

**Provincia di Milano
Settore Rifiuti e Bonifiche**

URS ITALIA S.p.A.



**Versione 3.1
Analisi di Sensitività**

INTRODUZIONE	1
SEZIONE 1 INALAZIONE DI VAPORI OUTDOOR DA SUOLO SUPERFICIALE	2
1.1 EQUAZIONI DI RIFERIMENTO	2
1.2 CALCOLO DELLE VARIAZIONI.....	3
1.3 SINTESI DEI RISULTATI.....	7
SEZIONE 2 INALAZIONE DI VAPORI OUTDOOR DA SUOLO PROFONDO	8
2.1 EQUAZIONI DI RIFERIMENTO	8
2.2 CALCOLO DELLE VARIAZIONI.....	9
2.3 SINTESI DEI RISULTATI.....	12
SEZIONE 3 INALAZIONE DI VAPORI OUTDOOR DALLA FALDA	13
3.1 EQUAZIONI DI RIFERIMENTO	13
3.2 CALCOLO DELLE VARIAZIONI.....	14
3.3 SINTESI DEI RISULTATI.....	19
SEZIONE 4 INALAZIONE DI VAPORI INDOOR DAL SUOLO	20
4.1 EQUAZIONI DI RIFERIMENTO	20
4.2 CALCOLO DELLE VARIAZIONI.....	21
4.3 SINTESI DEI RISULTATI.....	26
SEZIONE 5 INALAZIONE DI VAPORI INDOOR DALLA FALDA	27
5.1 EQUAZIONI DI RIFERIMENTO	27
5.2 CALCOLO DELLE VARIAZIONI.....	28
5.3 SINTESI DEI RISULTATI.....	34
SEZIONE 6 PERCOLAZIONE IN FALDA	35
6.1 EQUAZIONI DI RIFERIMENTO	35
6.2 CALCOLO DELLE VARIAZIONI.....	36
6.3 SINTESI DEI RISULTATI.....	40
SEZIONE 7 TRASPORTO IN FALDA	41
7.1 EQUAZIONI DI RIFERIMENTO	41
7.2 CALCOLO DELLE VARIAZIONI.....	42
7.3 SINTESI DEI RISULTATI.....	43
SEZIONE 8 SINTESI DEI RISULTATI	44
SEZIONE 9 BIBLIOGRAFIA	46

INTRODUZIONE

Questo documento illustra i risultati di uno studio di sensitività dei modelli di calcolo che sono implementati nel software Giuditta 3.1.

In generale lo scopo dell'analisi di sensitività è di definire la variazione dei dati di output di un modello di calcolo al variare di una o più variabili di input, ferme restando tutte le altre.

In questo caso l'obiettivo non è stato di predisporre un rigoroso studio scientifico circa la sensitività di tutte le variabili coinvolte nel calcolo del rischio, per il quale si rimanda a pubblicazioni specifiche.

L'obiettivo perseguito è stato di fornire agli utilizzatori di Giuditta 3.1 uno strumento in grado di indicare in modo rapido, per ciascuna delle vie di esposizione studiate, le variabili sito specifiche che maggiormente influenzano il valore dei fattori di trasporto e, conseguentemente, il valore di rischio sanitario.

E' pertanto su questi parametri che dovrà prioritariamente concentrarsi l'attenzione di chi esegue l'analisi di rischio.

L'analisi di sensitività è stata eseguita considerando il **benzene** quale contaminante di riferimento in quanto si tratta di una delle sostanze che meglio rappresenta le caratteristiche dei contaminanti tipicamente presenti nei siti inquinati: di ciò dovrà essere tenuto conto nel corso della consultazione di questo documento.

Lo studio ha considerato esclusivamente le vie di esposizione di tipo indiretto, ossia le vie per le quali il contatto tra la sorgente e il recettore si realizza mediante un fenomeno di trasporto. Non sono state considerate le vie di esposizione associate a contatto diretto con il suolo superficiale ossia contatto dermico e ingestione di suolo in quanto unicamente dipendenti da parametri tossicologici e di esposizione; l'inalazione di polveri non è stata considerata in quanto il relativo fattore di emissione è direttamente o inversamente proporzionale ai parametri che ne determinano il valore.

Conseguentemente, le vie di esposizione considerate sono:

- inalazione di vapori indoor da suolo superficiale;
- inalazione di vapori outdoor da suolo profondo;
- inalazione di vapori outdoor dalla falda
- inalazione di vapori indoor da suolo;
- inalazione di vapori indoor dalla falda;
- percolazione in falda;
- migrazione della fase dissolta in falda.

L'analisi di sensitività è stata mantenuta su un piano qualitativo, ossia è stata finalizzata ad individuare, per ciascuna via di esposizione, le variabili di input che maggiormente incidono nella determinazione del valore del fattore di trasporto.

Per ciascuna via di esposizione sono state quindi definite variabili a sensitività alta, media, bassa in funzione di una valutazione comparativa dell'effettiva incidenza di ciascuna di essa nel determinare apprezzabili variazioni del fattore di trasporto considerato.

Il documento è organizzato in sezioni, ciascuna dedicata allo studio delle singole vie di esposizione; al termine di ciascuna sezione vengono riassunti e comparati i risultati acquisiti indicando le variabili che più influenzano il fattore di trasporto in esame.

Al termine del documento la sezione 8 illustra, mediante tabelle sinottiche, i principali risultati acquisiti.

SEZIONE 1 INALAZIONE DI VAPORI OUTDOOR DA SUOLO SUPERFICIALE

1.1 Equazioni di riferimento

Il rischio relativo all'inalazione di vapori outdoor dal suolo superficiale nel software Giuditta 3.1 viene calcolato attraverso la stima del fattore di volatilizzazione, la cui formula è presentata qui di seguito:

$$VF_{SS} = \frac{2W\rho_s}{U_{air} \cdot \delta_{air}} \cdot \sqrt{\frac{D_s^{eff} \cdot H}{\pi\tau(\theta_{ws} + k_{oc}f_{oc}\rho_s + H\theta_{as})}} * 10^3 \quad (1)$$

In cui:

$$D_s^{eff} = D_a \cdot \frac{g_{as}^{3.33}}{\theta_T^2} + \frac{D_w}{H} \cdot \frac{g_{ws}^{3.33}}{\theta_T^2} \quad (2)$$

Dove:

W: Lunghezza della contaminazione nella direzione del vento dominante (cm)

ρ_s : Densità del suolo (t/m³)

U_{air} : Velocità del vento (cm/s)

δ_{air} : Spessore della zona di miscelazione (cm)

H: Costante di Henry (adim)

τ : Tempo di esposizione (s, nel grafico è in anni)

θ_{ws} : Contenuto volumetrico d'acqua nell'insaturo (adim)

θ_{as} : Contenuto volumetrico d'aria nell'insaturo (adim)

θ_T : Porosità totale insaturo (adim)

D_s^{eff} : Diffusività efficace insaturo (cm²/s)

D_a : Coefficiente di diffusione in aria (cm²/s)

D_w : Coefficiente di diffusione in acqua (cm²/s)

K_{oc} : Coefficiente di ripartizione carbonio organico/acqua (cm³/g)

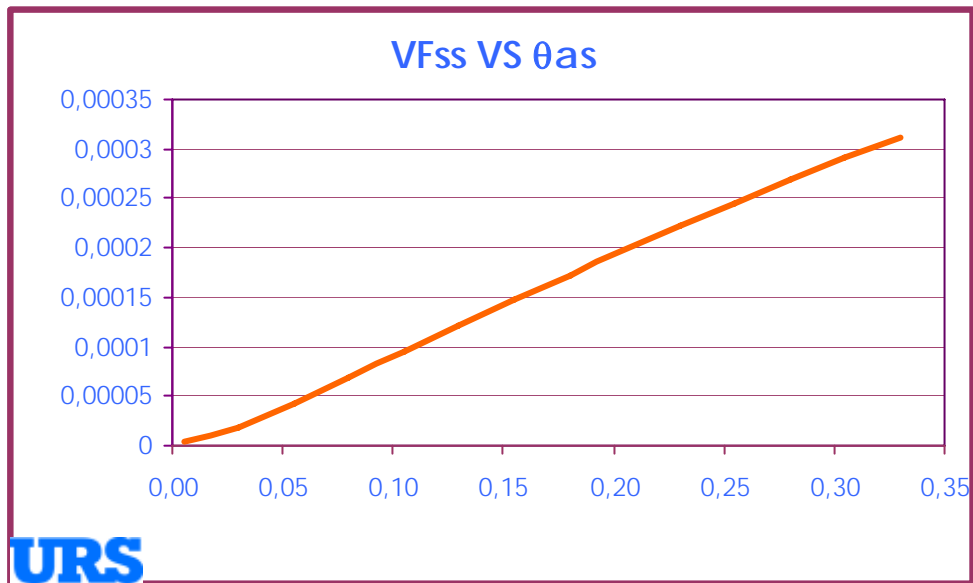
F_{oc} : Frazione di carbonio organico nel suolo (g/kg)

1.2 Calcolo delle variazioni

Sulla base della formula evidenziata, risulta:

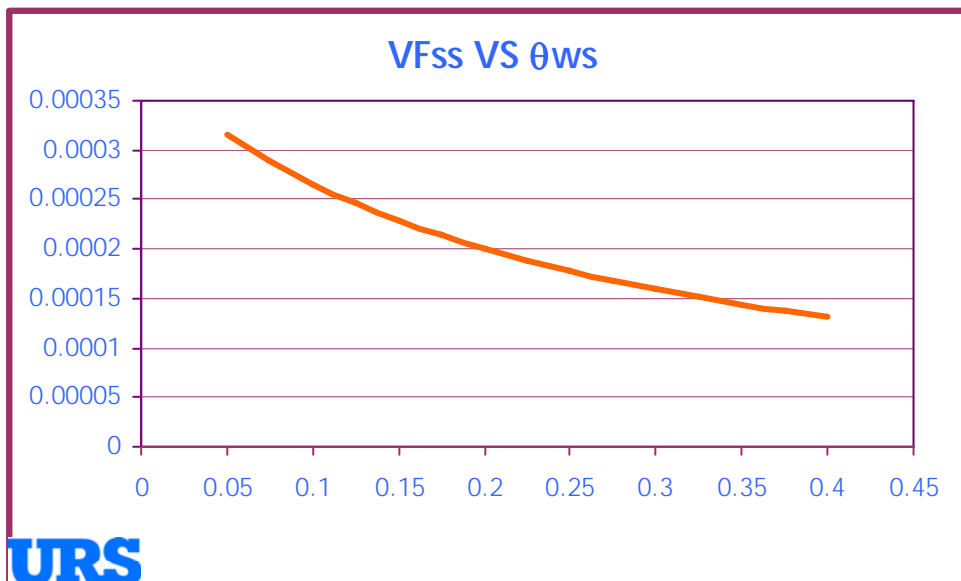
$$VF_{SS} = f(W, \rho_S, U_{air}, \partial_{air}, f_{oc}, \theta_{ws}, \theta_{as}, \tau)$$

Viene di seguito messa in evidenza la variazione del fattore di volatilizzazione VF_{SS} in funzione dei parametri elencati.

