CONFRONTO TRA DIFFERENTI VERSIONI DEL SOFTWARE RISK-NET PER LA VALUTAZIONE DEL RISCHIO SANITARIO-AMBIENTALE DI UN SITO CONTAMINATO DI INTERESSE NAZIONALE

Claudia Labianca[1,*], Sabino De Gisi[1], Grazia Pannarale[1], Vito Specchio[2], Michele Notarnicola[1]

[1] Politecnico di Bari, Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale, del Territorio, Edile e di Chimica.

[2] Sogesid S.p.a., Roma.

Sommario – Il presente lavoro intende fornire una valutazione aggiornata del rischio sanitario-ambientale per i lavoratori coinvolti negli interventi di messa in sicurezza e bonifica dell'area Micorosa all'interno del SIN di Brindisi. L'analisi è stata svolta nell'ambito di una indagine che ha previsto il confronto tra differenti elaborazioni di Analisi di Rischio (AdR). Una AdR aggiornata si è resa necessaria sia per gli aggiornamenti nel tempo del software di supporto che per il periodo trascorso dalla valutazione dei rischi all'inizio lavori. Si è proceduto a confrontare tre diverse elaborazioni di AdR: a) AdR iniziale, effettuata con Risk-net v. 1.0 da Sogesid nel 2013; b) AdR effettuata con Risk-net v. 3.1 con database ISS (Istituto Superiore di Sanità) – INAIL (Istituto nazionale Assicurazione Infortuni sul Lavori) del 2015, con calcolo delle Reference Dose (RfD) e Slope Factor (SF); c) AdR effettuata con Risk-net v. 3.1 con database ISS-INAIL del 2018, con calcolo delle Reference Concentration (RfC) e Inhalation Unit Risk (IUR). I risultati ottenuti hanno evidenziato una differenza sostanziale tra gli output delle diverse versioni del software Risk-net sia per le concentrazioni soglia di rischio (CSR) sia per i parametri di rischio e pericolo totali. Gli aggiornamenti dei software e delle loro banche-dati possono pertanto influenzare gli esiti della AdR e quindi gli obiettivi finali di bonifica.

Parole chiave: *analisi di rischio sanitario-ambientale, bonifiche, contaminazione, Micorosa.*

COMPARISON OF DIFFERENT VERSIONS OF THE SOFTWARE RISK-NET FOR THE HUMAN HEALTH AND ENVIRONMENTAL RISK ASSESSMENT OF A CONTAMINATED SITE OF NATIONAL INTEREST

Abstract – The study aims at assessing the sanitary and environmental risk for the workers involved during the remediation activities of the Micorosa area as a part of the Brindisi Site of National Interest (SIN) (Apulia Region, Southern Italy). In the Micorosa area, contamination is mainly linked to the petrochemical pole working from 1961 to 1980. The zone was used as a landfill for all waste produced by petrochemical activities. During the years, the following types of waste were identified: calcium hydroxide sludge, residues of the acetylene production line, a vinyl chloride synthesis intermediate for the production of PVC (polyvinyl chloride) (1962-1969), chlorinated residues (such as vinyl chloride, methyl chloride, 1,1-dichloroethylene, 1,2-dichloroethylene cis and trans; 1,2 dichloroethane, trieline, trichloroethanes, tetrachloroethane, pentachloroethane, hexachloroethane, bromodichloroethane), residues of the dichloroethane production line, vinyl chloride synthesis intermediate used for PVC production (1969-75), maleic and phthalic acids (1972-80). In 1987, the area was acquired by Società Micorosa S.r.l., which activated between 1994 and 1995 the production of hydrated lime by recovering the sludge discharged. The Micorosa area is included in the protected areas "Saline di Punta della Contessa" with the Apulian Regional Law 23/12/2002. The remediation of the site began in 2013 and has provided for the implementation of the following structural interventions: a) surface waterproof capping; b) semi-plastic diaphragm; c) groundwater treatment plant; d) pumping wells and hydraulic barriers; e) cliff and geotextiles installation; f) rainwater collection system; g) planting of water-dependent trees. In the construction site set-up (2018) started in 2013 by Sogesid for the final design, it was considered necessary to monitor the area condition because of the extension of the zone, the time elapsed and the workers' health conditions. A site-specific human health and environmental risk assessment (HHERA) by means of Risk-net software was performed. Three different risk assessments were compared: a) HHERA drawn up with Risk-net v. 1.0 by Sogesid in 2013; b) HHERA Risk-net v. 3.1 with 2015 ISS (National Institute of Health) – INAIL (National Institute for Insurance against Accidents at Work) database/calculation of Reference Dose (RfD) and Slope Factor (SF); c) HHERA Risk-net v. 3.1 with 2018 ISS-INAIL database/calculation of Reference Concentration (RfC) and Inhalation Unit Risk (IUR). RfD and SF consider a remodeling of risk according to both body weight and inhalation index, unlike RfC and IUR. The obtained results showed a substantial difference between the outputs of the different versions of the Risk-net software both for the risk threshold concentrations (CSR) and for the total risk/hazard parameters. This is mainly due to chemo-physical parameters updates over the years and subsequent modification of databases used by the software. Software and database updates can therefore influence the risk analysis and the final remediation targets.

Keywords: *contamination, Micorosa, remediation, risk, sanitary and environmental assessment.*

Ricevuto il 3-7-2019; Correzioni richieste il 26-8-2019; Accettazione finale il 16-9-2019.

* *Per contatti: Via E. Orabona n. 4, 70125 Bari. E-mail: claudia.labianca@poliba.it – Tel. +39 0805963279.*

1. INTRODUZIONE

La contaminazione delle matrici ambientali può rappresentare un grave rischio per la salute umana e gli ecosistemi in generale. La presenza dei siti contaminati è una questiona rilevante in Europa e in Italia. L'European Environment Agency (EEA, 2014) stima che i siti da bonificare in Europa siano circa 340.000 e migliaia in Italia. Alcuni di questi sono stati definiti dal Ministero Italiano dell'Ambiente come Siti di Interesse Nazionale (SIN) sulla base dell'entità della contaminazione ambientale e del rischio sanitario. Inizialmente 57, vennero ridotti a 39 con il D.M. 11/01/2013 in base a specifici criteri definiti a livello ministeriale. Attualmente il numero dei SIN in Italia è pari a 41. I vari SIN presentano caratteristiche differenti: possono includere aree industriali dismesse, in corso di riconversione, in attività, oggetto in passato di smaltimento incontrollato di rifiuti anche pericolosi o di incidenti con rilascio di contaminanti.

