

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DEL PIEMONTE ORIENTALE

“AMEDEO AVOGADRO”



UNIVERSITÀ DEL PIEMONTE ORIENTALE

Dipartimento di Scienze e Innovazione Tecnologica

**CORSO DI LAUREA MAGISTRALE
IN BIOLOGIA**

TESI DI LAUREA

Ecological Risk Assessment sulla contaminazione di falda

nell'area della città metropolitana di Milano

Relatore: *Prof. Antonio Calisi*

Correlatrice: *Dott.ssa Annalisa Gussoni*

Candidato: *Flavia Ferorelli*

Matricola: 20026281

Anno Accademico 2022-2023

*A mio padre, che mi ha insegnato
ad essere una combattente;
E a mia madre, per la sua pazienza
e supporto.*

Sommario

1.	Introduzione	4
1.1.	Ambiente ed Ecosistema	4
1.2.	Contaminazione Ambientale ed Inquinamento: Definizioni	5
1.3.	Ecological Risk Assessment.....	7
1.4.	Normative (Breve Storia Normativa).....	8
1.5.	Contaminazione delle Acque di Falda e correlazione con il consumo umano	13
1.6.	Caratteristiche delle Contaminazioni della Falda nel territorio Milanese	15
1.7.	Caratteristiche delle Contaminazioni nel Territorio Milanese	19
1.8.	Inquadramento Analisi di Rischio.....	24
1.9.	Scopo della Ricerca.....	29
2.	Materiali e Metodi.....	30
2.1.	Piano Di Lavoro	30
i.	Campionamento Terreni e Acqua di Falda.....	30
ii.	Tecniche Di Analisi Per Terreni e Acque di Falda	37
2.2.	Caratterizzazione e Analisi di rischio.....	42
2.3.	Risk-Net 3.1.1	44
3.	Risultati	54
4.	Discussione	62
5.	Conclusioni	65
6.	Abbreviazioni	67
7.	Bibliografia	69
8.	Ringraziamenti	73

1. Introduzione

1.1. Ambiente ed Ecosistema

L'ecosistema si definisce come una comunità complessa e dinamica composta da organismi viventi (biocenosi) e ambiente fisico (biotopo) all'interno di un'area precisa (*Treccani*). Come risultato della continua interazione fra questi, vi è un perpetuo scambio di energia e materia al fine di mantenere uno stato di equilibrio.

Gli organismi viventi che compongono un ecosistema possono essere classificati in organismi produttori (autotrofi), organismi consumatori (eterotrofi) e decompositori, i quali instaurano fra loro delle interazioni di competizione, parassitismo, predazione, relazioni sociali e familiari.

$$\text{Ecosistema} = \text{biocenosi} + \text{biotopo}$$

Il termine ecosistema è stato utilizzato per la prima volta da un biologo inglese, Arthur Tansley, che concentrò la sua carriera sullo studio delle interazioni tra ambiente e animali. Oggi, con il termine ecologia, si intende la scienza che studia i rapporti fra la componente biotica e abiotica.

Per il corretto funzionamento di un ecosistema e il suo sostentamento, vi sono delle condizioni strettamente necessarie:

- La presenza dei raggi solari come fonte primaria di energia;
- Flussi di energia unidirezionali;
- Cicli biogeochimici.

L'energia giunge sulla superficie terrestre sotto forma di radiazioni solari: questa viene utilizzata dagli organismi autotrofi che, grazie alla capacità fotosintetica, generano biomassa. Gli organismi eterotrofi, di conseguenza, si servono dell'energia contenuta nella biomassa per il sostentamento.

Fra i flussi di entrata troviamo:

- Energia solare (principale fonte di energia comune a tutti gli ecosistemi);
- Combustibili fossili;
- Pioggia.

Fra quelli di uscita, invece:

- Animali che lasciano la comunità;
- Energia persa sotto forma di calore;
- Rifiuti.

Mentre un ecosistema rappresenta una parte di biosfera limitata e ben delineata, l'ambiente, d'altro canto, rappresenta un contesto molto più ampio che costituisce esso stesso parte dell'ecosistema.

Per ambiente si intende l'insieme delle risorse naturali e dei fenomeni fisici come acqua, aria, radiazioni, cariche elettriche di qualsiasi tipo, condizioni metereologiche (componente abiotica) e di una componente biotica comprensiva di organismi viventi (Treccani, 2005).

1.2. Contaminazione Ambientale ed Inquinamento: Definizioni

In base all'art. Art. 2, c.1, n. 2 del D.Lgs. 372/99 (Attuazione della direttiva 96/61/CE relativa alla prevenzione e riduzione integrate dell'inquinamento) la definizione di «inquinamento» è:

“l'introduzione diretta o indiretta, a seguito di attività umana, di sostanze, vibrazioni, calore o rumore nell'aria, nell'acqua o nel suolo, che potrebbero nuocere alla salute umana o alla qualità dell'ambiente, causare il deterioramento di beni materiali, oppure danni o perturbazioni a valori ricreativi dell'ambiente o ad altri suoi legittimi usi”;

Dal punto di vista giuridico – amministrativo il fenomeno della contaminazione viene esaminato come un fenomeno di genesi antropica, ancorché accidentale. Dal punto di vista tecnico-scientifico i fenomeni di inquinamento possono essere definiti come: *“alterazioni di condizioni ambientali tali da generare ambienti non idonei alla vita di talune specie di esseri viventi, animali e vegetali”*.

L'inquinamento, di fatto, è il fenomeno che si verifica quando un elemento inquinante viene trasportato dalla sorgente al bersaglio ed è distinguibile dalla contaminazione, da intendersi come il fenomeno che si verifica quando si hanno una sorgente ed un bersaglio ma senza il trasporto.

L'inquinamento può essere:

- Puntiforme: la sorgente è individuata, le cause e i soggetti sono identificabili;

- Diffuso: le sorgenti sono molteplici e non individuabili singolarmente, sono definite non-point.

Tre le principali cause dell'inquinamento troviamo: fall out da emissioni industriali o civili, dispersione di contaminanti sul suolo non adeguatamente pavimentato, perdite da reti di distribuzione ed impianti, discariche interne a stabilimenti industriali, serbatoi interrati e fuori terra, scarichi fognari e pozzi perdenti, punti vendita carburanti, perforazioni e prospezioni geotecniche, attività agricola e zootecnica, discariche, riempimenti di scavi con rifiuti o materiali di risulta contaminati, nonché sistemi di raffreddamento industriale e scarichi di riscaldamento domestico (Treccani, 2007).

Le fonti, quindi, sono molteplici, estremamente differenziate e relative a contesti sia industriali che civili.

L'estensione della contaminazione dipende da numerosi fattori, tra cui:

- Entità del fenomeno iniziale;
- dal tempo che intercorre tra l'evento e l'azione riparatrice;
- dalla presenza o meno di acqua sia di infiltrazione;
- dalle caratteristiche degli inquinanti: ogni sostanza o composto ha caratteristiche chimico-fisiche che ne determinano il comportamento nell'ambiente: inorganiche, organiche peso, mobilità, solubilità, volatilità, tendenza a formare collidi o altri composti, biodegradabilità, persistenza, bioaccumulo, biomagnificazione, ecc.;
- dalle caratteristiche della matrice in cui la stessa contaminazione avviene che, nel caso, del terreno si possono riassumere in: composizione mineralogica (possibilità legami, carica superficiale, capacità di scambio, capacità tampone), pH, granulometria, permeabilità contenuto di sostanza organica, presenza microrganismi e nutrienti.

Alla luce della molteplicità di sorgenti, di inquinanti, di entità del fenomeno di inquinamento nonché delle caratteristiche della matrice, è evidente che ogni situazione di contaminazione è una realtà singola e peculiare e la possibilità quindi di contatto con i bersagli (uomo e ambiente) deve essere valutata rispetto al contesto descritto.

Da questo è nata l'esigenza di trovare uno strumento in grado di considerare tutte le variabili sopra descritte, di porle in relazione alla tossicità del singolo contaminante anche in modo

cumulativo, al fine di definire il rischio derivante dalla contaminazione ai bersagli uomo e ambiente.

1.3. Ecological Risk Assessment

L'impatto ambientale provocato dall'inquinamento necessita di una attenta valutazione al fine di evitare che si verificano effetti avversi sull'ambiente e, di conseguenza, sugli ecosistemi.

In quest'ottica, è stato introdotto l'Ecological Risk Assessment (ERA) che si definisce come *“processo di organizzazione e analisi di dati, informazioni, assunzioni ed incertezze per valutare la probabilità che effetti ecologici avversi si siano verificati o si verifichino come risposta ad un fattore di stress”* (RecoNnet, 2017).

L'ERA si applica in tre diversi scenari (Enhealth, 2012):

- Identificare la sorgente di stress ambientale;
- individuare il danno ambientale provocato dall'evento noto;
- il substrato ecologico a rischio e che si vuole proteggere.

Tale protocollo si articola in tre diverse fasi, precedute da una preventiva e puntuale pianificazione, definita *“Initial site assessment”*:

- *Fase 1: Formulazione del problema*

In questa fase viene identificato e quantificato il problema, in particolare si definiscono animali o piante soggetti a rischio e vengono valutati i percorsi di esposizione. Integrando le informazioni con il processo di pianificazione, si può procedere all'identificazione degli stress ambientali potenzialmente dannosi, alla valutazione della portata nel tempo e nello spazio e, infine, alla definizione degli obiettivi finali. Vengono inoltre determinati i *“Relevant Ecological Screening Criteria”* ossia i valori soglia di contaminazione che rappresentati come concentrazione del contaminante nel suolo.

- *Fase 2: Analisi.*

A questo punto vengono considerate nel dettaglio le caratteristiche chimico-fisiche dei contaminanti presenti nel suolo, le caratteristiche del suolo e dei recettori al fine di determinare l'esposizione e gli effetti dello stress a cui si è esposti (exposure e effect assessment). Si valuta

punto per punto quali animali e piante sono esposti, a quale stress particolare e in che misura. Vengono, pertanto, messe in atto ricerche per poter correlare l'esposizione e i possibili effetti negativi.

- *Fase 3: Caratterizzazione*

La terza e ultima fase prevede l'utilizzo di dati sito-specifici, modelli numerici e analisi statistica dei dati al fine di caratterizzare il rischio; si articola in stima del rischio e descrizione del rischio.

- La "stima del rischio" confronta il livello di esposizione stimato o misurato per ciascun fattore di stress e popolazione vegetale o animale, comunità o ecosistema di interesse con i dati sugli effetti attesi per quel gruppo per il livello di esposizione.

- La "descrizione del rischio" fornisce informazioni importanti per l'interpretazione dei risultati del rischio, comprendendo eventuali effetti dannosi sulle piante e sugli animali in questione, confronti qualitativi rilevanti, modo in cui le incertezze (lacune nei dati e variazioni naturali) potrebbero influenzare la valutazione.

1.4. Normative (Breve Storia Normativa)

L'attuale normativa di riferimento per i siti contaminati e gli interventi di bonifica è il D.lgs.152/06 che all'art.240 definisce come sito *“l'area o porzione di territorio, geograficamente definita e determinata, intesa nelle diverse matrici ambientali (suolo, materiali di riporto, sottosuolo ed acque sotterranee) e comprensiva delle eventuali strutture edilizie e impiantistiche presenti”*; il decreto prevede due livelli di attenzione individuati nelle *“concentrazioni soglia di contaminazione (CSC)”* ovvero i livelli di contaminazione delle matrici ambientali che costituiscono valori al di sopra dei quali è necessaria la caratterizzazione del sito e l'analisi di rischio sito specifica.

Le CSC sono contenute nella Tab. 1 Titolo V del D.lgs.152/06 che distingue obiettivi differenti in relazione all'uso del sito determinando valori di riferimento più restrittivi per l'uso verde-residenziale rispetto all'uso commerciale-industriale.

Il superamento delle CSC comporta la classificazione del sito come “potenzialmente contaminato” ed il passaggio ad una seconda fase di valutazione che è rappresentata dall’Analisi di Rischio sito specifica (AdR).

Con l’AdR si determinano gli obiettivi di riferimento specifici per il sito in esame che sono definiti dalla norma “concentrazioni soglia di rischio (CSR)” ovvero *“i livelli di contaminazione delle matrici ambientali, da determinare caso per caso con l'applicazione della procedura di analisi di rischio sito specifica secondo i principi illustrati nell'Allegato 1 alla parte IV del presente decreto e sulla base dei risultati del piano di caratterizzazione, il cui superamento richiede la messa in sicurezza e la bonifica. I livelli di concentrazione così definiti costituiscono i livelli di accettabilità per il sito”* (D.Lgs. 152/06, art 240).

Solo, quindi, al superamento delle CSR il sito è definito “contaminato” e viene richiesta un’azione riparatoria.

L’analisi di rischio ha visto diverse modalità applicative nel corso dell’evoluzione normativa.

L’AdR è comparsa nella legislazione italiana con la DGR (RL) 17252/96. La norma regionale introduceva un approccio in cui la vulnerabilità della falda era l’elemento cardine della valutazione, prevedendo infatti la definizione di un indice di rischio delle acque sotterranee.

A tale analisi di primo livello faceva seguito l’individuazione degli obiettivi della bonifica scelti a protezione della falda in base ad una classificazione in:

- Rischio basso
- Rischio medio
- Rischio alto.

Gli obiettivi della bonifica erano fissati in funzione dell’uso dell’area e calcolati in funzione di un’analisi specifica del sito: uso a verde pubblico e privato, uso agricolo, uso residenziale, uso industriale.

La prima normativa nazionale è stata il DM 471/99. Il decreto introduceva la medesima impostazione tabellare dell’attuale normativa (D.lgs.152/06) con Tabella 1 per i suoli (Col.A ad uso verde – residenziale e Col.B per destinazione d’uso commerciale - industriale) e Tabella 2 per la qualità della falda.

L'AdR divenne un elemento, per certi versi marginale, da applicarsi esclusivamente nei casi di insostenibilità tecnico-economica degli interventi di bonifica. L'AdR veniva pertanto svolta sulle contaminazioni residue. Tale modalità di calcolo viene definita "Modalità Diretta" che permette il calcolo del rischio (associato al recettore esposto) derivante da una sorgente di contaminazione di concentrazione nota. Tenendo in considerazione l'attenuazione legata ai fattori di trasporto, si valuta il rischio per il recettore.

Solo con il D.lgs. 152/06 è stato introdotto il concetto di sito-specificità già descritto nel paragrafo precedente.

La modalità di calcolo prevista in questo caso segue sia il principio della modalità diretta che quello della "Modalità Inversa". Tale modalità, come riportato dalle linee guida ISPRA, "permette il calcolo per ogni specie chimica contaminate degli obiettivi di bonifica sitespecifici per ciascuna sorgente di contaminazione, ossia del valore di concentrazione massimo ammissibile, in corrispondenza ad ogni sorgente secondaria di contaminazione (Concentrazione Soglia di Rischio, CSR), compatibile con il livello di rischio ritenuto tollerabile per il recettore esposto" (ISPRA).

La normativa attuale, però, non prevede una valutazione del rischio falda indipendente dall'uso del sito e ciò comporta diverse criticità nell'interpretazione del rischio stesso.

Articolo 242

Si riportano di seguito le principali fasi, in termini operativi e amministrativi (fig. 1), che vengono applicate secondo la normativa vigente e di cui si fa riferimento nello studio condotto ed esposto in questo elaborato.

Quando si verifica un evento potenzialmente contaminante, ai sensi dell'articolo 304, comma 2, il responsabile di tale fenomeno entro e non oltre le ventiquattro ore deve mettere in atto tutte le misure di prevenzione necessarie effettuando una comunicazione agli enti competenti.

La stessa procedura dev'essere attuata anche quando viene individuata una contaminazione storica di cui non si conosce il responsabile (D.lgs. 152/2006, art 242).

Il soggetto responsabile della contaminazione deve effettuare delle indagini preliminari nell'area in oggetto e, qualora non siano superate le CSC, entro ventiquattro ore deve effettuare una comunicazione al Comune e alla Provincia di competenza attraverso un'autocertificazione

e deve operarsi al ripristino di tale area. L'autocertificazione, di fatto, conclude il procedimento (D.lgs. 152/2006, art 242, comma 2).