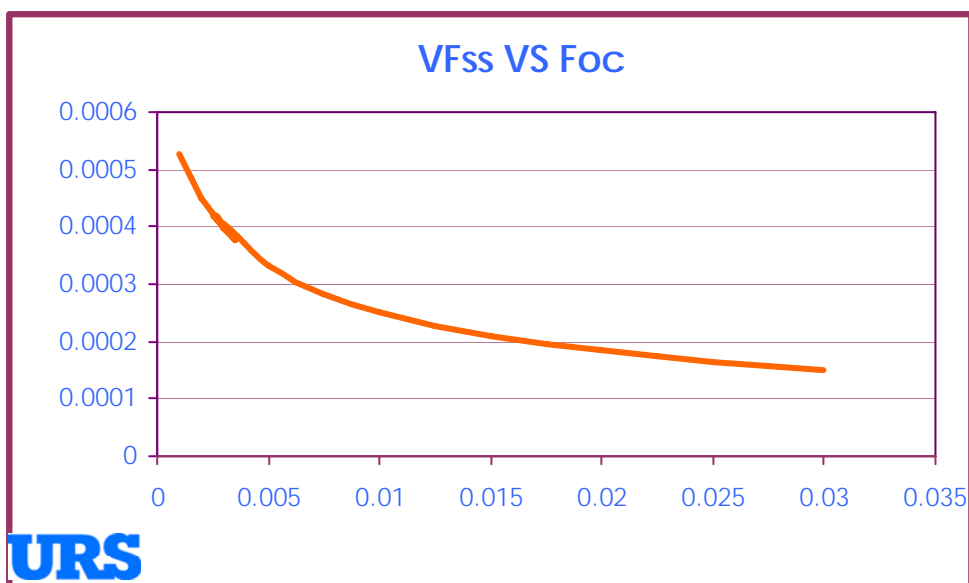


Questo grafico evidenzia che il fattore di volatilizzazione VF_{SS} cresce in maniera pressoché lineare al crescere del contenuto volumetrico d'aria nell'insaturo (θ_{as}) che, a sua volta, è connesso con la granulometria dei terreni. L'incremento di θ_{as} determina un incremento della diffusività del contaminante nell'insaturo (equazione 2) che, a sua volta, determina un incremento del fattore di volatilizzazione (equazione 1).

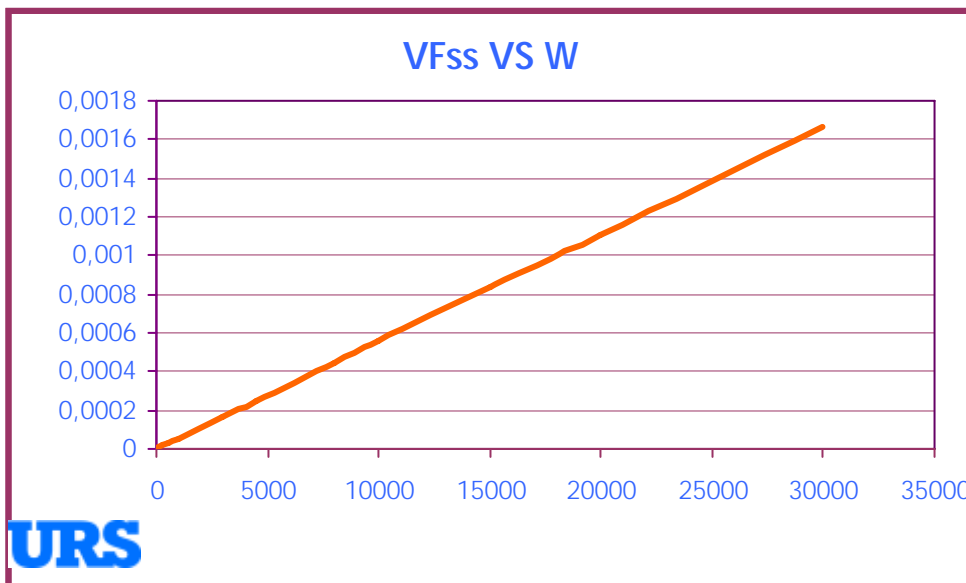
Si deriva pertanto che al crescere della granulometria dei terreni (e quindi del contenuto volumetrico d'aria) cresce il fattore di volatilizzazione.



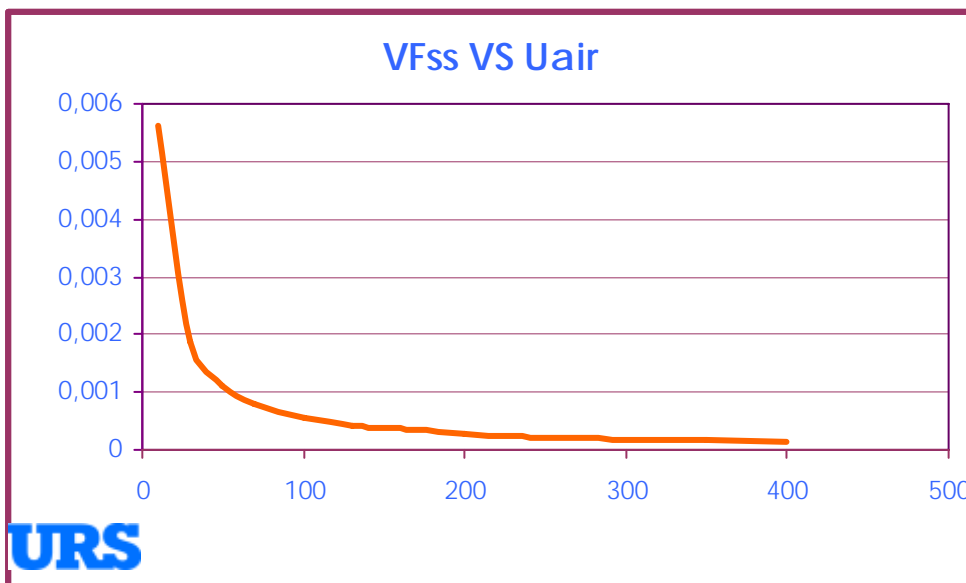
Il fattore di volatilizzazione VF_{ss} decresce al crescere del contenuto volumetrico d'acqua nell'insaturo (θ_{ws}). Il decremento del fattore di volatilizzazione è dovuto al decremento della diffusività del contaminante nell'insaturo espressa dall'equazione (2). θ_{ws} varia in funzione della granulometria dei terreni in esame ed è tipicamente compreso tra un valore minimo pari a 0.04 (terreni ghiaiosi) ad un massimo pari a 0.4 (terreni argillosi).



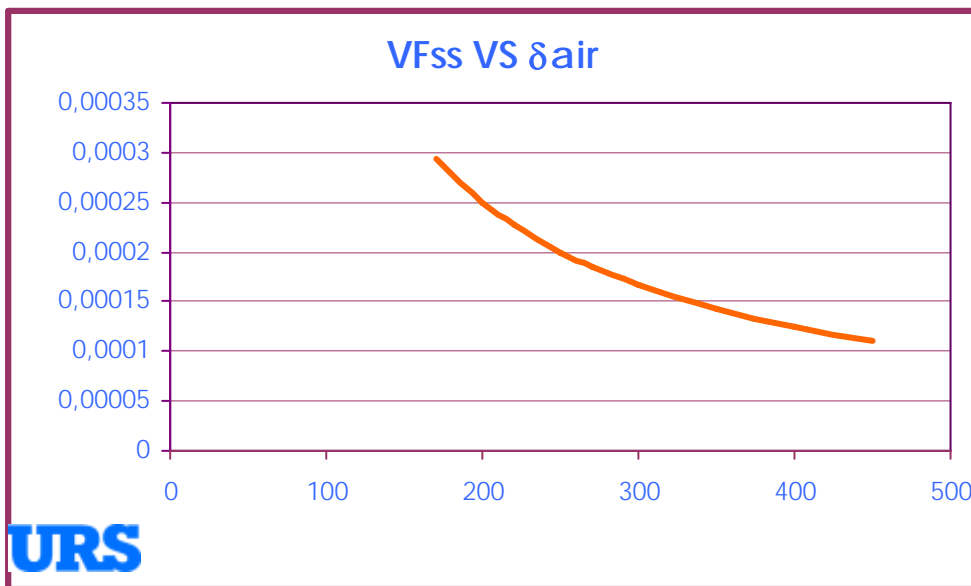
Il fattore di volatilizzazione dai suoli superficiali decresce al crescere del contenuto di sostanza organica nei suoli. E' interessante notare che la variazione è particolarmente marcata, nel caso in esame, per valori della frazione organica prossimi o inferiori a 0,01 (1%); per valori più elevati di F_{oc} , le variazioni del fattore di volatilizzazione risultano minime. In generale il valore minimo di F_{oc} utilizzato nei terreni è pari a 0.001 ed il valore massimo pari a 0.03.