A livello italiano, il decreto Ronchi (Decreto Legislativo 22/97) introdusse per la prima volta il concetto di SIN; successivamente è stato richiamato con il D.M. 471/99 e, infine, con il vigente D.Lgs n. 152 del 2006 "Norme in materia ambientale – Parte IV, Titolo V".

In generale i SIN rappresentano aree contaminate generalmente molto estese, classificate come pericolose e che necessitano di interventi di bonifica o di messa in sicurezza permanente (MISP) e, nelle more, di messa in sicurezza di emergenza (MISE), del suolo, del sottosuolo e/o delle acque superficiali e sotterranee.

Come riportato nel D.Lgs 152 del 2006, un progetto di bonifica prevede in primis la caratterizzazione ambientale del sito, con l'obiettivo di definire in modo qualitativo e quantitativo la tipologia e l'entità della contaminazione. La sostanziale novità del D.Lgs. n. 152/2006 ha riguardato l'introduzione di due differenti livelli di contaminazione: Concentrazioni Soglia di Contaminazione (CSC) e Concentrazioni Soglia di Rischio (CSR). Le CSC rappresentano i livelli di contaminazione delle matrici ambientali superati i quali sono obbligatori la caratterizzazione del sito e l'analisi del rischio (AdR) sanitario-ambientale sito-specifica, quest'ultima finalizzata al calcolo delle CSR, che permettono di indirizzare i successivi interventi di bonifica. La definizione di "sito contaminato" deriva appunto dal superamento delle CSR. Pertanto, l'AdR permette in primis la valutazione del rischio connesso alla contaminazione di suoli e acque di falda e successivamente la stima degli obiettivi di bonifica (Baciocchi e Verginelli, 2013). La valutazione del rischio include i seguenti step principali (USEPA, 2012): caratterizzazione quantitativa dei contaminanti indice e loro analisi; identificazione dei meccanismi di trasporto e vie di migrazione; individuazione dei potenziali bersagli recettori. A partire da queste informazioni è possibile elaborare il Modello Concettuale del Sito (MCS) e poi calcolare il rischio connesso al sito. Inoltre, l'AdR può essere applicata in modalità diretta (forward), stimando il rischio associato alla contaminazione rilevata o in modalità inversa (backward), determinando i livelli di contaminazione accettabili e gli obiettivi di bonifica per il sito in esame, a partire dai criteri di accettabilità del rischio.

L'applicazione della AdR ai siti contaminati può essere effettuata mediante svariati software e linee guida di riferimento. A solo titolo di esempio, i software più utilizzati nel Regno Unito sono CLEA, SNIFFER, RAM, ConSim e RISC, mentre in Olanda sono diffusi CSOIL e RISC-HUMAN. CETOX-human e JAGG sono utilizzati in Danimarca, mentre UMS, SISIM e CARO-PLUS in Germania. Vlier Humaan è, invece, adoperato in Belgio; LUR in Spagna. Secondo Pinedo et al. (2014), l'RBCA (Risk-Based Corrective Action) tool kit sviluppato dall'American Society for Testing Materials (ASTM) negli USA è quello più utilizzato globalmente. Gli strumenti maggiormente utilizzati in Italia sono DESYRE, Rachel, Risk-net, Giuditta (Zorzetto, 2013) e ROME plus (Linee Guida SNPA 17/2018; Linee Guida SNPA 15/2018).

In linea con il progresso tecnologico, i software per l'AdR sono in continua evoluzione. In molti casi, essi richiedono nuove determinazioni analitiche e gli output della AdR potrebbero divergere in modo significativo.

In questo contesto, lo studio mira ad applicare il software Risk-net nella sua ultima versione 3.1, confrontando i risultati ottenuti con quelli derivanti dall'applicazione di precedenti versioni dello stesso software. Con riferimento al caso studio dell'area Micorosa del SIN di Brindisi (Puglia), per il quale si è reso necessario procedere con un aggiornamento della iniziale AdR, sono stati considerati i seguenti casi: a) AdR con Risk-net v.1.0, così come effettuata da Sogesid nel 2013; b) AdR con Risk-net v.3.1, con il database dell'Istituto Superiore di Sanità (ISS) – Istituto nazionale Assicurazione Infortuni sul Lavoro (INAIL) del 2015 e calcolo delle Reference Dose (RfD) e Slope Factor (SF); c) AdR con Risk-net v.3.1, con database ISS-

INAIL del 2018 e calcolo delle Reference Concentration (RfC) e Inhalation Unit Risk (IUR).