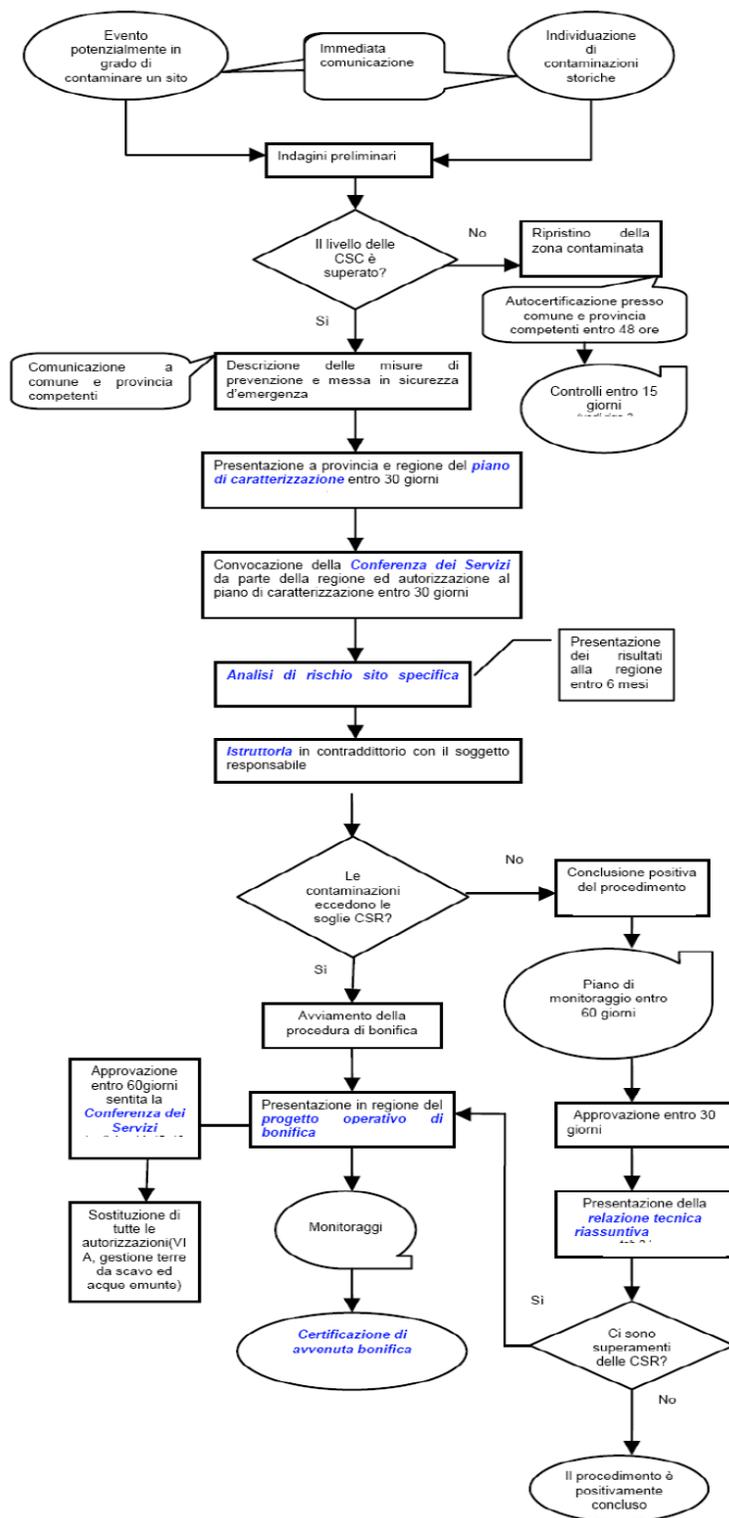


Figura 1: Iter legislativo per interventi di bonifica (S. Centrone, 2017)

D'altra parte, qualora vengano superate le CSC per uno o più punti di indagine, il responsabile deve dare immediatamente comunicare la notizia al Comune e alla Provincia competente dando anche indicazione delle misure preventive e di messa in sicurezza che sono state applicate, vista l'emergenza. Da qui il responsabile dispone di trenta giorni per presentare il piano di caratterizzazione (PdC) agli enti preposti. Entro trenta giorni dalla presentazione del PdC, la Regione attraverso una conferenza dei servizi, si adopera all'autorizzazione di tale documento indicando, ove necessario, integrazioni che devono essere effettuate (*D.lgs. 152/2006, art 242*).

Sulla base della caratterizzazione, si effettua una Analisi di Rischio sito specifica al fine di determinare le concentrazioni soglia di rischio (CSR) e si dispone di sei mesi, a partire dall'approvazione della caratterizzazione, per presentare i risultati agli enti. L'istruttoria si svolge in contraddittorio con il soggetto ritenuto responsabile della contaminazione. La Regione, a questo punto, convoca la conferenza dei servizi e ha tempo sessanta giorni per approvare il documento di AdR a partire dalla sua ricezione (*D.lgs. 152/2006, art 242*).

Qualora l'AdR dimostri che la concentrazione dei contaminanti sia inferiore alle CSR, la conferenza dei servizi deve approvare l'Analisi di Rischio e dichiarare positivamente concluso il procedimento; in alcune circostanze può anche prescrivere un programma di monitoraggio del sito in oggetto (*D.lgs. 152/2006, art 242*).

D'altro canto, qualora le concentrazioni delle specie chimiche riscontrate nel sito superino le CSR, il responsabile della contaminazione dispone di sei mesi (a partire dall'approvazione dell'AdR) per presentare agli enti preposti il Progetto Operativo di Bonifica (POB) o di Messa in Sicurezza Permanente (MISP) e di eventuali misure di ripristino ambientali. Nella documentazione fornita, dev'essere indicata la tempistica di esecuzione dei lavori, garanzie finanziarie e si deve garantire che tutti gli interventi devono essere effettuati in condizioni di massima sicurezza con particolare attenzione al rischio sia sanitari che ambientali (*D.lgs. 152/2006, art 242*).

A bonifica terminata, la Provincia dispone di trenta giorni per la concessione della certificazione di bonifica. Qualora venga superata la tempistica, si demanda alla Regione il rilascio di tale certificazione (*D.lgs. 152/2006, art 242*).

1.5. Contaminazione delle Acque di Falda e correlazione con il consumo umano

Non dappertutto si beve acqua di falda. Questa è una condizione molto favorevole garantendo una matrice qualitativamente pregiata grazie all'azione di filtro rappresentata dal terreno attraverso il quale passa l'acqua che va ad alimentare la falda stessa. Ma questo accade se la falda è protetta da strati impermeabili (argilla) continui. Se la falda è libera o le lenti di argilla sono discontinue la contaminazione dal suolo può essere veicolata nelle acque sottostanti.

Se la falda ha uno scopo idropotabile le condizioni di vulnerabilità sopra descritte possono portare ad un alimento non conforme rispetto agli obiettivi di qualità previsti dalle normative (*ISPRA, 2017*).

Nel caso dell'acquifero milanese la falda più superficiale non è utilizzata a scopo idropotabile ma lo è quella sottostante. Vi sono però interconnessioni tra i due acquiferi dovute appunto alla discontinuità delle lenti di argilla. Così nel corso del tempo la falda profonda è stata interessata da contaminazioni derivanti dalla falda più superficiale (*L. Alberti e V. Francani, 2022*).

Al fine di garantire la salute umana, l'acqua destinata al consumo umano richiede dei requisiti microbiologici e chimici particolari, designati dal Decreto legislativo 31/2001, parte A e parte B.

Per quanto riguarda i criteri microbiologici nella normativa di riferimento, Decreto Legislativo del 2 febbraio 2001, n.31, viene ben delineata la definizione di "acque destinate al consumo umano":

- acque trattate e non trattate destinate ad uso potabile e preparazione cibi e bevande o altri usi domestici, fornite attraverso rete di distribuzione, cisterne, bottiglie o contenitori;
- acque usate da imprese alimentari per fabbricazione, trattamento o conservazione o l'immissione nel mercato di prodotti o sostanze destinate al consumo umano;
- impianti di distribuzione domestici per l'erogazione dell'acqua destinata al consumo umano, compresa la rete esterna.

Secondo le direttive circa la qualità delle acque destinate al consumo umano indicate dal D.Lgs. 31 (2001), in Allegato I parte A e B vengono riportati i requisiti necessari per le acque destinate al consumo umano (Tab 1, 2).

Parametro	Valore di parametro (numero/100 ml)
Escherichia coli (E. coli)	0
Enterococchi	0

Per le acque messe in vendita in bottiglie o contenitori sono applicati i seguenti valori:

Parametro	Valore di parametro
Escherichia coli (E. coli)	0/250 ml
Enterococchi	0/250 ml
Pseudomonas aeruginosa	0/250 ml
Conteggio delle colonie a 22° C	100/ml
Conteggio delle colonie a 37° C	20/ml

Tabella 1 : Requisiti microbiologici per le acque destinate al consumo umano (D.Lgs. 31, 2001)

Parametro	Valore di parametro	Unità di misura
Acrilammide	0,10	µg/l
Antimonio	5,0	µg/l
Arsenico	10	µg/l
Benzene	1,0	µg/l
Benzo(a)pirene	0,010	µg/l
Boro	1,0	mg/l
Bromato	10	µg/l
Cadmio	5,0	µg/l
Cromo	50	µg/l
Rame	1,0	mg/l
Cianuro	50	µg/l
1,2 dicloroetano	3,0	µg/l
Epicloridrina	0,10	µg/l
Fluoruro	1,50	mg/l
Piombo	10	µg/l
Mercurio	1,0	µg/l
Nichel	20	µg/l
Nitrato (come NO3) (29)	50	mg/l
Nitrito (come NO2) (30)	0,50	mg/l
Antiparassitari	0,10	µg/l
Antiparassitari-Totale	0,50	µg/l
Idrocarburi policiclici aromatici	0,10	µg/l
Selenio	10	µg/l
Tetracloroetilene	10	µg/l
Tricloroetilene		
Triometani-Totale	30	µg/l
Cloruro di vinile	0,5	µg/l
Clorito	200	µg/l
Vanadio	50	µg/l

Tabella 2 : Requisiti chimici per le acque destinate al consumo umano (D.Lgs. 31, 2001)

1.6. Caratteristiche delle Contaminazioni della Falda nel territorio Milanese.

Inquadramento idrogeologico

Come riportato dal Piano di Governo del Territorio (PGT) del Comune di Milano, l'alimentazione delle falde milanesi è dovuta principalmente all'infiltrazione delle acque sulla superficie di un vasto territorio comprendente buona parte del settore prealpino lombardo: negli acquiferi di questa zona le acque si raccolgono per poi defluire verso l'area milanese.

L'acquifero ospitato nei depositi più superficiali risulta essere inoltre alimentato, sia dagli apporti meteorici efficaci, sia da fenomeni di dispersione nel sottosuolo dei corsi d'acqua, dei canali irrigui e dagli apporti diretti legati alle pratiche irrigue.

Nel sottosuolo della provincia di Milano sono riconoscibili tre differenti litozone con caratteristiche granulometriche gradualmente decrescente dall'alto verso il basso, creando così diverse condizioni per l'instaurarsi di acquiferi (*PGT, 2019*).

Le tre litozone sono:

1. Litozona ghiaioso-sabbiosa: è quella più superficiale che comprende depositi fluviali e fluvioglaciali (conosciuti come Depositi fluvio-glaciali Würm), il cui periodo di riferimento decorre dal Pleistocene a oggi. È prevalentemente costituita da elementi grossolani (ghiaie e sabbie con limi e argille subordinati) con variazioni granulometriche da nord verso sud.
2. La litozona ghiaioso-sabbiosa è disposta a livello intermedio e rappresenta il così detto "acquifero tradizionale" poiché si presenta come un acquifero libero. È di origine continentale e risulta costituito da sabbie, argille e limi con intercalazioni di torbe. Al suo interno sono presenti lenti sabbiose che danno origine a acquiferi sfruttabili.
3. Litozona argillosa: è quella più profonda che risulta costituita da sedimenti marini che vanno dalle argille ai limi con intercalazioni di sabbie. È in continuità sia lateralmente che verso l'alto con la litozona sabbioso-argillosa.

Le diverse litozone permettono la presenza di corpi intercomunicanti di elevata permeabilità e spessore soprattutto nella parte superficiale (zone a granulometria maggiore), mentre in profondità la permeabilità diminuisce (a causa della presenza di sedimenti più fini) e le porzioni permeabili divengono sempre più isolate.

La base, a scala regionale, è costituita dai depositi limoso-argillosi e dai depositi del Pliocene che determinano uno strato poco permeabile (acquitard) o del tutto impermeabile.

Il primo acquifero si estende dal piano campagna sino ad una profondità di 30/40 metri e risulta essere costituito da sedimenti ad elevata permeabilità (ghiaie e sabbie con frazioni subordinate di limi). Qui si trova la falda più superficiale, denominata “acquifero tradizionale”. Tale falda è di tipo freatico e presenta conducibilità idraulica di $10^{-3}/10^{-4}$ m²/s. Questo acquifero può essere soggetto a contaminazioni microbiologiche e chimiche.

Il secondo acquifero, il cui spessore si estende da 30/40 metri di profondità sino a 100 metri, è costituito da sedimenti con permeabilità medio-alta (sabbie e ghiaie con frazioni fini e orizzonti di conglomerati e arenarie). La falda in questo caso risulta essere libera o confinata e spesso collegata con quella sovrastante con conducibilità idraulica di $10^{-4}/10^{-5}$ m²/s. In questa falda possono essere presenti contaminanti chimici.

Il terzo acquifero si trova tra i 100 e i 200 m di profondità ed è costituito da sedimenti con permeabilità media – bassa (limi e argille con livelli sabbiosi). In questa porzione si trovano le falde più profonde, la cui conducibilità idraulica è di $10^{-4}/10^{-6}$ m²/s. È stata ipotizzata la possibile presenza di H₂S (chimismo riducente) e acqua salmastra, soprattutto nelle zone più profonde (PGT, 2019).

Rispetto allo stato di contaminazione della falda, dall’analisi di un rapporto annuale (riferito al 2012) condotto da ARPA Lombardia “*Stato delle acque sotterranee della provincia di Milano*” pubblicato nel settembre 2013, si evince che i principali contaminanti presenti nel territorio milanese sono:

- **Nitrati:** il limite di riferimento per la presenza di nitrati nelle acque di falda è di 50 mg/l e si osserva una diminuzione della concentrazione dall’altra alla bassa pianura, fenomeno riconducibile alla differenza di popolazione del territorio e dunque all’utilizzo della fognatura e alla maggiore vulnerabilità dell’acquifero. Nella città di Milano i valori di nitrati sono compresi tra 10 e 40 mg/l (valori più alti per la porzione dalla periferia nord verso il centro e valori più bassi nella parte sud della città). Precedentemente il limite dei nitrati risultava inferiore rispetto all’attuale ma, con il tempo, questo ha subito un aumento poiché tutto il territorio milanese presentava superamenti e dunque la sola

alternativa per far rientrare i valori riscontrati sul territorio entro limiti era istituire un valore soglia più alto.

- **Cromo esavalente:** la maggior parte dei superamenti di cromo esavalente in falda è dovuto a fenomeni di inquinamento puntuale con conseguente formazione di pennacchi di contaminazione stretti e che si estendono lungo la direzione del flusso di falda. Per quanto riguarda l'area milanese, si riscontrano aree di contaminazione da cromo esavalente con valori da 5 a 10 µg/l riscontrati prevalentemente nella zona centrale con picchi di contaminazione nelle aree di Gorla e Armi (19 e 17) µg/l. Oltre a questo, vi sono aree con superamenti nelle zone di: Trenno (concentrazioni fino a 185 µg/l), Varesina, via Savona e via Bazzi (massime concentrazioni a 4000 µg/l). Altri pennacchi si estendono da Gorla a Via Padova, nella zona Affori-Dergano, zona PII Garibaldi-Repubblica, via Mecenate.
- **Solventi clorurati:** in tutta la regione sono stati riscontrati sia plumes delineati che contaminazioni diffuse legati alla presenza di attività umane in cui si faceva ampiamente uso di questi solventi. Nella città di Milano sono stati riscontrati contaminazioni da solventi clorurati principalmente per il trasporto di questi da zone localizzate a monte. Tra i solventi maggiormente presenti nella falda milanese, troviamo delle contaminazioni di base costituite da: tetracloroetilene, con concentrazioni intorno ai 5 µg/l, triclorometano con valori compresi tra 2-3µg/l e tricloroetilene con 1-2 µg/l. A questa situazione di base si individuano delle zone con picchi di contaminazione nelle aree di: Giambellino, zona sud-est e Corvetto, nei pozzi di Martini e Ovidio, zona da Trenno a via Novara con origine della contaminazione a Rho, zona compresa tra Sesto San Giovanni-viale Sarca-via Palmanova comprendendo anche Gorla e Crescenzago e infine la fascia nord-ovest con estensione sino al centro della città e Vettabia e con origine individuata a Baranzate.
- **Altre sostanze inquinanti:** in tutta l'area sono presenti anche contaminazioni da idrocarburi, BTEX, MTBE, clorobenzeni, ammine, fitofarmaci e fenoli. Le contaminazioni da idrocarburi sono riconducibili principalmente a stazioni di adduzione di carburante. In particolare, nella città di Milano indichiamo:
 - idrocarburi nella periferia nord-ovest;
 - contaminazione da BTEX, IPA e idrocarburi per l'area di Bovisa;

- nella zona centrale si osservano elevate contaminazioni da arsenico e piccoli superamenti per ferro e manganese;
- Periferia sud-ovest con contaminazioni di BTEX, MTBE e idrocarburi.

Monitoraggio falda nella città di Milano

Al fine di valutare nel lungo periodo lo stato e la qualità della falda nella città metropolitana di Milano, è stata creata una rete congiunta tra ARPA, Comune di Milano, Città Metropolitana, CdP, SIF e altri enti che operano un monitoraggio continuo sulle acque sotterranee. Questo consente di avere un quadro preciso circa le contaminazioni che definiscono plumes aventi direzione nord-nord-ovest / sud-sud-est e nord-nord-est / sud-sud-ovest (fig. 2).

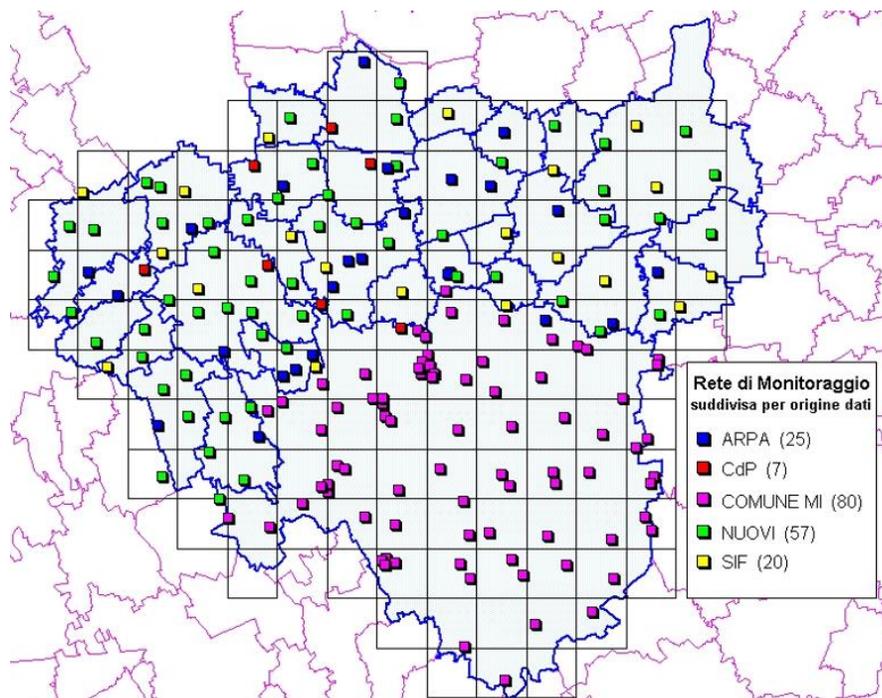


Figura 2: Monitoraggio falda città di Milano (ARPA, 2007)

1.7. Caratteristiche delle Contaminazioni nel Territorio Milanese

Inquadramento geologico

Il comune di Milano è situato nella porzione centro-orientale della Pianura Padana, la quale è il risultato della sedimentazione dei detriti trasportati dal fiume Po e dai suoi affluenti, avvenuta principalmente negli ultimi 2 milioni di anni. I depositi sono perciò riconducibili al Quaternario, ad eccezione della parte più settentrionale dove l'incisione fluviale ha portato in affioramento sedimenti pre-quaternari (PGT, 2019).