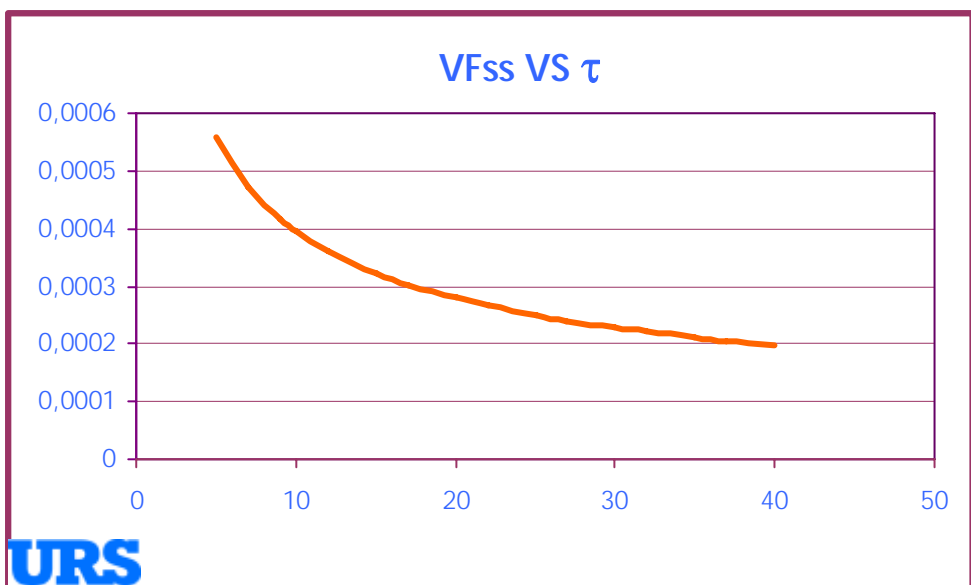
Come evidente dalla formulazione analitica, il fattore di volatilizzazione da suolo superficiale aumenta linearmente all'aumentare della dimensione longitudinale dell'area contaminata (espressa in questo grafico in cm).



Il grafico evidenzia che il fattore di volatilizzazione decresce all'aumentare della velocità del vento, ovvero della portata d'aria di diluizione. Ciò avviene in maniera più marcata per valori della velocità nell'intorno di 50 cm/s, ovvero in condizioni di calma di vento. Il valore di default di questo parametro utilizzato nel database di Giuditta 3.1 è pari a 225 cm/s.



Il grafico evidenzia il fattore di volatilizzazione decresce all'aumentare dello spessore della zona di miscelazione in aria, ovvero della portata d'aria di diluizione; il valore di tale parametro è tuttavia generalmente fissato pari all'altezza di respirazione 180-200 cm. Il valore di default di questo parametro utilizzato nel database di Giuditta 3.1 è pari a 200 cm.



Il grafico evidenzia che il fattore di volatilizzazione decresce all'aumentare dello tempo di esposizione. Il tempo di esposizione fa parte tuttavia delle assunzioni di default per la caratterizzazione del rischio ed è pari a 25-30 anni.

1.3 Sintesi dei risultati

Sulla base delle considerazioni esposte i parametri che influiscono maggiormente sul fattore di volatilizzazione e che conseguentemente devono essere oggetto di una scelta accurata sono:

- la frazione di carbonio organico nei terreni (F_{oc});
- la lunghezza della sorgente di contaminazione nella direzione del vento dominante (W);
- lo spessore della zona di miscelazione (δ_{air});
- la velocità del vento nella zona di esposizione (U_{air}).

SEZIONE 2 INALAZIONE DI VAPORI OUTDOOR DA SUOLO PROFONDO

2.1 Equazioni di riferimento

Il rischio relativo all'inalazione di vapori outdoor dal suolo profondo nel software Giuditta 3.1 viene calcolato attraverso la stima del fattore di volatilizzazione, la cui formula è presentata qui di seguito:

$$VFSamb = \frac{H\rho_s}{[\theta_{ws} + K_{OC}F_{OC}\rho_s + H\theta_{as}] \left[1 + \frac{U_{air}\delta_{air}L_s}{D_s^{eff}W} \right]} * 10^3 \quad (3)$$

In cui:

$$D_s^{eff} = D_a \cdot \frac{g_{as}^{3.33}}{\theta_T^2} + \frac{D_w}{H} \cdot \frac{g_{ws}^{3.33}}{\theta_T^2} \quad (4)$$

W: Lunghezza della contaminazione nella direzione del vento dominante (cm)

ρ_s : Densità del suolo (t/m³)

U_{air} : Velocità del vento (cm/s)

δ_{air} : Spessore della zona di miscelazione (cm)

H: Costante di Henry (adim)

T: Tempo di esposizione (s)

θ_{ws} : Contenuto volumetrico d'acqua nell'insaturo (adim)

θ_{as} : Contenuto volumetrico d'aria nell'insaturo (adim)

θ_T : Porosità totale insaturo (adim)

D_s^{eff} : Diffusività efficace insaturo (cm²/s)

D_a : Coefficiente di diffusione in aria (cm²/s)

D_w : Coefficiente di diffusione in acqua (cm²/s)

K_{OC} : Coefficiente di ripartizione carbonio organico/acqua (cm³/g)

F_{OC} : Frazione di carbonio organico nel suolo (g/kg)

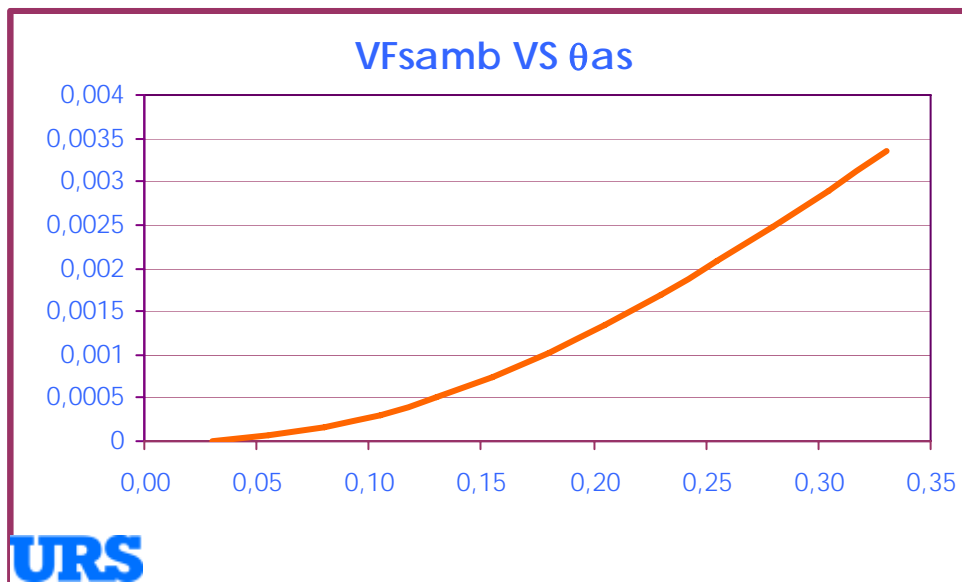
L_s : profondità del terreno contaminato (cm)

Sulla base della formula evidenziata, risulta:

$$VF_{Samb} = f(W, \rho_s, U_{air}, \delta_{air}, f_{oc}, \theta_{ws}, \theta_{as}, L_s)$$

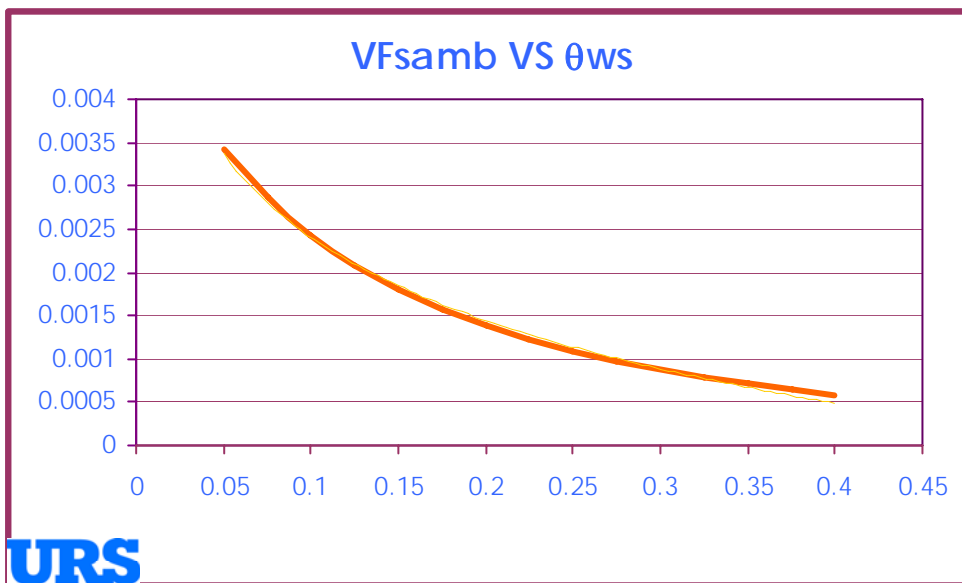
2.2 Calcolo delle variazioni

Qui in seguito viene riportata la variazione del fattore di volatilizzazione VFs in funzione dei parametri elencati.