2. MATERIALI E METODI

2.1. Il sito

L'area Micorosa confina ad est con il mare Adriatico, ad ovest e a nord con il polo petrolchimico di Brindisi ed a sud con alcune aree agricole e l'area SIC (Sito di Importanza Comunitaria) – ZPS (Zona di Protezione Speciale) "Saline Punta della Contessa" (Fig. 1).
L'area Micorosa è stata oggetto di smaltimento di molteplici tipologie di rifiuti. A partire dal 1961 venne avviato in prossimità dell'area il complesso Petrolchimico di Brindisi con la Società Montecatini che trattava 1.000.000 t/a di petrolio grezzo al fine di ottenere distillati da impiegare nella produzione di olefine e derivati chimici. Il gruppo Montecatini avviò anche una linea di polimerizzazione, insediata nell'area adiacente, di pertinenza della società Polymer. Nel 1966, il sito industriale divenne di proprietà della Montedison; vennero così attivate nuove linee di produzione di altre plastiche polimeriche quali il polietilene, il polipropilene ed i poliuretani. Nel corso degli anni, l'area Micorosa è stata utilizzata come discarica per i residui di lavorazione industriale del petrolchimico, costituiti da fanghi di idrossido di calcio, residui della linea di produzione dell'acetilene, intermedio di sintesi del cloruro di vinile e destinato alla produzione del PVC (1962-1969), code clorurate (costituite da composti organoclorurati bassobollenti, quali cloruro di vinile, cloruro di metile, 1,1-dicloroetilene, 1,2-dicloroetilene cis e trans; 1,2 dicloroetano; composti organoclorurati altobollenti, quali trieline, tricloroetani, tetracloroetano, pentacloroetano, esacloroetano, bromodicloroetano; miscele di solventi aromatici policiclici con punto di ebollizione compreso tra 180-190°C fino a 240-250°C), residui della linea di produzione del dicloroetano, intermedio di sintesi del cloruro di vinile, destinato alla produzione del PVC (1969-75), code residue dell'impianto di produzione dell'anidride ftalica, costituite da acidi maleico e ftalico (1972-80). Inoltre, nel 1987 l'area venne ceduta alla Società Micorosa S.r.l., che tra il 1994 ed il 1995 avviava la produzione di calce idrata (Sogesid, 2013).
Nonostante la contaminazione diffusa di tale area ad alto rischio ambientale, nel 2002 è stata istituita la riserva naturale regionale delle Saline di Punta della Contessa (L.R. 23/12/2002, n. 28, gestita in via definitiva dal Comune di Brindisi ai sensi dell'art.16 della L.R. n. 10/2006), comprendente anche l'area Micorosa.
Inoltre, dal 2009 al 2010 sono state svolte diverse attività di attuazione del piano di caratterizzazione (PdC) del sito area Micorosa (Servizio Ecologia Comune di Brindisi, 2007). L'esecuzione del PdC restituiva i seguenti risultati: presenza di rifiuto e materiali eterogenei di riporto nei primi 2 m dal piano campagna (p.c.); sabbie limose dal primo strato ai 6 m dal p.c.; calcareniti a grana grossa ben cementate con intercalati livelli sabbiosi in spessori variabili dallo strato precedente ai 15 m dal p.c.; dai 15 m ai 25 m da p.c., sabbie a grana fine di colore grigio, con gradazioni di limo incrementata in per-

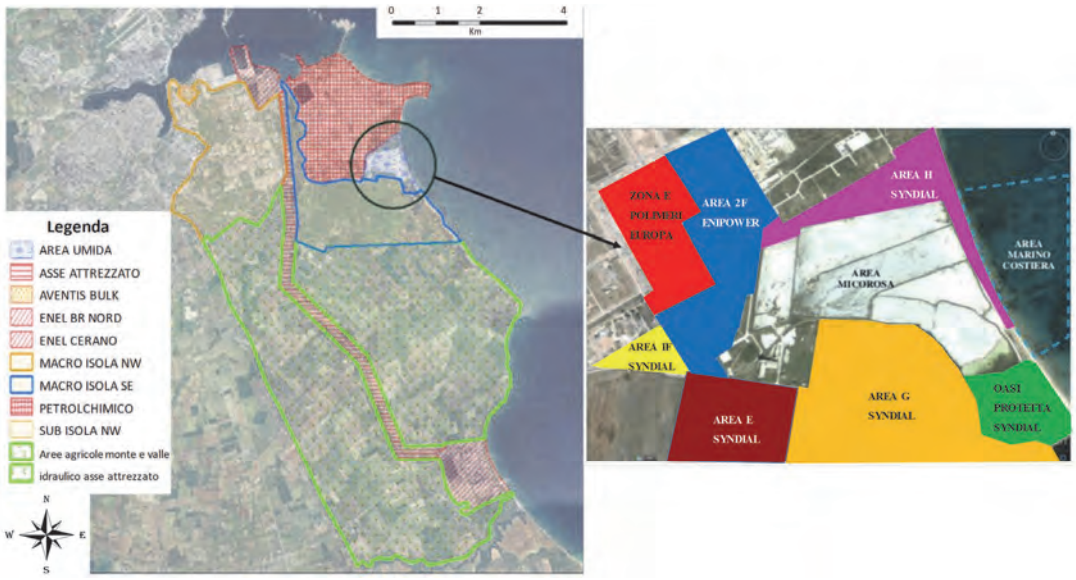

Figura 1 – Area Micorosa all'interno del SIN di Brindisi (Puglia)

centuale con la profondità. Inoltre, è stata identificata la presenza di una falda freatica all'interno dei depositi marini terrazzati e confinata inferiormente dalle argille sub-appenniniche ed un secondo acquifero, più profondo e di natura calcarea/calcarenitico-sabbiosa, nel quale l'acqua sotterranea circola per fratturazione e carsismo secondo una cadente piezometrica pari allo 0,05% (Sogesid, 2013).
I risultati della caratterizzazione non hanno evidenziato alcun superamento dei valori limite normati per gli analiti investigati ad eccezione dello stagno nel suolo superficiale (SS). Invece, i valori di concentrazione nel suolo profondo (SP) di berillio, benzene, etilbenzene, toluene, xilene, benzo(a)antracene, benzo(a)pirene, 1,2-dicloroetano, pentaclorobenzene, esaclorobenzene, Idrocarburi (IC) leggeri e pesanti hanno superato i valori limite (le Concentrazioni Soglia di Contaminazione, CSC, di cui alla colonna A, Tabella 1, Allegato 5, Titolo V, Parte IV, D.Lgs. 152/06 e ss.mm.ii.). Come contromisura, si è provveduto alla rimozione del primo metro (SS) interessato da "rifiuti e/o terre miste a rifiuti", all'applicazione della AdR ai sensi dell'art. 242 del D.Lgs. 152/06 all'area contaminata in SP, e a successivi interventi di MISP. Dato il valore naturalistico dell'area, la MISP ha previsto l'impermeabilizzazione superficiale dell'intero corpo rifiuti, la realizzazione del diaframma semi-plastico e dell'impianto di trattamento delle acque di falda (TAF), la realizzazione di pozzi di emungimento e barriere idrauliche, di una scogliera radente e posa in opera di geotessuti, di opere di raccolta ed allontanamento delle acque meteoriche dalle superfici di impermeabilizzazione, la piantumazione di alberi e arbusti idroesigenti.

