Impiego di tecnologie GIS per l'analisi del rischio ecotossico in un deposito costiero di idrocarburi. Caso studio.

Glauco Spanghero [(1)], Alberto Maiolo [(2)], Paolo Bevilacqua [(3)]

[(1)] ARPA Friuli Venezia Giulia, Via Cairoli n. 14, Palmanova (UD), P.O. Box 33057, Italia
[(2)] Direzione Regionale dei VV.F. del Friuli Venezia Giulia, Via del Teatro Romano n. 1, Trieste, P.O. Box 34121, Italia
[(3)] DICAMP - Università degli Studi di Trieste, Piazzale Europa n. 1, Trieste, P.O. Box 34127, Italia

Sommario

La presente memoria descrive l'esperienza di un caso studio trattato in seno al Comitato Tecnico Regionale dei Vigili del Fuoco del Friuli Venezia Giulia, concernente l'istruttoria tecnica per la revisione quinquennale di un Rapporto di Sicurezza relativo ad un deposito costiero di idrocarburi liquidi stoccati in una serie di serbatoi a tetto galleggiante con presenza di scenari incidentali di rischio ecotossico, ubicato in Comune di Muggia in provincia di Trieste (Italia).
Per ragioni di privacy, sono omessi i riferimenti alla ragione sociale della proprietà.
Nella prima fase dell'istruttoria, l'applicazione della *metodologia speditiva per la valutazione del rischio per l'ambiente da incidenti rilevanti in depositi di idrocarburi liquidi*, realizzata dal Gruppo di Lavoro misto APAT-ARPA-Ministero dell'interno/CNVVF e pubblicata nel Rapporto APAT 57/2005, ha evidenziato un alto grado di criticità del rischio per i bersagli (IRB), tale da indurre la necessità di prescrivere un approfondimento di indagine (Advance Risk Assessment - ARA).
Uno studio di vulnerabilità di un acquifero finalizzato all'analisi del rischio ecotossico può essere sviluppato mediante l'adozione di metodi parametrici che prendono in considerazione i principali parametri morfologici, geologici, idrogeologici ed idraulici del territorio sul quale insistono le strutture dell'impianto ed il risultato consente di ottenere una stima attendibile del grado di pericolosità intrinseca del sito di fronte ad un ipotetico scenario di sversamento di sostanze pericolose in superficie. Le problematiche classiche da affrontare in uno studio di questa natura riguardano essenzialmente due aspetti:

- Acquisizione dei dati geologici, idrogeologici ed idraulici del sito e di un suo conveniente intorno.
- Interpolazione spaziale dei dati puntuali al fine di poter ottenere le mappe tematiche necessarie per l'applicazione del metodo parametrico di calcolo della vulnerabilità del sito.

Nel caso in esame, per il calcolo della vulnerabilità dell'acquifero è stato proposto il metodo DRASTIC, messo a punto da Aller et. al. nel 1985 e 1987, mentre le interpolazioni spaziali sono state realizzate mediante l'impiego di strumenti geostatistici del pacchetto ArcGIS di ESRI, utilizzando come base la carta tecnica regionale numerica del Friuli Venezia Giulia in scala 1:5000.
I risultati ottenuti sono quindi stati comparati con le stime probabilistiche derivanti dall'analisi degli scenari di rilascio di sostanze liquide dalle componenti critiche dell'impianto, ottenendo quindi quella che è stato possibile definire *carta del rischio ecotossico*. In funzione dei risultati ottenuti, considerate le frequenze di accadimento delle diverse ipotesi incidentali credibili, le magnitudo degli effetti ed il corrispondente livello di vulnerabilità del sito, il CTR ha quindi potuto disporre di un affidabile Decision Support System per poter validare il Rapporto di Sicurezza anche mediante un puntuale e condiviso pacchetto di prescrizioni tecniche e gestionali atte a mitigare i reali rischi presenti.

1 L'approccio valutativo del rischio ecotossico

1.1 Aspetti introduttivi sull'analisi di rischio

L'approccio valutativo del rischio tecnologico si basa sullo studio probabilistico degli eventi incidentali più significativi che possono verificarsi in un impianto industriale, studio che si completa con l'analisi degli scenari derivanti dall'accadimento degli eventi stessi e dalla stima dei danni conseguenti, per i quali devono essere determinate le dosi critiche di inquinante, nell'accezione più ampia del termine, potenzialmente presenti nelle zone circostanti ai punti di accadimento degli eventi incidentali stessi.
Il concetto di inquinante, nel contesto in questione, deve essere interpretato come un qualsiasi agente fisico o chimico in grado di produrre danno per l'uomo o per l'ambiente, che può svilupparsi nelle matrici ambientali a seguito di un incidente, come per esempio un incendio, un'esplosione oppure un rilascio tossico in aria di una sostanza chimica aeriforme. E' evidente che, a seconda della natura e del tipo di sostanze coinvolte nell'incidente, i concetti di inquinante e di dose critica assumono differenti significati.
Ai fini della determinazione del rischio, le caratteristiche chimiche e fisiche delle sostanze vengono suddivise come segue:

- **Infiammabilità.** E' l'attitudine intrinseca a liberare vapori che miscelati con l'ossigeno dell'aria possono essere innescati e dare luogo ad incendi.
- **Esplosività.** E' l'attitudine della sostanza a decomporsi in modo esplosivo o a formare delle miscele con l'aria che, in caso di innesco, sviluppano energia cinetica, oltre che termica.
- **Tossicità**. E' la capacità della sostanza di provocare danni all'organismo umano quando viene assorbita per inalazione, ingestione o contatto cutaneo.
- **Instabilità.** E' l'attitudine della sostanza a decomporsi o a polimerizzare con sviluppo di energia termica e dinamica.
- **Reattività.** E' l'attitudine della sostanza a reagire violentemente con altre sostanze con sviluppo di energia termica e dinamica.
- **Corrosività.** E' l'attitudine della sostanza a reagire con altre sostanze o con l'epidermide umana.

In funzione delle caratteristiche chimiche e fisiche sopra elencate, gli effetti dannosi sulla salute e sull'ambiente possono essere misurati in termini di dose come evidenziato in Tabella 1.

Scenario Incidentale	**Elevata letalità**	**Inizio letalità**	**Lesioni irreversibili**	**Lesioni reversibili**	**Danni alle strutture / Effetti domino**
Radiazione termica stazionaria	12,5 Kw/m^2	7 Kw/m^2	5 Kw/m^2	3 Kw/m^2	12,5 Kw/m^2
Radiazione termica variabile	Raggio fireball	350 KJ/m^2	200 KJ/m^2	125 KJ/m^2	200 – 800 m
Radiazione termica istantanea	LFL	½ LFL	-	-	-
Sovrapressione di picco	0,3 bar (0,6 spazi scoperti)	0,14 bar	0,07 bar	0,03 bar	0,3 bar
Rilascio tossico	LC50 (30 min)	-	IDLH	-	-

Tabella 1: Scenari incidentali e relative dosi critiche

1.2 I modelli di calcolo del rischio

I rischi derivanti dagli scenari incidentali indicati in Tabella 1, relativi sia a fenomeni di propagazione di agenti fisici (energia termica e sovrappressioni) sia a rilasci di agenti chimici (dispersioni tossiche per l'uomo o per l'ambiente), possono essere determinati impiegando modelli matematici che tengono conto delle peculiarità intrinseche dell'evento scatenante, dello scenario

incidentale conseguente, della tipologia degli agenti inquinanti e delle caratteristiche del mezzo in cui l'evento stesso si propaga, che nei casi indicati è costituito quasi esclusivamente dall'atmosfera.
Nel contesto in questione, i modelli citati, concettualmente abbastanza simili tra loro, possono tutti beneficiare di un aspetto molto vantaggioso per quanto concerne la complessità delle equazioni matematiche sui quali si basano, costituito dalla possibilità di considerare l'atmosfera, ovviamente in termini conservativi, un mezzo omogeneo ed isotropo.
Ben diversa è la questione relativa ai modelli matematici sui quali si basano i calcoli dei flussi di inquinante nei suoli e nelle falde acquifere, entrambe matrici ambientali sicuramente non omogenee né isotrope. In aggiunta a ciò, quasi sempre la determinazione dei parametri fisico chimici dei suoli e delle acque sotterranee risulta difficile e costosa, fornendo inoltre dati a livello puntuale che per una corretta interpretazione devono essere comunque interpolati tra loro con conseguente propagazione degli errori.
Soprattutto in questi ultimi anni sono stati sviluppati numerosi modelli che consentono di stimare con buona precisione l'andamento delle contaminazioni nelle falde acquifere, tutti utilizzati principalmente per caratterizzare situazioni di inquinamento conclamato, sulle quali impostare i progetti di bonifica dei suoli e delle acque.
Poco si è fatto, viceversa, per quel che riguarda la stima degli effetti sull'uomo e sull'ambiente causati da incidenti industriali, sia per quanto concerne la magnitudo del danno sia per le potenziali evoluzioni nel tempo e nello spazio.

2 L'analisi del rischio nello stabilimento del caso studio

2.1 Analisi sitologica dello stato attivo

Per quanto concerne l'analisi sitologica dello stato attivo, ovvero lo studio delle cause che possono determinare lo sversamento sul suolo delle sostanze ecotossiche, l'approccio metodologico si è basato sulle classiche tecniche degli alberi di guasto ormai consolidate. Considerati gli scopi della presente memoria, non si è ritenuto importante declinare i vari passaggi logici utilizzati, limitandosi quindi ad una sintesi dei risultati riportata al capitolo conclusivo.

2.2 Analisi sitologica dello stato passivo

Contrariamente a quanto riportato al capitolo precedente, maggiore enfasi è stata invece dedicata alla cosiddetta analisi sitologica dello stato passivo, ovvero allo studio di vulnerabilità del sito in cui è ubicato il deposito oggetto dello studio in termini di attitudine alla contaminazione delle acque sotterranee e superficiali a seguito di uno sversamento superficiale di sostanze ecotossiche.

2.2.1 Sistemi di contenimento delle perdite di sostanze pericolose a disposizione del deposito

Al fine di prevenire e/o contenere gli eventuali rilasci delle sostanze stoccate, ed in particolare del gasolio (sostanza pericolosa per l’ambiente R51/53), il deposito è dotato di adeguate soluzioni impiantistiche che costituiscono la prima barriera attiva contro i possibili fenomeni di contaminazione rispetto a ciascuna sorgente primaria individuata.
Tutte le soluzioni impiantistiche sopra citate riguardano le seguenti componenti dell'impianto:

- Serbatoi
- Tubazioni
- Pompe di trasferimento
- Pontile
- Sistemi di drenaggio.

2.2.2 Descrizione dei possibili meccanismi di contaminazione

Le possibili sorgenti di contaminazione possono essere suddivise in sorgenti primarie e sorgenti secondarie. Le potenziali sorgenti primarie di contaminazione per il sito in esame possono essere individuate nelle seguenti strutture:

- Pontile di scarico del prodotto
- Rete di movimentazione del prodotto (tubazioni e collegamenti)
- Serbatoi di stoccaggio.

In caso di rilascio di prodotto dalle sorgenti primarie verso il terreno, le zone inquinate diventano a loro volta delle sorgenti di rilascio secondarie.
Data la tipologia di attività svolta presso il deposito è possibile individuare due tipologie di eventi incidentali che saranno analizzati come risultato della presente valutazione, e precisamente:

- Sversamento di gasolio sul suolo e nel suolo
- Sversamento di gasolio per ruscellamento nelle acque superficiali e nel mare.