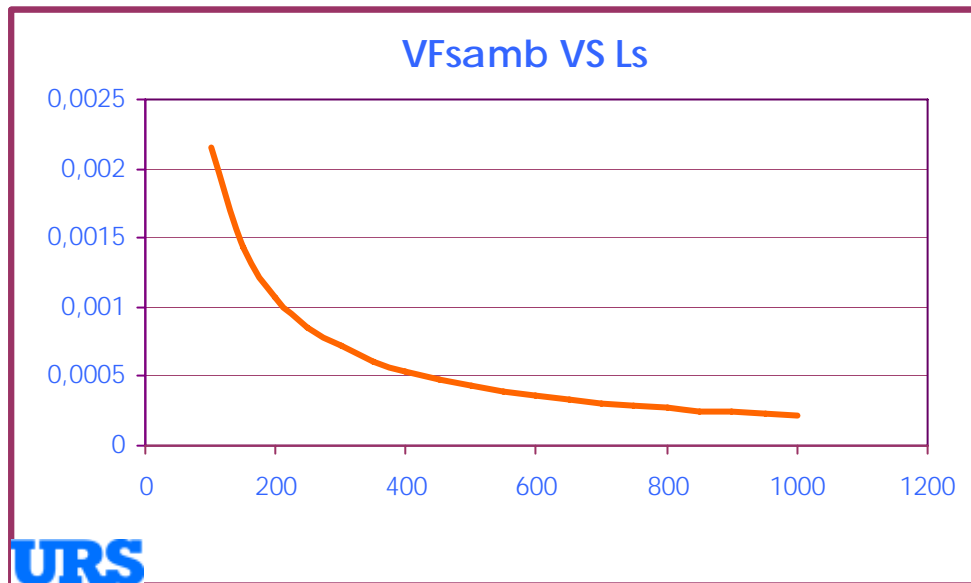
Il fattore di volatilizzazione VFs_{amb} cresce al crescere del contenuto volumetrico d'aria nell'insaturo. L'incremento del fattore di volatilizzazione è dovuto all'incremento della diffusività del contaminante nell'insaturo espressa dall'equazione (4).

9

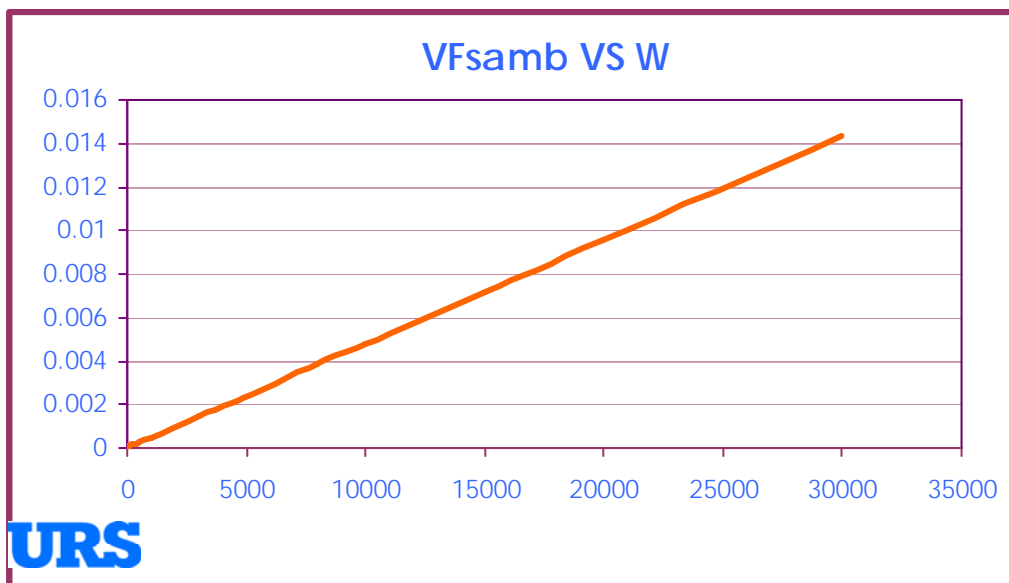


Il fattore di volatilizzazione VFs_{amb} decresce al crescere del contenuto volumetrico d'acqua nell'insaturo. Il decremento del fattore di volatilizzazione

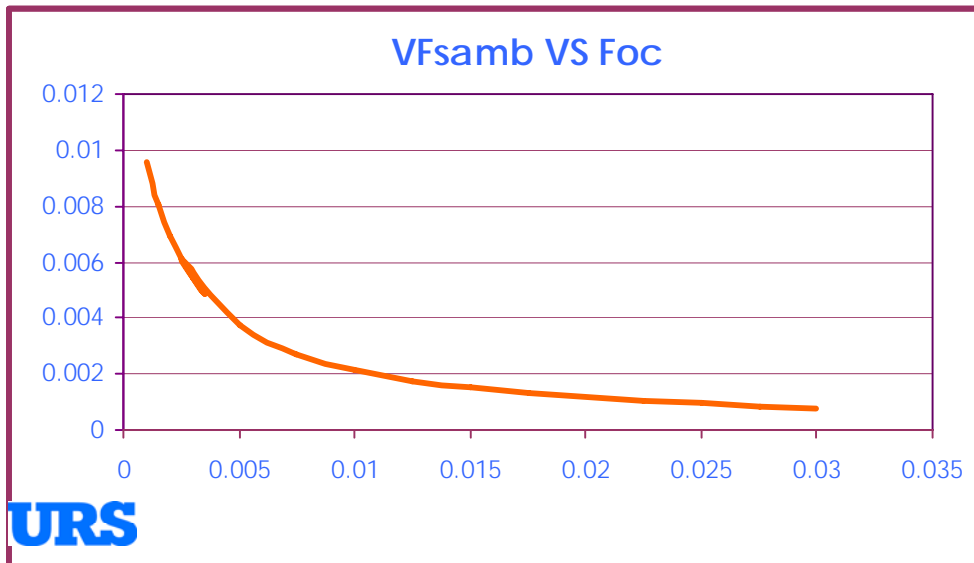
è dovuto al decremento della diffusività del contaminante nell'insaturo espressa dall'equazione (4).



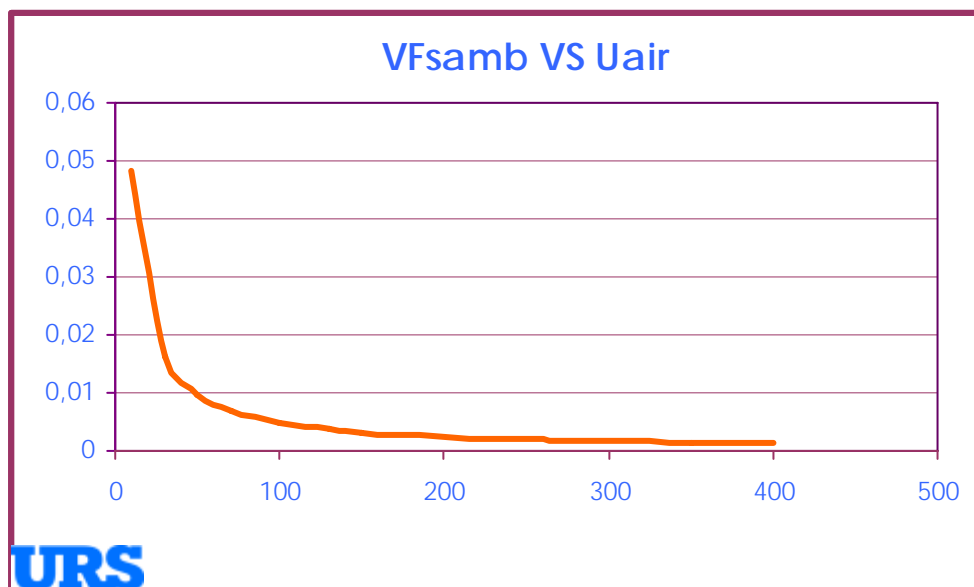
Il fattore di volatilizzazione dai suoli profondi decresce al crescere della profondità degli orizzonti contaminati. La variazione è particolarmente marcata, nel caso in esame, per valori compresi tra 1 m e 2,5 m; per valori più elevati, le variazioni del fattore di volatilizzazione risultano più contenute. La profondità dei terreni contaminati è un parametro noto dalle attività di caratterizzazione del sito.



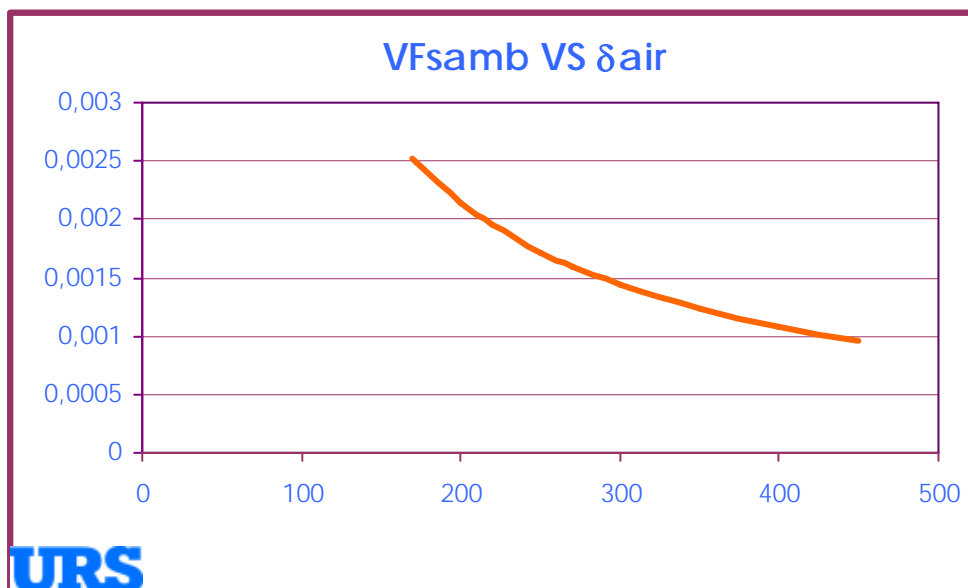
Come evidente dalla formulazione analitica, il fattore di volatilizzazione da suolo superficiale aumenta linearmente all'aumentare della dimensione longitudinale dell'area contaminata (espressa in questo grafico in cm).



Il fattore di volatilizzazione dai suoli profondi decresce al crescere del contenuto di sostanza organica nei suoli. La variazione è particolarmente marcata per valori della frazione organica prossimi o inferiori a 0,01(1%), per valori elevati del Foc, invece, le variazioni del fattore di volatilizzazione risultano minime.