2.2. Analisi di rischio

Il piano dell'indagine ha previsto il confronto di tre differenti elaborazioni di AdR, come riportato in precedenza. Le AdR sono state svolte utilizzando il software Risk-net, in grado di calcolare sia il rischio in modalità diretta, che gli obiettivi di bonifica in modalità inversa.
La prima versione di Risk-net è stata sviluppata nel 2012, seguita dalle successive ver. 2.0 (2015), ver. 2.1 (2016) e ver. 3.0 pro (luglio 2018). Ad oggi l'ultima versione disponibile è la 3.1 Pro di novembre 2018. Tra le novità principali delle versioni 2018, si evidenzia:

- implementazione dell'ultima banca dati ISS-INAIL del 2018;
- possibilità di scelta, ai fini del calcolo del rischio e degli obiettivi di bonifica, tra le RfD per gli effetti tossici e lo SF per gli effetti cancerogeni, e le RfC per gli effetti tossici e il IUR per gli effetti cancerogeni, laddove la maggiore differenza tra i due metodi consiste nella rimodulazione dei rischi in funzione del peso corporeo e del tasso di inalazione, prevista dal metodo basato sull'utilizzo della dose di riferimento e non dal metodo basato sull'utilizzo delle concentrazioni di riferimento (Floreani e Zorzet, 2016);
- utilizzo di dati soil gas, sia ad integrazione del calcolo del rischio che per la rimodulazione delle concentrazioni soglia di rischio. Nel caso di studio i risultati delle indagini sul soil gas hanno mostrato valori tutti inferiori al limite di rilevazione strumentale e come tali non sono stati integrati nella elaborazione della nuova AdR.

Le AdR sono state eseguite per valutare le novità sopracitate del software Risk-net, al variare delle proprietà chimico-fisiche e tossicologiche dei contaminanti. In particolar modo, sono state confrontate:

- l'AdR con Risk-net v. 1.0 svolta da Sogesid nel 2013 con quella svolta nell'ambito di questo studio utilizzando la versione 3.1 di Risk-net. In tal modo si è fatto riferimento ai dati del database ISS-INAIL 2015; i rischi e gli obiettivi di bonifica, per il percorso di inalazione, sono stati calcolati utilizzando le RfD per gli effetti tossici e gli SF per gli effetti cancerogeni;
- l'AdR sopra riportata, svolta con Risk-net v. 3.1 utilizzando RfD e SF con quella svolta con la stessa versione del software, determinando però rischi ed obiettivi di bonifica per il percorso di inalazione tramite le concentrazioni di riferimento (RfC per i non cancerogeni e IUR per i cancerogeni), come suggerito nell'ultima banca dati ISS-INAIL 2018.

Sono stati poi individuati i parametri di input quali il Modello Concettuale del Sito (MCS), i contaminanti indice e le rispettive Concentrazioni Rappresentative in Sorgente (CRS), i recettori, i parametri di esposizione e le caratteristiche del sito. Lo svolgimento delle elaborazioni è, inoltre, avvenuto considerando il suolo profondo quale sorgente di contaminazione, l'inalazione di vapori outdoor on-site come modalità di esposizione ed il solo adulto residenziale quale recettore (Fig. 2).
I contaminanti indice e le relative CRS sono riportati in Tab. 1.

3. RISULTATI E DISCUSSIONE

L'applicazione della AdR in modalità "backward" fornisce gli obiettivi di bonifica (Concentrazioni

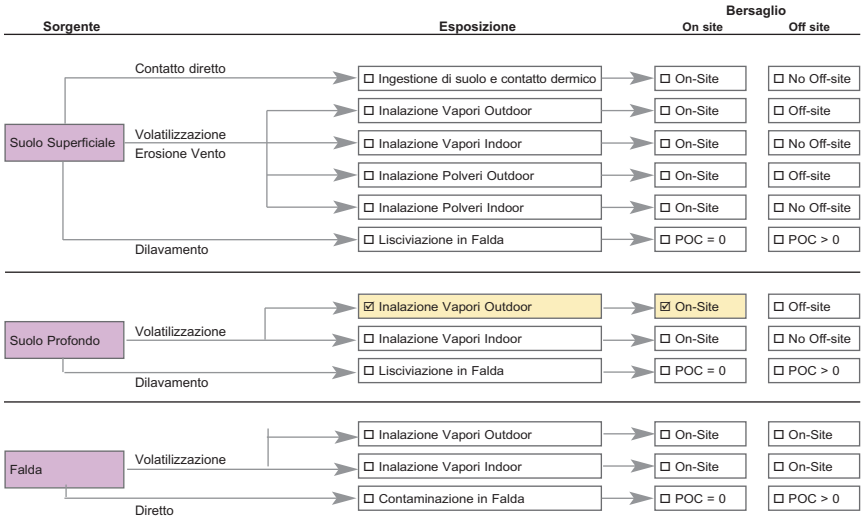

Figura 2 – Modello Concettuale del Sito (MCS)

Tabella 1 – Contaminanti Indice (Sogesid, 2013)

Contaminanti	CRS [mg/kg s.s.]
Benzene	0,29
Etilbenzene	3,3
Toluene	1,8
p-Xilene	6,8
Benzo(a)antracene	0,76
Benzo(a)pirene	0,3
1,2-Dicloroetano,	0,72
Pentaclorobenzene	0,75
Esaclorobenzene	0,13
Aromatici C9-C10	68
Aromatici C11-C22	589

Soglia di Rischio, CSR). In particolare, costituiscono obiettivi di bonifica sito-specifici della matrice contaminata, le CSR che rispettano i limiti di rischio individuali e cumulativi.