L'intero comprensorio risulta diviso nettamente in due parti, sia dal punto di vista orografico e geomorfologico, sia dal punto di vista idrogeologico: la valle del Torrente Rosandra e quella del Rio Ospo.
In particolare in sinistra idrografica del Torrente Rosandra si trovano l'Area ex-Impianti e l'area di Monte S.Giovanni, mentre in destra idrografica del Rio Ospo è ubicato il parco serbatoi delle Noghere.
Lungo il crinale del suddetto promontorio il complesso industriale è diviso da una zona residenziale con abitazioni civili, dell'abitato di Aquilinia.

2.2.3 Approccio valutativo

Sulla base del modello concettuale relativo all'approccio valutativo del rischio descritto al capitolo 2.1, nel presente capitolo verrà effettuata l'analisi sitologica dello stato passivo del sito in termini di:

- Inquadramento geologico e morfologico dell'area
- Idrologia dell'area
- Idrogeologia dell'area
- Aspetti meteoclimatici del sito
- Studio di vulnerabilità del sito (DRASTIC)
- Analisi dei fenomeni di ruscellamento (steepest path).

2.2.4 Inquadramento geologico e morfologico dell'area

Il territorio in esame si presenta da un punto di vista geomorfologico piuttosto variegato. Da Punta Sdobba alle foci del Timavo il litorale è costituito da spiagge sottili, ad Est delle foci del Timavo la costa diventa alta e rocciosa. Il litotipo che costituisce la falesia, scarpata molto ripida formatasi per l'intensa azione erosiva del mare su coste alte a struttura omogenea, è il Calcare Mesozoico. Il secondo litotipo del Golfo di Trieste che affiora nel Golfo di Sistiana è il Flysch del Luteziano Medio (costituito da marne ed arenarie in percentuali variabili). A S-E della Baia di Sistiana, il calcare è nuovamente l'unico litotipo presente fino ai Filtri di Aurisina, dove affiora nuovamente il Flysch, inizialmente solo ai piedi della falesia. Dai Filtri di Aurisina verso Trieste il Flysch si

presenta con una maggior continuità e con affioramenti più consistenti, anche alle quote alte della falesia; infine, da Miramare fino a Portorose, in Istria, diventa l'unico litotipo della costa. I calcari ricompaiono direttamente sul mare solo in due limitati tratti: a Nord dei Filtri di Aurisina ed in corrispondenza del promontorio di Miramare. Il Carso triestino fa strutturalmente parte di una vasta unità la cui genesi va ricercata in una originale spinta da NE, cui, in un secondo momento, si sono sovrapposte e sostituite ulteriori spinte provenienti da NO. Tutte queste Unità e le loro strutture tettoniche hanno andamento dinarico (NO-SE).

2.2.4.1 Aspetto geologici

Tettonicamente l'area comprende due unità, la "piattaforma di Comeno", che corrisponde alla successione carbonatica della "anticlinale del Basso Carso" con asse SE-NO, cui sovrasta parte della successione torbiditica del Flysch, e la "struttura embriciata della Ciceria" cui corrispondono terreni carbonatici e torbiditici, posti a meridione della fessura a SO di detta anticlinale, interessati da una serie di faglie inverse, sempre ad andamento dinarico, legate alla "linea Golfo di Panzano-Baia di Muggia".
Gli elementi strutturali più importanti sono dati da due faglie inverse ad andamento SE-NO, dinarico, facenti parte del sistema legato alla " linea Golfo di Panzano-Baia di Muggia" (o "faglia di Trieste"). Altre due faglie notevoli presenti nella zona, sono ad andamento anti-dinarico, NE-SO. Si tratta di faglie che avrebbero dislocato trasversalmente la struttura anticlinalica del Carso Triestino, e che potrebbero aver funzionato da svincolo ai movimenti dinarici NE-SO.
Vi sono poi tutta una serie di faglie di minor entità, con andamento medio NE-SO e SE-NO, che interessano la compagine carbonatica.
Dal punto di vista geomorfologico, in generale, la zona di Trieste può essere suddivisa in due parti: la prima che comprende tutta la zona collinare sviluppata nelle rocce marnoso-arenacee, fino ad una quota di 250 m s.l.m. (dorsale Montebello-Cattinara), incisa da torrenti con piccoli apparati deltizi alle foci, e la seconda che comprende l'intero plateau calcareo, carsico, soprastante, privo di qualsiasi idrografia superficiale che si innalza dalla quota di 150 m s.l.m. (sopra le sorgenti di Aurisina) alla quota di oltre 400 m s.l.m. (Basovizza).

2.2.5 Idrologia dell'area e descrizione dei bacini afferenti l'area del deposito

Originariamente l'area era interessata da numerosi corsi d'acqua, tra i quali maggiore rilievo assumevano il Rio Baiamonti, Rio Primario, Rio Spinoleto, Rio Storto, Torrente S. Antonio, Torrente Rosandra, Rio di Stramare, Rio Ospo, Torrente Rabuiese, Torrente Farnei; tuttavia, nel corso dei decenni, l'idrografia originaria è stata del tutto stravolta a seguito di interventi di interramento, canalizzazione e/o convogliamento al depuratore dei corsi d'acqua. Attualmente gli unici corsi d'acqua degni di rilievo a cielo aperto sono il Torrente Rosandra ed il Rio Ospo.

2.2.6 Aspetti meteoclimatici del sito

Di seguito viene data una breve descrizione meteo-climatica con un elenco dei maggiori parametri che influenzano il clima della zona in esame:

- Precipitazione totale
- Temperatura massima/minima/media
- Vento massimo/medio
- Radiazione totale
- Umidità media.

I dati meteoclimatici provengono dall'archivio dell'Osservatorio Meteorologico di ARPA FVG riferiti alla stazione n. 13 "Trieste Molo" relativamente al periodo Gennaio 2005 - Aprile 2006.

2.2.7 Studio della vulnerabilità del sito con il metodo DRASTIC

L'analisi sitologica dello stato passivo, relativamente allo studio di vulnerabilità dell'acquifero, è stata condotta utilizzando il metodo parametrico DRASTIC, proposto per la prima volta da Aller et. al. [1][2] nel 1985 e 1987.
Il metodo DRASTIC analizza le caratteristiche intrinseche del sito, prendendo in esame sia le caratteristiche della copertura che quelle dell'acquifero stesso e suddividendole in 7 parametri.
In particolare il metodo prende in considerazione:

- ***D***- Profondità della falda (Depth)- Una falda superficiale è molto più suscettibile alla contaminazione rispetto ad una falda profonda.
- ***R*** -Ricarica netta- La ricarica di una falda è il meccanismo che determina la capacità di trasporto di un inquinante sulla superficie falda; maggiore è la ricarica netta maggiore è la probabilità che esso venga veicolato sulla superficie della falda.
- ***A*** -Litologia dell'acquifero- Le caratteristiche dell'acquifero influiscono sul grado di movimento e di attenuazione del contaminante.
- ***S*** -Suolo- La tipologia e lo spessore della coltre superficiale di suolo condizionano la veicolazione dell'acqua e del contaminante sulla superficie dell'acquifero (zona satura); una coltre di suolo spessa e caratterizzata da materiali argillosi e siltosi incrementa notevolmente il tempo di arrivo in falda di un contaminante.
- ***T*** -Topografia (pendenza)- Una forte pendenza favorisce il dilavamento della sostanza contaminante riducendo il tempo di accumulo sulla coltre di suolo e impedendo la penetrazione nella zona insatura e la migrazione nella zona satura.
- ***I*** -Impatto della zona vadosa o insatura- Spessore e caratteristiche della zona insatura condizionano il tempo ed il quantitativo di contaminante veicolato sulla superficie della falda anche per l'innescarsi di fattori di attenuazione.
- ***C*** -Conducibilità idraulica- La conducibilità idraulica condiziona la velocità di spostamento dell'acqua nell'acquifero.

Il risultato è una mappa tematica suddivisa in unità areali o "celle" per ciascuna delle quali si calcola l'indice di vulnerabilità "Drastic" I_D espresso come risultante dalla sommatoria del fattore i-esimo F moltiplicato per il relativo peso secondo la relazione.

$$I_D = \Sigma Peso_i * F_i.$$

Per ognuno dei sette parametri del metodo sono proposti i pesi riportati in Tabella 2:

Parametro DRASTIC rilevato dagli abachi	Peso
D	Dr = 5
R	Rr = 4
A	Ar = 3
S	Sr = 2
T	Tr = 1
I	Ir = 5
C	Cr = 3

Tabella 2: Pesi attribuiti ai sette parametri del metodo DRASTIC

Il calcolo dei parametri DRASTIC viene fatto, a partire dai valori misurati dei singoli indici geologici ed idrogeologici, mediante un confronto con abachi presenti in letteratura [3], riportati nei capitoli che seguono.
Nel presente studio di vulnerabilità, il calcolo dei parametri DRASTIC è stato eseguito utilizzando la tecnologia *ArcGIS di ESRI*, interpolando sull'intera area analizzata i valori misurati ovvero desunti dalla letteratura mediante lo strumento del *Kriging* del modulo di *Geostatistica*. Le mappe di rischio sono state realizzate con una risoluzione a maglia quadrata di lato 2 metri.

2.2.7.1 Il Fattore D (Livello piezometrico)

La profondità della superficie di falda è un parametro molto importante (peso 5), in quanto dallo spessore del mezzo non saturo dipende il tempo di permanenza e la possibilità di attivazione di reazioni chimico-fisiche e biologiche denominate "potere autodepurante del terreno" [3].
Il calcolo è stato effettuato mediante un'interpolazione di kriging su una base di valori misurati desunti dalla documentazione relativa ai lavori di caratterizzazione del sito nell'ambito del DM 471/99, forniti dal Committente.
In funzione del valore calcolato di profondità dell'acquifero, l'indice DRASTIC D è stato determinato con l'abaco di Figura 1.

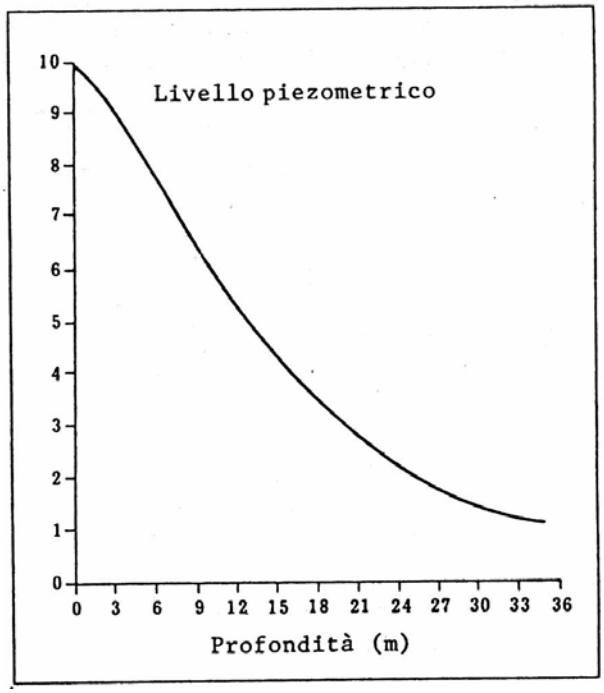


Figura 1: Abaco per il calcolo dell'indice DRASTIC D in funzione del valore di profondità dell'acquifero

In Figura 2 è riportata la mappa del coefficiente Drastic D, nella quale si osserva un forte impatto nella zona dell'Area Impianti (acquifero quasi superficiale) ed una sua progressiva diminuzione nella Zona Valle delle Noghere, dove l'acquifero è via via più profondo man mano che si sale verso monte.