Come illustrato dal PGT del Comune di Milano nella sezione “*Componenti geologica, idrogeologica e sismica*”, La Pianura Padana risente dei processi che si sono succeduti a partire dal Miocene (5 milioni di anni fa) quando l'area costituiva un ampio golfo del mare Adriatico dove si depositavano sedimenti tipici di mare profondo (PGT, 2019).

La successiva evoluzione della Pianura Padana si può ricondurre a tre fasi:

- Fase di regressione marina con sedimentazione continentale. A questa prima fase è attribuibile la transizione da sedimenti marini a depositi di tipo continentale fluvio-lacustri, deltizi e di pianura costiera a granulometria fine identificabili con sabbie fini, limi ed argille (Unità Villafranchiana).
- Fase glaciale (Pleistocene): in questa fase, i fenomeni glaciali Mindel, Riss e Würm diedero origine alla formazione di sedimenti fluvioglaciali nelle porzioni della media e bassa pianura. Questi sedimenti, furono successivamente soggetti a erosione e formazione di terrazzi (*Lifesorgive*).
- Fase post-glaciale: riguarda la formazione di sedimenti alluvionali e fenomeni di erosione (Olocene).

Dal periodo del Pleistocene superiore all'Olocene, è avvenuto un innalzamento tettonico dell'alta pianura, il quale ha provocato la formazione di dorsali e bacini. I bacini sono stati in seguito colmati da depositi alluvionali fino a costituire potenti accumuli di materiale ghiaioso-sabbioso, con strato superficiale di alterazione molto ridotto (40-60 cm), generalmente brunastro in cui prevale una matrice limosa derivata dal disfacimento dei materiali più grossolani. Tali depositi, di età riferibile all'interglaciale Riss- Würm, vengono indicati nella Carta Geologica d'Italia come "*Diluvium Recente*".

Si può quindi concludere che la gran parte dei sedimenti che affiorano attualmente sulla superficie della pianura padana sono recenti (età olocenica, meno di 10.000 anni), molti dei quali si sono depositati negli ultimi duemila anni a causa della complessa relazione fra il fiume Po, a nord, i fiumi appenninici, a Sud e il Mare Adriatico, a est.

Il risultato è una grande varietà di depositi comprendenti: le conoidi e le piane alluvionali dei fiumi appenninici, la piana a meandri del Po, la piana costiera, il delta e le fronti deltizie.

Dal punto di vista geomorfologico il terreno dell'area comunale digrada dolcemente da nord-ovest a Sud-est misurando, sul livello del mare, dai 147 ai 102 m, con una media di 122 m s.l.m.

Dal punto di vista morfologico il territorio della provincia di Milano viene suddiviso in tre zone:

- Zona delle cerchie moreniche;
- Zona dei terrazzi ferrettizzati;
- Zona della media e bassa pianura diluviale e alluvionale.

La prima è costituita dalle zone moreniche terminali dell'Adda e del Ticino e occupando le aree più settentrionali e altimetricamente più elevate.

L'area terrazzata occupa il territorio dalle pendici degli archi morenici fino all'altezza del canale Villoresi.

- La terza zona, la più estesa territorialmente, è costituita dalla piana digradante verso Sud, solcata dai fiumi Lambro e Ticino.
- In base alle loro caratteristiche idrogeologiche e stratigrafiche si possono distinguere:
- Substrato indifferenziato: comprende formazioni risalenti al periodo che decorre dal Paleozoico al Cenozoico, su cui poggiano i depositi quaternari. Le porzioni più esterne sono rappresentate da Gonfolite ed i Flysch.
- La deposizione della Gonfolite, risalente all'Oligocene sino a Miocene inferiore), attesta la presenza di una cospicua attività erosiva che ha interessato l'area subalpina. È costituito da deposito clastico di tipo continentale costituito in particolare da ciottoli di natura cristallina.

- La deposizione dei Flysch riguardano successioni di rocce clastiche con alternanza di porzioni di argilla e arenarie che determinano la formazione di aree a bassa permeabilità e con funzione di isolamento idrogeologico.
- Villafranchiano: litologicamente si presentano come argille con intercalazioni di sabbie, ghiaie e ciottoli, che localmente possono dare luogo alla formazione di acquiferi. Il passaggio dal basso verso l'alto a sedimenti di tipo sabbioso-argilloso, attestano. Queste porzioni, passando verso l'alto a sedimenti sabbioso-argillosi, testimoniano la graduale evoluzione da un ambiente marino (litozona argillosa del Calabriano) ad uno continentale (litozona sabbioso-argillosa). A seguito della loro deposizione, queste unità sono state soggette a sollevamento durante il quale la porzione più superficiale è stata erosa e incisa. Proprio nelle incisioni si sono accumulati materiali con granulometria grossolana (ghiaia e sabbia).
- Unità conglomeratica (Ceppo Lombardo): è costituito da conglomerati di cemento carbonatico che si alternano a porzioni di argilla, arenaria e sabbia; è precedente ai depositi fluvio-glaciali del Mindel. È un ceppo molto importante poiché nelle porzioni meno cementate si possono creare acquiferi. D'altro canto, le porzioni più cementate manifestano elevata permeabilità dovuta alla fratturazione.
- Sebbene nell'area settentrionale gli spessori del Ceppo sono molto elevati (anche decine di metri), nella zona di Milano si riducono a lenti o banchi con spessori inferiori ai 10m e profondità variabili da 100 a 80 m.
- Depositi glaciali Mindel: lo spessore di questi depositi può superare i 40 m e comprendono tutte le unità che costituiscono gli apparati morenici, dei quali i più antichi affiorano in posizione più esterna (da Triuggio a Usmate). La porzione inferiore risale al fluvio-glaciale del Mindel. Litologicamente si presenta eterogenea e con bassa permeabilità.
- Depositi fluvio-glaciali Mindel: comprendono i depositi fluvio-glaciali che formano le porzioni più elevate della pianura (A. Marzorati, 2015). Si raccordano con le cerchie moreniche a monte e con il livello fondamentale della pianura, tramite dei terrazzi, a valle (Groane, Albiate-Sovico-Macherio, Gerone-Camparada-Velate, Olgiate, Bernareggio, Paderno-Verderio-Mezzago, Gessate). Nella porzione superficiale vi sono alterazioni di colore rossastro con spessore variabile da 2 a 8 (alterazioni del "Ferretto"). Sono costituiti

da elementi di diametro variabile generalmente arrotondati che presentano una matrice sabbioso-argillosa.

- Depositi glaciali Riss: Sono depositi caotici ghiaiosi e sabbiosi con matrice argillosa e con presenza di blocchi provenienti dall'arco alpino. Morfologicamente si presentano in colline disposte in cordoni morenici subparalleli, posti all'interno della cerchia mendeliana (cerchie degli apparati del Lario, dell'Adda e del Lambro).
- Depositi fluvio-glaciali Riss: Ciottoli arrotondati con ghiaie, in matrice sabbiosa giallo-ocrea, con locale presenza di lenti di conglomerati. Anche questi depositi sono soggetti alle alterazioni rossastre simili a quella del "Ferretto".
- Formano terrazzi riassiani intermedi tra quelli mendeliani e la pianura. Presenti nell'area a nord presso Garbagnate Milanese, Monza, Vimercate e Bellinzago Lombardo.
- Depositi glaciali Würm: questi corrispondono all'ultima glaciale e sono costituiti da ghiaie, ciottoli e limi che possono inglobare massi erratici. In questo contesto si creano morene laterali, frontali e di fondo, nella cerchia più interna al passaggio con le Prealpi. Affiorano unicamente nella parte nord-orientale della provincia di Milano (PGT).
- Depositi fluvio-glaciali Würm (livello fondamentale della pianura): Ghiaie e sabbie con matrice argillosa composta da locali lenti di argilla. Questi depositi presentano in superficie uno strato sabbioso-argilloso in grado di convogliare una grande quantità d'acqua negli orizzonti sottostanti i quali, a causa dell'elevata porosità, costituiscono un grande serbatoio per l'acqua nel sottosuolo.
- Depositi lacustri: costituiscono la porzione più interna degli apparati morenici e sono costituiti da sabbie fini limose ed argille. Definiscono delle estese aree impermeabili che affiorano nella parte nord della provincia di Milano (PGT).
- Alluvioni antiche: sono costituite da ghiaie ciottolose che progressivamente si trasformano in ghiaie sabbiose in direzione Sud; risultano frammentate da livelli sabbioso-limosi e si trovano in corrispondenza dei corsi d'acqua principali.
- Alluvioni recenti e attuali: sono costituite da ghiaie con granulometria diversificata e si rinvencono negli attuali alvei dei fiumi. Grazie alla elevata granulometria, alimentano gli acquiferi.

Riguardo lo stato del suolo nell'area di Milano, da uno studio condotto da ARPA Lombardia nel 2021, è emerso che la maggior parte delle contaminazioni di suolo e sottosuolo della provincia di Milano, così come tutta l'area lombarda, sono riconducibili a vecchie aree industriali dismesse, in piccola parte da industrie attualmente attive, impianti di stoccaggio e adduzione di carburante, sversamenti e scarichi abusivi. Ciò trova conferma nel fatto che i principali inquinanti sono ascrivibili a idrocarburi e in piccola parte a metalli.

Per quanto riguarda i siti contaminati presenti in tutta la regione Lombardia, un dato del 31 dicembre 2021 (fig.3) attesta che questi erano 1009, di cui 492 solo per la provincia milanese.

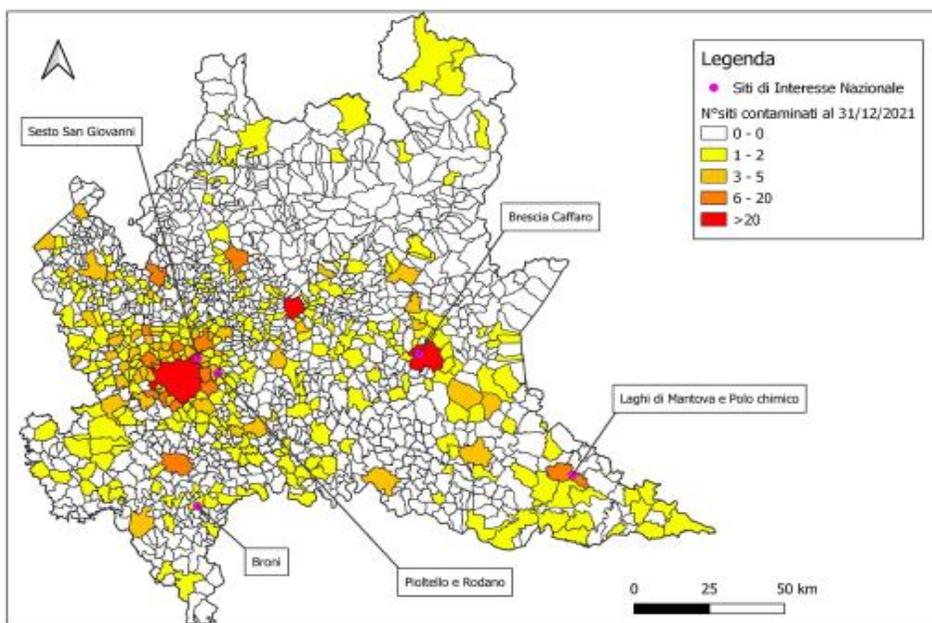


Figura 3: Siti oggetto di Bonifica - aggiornamento del 31 dicembre 2021 (ARPA Lombardia, 2023)

1.8. Inquadramento Analisi di Rischio

Come accennato in precedenza, l'AdR rappresenta il metodo più efficace e all'avanguardia per determinare la possibilità di pericolo associato alla presenza di una contaminazione in un determinato sito, permettendo di definire le priorità di intervento; la sua applicazione è prevista unicamente per la valutazione di rischi cronici e a lungo termine, non viene pertanto utilizzata per la valutazione di rischi in cantieri di lavoro o per situazioni che prevedono messa in sicurezza d'emergenza. Può essere impiegata prima, dopo o durante un intervento di bonifica o può, in molti casi, escludere la necessità di bonifica (APAT, 2008 e ARPA, 2008).

Tale procedura, infatti, viene applicata ai siti che potrebbero rappresentare fonte di pericolo sia per l'uomo che per l'ambiente; nella sua applicazione vengono tenuti in considerazione:

- caratteristiche specifiche del sito;
- recettori e destinazione d'uso dell'area;
- meccanismi di trasporto.

Attraverso l'AdR viene calcolato il rischio, ossia *“la concomitanza della probabilità di accadimento di un evento dannoso (P) e dell'entità del danno provocato dall'evento stesso (D)”*:

$$\mathbf{R = P \times D}$$

Il danno (D), d'altra parte, può essere calcolato come:

$$\mathbf{D = Fp \times Fe}$$

Di cui (Fp) rappresenta il fattore di pericolosità, legato all'entità del possibile danno e (Fe) fattore di contatto in funzione della durata di esposizione.

Nel caso di siti inquinati:

- (P=1);
- Fp dovuto alla tossicità intrinseca dell'inquinante (T [mg/kg d]⁻¹);
- Fe è definito in funzione dell'esposizione (E [mg/kg d]).

Di conseguenza il rischio (R) derivante da un sito contaminato è definito come:

$$R = E \times T$$

Dove E ([mg/kg d]) si riferisce all'assunzione giornaliera del contaminante e T ([mg/kg d]⁻¹) rappresenta la tossicità del contaminante stesso.

Come riportato dal Manuale ISPRA, questo punto il rischio R viene valutato mediante “criteri di accettabilità sia individuali che cumulativi legati al rischio sanitario” i per definire se la contaminazione potrebbe comportare effetti nocivi alla salute delle persone (APAT - 2008).

- Il rischio legato alle sostanze cancerogene viene calcolato con la seguente formula:

$$R = E \times SF;$$

- Per le sostanze non cancerogene: $HQ = E / RfD$

HQ rappresenta “l'Indice di Pericolo” (APAT - 2008.) ossia di quanto l'esposizione al contaminante ecceda rispetto alla dose tollerabile.

RfD (Reference Dose [mg/kg d]): quantità media giornaliera del contaminante che non produce effetti nocivi per l'uomo.

Come spiegato dal Manuale ISPRA (APAT, 2008), il rischio risultante dall'AdR può essere:

“Rischio e indice di pericolo individuale (R e HQ): rischio dovuto ad un singolo contaminante per una o più vie d'esposizione” (APAT, 2008).

“Rischio e indice di pericolo cumulativo (RTOT e HQTOT): rischio dovuto alla cumolazione” degli effetti di più sostanze per una o più vie d'esposizione” (APAT, 2008).

L'AdR può essere applicata con due finalità differenti: determinare approssimativamente e quantitativamente il rischio per la salute umana in relazione alla presenza di uno o più inquinanti nella matrice ambientale e identificare la massima concentrazione ammissibile di contaminante nel suolo e nella falda riferiti alle condizioni riscontrate nel sito in esame. Questi costituiscono gli obiettivi di bonifica sito specifici (CSR).

Per i due casi sopradescritti, si può procedere seguendo due modalità (fig. 4):

- Modalità diretta (forward mode): consente di calcolare il rischio legato alla sorgente di contaminazione, le cui concentrazioni delle specie chimiche inquinanti sono note, per il recettore preso in considerazione. Da tale concentrazione, viene stimata l'esposizione del recettore in oggetto, tenendo conto dei fattori di trasporto. La tossicità delle sostanze viene

stimata mediante due fattori: RfD (Reference Dose) e SF (Slope Factor). Questi permettono il calcolo del rischio.

- Modalità inversa (backward mode): consente di identificare gli obiettivi di bonifica del sito in esame attraverso il calcolo della concentrazione massima accettabile in sorgente in accordo con il livello di rischio ammissibile per il recettore esposto.

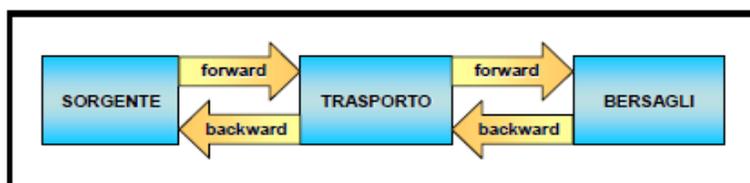


Figura 4: Possibili modalità di applicazione dell'analisi di rischio (APAT, 2008)

L'analisi di rischio può essere svolta in tre livelli.

Livello 1: corrisponde ad una valutazione di screening in cui vengono considerati parametri del sito generici. Si tratta di Risk Based Screening Levels (RBSL) che possono essere usati come obiettivi di bonifica qualora le concentrazioni superino tali valori di riferimento. In questa fase si considerano percorsi di esposizione sia diretti che indiretti e si considerano solo bersagli on-site.