I risultati della AdR svolta da Sogesid nel 2013 hanno portato a valori delle CRS < CSR (Fig. 3); ciò nonostante, le concentrazioni così calcolate non hanno rispettato le condizioni di rischio tollerabile totale (R tot = 10^{-5} e HI tot = 1). Le CSR individuali (CSR ind) ottenute non possono diventare obiettivi di bonifica. Infatti, le CSR rappresentano sia i livelli di contaminazione, superati i quali è necessario procedere alla bonifica del sito, sia i valori obiettivo della bonifica stessa.

A tal proposito per alcuni contaminanti è stato applicato in maniera ragionata un fattore di correzione (f) affinché rischio e indice di pericolo rispettassero le condizioni di rischio cumulato accettabile. In tal modo, le nuove CSR cumulate ottenute nella colonna "CSR cum" rappresentano gli obiettivi di bonifica.

Procedendo con l'analisi dei risultati della AdR svolta con Risk-net v. 3.1 tramite il calcolo dei rischi e degli obiettivi di bonifica utilizzando la RfD e lo SF, è emerso che per i contaminanti Etilbenzene e Dicloroetano (1,2) risultano CSR < CRS (Fig. 4), diventando improcrastinabili da normativa interventi di bonifica o di messa in sicurezza operativa o permanente. Inoltre, la sommatoria degli indici di pericolo calcolati (HI tot) sono risultati superiori al valore limite, pari a 1.

Tramite l'applicazione di fattori di correzione, si è proceduto a ridurre le CSR individuali dei contaminanti p-Xilene e Aromatici C9-C10, ai fini di rendere l'indice di pericolo cumulativo accettabile. In tal modo, le CSR cum ottenute sono diventate obiettivi di bonifica.

	Suolo Profondo										
Contaminanti	**CRS [mg/kg s.s.]**	**Csat [mg/kg s.s.]**	**CSR ind [mg/kg s.s.]**	**CSR cum [mg/kg s.s.]**	**Rischio Cancerog. [R]**	**Indice di Pericolo [HI]**		**Fattore correttivo (f)**	**CSR cum [mg/kg s.s.]**	**Rischio Cancerog. [R]**	**Indice di Pericolo [HI]**
Benzene	2,90E-01	1,25E+03	1,00E+01	**1,00E+01**	1,00E-06	1,25E-02		2,00E+00	**5,00E+00**	5,00E-07	6,25E-03
Etilbenzene	3,30E+00	3,63E+02	>Csat	**>Csat**	-	1,35E-02			**>Csat**	-	1,35E-02
Toluene	1,80E+00	7,89E+02	>Csat	**>Csat**	-	5,87E-03			**>Csat**	-	5,87E-03
p-Xilene	6,80E+00	-	1,88E+04	**1,88E+04**	-	1,00E+00		2,00E+00	**9,40E+03**	-	5,06E-01
Benzo(a)antracene	7,60E-01	3,37E+01	>Csat	**>Csat**	3,39E-10	5,78E-09			**>Csat**	3,39E-10	5,78E-09
Benzo(a)pirene	3,00E-01	1,57E+01	>Csat	**>Csat**	2,35E-10	2,99E-11			**>Csat**	2,35E-10	2,99E-11
Dicloetano, 1,2-	7,20E-01	2,05E+03	3,01E+00	**3,01E+00**	1,00E-06	1,12E-02		2,00E+00	**1,51E+00**	5,00E-07	5,62E-03
Pentaclorobenzene	7,50E-01	2,05E+02	>Csat	**>Csat**	-	4,04E-02			**>Csat**	-	4,04E-02
Esaclorobenzene	1,30E-01	4,96E+03	2,12E+01	**2,12E+01**	1,00E-06	2,28E-03		2,00E+00	**1,06E+01**	5,00E-07	1,14E-03
Aromatici C9-C10	6,80E+01	9,12E+02	>Csat	**>Csat**	-	6,81E-01		5,00E+00	**2,68E+02**	-	2,00E-01
Aromatici C11-C12					-	-					
Aromatici C13-C22	5,89E+02	2,90E+02	NA	**NA**	-	-			**NA**	-	-
				Rtot (outdoor)		**3,00E-06**			**Rtot (outdoor)**		**1,50E-06**
				HI tot (outdoor)		1,77E+00			**HI tot (outdoor)**		**7,73E-01**

Figura 3 – Risultati AdR Sogesid 2013 con Risk-net v. 1.0

Suolo Profondo											
Contaminanti	CRS [mg/kg s.s.]	Csat [mg/kg s.s.]	CSR ind [mg/kg s.s.]	CSR cum [mg/kg s.s.]	Rischio Cancerog. [R]	Indice di Pericolo [HI]		Fattore correttivo (f)	CSR cum [mg/kg s.s.]	Rischio Cancerog. [R]	Indice di Pericolo [HI]
Benzene	2,90E-01	6,42E+02	4,34E-01	**4,34E-01**	1,00E-06	1,25E-02			**4,34E-01**	1,00E-06	6,25E-03
Etilbenzene	3,30E+00	1,64E+02	1,71E+00	**1,71E+00**	1,00E-06	1,17E-03			**1,71E+00**	1,00E-06	1,35E-02
Toluene	1,80E+00	2,84E+02	>Csat	**>Csat**	-	4,88E-02			**>Csat**	-	5,87E-03
p-Xilene	6,80E+00	1,33E+02	>Csat	**>Csat**	-	9,22E-01		2,00E+00	**6,66E+01**	-	5,06E-01
Benzo(a)antracene	7,60E-01	3,33E+00	>Csat	**>Csat**	2,01E-09	-			**>Csat**	2,01E-09	5,78E-09
Benzo(a)pirene	3,00E-01	1,90E+00	>Csat	**>Csat**	1,62E-10	-			**>Csat**	1,62E-10	2,99E-11
Dicloetano, 1,2-	7,20E-01	1,09E+03	1,37E-01	**1,37E-01**	1,00E-06	1,60E-02			**1,37E-01**	1,00E-06	5,62E-03
Pentaclorobenzene	7,50E-01	6,20E+00	>Csat	**>Csat**	-	5,63E-02			**>Csat**	-	4,04E-02
Esaclorobenzene	1,30E-01	7,20E-02	>Csat	**>Csat**	4,43E-07	-			**>Csat**	4,43E-07	1,14E-03
Aromatici C9-C10	6,80E+01	1,86E+02	1,39E+02	**1,39E+02**	-	1,00E+00		3,00E+00	**4,62E+01**	-	2,00E-01
Aromatici C11-C12		5,83E+01	>Csat	**>Csat**	-	4,69E-02			**>Csat**	-	
Aromatici C13-C22	5,89E+02	5,83E+01	NA	**NA**	-	-			**NA**	-	-
				Rtot (outdoor)		**3,44E-06**			**Rtot (outdoor)**		**3,44E-06**
				HI tot (outdoor)		**2,10E+00**			**HI tot (outdoor)**		**9,76E-01**