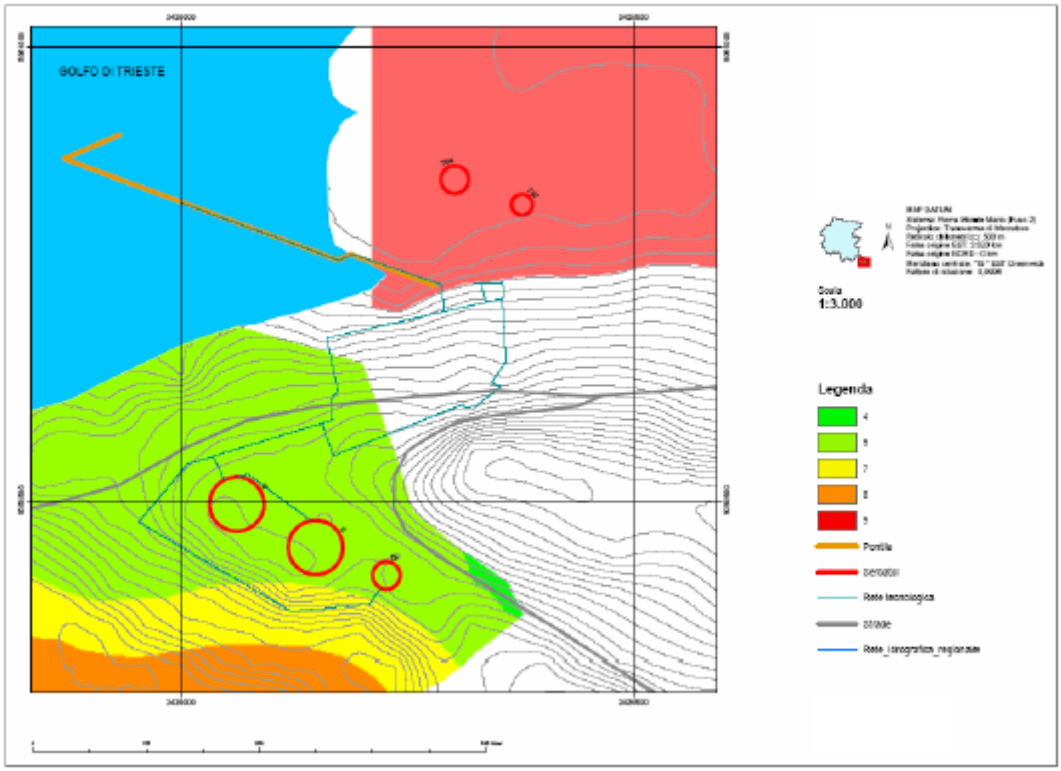


Figura 2: Interpolazione geostatistica del coefficiente DRASTIC "D" (profondità dell'acquifero)

2.2.7.2 Il Fattore R (Infiltrazione o ricarica dell'acquifero)

Uno studio che ha come scopo quello di valutare sul territorio la vulnerabilità degli acquiferi, non può prescindere da un attento esame quantitativo della percolazione dell'acqua attraverso il suolo. E', infatti, principalmente attraverso questa via che eventuali inquinanti presenti nel terreno vengono portati alle falde acquifere sottostanti [3].
Nel contesto in questione, lo scopo principale dello studio di vulnerabilità dell'acquifero sottostante il deposito è quello di determinare l'ipotesi di inquinamento della falda derivante da uno sversamento accidentale di prodotto sul terreno che, dalla superficie, penetra fino all'acquifero. Non si tratta quindi di un'analisi di inquinamento continuo e perdurato nel tempo, bensì di un calcolo basato su un'ipotesi incidentale di breve durata.
I dati di letteratura citati [4] mostrano che, nell'area in esame, l'infiltrazione annua si attesta attorno ad un valore massimo di 500 mm/anno.
A fronte di quanto sopra esposto, al posto del parametro *Infiltrazione efficace* di letteratura, si è ritenuto considerare un più significativo parametro conservativo *Infiltrazione efficace incidentale*, determinato dalla seguente relazione:

$$IEi = IE \cdot \frac{Np}{365} \qquad \text{(F1)}$$

Dove:

IE = Infiltrazione Efficace

IEi = Infiltrazione Efficace incidentale
Np = Numero di giornate piovose nel periodo di 1 anno

Nel corso del periodo Gennaio 2005 - Dicembre 2005 [9] i dati rilevati presso la stazione ARPA FVG - OSMER di Trieste Molo mostrano la seguente situazione:

Dati di piovosità		
Anno 2005	Giorni	Cumulato
Gennaio	3	14,0
Febbraio	6	9,8
Marzo	7	40,4
Aprile	10	87,4
Maggio	11	61,0
Giugno	5	36,0
Luglio	5	57,0
Agosto	14	154,2
Settembre	7	121,8
Ottobre	10	42,0
Novembre	7	85,6
Dicembre	12	83,8
Totale	**97**	**793**

Quindi, secondo la (F1), avremo:

$$IEi = 500 \cdot \frac{97}{365} = 133 \qquad \text{(F2)}$$

A cui corrisponde un valore cautelativo del parametro di Infiltrazione DRASTIC R di circa 7 [3], dedotto dall'abaco di Figura 3 dopo aver convertito l'unità di misura del valore calcolato con la (F2) (espresso in mm/anno) nel valore coerente con l'abaco stesso (espresso in cm/anno), da considerare omogeneo ed uniforme per l'intera superficie del deposito, come mostrato in Figura 4.

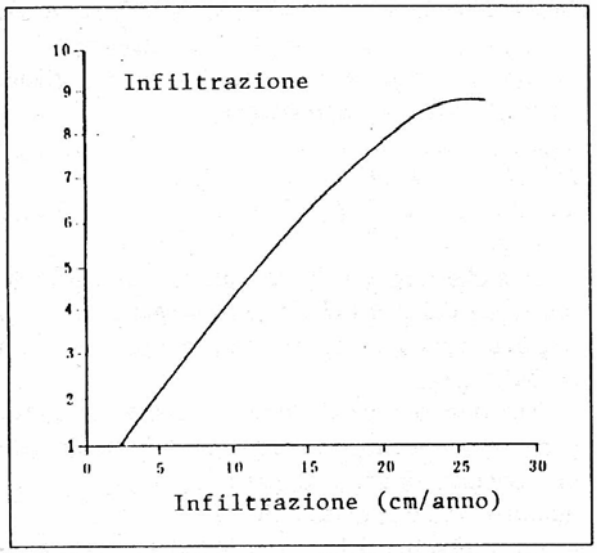


Figura 3: Abaco per il calcolo dell'indice DRASTIC R in funzione del tipo di terreno non saturo

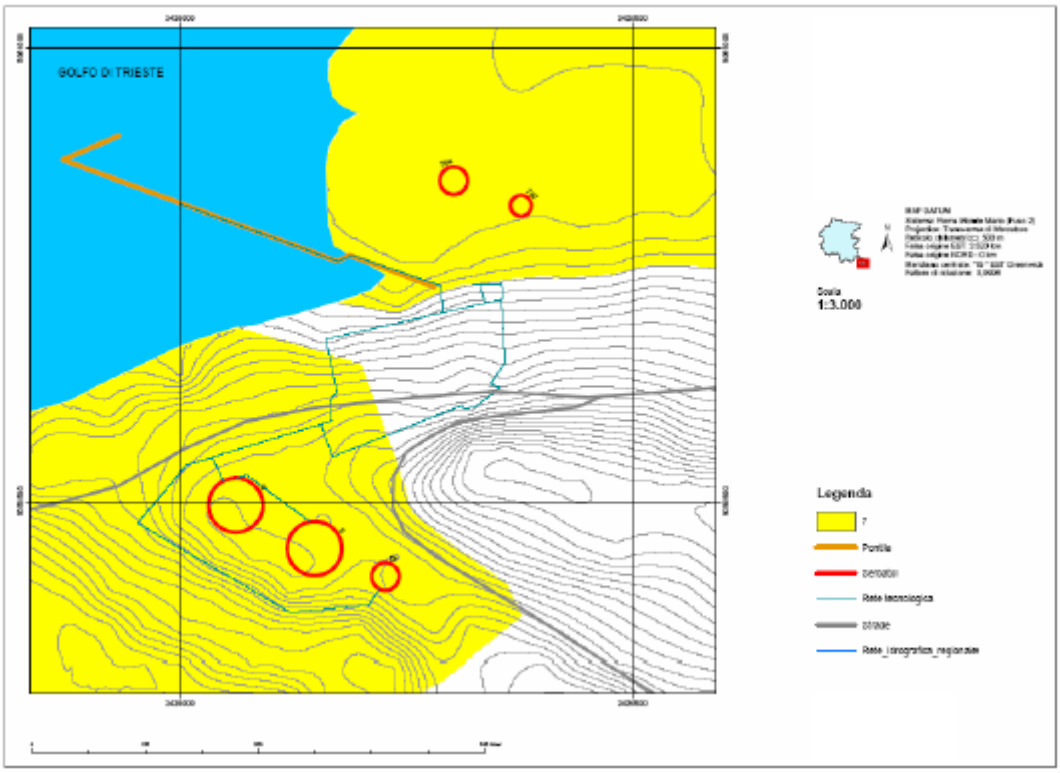


Figura 4: Interpolazione geostatistica del coefficiente DRASTIC "R" (ricarica dell'acquifero)

2.2.7.3 Il Fattore A (Caratteristiche dell'acquifero)

Sulla base dei dati a disposizione, derivanti dai carotaggi eseguiti in vari periodi sull'intera superficie del deposito, è stato ritenuto ragionevole e cautelativo ai fini preposti considerare l'acquifero dell'area suddiviso in due macro aree: la zona pianeggiante, corrispondente a tutta l'area "Impianti" e ad una porzione della zona "Valle delle Noghere", e la zona collinare, corrispondente al promontorio in cui sono ubicati i serbatoi n. 5, 6 e 18.
Alle due aree, considerate omogenee, sono stati attribuiti rispettivamente i coefficienti DRASTIC A di 4 (zona pianeggiante) e 5 (zona collinare), dedotti dall'abaco di Figura 5.

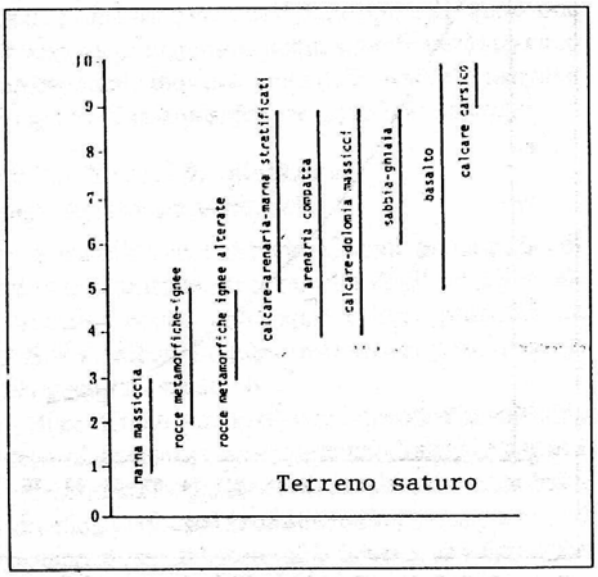


Figura 5: Abaco per il calcolo dell'indice DRASTIC A in funzione delle caratteristiche dell'acquifero

In Figura 5 è riportata la carta del coefficiente DRASTIC A "Caratteristiche dell'acquifero".

