>388</b>		
$K_{sat}$	Conducibilità idraulica del terreno saturo	cm/anno	---	<b>38789</b>	---	---	<b>38789</b>	---	---
$i$	Gradiente idraulico	adim.	---	0.01	---	---	0.01	---	---
$V_e$	Velocità media effettiva nella falda	cm/anno	7082	<b>1124</b>	---	---	<b>1124</b>	---	---
$\theta_T$	Porosità totale del terreno in zona satura	adim.	0.41	<b>0.41</b>	---	<b>0.36</b>	<b>0.41</b>	---	<b>0.36</b>
$\theta_e$	Porosità efficace del terreno in zona satura	adim.	0.353	<b>0.345</b>	---	<b>0.29</b>	<b>0.345</b>	---	<b>0.29</b>
$f_{oc}$	Frazione di carbonio organico nel suolo saturo	g-C/g-s	0.001	0.001	---	0.001	0.001	---	0.001
$\alpha_x$	Dispersività longitudinale	cm	10	250	---	---	250	---	---
$\alpha_y$	Dispersività trasversale	cm	3.3	83.33	---	---	83.33	---	---
$\alpha_z$	Dispersività verticale	cm	0.5	12.5	---	---	12.5	---	---
	SE: Distanza dal punto di conformità	cm	100	<b>2500</b>	---	---	<b>2500</b>	---	---
<b>pH</b>	pH del suolo saturo	adim.	6.8	6.8	6.8	6.8	6.8	6.8	6.8
<b>Caratteristiche dell'aria outdoor</b>									
$\delta_{air}$	Altezza della zona di miscelazione	cm	200	200	200	200	200	200	200
$W'$	Estensione della sorgente in direzione parallela alla direzione prevalente del vento	cm	4500	---	<b>3000</b>	---	---	<b>3000</b>	---
$S_w'$	Estensione della sorgente in direzione ortogonale alla direzione prevalente del vento	cm	4500	---	<b>4000</b>	---	---	<b>4000</b>	---
$A'$	Area della sorgente rispetto alla direzione prevalente del vento	cm <sup>2</sup>	20250000	---	---	---	---	---	---
$U_{air}$	Velocità del vento	cm/s	225	---	225	---	---	225	---
$\sigma_y$	Coefficiente di dispersione trasversale	cm	---	---	---	---	---	---	---
$\sigma_z$	Coefficiente di dispersione verticale	cm	---	---	---	---	---	---	---
$\tau$	Tempo medio di durata del flusso di vapore (RES.)	anno	30	---	30	30	---	30	30
$\tau$	Tempo medio di durata del flusso di vapore (IND.)	anno	25	---	25	25	---	25	25
$P_e$	Portata di particolato per unità di superficie	g/(cm <sup>2</sup> .s)	6.90E-14	---	---	---	---	---	---
<b>Caratteristiche dell'aria indoor</b>									
$A_b$	Superficie totale coinvolta nell'infiltrazione	cm <sup>2</sup>	700000	---	---	<b>6000000</b>	---	---	<b>6000000</b>
$L_{crack}$	Spessore delle fondazioni/muri	cm	15	---	---	<b>25</b>	---	---	<b>25</b>
$L_b$	Rapporto tra volume indoor ed area di infiltrazione (RES.)	cm	200	---	---	<b>190</b>	---	---	<b>190</b>
$L_b$	Rapporto tra volume indoor ed area di infiltrazione (IND.)	cm	300	---	---	---	---	---	---
$\eta$	Frazione areale di fratture	adim.	0.01	---	---	0.01	---	---	0.01
$\theta_{wcrack}$	Contenuto volumetrico di acqua nelle fratture	adim.	0.12	---	---	0.12	---	---	0.12
$\theta_{acrack}$	Contenuto volumetrico di aria nelle fratture	adim.	0.26	---	---	0.26	---	---	0.26
<b>ER</b>	Tasso di ricambio di aria indoor (RES.)	1/s	0.00014	---	---	0.00014	---	---	0.00014
<b>ER</b>	Tasso di ricambio di aria indoor (IND.)	1/s	0.00023	---	---	---	---	---	---
$L_T$	Distanza tra il top della sorgente nel suolo insaturo (in falda) e la base delle fondazioni	cm	0 (285)	---	---	<b>430</b>	---	---	<b>430</b>
$Z_{crack}$	Profondità delle fondazioni	cm	15	---	---	<b>20</b>	---	---	<b>20</b>
$K_v$	Permeabilità del suolo al flusso di vapore	cm <sup>2</sup>	1.00E-08	---	---	1.00E-08	---	---	1.00E-08
$\Delta p$	Differenza di pressione tra indoor e outdoor	g/(cm <sup>2</sup> .s <sup>2</sup> )	0	---	---	0	---	---	0
$\mu_{air}$	Viscosità del vapore	g/(cm*s)	1.81E-04	---	---	1.81E-04	---	---	1.81E-04
$\tau$	Tempo medio di durata del flusso di vapore (IND.)	anni	25	---	---	25	---	---	25
$\tau$	Tempo medio di durata del flusso di vapore (RES.)	anni	30	---	---	30	---	---	30

(\*) Per i casi studio da 7 a 9, i valori dei parametri sito specifici sono assunti pari a quelli proposti come default dal documento (APAT, 2008).

