

APPENDICE N**ANALISI DI SENSIBILITA'**

L'analisi di sensibilità è una tecnica comunemente usata nel campo della modellistica per valutare l'effetto della variabilità e dall'incertezza dei parametri che intervengono nelle procedure di calcolo sul risultato ottenuto dall'applicazione di un determinato modello matematico. In questa appendice, lo strumento dell'analisi di sensibilità viene applicato nell'ambito dell'analisi di rischio con i seguenti obiettivi:

- Quantificare l'effetto della variazione dei diversi parametri sito-specifici e geometrici sul valore del rischio calcolato;
- Individuare una lista di parametri che debbono prioritariamente essere determinati mediante misure sito-specifiche;
- Fornire una indicazione su quale sia la scelta più conservativa per il valore di un determinato parametro, in presenza di un set di dati.

Tra i parametri, non sono stati considerati quelli di esposizione, il cui effetto sull'esposizione e quindi sul rischio è di tipo lineare, visto che compaiono esplicitamente nelle equazioni per il calcolo dell'esposizione stessa. Per quanto attiene agli altri parametri (sito-specifici e geometrici) questi rientrano di fatto nel calcolo della concentrazione al punto di esposizione, nei quali entrano più propriamente come parametri per il calcolo dei fattori di trasporto. Per questo motivo, lo studio di sensibilità presentato in questa appendice è stato focalizzato riferendosi esclusivamente alle equazioni relative al calcolo dei fattori di trasporto definite così come descritto nel Capitolo 3.3 del presente documento.

N.1 Criteri di stima della sensibilità.

La stima della sensibilità di ogni fattore di trasporto ai parametri presenti nelle equazioni per il loro calcolo è stata effettuata utilizzando diversi indicatori, il cui significato viene brevemente di seguito descritto.

Sensibilità relativa / relativa o rapporto di sensibilità

La sensibilità relativa/relativa, definita dalla equazione (N.1), consente di determinare la variazione percentuale di una grandezza di output in funzione di una variazione percentuale del parametro in input.

$$s = \frac{x_{default}}{f(x_{default})} \frac{\delta f(x)}{\delta(x)} \quad (N.1)$$

Il calcolo della sensibilità relativa richiede di identificare un valore di riferimento (o di default) per il parametro considerato (x) e di conseguenza per il fattore da calcolare (y) e di valutare la variazione (dy) del fattore indotta da una variazione (dx) del parametro stesso. E' quindi evidente che il risultato ottenuto in termini di sensibilità può variare a seconda del valore di riferimento scelto. Per questo motivo, in questa appendice, l'analisi di sensibilità è stata ripetuta in corrispondenza a tre condizioni di riferimento, scelte ovviamente all'interno dell'intervallo di oscillazione atteso per ogni specifico parametro. In particolare, per rappresentare l'intero intervallo di oscillazione, le tre condizioni di riferimento sono state scelte in corrispondenza del valore minimo, di quello di default e di quello massimo. Laddove il valore di default corrispondesse al valore massimo o al valore minimo dell'intervallo di oscillazione, l'analisi di sensibilità è stata effettuata in corrispondenza anche del valore medio che il parametro può assumere.

Naturalmente l'informazione che si ottiene dall'analisi di sensibilità relativa/relativa fornisce esclusivamente indicazioni su quanto varia percentualmente il valore di output per una variazione percentuale del parametro in input, prescindendo dall'ampiezza del range di variazione del parametro. Pertanto, questo indicatore non fornisce indicazioni sul grado di indeterminazione della stima di un determinato parametro. Si può supporre che tale indeterminazione sia in qualche modo proporzionale all'intervallo di oscillazione potenziale di un parametro. In altre parole, l'indeterminazione nella stima del parametro f_{oc} , che può oscillare in un intervallo di diversi ordini di grandezza, è senz'altro superiore a quella della porosità, che può al massimo variare in un range molto ristretto e sempre dello stesso ordine di grandezza. Una risposta all'esigenza di includere questo aspetto nello studio di sensibilità è venuto dalla introduzione di due ulteriori indicatori, definiti *Score*, che tenessero conto, oltre che della sensibilità relativa, anche del potenziale range di variazione del parametro. Il primo indicatore applicato è il seguente:

Score 1

$$score1 = s \cdot \frac{x_{max}}{x_{min}} \quad (N.2)$$

dove:

x_{max} = valore massimo del parametro

x_{min} = valore minimo del parametro

Questo indicatore è ottenuto moltiplicando la sensibilità relativa, calcolata tramite l'equazione (N.1), per il rapporto tra il valore massimo e minimo che il parametro può potenzialmente assumere, definiti facendo riferimento ai range, proposti nelle linee guida. Poiché questo approccio risulta molto sensibile all'ampiezza di variazione del parametro e si è ritenuto opportuno applicare un ulteriore indicatore di score (RAGS, EPA 2002):

Score 2

$$score2 = s \cdot \frac{(x_{\max} - x_{\min})}{x_{\text{default}}} \quad (\text{N.3})$$

dove:

x_{\max} = valore massimo del parametro

x_{\min} = valore minimo del parametro

x_{default} = valore di default del parametro

Questo indicatore prevede ancora una volta un termine legato alla massima oscillazione potenziale di un parametro, che però viene riportata come differenza (e non più come rapporto) e riferita comunque al valore di default (o medio) del parametro.

I risultati dell'analisi di sensibilità rispetto ai parametri geometrici e sito-specifici sono presentati nei paragrafi seguenti, seguendo la classificazione dei Capitoli 3.1 e 3.2.

- Geometria della sorgente di contaminazione in zona satura;
- Caratteristiche fisiche del terreno in zona satura;
- Geometria della zona satura di suolo;
- Geometria della sorgente di contaminazione in zona insatura;
- Caratteristiche fisiche del terreno in zona insatura;
- Geometria della zona insatura di suolo;
- Caratteristiche degli ambienti aperti;
- Caratteristiche degli ambienti chiusi;

Tutti i valori riportati sono stati ottenuti applicando le equazioni definite nel presente documento per il calcolo dei fattori di trasporto, utilizzando per tutti i fattori, tranne che per quelli di volta in volta interessati allo studio di sensibilità, i valori di default di livello. A scopo esemplificativo, come contaminante è stato selezionato il Benzene.

I seguenti paragrafi sono così organizzati: nel Capitolo N.2 si propone un esame dettagliato per ciascun parametro del suo effetto sul valore calcolato dei diversi fattori di trasporto in cui entra in gioco. Il Capitolo N.3 fornisce informazioni sull'esito dell'analisi

di sensibilità, sul ranking dei diversi parametri effettuato in base allo Score 2, di derivazione EPA, e sulle indicazioni relative alla scelta del valore più conservativo di un dato parametro, in presenza di un set di dati.

N.2 Effetto dei parametri sul calcolo dei fattori di trasporto

N.2.1 Geometria della sorgente di contaminazione in zona satura

I parametri necessari a caratterizzare la sorgente di contaminazione in zona satura sono l'estensione della stessa in direzione del flusso di falda (W) e l'estensione nella direzione ortogonale al flusso di falda (S_w).

Estensione della sorgente in direzione del flusso di falda W (cm)

Interviene nel calcolo del fattore di lisciviazione LF e non ha un range di oscillazione univocamente definito. Per questo motivo si è scelto arbitrariamente di far variare il parametro tra 2500 cm e 5500 cm. Riportiamo in Figura N.1 il grafico che rappresenta l'andamento del fattore di lisciviazione (LF) in funzione di W :

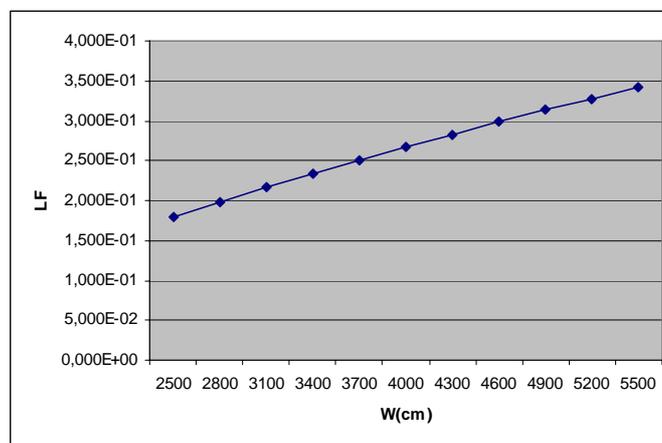


Fig. N.1

Occorre notare che data l'impossibilità di definire univocamente un intervallo di oscillazione di questo parametro geometrico, non si è proceduto al calcolo degli indici di score.

Estensione della sorgente in direzione ortogonale al flusso di falda S_w (cm).

L'estensione della sorgente nella direzione ortogonale rispetto al flusso di falda entra in gioco nella determinazione del fattore di diluizione attenuazione in falda (DAF).

Il modello applicato è l'equazione di Domenico che come risultato ci restituisce il valore di $1/DAF$. Anche in questo caso non esiste un range di oscillazione univoco per il parametro ed è stato quindi adottato lo stesso utilizzato per W . In fig. N.2 è riportato l'andamento di $1/DAF$ rispetto a S_w .

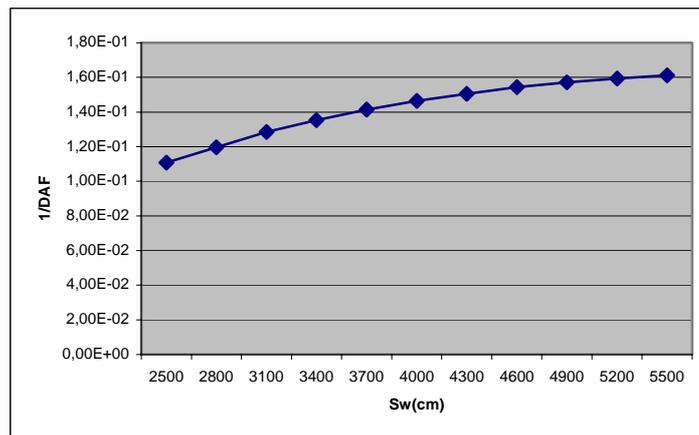


Fig. N.2

Occorre notare che data l'impossibilità di definire univocamente un intervallo di oscillazione di questo parametro geometrico, non si è proceduto al calcolo degli indici di score.

N.2.2 Caratteristiche fisiche del terreno in zona satura

Si tratta dei parametri necessari a caratterizzare la zona di suolo saturo e, nel caso del calcolo dei fattori di trasporto, sono la conducibilità idraulica del terreno saturo K_{sat} , il gradiente idraulico i e la porosità totale θ_T .

Conducibilità idraulica del terreno saturo K_{sat}

Entra nel calcolo del fattore di lisciviazione LF, poiché determina insieme al gradiente idraulico la velocità dell'acqua in falda, e nel calcolo di $1/DAF$. Il range di variazione è stato definito in base ai valori di letteratura già proposti nelle presenti linee guida e va dal valore minimo di $5.56E-06$ cm/s al massimo di $8.25E-03$ cm/s. In figura N.3 è riportato l'andamento di LF ed in figura N.4 quello di $1/DAF$.

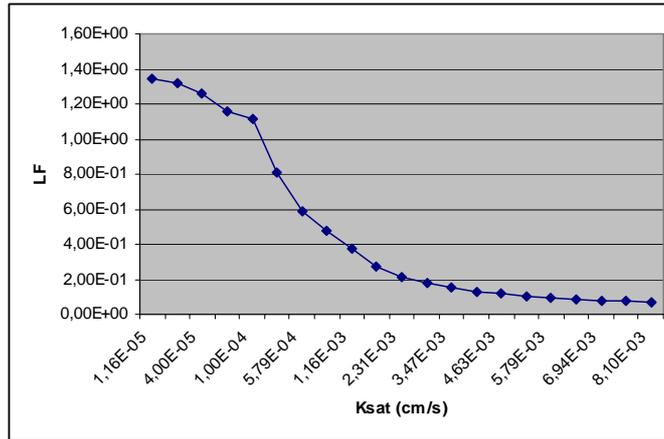


Fig. N.3

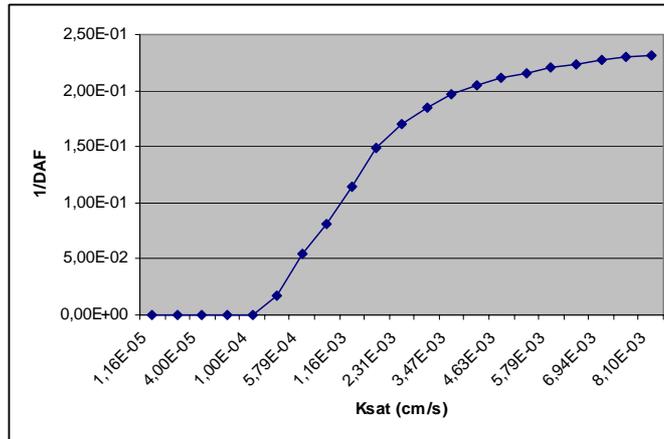


Fig. N.4

Gradiente idraulico *i*

Anche il gradiente idraulico contribuisce alla determinazione del fattore di lisciviazione e del fattore di diluizione ed attenuazione DAF entrando in gioco nel calcolo della velocità di Darcy. Il parametro va ricavato da misure dirette e per l'analisi di sensibilità è stato ipotizzato un range che va da 0.001 a 0.1. In figura N.5 e N.6 si riportano gli andamenti di LF e 1/DAF in funzione di *i*.