Il grafico evidenzia che il fattore di volatilizzazione decresce all'aumentare della velocità del vento, ovvero della portata d'aria di diluizione. Ciò avviene in maniera più marcata per valori della velocità nell'intorno di 50 cm/s, ovvero in condizioni di calma di vento.



Il grafico evidenzia che il fattore di volatilizzazione decresce all'aumentare dello spessore della zona di miscelazione, ovvero della portata d'aria di diluizione; il valore di tale parametro è tuttavia generalmente fissato pari all'altezza di respirazione 180-200 cm.

2.3

Sintesi dei risultati

Sulla base delle considerazioni espresse, i parametri che influiscono maggiormente sul fattore di volatilizzazione outdoor sono: la frazione di carbonio organico nei terreni,

- la velocità del vento nella zona di esposizione (U_{air});
- lo spessore della zona di miscelazione (δ_{air});
- la lunghezza della sorgente in direzione del vento (W);
- la profondità degli orizzonti contaminati (L_s).

SEZIONE 3 INALAZIONE DI VAPORI OUTDOOR DALLA FALDA

3.1 Equazioni di riferimento

Il rischio relativo all'inalazione di vapori outdoor dalla falda nel software Giuditta 3.1 viene calcolato attraverso la stima del fattore di volatilizzazione, la cui formula è presentata qui di seguito:

$$VFwamb = \frac{H}{1 + \frac{U_{air} \delta_{air} L_{GW}}{D_{ws}^{eff} W}} * 10^3 \quad (5)$$

In cui:

$$D_{ws}^{eff} = (h_c + h_v) \cdot \left[\frac{h_c}{D_{cap}^{eff}} + \frac{h_v}{D_s^{erff}} \right]^{-1} \quad (6)$$

$$D_s^{eff} = D_a \cdot \frac{g_{as}^{3.33}}{\theta_T^2} + \frac{D_W}{H} \cdot \frac{g_{Ws}^{3.33}}{\theta_T^2} \quad (7)$$

$$D_{cap}^{eff} = D_a \cdot \frac{g_{acap}^{3.33}}{\theta_T^2} + \frac{D_W}{H} \cdot \frac{g_{wcap}^{3.33}}{\theta_T^2} \quad (8)$$

W: Lunghezza della piuma nella direzione del vento dominante (cm)

U^{air}: Velocità del vento (cm/s)

δ_{air}: Spessore della zona di miscelazione (cm)

H: Costante di Henry (adim)

θ_{ws}: Contenuto volumetrico d'acqua nell'insaturo (adim)

θ_{as}: Contenuto volumetrico d'aria nell'insaturo (adim)

θ_T: Porosità totale insaturo/frangia capillare (adim)

θ_{wcap}: Contenuto volumetrico d'acqua nella frangia capillare (adim)

θ_{as}: Contenuto volumetrico d'aria nella frangia capillare (adim)

L_{gw}: Sogginenza della falda (cm)

D^{eff}_{ws}: Diffusività efficace sopra l'acquifero (cm²/s)

D^{eff}_s: Diffusività efficace insaturo (cm²/s)

D^{eff}_{cap}: Diffusività efficace nella frangia capillare (cm²/s)

h_c: Spessore della frangia capillare (cm)

h_v: Spessore della zona insatura (cm)

D_a: Coefficiente di diffusione in aria (cm²/s)

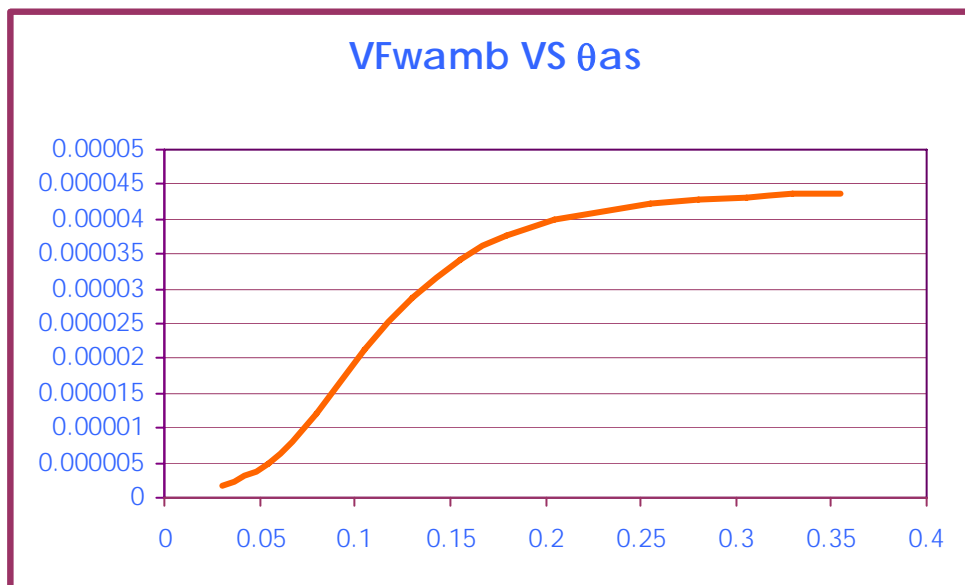
D_w: Coefficiente di diffusione in acqua (cm²/s)

Sulla base della formula evidenziata, risulta:

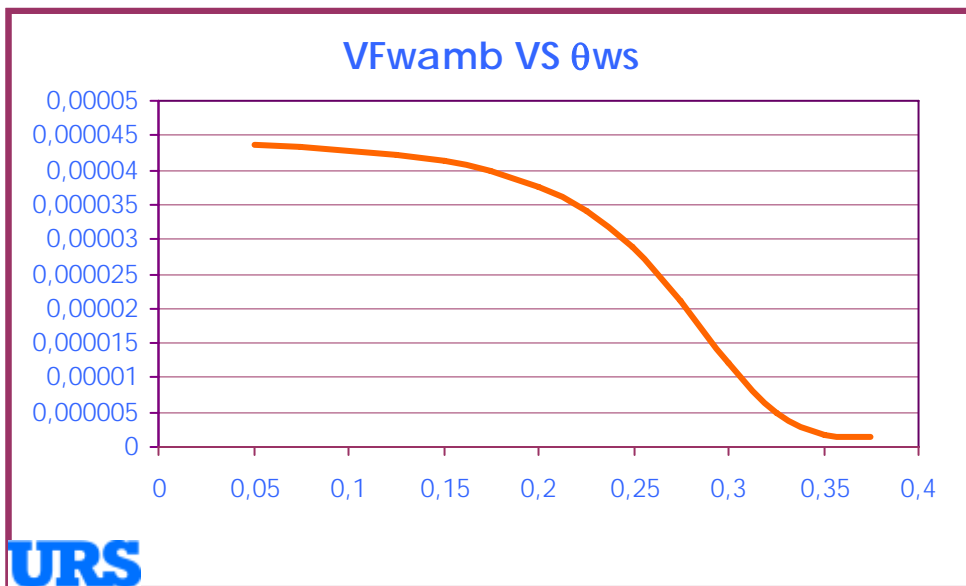
$$VF_{Wamb} = f(\theta_{ws}, \theta_{as}, \theta_{wscap}, \theta_{ascap}, hc, W, \rho_s, U_{air}, \delta_{air}, L_{GW})$$

3.2 Calcolo delle variazioni

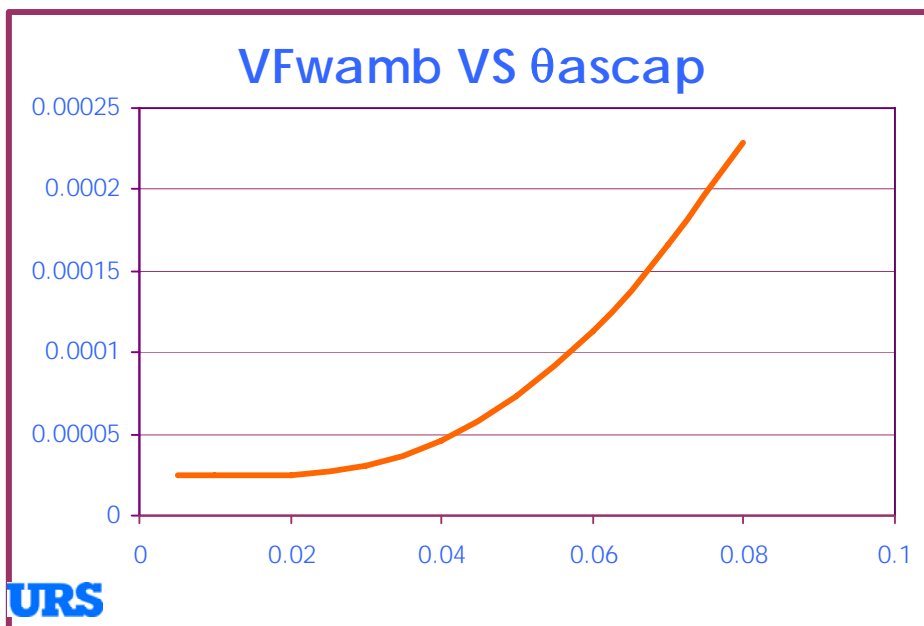
Viene di seguito messa in evidenza la variazione del fattore di volatilizzazione VFwamb in funzione dei parametri elencati.