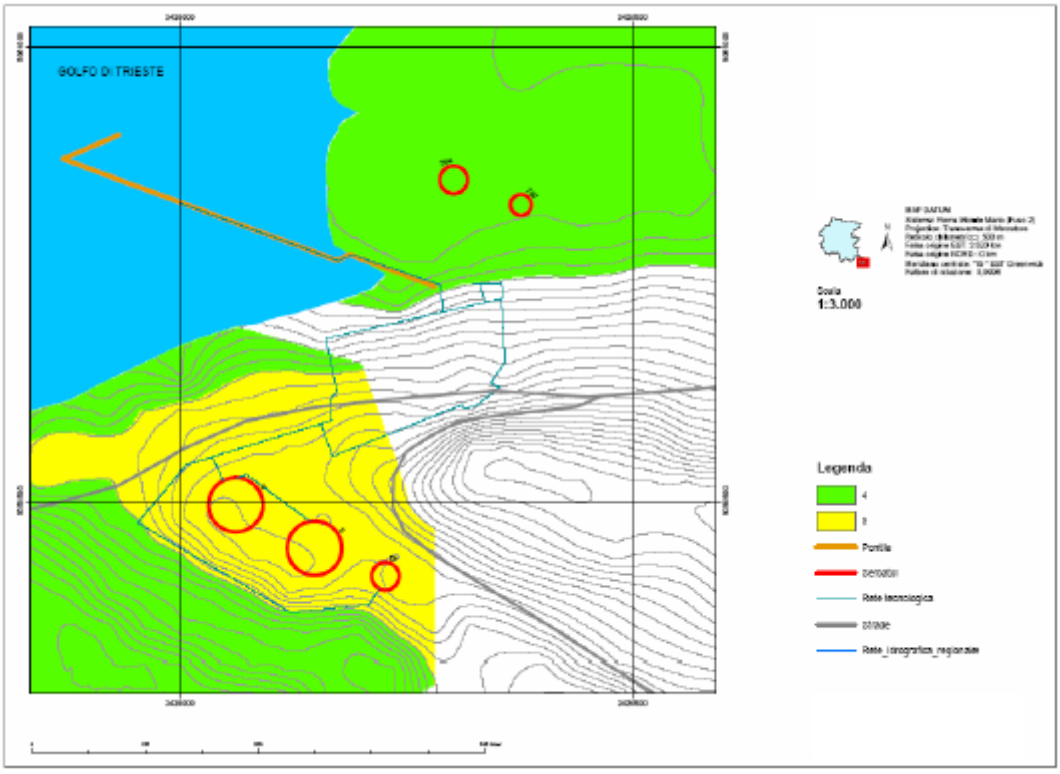


Figura 6: Interpolazione geostatistica del coefficiente DRASTIC "A" (caratteristiche dell'acquifero)

2.2.7.4 Il Fattore S (Caratteristiche del suolo superficiale)

Da un punto di vista pedologico, l'area del deposito è nettamente suddivisa in due zone omogenee, l'area Impianti e l'area Valle delle Noghere.
In entrambe le aree, la coltre superficiale ricopre in maniera sostanzialmente uniforme il substrato flyschoide costituente l'acquitardo, con spessori variabili ma contenuti come mostrato nelle sezioni stratigrafiche di Tavola 2-A.
In coerenza con i ragionamenti già descritti al precedente capitolo 2.2.7.3, per questo parametro vengono scelti i valori di 1 nell'area Impianti e 5 nell'area Valle delle Noghere, dedotti entrambi direttamente dall'abaco di Figura 7.

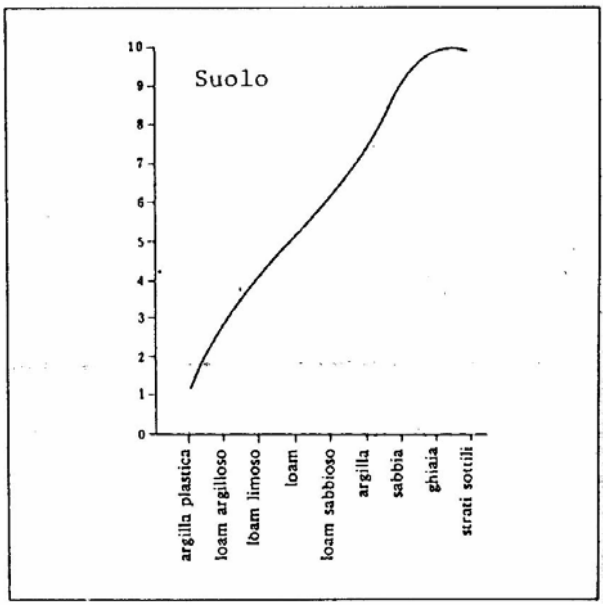


Figura 7: Abaco per il calcolo dell'indice DRASTIC S in funzione delle caratteristiche del suolo superficiale

In Figura 8 è riportata la carta del coefficiente DRASTIC S "Tipologia di suolo superficiale".

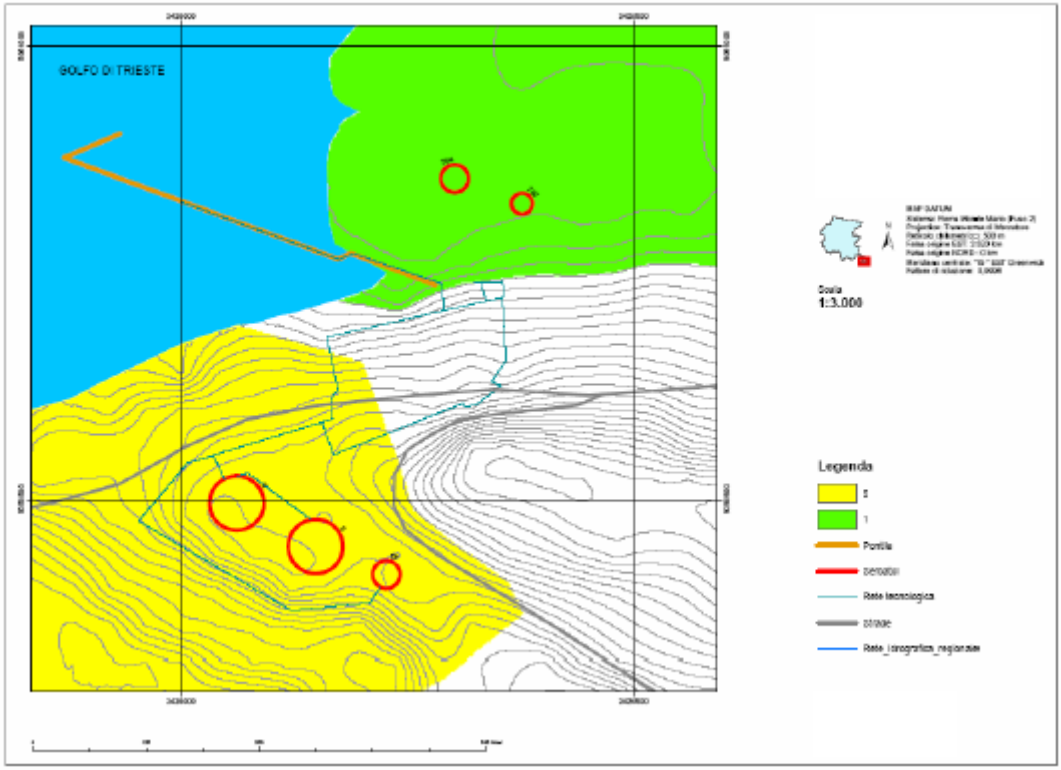
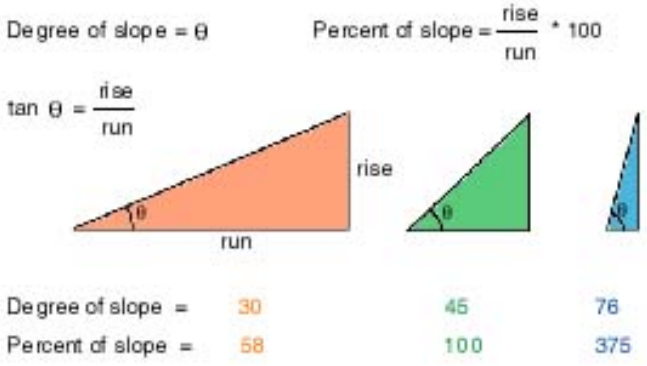


Figura 8: Interpolazione geostatistica del coefficiente DRASTIC "S" (tipologia di suolo superficiale)

2.2.7.5 Il Fattore T (Caratteristiche topografiche (di pendenza))

Il calcolo di questo fattore è stato condotto mediante un'elaborazione spaziale del modello tridimensionale dell'area con la funzione *Slope* del tool *3D Analyst* di ArcGIS.
La funzione *Slope* calcola il massimo rateo di pendenza tra ogni cella del file raster e le sue celle adiacenti. Ogni cella del file raster di output sarà associata ad un valore di pendenza, a sua volta abbinato anche ad una scala di colori per meglio rappresentare cartograficamente l'informazione. La pendenza può essere calcolata sia in gradi decimali sia in percentuale; visti gli scopi del presente studio e considerato che il metodo DRASTIC associa uno specifico indice numerico alla pendenza espressa in percentuale, è con questa unità di misura che è stato eseguito il calcolo.
Nello schema di Figura 9 è rappresentata graficamente la logica di calcolo impiegata, unitamente ad un esempio cartografico.



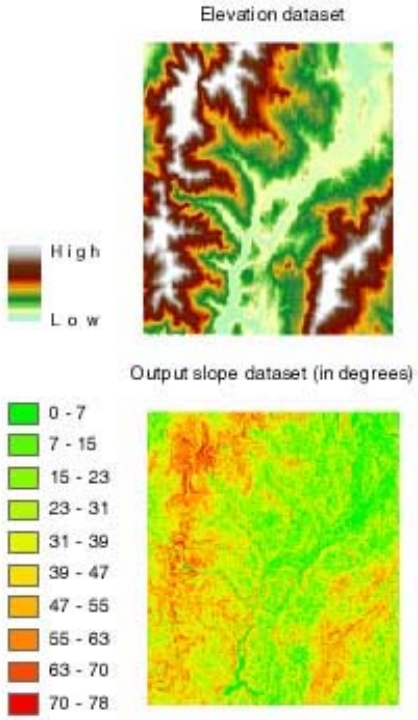


Figura 9: Logica di calcolo della funzione *slope* di 3D Analyst ed esempio cartografico

In Figura 10 è riportata la carta delle pendenze, espresse in gradi, relative all'area oggetto dello studio. Si osserva come questo indice sia molto più elevato nelle zone a bassa pendenza (pianeggianti e/o terrazzamenti), mentre diminuisce di valore nelle zone ripide, dove l'eventuale sostanza sversata scorre via senza infiltrarsi nel suolo.