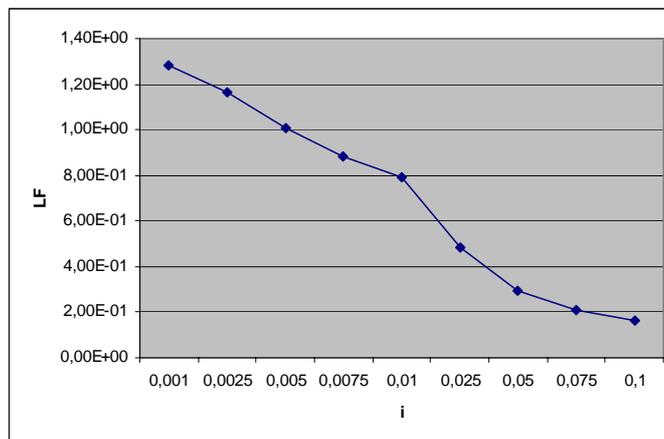


Fig. N.5

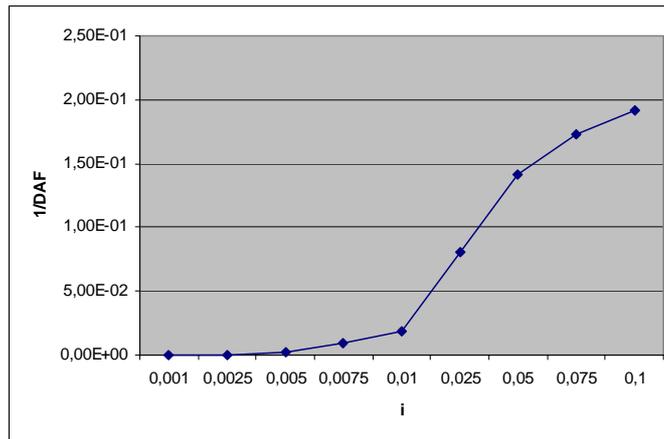


Fig. N.6

Dispersività longitudinale α_x .

Questo parametro interviene nel calcolo del fattore di dispersione laterale (1/DAF). E' stato calcolato utilizzando l'equazione proposta da Xu and Eckstein:

$$\alpha_x = 0.83 \cdot (\log L)^{2.414} \tag{N.4}$$

Dove L è un fattore di scala.

Si è ipotizzato di far variare L da 10 m a 1000 m ottenendo per α_x un range che va da 0.83 m a 11.77 m. Non sono stati valutati valori di L superiori in quanto come si vede dall'andamento riportato in Figura N.7, in questo caso il valore di 1/DAF tende a zero.

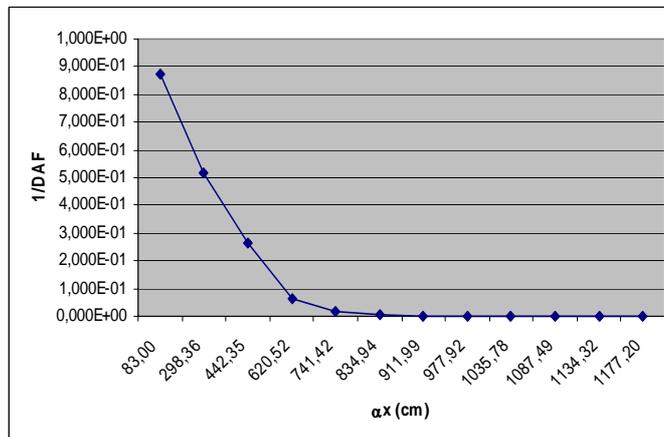


Fig. N.7

Porosità totale del terreno θ_T

Nel caso della zona satura di terreno, la porosità totale interviene nella determinazione del fattore di ritardo R che attraverso l'equazione di Domenico ci permette di determinare 1/DAF. Attraverso un'accurata ricerca bibliografica, già presentata in queste linee guida,

abbiamo definito un range di variazione che va da 0.35 a 0.49. In figura N.8 riportiamo l'andamento di $1/DAF$ rispetto a θ_T .

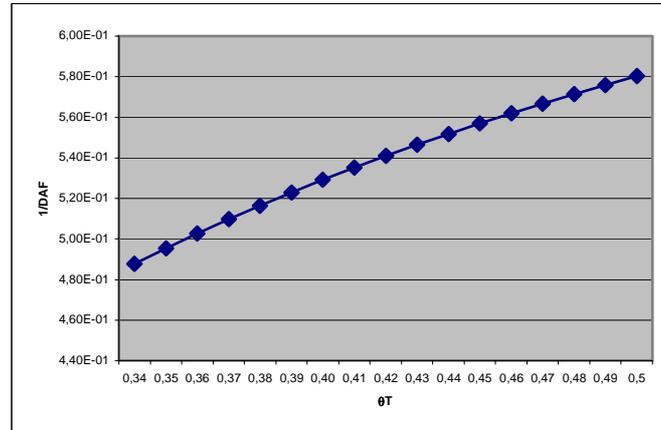


Fig. N.8

N.2.3 Geometria della zona satura di suolo

Spessore della zona di miscelazione in falda δ_{gw} .

Rappresenta lo spessore, partendo dal piano di falda, entro il quale si ipotizza avvenga la miscelazione del contaminante percolato da una sorgente posta in zona insatura. Interviene quindi nel calcolo del fattore di Lisciviazione LF. Anche per questo parametro non esiste un range di variazione univoco e si è ipotizzata arbitrariamente una variazione da un minimo di 100 cm ad un massimo di 500 cm. In figura N.9 è riportato l'andamento di LF in funzione di δ_{gw} .

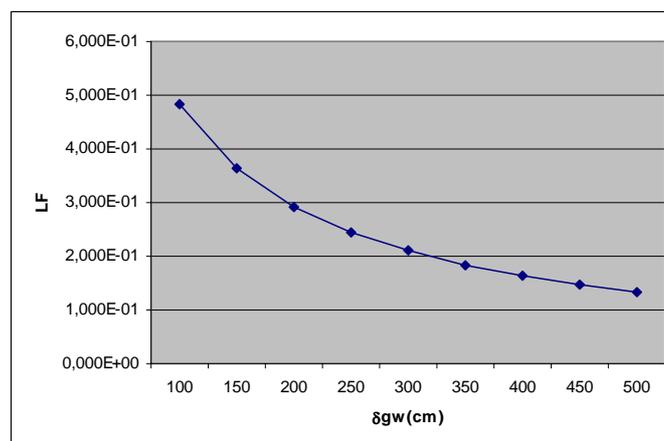


Fig. N.9

Occorre notare che data l'impossibilità di definire univocamente un intervallo di oscillazione di questo parametro, non si è proceduto al calcolo degli indici di score.

N.2.4 Geometria della sorgente di contaminazione in zona insatura

Profondità del top della sorgente rispetto al piano campagna L_s

Interviene nel calcolo dei fattori di trasporto VF_{samb} , VF_{sesp} e VF_{wesp} .

Occorre notare che all'aumentare di L_s , diminuisce lo spessore della sorgente di contaminazione d_s . L'andamento dei fattori di trasporto, riportato nei grafici seguenti (Fig. N.10, N.12), è inoltre valido anche per il parametro L_T .

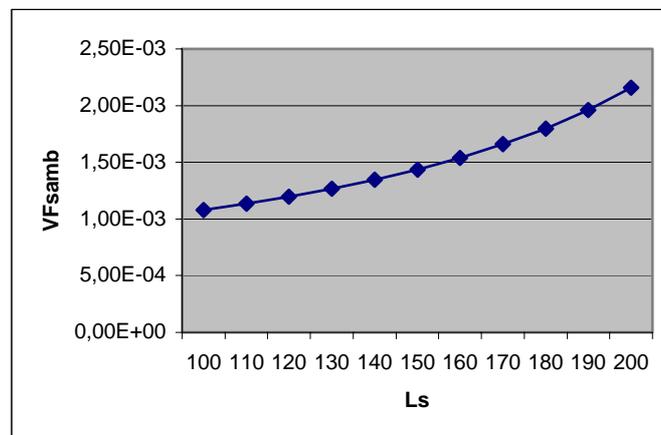


Fig. N.10

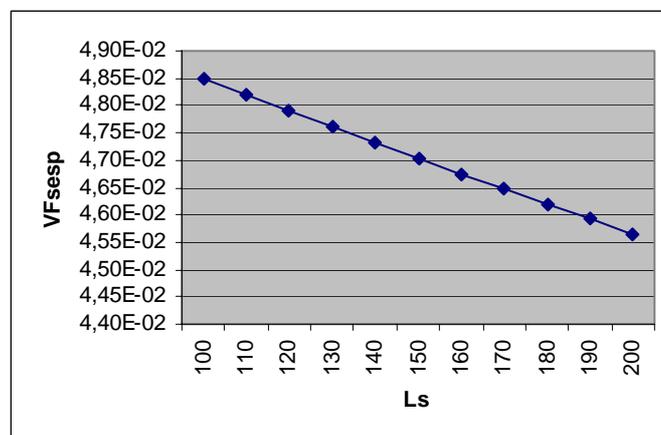


Fig. N.11

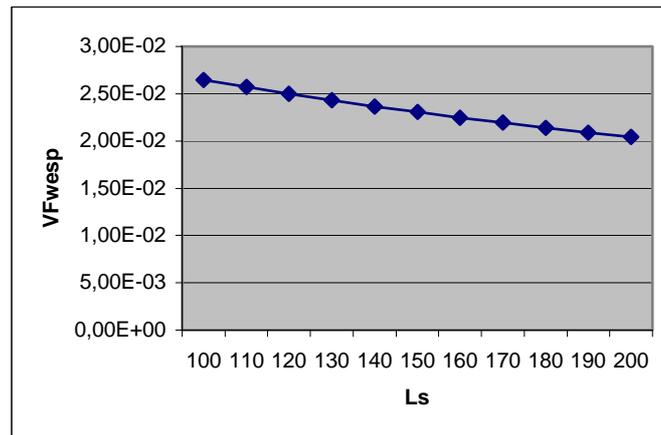


Fig. N.12

Occorre notare che data l'impossibilità di definire univocamente un intervallo di oscillazione di questo parametro, non si è proceduto al calcolo degli indici di score.

N.2.5 Caratteristiche fisiche del terreno in zona insatura

I parametri necessari a caratterizzare la zona insatura e che entrano in gioco nelle equazioni per il calcolo dei fattori di trasporto sono la densità del suolo ρ_s , la porosità totale del terreno θ_T , il contenuto volumetrico d'acqua θ_w , il contenuto volumetrico d'acqua nella frangia capillare θ_{wcap} , la frazione di carbonio organico nel suolo f_{oc} e l'infiltrazione efficace I_{ef} .

Non è stata effettuata l'analisi sul contenuto volumetrico d'aria θ_a e sul contenuto volumetrico d'aria nella frangia capillare θ_{acap} poiché si ricavano dagli altri termini di porosità attraverso le seguenti relazioni:

$$\vartheta_a = \vartheta_T - \vartheta_w \quad (N.5)$$

$$\vartheta_{acap} = \vartheta_T - \vartheta_{wcap} \quad (N.6)$$

Densità del suolo, ρ_s

Questo parametro entra in gioco nel calcolo del fattore di volatilizzazione in aria outdoor da sorgente in suolo superficiale VFss e profondo VFsam e volatilizzazione in aria indoor con sorgente in suolo profondo VFsesp. Entra anche nel calcolo del fattore di lisciviazione LF ed in quello di diluizione attenuazione DAF. Il range di variazione, individuato attraverso ricerche bibliografiche, va da un minimo di 1.60 g/cm^3 ad un massimo di 1.75 g/cm^3 . Nelle seguenti figure (N.13-N.17) sono riportati gli andamenti.