Figura 4 – Risultati AdR con Risk-net v. 3.1 tramite RfD-SF

Confrontando i risultati della iniziale AdR con Risk-net versione 1.0 con quella sviluppata con la versione 3.1 (RfD e SF), sono state osservate delle differenze sia nei valori delle CSR che in quelli relativi al rischio e indice di pericolo totali. Gli obiettivi di bonifica finali sono risultati nettamente più restrittivi nel secondo caso. Pertanto, a parità di dati di input e con versioni diverse del software/database implementati, i risultati sono stati differenti. Uno dei motivi principali è dovuto alle variazioni delle proprietà chimico-fisiche e tossicologiche dei contaminanti considerate dal software; in particolare il valore del coefficiente di ripartizione carbonio organico-acqua (K_{oc}) e del coefficiente di ripartizione suolo-acqua (K_d), che influenzano il calcolo del fattore di trasporto volatilizzazione outdoor da suolo profondo VF samb (K_{oc}, K_d) e di conseguenza le CSR (Fig. 5) (RECONnet, 2018; APAT-ISPRA, 2008).
Infine, l'esecuzione della AdR con Risk-net 3.1 ha previsto l'utilizzo della banca dati ISS-INAIL 2018 per il calcolo del rischio e degli obiettivi di bonifica tramite RfC e IUR (Ispra, 2018). I risultati ottenuti hanno evidenziato valori delle CRS maggiori delle CSR per l'Etilbenzene ed il Dicloroetano (1,2) (Fig. 6); essendo il valore dell'indice di pericolo cumulato superiore al limite accettabile, sono stati applicati fattori di correzione al Toluene, al p-Xilene e agli Aromatici C9-C10. Per questi ultimi la CSR cum è risultata inferiore alla CRS, diventando anch'essa un obiettivo di bonifica.
Mettendo a confronto le due elaborazioni effettuate con la versione del software v. 3.1 non sono stati riscontrati particolari scostamenti nei risultati ottenuti dall'applicazione dei due metodi, sia in termini di rischio/indice di pericolo sia di CSR. La differenza sostanziale tra i due metodi è rappresentata dalla rimodulazione dei rischi in funzione del peso corporeo e del tasso di inalazione, prevista dal metodo basato sull'utilizzo della dose di riferimento (RfD-SF) e non dal metodo basato sull'utilizzo delle concentrazioni di riferimento (RfC-IUR).
Complessivamente, i risultati ottenuti hanno evidenziato come i valori di rischio ed indice di pericolo totali sono notevolmente più bassi nel caso della AdR con Risk-net v. 1.0; gli aggiornamenti dei tool e delle banche-dati di supporto hanno pertanto influenzato in modo significativo gli output finali della valutazione di rischio e pericolo (Fig. 7). Il rischio totale ottenuto nella versione 1.0 è risultato inferiore del 14-15% rispetto ai rischi calcolati con le versioni 3.1, mentre l'indice di pericolo totale di quasi il 20%.

4. CONCLUSIONI

Il presente lavoro ha permesso di osservare la sensibilità della soluzione al variare degli strumenti metodologici a sostegno dell'esecuzione di una AdR. Il confronto dei risultati delle AdR eseguite con tre versioni differenti dello stesso software Risk-net ha mostrato una differenza non trascurabile per le CSR, il rischio e l'indice di pericolo. La versione 1.0 ha sottostimato tali parametri rispetto alla versione 3.1. La principale causa di tale discordanza è imputabile agli aggiornamenti nel tempo delle proprietà chimico-fisiche dei contaminanti e, dunque, delle banche-dati del software. Di contro, il confronto tra i due approcci previsti dalla versione 3.1 (RfD-SF e RfC-IUR) non ha mostrato discordanze significative. La differenza tra i due metodi è risultata sostanzialmente nell'approccio, ovvero nella rimodulazione dei rischi in funzione del peso corporeo e del tasso di inalazione, prevista dal metodo basato sull'utilizzo della RfD-SF e non da quello basato sull'utilizzo della RfC-IUR.

$$VF_{samb}\left[\frac{mg/m^3_{aria}}{mg/kg_{suolo}}\right] = min\begin{cases} VF_{samb}(1) = \dfrac{H \cdot \rho_s}{(\theta_w + K_s\,\rho_s + H \cdot \theta_a)\cdot\left(1+\dfrac{U_{air}\cdot\delta_{air}\cdot L_{S(SP)}\cdot}{D_s^{eff}\cdot W'}\right)} BDF_{vol}\cdot 10^3 \\ VF_{samb}(2) = \dfrac{W'\,\rho_S\cdot d_s}{U_{air}\cdot\delta_{air}\cdot\tau_{outdoor}}\cdot 10^3 \text{(opzionale)} \end{cases}$$

$$K_s = \begin{cases} K_d & \textit{composti inorganici} \\ K_{OC}\cdot f_{OC} & \textit{composti organici} \end{cases}$$