Tab. A.4 - Fattori di esposizione per casi studio da 1 a 6 (\*\*)

FATTORI DI ESPOSIZIONE (EF)	Simbolo	Unità di Misura	Caso studio 1	Caso studio 2	Caso studio 3	Caso studio 4	Caso studio 5	Caso studio 6
			Com/Ind	Residenziale			Com/Ind	Residenziale
			Adulto	Adulto	Adulto	Adulto	Adulto	Adulto
<b>Fattori comuni a tutte le modalità di esposizione</b>								
Peso corporeo	BW	kg	70	70	70	70	70	70
Tempo di esposizione per le sost. cancerogene	ATc	anni	70	70	70	70	70	70
Tempo di esposizione per le sost. non cancerogene	ATn	anni	ED	ED	ED	ED	ED	ED
<b>Inalazione di Aria Outdoor (AO)</b>								
Durata di esposizione	ED	anni	---	24	---	---	24	---
Frequenza di esposizione	EF	giorni/anno	---	350	---	---	350	---
Frequenza giornaliera di esposizione outdoor	EFgo	ore/giorno	---	24	---	---	24	---
Inalazione outdoor	Bo	m <sup>3</sup> /ora	---	0.8333	---	---	0.8333	---
Frazione di particelle di suolo nella polvere	Fsd	adim.	---	1	---	---	1	---
<b>Inalazione di Aria Indoor (AI)</b>								
Durata di esposizione	ED	anni	---	---	24	---	---	24
Frequenza di esposizione	EF	giorni/anno	---	---	350	---	---	350
Frequenza giornaliera di esposizione indoor	EFgi	ore/giorno	---	---	24	---	---	24
Inalazione indoor	Bi	m <sup>3</sup> /ora	---	---	0.8333	---	---	0.8333
Frazione indoor di polvere all'aperto	Fi	adim.	---	---	1	---	---	1
<b>Contatto dermico con Suolo (SS)</b>								
Durata di esposizione	ED	anni	25	---	---	25	---	---
Frequenza di esposizione	EF	giorni/anno	250	---	---	250	---	---
Superficie di pelle esposta	SA	cm <sup>2</sup>	3300	---	---	3300	---	---
Fattore di aderenza dermica del suolo	AF	mg/(cm <sup>2</sup> giorno)	1	---	---	1	---	---
<b>Ingestione di Suolo (SS)</b>								
Durata di esposizione	ED	anni	25	---	---	25	---	---
Frequenza di esposizione	EF	giorni/anno	250	---	---	250	---	---
Frazione di suolo ingerita	FI	adim.	1	---	---	1	---	---
Tasso di ingestione di suolo	IR	mg/giorno	50	---	---	50	---	---

(\*\*) Per i casi studio da 7 a 9, i valori dei fattori di esposizione sono assunti pari a quelli proposti come default dal documento (APAT, 2008), ad eccezione del "Tasso di inalazione outdoor e indoor" posto pari a 20 m<sup>3</sup>/d.