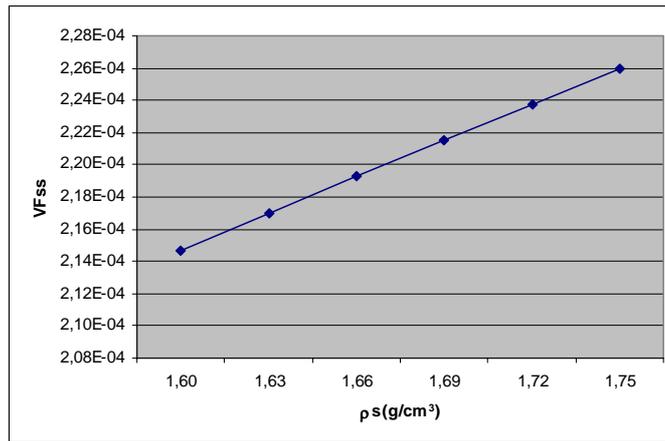


Fig. N.13

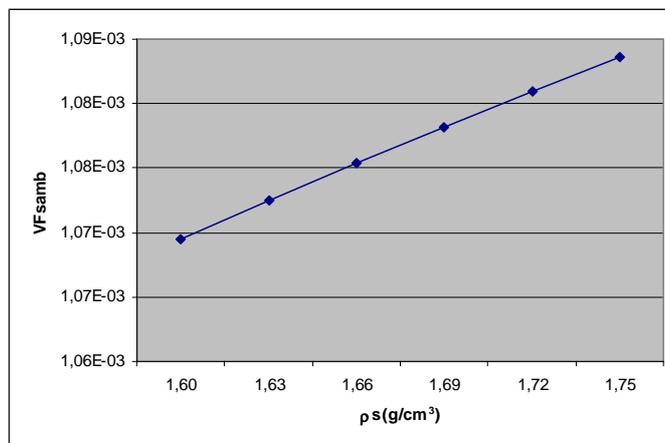


Fig. N.14

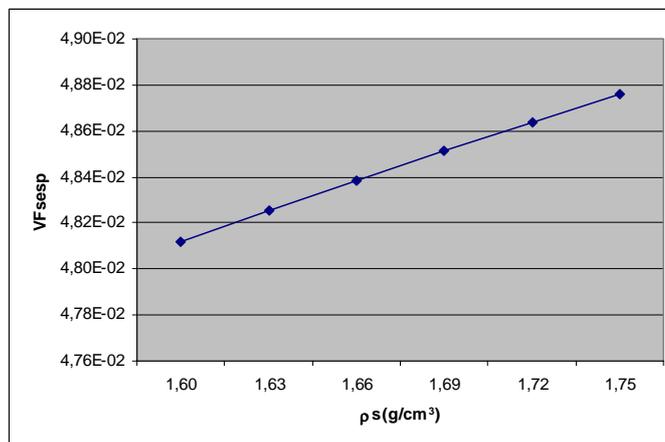


Fig. N.15

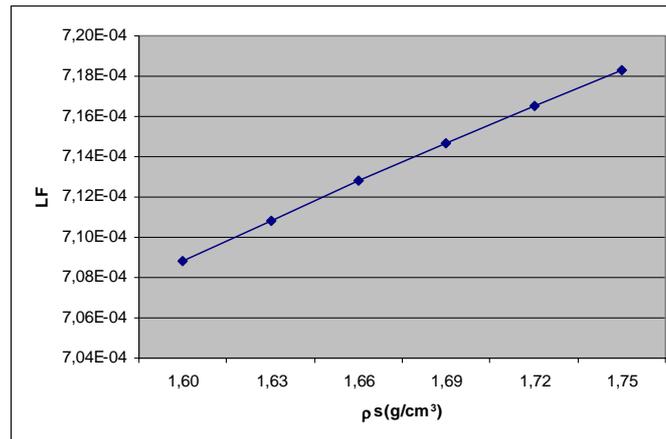


Fig. N.16

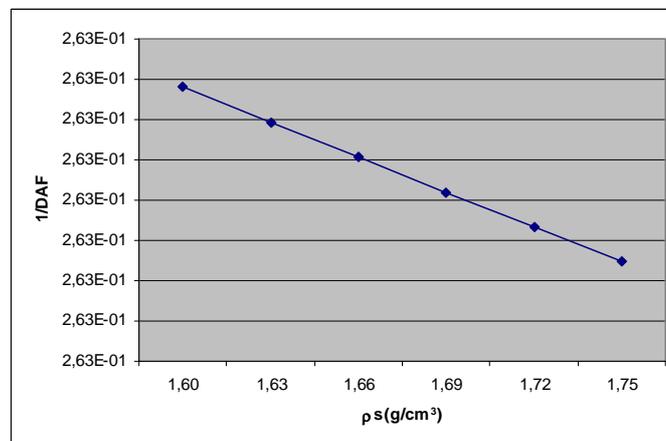


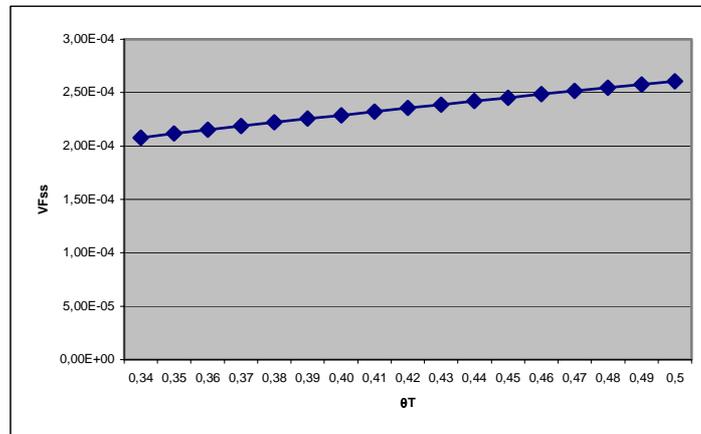
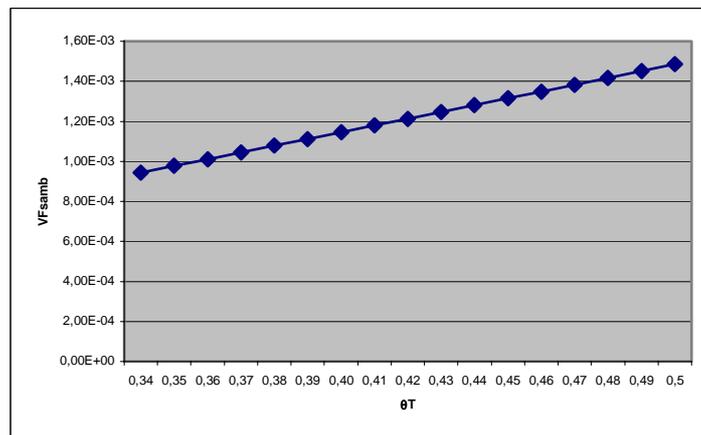
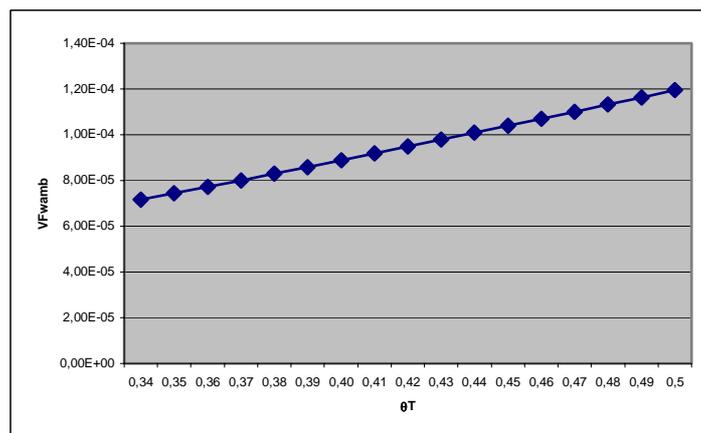
Fig. N.17

Porosità totale del terreno, θ_T

Per il range di variazione della porosità totale del terreno in zona insatura vale quanto detto per la zona satura. Nel caso di sorgente in zona insatura θ_T interviene nel calcolo della volatilizzazione sia in aria outdoor che indoor da suolo superficiale, VF_{ss}, da suolo profondo VF_{samb} e VF_{sest}, da falda VF_{wamb} e VF_{wesp}, e nel calcolo del fattore di lisciviazione LF. Nell'ambito di applicazione del presente documento, l'analisi di sensibilità sulla porosità totale fornisce indicazioni anche sulla porosità efficace.

E' evidente che la variazione di θ_T determina necessariamente una variazione di uno o più dei parametri di porosità o nel caso di frangia capillare. Questo fatto rende particolarmente articolato lo studio di sensibilità sul parametro porosità totale. Per questo motivo in questo documento lo studio di sensibilità è stato di fatto limitato ai parametri θ_w , θ_a , θ_{wcap} e θ_{acap} . Questa analisi è riportata nel paragrafo seguente. Per quanto attiene alla porosità totale, per effettuare l'analisi di sensibilità abbiamo ipotizzato che il

contenuto volumetrico d'acqua e di aria ed il contenuto volumetrico d'acqua e di aria nella frangia capillare variassero mantenendo costante il rapporto dato dai valori di default. Riportiamo gli andamenti nelle figure seguenti.

*Fig. N.18**Fig. N.19**Fig. N.20*

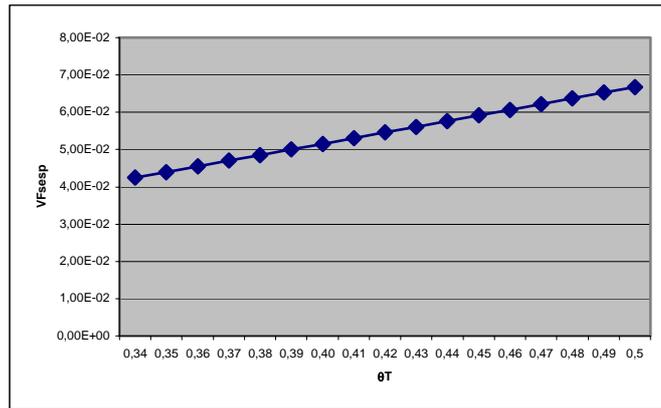


Fig. N.21

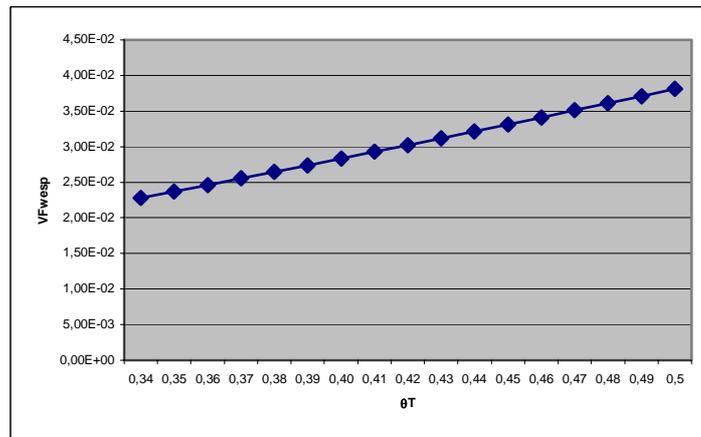


Fig. N.22

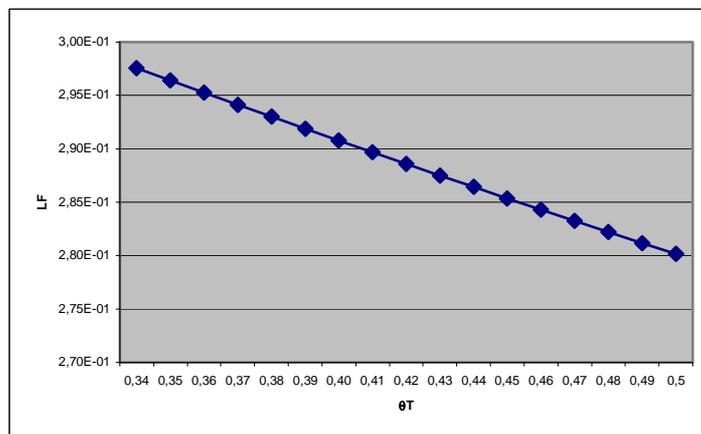


Fig. N.23

Contenuto volumetrico d'acqua θ_w .

Anche per il contenuto volumetrico d'acqua il range di variazione è stato definito attraverso un'indagine bibliografica che ha condotto ad utilizzare un valore minimo pari a 0.04 ed un massimo pari a 0.38. Interviene nel calcolo di tutti i fattori di volatilizzazione VFss, VFsamb, VFwamb, VFsesp, VFwesp e nel calcolo del fattore di lisciviazione LF.

L'analisi è stata fatta mantenendo θ_T costante. Di seguito (Figura N.24-N.29) vengono riportati gli andamenti ottenuti. Questi andamenti possono essere letti al contrario per valutare l'andamento dei fattori di trasporto rispetto a θ_a , che decresce all'aumentare di θ_w .