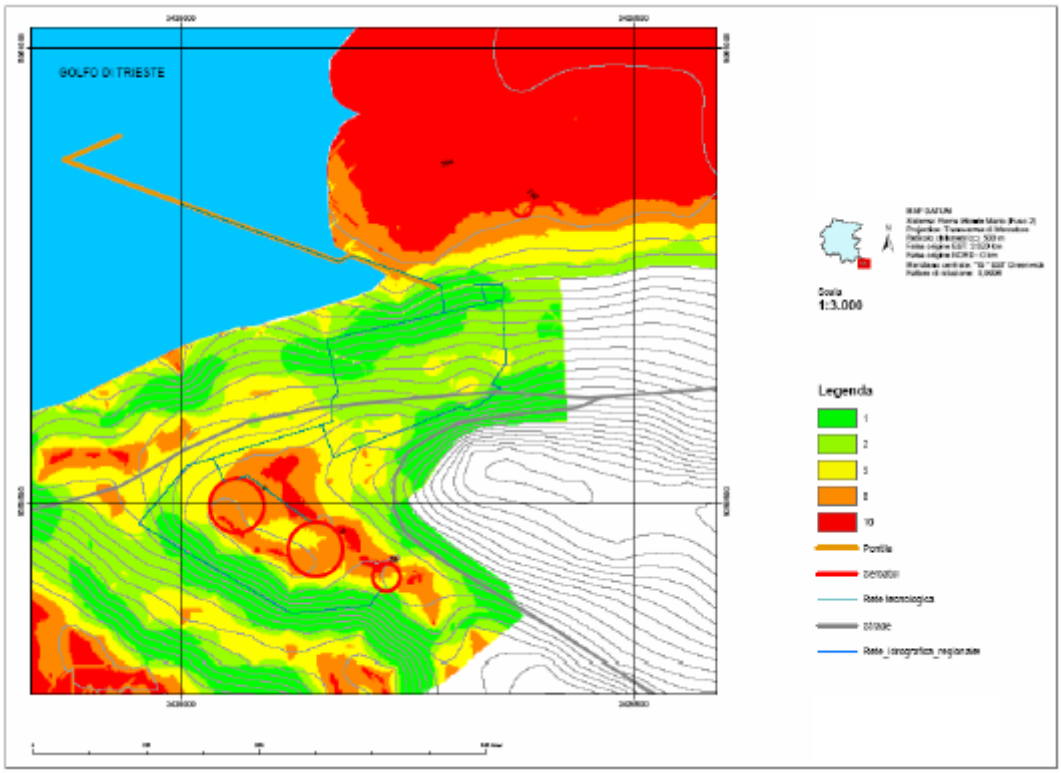


Figura 10: Carta delle pendenze (fattore DRASTIC "T")

2.2.7.6 Il Fattore I (Caratteristiche del mezzo non saturo)

Nel riprendere integralmente i ragionamenti esposti al precedente capitolo 2.2.7.4, sono stati assunti i valori di 4 per l'area Impianti e 5 per l'area Valle delle Noghere, dedotti dall'abaco di Figura 11 in funzione delle già descritte caratteristiche litologiche della coltre superficiale nelle due zone.

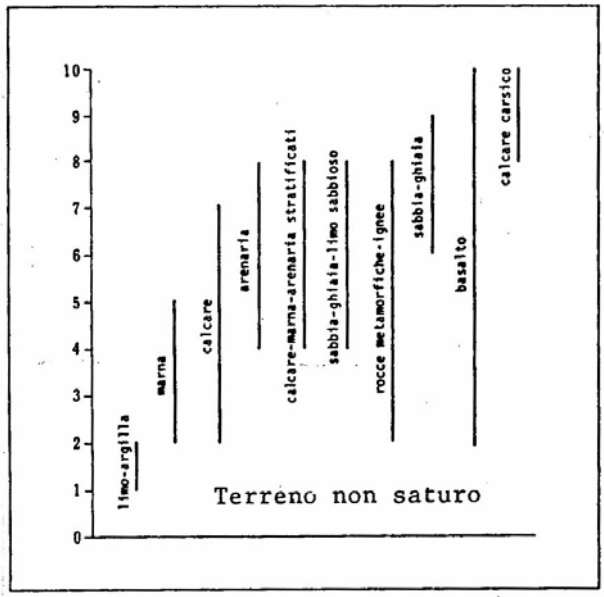


Figura 11: Abaco per il calcolo dell'indice DRASTIC I in funzione delle caratteristiche del mezzo non saturo

In Tavola 9-A è riportata la carta del coefficiente DRASTIC I "Caratteristiche del mezzo non saturo".

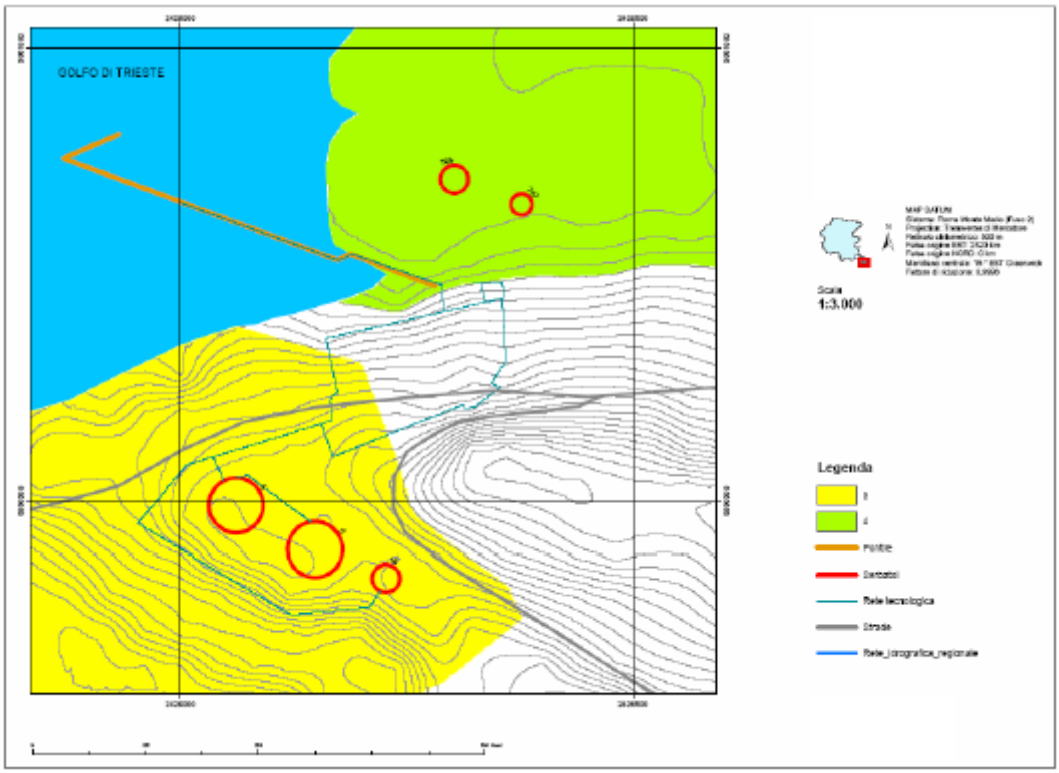


Figura 12: Interpolazione geostatistica del coefficiente DRASTIC "I" (zona non satura)

2.2.7.7 Il Fattore C (permeabilità)

La permeabilità esprime l'attitudine di un mezzo poroso a lasciarsi attraversare dall'acqua per effetto di un gradiente idraulico. Nel sito oggetto del presente studio sono state condotte prove di permeabilità a carico variabile di tipo Lefranc, caratterizzate dal fatto di essere puntuali ed applicabili con risultati migliori in situazioni di acquiferi poco potenti con spessori variabili da pochi centimetri a qualche metro, come appunto quelli presenti nel deposito oggetto dello studio.
Con le prove di permeabilità si misura solo la permeabilità del terreno nell'intorno del foro, dato molto sensibile ad eventuali variazioni di granulometria, addensamento e struttura del terreno. Questa prova si esegue raggiungendo la quota di prova con una generica perforazione e creando all'interno del foro un gradiente idraulico mediante l'immissione o l'estrazione di acqua tale per cui si possa misurare la tendenza al ristabilirsi dell'equilibrio idraulico (prova a carico variabile), oppure misurare la portata del flusso mantenendo costante il gradiente (prova a carico costante).
Nell'arco del 2004 sono state eseguite, unicamente nell'area "Impianti", n. 16 prove di permeabilità di tipo Lefranc, i cui risultati sono riportati in Tabella 3.

Prova	k [cm/sec]
PZS_1	1,07E-04
PM_104	4,32E-03
F_1	2,38E-06
PZ_2	3,02E-04
F_8	8,94E-06
PM_106	1,85E-06
PZP_3	6,20E-07
PZS_3	1,21E-06
PM_107	4,39E-05
PZS_5	8,50E-07
PZP_5	1,54E-04
PM_110	4,14E-04
PM_109	2,41E-05
PZ_6	2,88E-06
F_18	4,44E-06
PZ_4	7,47E-06
Valore medio	**3,37E-04**
Deviazione standard	**0,10%**

Tabella 3: Risultati delle prove di permeabilità tipo Lefranc eseguite nel 2004 nel sito oggetto dello studio

Dai dati di Tabella 3 si desume che la permeabilità del sito risulta molto bassa, con la conseguenza che il parametro DRASTIC C, calcolato con l'abaco di Figura 13, risulta essere pari a 1.
Per quanto concerne la restante porzione di territorio non coperta con le prove Lefranc, ad essa è stato associato lo stesso valore di indice DRASTIC della zona Impianti.

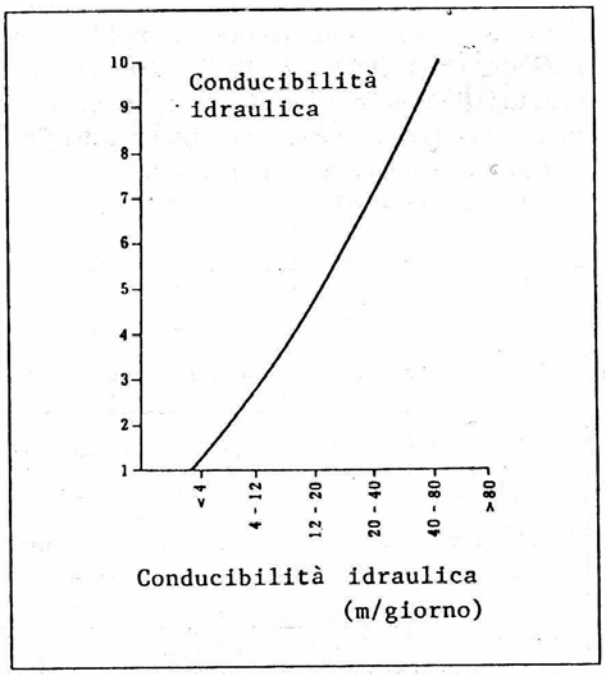


Figura 13: Abaco per il calcolo dell'indice DRASTIC C in funzione della permeabilità (conducibilità idraulica) dell'acquifero

In Figura 14 è riportata la carta del coefficiente DRASTIC C "Conducibilità idraulica", mentre in Figura 15 è riportata la carta di ubicazione delle prove Lefranc e del risultato del krigaggio sui valori noti di permeabilità.

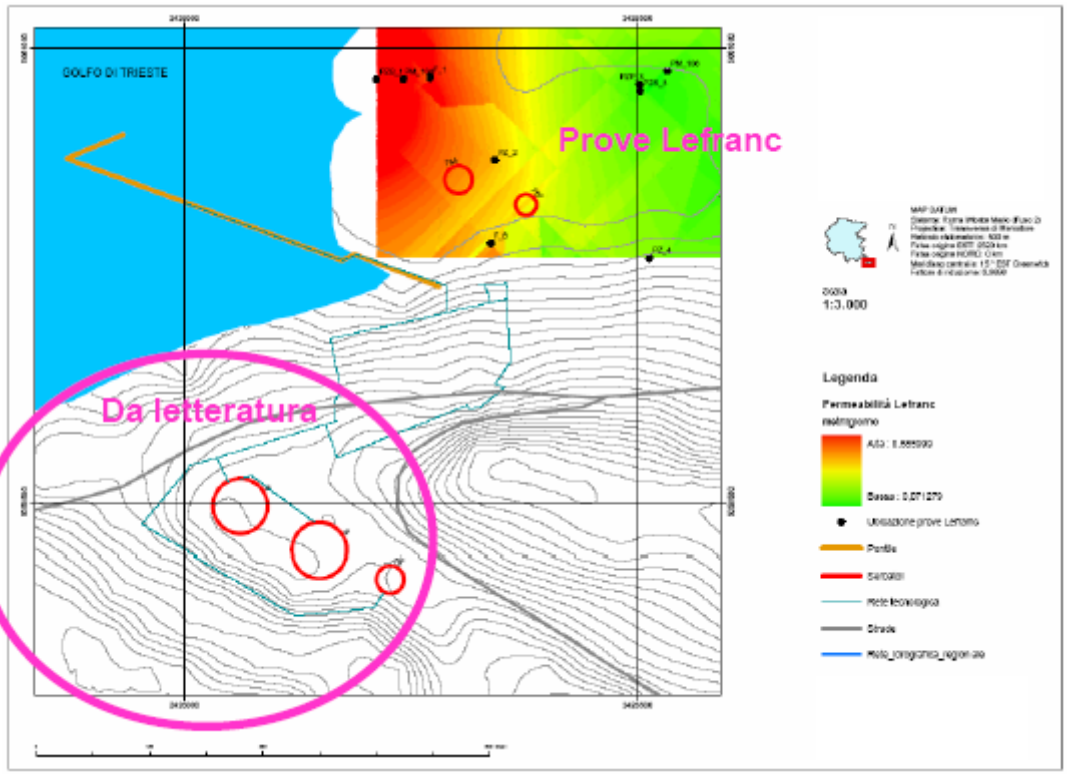


Figura 14: Carta dell'ubicazione delle prove di conducibilità idraulica eseguite con il metodo Lefranc