Livello 2: si tratta di una procedura sito specifica in cui vengono effettuate indagini approfondite e vengono calcolati i Site Specific Target Level (SSTL) usati come obiettivi di bonifica. Trattandosi di una valutazione più approfondita, si considerano più parametri di esposizione, più scenari e si valutano sia bersagli on-site che off-site.

Livello 3: costituisce una valutazione maggiormente dettagliata rispetto alla precedente fase. Vengono utilizzati degli strumenti di calcolo più complessi in cui si applicano modelli numerici per simulare fenomeni di trasporto nei siti contaminati. Questo livello si applica nel caso in cui nell'indagine vengono reperiti dati chimici, biologici e fisici specifici per il sito in esame.

Il primo passo per effettuare un'analisi di rischio è la costruzione di un modello concettuale. Questa fase è fondamentale poiché permette di ricostruire in maniera più semplificata lo scenario del mondo reale tenendo in considerazione:

- sorgente di contaminazione;
- vie di migrazione;
- bersagli di contaminazione;
- grado di estensione delle contaminazioni (nel suolo e nella falda)

I bersagli vengono identificati in base alla destinazione d'uso del sito in esame e in relazione alla loro localizzazione rispetto al sito contaminato:

- on-site: posti in prossimità della sorgente di contaminazione;
- off-site: per i recettori a distanza rispetto alla contaminazione (tab. 3).

Le differenti destinazioni d'uso del suolo possono essere:

- verde residenziale: adulti e bambini
- ricreativo: adulti e bambini
- industriale e commerciale: adulti

L'esposizione dei bersagli alle sostanze contaminanti possono essere dirette, quando la via di esposizione è coincidente alla sorgente di contaminazione, o indirette, quando il bersaglio entra in contatto con il contaminante a seguito della sua migrazione. Le vie di esposizione sono raggruppate in:

- suolo superficiale (SS)
- aria outdoor (AO)
- aria indoor (AI)
- acqua profonda (GW)

La sorgente di contaminazione può essere di tipo primario (rappresenta l'elemento responsabile dell'inquinamento) o secondario (si riferisce al comparto ambientale oggetto della contaminazione) e può avvenire in zona satura o insatura. Durante l'applicazione dell'analisi di rischio si fa riferimento alla sorgente secondaria.

La zona insatura si riferisce al suolo ed è suddivisa in suolo superficiale (SS), quando la porzione è compresa dal piano campagna (p.c.) sino a -1m di profondità, e suolo profondo, compreso tra -1m fino alla profondità massima di contaminazione nel sottosuolo.

sorgente di contaminazione	modalità di migrazione (*)	via di esposizione	modalità di esposizione	tipo di esposizione	uso del suolo RESIDENZIALE		uso del suolo RICREATIVO		uso del suolo IND/COMM	
					bersaglio on-site (**)	bersaglio off-site	bersaglio on-site	bersaglio off-site	bersaglio on-site	bersaglio off-site
suolo superficiale	---	suolo superficiale	ingestione di suolo	diretta	A e B	---	A e B	---	A	---
	---		contatto dermico	diretta	A e B	---	A e B	---	A	---
	erosione del vento (e dispersione in aria)	aria outdoor	inalazione di polveri outdoor	indiretta	A e B	A e B	A e B	A e B	A	A
	volatilizzazione (e dispersione in aria)		inalazione di vapori outdoor	indiretta	A e B	A e B	A e B	A e B	A	A
	erosione del vento	aria indoor	inalazione di polveri indoor	indiretta	A e B	---	---	---	A	---
	volatilizzazione		inalazione di vapori indoor	indiretta	A e B	---	---	---	A	---
	percolazione nell'insaturo, diluizione in falda (e trasporto in falda)	falda	Rischio per la falda al punto di conformità	---	---	---	---	---	---	---
suolo profondo	volatilizzazione (e dispersione in aria)	aria outdoor	inalazione di vapori outdoor	indiretta	A e B	A e B	A e B	A e B	A	A
		aria indoor	inalazione di vapori indoor	indiretta	A e B	---	---	---	A	---
	percolazione nell'insaturo, diluizione in falda (e trasporto in falda)	falda	Rischio per la falda al punto di conformità	---	---	---	---	---	---	---
falda	---	falda	Rischio per la falda al punto di conformità	---	---	---	---	---	---	---
	(trasporto in falda)	aria outdoor	inalazione di vapori outdoor da falda	indiretta	A e B	---	A e B	A e B	A	A
	volatilizzazione da falda	aria indoor	inalazione di vapori indoor da falda	indiretta	A e B	---	---	---	A	A

(*) le modalità di migrazione tra parentesi comportano una esposizione off-site
 (***) A = Adulto, B = Bambino

Tabella 3: Tipologie di bersagli in funzione della sorgente di contaminazione modalità di esposizione (APAT – 2008)

La sorgente di contaminazione in zona satura fa riferimento alla presenza di contaminanti nella falda che superano i limiti massimi tollerabili. L'ispezione delle acque sotterranee e la valutazione della possibile contaminazione viene effettuata attraverso dei piezometri che vengono realizzati nell'area di interesse. La sorgente di contaminazione nelle acque sotterranee viene individuata attraverso la valutazione della massima estensione del plume di contaminazione facendo riferimento ai punti di campionamento non conformi rispetto ai limiti definiti dalle normative (fig. 5).

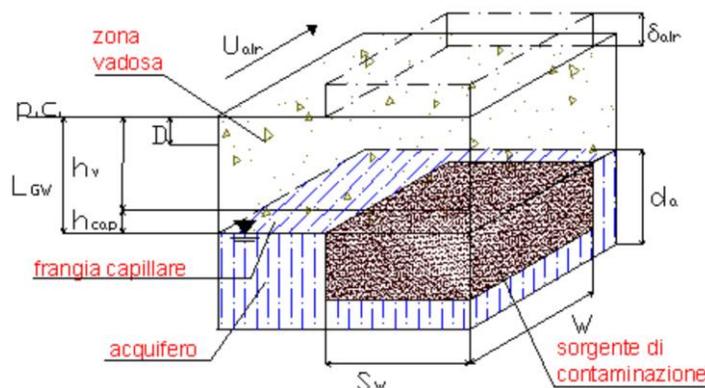


Figura 5: MCS sorgente di contaminazione nel suolo saturo (APAT, 2008)

La procedura di AdR rivolge quindi un'attenzione alla tutela della falda sebbene questo aspetto sia per certi versi contraddittorio come sarà descritto con il lavoro svolto.

1.9. Scopo della Ricerca

Scopo del presente lavoro è stato quello di valutare le criticità dell'Analisi di Rischio come attualmente concepita ed applicata, rispetto al potenziale rischio di contaminazione per la falda. Valutando due siti con uguali caratteristiche geologiche e con medesima contaminazione, rispetto alla destinazione d'uso prevista, non necessariamente per entrambi i siti sono state previste le medesime indagini sulle matrici ambientali.

Quando, ad esempio, il superamento delle CSC è solo per la Col.A della Tab.1 allegata alla Parte IV, Titolo V, del D.lgs.152/06, questo sito sarà sottoposto a verifica di contaminazione della falda dal quale potrebbe risultare inquinata.

D'altro canto, il secondo sito che presenta invece conformità rispetto alla Col.B della Tab.1 allegata alla Parte IV, Titolo V, del D.lgs.152/06, non sarà oggetto di alcuna indagine approfondita e una potenziale contaminazione della falda non verrà dunque rilevata.

Quindi, se si considerasse solo la destinazione d'uso commerciale-industriale, potremmo essere in presenza di un rischio falda senza esserne a conoscenza.

Di contro, il rischio falda appare spesso sovrastimato in quanto, sulla base dell'esperienza e dei dati disponibili di qualità della falda, si evince che non sempre c'è corrispondenza tra il rischio di lisciviazione evidenziato dalla procedura di AdR e l'effettiva presenza di contaminanti in falda.

A tale proposito, nel presente documento si riporta una Analisi di Rischio svolta su un sito collocato nell'area metropolitana di Milano (di cui non si riportano dati specifici per motivi di riservatezza) effettuando un confronto con dati derivanti da altri siti precedentemente indagati dalla società PasaLabs srl, al fine di porre in evidenza come la destinazione d'uso di una area influenzi ampiamente le indagini da eseguire e, dunque, la rilevazione di contaminazioni per le acque sotterranee.

2. Materiali e Metodi

Il presente studio è stato messo a punto attraverso diverse fasi: nella prima sono stati effettuati i campionamenti di terreni e acque sotterranee, una seconda fase ha previsto l'analisi chimica delle matrici ambientali, durante la terza fase è stata condotta l'Analisi di Rischio sito specifica attraverso l'utilizzo del software Risk-Net 3.1.1.

Infine, vengono riportati dei dati di pregresse analisi di rischio al fine di confrontare i risultati ottenuti.

2.1. Piano Di Lavoro

i. Campionamento Terreni e Acqua di Falda

Terreni

Il campionamento dei terreni è il primo passo per indagare e poter caratterizzare un sito: la disposizione dei punti di campionamento dev'essere idonea al fine di caratterizzare al meglio il sito in oggetto (*ARPA, 2010*). Altro fattore cruciale è la scelta delle profondità in cui effettuare il campionamento: questo consente di determinare la massima estensione della contaminazione e la vicinanza alla falda (*APAT, 2006*).

Le tecniche di campionamento prevedono due metodologie:

- formazione di trincee: in questo caso il campione si preleva dalla massa di terreno, raccolta nella benna o depositata su un piano superficiale, del materiale in più porzioni, avendo cura di ottenere un campione omogeneo e statisticamente rappresentativo dell'orizzonte indagato;
- Sondaggi a carotaggio continuo o metodi analoghi (es. a percussione): in questo caso la formazione del campione avviene ponendo l'intera carota da indagare nella cassetta catalogatrice; la perforazione avviene a secco, senza fluidi di perforazione, in modo tale da evitare il dilavamento di eventuali composti che si intendono ricercare. Durante i carotaggi, il terreno non deve subire surriscaldamento poiché questo potrebbe alterare i contaminanti volatili o termo degradabili che si stanno ricercando; dunque, la velocità di rotazione deve essere costantemente controllata e limitata al fine di ridurre al minimo l'attrito generato tra il macchinario e la matrice (*ARPA, 2010*).

Il carotaggio scelto per il sito in esame è stato quello di carotaggio continuo.

Composti non volatili

Nel caso di campionamenti per la ricerca di composti non volatili (metalli, idrocarburi pesanti, ecc.) il procedimento da seguire è il seguente:

- viene prelevato tramite sessola il materiale estratto, passarlo a setaccio con maglia $\varnothing = 2$ cm conforme, in modo da eliminare in campo la frazione grossolana.
- si procede miscelando e omogenizzando il campione composito così ottenuto. Se operativamente fattibile, procedere con la quartatura.
- si confezionano le aliquote utilizzando i contenitori opportuni.

Le operazioni di vagliatura avvengono attraverso l'utilizzo di vagli certificati secondo la normativa ASTM E11-71 o la norma UNI 2331 con diametro di 200 mm., altezza 50 mm che permettono un passante da 2,0 cm.

In generale, le aliquote confezionate nei vasi di vetro devono essere preparate avendo cura di riempire il contenitore con una quantità di terreno sufficiente a soddisfare tutte le determinazioni analitiche.

Se il campionamento avviene in contraddittorio con i tecnici ARPA occorre formare 3 aliquote omogenee: una per il laboratorio di parte, una per il laboratorio pubblico ed una per un'eventuale contestazione (aliquota C o terza aliquota).

Composti volatili

Nel caso di campionamenti per la ricerca di composti volatili (idrocarburi leggeri con $C \leq 12$) il prelievo viene eseguito, in modo puntuale, senza setacciatura né omogeneizzazione o miscelazione, direttamente dalla benna dell'escavatore o immediatamente dopo l'estrazione del terreno dal carotiere. Tale operazione risulta indispensabile per non disperdere il contaminante che renderebbe il campione poco rappresentativo.

Qualora si operi in contraddittorio non è prevista la formazione della terza aliquota perché l'analisi avverrebbe dopo un tempo medio-lungo rendendo il campione non rappresentativo per perdita e degradazione dei composti volatili.

Campionamento del materiale di riporto

In presenza di materiali di riporto va previsto il prelievo di un campione tal quale (senza setacciatura) da sottoporre a test di cessione di eluato, costituito da almeno 2 kg di materiale opportunamente omogeneizzato.

Ove i risultati evidenzino la conformità dei materiali allocati, la matrice riporto dovrà essere assoggettata ad indagini volte ad accertarne la conformità anche ai sensi del Titolo V della Parte Quarta del D.Lgs.152/06, ovvero come avviene per la matrice terreno, come materiale setacciato per la quantificazione dei composti non volatili di tal quale, ma in un vasetto ad hoc, per la quantificazione di composti volatili.

Le tecniche di conservazione dei campioni devono garantire la qualità dello stesso e limitare il più possibile i naturali processi di deterioramento a cui sono soggette le matrici ambientali a seguito del campionamento.

Ai fini di una corretta conservazione durante il trasporto di campioni, è necessario attenersi alle seguenti regole generali:

- il trasporto dei campioni deve essere effettuato nel minor tempo possibile (dal momento del prelievo allo stoccaggio nei frigo della sede operativa/laboratorio) all'interno di contenitori termici (frigo portatili) adeguatamente attrezzati con corpi refrigeranti ed evitando, pertanto, di esporre i campioni alla luce diretta del sole o a temperature elevate;
- i campioni devono essere stivati correttamente in modo tale da impedire il loro rovesciamento ed evitare possibili rotture causate da eventuali manovre brusche durante il trasporto.

Per il sito in esame, tutte le operazioni di campionamento sono state condotte in maniera tale da evitare il verificarsi di fenomeni di “cross contamination” tra matrici ambientali con differenti caratteristiche chimico-fisiche.

Particolare attenzione è stata posta sia nella scelta della tipologia degli strumenti utilizzati, sia nelle operazioni di decontaminazione delle stesse attrezzature.

Tutti gli strumenti sono stati scelti ed utilizzati in maniera tale che né i materiali di cui sono costituiti, né le modalità del loro impiego potessero modificare le caratteristiche delle matrici ambientali campionate ed in particolare la concentrazione delle sostanze contaminanti.

Le attività di campionamento sono state condotte in modo da ottenere campioni che rappresentassero correttamente la situazione esistente nel sito.

Falda

Per quanto concerne il campionamento delle acque sotterranee, in applicazione dell'allegato 2 al titolo V del D.lgs. 152/06, le operazioni di prelievo dei campioni dovranno garantire i requisiti minimi essenziali e possono essere eseguiti secondo due metodologie:

- prelievo statico: in questo caso non viene effettuato uno spurgo preliminarmente al campionamento. Il prelievo del campione avviene direttamente dalla colonna d'acqua presente all'interno del tubo piezometrico o del pozzo mediante un campionatore "bailer" (in acciaio inossidabile o polietilene). Questa tecnica può essere adottata per l'analisi di sostanze che possono essere presenti in fase di galleggiamento alla superficie della falda. Il campionamento, difatti, prevede il prelievo del liquido galleggiante in superficie facendo in modo di evitare diluizioni con acque provenienti da maggiori profondità.

- prelievo dinamico: in questo caso il prelievo dei campioni avviene tramite aspirazione di un'elettropompa sommersa che opera in depressione. La pompa deve essere calata nel pozzo almeno 2 metri sotto il livello di soggiacenza misurata precedentemente. Il prelievo del campione si effettua dopo adeguato spurgo dell'acqua.

La portata, durante la raccolta del campione, è di norma la stessa utilizzata durante lo spurgo o può essere leggermente modificata nel caso si debba minimizzare il flusso per evitare la formazione di bolle d'aria nel corso del campionamento.

Prima di procedere al campionamento è necessario:

- identificare il pozzetto di campionamento;

- eseguire le misure del livello piezometrico con precisione almeno centimetrica utilizzando l'apposito freatometro;
- le misure della soggiacenza della falda devono essere riferite ad un punto a quota nota; in genere si fa rispetto al boccapozzo dove è stata fatta la rilevazione della quota altimetrica; la misura viene annotata sul verbale di campionamento;
- se possibile, identificare l'ordine di campionamento dai pozzetti secondo un livello di crescente contaminazione;
- rilevare l'eventuale presenza di sostanze non miscibili con l'acqua e le relative superfici di interfaccia.

Successivamente alle operazioni preliminari e prima del prelievo, viene eseguito lo spurgo fino ad ottenimento di acqua chiara e comunque per un tempo non inferiore al ricambio di 4-6 volumi d'acqua all'interno del pozzo/piezometro. Lo spurgo è necessario per evitare di prelevare l'acqua contenuta nella colonna e nel dreno che non è rappresentativa dell'acquifero che si intende investigare.

Il tempo necessario per lo spurgo viene calcolato nel seguente modo:

- si determina il volume (Vw) della colonna d'acqua applicando la seguente espressione:

$$VW = \pi (\Phi/2)^2 * (p - h)$$

dove:

Φ = diametro del pozzo/piezometro;

p = profondità del pozzo/piezometro;

h = soggiacenza

- viene stimata la portata (Q) della pompa utilizzata per effettuare lo spurgo e il campionamento attraverso una prova speditiva di campo.
- Il tempo di spurgo (tS) viene calcolato con la seguente espressione:

$$tS = (VW / Q) * 3 \div 5$$

Nei casi in cui si renda necessario un campionamento a basso flusso, lo spurgo e il

campionamento vero e proprio devono essere effettuati con pompe a bassa portata al fine di evitare elevati livelli di torbidità nel campione prelevato che possono determinare la perdita di sostanze volatili e una sovrastima delle concentrazioni di alcuni composti.

Per il campionamento da pozzi in esercizio attrezzati con rubinetto posizionato direttamente sulla testata del pozzo o sul condotto di distribuzione alla rete, non è necessario lo spurgo. Nelle situazioni in cui il rubinetto risulti ubicato nell'armadietto prelievi, esterno alla cameretta del pozzo, dovrà essere eseguito lo spurgo della condotta.