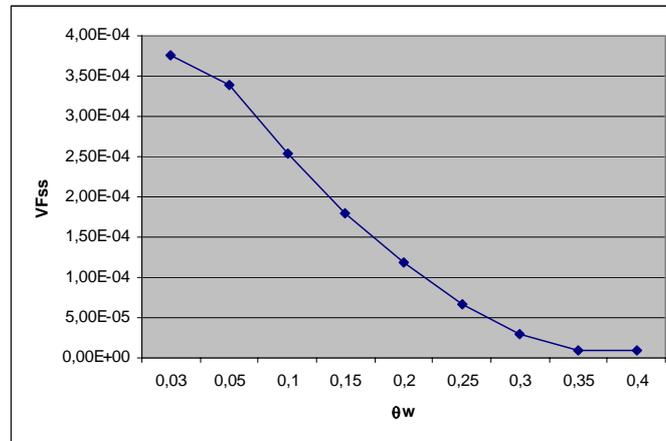


Fig. N.24

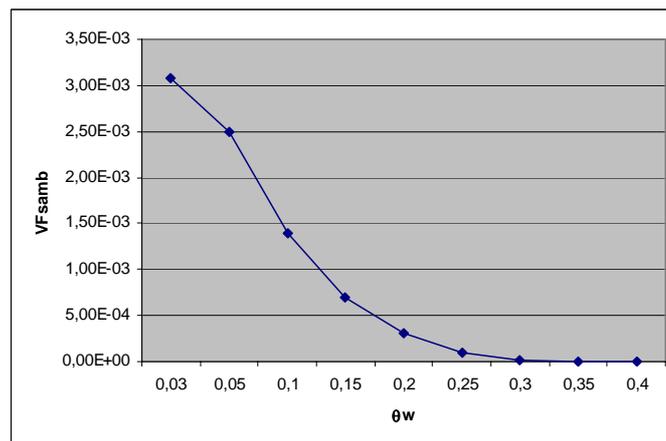


Fig. N.25

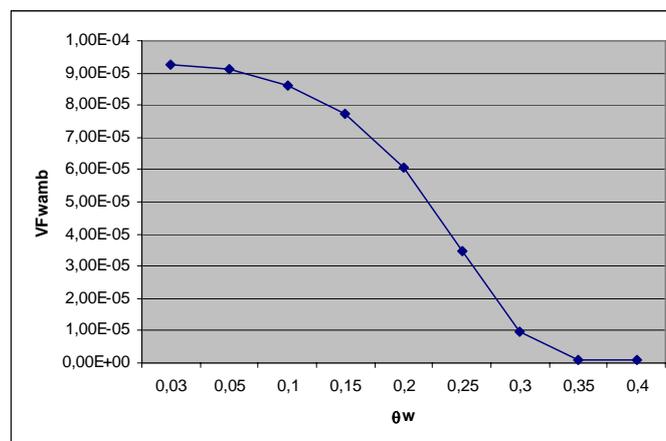


Fig. N.26

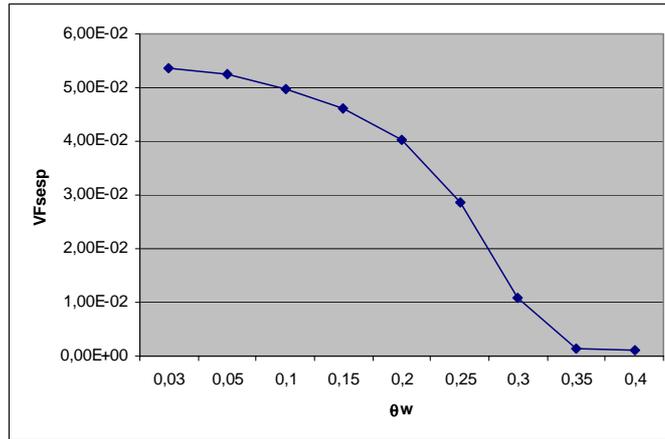


Fig. N.27

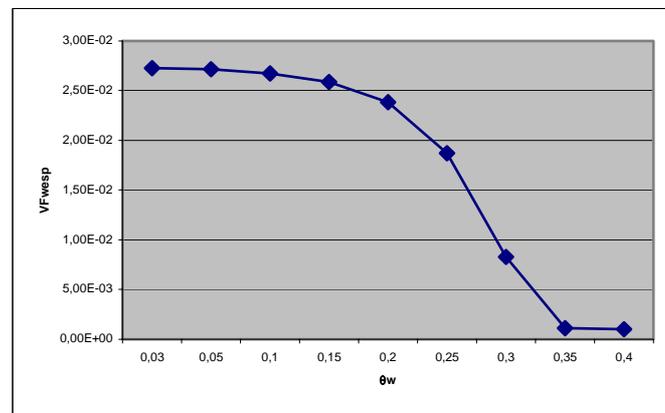


Fig. N.28

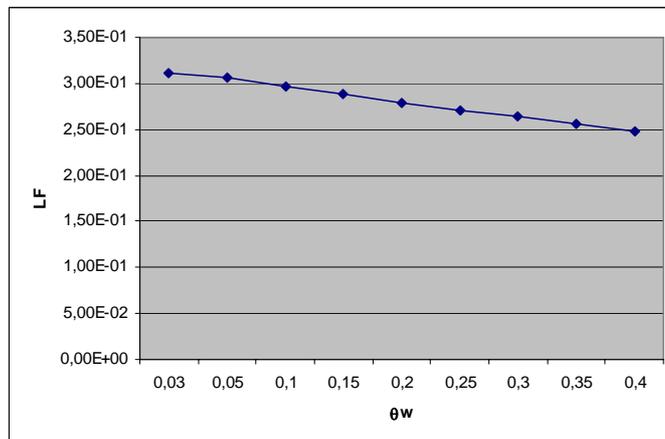


Fig. N.29

Contenuto volumetrico d'acqua nella frangia capillare θ_{wcap} .

Questo parametro interviene nel calcolo dei fattori di volatilizzazione in ambiente outdoor ed indoor per sorgente di contaminazione in falda VF_{wamb} , VF_{wesp} . Il range di variazione è stato determinato attraverso indagine bibliografica e va da un valore minimo di 0.33 ad un valore massimo di 0.38.

L'analisi è stata condotta mantenendo costante il valore di θ_T . Riportiamo di seguito (Figura N.30-N.31) gli andamenti dei fattori di trasporto. Questi andamenti possono essere letti al contrario per valutare l'andamento dei fattori di trasporto rispetto a θ_{awcap} .

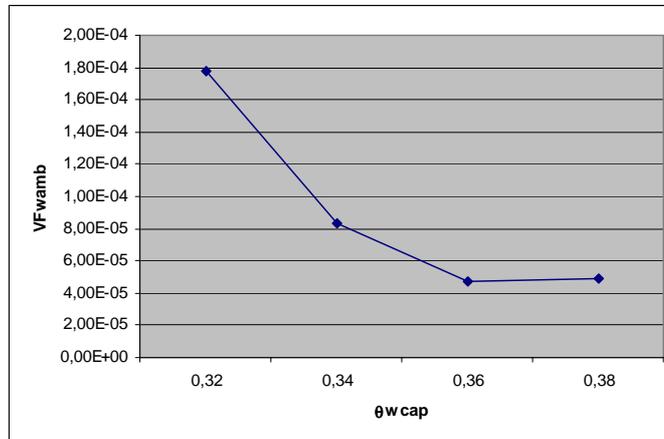


Fig. N.30

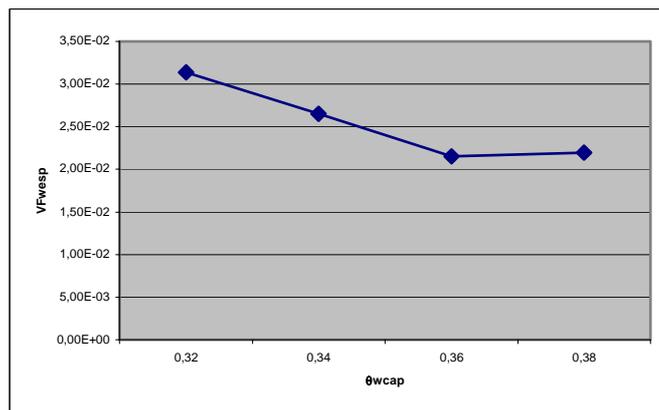


Fig. N.31

Frazione di carbonio organico f_{oc}

Anche nel caso della frazione di carbonio organico è stato scelto un range di variazione dopo un'attenta ricerca bibliografica, assumendo un valore minimo pari a 0.001 ed un valore massimo pari a 0.03.

Questo parametro interviene nel calcolo del fattore di volatilizzazione di vapori da suolo superficiale e profondo in ambiente outdoor ed indoor VFss, VF samb, VFsesp, nel calcolo del fattore di lisciviazione LF e nel fattore di attenuazione diluizione 1/DAF. Di seguito (Figure N.32-N.36) riportiamo gli andamenti dei fattori di trasporto rispetto al parametro.

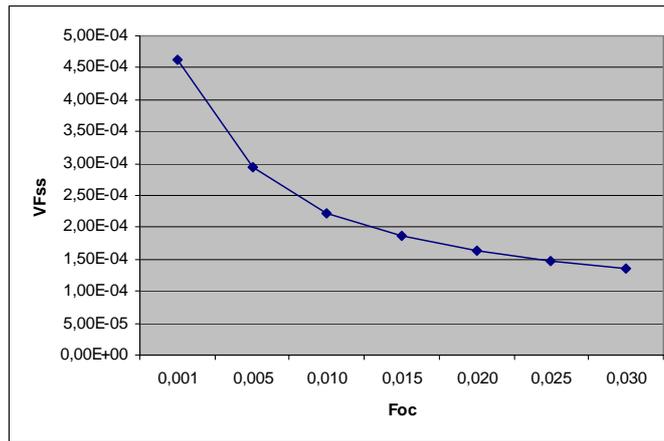


Fig. N.32

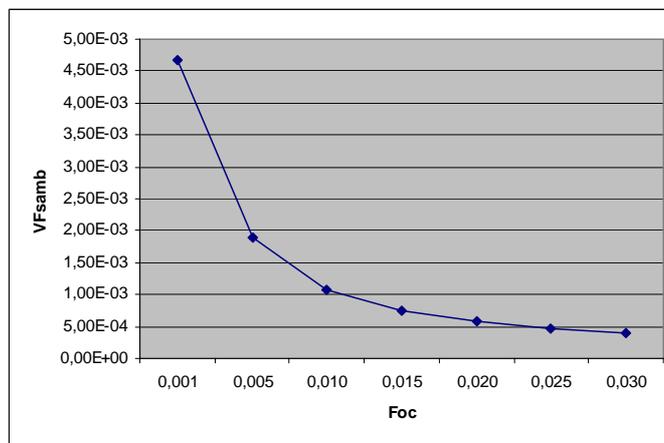


Fig. N.33

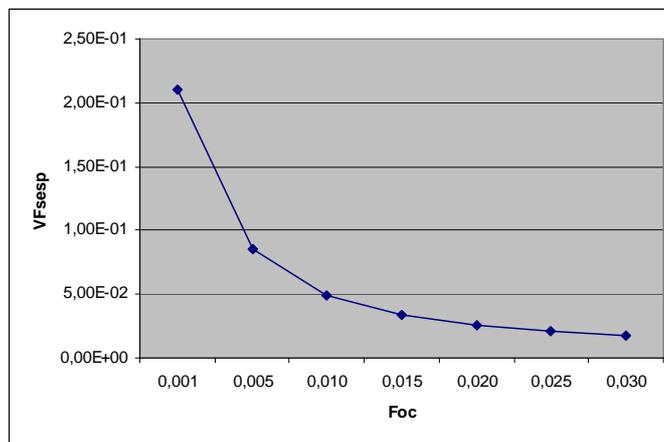


Fig. N.34

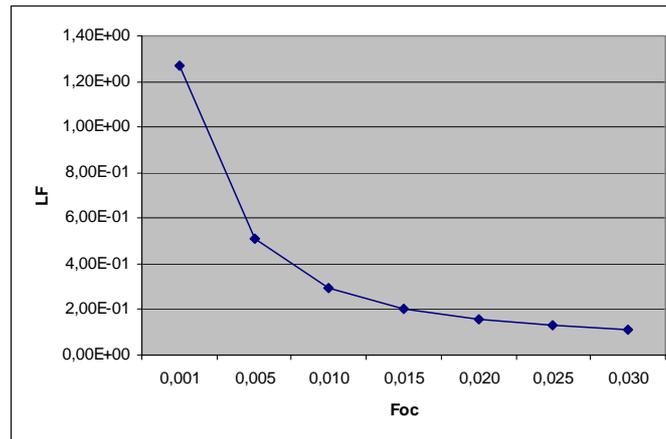


Fig. N.35

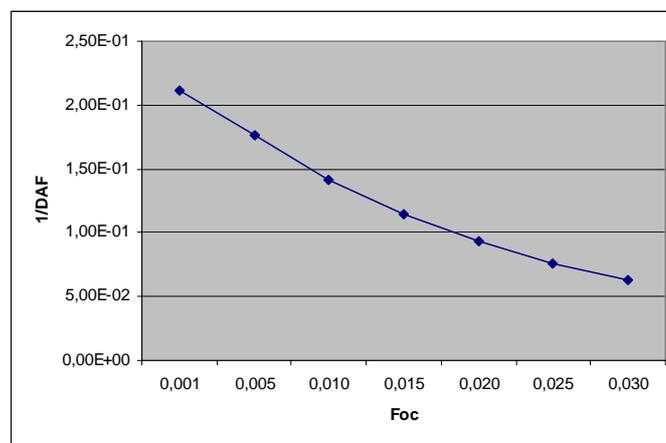


Fig. N.36

Infiltrazione efficace I_{ef} .

Nel caso dell'infiltrazione efficace è stato definito il range di variazione raccogliendo i dati indicativi di piovosità mediati per tutte le regioni italiane ed applicando le seguenti formule in corrispondenza dei valori massimo, minimo e medio delle precipitazioni:

$$I_{ef} = 0.0018 \cdot P^2 \quad \text{per terreni sabbiosi} \quad (\text{N.7})$$

$$I_{ef} = 0.0009 \cdot P^2 \quad \text{per terreni limosi} \quad (\text{N.8})$$

$$I_{ef} = 0.00018 \cdot P^2 \quad \text{per terreni argillosi} \quad (\text{N.9})$$

Dove:

P = precipitazioni medie espresse in cm/anno

L'infiltrazione efficace interviene nel calcolo del fattore di lisciviazione, come riportato in Figura N.37.

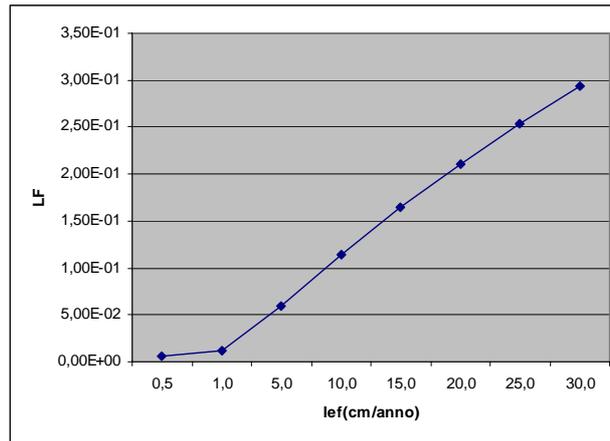


Fig. N.37

N.2.6 Geometria della zona insatura di suolo

I parametri che intervengono nella caratterizzazione della zona insatura di suolo e che intervengono nel calcolo dei fattori di trasporto sono la profondità del piano di falda L_{GW} e lo spessore della frangia capillare h_{cap} .

Profondità del piano di falda L_{GW} .

Interviene nella determinazione del fattore di volatilizzazione di vapori da falda in ambiente indoor ed outdoor VF_{wamb} , VF_{wesp} . Interviene inoltre nella determinazione di L_F poiché nel calcolo del fattore SAM, facendo variare L_{GW} varia di conseguenza L_F che si determina attraverso la seguente equazione:

$$L_F = L_{GW} - L_s$$

In assenza di altre informazioni, si è supposto un range che va da 200 a 500 cm

Di seguito (Figura N.38-N.40) sono riportati gli andamenti dei fattori di trasporto coinvolti.