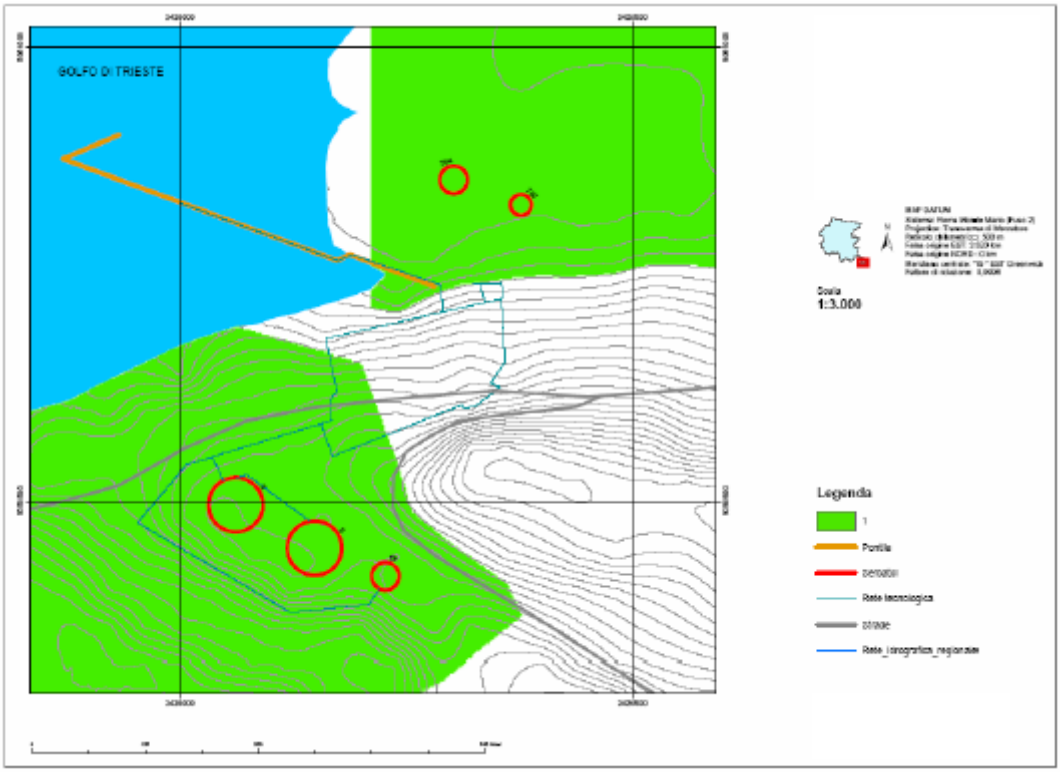


Figura 15: Interpolazione geostatistica del coefficiente DRASTIC "C" (conducibilità idraulica)

2.2.7.8 Risultato del calcolo dell'indice DRASTIC di vulnerabilità dell'acquifero del sito oggetto dello studio.

Applicando i pesi desunti dalla Tabella 2 ai valori dei sette parametri DRASTIC calcolati secondo i principi esposti ai capitoli precendenti, con lo strumento *Raster calculator* del tool *Spatial analyst* di *ArcGIS* è stata prodotta la carta dell'indice calcolato DRASTIC IDRN (normalizzato), rappresentata in Figura 16. Si desume che i valori oscillano tra un minimo compreso nella classe 0.30-0.35 ed un massimo compreso nella classe 0.40-0.45.

Utilizzando la classificazione riportata in Tabella 4, alla quale corrisponde la carta di vulnerabilità DRASTIC di Figura 17, si evince che l'area del deposito ricade nelle categorie di vulnerabilità "Modesta" e "Media".
In particolare si osserva che i serbatoi n. 5, n. 6 e n. 18 della zona Valle delle Noghere sono ubicati in categoria "Modesta", mentre i rimanenti serbatoi n. 764 e n. 767 della zona Impianti ricadono in categoria "Media". L'intero insieme delle reti tecnologiche, rappresentato nella stessa tavola, interseca zone classificate in categoria "Modesta".
Va specificato che per quanto concerne la zona di transizione tra l'area Impianti e l'area Valle delle Noghere, non essendoci la disponibilità di informazioni soprattutto di carattere idrogeologico e di conducibilità idraulica, sulla base del principio di continuità con le aree adiacenti è stato attribuito un indice DRASTIC IDRN di 0.40, che fa ricadere questa zona nella classe di vulnerabilità "Modesta".

Valore IDRN	Categoria di vulnerabilità DRASTIC
< 0.2	Trascurabile
0.2 - 0.4	Modesto
0.4 - 0.6	Medio
0.6 - 0.8	Elevato
0.8 - 1.0	Massimo

Tabella 4: Classificazione qualitativa DRASTIC normalizzata

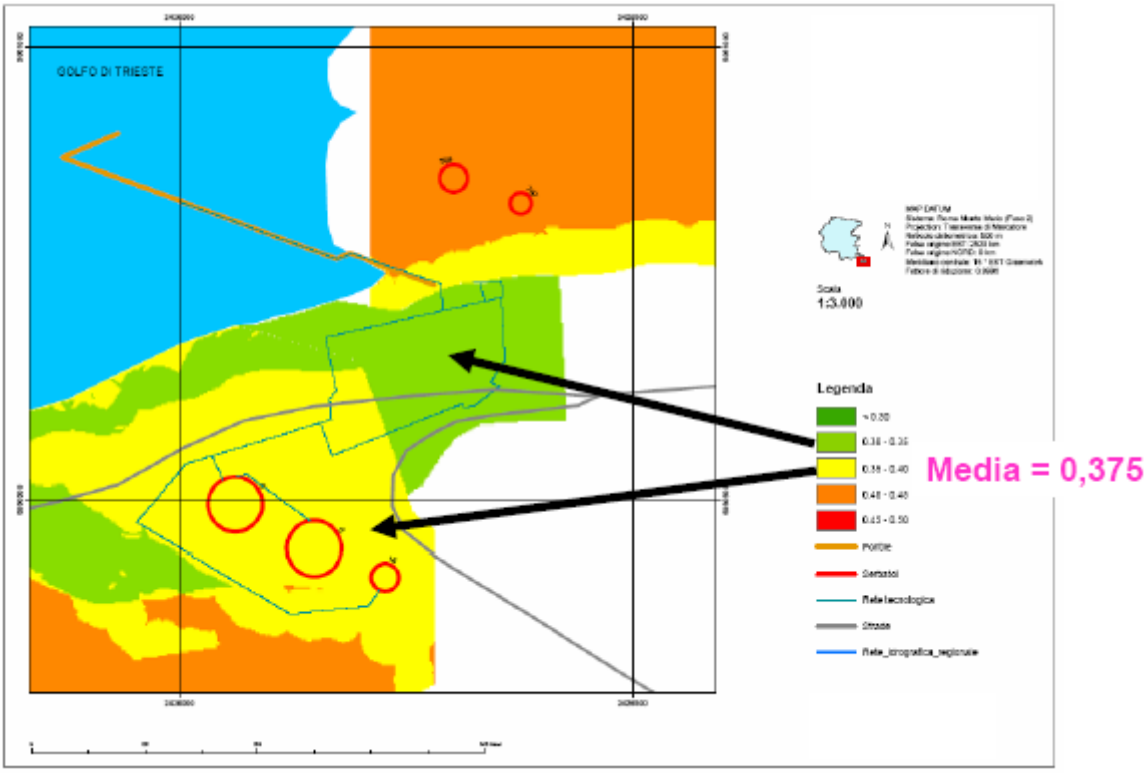


Figura 16: Carta dell'indice DRASTIC IDR (calcolato)

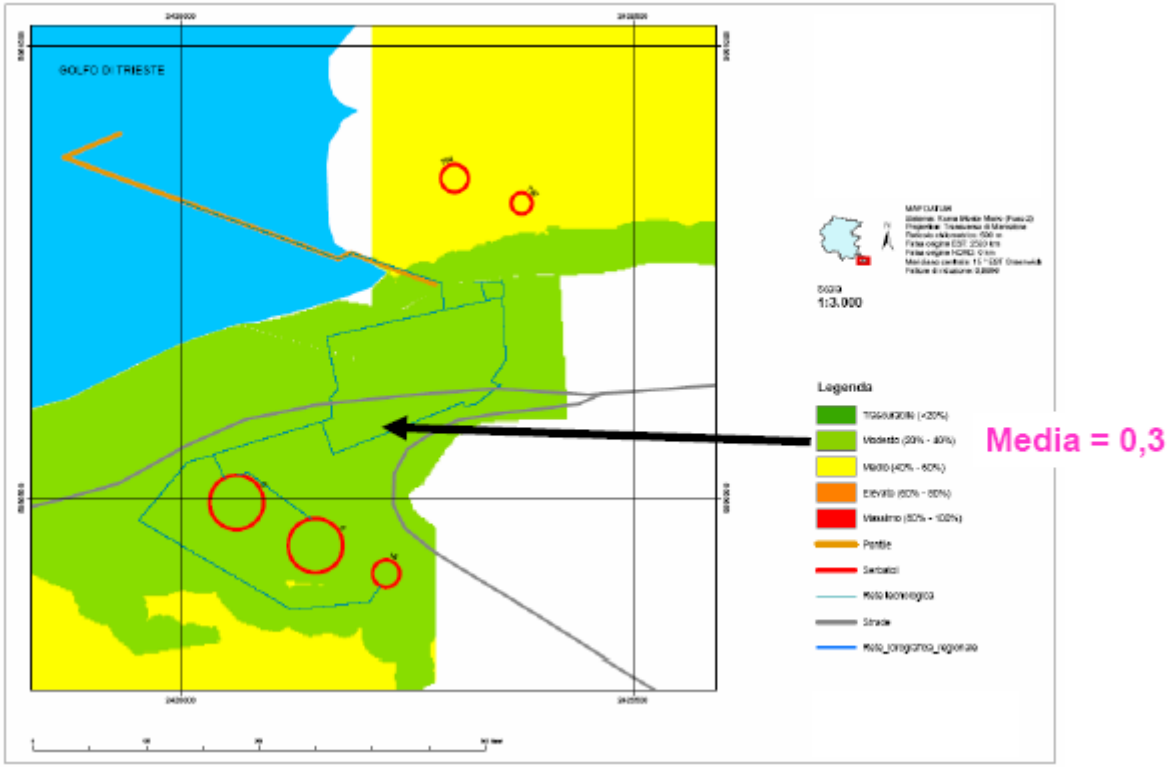


Figura 17: Carta dell'indice DRASTIC IDRN (normalizzato)

2.2.8 Analisi del ruscellamento superficiale

Il ruscellamente superficiale, nel contesto in esame, è il fenomeno che descrive la forma spaziale degli ipotetici flussi di idrocarburo che potenzialmente possono essere rilasciati a seguito di eventi incidentali di rottura dei serbatoi a tetto galleggiante e dalle condotte ad essi collegate.