Nomenclatura

d_s= spessore della sorgente nel suolo profondo (insaturo) (cm)
$L_{s\ (SP)}$ = Profondità del top della sorgente nel suolo profondo rispetto al p.c. (cm)
D_s^{eff}= Coefficiente di diffusione nella zona insatura (cm^2/s)
W' = Estensione della sorgente di contaminazione nella direzione principale del vento (cm)
δ_{air} = Altezza della zona di miscelazione in aria (cm)
U_{air} = Velocità del vento(cm/s)
τ outdoor =Tempo medio di durata del flusso di vapore outdoor (impostato pari alla durata di esposizione) (s)
θ_w = Contenuto volumetrico di acqua nella zona insatura (-)
θ_a = Contenuto volumetrico di aria nella zona insatura (-)
θ_e = Porosità effettiva zona insatura (-)
H = costante di Henry (-)
ρ_s = Densità del suolo (g/cm^3)
BDF_{Vol} = Fattore di attenuazione per biodegradazione per il percorso di volatilizzazione (-)

Inalazione di vapori outdoor (dosi di riferimento)

$$CSR_{SP\ InaO} = min\begin{cases} CSR_{canc} = \dfrac{TR}{SF_{Ina}\cdot VF_{samb}\cdot EM_{InaO}\cdot ADF} \\ CSR_{non\ canc} = \dfrac{THQ\cdot RfD_{Ina}}{VF_{samb}\cdot EM_{InaO}\cdot ADF} \end{cases}$$

CSR_{canc} = CSR sost. cancerogene
$CSR_{non.canc}$ = CSR sost. tossiche
TR = Rischio accettabile
THQ = Indice di Pericolo Accettabile
SF_{Ina} = Slope factor - inalazione
RfD_{Ina} = Reference dose - inalazione
EM_{InaO} = Fattore di inalazione outdoor
VF_{samb} = Volatilizzazione outdoor
ADF = Dispersione atmosferica

Inalazione di vapori outdoor (concentrazioni di riferimento)

$$CSR_{SP\ InaO} = min\begin{cases} CSR_{canc} = \dfrac{TR}{IUR\cdot VF_{samb}\cdot EC_{InaO}\cdot ADF} \\ CSR_{non\ canc} = \dfrac{THQ\cdot RfC}{VF_{samb}\cdot EC_{InaO}\cdot ADF} \end{cases}$$

CSR_{canc} = CSR sost. cancerogene
$CSR_{non.canc}$ = CSR sost. tossiche
TR = Rischio accettabile
THQ = Indice di Pericolo Accettabile
IUR= Inhalation Unit Risk
RfC = Concentrazione di riferimento
EC_{InaO} = Fattore di inalazione outdoor
VF_{samb} = Volatilizzazione outdoor
ADF = Dispersione atmosferica

Figura 5 – Formule per calcolare i VF e le CSR da Manuale Risk-net v. 3.1 (RECONnet, 2018)

	Suolo Profondo										
Contaminanti	**CRS [mg/kg s.s.]**	**Csat [mg/kg s.s.]**	**CSR ind [mg/kg s.s.]**	**CSR cum [mg/kg s.s.]**	**Rischio Cancerog. [R]**	**Indice di Pericolo [HI]**		**Fattore correttivo (f)**	**CSR cum [mg/kg s.s.]**	**Rischio Cancerog. [R]**	**Indice di Pericolo [HI]**
Benzene	2,90E-01	6,42E+02	4,69E-01	**4,69E-01**	1,00E-06	1,25E-02			**4,69E-01**	1,00E-06	1,25E-02
Etilbenzene	3,30E+00	1,64E+02	1,84E+00	**1,84E+00**	1,00E-06	1,17E-03			**1,84E+00**	1,00E-06	1,17E-03
Toluene	1,80E+00	2,84E+02	>Csat	**>Csat**	-	4,52E-02		2,00E+00	**1,42E+02**	-	2,26E-02
p-Xilene	6,80E+00	1,33E+02	>Csat	**>Csat**	-	8,55E-01		2,00E+00	**6,66E+01**	-	4,27E-01
Benzo(a)antracene	7,60E-01	3,33E+00	>Csat	**>Csat**	1,02E-09	-			**>Csat**	1,02E-09	-
Benzo(a)pirene	3,00E-01	1,90E+00	>Csat	**>Csat**	8,18E-11	1,99E-04			**>Csat**	8,18E-11	1,99E-04
Dicloetano, 1,2-	7,20E-01	1,09E+03	1,48E-01	**1,48E-01**	1,00E-06	1,60E-02			**1,48E-01**	1,00E-06	1,60E-02
Pentaclorobenzene	7,50E-01	6,20E+00	>Csat	**>Csat**	-	5,21E-02			**>Csat**	-	5,21E-02
Esaclorobenzene	1,30E-01	7,20E-02	>Csat	**>Csat**	4,10E-07	-			**>Csat**	4,10E-07	-
Aromatici C9-C10	6,80E+01	1,86E+02	7,48E+01	**7,48E+01**	-	1,00E+00		3,00E+00	**2,49E+01**	-	3,33E-01
Aromatici C11-C12		5,83E+01	>Csat	**>Csat**	-	8,69E-02			**>Csat**	-	8,69E-02
Aromatici C13-C22	5,89E+02	5,83E+01	>Csat	**>Csat**	-	4,34E-02			**>Csat**	-	4,34E-02
				Rtot (outdoor)		**3,41E-06**			**Rtot (outdoor)**		**3,41E-06**
				HI tot (outdoor)		**2,11E+00**			**HI tot (outdoor)**		**9,96E-01**

Figura 6 – Risultati AdR con Risk-net v. 3.1 tramite RfC-IUR

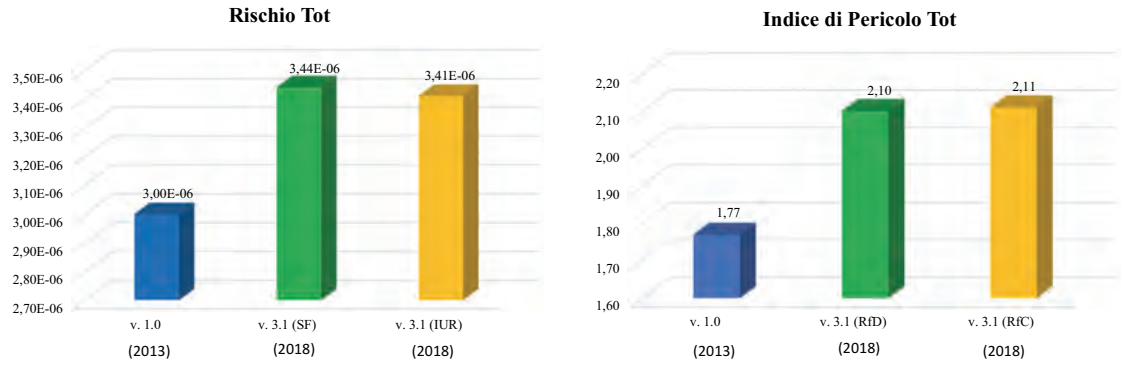

Figura 7 – Confronto Rtot e HI tot per i tre casi considerati

5. NOMENCLATURA

AdR = Analisi del Rischio;