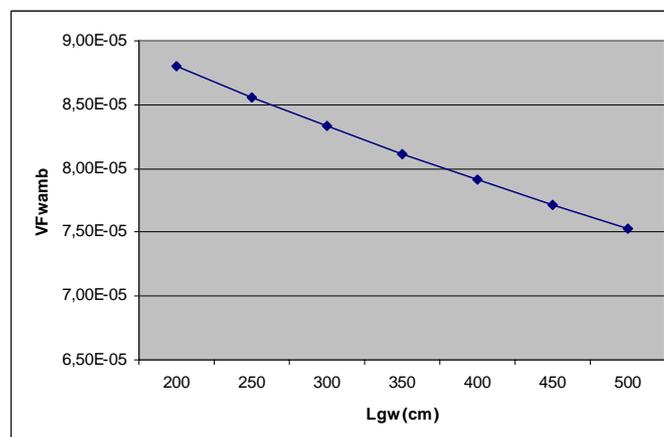


Fig. N.38

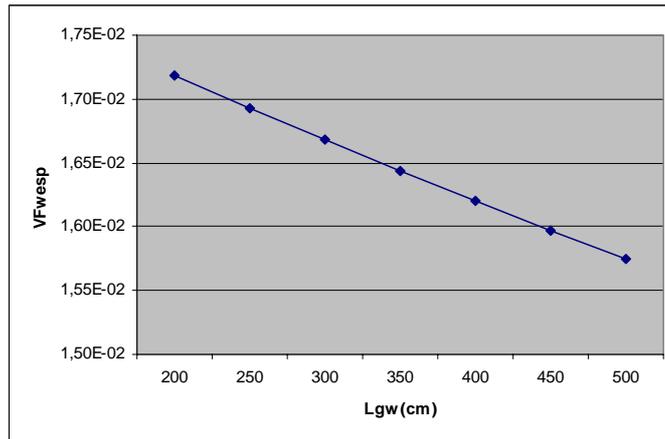


Fig. N.39

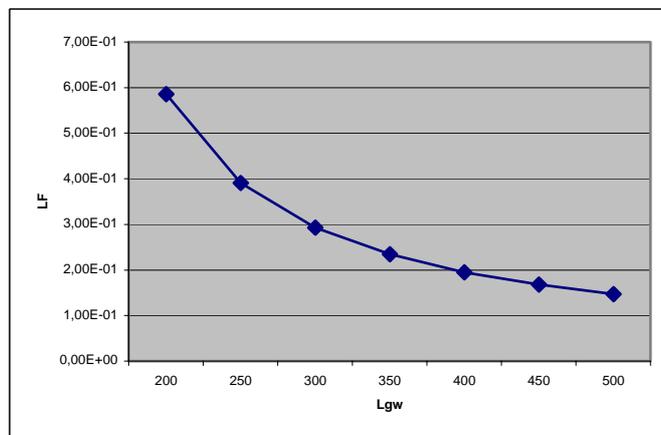


Fig. N.40

Occorre notare che data la mancanza di un univoco intervallo di oscillazione, non sono stati applicati gli score a questo parametro ed è stata calcolata la sola sensibilità relativa/relativa.

Spessore della frangia capillare h_{cap}

Anche lo spessore della frangia capillare interviene nel calcolo delle emissioni di vapori proveniente da sorgente in falda in ambienti indoor ed outdoor Vfwamb, Vfwesp.

E' stato ipotizzato un range che va da 1 a 10 cm. Si riportano di seguito (Figure N.41-N.42) gli andamenti dei fattori di trasporto.

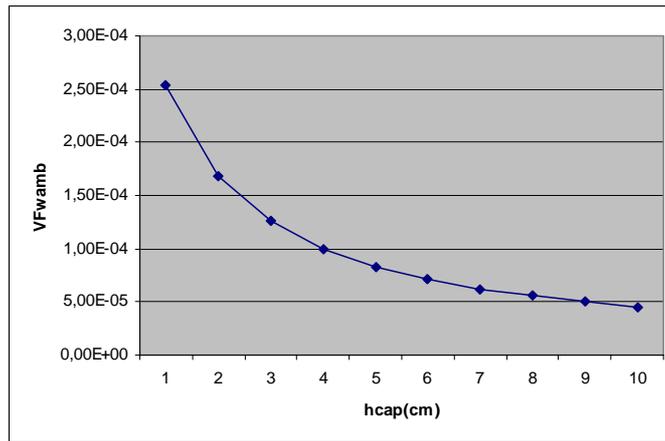


Fig. N.41

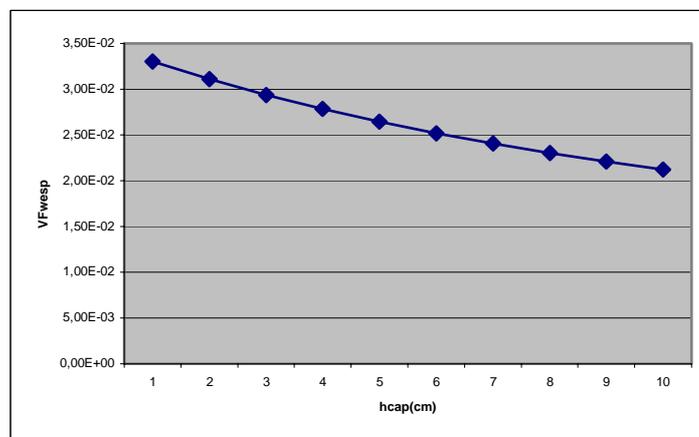


Fig. N.42

Occorre notare che data la mancanza di un univoco intervallo di oscillazione, non sono stati applicati gli score a questo parametro ed è stata calcolata la sola sensibilità relativa/relativa.

N.2.7 Caratteristiche degli ambienti aperti.

I parametri che necessitano per caratterizzare gli ambienti aperti sono l'estensione della sorgente nella direzione principale del vento W' , l'altezza del box all'interno del quale avviene la miscelazione del contaminante δ_{air} e la velocità del vento U_{air} .

Estensione della sorgente di contaminazione nella direzione principale del vento W'

L'estensione della sorgente nella direzione principale del vento interviene nel calcolo delle emissioni di vapori provenienti da falda, suolo profondo e suolo superficiale e nelle emissioni di particolato in ambiente outdoor VF_{ss} , P_{ef} , VF_{samb} , VF_{wamb} .

In assenza di altri dati, è stato ipotizzato un range di variazione che va da 2500 cm a 5000 cm. Di seguito (Figura N.43-N.46) si riportano gli andamenti dei fattori di trasporto.

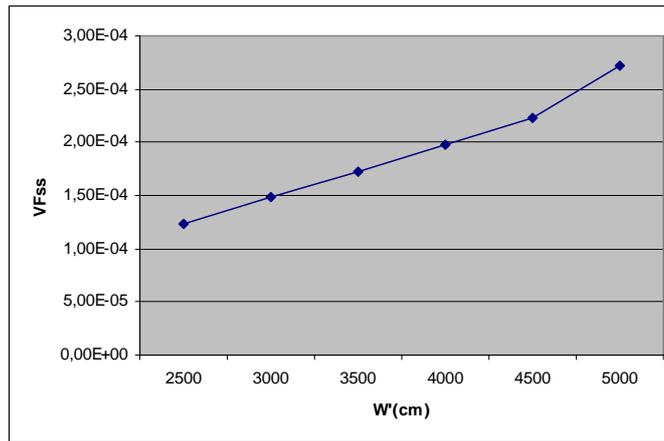


Fig. N.43

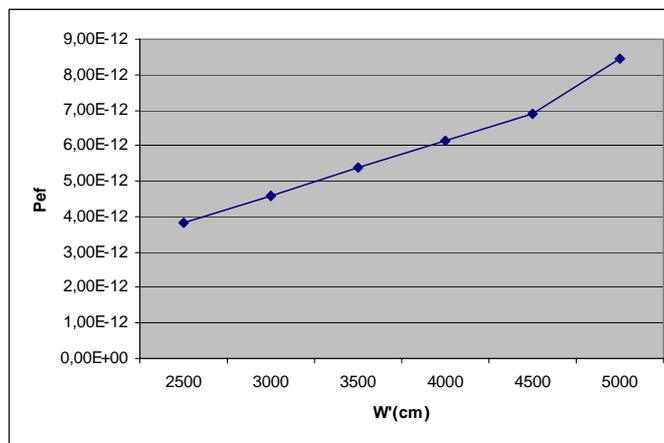


Fig. N.44

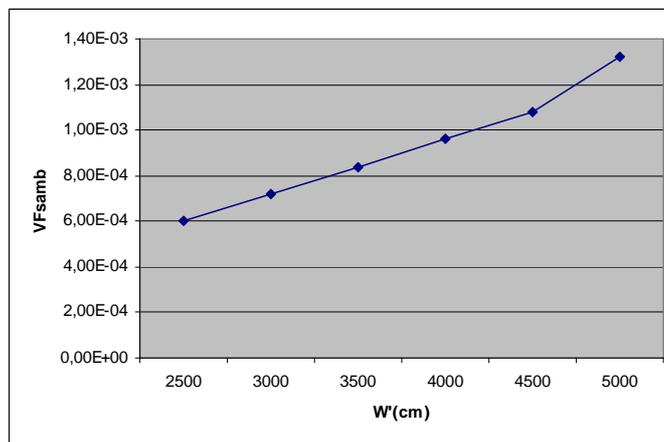


Fig. N.45

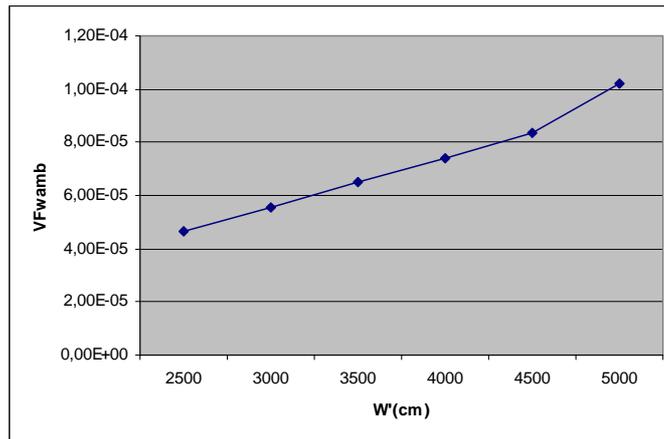


Fig. N.46

Occorre notare che data la mancanza di un univoco intervallo di oscillazione, non sono stati applicati gli score a questo parametro ed è stata calcolata la sola sensibilità relativa/relativa.

Altezza del box di miscelazione δ_{air}

Anche l'altezza del box di miscelazione interviene nel calcolo delle emissioni di vapori e particolato da suolo superficiale, profondo e falda VFss, Pef, VF samb, VFwamb. Il valore di default comunemente accettato dai riferimenti esaminati è pari a 200 cm. Si è comunque ipotizzato un range di variazione, che va da 100 cm a 500 cm, per valutare il suo peso all'interno della procedura. Di seguito si riportano gli andamenti dei fattori di trasporto coinvolti (Figure N.47-N.50).