**Tab. A.5.a** - Opzioni di calcolo utilizzati per il confronto tra RBCA Tool Kit e RISC.

Via di esposizione	Sorgente di contaminazione	RBCA toolkit	RISC
Volatilizzazione Outdoor	Suolo superficiale (SS) e Suolo profondo (SP)	Attivata opzione "Esaurimento in sorgente"	Utilizzato "Vapor Emission Model" (modello transitorio) con diminuzione della sorgente nel tempo in combinazione con "Outdoor Air Model".
		Attivata opzione modello: "Combination surface soil/Johnson & Ettinger"	Biodegradazione nella zona insatura non attivata
	Falda (GW)	(Impostazioni di default)	Utilizzato "Vapor Emission Model" (stazionario) con sorgente costante nel tempo in combinazione con "Outdoor Air Model". Biodegradazione nella zona insatura non attivata
Volatilizzazione Indoor	Suolo superficiale (SS) e Suolo profondo (SP)	Attivato esaurimento in sorgente	Utilizzato "Vapor Emission Model" con Johnson and Ettinger (stazionario) con sorgente costante nel tempo
		Attivata opzione modello: "Johnson & Ettinger model for soil and groundwater volatilization"	Biodegradazione nella zona insatura non attivata
	Falda (GW)	Attivata opzione modello: "Johnson & Ettinger model for soil and groundwater volatilization"	Utilizzato "Vapor Emission Model" con Biodegradazione nella zona insatura non attivata
Lisciviazione in falda	Suolo superficiale (SS) e Suolo profondo (SP)	Attivato calcolo "SAM"	Utilizzato "Unsaturated zone model" (modello transitorio) con diminuzione della sorgente nel tempo Biodegradazione nella zona insatura non attivata
		Utilizzato "ASTM Model"	
Trasporto in falda	Falda (GW)	Attivata opzione modello: "Domenico equation with dispersion only (no biodegradation)"	Utilizzato "Groundwater Model" Biodegradazione nella zona insatura non attivata

**Tab. A.5.b** - Opzioni di calcolo utilizzati per il confronto tra RBCA Tool Kit e GIUDITTA.

Via di esposizione	Sorgente di contaminazione	RBCA toolkit	GIUDITTA
Volatilizzazione Outdoor	Suolo superficiale (SS) e Suolo profondo (SP)	Attivata opzione "Esaurimento in sorgente"	(Impostazioni di default)
		Attivata opzione modello: "Combination surface soil/Johnson & Etinger"	
	Falda (GW)	(Impostazioni di default)	(Impostazioni di default)
Volatilizzazione Indoor	Suolo superficiale (SS) e Suolo profondo (SP)	Attivato esaurimento in sorgente	(Impostazioni di default)
		Attivata opzione modello: "Johnson & Etinger model for soil and groundwater volatilization"	
	Falda (GW)	Attivata opzione modello: "Johnson & Etinger model for soil and groundwater volatilization"	(Impostazioni di default)
Lisciviazione in falda	Suolo superficiale (SS) e Suolo profondo (SP)	Attivato calcolo "SAM" Utilizzato "ASTM Model"	Attivato calcolo "SAM"
Trasporto in falda	Falda (GW)	Attivata opzione modello: "Domenico equation with dispersion only (no biodegradation)"	(Impostazioni di default)

**Tab. A.5.c** - Opzioni di calcolo utilizzati per il confronto tra RBCA Tool Kit e RACHEL.

Via di esposizione	Sorgente di contaminazione	RBCA toolkit	RACHEL
Volatilizzazione Outdoor	Suolo superficiale (SS) e Suolo profondo (SP)	Attivata opzione "Esaurimento in sorgente"	Attivato esaurimento in sorgente (default per la volatilizzazione)
		Attivata opzione modello: "Combination surface soil/Johnson & Ettinger"	
	Falda (GW)	(Impostazioni di default)	Impostata assenza di prodotto libero
Volatilizzazione Indoor	Suolo superficiale (SS) e Suolo profondo (SP)	Attivato esaurimento in sorgente	Attivato esaurimento in sorgente (default per la volatilizzazione)
		Attivata opzione modello: "Johnson & Ettinger model for soil and groundwater volatilization"	
	Falda (GW)	Attivata opzione modello: "Johnson & Ettinger model for soil and groundwater volatilization"	Impostata assenza di prodotto libero
Lisciviazione in falda	Suolo superficiale (SS) e Suolo profondo (SP)	Attivato calcolo "SAM"	Attivato calcolo "SAM"
		Utilizzato "AST M Model"	Impostata assenza di prodotto libero Disattivata opzione "Esaurimento sorgente"
Trasporto in falda	Falda (GW)	Attivata opzione modello: "Domenico equation with dispersion only (no biodegradation)"	Dispersione in falda: DAF2
			Impostata assenza di prodotto libero