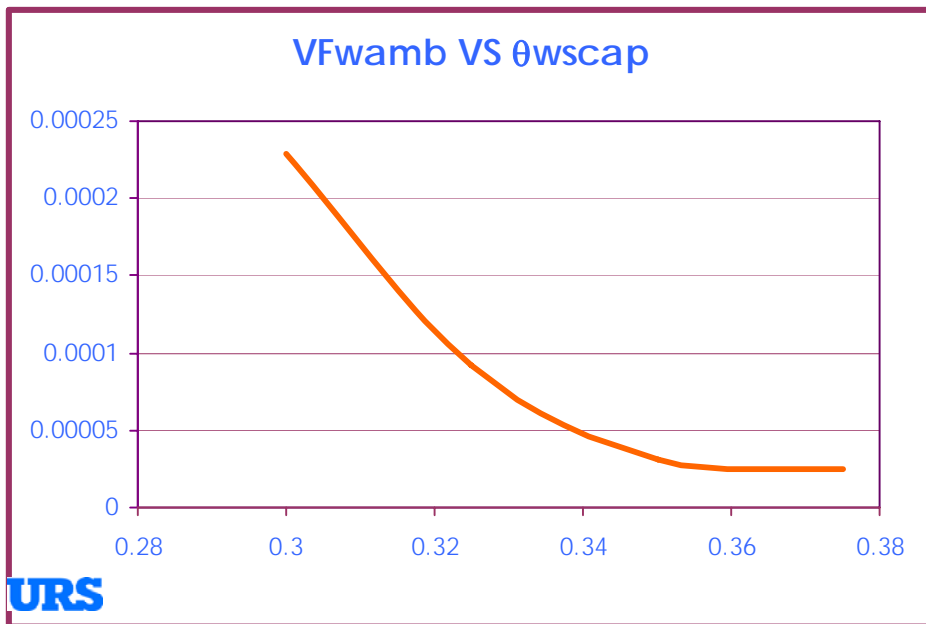
Il fattore di volatilizzazione VFwsamb cresce al crescere del contenuto volumetrico d'aria nell'insaturo. L'incremento del fattore di volatilizzazione è dovuto all'incremento della diffusività del contaminante nell'insaturo espressa dall'equazione (7). L'incremento risulta maggiore per valori bassi del parametro (<0,2), ovvero per terreni che vanno da argillosi a limosi. Il valore di default di questo parametro inserito nel database di Giuditta 3.1 è pari a 0,26 (valore di default ASTM).



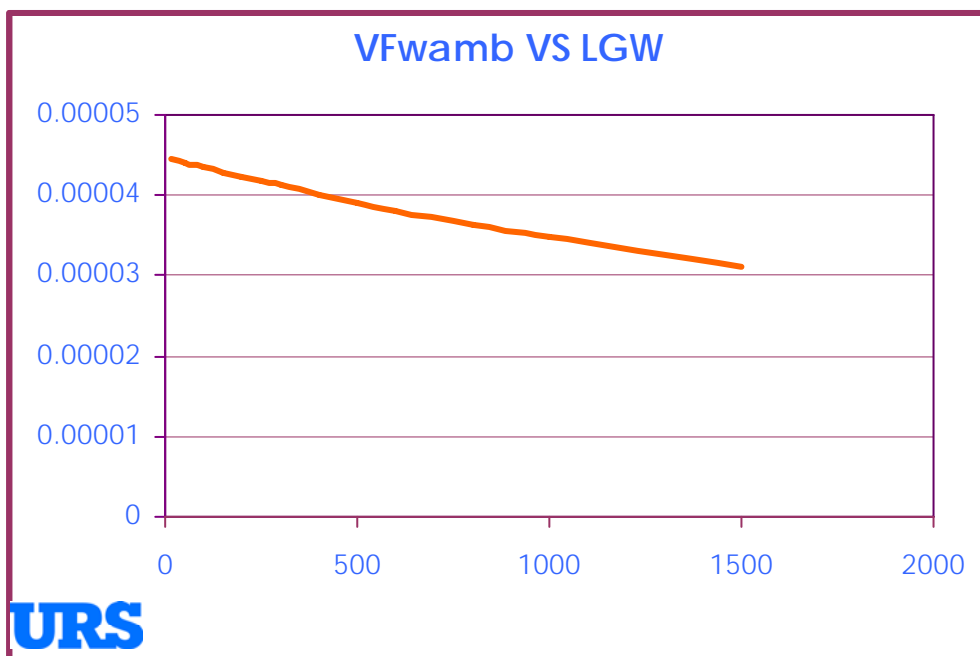
Il fattore di volatilizzazione VFWamb decresce al crescere del contenuto volumetrico d'acqua nell'insaturo. Il decremento del fattore di volatilizzazione è dovuto al decremento della diffusività del contaminante nell'insaturo espressa dall'equazione (7). Il decremento risulta maggiore per valori elevati del parametro ($>0,2$). Il valore di default di questo parametro inserito nel database di Giuditta 3.1 è pari a 0,12 (valore di default ASTM).



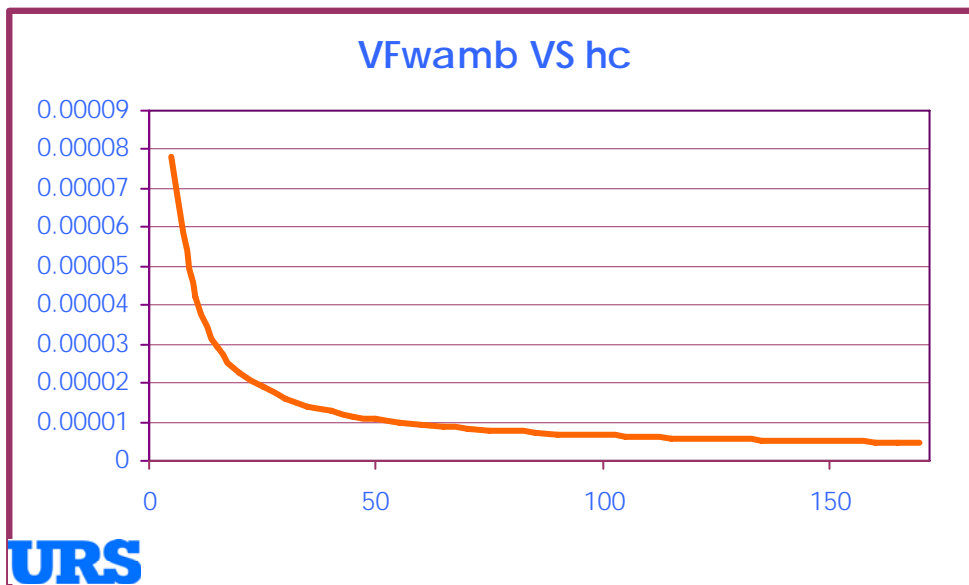
Il fattore di volatilizzazione VFWamb cresce al crescere del contenuto volumetrico d'aria nella frangia capillare. L'incremento del fattore di volatilizzazione è dovuto all'incremento della diffusività del contaminante nell'insaturo espressa dall'equazione (8). L'incremento risulta maggiore per valori superiori a 0,04, tali valori corrispondono a terreni limosi e sabbiosi. Il valore di default di questo parametro inserito nel database di Giuditta 3.1 è pari a 0,038 (valore di default ASTM).



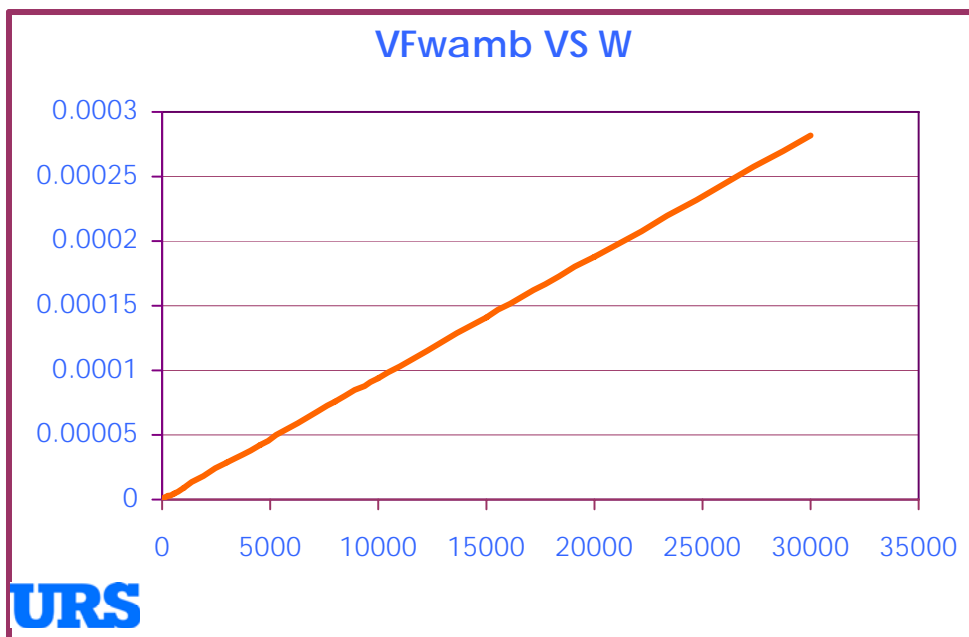
Il fattore di volatilizzazione VFwamb decresce al crescere del contenuto volumetrico d'acqua nella frangia capillare. Il decremento del fattore di volatilizzazione è dovuto al decremento della diffusività del contaminante nell'insaturo espressa dall'equazione (8). Il range di variazione di questo parametro va da un valore minimo di 0,33 ad un valore massimo di 0,38. Il valore di default di questo parametro inserito nel database di Giuditta 3.1 è pari a 0,342 (valore di default ASTM).