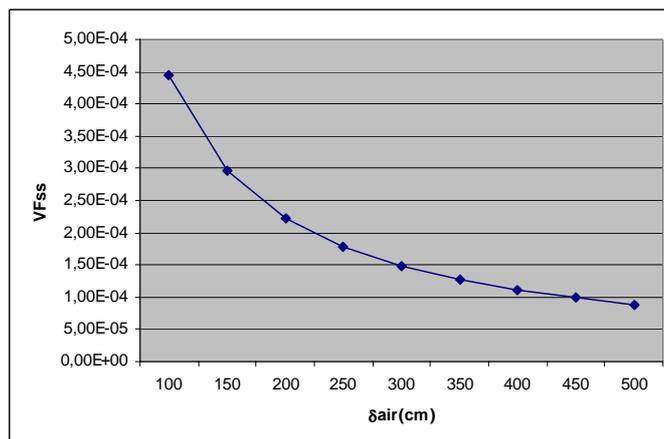


Fig. N.47

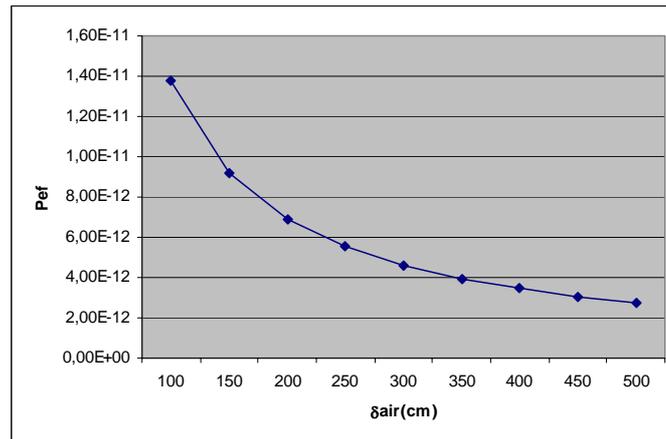


Fig. N.48

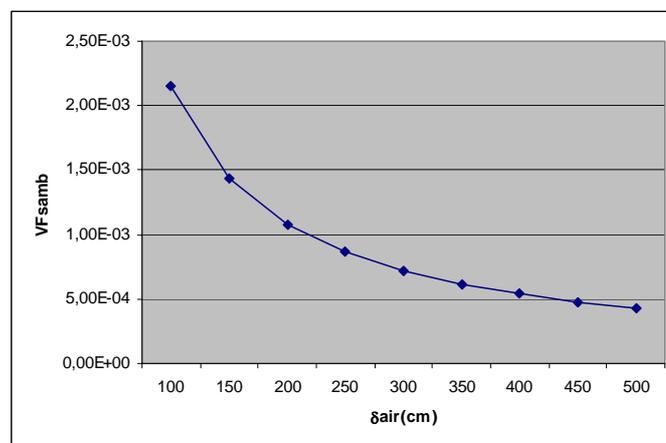


Fig. N.49

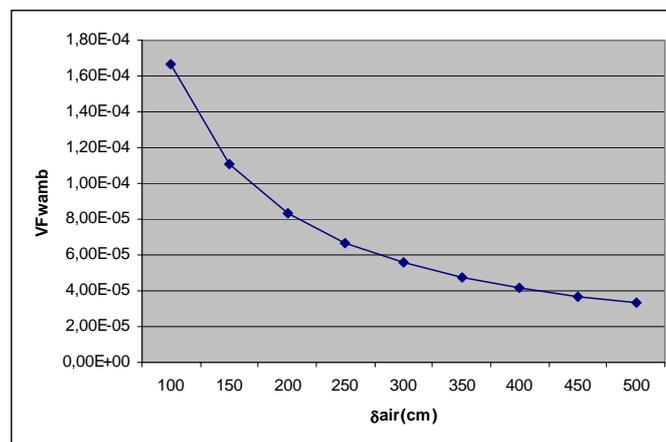
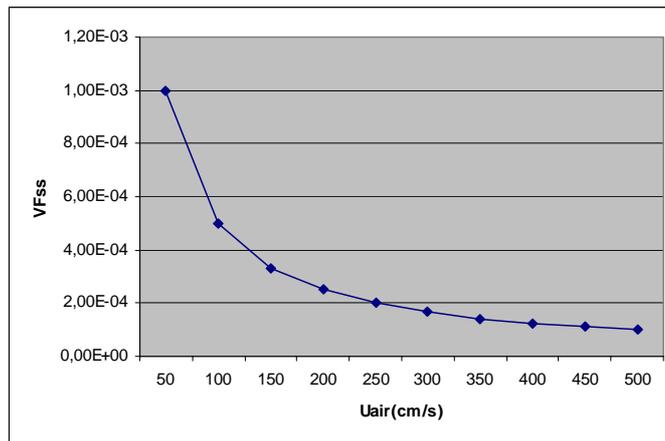
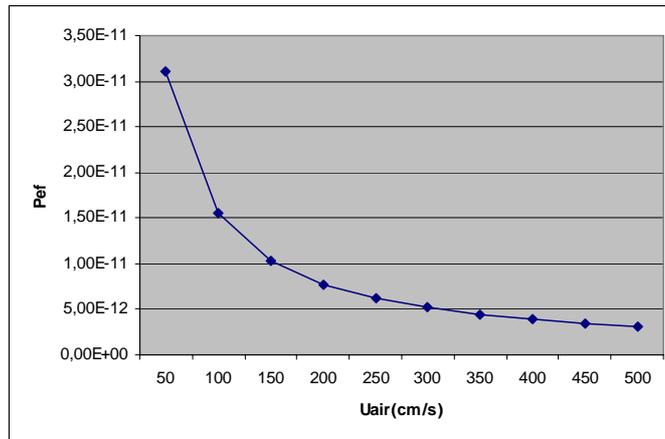
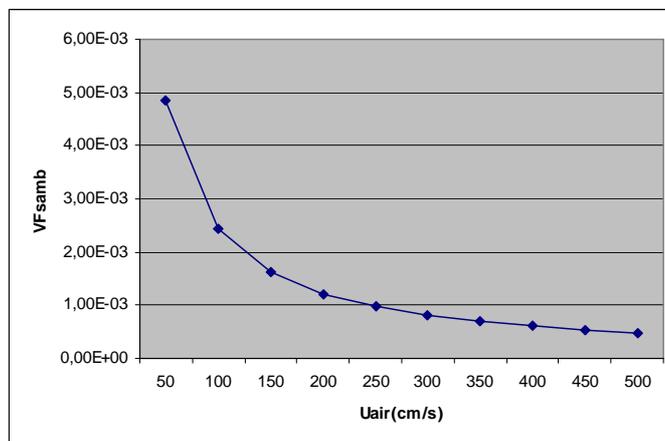


Fig. N.50

Occorre notare che data la mancanza di un univoco intervallo di oscillazione, non sono stati applicati gli score a questo parametro ed è stata calcolata la sola sensibilità relativa/relativa.

Velocità del vento U_{air} .

La velocità del vento interviene nel calcolo della volatilizzazione in ambienti outdoor di vapori provenienti da suolo superficiale, profondo, falda ed inalazione di particolato VFss, Pef, VF_{samb}, VF_{wamb}. Si è ipotizzato un range di variazione che va da 50 cm/s a 500 cm/s. Di seguito si riportano gli andamenti dei fattori di trasporto. (Figure N.51-N.54).

*Fig. N.51**Fig. N.52**Fig. N.53*

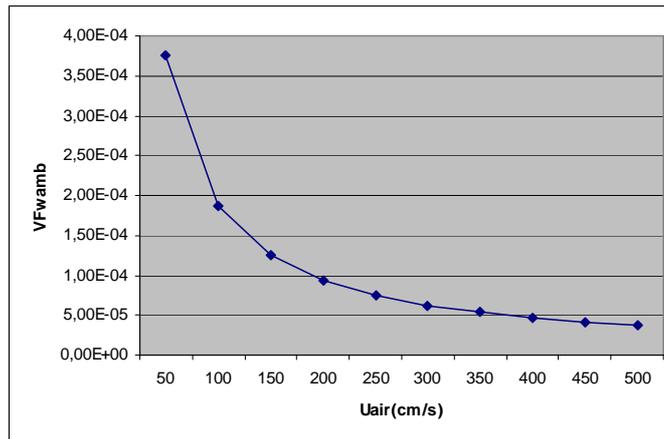


Fig. N.54

Tempo medio di durata del flusso di vapore τ .

Si è ipotizzato per questo parametro un range di variazione che va da 15 anni a 40 anni. Interviene nel calcolo di VFss e di seguito si riporta l'andamento ottenuto (Figura N.55).

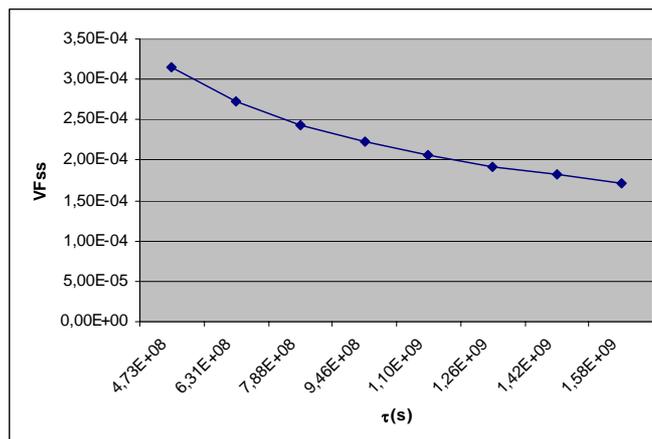


Fig. N.55

N.2.8 Caratteristiche degli ambienti chiusi.

Per caratterizzare gli ambienti di esposizione chiusi occorre considerare lo spessore delle fondazioni L_{crack} , il rapporto tra volume indoor ed area di infiltrazione L_b , la frazione areale di fratture η , il tasso di ricambio di aria ER ed il contenuto volumetrico d'acqua nelle fratture θ_{wcrack} .

Non è stato esplicitamente considerato il contenuto volumetrico d'aria nelle fratture, θ_{acrack} , poiché di fatto ricavabile attraverso la seguente relazione:

$$g_{acrack} = g_T - g_{wcrack} \tag{N.10}$$

Spessore delle fondazioni L_{crack} .

Entra in gioco nel calcolo dei vapori provenienti da suolo profondo e falda in ambienti indoor VFsesp, VFwesp. Abbiamo ipotizzato un range di variazione che va da 20 cm a 30 cm. Di seguito (Figure N.56-N.57) si riportano gli andamenti dei fattori di trasporto.

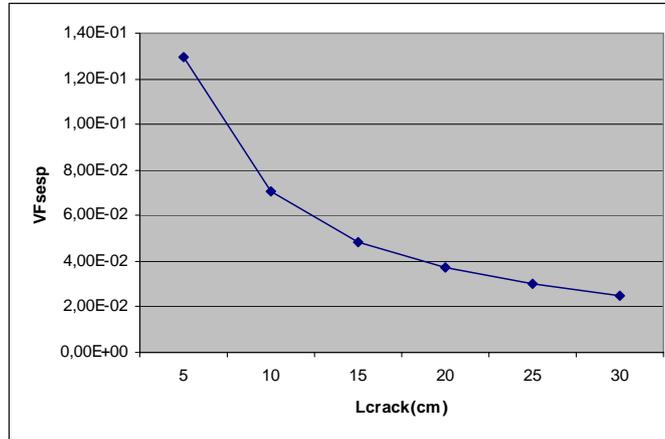


Fig. N.56

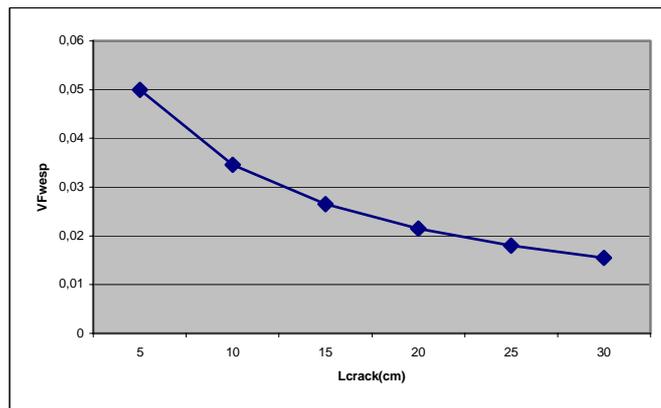


Fig. N.57

Rapporto tra volume indoor ed area d'infiltrazione L_b .

Entra in gioco nel calcolo dei vapori provenienti da suolo profondo e falda in ambienti indoor VFsesp, VFwesp. E' stato ipotizzato un range di variazione che va da 100 cm a 320 cm. Di seguito (Figure N.58-N.59) si riportano gli andamenti dei fattori di trasporto.

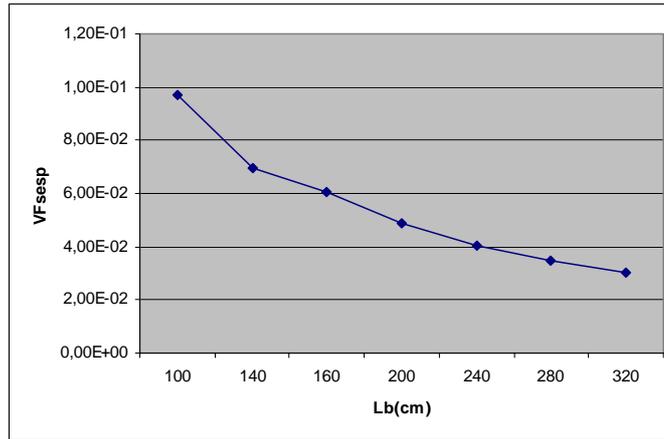


Fig. N.58

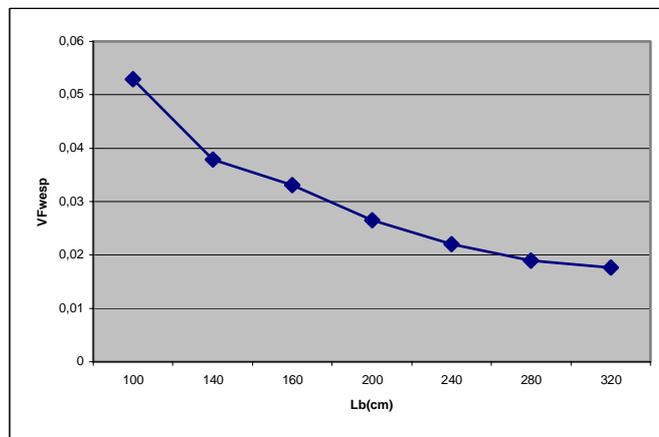


Fig. N.59

Frazione areale di fratture η .

Entra in gioco nel calcolo dei vapori provenienti da suolo profondo e falda in ambienti indoor VFsesp, VFwesp. E' stato ipotizzato un ipotetico range di variazione che va da 0,01 a 1 . Di seguito (Figure N.60-N.61) si riportano gli andamenti dei fattori di trasporto coinvolti.

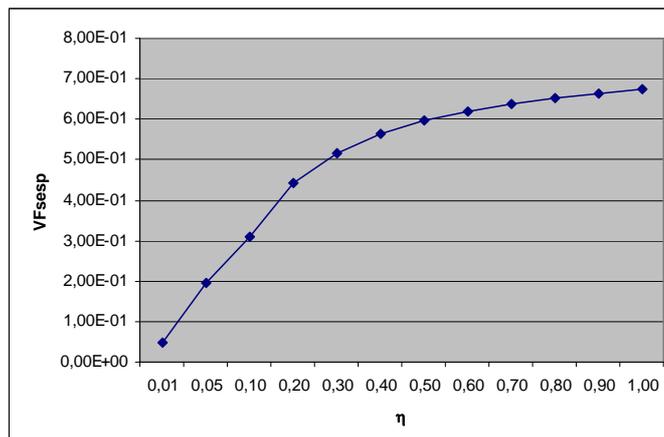


Fig. N.60

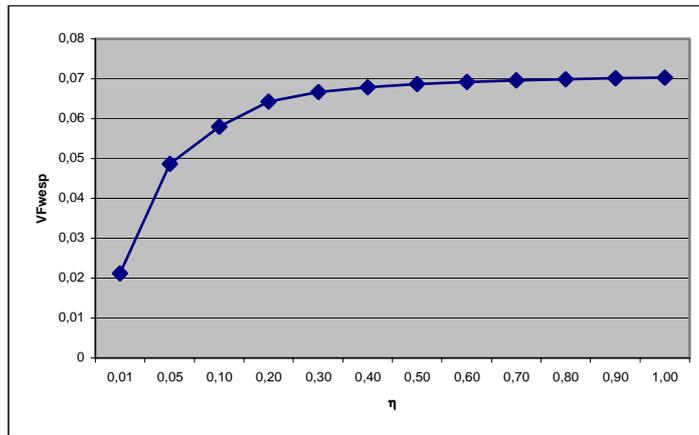


Fig. N.61

Tasso di ricambio di aria ER.