Questa analisi è stata effettuata con la funzione *steepest path* del tool *3D Analyst* di *ArcGIS*.

2.2.8.1 La creazione del modello tridimensionale continuo del terreno

L'applicabilità delle funzioni geostatistiche (interpolanti) del tool 3D Analyst è subordinata alla georeferenziazione delle informazioni territoriali, con particolare riferimento alla realizzazione di un modello tridimensionale del terreno (DTM) sul quale basare tutti i calcoli.
Nel contesto in esame il modello tridimensionale del terreno è stato realizzato, partendo dal geodatabase delle quote georiferite, mediante la funzione *Inverse Distance Weighted (IDW)*.
Questa funzione, a partire da una matrice discreta di valori misurati, predice i valori delle celle incognite mediante una tecnica che minimizza la varianza tra tutti i possibili errori corrispondenti alle interpolazioni con i valori noti adiacenti, individuando quindi una funzione continua che approssima nel migliore dei modi l'andamento dei punti noti.
In Figura 18 è schematizzato il metodo di calcolo della funzione IDW.

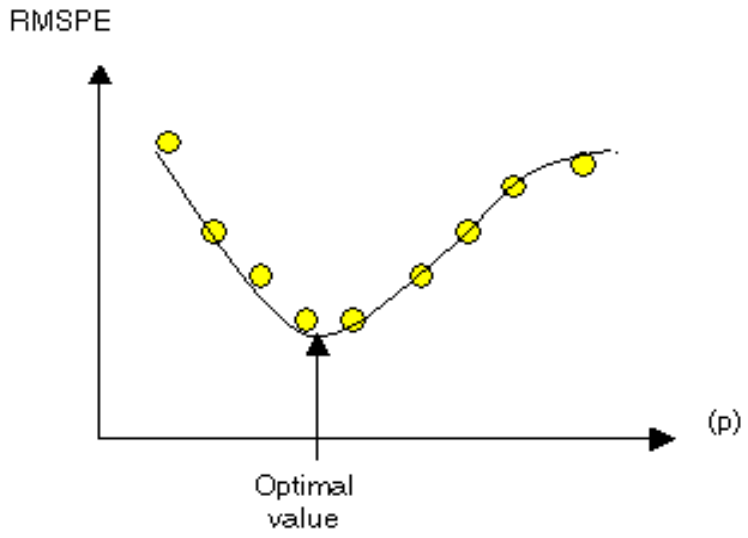


Figura 18: Schema di calcolo del metodo IDW

Siccome il metodo è applicato su una matrice di valori (E, N, Quota), la determinazione dei parametri incogniti viene fatto effettuando i calcoli per ogni nodo della matrice del file raster di output. Conseguentemente, in funzione della disposizione dei valori noti nei dintorni di ogni nodo (neighborhoods values), ogni valore incognito sarà determinato mediante un calcolo su un numero diverso di valori veri. Nello schema di Figura 19 è rappresentato un caso esemplificativo con indicazione della circonferenza di ricerca dei valori noti adiacenti ad un punto incognito.

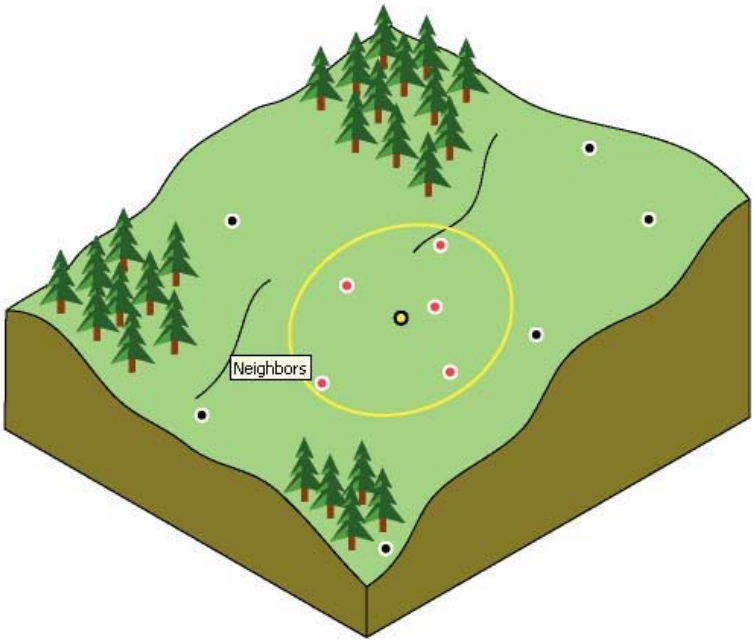


Figura 19: Esempio di calcolo di un valore incognito (punto giallo) mediante un'analisi su 5 valori noti adiacenti (punti rossi). In giallo è evidenziata la circonferenza di ricerca.

2.2.8.2 Calcolo dello steepest path

Nel presente capitolo vengono individuate le linee a pendenza massima (steepest path) che un ipotetico filetto fluido sversato sul suolo, in assenza di barriere fisiche, percorre lungo il gradiente morfologico della superficie topografica.
Questa analisi spaziale, condotta con il tool *3D Analyst di ArcGIS*, permette di focalizzare con precisione le zone del deposito in cui, sulla base di un modello conservativo caratterizzato dall'assenza di barriere fisiche e/o bacini di contenimento, è più probabile che si formino i flussi di idrocarburo conseguenti ad eventi di massiccio sversamento nelle zone di ubicazione dei serbatoi a tetto galleggiante. Questa importante informazione consente di inquadrare lo stato di rischio del ruscellamento superficiale individuando le zone in cui impostare gli interventi procedurali di carattere sia gestionale che protezionistico mirati all'intercettazione dei flussi di idrocarburo.
Il comando *steepest path* consente di tracciare una linea 3D corrispondente al percorso che un'ipotetica palla compie una volta rilasciata ad un determinato punto delle superficie topografica. Questa linea è associabile ad un grafico che rappresenta l'andamento nello spazio della pendenza del percorso individuato. In Figura 20 sono ubicati gli steepest paths calcolati. Si osserva che solamente i percorsi con origine nelle zone indicate St_1, St_2 ed St_3 hanno un percorso teorico (conservativo) che potenzialmente può arrivare a mare.
Nessuno dei percorsi calcolati presenta forma e/o lunghezza tali da ipotizzare il raggiungimento dei corsi d'acqua superficiali esistenti in zona.
Si sottolinea che questo tipo di analisi ha lo scopo di calcolare quelli che possono essere definiti come "percorsi teorici" e, come tali, molto conservativi, che non tengono conto di piccole variazioni locali e/o presenza di ostacoli di qualsiasi genere. L'utilità pratica risiede nella possibilità di individuare la direzione del gradiente di pendenza così da ottimizzare l'eventuale posizionamento dei sistemi di protezione attiva necessari a mitigare gli effetti della contaminazione superficiale da ruscellamento in caso di fuoriuscita di liquidi dai punti critici.

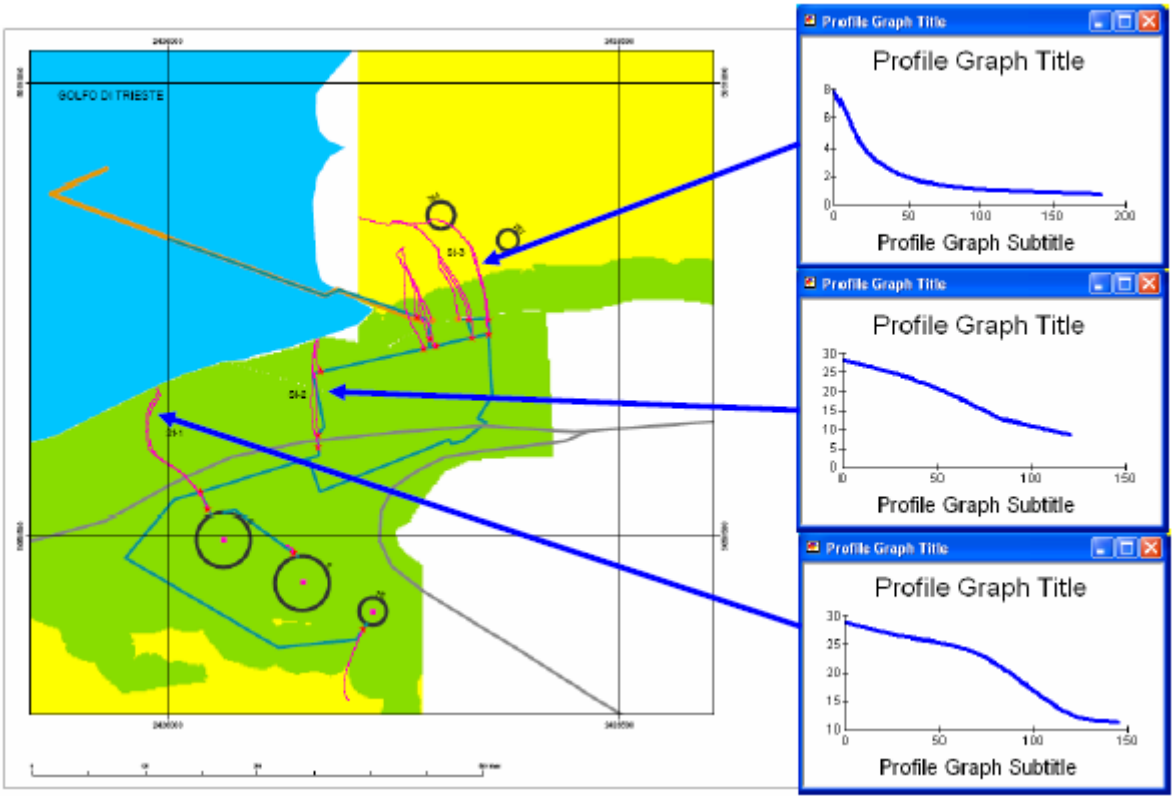


Figura 20: Calcolo degli *steepest path* relativi all'analisi del ruscellamento superficiale

3 Intersezione stato attivo/stato passivo

Con l'analisi dello stato attivo richiamata al capitolo 2.1, sono state calcolate le frequenze di accadimento degli scenari incidentali ipotizzabili nell'impianto. Analogamente, con l'analisi dello stato passivo trattata al capitolo 2.2, è stato determinato il valore del coefficiente DRASTIC IDRN per tutta l'area dell'impianto.

La logica probabilistica dell'analisi del rischio ecotossico prevede l'intersezione spaziale delle due tipologie di frequenze calcolate e descritte al precedente paragrafo, da attuare moltiplicando i valori delle frequenze attese dello stato attivo di ogni singolo evento incidentale considerato per i valori dell'indice DRASTIC IDRN calcolati secondo una maglia di 2 m x 2 m su tutta l'area dello stabilimento (stato passivo). Considerato che tutti i suddetti punti critici ricadono in zone di vulnerabilità DRASTIC classificate "Modeste" (vedi Figura 17), il fattore DRASTIC a moltiplicare è risultato sempre pari a 0,3.

Il risultato dell'intersezione stato attivo - stato passivo è rappresentato in Tabella 5, nella quale, per chiarezza espositiva, in rosso sono evidenziati gli eventi ritenuti credibili (frequenze attese >= 10^{-6}) ed in verde quelli non credibili (frequenze attese < 10^{-6}).

A fini puramente esemplificativi, considerati i valori ottenuti dal calcolo descritto, oltre alla frequenza di cut off di $1.0*10^{-6}$, sono stati eseguiti confronti anche con frequenze di cut off di $2.0*10^{-6}$ e $3.0*10^{-6}$. Il ragionamento è riportato in Figura 21 in cui, per chiarezza espositiva, le celle evidenziate in colore rosso rappresentano le frequenze maggiori (eventi più probabili) del corrispondente valore di cut off indicato nell'intestazione della relativa colonna, mentre quelle evidenziate in colore verde rappresentano le frequenze minori (eventi meno probabili), tali da rendere non credibile il corrispondente evento incidentale.