**Tab. A.5.d** - Opzioni di calcolo utilizzati per il confronto tra RBCA Tool Kit e RISK-NET 1.0.

Via di esposizione	Sorgente di contaminazione	RBCA toolkit	RISK-NET 1.0
Volatilizzazione Outdoor	Suolo superficiale (SS) e Suolo profondo (SP)	Attivata opzione "Esaurimento in sorgente"	Attivata opzione "Esaurimento in sorgente"
		Attivata opzione modello: "Combination surface soil/Johnson & Ettinger"	Disattivata opzione "Limita CRS a Csat"
	Falda (GW)	(Impostazioni di default)	Disattivata opzione "Limita CRS a Csat"
Volatilizzazione Indoor	Suolo superficiale (SS) e Suolo profondo (SP)	Attivata esaurimento in sorgente	Attivata opzione "Esaurimento in sorgente"
		Attivata opzione modello: "Johnson & Ettinger model for soil and groundwater volatilization"	Disattivata opzione "Limita CRS a Csat"
	Falda (GW)	Attivata opzione modello: "Johnson & Ettinger model for soil and groundwater volatilization"	Disattivata opzione "Limita CRS a Csat"
Lisciviazione in falda	Suolo superficiale (SS) e Suolo profondo (SP)	Attivato calcolo "SAM"	Attivato calcolo "SAM"
		Utilizzato "ASTM Model"	Disattivata opzione "Limita CRS a Csat" Disattivata opzione "Esaurimento sorgente"
Trasporto in falda	Falda (GW)	Attivata opzione modello: "Domenico equation with dispersion only (no biodegradation)"	Dispersione in falda: DAF2
			Disattivata opzione "Limita CRS a Csat"

**Tab. A.5.e** - Opzioni di calcolo utilizzati per il confronto tra RBCA Tool Kit e RISK-NET 2.0.

Via di esposizione	Sorgente di contaminazione	RBCA toolkit	RISK-NET 2.0
Volatilizzazione Outdoor	Suolo superficiale (SS) e Suolo profondo (SP)	Attivata opzione "Esaurimento in sorgente"	Attivata opzione "Esaurimento in sorgente"
		Attivata opzione modello: "Combination surface soil/Johnson & Ettinger"	Disattivata opzione "Considera Csat per calcolo del Rischio"
	Falda (GW)	(Impostazioni di default)	Disattivata opzione "Limita CRS a Csat"
Volatilizzazione Indoor	Suolo superficiale (SS) e Suolo profondo (SP)	Attivato esaurimento in sorgente	Attivata opzione "Esaurimento in sorgente"
		Attivata opzione modello: "Johnson & Ettinger model for soil and groundwater volatilization"	Disattivata opzione "Considera Csat per calcolo del Rischio"
	Falda (GW)	Attivata opzione modello: "Johnson & Ettinger model for soil and groundwater volatilization"	Disattivata opzione "Considera Csat per calcolo del Rischio"
Lisciviazione in falda	Suolo superficiale (SS) e Suolo profondo (SP)	Attivato calcolo "SAM"	Attivato calcolo "SAM"
		Utilizzato "ASTM Model"	Disattivata opzione "Considera Csat per calcolo del Rischio"
			Disattivata opzione "Esaurimento sorgente"
Trasporto in falda	Falda (GW)	Attivata opzione modello: "Domenico equation with dispersion only (no biodegradation)"	Dispersione in falda: DAF2
			Disattivata opzione "Considera Csat per calcolo del Rischio"

**Tab. A.5.f** - Opzioni di calcolo utilizzati per il confronto tra RBCA Tool Kit e RISK-NET 3.0 Pro.

Via di esposizione	Sorgente di contaminazione	RBCA toolkit	RISK-NET 3.0 Pro
Volatilizzazione Outdoor	Suolo superficiale (SS) e Suolo profondo (SP)	Attivata opzione "Esaurimento in sorgente"	Attivata opzione "Esaurimento in sorgente"
		Attivata opzione modello: "Combination surface soil/Johnson & Ettinger"	Disattivata opzione "Considera Csat per calcolo del Rischio e delle CSR"
	Falda (GW)	(Impostazioni di default)	Attivato " Utilizza le RfD e gli SF per il calcolo del percorso di inalazione"
Volatilizzazione Indoor	Suolo superficiale (SS) e Suolo profondo (SP)	Attivato esaurimento in sorgente	Attivata opzione "Esaurimento in sorgente"
		Attivata opzione modello: "Johnson & Ettinger model for soil and groundwater volatilization"	Disattivata opzione "Considera Csat per calcolo del Rischio e delle CSR"
	Falda (GW)		Attivato " Utilizza le RfD e gli SF per il calcolo del percorso di inalazione"
		Attivata opzione modello: "Johnson & Ettinger model for soil and groundwater volatilization"	Disattivata opzione "Considera Csat per calcolo del Rischio e delle CSR"
Lisciviazione in falda	Suolo superficiale (SS) e Suolo profondo (SP)	Attivato calcolo "SAM"	Attivato calcolo "SAM"
		Utilizzato "ASTM Model"	Disattivata opzione "Considera Csat per calcolo del Rischio e delle CSR"
			Disattivata opzione "Esaurimento sorgente"
Trasporto in falda	Falda (GW)	Attivata opzione modello: "Domenico equation with dispersion only (no biodegradation)"	Dispersione in falda: DAF2
			Disattivata opzione "Considera Csat per calcolo del Rischio e delle CSR"