Le operazioni di spurgo devono continuare fino al conseguimento di una almeno delle seguenti condizioni (ARPA, 2008):

1. Rimozione di un volume pari a 4-6 volte rispetto all'acqua presente nel pozzo.
2. pescaggio d'acqua chiarificata e misurazione attraverso una "sonda multiparametrica" valori di PH, conducibilità, temperatura, potenziale redox e ossigeno disciolto sino al raggiungimento di stabilità degli stessi.
3. trascorrimento del tempo di estrazione dell'acqua determinato precedentemente all'attività di campionamento sulla base delle caratteristiche dell'acquifero.

Per effettuare il campionamento delle acque sotterranee, il materiale necessario comprende:

- contenitori idonei in funzione delle analisi specifiche da effettuare per ciascun punto di prelievo e le relative etichette per il campionamento; in genere servono bottiglie, vials (volatili), falcon (metalli). Per la ricerca di metalli è necessario filtrare e acidificare il campione d'acqua e per questo motivo occorreranno l'acido nitrico e il materiale per filtrare (siringhe da 50ml e filtri con porosità da 0,45 μ m).
- idonei contenitori termici (frigo portatili) nei quali inserire un numero adeguato di corpi refrigeranti;
- un freatometro necessario per misurare il livello piezometrico;
- una sonda multiparametrica (T, pH, ossigeno disciolto, conducibilità, redox);
- un'elettropompa da 2", un inverter, un gruppo elettrogeno portatile e un tubo avvolgibile atossico ed eventuale camera di flusso;

- un campionatore “bailer” (in acciaio inossidabile o polietilene);
- i dispositivi di protezione individuale, i guanti monouso per il prelievo dei campioni, una cassetta degli attrezzi.

La scelta dei contenitori utilizzati per il prelievo e la conservazione dei campioni devono rispondere a requisiti generali di robustezza, idoneità alle condizioni di conservazione e devono garantire l’inerzia dei materiali costituenti il contenitore al fine di:

- evitare assorbimento e cessione di sostanze che possono alterare la composizione del campione e dunque le proprietà degli analiti;
- essere resistenti ai vari costituenti presenti nel campione;
- garantire la tenuta dei gas disciolti e dei composti volatili, se oggetto di determinazioni.

Prima di procedere alla raccolta dei campioni, ogni contenitore, ad eccezione dei contenitori contenenti soluzioni stabilizzanti (es. per analisi dei cianuri), deve essere sciacquato almeno 2÷3 volte con la stessa acqua che si intende prelevare (*APAT, 2006*). Il campione di acqua prelevato va versato nel contenitore.

I contenitori per i prelievi destinati all’analisi dei composti volatili devono essere riempiti fino all’orlo avendo cura di evitare la formazione di bolle d’aria nella provetta e in modo che lo spazio di testa sia nullo. La chiusura di ogni contenitore deve garantire perfetta tenuta del tappo. Il volume di acqua prelevato deve essere sufficiente per effettuare le analisi dei parametri da determinare.

Per quanto riguarda il trasporto dei campioni, l’adozione di adeguate tecniche di conservazione consente di ritardare o attenuare significativamente i processi chimici e biologici che continuano sul campione anche successivamente al prelievo e che potrebbero modificare le caratteristiche del campione stesso e i risultati analitici sul parametro oggetto di indagine.

Ai fini di una corretta conservazione durante il trasporto di campioni, è necessario attenersi alle seguenti regole generali:

- il trasporto dei campioni deve essere effettuato nel minor tempo possibile (dal momento del prelievo allo stoccaggio nei frigo della sede operativa/laboratorio) all’interno di contenitori termici (frigo portatili) adeguatamente attrezzati con corpi refrigeranti, evitando pertanto di esporre i campioni alla luce diretta del sole o a temperature elevate, I

corpi refrigeranti devono essere sufficientemente freddi;

- i campioni devono essere stivati correttamente in modo tale da impedire il loro rovesciamento ed evitare possibili rotture causate da eventuali manovre brusche durante il trasporto.

I campioni di acque sotterranee prelevati, devono essere necessariamente analizzati dal laboratorio entro e non oltre le 24 ore al fine di evitare qualsiasi alterazione dei contaminanti presenti.

ii. Tecniche Di Analisi Per Terreni e Acque di Falda

Acqua di falda

Per la ricerca di idrocarburi pesanti con $C > 12$ la normativa di riferimento è la ISO 9377. Il campione viene posto in una bottiglia di vetro da 1 litro e la prima fase di analisi prevede l'aggiunta di 10 ml di acido cloridrico al 19% e 50ml di soluzione contenente esano, decano e tetracontano a 900 ml di campione.

La soluzione viene lasciata in agitazione per circa 30 minuti; dopodiché, mediante l'utilizzo di un imbuto separatore, avviene la "separazione" della soluzione in due fasi.

Il campione d'acqua, dopo la separazione, viene rimesso nella bottiglia e avviene il recupero dell'esano in pallone. Il tutto viene portato quasi a secco con il Rotavapor. Questo processo avviene a circa 60/70°C.

Terminato il processo con il Rotavapor, avviene il recupero con 10ml di esano a più riprese; il campione viene fatto passare in una colonnina con Florisil per recuperare la porzione non idrocarburica.

A questo punto avviene un altro processo di recupero con esano in pallone e il composto viene portato quasi a secco, il pallone viene lavato con esano e con il ricavato si riempie una viala da 1ml.

La lettura dei risultati ottenuti avviene attraverso l'utilizzo del GC FID che restituisce un cromatogramma. Per ogni analisi viene effettuato un "bianco" al fine di ottenere uno standard

di riferimento poiché l'utilizzo di esano aumenta il rumore di fondo e ciò porterebbe ad un elevato numero di falsi positivi.

L'analisi di idrocarburi leggeri con $C < 12$ avviene seguendo le normative di riferimento EPA 5021A e 8015C.

Prima di procedere con l'analisi, avviene una fase di preparazione per il campione che prevede l'aggiunta di 10 ml di matrice (acqua e sale) al campione al fine di stabilizzare le fasi successive ed evitare che avvenga il pescaggio di acqua.

Il macchinario utilizzato è HS CG FID e il principio di analisi è lo stesso illustrato per gli idrocarburi pesanti ma, in questo caso, viene utilizzato un auto-campionamento con "spazio di testa": vengono utilizzate delle vials sigillate ermeticamente che nella porzione superiore presentano una chiusura di gomma, il macchinario fa sì che un ago penetri nella parte alta della vials e viene prelevata la porzione volatile del campione (la parte di aria, non di acqua). Nello strumento vi è un incubatore che scalda sino a 85° e al contempo agita. La porzione volatile del campione evapora nello spazio di testa e l'ago preleva proprio questa porzione.

La taratura dello strumento può essere effettuata con due composti: DRO o GRO. Sono due standard contenenti differenti miscele di idrocarburi che servono come riferimento per il macchinario.

La normativa di riferimento per l'analisi dei metalli nei campioni di acque sotterranee è la UNI EN ISO17294-2 2023, la quale prevede l'utilizzo del macchinario ICP-MS che funziona con gas Argon.

Il campione, prima di poter essere analizzato, deve essere filtrato attraverso l'utilizzo di una membrana di porosità pari a $0,45 \mu\text{m}$ e successivamente dev'essere sottoposto a acidificazione al fine di ottenere dei cationi nella fase successiva. La filtrazione precedente all'acidificazione, d'altro canto, permette di ottenere un risultato preciso e allontanare dal campione i metalli non disciolti nell'acqua.

Lo strumento è dotato di un generatore ad alta frequenza che crea un plasma ad alta energia e alta temperatura: quando il campione passa attraverso questo plasma tutti i metalli vengono ossidati generando cationi.

I cationi passano attraverso delle lenti per poi arrivare al “rilevatore di massa”. Il detector rileva i cationi (precedentemente eccitati) secondo il loro rapporto di massa/carica. Questo permette di identificare ogni metallo.

La taratura dello strumento avviene attraverso l'utilizzo di una soluzione multi elementare contenente 21 metalli, attraverso la quale si costruisce uno standard.

Il risultato viene espresso in concentrazioni e in “conteggi”, ossia il numero di particelle che arrivano al detector. Lo strumento costruisce una retta di taratura che, essendo diversa per ogni metallo, ne permette il riconoscimento.

Lo strumento necessita dell'utilizzo della stessa tipologia di matrice, per questo sia il campione sia lo standard, sono sottoposti ad acidificazione.

L'analisi dei solventi nella falda avviene secondo la normativa di riferimento UNI EN ISO 15680, 2005.

Il campione di falda dev'essere sottoposto ad analisi entro le 48h dal campionamento e prevede l'utilizzo del macchinario PURGE-TRAP accoppiato a CG Massa.

Il campionamento dell'acqua destinata all'analisi dei solventi, dev'essere effettuato in vials riempite sino all'orlo, senza lasciare nessuna bolla d'aria.

È una tecnica molto selettiva che prevede l'utilizzo di una colonna 624-SIL Ms.

La vial viene caricata nello strumento, il quale preleva l'acqua, strappa i solventi presenti con elio e questi vengono raccolti in una trappola; vengono riscaldati e in seguito assorbiti. La matrice presente nel macchinario permette alle molecole di “spacchettarsi” con un rapporto di massa/carica differente. Il riconoscimento dei solventi presenti nel campione è molto preciso e basa proprio sul rapporto m/z. Il risultato viene restituito con un cromatogramma a massa.

Lo standard permette di costruire una retta di taratura che viene utilizzata come confronto.

Terreni

Le normative di riferimento per l'analisi dei terreni sono:

- UNI EN 17503-2022 per l'analisi degli IPA;
- UN EN ISO 16703 per idrocarburi con C>12 ed EPA 8015 –5021 per C<12;

- UNI EN ISO 13657 e APAT 3020 per metalli.

Per l'analisi di IPA, PCB e idrocarburi con $C>12$ si procede in primo luogo all'essiccazione del terreno fresco, sottoponendolo ad una temperatura di 40°C . Una volta eliminata la componente umida dal terreno, attraverso frantumazione manuale con mortaio viene separata la porzione più grossolana (scheletro) dalla porzione più fine.

Dalla parte più fine del campione si pesano 15g e si è successivamente si aggiunge una soluzione 50:50 di Etanolo:Acetone.

- Per ricercare IPA aggiungono $4\mu\text{l}$ di Benzo-A-Pirene e $2\mu\text{l}$ di Naftalene;
- Per ricercare idrocarburi con $C>12$ nel campione, non si sono aggiungono surrogati.

Per ciascuno dei casi sopraindicati il campione viene sonicato per la durata di un'ora e al termine l'estratto viene filtrato in vessel con risciacquo del campione in esano.

Il campione, a questo punto, viene concentrato al Multivap 10.

- Per la ricerca di idrocarburi con $C>12$, il campione ottenuto viene purificato con 10 ml di esano e attivato con colonnina di Florisil;
- Per ricercare IPA e PCB il campione è già pronto per l'analisi e vengono riempite Vials da 2ml.

Per l'analisi di PCB, IPA e idrocarburi con $C>12$ si utilizza il gascromatografo GS-FID, il quale emette un segnale elettrico in relazione a quanto viene rilevato: il macchinario ricostruisce un grafico con i risultati ottenuti. La tipologia di idrocarburi presenti nel campione viene distinta in base al tempo in cui si presenta il picco. Viene calcolata l'area dell'intervallo interessato e si effettua una retta. Il risultato viene espresso in mg/Kg.

Per la determinazione degli idrocarburi leggeri con $C<12$ nei campioni di terreno, si applica la "tecnica dello spazio di testa automatico".

L'analisi dei terreni prevede un passaggio preventivo in cui vengono pesati 10 g di terreno a cui si aggiungono 20 ml di metanolo. Viene prelevato un estratto e trasferito in una vials da 20 ml che contiene 10 ml di acqua ricca di NaCl. La vials viene dunque chiusa ermeticamente con un tappo metallico avente un setto in silicone perforabile dall'ago dell'autocampionatore.

A questo punto la vials viene trasferita nel GC-FID, il cui meccanismo d'azione è stato illustrato nel precedente paragrafo.

L'analisi dei metalli nei campioni di terreno prevede la preparazione di una soluzione di mineralizzazione; 0,5g di campione (precedentemente setacciato e essiccato) vengono addizionati con 3 ml di H₂O₂ e il preparato viene lasciato a riposo per 5 min. circa. A ciò si aggiungono 3 ml di HNO₃ e 9 ml di HCL lasciando riposare per altri 10 minuti per poi chiudere il contenitore di scaldarlo nel forno a microonde.

A questo punto viene utilizzato un mineralizzatore seguendo un ciclo operativo che prevede tre passaggi con graduale riscaldamento e raffreddamento del campione:

1. 25°C per 10 min a 1200W
2. 180 °C per 15 min a 1200W
3. da 180 °C a 25°C per 15 min per un tempo di 45 ore

Non appena il campione si è raffreddato, viene estratto dal mineralizzatore e si procede alla filtrazione utilizzando un filtro di carta a pieghe per recuperare il liquido in un matraccio da 50 ml. Il residuo viene lavato più volte con acqua distillata e il surnatante viene trasferito nel matraccio. Viene aggiunta acqua ultra-pura per raggiungere un volume pari a 50 ml.

Per la prova in bianco, vengono eseguite le stesse modalità operative su una soluzione composta da 9 ml di HCL, 3 ml di HNO₃ e 3 ml di H₂O₂.

A questo punto il campione viene analizzato con il macchinario ICP-MS secondo le modalità descritte per le acque sotterranee.

2.2. Caratterizzazione e Analisi di rischio

Il sito oggetto dell'Analisi di Rischio sotto riportata, si colloca nell'area sud di Milano (plan. 1, fig. 7).

I proprietari dell'area, durante gli scavi per la realizzazione delle fondamenta dello stabile di futura edificazione ad uso in parte commerciale ed in parte residenziale, trovarono un serbatoio interrato che fu successivamente rimosso nel mese di dicembre 2020.

In un primo momento, durante la rimozione del predetto serbatoio, fu eseguito un controllo sulle pareti e del fondo scavo che mostrarono alcune criticità. Lo scavo fu successivamente allargato e furono prelevati nuovi campioni di terreno, i cui risultati diedero esiti positivi.

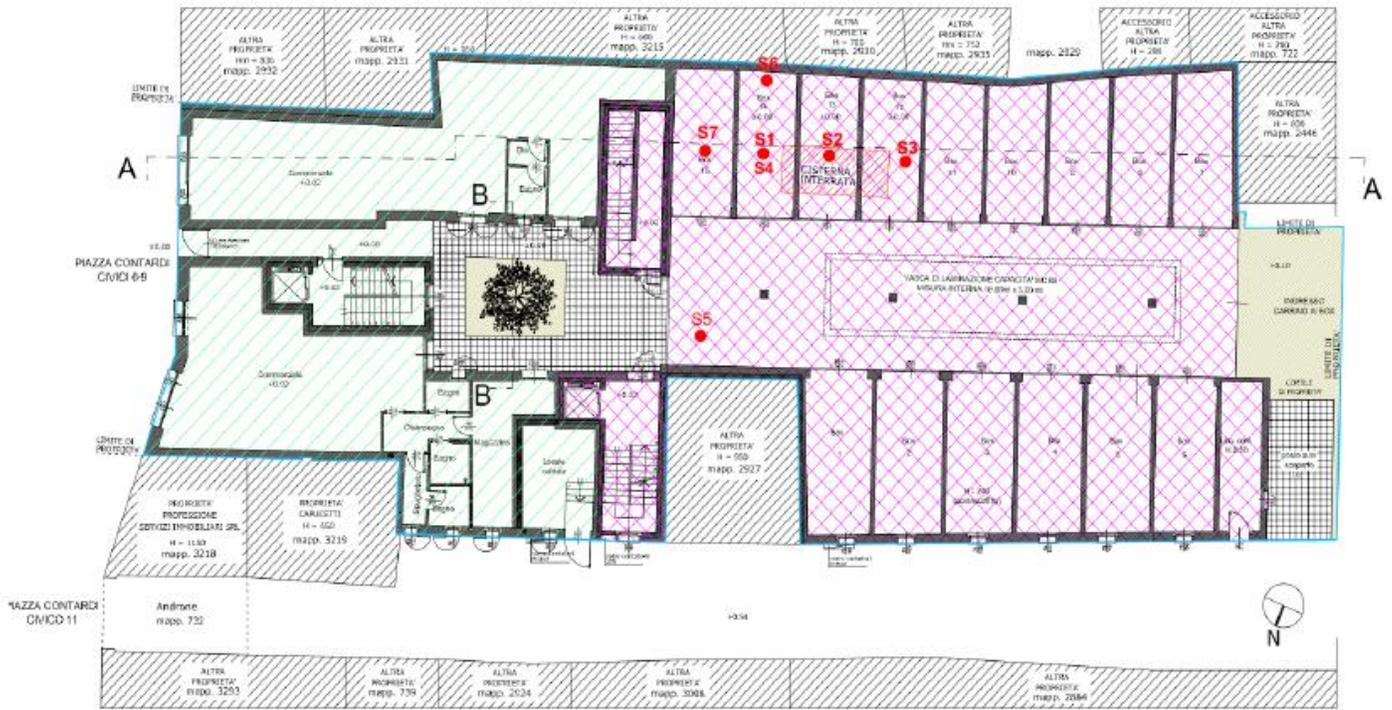
Il 2 novembre 2022 fu eseguito un collaudo in contraddittorio con ARPA, durante il quale si effettuarono 3 carotaggi manuali spinti ad una profondità di 2,5 metri dal piano campagna. Le analisi evidenziarono una contaminazione limitata alla zona ove era collocato il boccaporto di rifornimento del serbatoio.