TOP	ELEMENTO	FREQUENZE DI RILASCIO (OCC/ANNO)	Frequenza di CUT OFF (DRASTIC IDRN = 0,3)			CLASSIFICAZIONE
			1,00E-06	2,00E-06	3,00E-06	
1	***Sovrariempimento in fase di caricamento del serbatoio***	8,00E-06	2,40E-06	2,40E-06	2,40E-06	Molto improbabile
2	***Perdita da accoppiamento flangiato***	2,10E-01	6,30E-02	6,30E-02	6,30E-02	Molto probabile
3	***Affondamento del Tetto galleggiante***	8,80E-04	2,64E-04	2,64E-04	2,64E-04	Molto improbabile
4a	***Pompa centrifuga a tenuta singola per fori da 1/4"***	1,20E-03	3,59E-04	3,59E-04	3,59E-04	Improbabile
4b	***Pompa centrifuga a tenuta singola per fori da 1"***	9,98E-06	2,99E-06	2,99E-06	2,99E-06	Molto improbabile
4c	Pompa centrifuga a tenuta singola per fori da 4"	2,00E-06	5,99E-07	5,99E-07	5,99E-07	Molto improbabile
5a	***Pompa centrifuga a tenuta doppia per fori da 1/4"***	1,20E-04	3,59E-05	3,59E-05	3,59E-05	Molto improbabile
5b	***Pompa centrifuga a tenuta doppia per fori da 1"***	9,98E-06	2,99E-06	2,99E-06	2,99E-06	Molto improbabile
5c	Pompa centrifuga a tenuta doppia per fori da 4"	2,00E-06	5,99E-07	5,99E-07	5,99E-07	Molto improbabile
6	***Linea entrata TK18 tratto da 12" per fori da 1"***	9,50E-06	2,85E-06	2,85E-06	2,85E-06	Molto improbabile
7	***Linea entrata TK18 tratto da 8" per fori da 1"***	6,05E-06	1,81E-06	1,81E-06	1,81E-06	Molto improbabile
8	***Linea uscita TK18 tratto da 12" per fori da 1"***	7,77E-06	2,33E-06	2,33E-06	2,33E-06	Molto improbabile
9	***Linea uscita TK18 tratto da 8" per fori da 1"***	6,91E-06	2,07E-06	2,07E-06	2,07E-06	Molto improbabile
10	***Linea entrata TK5 tratto da 14" per fori da 1"***	7,20E-06	2,16E-06	2,16E-06	2,16E-06	Molto improbabile
11	Linea uscita TK5 tratto da 10" per fori da 1"	1,13E-06	3,39E-07	3,39E-07	3,39E-07	Molto improbabile
12	***Linea uscita TK5 tratto da 8" per fori da 1"***	7,85E-06	2,36E-06	2,36E-06	2,36E-06	Molto improbabile
13	***Linea entrata TK6 tratto da 10" per fori da 1"***	8,84E-06	2,65E-06	2,65E-06	2,65E-06	Molto improbabile
14	Linea entrata TK6 tratto da 12" per fori da 1"	2,59E-06	7,77E-07	7,77E-07	7,77E-07	Molto improbabile
15	***Linea uscita TK6 da 10" per fori da 1"***	8,84E-06	2,65E-06	2,65E-06	2,65E-06	Molto improbabile
16	***Linea darsena verso TK18 VM6 da 8" per fori da 1"***	7,85E-06	2,36E-06	2,36E-06	2,36E-06	Molto improbabile
17	***Linea darsena verso TK18 VM7 da 8" per fori da 1"***	7,85E-06	2,36E-06	2,36E-06	2,36E-06	Molto improbabile
18	***Linea darsena verso TK5 da 14" per fori da 1"***	6,55E-06	1,96E-06	1,96E-06	1,96E-06	Molto improbabile
19	***Linea darsena verso TK6 da 14" per fori da 1"***	6,55E-06	1,96E-06	1,96E-06	1,96E-06	Molto improbabile

Tabella 5: Effetti dello stato passivo sulle frequenze calcolate nell'analisi dello stato attivo

Questa ulteriore analisi è stata condotta per evidenziare il fatto che molti degli eventi analizzati, pur considerati credibili ai fini della presente analisi di rischio avendo frequenze maggiori di **$1.0*10^{-6}$**, presentano valori non molto distanti da questo limite e di pari ordine di grandezza. Si nota infatti che, aumentando di poco le frequenze di cut off, molti di essi diventano eventi non credibili (evidenziati in verde). Si passa infatti da 19 eventi credibili con cut off a $1.0*10^{-6}$, a 16 eventi credibili con cut off a $2.0*10^{-6}$ (- 16%), per arrivare ad appena 4 eventi credibili con cut off di $3.0*10^{-6}$ (- 79%).

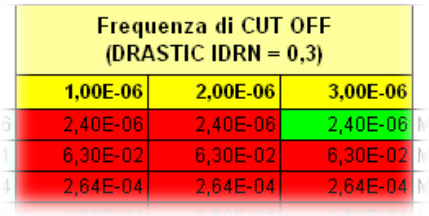


Figura 21: Particolare che evidenzia le tre colonne corrispondenti alle frequenze di cut off per la stima degli eventi credibili

4 Conclusioni

La presente memoria descrive l'esperienza di un caso studio trattato in seno al Comitato Tecnico Regionale dei Vigili del Fuoco del Friuli Venezia Giulia, concernente l'istruttoria tecnica per la revisione quinquennale di un Rapporto di Sicurezza relativo ad un deposito costiero di idrocarburi liquidi stoccati in una serie di serbatoi a tetto galleggiante con presenza di scenari incidentali di rischio ecotossico, ubicato in Comune di Muggia in provincia di Trieste (Italia).

4.1 Criteri di valutazione del rischio

Con l'analisi dello stato attivo sono state calcolate le frequenze di accadimento degli scenari incidentali ipotizzabili nell'impianto oggetto dello studio. Analogamente, con l'analisi dello stato passivo, è stato determinato il valore del coefficiente DRASTIC IDRN per tutta l'area dell'impianto.
La logica probabilistica dell'analisi del rischio ecotossico prevede l'intersezione spaziale delle due tipologie di frequenze calcolate e descritte al precedente paragrafo, da attuare moltiplicando i valori delle frequenze attese dello stato attivo di ogni singolo evento incidentale considerato per i valori dell'indice DRASTIC IDRN calcolati secondo una maglia di 2 m x 2 m su tutta l'area dello stabilimento (stato passivo). Considerato che tutti i suddetti punti critici ricadono in zone di vulnerabilità DRASTIC classificate "Modeste" il fattore DRASTIC a moltiplicare è risultato sempre pari a 0,3.
Sono stati considerati credibili, con tutte le opportune conseguenze, tutti e soli quegli eventi che presentano, a seguito dell'intersezione stato attivo - stato passivo, valori di frequenze attese maggiori o uguali a $1.0*10^{-6}$ (frequenza di CUT OFF).
A fini puramente esemplificativi, considerati i valori ottenuti dal calcolo descritto, oltre alla frequenza di cut off di $1.0*10^{-6}$, sono stati eseguiti confronti anche con frequenze di cut off di $2.0*10^{-6}$ e $3.0*10^{-6}$.
Quest'ulteriore analisi è stata condotta per evidenziare il fatto che molti degli eventi analizzati, pur considerati credibili ai fini della presente analisi di rischio avendo frequenze maggiori di $1.0*10^{-6}$, presentano valori non molto distanti da questo limite e di pari ordine di grandezza. Si nota infatti che, aumentando di poco le frequenze di cut off, molti di essi diventano eventi non credibili (evidenziati in verde). Si passa infatti da 19 eventi credibili con cut off a $1.0*10^{-6}$, a 16 eventi credibili con cut off a $2.0*10^{-6}$ (- 16%), per arrivare ad appena 4 eventi credibili con cut off di $3.0*10^{-6}$ (- 79%).

4.2 Strumenti di mitigazione del rischio

In riferimento alla credibilità degli eventi considerati, basata sui criteri esposti al paragrafo 4.1, al fine di evitare che il rilascio ecotossico possa raggiungere il ricettore sensibile (mare) sono stati prescritti i seguenti interventi di mitigazione:

- Eventi n. 1 e 3
    - Tutti i serbatoi considerati, in virtù dei disposti normativi per la categoria delle sostanze contenute, sono dotati di bacino di contenimento atto a contenere la totalità del liquido presente. I sistemi di pompaggio esistenti, adeguatamente mantenuti in perfetto stato di efficienza secondo le procedure implementate nel SGS aziendale, sono in grado di garantire l'estrazione dal bacino delle sostanze liquide in tempi sufficientemente brevi in coerenza con lo stato di vulnerabilità delle zone in cui sono ubicati.

- Eventi n. 4a, 4b, 5a e 5b
    - Il bacino di contenimento impermeabile, dotato di apposita cordolatura in corrispondenza dell'ubicazione delle pompe, è tale da contenere il massimo volume di prodotto che può essere rilasciato e di cui ai calcoli sopra riportati.

- Eventi n. 2, 6-10, 12, 13, 15-19
    - In corrispondenza di tutte le flange che evidenziano un probabile percorso di ruscellamento del prodotto verso mare verranno posizionati appositi "palloni" segnalatori che evidenziano anche il minimo gocciolamento da flangia. Apposita procedura di controllo verrà inoltre adottata al fine di far effettuare una verifica almeno bi-settimanale degli stessi e di tutte le altre flange presenti in deposito. Per quanto concerne il rilascio da flange poste all'interno dei bacini di contenimento dei serbatoi la Società si impegna a garantire la bonifica del terreno nei tempi coerenti con i valori di conducibilità idraulica stimati per le suddette aree di deposito, che nello specifico e nel caso più gravoso, risultano essere inferiori a circa 300 giorni.

Bibliografia selezionata

[1] Aller L., Bennet T., Lehr J.H., Petty R.J.: *DRASTIC: A standardized system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeological settings*, EPA/600/2-85/018, National Water Well Association, Worthington, 1985.

[2] Aller L., Bennet T., Lehr J.H., Petty R.J.: DRASTIC: *A standardized system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeological settings*, EPA/600/2-87/035, Washington D.C., 1987.

[3] Beretta G.P., *Idrogeologia per il disinquinamento delle acque sotterranee*, pp. 545-547, Pitagora Ed. Bologna, III Edizione 1997.

[4] Cicogna A., Gani M, Danuso F., 1999. *Applicazioni modellistiche per la gestione e pianificazione delle risorse idriche del territorio*. Atti convengo «Strumenti informatici e statistici per la valutazione delle risorse agroambientali». Udine 24-25 novembre 1999. Bollettino della Societa Italiana di Scienza del Suolo 949, 505- 528.

[5] Giardini L., Finocchio E., 1987. *Piano generale di bonifica irrigua. Parte Agronomica. Consorzio per la Bonifica e lo Sviluppo Agricolo della Bassa Friulana.* Udine.

[6] Danuso F., Gani M., Giovanardi R., 1994 b. *Field water balance: BIdriCo 2. In «Crop Water Models in Practise»*, Pereira L.S., Van den Broek, Kabat and Allen (eds), Wageningen Pers.

[7] Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana, n. 124 del 29 maggio 1999. Supplemento ordinario n. 101.

[8] Min.LL.PP. (1961-1990). *Annali Idrologici.*

[9] ARPA FVG - OSMER (www.arpa.fvg.it), Archivio dati giornalieri di precipitazione, http://www.osmer.fvg.it/.