Entra in gioco nel calcolo dei vapori provenienti da suolo profondo e falda in ambienti indoor VFfesp, VFwesp. Abbiamo ipotizzato un range di variazione che va da 5.79E-05 1/s a 3205.09E-04 1/s. Di seguito (Figure N.62-N.63), si riportano gli andamenti dei fattori di trasporto interessati.

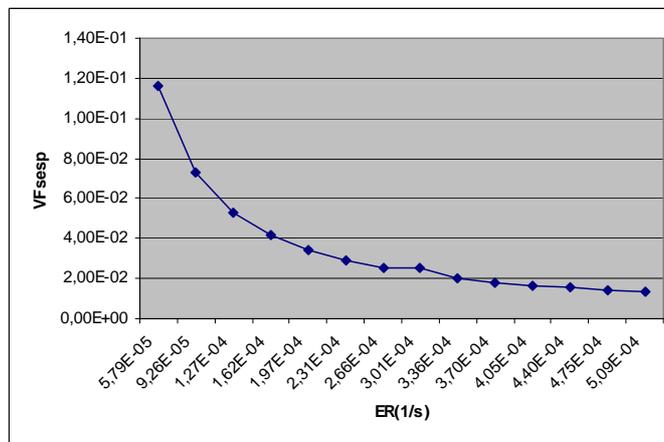


Fig. N.62

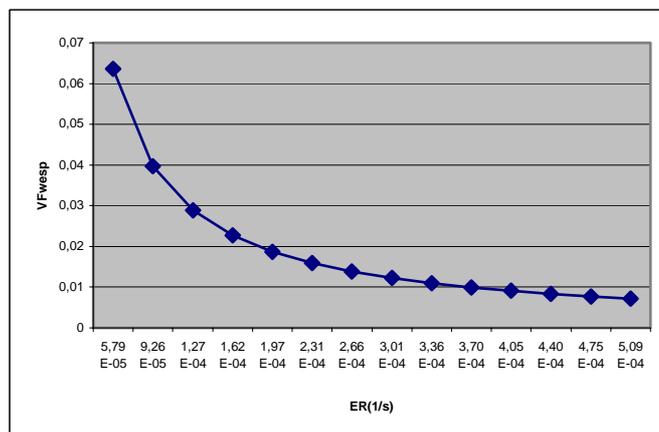


Fig. N.63

Contenuto volumetrico di acqua nelle fratture θ_{wcrack} .

Questo parametro interviene nel calcolo di VF_{sresp}, VF_{wesp}. Il range di variazione va da 0.04 a 0.38. Nei grafici seguenti (Figure N.64 e N.65) si riporta l'andamento dei fattori di trasporto.

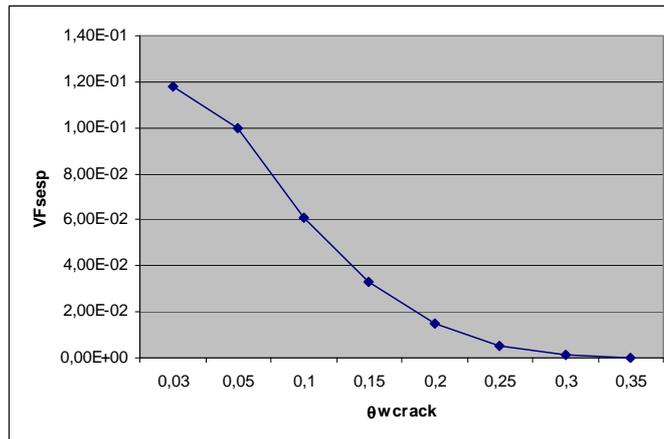


Fig. N.64

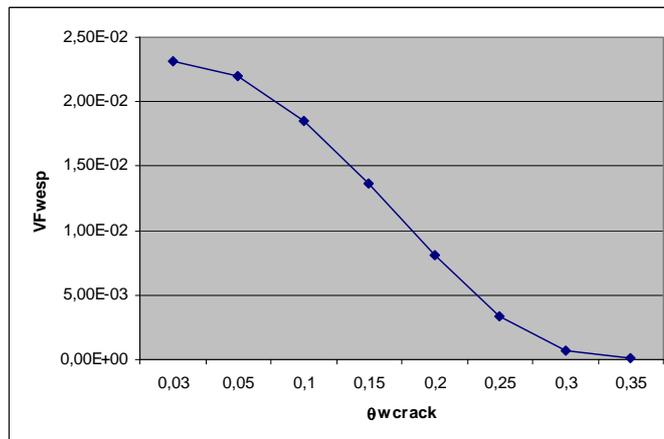


Fig. N.65

N.3 Conclusioni.

I risultati dello studio di sensibilità sono stati riassunti in forma di tabelle così organizzate. Sono state approntate tre Tabelle (N.4-N.6) nelle quali per ogni fattore di trasporto sono indicati i valori di sensibilità relativa/relativa rispetto a ciascun parametro che rientra nella corrispondente equazione di calcolo. In particolare:

- In Tabella N.4 sono riportati i valori di sensibilità relativa/relativa calcolati in corrispondenza del valore minimo di oscillazione potenziale del singolo parametro

- In Tabella N.5 sono riportati i valori di sensibilità relativa/relativa calcolati in corrispondenza del valore medio di oscillazione potenziale del singolo parametro
- In Tabella N.6 sono riportati i valori di sensibilità relativa/relativa calcolati in corrispondenza del valore massimo di oscillazione potenziale del singolo parametro

Per quanto attiene agli score, calcolati con le equazioni N.2 e N.3, i corrispondenti valori determinati per ogni parametro in relazione ai diversi fattori di trasporto coinvolti, sono riassunti sempre nelle Tabelle N.4-N.6. In particolare:

- In Tabella N.4 sono riportati i valori di score calcolati in corrispondenza del valore minimo di oscillazione potenziale del singolo parametro
- In Tabella N.5 sono riportati i valori di score calcolati in corrispondenza del valore medio di oscillazione potenziale del singolo parametro
- In Tabella N.6 sono riportati i valori di score calcolati in corrispondenza del valore massimo di oscillazione potenziale del singolo parametro

I dati grezzi presentati nelle Tabelle N.4-N.6 sono stati utilizzati per effettuare una classificazione dei diversi parametri in funzione dei corrispondenti valori di score. Per adeguarsi a quanto proposto nel documento RAGS/EPA è stato deciso di utilizzare come indicatore lo Score 2 (Equazione N.3), e il grado di sensibilità dei diversi parametri sui singoli fattori è stato definito in maniera semi-quantitativa in accordo a quanto schematizzato in Tabella N.2.

Tab. N.2 definizione sensibilità

Valore score2 (S2)	Sensibilità
$0 < S2 < 0,5$	Bassa
$0,5 < S2 < 1$	Medio/Bassa
$1 < S2 < 1,5$	Media
$1,5 < S2 < 2$	Medio/Alta
$S2 > 2$	Alta

La classificazione della sensibilità dei diversi fattori rispetto ai diversi parametri correlati è riportata in Tabella N.7. Si sottolinea ancora una volta che per alcuni parametri non è stato possibile effettuare alcun tipo di classificazione, in quanto non sono stati determinati gli score corrispondenti. Per questi fattori, l'unico valore a cui fare riferimento è quello della sensibilità relativa/relativa, che però non tiene conto della

effettivo range di oscillazione di un parametro. Per questi parametri abbiamo adottato la classificazione riportata in Tab N.3:

Tab. N.3 definizione sensibilità

Valore sensibilità relativa/relativa	Sensibilità
$0 < R/R < 0,33$	Bassa
$0,33 < R/R < 0,66$	Media
$R/R > 0,66$	Alta

Per definire la sensibilità in tabella N.7 si è effettuata la media dei valori ottenuti per ogni parametro rispetto al valore minimo, medio e massimo di oscillazione. In colore rosso sono stati evidenziati i parametri per i quali è disponibile il solo valore di sensibilità relativa/relativa.

In tabella N.8 è stata riportata una classificazione generale di sensibilità per ogni parametro effettuando la media rispetto ai valori ottenuti per ogni singola via di migrazione.

Infine, con riferimento ad i criteri per la stima dei parametri sito-specifici esposti nel Capitolo 3, i risultati dell'analisi di sensibilità sono stati impiegati per definire se la scelta più conservativa per un dato parametro corrisponda al valore massimo o ad un opportuno UCL della media ovvero al valore minimo o ad un opportuno LCL della media. Questa indicazione è fornita in Tabella N.9, dove con il simbolo ">" si indica che il valore più conservativo è quello massimo o l'opportuno UCL della media di un determinato data set; mentre con il simbolo "<" si indica che il valore più conservativo è il minimo o l'opportuno LCL della media di un determinato data set.

Tab. N. 4 Analisi di sensibilità nell'intorno del valore minimo.

Fattori di trasporto	Tipo di analisi	W (cm)	Sw (cm)	dgw (cm)	Ksat (cm/s)	i	θ_r	θ_w	θ_{wcap}	f_{oc}	δ_{wv} (cm)	W(cm)	Uair (cm/s)	τ (anni)	L_{crack} (cm)	L_b (cm)	ER (1/d)	η	θ_{wcrack}	L_{GW} (cm)	h_{cap} (cm)	ρ_s (g/cm ³)	I_{ur} (cm/anno)	L_c (cm)	αx (cm)		
Range >		2490 - 2510	2490 - 2510	95 - 105	5,48E-6 - 5,66E-6	0,001 - 0,003	0,34 - 0,36	0,03 - 0,05	0,32 - 0,34	0,001 - 0,002	100 - 120	2490 - 2510	50 - 60	15 - 17	5 - 7	100 - 120	5 - 7	0,005 - 0,006	0,04 - 0,06	200 - 220	1 - 3	1,6 - 1,62	0,5 - 2,5	10 - 30	10 - 30		
VFss	Relativa relativa						5,97E-01	-2,1E-01		-2,83E-01	-1,01E+00	1,00E+00	-1,01E+00	-5,01E-01									5,76E-01				
	Score1						8,78E-01	-2,7E+00		-8,50E+00			-1,01E+01	-1,34E+00									6,30E-01				
	Score2						2,51E-01	-6,27E-01		-1,18E+01				-2,02E+00	-4,18E-01									5,08E-02			
Pef	Relativa relativa										-1,01E+00	1,00E+00	-1,01E+00														
	Score1												-1,01E+01														
	Score2												-2,02E+00														
VFsamB	Relativa relativa						1,19E+00	-4,2E-01		-5,83E-01	-1,01E+00	1,00E+00	-1,01E+00										1,52E-01		5,81E-01		
	Score1						1,76E+00	-5,4E+00		-1,75E+01			-1,01E+01										1,67E-01		1,16E+00		
	Score2						5,03E-01	-1,26E+00		-2,43E+01			-2,02E+00										1,34E-02		3,87E-01		
VFwamb	Relativa relativa						1,33E+00	-2,8E-02	-1,25E+01		-1,01E+00	1,00E+00	-1,01E+00														
	Score1						1,96E+00	-3,6E-01	-1,64E+01				-1,01E+01														
	Score2						5,60E-01	-8,35E-02	-3,68E+00				-2,02E+00														
VFsesp	Relativa relativa						1,19E+00	-3,7E-02		-5,83E-01					-8,75E-01	-1,01E+00	-1,03E+00	9,65E-01	-4,39E-01					1,52E-01		-6,83E-02	
	Score1						1,76E+00	-4,8E-01		-1,75E+01					-5,25E+00	-3,02E+00	-9,25E+00	1,93E+02	-4,17E+00					1,67E-01		-1,37E-01	
	Score2						5,03E-01	-1,10E-01		-2,43E+01					-1,46E+00	-1,01E+00	-2,74E+00	9,60E+01	-1,25E+00					1,34E-02		-4,55E-02	
VFwesp	Relativa relativa						1,33E+00	-7,6E-03	-2,76E+00						-4,93E-01	-1,01E+00	-1,03E+00	8,14E-01	-2,62E-01	-6,38E-02	-1,17E-01					-3,16E-01	
	Score1						1,96E+00	-9,9E-02	-3,63E+00						-2,96E+00	-3,02E+00	-9,25E+00	1,63E+02	-2,49E+00							-6,31E-01	
	Score2						5,60E-01	-2,29E-02	-8,12E-01						-8,21E-01	-1,01E+00	-2,74E+00	8,10E+01	-7,43E-01							-2,10E-01	
LF	Relativa relativa	8,70E-01		-6,50E-01	-1,48E-02	-9,41E-02	-1,35E-01	-2,6E-02		-5,83E-01														1,52E-01	9,87E-01		
	Score1				-2,27E+01	-9,41E+00	-1,99E-01	-3,4E-01		-1,75E+01														1,67E-01	6,12E+01		
	Score2				-7,83E-02	-1,86E-01	-5,70E-02	-7,91E-02		-2,43E+01														1,34E-02	2,01E+00		
1/DAF	Relativa relativa		7,58E-01		2,56E+01	4,25E+01	5,27E-01			-9,23E-02																-3,20E-01	
	Score1				3,92E+04	4,25E+03	7,75E-01			-2,77E+00																	-4,54E+00
	Score2				1,35E+02	8,41E+01	2,22E-01			-3,86E+00																	-3,84E-01

Tab. N. 5 Analisi di sensibilità nell'intorno del valore medio.