Un'ultima indagine, in contraddittorio con ARPA, fu effettuata il 31 luglio 2023 e ha previsto 4 carotaggi manuali nell'area circostante alla contaminazione precedentemente riscontrata. Tre dei quattro sondaggi sono stati effettuati nelle aree limitrofe al punto S1 (unico risultato contaminato nella prima indagine del 2022) e si sono spinti sino ad una profondità di 2,6 metri dal p.c. e sono stati denominati S5, S6, S7. Il quarto sondaggio S4 è stato effettuato ribattendo il punto S1 e ci si è spinti sino ad una profondità di 3,7m dal piano campagna.

Il giorno 11 ottobre 2023 sono stati realizzati dei campionamenti di acque sotterranee su 3 piezometri precedentemente effettuati su indicazione di ARPA.

Il piezometro Pz1, essendo stato collocato in "prossimità" della contaminazione, non è stato realizzato con distruzione di nucleo così che la carota potesse essere prelevata e analizzata. Secondo la direzione di falda il Pz1 è da considerarsi il piezometro di monte e il Pz3 di valle.

In considerazione di quanto emerso e della situazione del sito già parzialmente edificato, si è deciso di effettuare un'Analisi di Rischio per verificare la criticità della contaminazione riscontrata.



Planimetria 1: Punti di campionamento indagine luglio 2023 e serbatoio



Figura 7. Planimetria 2: Piezometri

2.3. Risk-Net 3.1.1

Il software più utilizzato in Italia per eseguire l'AdR sito specifica è "Risk-Net ver.3.1.1 (2018)", messo a punto dall'Università di Roma Tor Vergata al fine di poter calcolare sia il rischio che gli obiettivi di bonifica relativamente alla presenza di contaminazioni in un sito. Il programma permette di applicare la Procedura APAT-ISPRA di AdR ai siti contaminati in accordo con quanto previsto dalla normativa italiana D.lgs. 152/06 (*RecoNnet, 2019*).

Risk-Net consente di applicare la procedura di Analisi di Rischio nelle modalità diretta ("Forward mode") e inversa ("Backward mode"). In particolare, è possibile scegliere se calcolare gli obiettivi di bonifica sito-specifici o stimare il rischio associato alla concentrazione rilevata in sorgente (o effettuare entrambe le analisi) tenendo conto delle seguenti considerazioni:

- "Calcolo Obiettivi di Bonifica". Calcolo delle concentrazioni massime ammissibili in sorgente compatibili con il livello di rischio e indice di pericolo accettabile. Tale calcolo viene effettuato mediante tre passaggi sequenziali:
 1. Calcolo delle Concentrazioni Soglia di Rischio (CSR) individuali (singola sostanza) applicando la procedura AdR in modalità inversa (backward mode);
 2. Verifica del rischio cumulativo legato alla presenza di più sostanze. In questa fase Risk-net calcola il rischio individuale associato alla CSR individuale di ciascun contaminante e il rischio complessivo (sommatoria dei singoli rischi individuali);
 3. Infine, l'utente deve ridurre iterativamente le diverse CSR fino a che il rischio totale (ovvero la somma dei rischi delle singole CSR) sia pari o inferiore al valore limite. I valori di CSR che rispettano i valori limite accettabili (individuali e cumulativi) costituiscono gli obiettivi di bonifica del sito in esame.
- "Calcolo Rischio". Calcolo del rischio associato alla Concentrazione Rappresentativa alla Sorgente (CRS) definita dall'utente. Anche in questo caso viene calcolato sia il rischio individuale (singola sostanza) che quello cumulativo (sommatoria dei rischi associati ai diversi contaminanti riscontrati nel sito). I valori ottenuti devono essere confrontati con i criteri di accettabilità individuali e cumulativi del rischio sanitario, al fine di valutare se esistono o meno condizioni in grado di causare effetti sanitari nocivi.

In generale si effettuano i calcoli in entrambe le modalità di analisi.

Si precisa che la prassi abituale di svolgimento di Analisi di rischio prevede la verifica allo scenario attuale ed a quello definitivo. Qualora allo scenario attuale fossero evidenziati rischi non risolti allo scenario definitivo per rimozione di parte della sorgente o confinamento della sorgente tramite opere edilizie, quest'ultimo dovrà prevedere modalità operative di taglio dei percorsi di esposizione che si configureranno come opere di messa in sicurezza permanente nonché vincolo rispetto a modifiche dello scenario per il quale è stata sviluppata l'Analisi di Rischio.

Nel caso in oggetto lo scenario attuale e quello futuro sono di fatto coincidenti, poiché l'area è già costruita e riqualificata, e pertanto l'Analisi di Rischio è stata sviluppata esclusivamente per lo scenario definitivo.

2.3.1. Accettabilità e Opzioni di calcolo

Per il calcolo degli obiettivi di bonifica sito-specifici è necessario definire il livello accettabile di rischio, R, per le sostanze cancerogene e l'indice di pericolo, HI, per le sostanze non cancerogene.

A tale proposito vengono sempre mantenuti i dati di default forniti dal software riferiti ai valori limite definiti dalla normativa vigente (D.Lgs 152/06 e D.Lgs 04/08) e pari a $R=10^{-6}$ e $HI=1$ per la singola sostanza e $R=10^{-5}$ e $HI=1$ per gli effetti cumulati legati alla presenza di più sostanze.

Vengono mantenute le equazioni e i criteri di calcolo definiti nelle linee guida APAT-ISPRA (2008) come impostazioni di base (default) implementate dal software.

2.4. INPUT

2.4.1. Modello concettuale

In questa prima fase di AdR avviene la così detta “modellizzazione” del sito in oggetto che consiste nel riprodurre in maniera semplicistica e secondo schemi matematici la complessa geometria degli areali presenti mondo reale attraverso l'inserimento nel software dei dati sito-

specifici. In accordo con quanto previsto dalle linee guida APAT-ISPRA (2008), vengono considerate in maniera distinta le seguenti sorgenti secondarie:

- suolo superficiale (da 0 a 1 m dal piano campagna);
- suolo profondo (oltre 1 m dal piano campagna);
- falda (zona satura).

Nella definizione del modello concettuale, in relazione alla sorgente di contaminazione (Suolo profondo, Suolo superficiale e Falda), Risk-Net 3.1.1 consente di attivare diversi percorsi di migrazione sia on-site che off-site.

Il software permette inoltre di attivare una caratterizzazione integrativa particolarmente importante per la lisciviazione in falda (fig. 8), qualora il materiale di riporto (MdR) sottoposto a test di cessione mostri una non conformità rispetto ai limiti previsti dalle normative o le CSC superino i limiti indicati in Tabella 1, Allegato 5. Difatti, come riportato dal manuale SNPA relativo all'applicazione della AdR sulle matrici di materiale di riporto, “la valutazione del percorso di lisciviazione in falda è prevista qualora siano state riscontrate eccedenze delle CSC nei MdR o valutazione non favorevole del test di cessione/linee di evidenza” (SNPA – 2023).



Figura 8: Schermata Risk-Net 3.1.1 caratterizzazione sito

Per l'areale oggetto di studio, sono stati considerati i dati di contaminazione relativi solo al suolo profondo in quanto la contaminazione riscontrata interessa solo tale spessore, posto tra -2,20 m e -2,90 m dal pavimento del cortile interno.

In riferimento al dato di contaminazione ed allo scenario definitivo previsto per il sito (area coperta con presenza di soletta di 20 cm e platea di spessore di 40 cm), sono stati attivati i seguenti percorsi:

- suolo profondo: inalazione vapori Indoor On-site. Pur non essendoci presenza di aree scoperte a stretto contatto con l'areale contaminato, in via cautelativa essendo lo stabile inserito in ambito urbano, è stato attivato anche il percorso outdoor:
- suolo profondo: inalazione vapori Outdoor On-site e Off-site. Il percorso di lisciviazione non è stato attivato in quanto l'areale contaminato è caratterizzato dalla presenza di pavimentazione e copertura (area box). Le uniche due aree filtranti presenti nel sito sono posizionate, come si può rilevare dalla planimetria riportata nella Tavola 3, in zone non coincidenti con l'areale contaminato.

Infine, dalla falda non è stata considerata nessuna via di esposizione in quanto le analisi non hanno evidenziato contaminazioni.

Nella sezione di Risknet sopra descritta sono stati utilizzati interamente dati sito specifici.

2.4.2. Recettori

Sulla base del modello concettuale, vengono successivamente inseriti all'interno del software i bersagli che saranno esposti alle contaminazioni e per i quali si vuole calcolare il rischio per la salute umana: in questo caso Risk-Net prevede l'inserimento di differenti recettori (fig. 9) a seconda della destinazione d'uso del sito in oggetto:

- “Adulti e Bambini” per uso residenziale e ricreativo;
- “Lavoratori” per uso industriale e commerciale;
- “Protezione per la risorsa idrica”.

Per l'area di interesse, nonostante il piano terra dell'edificio manterrà una destinazione terziario-commerciale, in considerazione dei piani superiori a destinazione residenziale, in via cautelativa è stato designato come possibile recettore On-site ed Off-site della contaminazione il parametro

“Adjusted” che tiene conto anche della presenza di bambini (Ambito Residenziale o Ricreativo) mantenendo i dati di default forniti dal software relativamente ai parametri di esposti.

Recettori

on-site

Recettori on-site Help

Residenziale / Ricreativo

Industriale / Commerciale

Protezione Risorsa Idrica

- Adulti e Bambini (Adjusted)
- Per sostanze tossiche considera recettore più critico
- Adulti, Bambini, Adolescenti e Anziani
- Adulti
- Bambini
- Lavoratori

- Rispetto dei limiti tabellari (CSC) al POC
- Calcolo Rischio Ingestione di acqua

Figura 9: Schermata Risk-Net 3.1.1 per inserimento recettori in fase di Analisi di Rischio

2.4.3. Contaminanti e concentrazioni rappresentative alla sorgente (CRS)

A questo punto, Risk-Net prevede l’inserimento dei contaminanti riscontrati nei campioni e la rispettiva concentrazione. La tipologia di contaminante, come detto in precedenza, è importante ai fini della valutazione della sua persistenza nell’ambiente, tossicità, mobilità, ecc.

Le caratteristiche descritte sono catalogate nel database INAIL inserito nel software. Nel caso di descrizioni degli inquinanti più approfondite è possibile modificare il database. Per questo lavoro è stato utilizzato il database di default.

La sorgente di contaminazione è descritta inserendo come “**concentrazioni rappresentative alla sorgente (CRS)**” i valori di massima contaminazione riscontrati nel sito rispettivamente per il suolo superficiale e profondo.

I dati di input considerati per il modello sono:

idrocarburi C<12	627,7 mg/kg
idrocarburi C>12	4218 mg/kg

Per gli idrocarburi il software chiede l'inserimento delle diverse frazioni idrocarburiche che possono pesare in modo differente in termini di rischio di inalazione e rischio di lisciviazione in falda. Pertanto, si procede con la speciazione degli idrocarburi mediante la determinazione delle citate frazioni sul campione con la concentrazione maggiore riscontrata. Nel modello concettuale sono stati inseriti i contaminanti della speciazione del laboratorio di parte ricalcolati sui campioni più contaminati (tab. 4).

In questo caso, il laboratorio Arpa non ha eseguito la speciazione. Per il calcolo delle percentuali di speciazione è stato utilizzato il RdP del campione prelevato del punto S1.

Gli esiti sono riportati di seguito:

Alifatici C9-C12	82,8%	mg/kg 519,156
Aromatici C11-C12	9,2%	mg/kg 57,684
Aromatici C9-C10	8,0%	mg/kg 50,16
Alifatici C13-C18	45%	mg/kg 1898,1
Alifatici C19-C36	55%	mg/kg 2319,9

Tabella 4: Speciazione Idrocarburi C<12 e C>12

Ai fini dell'applicazione dell'Analisi di rischio sono stati ricercati inoltre i seguenti parametri sito-specifici: FOC, Kd.

2.4.4. Caratteristiche del sito

In riferimento all'inquinante riscontrato e alle caratteristiche del sito, al fine di poter determinare accuratamente il rischio e l'impatto ambientale legato alla contaminazione presente, è

importante considerare alcune peculiarità dell'areale oggetto di studio. Nella "geometria delle sorgenti" proposte dal software troviamo per esempio:

- Estensione della sorgente nella direzione del flusso di falda;
- Estensione della sorgente nella direzione ortogonale al flusso di falda;
- Altezza della zona di miscelazione in aria;
- Estensione della sorgente nella direzione principale del vento;
- Profondità del top della sorgente nel suolo superficiale rispetto al p.c.;
- Spessore della sorgente nel suolo superficiale insaturo;
- Profondità del top della sorgente nel suolo profondo rispetto al p.c.;
- Spessore della sorgente nel suolo profondo insaturo;
- Soggiacenza della falda da p.c.".

Inoltre, vi sono altri parametri specifici che fanno riferimento alla zona insatura, alla zona satura, outdoor e indoor. Di particolare rilievo è la "Frazione areale di fratture outdoor" poiché influenza largamente il rischio di lisciviazione in falda nei casi in cui la contaminazione sia stata riscontrata esclusivamente nella zona insatura sia superficiale che profondo (*RecoNnet - 2019*).

È importante precisare che, in fase di caratterizzazione, quando non si dispongono i parametri sito-specifici vengono usati dati di default riferiti alla zona di interesse. In questi casi l'Analisi di Rischio può dare risultati sovrastimati o sottostimati rispetto alla reale condizione. Per quanto riguarda le caratteristiche della zona insatura nell'area di Milano, viene generalmente utilizzato il parametro di default "Sand", utilizzato anche per l'areale in esame.

Sorgente di contaminazione in direzione del vento

Per la ventosità si è fatto riferimento a quelli della serie storica decennale di ARPA:

- Velocità del vento pari a 9,9 m/s (velocità massima registrata nel periodo decennale dal 01 gennaio 2013 al 01 gennaio 2023, id sensore 11648).
- Direzione media 177,444813° (Media della direzione del vento registrata nel periodo decennale dal 01 gennaio 2013 al 01 gennaio 2023, id sensore 11834).

L'estensione massima della contaminazione in direzione del vento è stata calcolata pari a 6,29 metri e la distanza ortogonale nella direzione del vento pari a 1,83 metri.

Sorgente di contaminazione in direzione del flusso di falda

Per quanto riguarda le caratteristiche della falda, si fa riferimento sia ai dati di letteratura (in particolare nei sistemi informativi della Provincia e della Regione) sia alla carta idrogeologica realizzata per lo studio geologica supporto del PGT.

Dai dati bibliografici consultati per la caratterizzazione dell'area, si evince una direzione di falda nord-nord-est / sud-sud-ovest, con una soggiacenza intorno a 10 m dal piano campagna; tuttavia, durante il campionamento delle acque sotterranea avvenute nel mese di ottobre del 2023 è stata registrata una soggiacenza intorno ai 3 metri dal piano campagna.

Parametri Indoor

Nella sezione “parametri indoor” delle caratteristiche del sito sono stati opportunamente inseriti i particolari costruttivi dell'edificio (fig.10). Per tutti i restanti dati dell'ambiente indoor vengono mantenuti quelli di default.

Geometria Sorgenti		Zona Insatura		Outdoor		Indoor	
Indoor							
★ Default							
📄 Copia tabella							
🔗 Help							
Descrizione			Valore				
Parametro	Simbolo	Default	Sito-Specifico	UM	check		
Caratteristiche edificio on-site							
Profondità delle fondazioni da p.c.	Z crack	0.15	1,2	m	✓		
Spessore delle fondazioni	L crack	0.15	1,2	m	✓		
Frazione areale di fratture indoor	η	0.01	0,01	m ² /m ²	✓		
Rapporto tra volume indoor ed area di infiltrazione	Lb	2	2	m	✓		
Contenuto volumetrico di acqua nelle fondazioni	$\theta_w, crack$	0.12	0,12	-	✓		
Contenuto volumetrico di aria nelle fondazioni	$\theta_a, crack$	0.26	0,26	-	✓		
Tasso di ricambio di aria indoor	ER	0.00014	0,00014	1/s	✓		
Differenza di pressione tra outdoor e indoor	Δp	0	0	g/cm/s ²	no check		
Flusso convettivo entrante nell'edificio	<input type="checkbox"/> Inserisci valore sito-specifico						
Superficie totale coinvolta nell'infiltrazione	Ab	70	70	m ²	✓		
Permeabilità del suolo al flusso di vapore*	Kv	1e-12	1e-12	m ²	✓		
Perimetro delle fondazioni/muri	x crack	34	34	m	✓		
Viscosità del vapore	μ_{air}	0.000181	0,000181	g/cm/s	✓		
Flusso convettivo entrante nell'edificio	Qs	Calcolato	0.00e+0	L/min	✓		
Profondità della zona aerobica dalle fondazioni	La Indoor	1	1	m	✓		

* Le linee guida ISPRA suggeriscono di usare dei dati di Kv tra 1E-10 m² e 1E-11 m² per le sabbie medie, tra 1E-11 m² e 1E-12 m² per le sabbie fini, tra 1E-12 m² e 1E-13 m² per i limi e tra 1E-13 m² e 1E-14 m² per le argille.

Figura 10: Schermata Risk-Net con caratteristiche Indoor del sito in studio

2.5. OUTPUT

2.5.1. Rischio

Dopo aver inserito tutti i dati sito specifici descrittivi del sito e le massime concentrazioni alla sorgente, Risk-Net restituisce il così detto “Rischio” relativo alla presenza di contaminanti.

“In generale, porre il rischio per la salute umana pari a 10^{-6} significa che il rischio incrementale di contrarre il tumore è per 1 individuo su 1.000.000. Se il rischio per la salute umana è uguale o inferiore alla soglia di 10^{-6} lo stesso viene considerato “accettabile” (APAT - 2008).