COV = Composti Organici Volatili;

CSC = Concentrazioni Soglia di Contaminazione;

CSR = Concentrazioni Soglia di Rischio;

HI tot = Indice di Pericolo cumulato (non cancerogeno);

IUR = Inhalation Unit Risk;

MCS = Modello Concettuale del Sito;

MISP = Messa in Sicurezza Permanente;

R tot = Rischio cumulato (cancerogeno);

RfC = Reference Concentration;

RfD = Reference Dose;

SF = Slope Factor.

6. RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

APAT-ISPRA (2008) Criteri metodologici per l'applicazione dell'analisi assoluta di rischio ai siti contaminati. Rev.2.

Baciocchi R. e Verginelli I. (2013) Analisi di rischio applicata ai siti contaminati. Ambiente Rischio Comunicazione (7): 18-27.

Decreto Legislativo 5 febbraio 1997 n. 22. "Attuazione delle direttive 91/156/CEE sui rifiuti, 91/689/CEE sui rifiuti pericolosi e 94/62/CE sugli imballaggi e sui rifiuti di imballaggio". Supplemento Ordinario n. 33 Gazzetta Ufficiale Serie Generale n. 38 del 15-02-1997.

Decreto Legislativo 3 aprile 2006 n. 152. "Norme in materia ambientale". Supplemento Ordinario n. 96 Gazzetta Ufficiale Serie Generale n. 88 del 14 aprile 2006.

Decreto Ministeriale 25 ottobre 1999 n. 471. "Regolamento recante criteri, procedure e modalità per la messa in sicurezza, la bonifica e il ripristino ambientale dei siti inquinati" ai sensi dell'articolo 17 del Decreto Legislativo 5 febbraio 1997, n. 22, e successive modificazioni e integrazioni. Supplemento Ordinario n. 218 Gazzetta Ufficiale Serie Generale n. 293 del 15-12-1999.

Decreto 11 gennaio 2013. "Approvazione dell'elenco dei siti che non soddisfano i requisiti di cui ai commi 2 e 2-bis dell'art. 252 del Decreto Legislativo 3 aprile 2006, n. 152 e che non sono più ricompresi tra i siti di bonifica di interesse nazionale" (13A02116). Gazzetta Ufficiale Serie Generale n. 60 del 12-03-2013.

European Environment Agency (EEA) (2014) Progress in management of contaminated sites. *https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/progress-in-management-of-contaminated-sites-3*

Floreani A. e Zorzet A. (2016) Stima dell'esposizione e del calcolo del rischio inalatorio nell'analisi di rischio sito specifica: confronto fra diverse linee guida e software. Ingegneria dell'Ambiente 3 (4): 289-294.

Ispra (2018) Banca dati ISS-INAIL, Documento di Supporto.

Legge Regionale 23 dicembre 2002 n. 28. "Istituzione delle riserve naturali regionali orientate del litorale tarantino orientale gestito in via definitiva dal Comune di Brindisi ai sensi dell'articolo 16 della L.R. n. 10/2006".

Linee Guida SNPA 17/2018. "Procedura operativa per la valutazione e l'utilizzo dei dati derivanti da misure di gas interstiziali nell'analisi di rischio dei siti contaminati".

Linee Guida SNPA 15/2018. "Progettazione del monitoraggio dei vapori nei siti contaminati" – Appendice B "Misure di flusso (flux chambers) in modalità attiva".

Pinedo J., Ibáñez R. e Irabien Á. (2014) A comparison of models for assessing human risks of petroleum hydrocarbons in polluted soils. Environmental modelling & software, 55: 61-69.

RECONnet (2018) Manuale d'uso Risk-net versione 3.1 Pro, Novembre 2018, Iason Verginelli, Università degli studi di Roma "Tor Vergata".

Servizio Ecologia Comune di Brindisi (2007) Piano della Caratterizzazione Ambientale del sito area Micorosa, approvato con prescrizioni dal Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare in sede di Conferenza di Servizi decisoria del 01 agosto 2007.

Sogesid (2013) Interventi di messa in sicurezza e bonifica della falda del SIN di Brindisi, Progetto definitivo, Ottobre 2013.

USEPA (2012) United States Environmental Protection Agency. Human Health Risk Assessment. Strategic Research Action Plan 2012–2016 601/R-12/007 Office of Research and Development, Washington, DC, USA (June 2012).

Zorzetto R. (2013) Valutazione di conformità e applicabilità del DSS "DESYRE" per l'analisi di rischio sanitario per i siti contaminati attraverso il confronto con il software GIUDITTA (Tesi triennale, Università Ca'Foscari Venezia).

INGEGNERIA DELL'AMBIENTE

per il 2019 è sostenuta da:

UNICALCE
Innoviamo la tradizione

ecopneus
il futuro dei pneumatici fuori uso, oggi

auma®
Solutions for a world in motion

suez

SOLVAIR®

VEOLIA
Veolia Water Technologies Italia S.p.A.

xylem
Let's Solve Water

SIAD

CID
Ing. VENTURA srl

KSB

STADLER®
STADLER ITALIA S.r.l.

ALLEGRI
ecologia
trattamento acque

VOMM

comieco
Consorzio Nazionale Recupero e Riciclo degli Imballaggi a base Cellulosica

SEAM
engineering
l'acqua e l'ambiente

EN

CONOU

MARAZZATO