Fattori di trasporto	Tipo di analisi	W (cm)	Sw (cm)	dgw (cm)	Ksat (cm/s)	i	θ_r	θ_w	θ_{wcap}	f_{oc}	δ_{wv} (cm)	W(cm)	Uair (cm/s)	τ (anni)	L_{crack} (cm)	L_b (cm)	ER (1/d)	η	θ_{wcrack}	L_{GW} (cm)	h_{cap} (cm)	ρ_s (g/cm ³)	I_{ur} (cm/anno)	L_c (cm)	αx (cm)		
Range >		4490 - 4510	4490 - 4510	195 - 205	1,48E-3 - 1,68E-3	0,0485 - 0,0515	0,37 - 0,39	0,11 - 0,13	0,36 - 0,37	0,009 - 0,011	190 - 210	4490 - 4510	220 - 230	29 - 31	14 - 16	190 - 210	14 - 16	0,0095 - 0,0105	0,11 - 0,13	290 - 310	4 - 6	1,69 - 1,71	14 - 16	90 - 110	10 - 30		
VFss	Relativa relativa						5,92E-01	-8,1E-01		-2,98E-02	-1,00E+00	1,00E+00	-1,00E+00	-5,00E-01									5,73E-01				
	Score1						8,71E-01	-1,0E+01		-8,94E-01			-1,00E+01	-1,33E+00										6,26E-01			
	Score2						2,49E-01	-2,42E+00		-1,24E+00				-2,00E+00	-4,17E-01									5,05E-02			
Pef	Relativa relativa										-1,00E+00	1,00E+00	-1,00E+00														
	Score1												-1,00E+01														
	Score2												-2,00E+00														
VFsamB	Relativa relativa						1,18E+00	-1,6E+00		-5,98E-02	-1,00E+00	1,00E+00	-1,00E+00										1,45E-01		1,00E+00		
	Score1						1,74E+00	-2,1E+01		-1,79E+00			-1,00E+01											1,59E-01		2,01E+00	
	Score2						4,99E-01	-4,84E+00		-2,50E+00			-2,00E+00											1,28E-02		6,70E-01	
VFwamb	Relativa relativa						1,33E+00	-2,4E-01	9,37E-01		-1,00E+00	1,00E+00	-1,00E+00														
	Score1						1,96E+00	-3,1E+00	1,23E+00				-1,00E+01														
	Score2						5,60E-01	-7,26E-01	2,76E-01				-2,00E+00														
VFsesp	Relativa relativa						1,18E+00	-1,7E-01		-5,98E-02					-9,41E-01	-1,00E+00	-1,00E+00	9,37E-01	-1,44E+00					1,45E-01		-9,09E-02	
	Score1						1,74E+00	-2,2E+00		-1,79E+00					-5,65E+00	-3,01E+00	-9,04E+00	1,87E+02	-1,37E+01					1,59E-01		-1,82E-01	
	Score2						4,99E-01	-5,15E-01		-2,50E+00					-1,57E+00	-1,00E+00	-2,68E+00	9,33E+01	-4,08E+00					1,28E-02		-6,06E-02	
VFwesp	Relativa relativa						1,33E+00	-7,1E-02	3,84E-01						-7,07E-01	-1,00E+00	-1,00E+00	7,06E-01	-1,08E+00	-8,88E-02	-2,48E-01					-3,86E-01	
	Score1						1,96E+00	-9,3E-01	5,03E-01						-4,24E+00	-3,01E+00	-9,04E+00	1,41E+02	-1,03E+01							-7,72E-01	
	Score2						5,60E-01	-2,14E-01	1,13E-01						-1,18E+00	-1,00E+00	-2,68E+00	7,02E+01	-3,07E+00							-2,57E-01	
LF	Relativa relativa	7,87E-01		-7,88E-01	-7,91E-01	-7,88E-01	-1,45E-01	-7,5E-02		-5,98E-02														1,45E-01	8,81E-01		
	Score1				-1,21E+03	-7,88E+01	-2,14E-01	-9,8E-01		-1,79E+00														1,59E-01	5,46E+01		
	Score2				-4,18E+00	-1,56E+00	-6,12E-02	-2,25E-01		-2,50E+00														1,28E-02	1,79E+00		
1/DAF	Relativa relativa		1,19E+00		5,90E-01	5,88E-01	4,86E-01			-3,00E-02																-1,84E+01	
	Score1				9,02E+02	5,88E+01	7,14E-01			-9,01E-01																	-2,61E+02
	Score2				3,11E+00	1,16E+00	2,05E-01			-1,25E+00																	-2,21E+01

Tab. N. 6 Analisi di sensibilità nell'intorno del valore massimo.

Fattori di trasporto	Tipo di analisi	W (cm)	Sw (cm)	dgw (cm)	Ksat (cm/s)	i	θ_r	θ_w	θ_{wcap}	f_{oc}	$\delta_{air}(cm)$	W'(cm)	Uair (cm/s)	τ (anni)	L _{crack} (cm)	L _b (cm)	ER (1/d)	η	θ_{wcrack}	L _{ow} (cm)	h _{cap} (cm)	ρ_s (g/cm ³)	I _{er} (cm/anno)	L _s (cm)	αx (cm)	
Intorno del valore massimo	Range >	5490 - 5510	5490 - 5510	495 - 505	8,15E-3 - 8,35E-3	9,50E-2 - 1,00E-1	0,48 - 0,50	0,37 - 0,39	0,40 - 0,42	0,028 - 0,03	480 - 500	5490 - 5510	490 - 500	38 - 40	28 - 30	280 - 300	43 - 45	0,999 - 1	0,36 - 0,38	480 - 500	8 - 10	1,73 - 1,75	29 - 31	180 - 200	10 - 30	
	VFss	Relativa relativa					5,75E-01	4,7E-01			-4,73E-01	-1,00E+00	1,00E+00	-1,00E+00	-5,00E-01									5,71E-01		
		Score1					8,46E-01	6,1E+00			-1,42E+01			-1,00E+01	-1,33E+00									6,25E-01		
		Score2					2,42E-01	1,40E+00			-1,97E+01			-2,00E+00	-4,17E-01									5,04E-02		
		Pef	Relativa relativa									-1,00E+00	1,00E+00	-1,00E+00												
		Score1												-1,00E+01												
		Score2												-2,00E+00												
		VF _{samb}	Relativa relativa					1,15E+00	9,6E-01			-9,46E-01	-1,00E+00	1,00E+00	-1,00E+00										1,43E-01	1,74E+00
		Score1						1,69E+00	1,2E+01			-2,84E+01			-1,00E+01										1,56E-01	3,48E+00
		Score2						4,84E-01	2,87E+00			-3,95E+01			-2,00E+00									1,26E-02	1,16E+00	
		VF _{wamb}	Relativa relativa					1,33E+00	1,2E+00	1,40E+00			-1,00E+00	1,00E+00	-1,00E+00							-2,37E-01	-9,14E-01			
		Score1						1,96E+00	1,5E+01	1,83E+00					-1,00E+01											
		Score2						5,60E-01	3,49E+00	4,11E-01					-2,00E+00											
		VF _{sresp}	Relativa relativa					1,15E+00	9,3E-01			-9,46E-01				-9,68E-01	-1,00E+00	-1,00E+00	1,30E-01	1,03E+00				1,43E-01	-1,12E-01	
		Score1						1,69E+00	1,2E+01			-2,84E+01				-5,81E+00	-3,00E+00	-9,00E+00	2,60E+01	9,83E+00				1,56E-01	-2,25E-01	
		Score2						4,84E-01	2,79E+00			-3,95E+01				-1,61E+00	-1,00E+00	-2,67E+00	1,30E+01	2,93E+00				1,26E-02	-7,49E-02	
		VF _{wresp}	Relativa relativa					1,33E+00	1,1E+00	5,74E-01						-8,23E-01	-1,00E+00	-1,00E+00	2,34E-02	1,03E+00	-1,37E-01	-1,79E-01			-4,43E-01	
		Score1						1,96E+00	1,5E+01	7,54E-01						-4,94E+00	-3,00E+00	-9,00E+00	4,68E+00	9,82E+00					-8,87E-01	
		Score2						5,60E-01	3,40E+00	1,69E-01						-1,37E+00	-1,00E+00	-2,67E+00	2,33E+00	2,93E+00					-2,96E-01	
		LF	Relativa relativa	7,52E-01		-9,03E-01	-9,51E-01	-8,96E-01	-1,80E-01	-2,0E-01			-9,46E-01									-1,26E+00		1,43E-01	7,87E-01	
		Score1					-1,45E+03	-8,96E+01	-2,65E-01	-2,7E+00			-2,84E+01											1,56E-01	4,88E+01	
		Score2					-5,02E+00	-1,77E+00	-7,58E-02	-6,13E-01			-3,95E+01											1,26E-02	1,60E+00	
		1/DAF	Relativa relativa		2,88E-01		1,24E-01	3,20E-01	3,77E-01																-9,56E-04	-3,93E+01
		Score1					1,90E+02	3,20E+01	5,54E-01																-1,05E-03	-5,58E+02
	Score2					2,07E-02	6,35E-01	1,59E-01																-8,44E-05	-4,72E+01	

Tab. N.7 Classificazione sensibilità

Fattori di trasporto	W (cm)	Sw (cm)	dgw (cm)	Ksat (cm/s)	i	θ_r	θ_w	θ_{wcap}	f_{oc}	$\delta_{air}(cm)$	W'(cm)	Uair (cm/s)	τ (anni)	L _{crack} (cm)	L _b (cm)	ER (1/d)	η	θ_{wcrack}	L _{ow} (cm)	h _{cap} (cm)	ρ_s (g/cm ³)	I _{er} (cm/anno)	L _s (cm)	αx (cm)	
VFss						Bassa	Medio/Bassa		Alta	Alta	Alta	Alta	Bassa									Bassa			
Pef										Alta	Alta	Alta													
VF _{samb}						Medio/Bassa	Media		Alta	Alta	Alta	Alta										Bassa		Alta	
VF _{wamb}						Medio/Bassa	Medio/Bassa	Media		Alta	Alta	Alta									Bassa	Alta			
VF _{sresp}						Medio/Bassa	Medio/Bassa		Alta					Medio/Alta	Media	Alta	Alta	Alta	Medio/Bassa			Bassa		Bassa	
VF _{wresp}						Medio/Bassa	Media	Bassa						Medio/Bassa	Media	Alta	Alta	Alta	Bassa		Bassa	Bassa			Media
LF	Alta		Alta	Alta	Media	Bassa	Bassa		Alta													Bassa	Medio/Alta		
1/DAF		Alta		Alta	Alta	Bassa			Alta												Alta				Alta

Tab. N.8 Classificazione sensibilità generale

Fattori di trasporto	Vie di migrazione	Sensibilità
W (cm)	LF	Alta
Sw (cm)	1/DAF	Alta
dgw (cm)	LF	Alta
Ksat (cm/s)	LF, 1/DAF	Alta
i	LF, 1/DAF	Alta
θ_T	VFss, VFsamb, VFwamb, VFsest, VFwesp, LF, 1/DAF	Bassa
θ_w	VFss, VFsamb, VFwamb, VFsest, VFwesp, LF	Medio/Bassa
θ_{wcap}	VFwamb, VFwesp	Medio/Bassa
f_{oc}	VFss, VFsamb, VFsest, LF, 1/DAF	Alta
$\delta_{air}(cm)$	VFss, Pef, VFsamb, VFwamb	Alta
W'(cm)	VFss, Pef, VFsamb, VFwamb	Alta
Uair (cm/s)	VFss, Pef, VFsamb, VFwamb	Alta
τ (anni)	VFss	Bassa
L_{crack} (cm)	VFsest, VFwesp	Media
Lb (cm)	VFsest, VFwesp	Media
ER (1/d)	VFsest, VFwesp	Alta
η	VFsest, VFwesp	Alta
θ_{wcrack}	VFsest, VFwesp	Medio/Bassa
L_{GW} (cm)	VFwamb, VFwesp	Media
h_{cap} (cm)	VFwamb, VFwesp	Media
ρ_s (g/cm ³)	VFss, VFsamb, VFsest, LF	Bassa
I_{ef} (cm/anno)	LF	Medio/Alta
L_s (cm)	VFsamb, VFsest, VFwesp	Media
α_X (cm)	1/DAF	Alta

Tab. N. 9 Scelte più conservative

Fattori di trasporto	W (cm)	Sw (cm)	dgw (cm)	Ksat (cm/s)	i	θ_r	θ_w	θ_{wcap}	f_{oc}	$\delta_{air}(cm)$	W'(cm)	Uair (cm/s)	τ (anni)	L_{crack} (cm)	L_v (cm)	ER (1/d)	η	θ_{wcrack}	L_{GW} (cm)	h_{cap} (cm)	ρ_s (g/cm ³)	I_{er} (cm/anno)	L_c (cm)	αx (cm)	
VFss						>	<		<	<	>	<	<									>			
Pef										<	>	<													
VFsamb						>	<		<	<	>	<										>		>	
VFwamb						>	<	<		<	>	<								<	<				
VFsesp						>	<		<					<	<	<	>	<				>		<	
VFwesp						>	<	<						<	<	<	>	<	<	<					
LF	>		<	<	<	<	<		<													>	>	<	
1/DAF		>		>	>	>			<													<			<