Come proposto da ISS e riportato nel D.lgs. 04/08, i valori di rischio considerati tollerabili per le sostanze cancerogene sono:

- *sostanze cancerogene: $TR = 10^{-6}$ (valore di rischio individuale)*
- *sostanze cancerogene $TRCUM = 10^{-5}$ (valore di rischio cumulativo)*

L’Indice di Pericolo rappresenta invece un indicatore che esprime di quanto l’esposizione reale alla sostanza supera la dose tollerabile o di riferimento (TDI o RfD). Quindi, il criterio di accettabilità riferito a specie chimiche contaminanti che comportano effetti tossici sulla salute umana, si traduce nell’imporre il non superamento della dose di contaminante effettivamente assunta rispetto alla TDI o RfD, da cui ne consegue che sia nel caso di Indice di Pericolo individuale (HQ) che cumulativo (HQ_{TOT}) gli stessi devono essere inferiori all’unità.

2.5.2. CSR (Concentrazione Soglia di Rischio)

Come precedentemente introdotto, l’applicazione della procedura di analisi assoluta di rischio, secondo la modalità inversa (backward mode), permette il calcolo degli obiettivi di bonifica sito specifici per ogni specie chimica contaminante e per ciascuna sorgente di contaminazione, nonché il valore di concentrazione massimo ammissibile, in corrispondenza ad ogni sorgente secondaria di contaminazione (Concentrazione Soglia di Rischio, CSR), compatibile con il livello di rischio ritenuto tollerabile per il recettore esposto.

Il calcolo della Concentrazione Soglia di Rischio (CSR) viene svolto mediante l’applicazione dell’analisi assoluta di rischio in modalità inversa, utilizzando le stesse equazioni applicate per

il calcolo del rischio. La CSR viene calcolata in funzione della sorgente di contaminazione e del bersaglio considerato. Ai fini del calcolo è necessario stabilire: l'esposizione accettabile, la concentrazione nel punto di esposizione e quindi la concentrazione in sorgente. La procedura seguita dal software può essere sintetizzata e suddivisa in tre step successivi:

- *1° STEP: Calcolo dell'esposizione accettabile;*
- *2° STEP: Calcolo della concentrazione nel punto d'esposizione,*
- *3° STEP: Calcolo degli obiettivi di bonifica sito-specifici.*

3. Risultati

Si riportano di seguito gli esiti delle analisi effettuate sulle matrici ambientali (tab. 5, 6 e 7).

In tabella 4 sono riportati i risultati della speciazione effettuata dal laboratorio.

		S1 (1,2-2,2)	S1 (2,2-2,9)	S2 (1,2-2,9)	S2 (2,2-2,9)	S3 (1,2-2,2)	S3 (2,2-2,9)
Benzo(a)antracene	mg/kg	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05
Benzo(a)pirene	mg/kg	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05
Benzo(b)fluorantene	mg/kg	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05
Benzo(k)fluorantene	mg/kg	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05
Benzo(g,h,i)perilene	mg/kg	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05
Crisene	mg/kg	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
Dibenzo(a,e)pirene	mg/kg	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05
Dibenzo(a,l)pirene	mg/kg	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05
Dibenzo(a,i)pirene	mg/kg	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05
Dibenzo(a,h)pirene	mg/kg	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05
Dibenzo(a,h)antracene	mg/kg	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05
Indeno(1,2,3-c,d)pirene	mg/kg	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05
Pirene	mg/kg	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
Sommatoria policiclici aromatici da 25 a 34	mg/kg	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
Idrocarburi leggeri (C≤12)	mg/kg	2	26	< 1	< 1	< 1	< 5
Idrocarburi pesanti (C>12)	mg/kg	< 25	590	24	< 25	< 25	< 25

Tabella 5: Risultati analisi prima indagine, novembre 2022

		S4 (2,7-3,7)	S5 (1,2-2,0)	S5 (2,0-2,6)	S6 (1,2-2,0)	S6 (2,0-2,6)	S7 (1,0-2,0)	S7 (2,0-2,6)
Benzo(a)antracene	mg/kg	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05
Benzo(a)pirene	mg/kg	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05
Benzo(b)fluorantene	mg/kg	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05
Benzo(k)fluorantene	mg/kg	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05
Benzo(g,h,i)perilene	mg/kg	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05
Crisene	mg/kg	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1
Dibenzo(a,e)pirene	mg/kg	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05
Dibenzo(a,l)pirene	mg/kg	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05
Dibenzo(a,i)pirene	mg/kg	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05
Dibenzo(a,h)pirene	mg/kg	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05
Dibenzo(a,h)antracene	mg/kg	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05
Indeno(1,2,3-c,d)pirene	mg/kg	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05
Pirene	mg/kg	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1
Sommatoria policiclici aromatici da 25 a 34	mg/kg	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1
Idrocarburi leggeri (C≤12)	mg/kg	7	<5	<5	<5	<5	<5	<5
Idrocarburi pesanti (C>12)	mg/kg	681	43	24	<5	4218	15	15

Tabella 6: Risultati analisi seconda indagine, agosto 2023

		PZ1	PZ2	PZ3
Idrocarburi Totali	µg/l	< 35	< 35	< 35
Sommatoria Idrocarburi totali, come n-esano	µg/l	< 35	< 35	< 35

Tabella 7: Risultati analisi seconda indagine, agosto 2023

Per i contaminanti in esame il software restituisce CSR (tab. 8) decisamente più elevate delle CSC.

Il valore di CSR calcolato dal Software risulta:

CSR per il Suolo Profondo							
Contaminante	CRS	Csat	Cres	CSC	CSR (HH)	CSR (GW)	CSR
	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg
Alifatici C9-C12	<u>5.19e+2</u>	6.81e+1	6.81e+1	1.00e+1	1272.4	4869.9	1272.4
Aromatici C11-C12	5.77e+1	2.90e+2	2.90e+2	1.00e+1	3133.6	<u>35.77</u>	35.77
Aromatici C9-C10	5.02e+1	9.13e+2	9.13e+2	1.00e+1	87.38	<u>12.80</u>	12.80
Alifatici C13-C18	<u>1.90e+3</u>	6.81e+1	6.81e+1	5.00e+1	-	4869.9	4869.9
Alifatici C19-C36	<u>2.32e+3</u>	5.97e+0	5.97e+0	5.00e+1	-	>1e+6	>1e+6

Tabella 7: CSR calcolate da Risk-Net 3.1.1

Come riportato nel manuale APAT-ISPRA (2008) “*in relazione al calcolo delle CSR per suolo superficiale e suolo profondo, va rilevato che l’eventualità in cui la concentrazione del contaminante riscontrata nel suolo risulti maggiore rispetto alla concentrazione di saturazione (Csat)*”.

In questa situazione, raggiunta la concentrazione di saturazione (Csat), inizia a formarsi la fase libera di soluto poiché questo raggiunge la solubilità in acqua e la tensione di vapore.

Risulta dunque impossibile calcolare una CSR poiché il contaminante si rivela poco mobile e quindi le concentrazioni nel “soil-gas” o nell’eluato sono inferiori a quelle che determinano un rischio.

Inoltre, è bene evidenziare che, attivando le Csat (Concentrazione di saturazione nel suolo) in Risk-Net, le CSR risultano superiori alle concentrazioni di saturazione della singola sostanza.

Poiché il software, in questo caso, non definisce una CSR, l’Analisi di Rischio è stata verificata anche secondo le indicazioni del parere del MATTM del 19 febbraio 2015, non tenendo conto del raggiungimento delle concentrazioni di saturazione. Inserendo i fattori di correzione riportati in tabella 6 le CSR calcolate non determinano rischio per singola sostanza né rischio cumulato.

Rischio da Suolo Profondo								
Contaminante	CRS	f	CRS/f	Csat	Cres	R (HH)	HI (HH)	Rgw (GW)
	mg/kg	-	mg/kg	mg/kg	mg/kg	-	-	-
Alifatici C9-C12	<u>5.19e+2</u>	5	<u>1.04e+2</u>	6.81e+1	6.81e+1	-	8.16e-2	2.13e-2
Aromatici C11-C12	5.77e+1	5	1.15e+1	2.90e+2	2.90e+2	-	3.68e-3	3.23e-1
Aromatici C9-C10	5.02e+1	5	1.00e+1	9.13e+2	9.13e+2	-	1.15e-1	7.84e-1
Alifatici C13-C18	<u>1.90e+3</u>	5	<u>3.80e+2</u>	6.81e+1	6.81e+1	-	-	7.80e-2
Alifatici C19-C36	<u>2.32e+3</u>	5	<u>4.64e+2</u>	5.97e+0	5.97e+0	-	-	1.63e-4
Cumulato Outdoor (On-site)						-	8.75e-3	
Cumulato Indoor (On-site)						-	2.00e-1	
Rischio per la risorsa idrica per gli idrocarburi - MADEP								<u>1.21e+0</u>
Cumulato Outdoor (Off-site)						-	8.75e-3	
Rischio per la risorsa idrica per gli idrocarburi - MADEP (Off-site)								-

Tabella 8: Rischio calcolato da Risk-Net 3.1.1 per suolo profondo

Si ritiene però, sempre in linea con le indicazioni del parere del MATTM del 19 febbraio 2015, di proporre le CSR pari alle Cmax che sono state quindi verificate dal software anche con metodo diretto.

Dalla valutazione dei contenuti del documento di Analisi di Rischio per il sito in oggetto, si evidenzia un rischio per la falda a carico di una frazione idrocarburica particolarmente solubile.

In realtà, come avviene in molti casi, l'analisi diretta delle acque sotterranee non ha confermato questa criticità. È stato quindi proposto un piano di monitoraggio biennale della falda con cadenza semestrale per confermare l'evidenza scientifica di assenza di apporto di contaminanti alla falda da parte del sito.

I risultati ottenuti con l'Analisi di Rischio sopra descritta hanno suggerito di porre a confronto altre situazioni trattate con AdR.

Si riportano di seguito i dati riepilogativi di sette siti, di cui non si riportano i nomi per motivi di riservatezza richiesti dai clienti ma vengono assegnati dei codici identificativi.

Tutti i siti sotto riportati presentano caratteristiche differenti in termini di estensione dell'area, di estensione dell'areale contaminato, della tipologia di inquinanti, stato dell'area, della profondità di falda, della destinazione d'uso ma accomunati dall'esito dell'AdR rispetto al rischio per la falda:

Codice area	1
Superficie	9.737 m ²
Destinazione d'uso attuale	industriale
Destinazione d'uso futura	residenziale
Uso pregresso	deposito combustibili
Contaminanti	arsenico, benzo(a)pirene, benzo(b)fluorantene, benzo(g,h,i)perilene, indenopirene
Estensione areale contaminazione	8.506 m ²
Stato area	pavimentata non coperta
Profondità contaminazione	8 m
Soggiacenza falda	8,5 m
Piezometri	3
Non conformità per colonna	B
Rischio lisciviazione da AdR scenario CI	si , con percorso lisciviazione aperto e frazione areale di fratture outdoor 0,1
Stato falda	non contaminata

Codice area	2
Superficie	54 m ²
Destinazione d'uso attuale	industriale
Destinazione d'uso futura	industriale
Uso pregresso	produzione e commercializzazione di barre in acciaio cromate, tubi di acciaio alesati, rullati o levigati
Contaminanti	cromo totale
Estensione areale contaminazione	20 m ²
Stato area	pavimentata non coperta
Profondità contaminazione	4,5 m
Soggiacenza falda	5,5 m
Piezometri	3
Non conformità per colonna	B
Rischio lisciviazione da AdR scenario CI	no
Rischio lisciviazione da AdR scenario VR	si
Stato falda	non contaminata

Codice area	3
Superficie	9.800 m ²
Destinazione d'uso attuale	industriale
Destinazione d'uso futura	industriale
Uso pregresso	stabilimento chimico
Contaminanti	piombo, idrocarburi c>12
Estensione areale contaminazione	5.100 m ²
Stato area	dismessa con pavimentazione incompleta
Profondità contaminazione	2 m
Soggiacenza falda	5 m
Piezometri	3
Non conformità per colonna	B
Rischio lisciviazione da AdR scenario CI	si
Stato falda	non contaminata

Codice area	4
Superficie	40.000 m ²
Destinazione d'uso attuale	industriale
Destinazione d'uso futura	industriale
Uso pregresso	industria chimica
Contaminanti	antimonio, arsenico, cadmio, cobalto, mercurio, rame, piombo, selenio, tallio, vanadio zinco, idrocarburi con c<12, idrocarburi con c>12, benzo(a)pirene, benzo(ghi)perilene, diclorometano, alaclor
Estensione areale contaminazione	1890 m ²
Stato area	dismessa con pavimentazione filtrante
Profondità contaminazione	8 m
Soggiacenza falda	15 m
Piezometri	2
Non conformità per colonna	B
Rischio lisciviazione da AdR scenario CI	si
Stato falda	non contaminata

Codice area	5
Superficie	16.090 m ²
Destinazione d'uso attuale	industriale
Destinazione d'uso futura	commerciale-industriale
Uso pregresso	meccanica
Contaminanti	rame, cromo totale, idrocarburi c>12
Estensione areale contaminazione	7000 m ²
Stato area	dismessa, in parte coperta, parte esterna con pavimentazione incompleta
Profondità contaminazione	4 m
Soggiacenza falda	9,6 m
Piezometri	4
Non conformità per colonna	B
Rischio lisciviazione da AdR scenario CI	sì
Stato falda	non contaminata

Codice area	6
Superficie	22.000 m ²
Destinazione d'uso attuale	industriale
Destinazione d'uso futura	industriale
Uso pregresso	metallurgica
Contaminanti	rame, idrocarburi c>12, piombo, diossine, triclorobenzene
Estensione areale contaminazione	18.000 m ²
Stato area	dismessa, in parte coperta, porzione esterna con pavimentazione incompleta
Profondità contaminazione	8 m
Soggiacenza falda	25 m
Piezometri	7
Non conformità per colonna	B
Rischio lisciviazione da AdR scenario CI	sì
Stato falda	non contaminata

Codice area	7
Superficie	6000 m ²
Destinazione d'uso attuale	industriale
Destinazione d'uso futura	industriale
Uso pregresso	distribuzione carburante
Contaminanti	arsenico e mercurio
Estensione areale contaminazione	2000 m ²
Stato area	dismessa, con pavimentazione filtrante
Profondità contaminazione	1 m
Soggiacenza falda	5,5 m
Piezometri	4 m
Non conformità per colonna	B
Rischio lisciviazione da AdR scenario CI	sì
Stato falda	non contaminata

Dall'osservazione dei dati riassunti nelle precedenti schede, per tutti i siti esaminati con Risknet 3.1.1, si evidenzia un primo elemento degno di attenzione: lo strumento di valutazione utilizzato indica in effetti una criticità per la falda che, in assenza di verifica diretta, porterebbe ad interventi di rimozione della sorgente di contaminazione o all'applicazione di misure di contenimento.

Tuttavia, la verifica diretta della qualità della falda ha mostrato per tutti i siti esaminati, così come per quello oggetto di studio, assenza di contaminazione rendendo sovradimensionati gli interventi di contenimento.

Inoltre, lo studio degli esiti delle diverse Analisi di Rischio ha fatto scaturire l'idea di condurre un'ulteriore verifica e, a tal fine, per tutti gli otto siti è stata effettuata la medesima simulazione: le CRS superiori alle CSC di Col.B sono state abbassate ad un valore di poco inferiore al limite indicato, come se la contaminazione del sito fosse esclusivamente riferita alla Col.A; i dati generali e sito specifici sono stati mantenuti invariati.

Sono state dunque aggiornate le AdR con i nuovi dati di input.

Solo in un caso su otto (area con codice 2) non si rileva il rischio per la falda: questo attesta che se per gli altri sette siti lo scenario definitivo fosse stato CI e non ci fossero stati superamenti della Col.B, non si evidenzerebbe il rischio per la risorsa idrica e questa non sarebbe oggetto di analisi diretta.

4. Discussione

L'inquinamento ambientale, qualunque sia la causa, può provocare ingenti danni sia all'ecosistema che alla salute umana. Risulta dunque di rilevanza fondamentale poter agire al fine di limitare e/o rimuovere tali degradazioni. A monte di queste soluzioni però è fondamentale avere uno strumento efficace e completo di valutazione delle criticità.

L'applicazione dell'Ecological Risk Assessment (ERA) è un processo basilare nella valutazione della probabilità di effetti ecologici avversi in seguito all'esposizione a fenomeni potenzialmente dannosi. L'ERA si configura come una procedura preziosa per fronteggiare e definire al meglio le strategie per la bonifica dei siti che risultano contaminati (*Wiley, 2023*).

L'ERA non si deve configurare come un mero strumento residuale da utilizzare nei casi in cui le operazioni di bonifica di siti contaminati siano tecnicamente impraticabili e/o economicamente insostenibili. Deve invece essere utilizzata come strumento di screening per determinare l'effettivo rischio associato alle contaminazioni presenti e al contempo come mezzo per delineare le azioni da intraprendere evitando di effettuare interventi invasivi che potrebbero arrecare ulteriori danni al comparto ambientale.

La valutazione dello stato di falda è un processo fondamentale per stabilire le condizioni della stessa e l'eventuale esigenza di un intervento correttivo, qualora questa manifesti contaminazioni.

Come precedentemente spiegato, questa valutazione avviene successivamente ad una non conformità della matrice insatura rispetto alle CSC rispetto alla Colonna B della tabella (destinazione d'uso) e quando l'applicazione dell'Analisi di Rischio sito specifica evidenzia rischio di lisciviazione.

La subordinazione dell'indagine sulle acque sotterranee dipende dal fatto che le caratteristiche chimico-fisiche dei contaminanti presenti nel terreno sovrastante influiscono sulla "mobilità" degli stessi e dunque, per i contaminanti maggiormente mobili corrisponde una maggiore probabilità che questi passino dalla matrice insatura a quella satura (*RecoNnet, Enciclopedia degli idrocarburi, 2007*).

Nel presente lavoro si è voluto porre l'attenzione proprio sul processo di valutazione dello stato della falda passando in rassegna alcune analisi di rischio svolte nella città metropolitana di Milano.

Tutte le Analisi di Rischio riportate sono state svolte attraverso l'utilizzo del software Risk-Net 3.1.1.

I software disponibili per l'applicazione dell'Analisi di Rischio sono:

- RISC 5.0 (Risk-Integrated Software for Cleanups), sviluppato in USA nel 2011;
- RBCA Tool Kit for Chemical Releases 2.5 (Risk Based Corrective Action), sviluppato in USA nel 2009;
- GIUDITTA 3.2 (Gestione Informatizzata Di Tollerabilità Ambientale), sviluppato nella zona Milanese nel 2008;
- RACHEL 1.1.5 (Risk Analysis Calculation Handbook for Environmental and Living-beings), sviluppato dal Politecnico di Torino nel 2012;
- RISK-NET 3.1.1 sviluppato nel 2012 da Università degli Studi di Roma Tor Vergata nel 2012.

Da uno studio riportato da ISPRA nel 2019 *“Utilizzo dei software per l'analisi di rischio sito-specifica dei siti contaminati”* in cui sono stati messi a confronto i programmi che permettono l'applicazione dell'AdR, emerge quanto segue:

- Tutti i software oggetto di studio permettono di svolgere una Analisi di Rischio sito specifica applicando le normative vigenti.
- Tutti i software applicano le linee guida MATTM del 2014. Tuttavia, RISK-NET e RBCA Tool Kit presentano delle limitazioni rispetto alle Csat, per cui bisogna fare attenzione e inserire manualmente l'inclusione delle stesse.
- Per la valutazione del rischio correlato alla presenza di “aeriformi nei siti contaminati”, (ISPRA, 2019) è consigliabile l'utilizzo del software ROME Plus, messo a punto da SNPA.
- Per la valutazione del rischio riferito ad acque e terreni, si consiglia l'utilizzo di programmi che presentano *“grado di attinenza ALTO”* (ISPRA, 2019) rispetto alla Tabella 7 sotto riportata.

Alla luce di questo studio, emerge che il software RISK-NET 3.1.1 si profila come un programma valido e idoneo alla valutazione del rischio correlato alla presenza di contaminanti nel comparto ambientale. Si vuole inoltre sottolineare che gli enti stessi nella città metropolitana di Milano richiedono l'utilizzo di questo programma nell'applicazione della Analisi di Rischio sito specifica. Per tali motivi si è scelto di utilizzare il software RISK-NET 3.1.1 per condurre questo studio.

Scenario residenziale	ROME 2.1	GIUDITTA 3.2	RBCA Tool Kit 2.6	RISC 5.0	RACHEL 1.1.5	RISK-NET 3.1
<i>Recettori considerati</i>	ALTA	ALTA	ALTA	ALTA	ALTA	ALTA
<i>Valutazione esposizione effetti tossici</i>	ALTA	ALTA	ALTA	ALTA	ALTA	ALTA
<i>Valutazione esposizione effetti cancerogeni</i>	ALTA	ALTA	MEDIA	ALTA	ALTA	ALTA
Scenario ricreativo	ROME 2.1	GIUDITTA 3.2	RBCA Tool Kit 2.6	RISC 5.0	RACHEL 1.1.5	RISK-NET 3.1
<i>Recettori considerati</i>	ALTA	ALTA	ALTA	ALTA	ALTA	ALTA
<i>Valutazione esposizione effetti tossici</i>	ALTA	ALTA	ALTA	ALTA	ALTA	ALTA
<i>Valutazione esposizione effetti cancerogeni</i>	ALTA	ALTA	MEDIA	ALTA	ALTA	ALTA
Scenario commerciale/industriale	ROME 2.1	GIUDITTA 3.2	RBCA Tool Kit 2.6	RISC 5.0	RACHEL 1.1.5	RISK-NET 3.1
<i>Recettori considerati</i>	ALTA	ALTA	ALTA	ALTA	ALTA	ALTA
<i>Valutazione esposizione effetti tossici</i>	ALTA	ALTA	ALTA	ALTA	ALTA	ALTA
<i>Valutazione esposizione effetti cancerogeni</i>	ALTA	ALTA	ALTA	ALTA	ALTA	ALTA
<i>Nota</i> Giudizio di attinenza: ALTA - il software effettua in il calcolo dell'esposizione in conformità al Manuale; MEDIA – il software utilizza alcune opzioni di calcolo non conformi al Manuale						

Tabella 9: Giudizio di attinenza dei software rispetto alla valutazione degli scenari di esposizione delineati dal Manuale "Criteri Metodologici" (ISPRA, 2019)

Dall'osservazione dei dati ricavati dall'Analisi di Rischio condotta e dallo studio delle precedenti Analisi di Rischio effettuate si evidenzia che il software utilizzato per la valutazione del rischio legato alla presenza di specie chimiche contaminanti, restituisce un potenziale rischio di lisciviazione per la falda. Tuttavia, tramite analisi dirette sulle acque sotterranee, si evince assenza di contaminazione nella stessa.

Un altro punto di riflessione è legato alla verifica diretta dello stato della falda: questo avviene solo nel momento in cui si hanno superamenti rispetto alla Col.B della Tab.1 allegata alla Parte IV, Titolo V, del D.lgs.152/06. D'altro canto, in presenza di contaminazioni con concentrazioni inferiori (e conformi Col.A della Tab.1 allegata alla Parte IV, Titolo V, del D.lgs.152/06), la valutazione diretta dello stato della falda, non verrebbe presa in esame.

5. Conclusioni

Il lavoro svolto, ha messo in evidenza alcune criticità:

- a) Rischio di lisciviazione in falda ma assenza di effettiva contaminazione nella falda
- b) Valutazione dello stato delle acque sotterranee in riferimento alla destinazione d'uso dell'areale oggetto di studio

Le criticità evidenziate devono far riflettere sulla necessità di integrare la valutazione della qualità della falda: da un lato evitare di considerare il rischio in relazione della destinazione d'uso, dall'altro evitare di prescrivere interventi non strettamente necessari.

Tuttavia, è bene sottolineare che l'applicazione della procedura di Analisi di Rischio di per sé salvaguarda la falda poiché nell'elaborazione della stessa, il software in uso prevede l'inserimento di un indicatore denominato "Protezione della risorsa idrica", in particolar modo quando la falda è utilizzata ad uso potabile (tab. 11).

Recettori

on-site

Recettori on-site Help

Residenziale / Ricreativo		<ul style="list-style-type: none"><input checked="" type="radio"/> Adulti e Bambini (Adjusted) <input type="checkbox"/> Per sostanze tossiche considera recettore più critico<input type="radio"/> Adulti, Bambini, Adolescenti e Anziani <input type="radio"/> Adulti <input type="radio"/> Bambini 
Industriale / Commerciale		<ul style="list-style-type: none"><input type="radio"/> Lavoratori 
Protezione Risorsa Idrica		<ul style="list-style-type: none"><input checked="" type="radio"/> Rispetto dei limiti tabellari (CSC) al POC<input type="radio"/> Calcolo Rischio Ingestione di acqua

Tabella 11: Attivazione percorso di protezione falda su Risk-Net 3.1.1

Ciò che invece viene tralasciato durante l'applicazione dell'AdR è la valutazione del rischio microbiologico per le acque sotterranee poiché il terreno opera una funzione filtrante e in particolar modo perché la falda, in condizioni ottimali e di integrità, non rappresenta un ambiente idoneo alla crescita di microrganismi per cui dovrebbe garantire una situazione di sterilità.

Fanno eccezione situazioni contingenti per cui la falda risulta esposta a fenomeni inquinanti (come, per esempio, vicinanza ad una rete fognaria) e ciò non garantisce la sterilità dell'acquifero.

6. Abbreviazioni

In questo paragrafo vengono riportate tutte le abbreviazioni presenti nel documento al fine di rendere più facile la comprensione.

Adr	Analisi di Rischio
Csat	Concentrazione di saturazione nel suolo
CSC	Concentrazioni soglia di contaminazione
CSR	Concentrazione soglia rischio
D	Danno
D.Lgs	Decreto legislativo
E	Esposizione
ERA	Ecological risk assessments
Fe	Fattore di esposizione
Fp	Fattore di pericolosità
HI	Indice di pericolo
HQ	Indice di pericolosità
IAP	Indagine ambientale preliminare
IPA	Idrocarburi policiclici aromatici

MATTM	Ministero dell'ambiente e Sicurezza Energetica
PCB	Policlorodifenili
PDC	Piano di Caratterizzazione
PGT	Piano di Governo del Territorio
POB	Progetto operativo di Bonifica
RBSL	Risk based screening levels
RFd	Dose di riferimento
RL	Regione Lombardia
SSTL	Site specific target levels
T	Tossicità
TR	Rischio individuale
TRCUM	Rischio cumulativo

7. Bibliografia

Gazzetta Ufficiale n. 252, Decreto Legislativo 372/99, 4 agosto 1999, “Attuazione della direttiva 96/61/CE relativa alla prevenzione e riduzione integrale dell’inquinamento”.

RECONnet, Rete italiana sulla gestione e la bonifica dei siti contaminati, 2017. “Analisi di rischio ecologico (ERA) per il suolo - Benchmarking dei principali standard internazionali”. Pag. 36.

Enhealth, 2012. “Environmental health risk assessment. Guidelines for assessing human health risks from environmental hazards”, pag. 3-5.

Gazzetta ufficiale n.88, Decreto Legislativo 352/06, 3 aprile 2006, “Norme in materia ambientale”.

Bollettino ufficiale Regione Lombardia, Delibera Giunta regionale della Lombardia. n. 17252, 1 agosto 1996, “Standard di qualità suoli per la bonifica dei terreni contaminati sul territorio lombardo: approvazione circolare”.

ISPRA, Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale, 2017. “Memorie descrittive della Carta Geologica d'Italia”.

Gazzetta ufficiale, Decreto Ministeriale 471/99, 25 ottobre 1999. “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”.

S. Centrone, 2017. “Tesi di Laurea, Analisi di rischio applicata ad un sito contaminato da gasolio. Monitoraggio del soil gas per la verifica del modello di volatilizzazione da suolo e falda”, pag. 18-24.

L. Alberti, V. Francani, 2022. “Dispense di Idrogeologia Applicata”. Engology, parte I, II, III.

Gazzetta ufficiale n.52, Decreto Legislativo 31/2001, 2 Febbraio 2001. “Attuazione della direttiva 98/83/CE relativa alla qualità delle acque destinate al consumo umano”.

ARPA Lombardia, Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente, 2013. "Stato delle acque sotterranee della Provincia di Milano. Rapporto annuale 2012 – Dipartimento di Milano", pag. 6-36.

ARPA Lombardia, Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente, 2007. "Bovisa Gasometri: sorgenti di contaminazione della falda", pag. 28-29.

A. Marzorati, 2015. Tesi di laurea, "Analisi dell'influenza delle gallerie metropolitane sull'innalzamento del livello di falda: il caso di Milano", pag. 14.

ISPRA, Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale, 2008 - "Criteri metodologici per l'applicazione dell'analisi assoluta di rischio ai siti contaminati", Rev.2., pag. 5-56.

ARPA Sicilia, Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente, 2008. "L'analisi del rischio ambientale come strumento di supporto nella valutazione post incidentale".

ARPA Lombardia, Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente, 2010 "Protocollo di campionamento ai sensi del D.M. 471/99", pag. 3-12.

ASTM E1171-15, 2019. "Standard Test Methods for Photovoltaic Modules in Cyclic Temperature and Humidity Environments".

UNI EN Ente Italiano di Normazione 2331-1;1980, 31 Marzo 1980. "Tele metalliche per vagliatura. Fili metallici".

ISPRA, Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale, 2006 "Manuale per le indagini ambientali nei siti contaminati", pag. 25-79.

UNI EN Ente Italiano di Normazione 9377-2:2002, 1 Luglio 2002. "Qualita' dell'acqua - Determinazione dell'indice di idrocarburi - Metodo mediante estrazione con solvente e gascromatografia".

US Environmental Protection Agency, Method 5021A, Luglio 2004. "Volatile organic compounds in various sample matrices using equilibrium headspace analysis".

US Environmental Protection Agency, Method 8015C, Febbraio 2007. "Nonhalogenated organics by gas chromatography".

UNI EN Ente Italiano di Normazione 17294-2:2023, 14 Dicembre 2023. *“Qualità dell'acqua - Applicazione della spettrometria di massa al plasma accoppiato induttivamente (ICP-MS) - Parte 2: Determinazione di elementi selezionati, compresi gli isotopi dell'uranio”*.

UNI EN Ente Italiano di Normazione 15680:2005, 1 Gennaio 2005. *“Qualità dell'acqua - Determinazione gascromatografica in un certo numero di idrocarburi aromatici monociclici, naftalene e diversi composti clorurati, mediante estrazione ed intrappolamento e desorbimento termico”*.

UNI EN Ente Italiano di Normazione 17503:2022, 30 Agosto 2022. *“Suolo, fanghi, rifiuti organici trattati e rifiuti - Determinazione degli idrocarburi policiclici aromatici (IPA) mediante gascromatografia (GC) e cromatografia liquida ad alta prestazione (HPLC)”*.

UNI EN Ente Italiano di Normazione 16703:2011, 21 Agosto 2011. *“Qualità del suolo - Determinazione del contenuto di idrocarburi da C10 a C40 mediante gascromatografia”*.

UNI EN Ente Italiano di Normazione 13657:2004, 01 Gennaio 2004. *“Caratterizzazione dei rifiuti - Digestione per la successiva determinazione della porzione solubile in acqua regia degli elementi contenuti nei rifiuti”*.

APAT Agenzia per la Protezione dell'Ambiente e per i Servizi Tecnici, –IRSA 3020. *“Determinazione di elementi chimici mediante spettroscopia di emissione con sorgente al plasma”*.

RECONnet, Rete italiana sulla gestione e la bonifica dei siti contaminati, 2019. *“Manuale D'uso Risk Net 3.1.1”*, pag. 2-69.

SNPA, Sistema Nazionale per la Protezione dell'Ambiente, 2023. *“Indicazioni per l'applicazione dell'analisi di rischio alle matrici materiali di riporto all'interno dei siti oggetto di procedimento di bonifica”*, pag. 5-17.

Gazzetta ufficiale n.24, Decreto Legislativo 04/08, 29 Gennaio 2008 *“Ulteriori disposizioni correttive ed integrative del decreto legislativo 3 aprile 2006, n. 152, recante norme in materia ambientale”*.

Sitografia

Treccani - <https://www.treccani.it/enciclopedia/ecosistema/>

Treccani - [https://www.treccani.it/enciclopedia/ambiente_\(Enciclopedia-dei-ragazzi\)/](https://www.treccani.it/enciclopedia/ambiente_(Enciclopedia-dei-ragazzi)/)

Treccani (2007) - https://www.treccani.it/enciclopedia/inquinamentoambientale_%28Enciclopedia-Italiana%29/.

ARPA Lombardia (Maggio 2023) – “Siti contaminati e aree degradate”.
<https://www.arpalombardia.it/rapporto-stato-ambiente/siti-contaminati-e-aree-degradate/>

Lifesorgive 2016 - <http://www.liferisorgive.it/it/le-risorgive/aspetti-geologici/>

PGT - Relazione geologica Relazione illustrativa e norme geologiche di piano (Ottobre 2019) -
<https://www.pgt.comune.milano.it/gall01-relazione-geologica-relazione-illustrativa-e-norme-geologiche-di-piano/3-componente-idrogeologica/31-caratterizzazione-degli-acquiferi>

PGT - Caratteri geomorfologici e geologici (Ottobre 2019) -
<https://www.pgt.comune.milano.it/gall02-analisi-della-sismicita-del-territorio-e-valutazione-degli-effetti-sismici-di-sito/analisi-della-sismicita-del-territorio-e-valutazione-degli-effetti-sismici-di-sito/2-inquadramento-geomorfologico-geologico/22-caratteri-geomorfologici-e-geologici>.

8. Ringraziamenti

In questa parte conclusiva vorrei dedicare qualche riga di riconoscimento a chi mi ha supportata lungo questo percorso.

Un grazie speciale, prima di tutto, al professore *Antonio Calisi*, nonché mio relatore, per avermi supportata e aver pazientato durante la stesura di questa tesi.

Ringrazio particolarmente tutto il team di *PasaLabs* per avermi fatto sentire sin da subito parte dell'azienda e avermi dato grandi responsabilità. In particolare, ringrazio *Annalisa Gussoni* per tutti gli insegnamenti e per la grande fiducia che ha immediatamente avuto nei miei confronti.

Ringrazio di cuore i miei genitori, pilastri della mia vita, che mi hanno permesso di essere chi sono oggi.

A papà *Gianni*, che nel suo essere enigmatico e temerario mi ha insegnato ad essere una persona audace e combattente.

E a mia *madre*, sempre presente e paziente, grazie per avermi sempre supportata in ogni momento della mia vita.

Grazie anche a mia *sorella* che è da sempre un esempio di forza e grande intelligenza.

Un grazie speciale a mio *zio Pasquale*, che da sempre mi illumina con i suoi studi e scoperte nel mondo della Biologia.

Ringrazio *Giulia*, una persona speciale, per avermi insegnato tanto e per avermi sempre considerata come una figlia. Un sincero e profondo senso di gratitudine per aver creduto sempre in me.

Ringrazio tutti i miei professori che in un modo o nell'altro mi hanno insegnato ad amare ancora di più il mondo della biologia; e un ringraziamento a tutti i miei compagni di corso e in particolare a *Sara* e *Alice* che in questi due anni mi hanno sopportato e incoraggiato durante le sessioni di esami interminabili.

Ringrazio di cuore tutti i miei amici e tutte le persone che in un modo o nell'altro mi hanno accompagnata e supportata durante questo percorso.