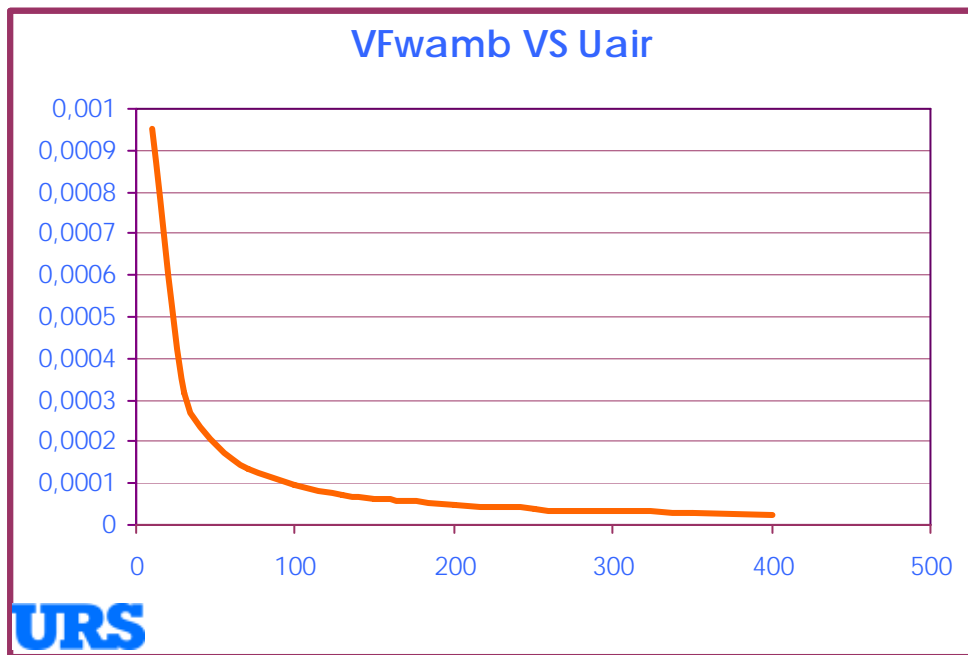
Il fattore di volatilizzazione VFwsamb decresce in maniera pressoché lineare al crescere della soggiacenza della falda.



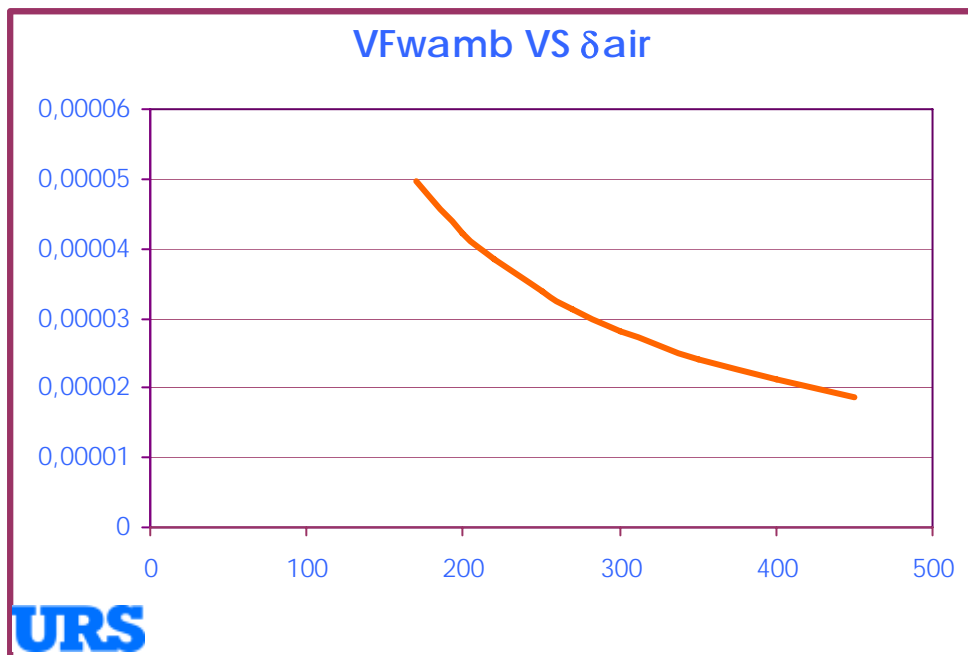
Il fattore di volatilizzazione VFwsamb decresce al crescere dello spessore della frangia capillare, che varia tra 5 cm (terreni sabbiosi) fino a 170 cm (terreni argillosi). Il decremento del fattore di volatilizzazione è dovuto al decremento della diffusività complessiva del contaminante sopra l'acquifero espressa dell'equazione (6). Il decremento risulta molto marcato per valori compresi tra 0 e 50 centimetri.



Come evidente dalla formulazione analitica, il fattore di volatilizzazione dalla falda aumenta linearmente all'aumentare della dimensione longitudinale dell'area contaminata (espressa in questo grafico in cm).



Il grafico evidenzia che, il fattore di volatilizzazione decresce all'aumentare della velocità del vento, ovvero della portata d'aria di diluizione. Ciò avviene in maniera più marcata per valori della velocità nell'intorno di 50 cm/s, ovvero in condizioni di calma di vento.



Il grafico evidenzia che il fattore di volatilizzazione decresce all'aumentare dello spessore della zona di miscelazione, ovvero della portata d'aria di diluizione; il valore di tale parametro è tuttavia generalmente fissato pari all'altezza di respirazione 180-200 cm.

3.3 Sintesi dei risultati

Sulla base delle considerazioni esposte, i parametri che influiscono maggiormente sul fattore di volatilizzazione outdoor sono:

- la dimensione longitudinale dell'area contaminata (W);
- la velocità del vento nella zona di esposizione (U_{air});
- lo spessore della zona di miscelazione (δ_{air}).

in maniera inferiore:

- la soggiacenza della falda (L_{gw});
- lo spessore della frangia capillare (h).

SEZIONE 4 INALAZIONE DI VAPORI INDOOR DAL SUOLO

4.1 Equazioni di riferimento

Il rischio relativo all'inalazione di vapori indoor dal suolo nel software Giuditta 3.1 viene calcolato attraverso la stima del fattore di volatilizzazione, la cui formula è presentata qui di seguito:

$$VFsesp = \frac{\frac{H\rho_s}{\theta_{ws} + K_{OC}F_{OC}\rho_s + H\theta_{as}} \left[\frac{D_s^{eff}/Ls}{ERL_B} \right]}{1 + \left[\frac{D_s^{eff}/Ls}{ERL_B} \right] + \left[\frac{D_s^{eff}/Ls}{\left(\frac{D_{crack}^{eff}}{L_{crack}} \right)^\eta} \right]} * 10^3 \quad (9)$$

In cui:

$$D_s^{eff} = D_a \cdot \frac{g_{as}^{3.33}}{\theta_T^2} + \frac{D_w}{H} \cdot \frac{g_{ws}^{3.33}}{\theta_T^2} \quad (10)$$

$$D_{crack}^{eff} = D_a \cdot \frac{g_{acrack}^{3.33}}{\theta_T^2} + \frac{D_w}{H} \cdot \frac{g_{wcrack}^{3.33}}{\theta_T^2} \quad (11)$$

ER: Tasso di ricambio dell'aria negli edifici (1/s)

L_B: Rapporto volume/area degli edifici (cm)

H: Costante di Henry (adim)

θ_{ws}: Contenuto volumetrico d'acqua nell'insaturo (adim)

θ_{as}: Contenuto volumetrico d'aria nell'insaturo (adim)

θ_T: Porosità totale insaturo/fratture (adim)

θ_{wcap}: Contenuto volumetrico d'acqua nella frangia capillare i (adim)

θ_{as}: Contenuto volumetrico d'aria nella frangia capillare (adim)

θ_{wcrack}: Contenuto volumetrico d'acqua nelle fratture (adim)

θ_{acrack}: Contenuto volumetrico d'aria nelle fratture (adim)

L_s: soggiacenza dei suoli contaminati (cm)

L_{crack}: spessore delle fondazioni(cm)

η: frazione areale di fratture (adim)

D_{crack}^{eff} : Diffusività efficace nelle fratture (cm²/s)

D_s^{eff} : Diffusività efficace insaturo (cm²/s)

D_{cap}^{eff} : Diffusività efficace nella frangia capillare (cm²/s)

Da: Coefficiente di diffusione in aria (cm²/s)

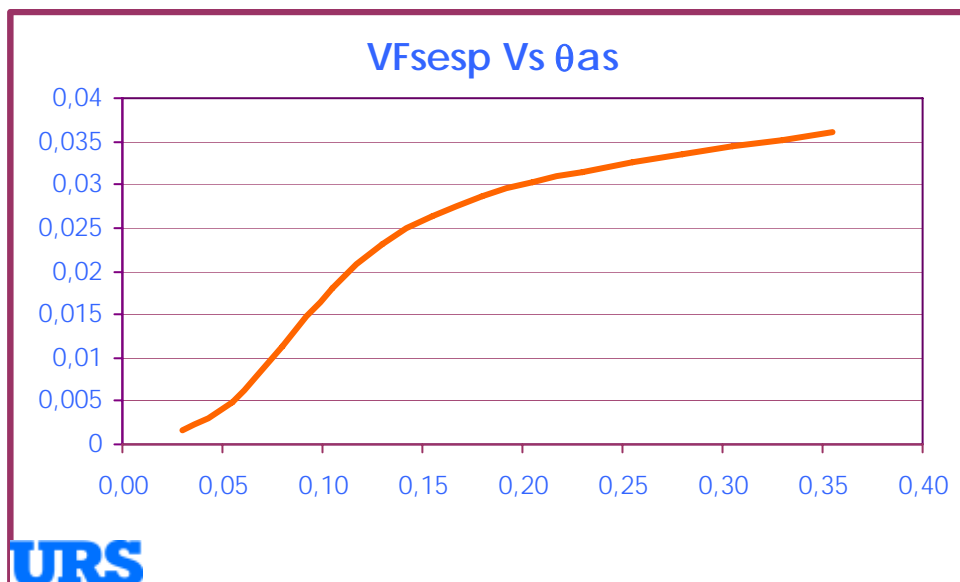
Dw: Coefficiente di diffusione in acqua (cm²/s)

Sulla base della formula evidenziata, risulta:

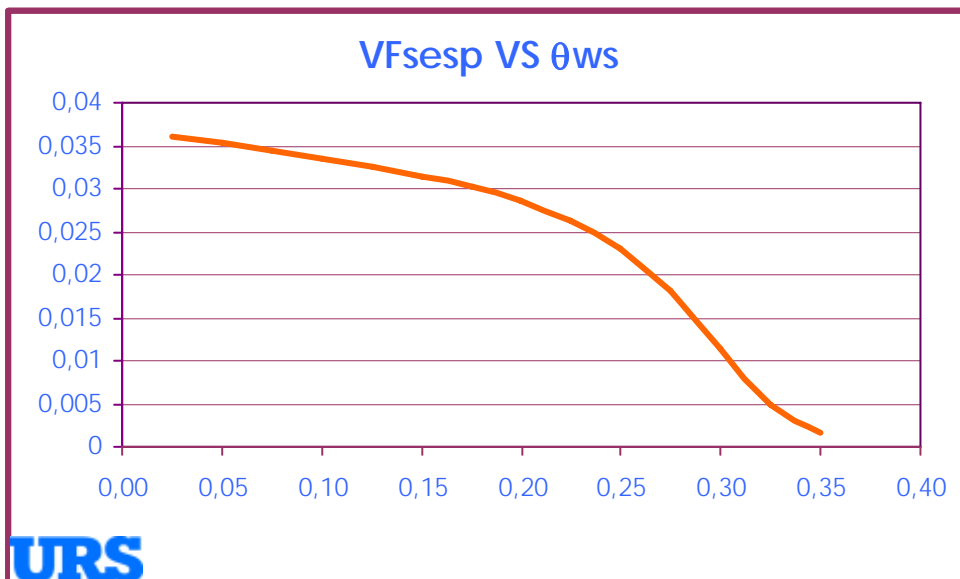
$$VF_{seps} = f(\theta_{ws}, \theta_{as}, \theta_{wscrack}, \theta_{ascrack}, L_s, L_B, ER, Lcrack, foc, \eta)$$

4.2 Calcolo delle variazioni

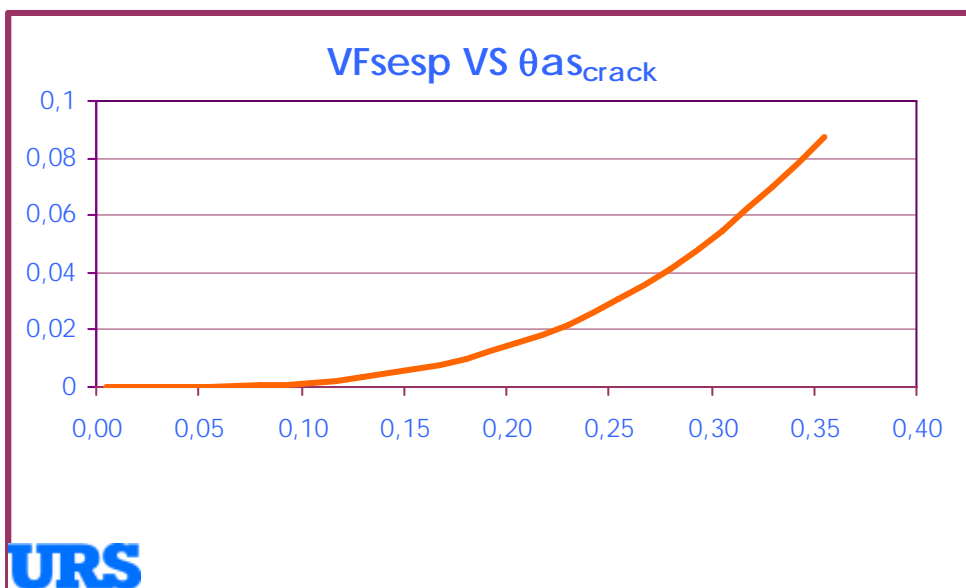
Viene di seguito presentata la variazione del fattore di volatilizzazione VFseps in funzione dei parametri elencati.



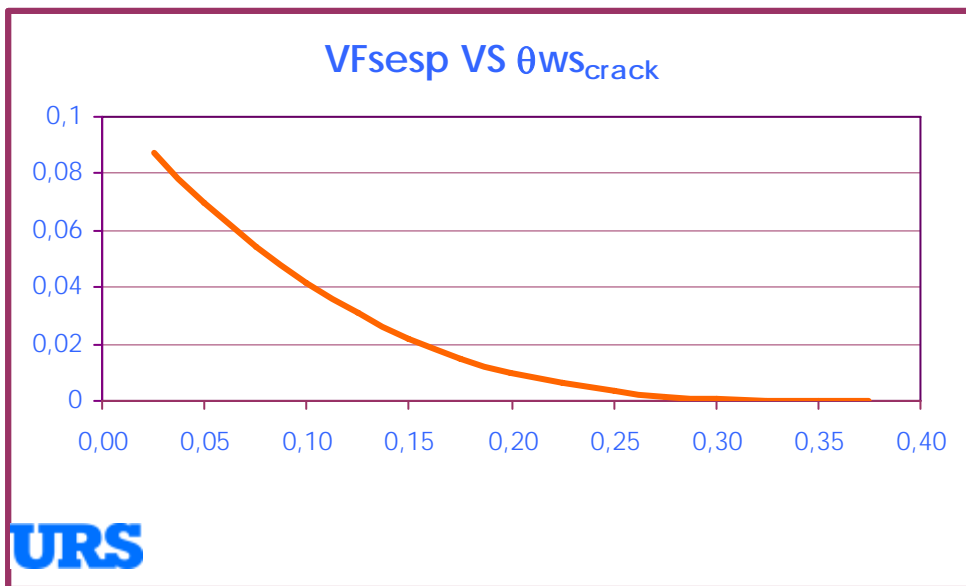
Il fattore di volatilizzazione VFseps cresce al crescere del contenuto volumetrico d'aria nell'insaturo. L'incremento del fattore di volatilizzazione è dovuto all'incremento della diffusività del contaminante nell'insaturo espressa dall'equazione (10). L'incremento risulta maggiore per valori bassi del parametro (<0,1), che caratterizzano terreni sabbioso/ghiaiosi.



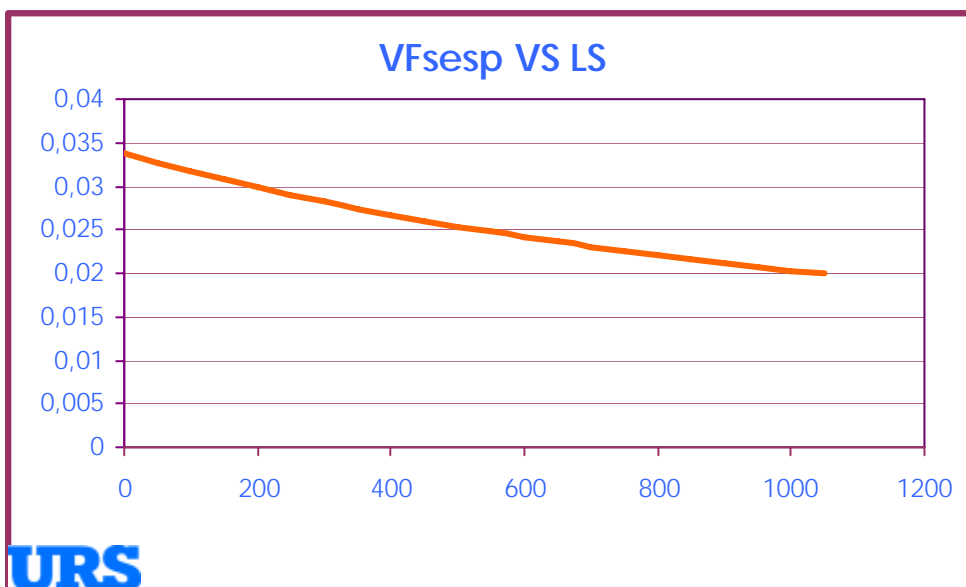
Il fattore di volatilizzazione VFsesp decresce al crescere del contenuto volumetrico d’acqua nell’insaturo. Il decremento del fattore di volatilizzazione è dovuto al decremento della diffusività del contaminante nell’insaturo espressa dall’equazione (10). Il decremento risulta maggiore per valori elevati del parametro ($>0,2$), tali valori caratterizzano terreni sabbiosi.



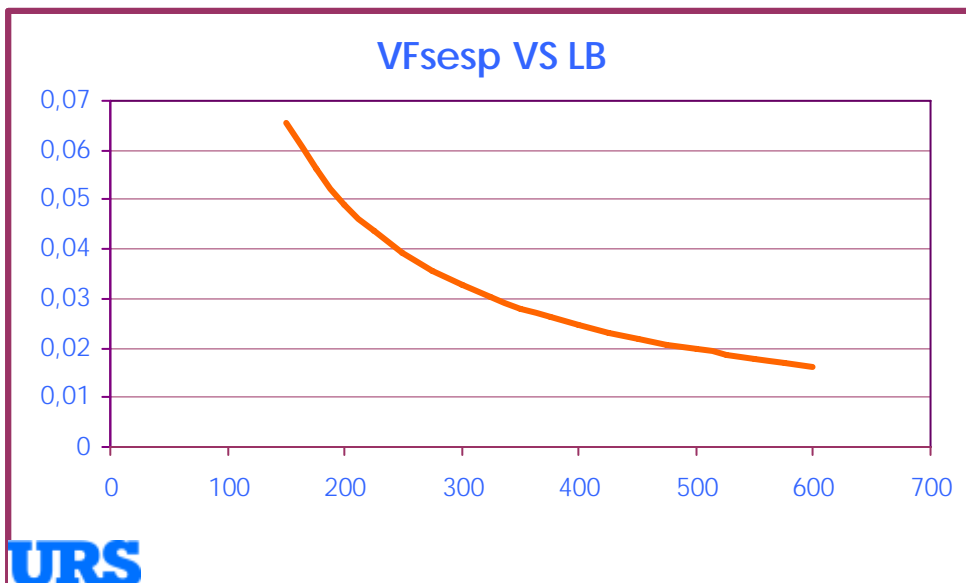
Il fattore di volatilizzazione VFsesp cresce al crescere del contenuto volumetrico d’aria nelle fratture. L’incremento del fattore di volatilizzazione è dovuto all’incremento della diffusività del contaminante nell’insaturo espressa dall’equazione (11). L’incremento risulta maggiore per valori elevati del parametro ($>0,2$).



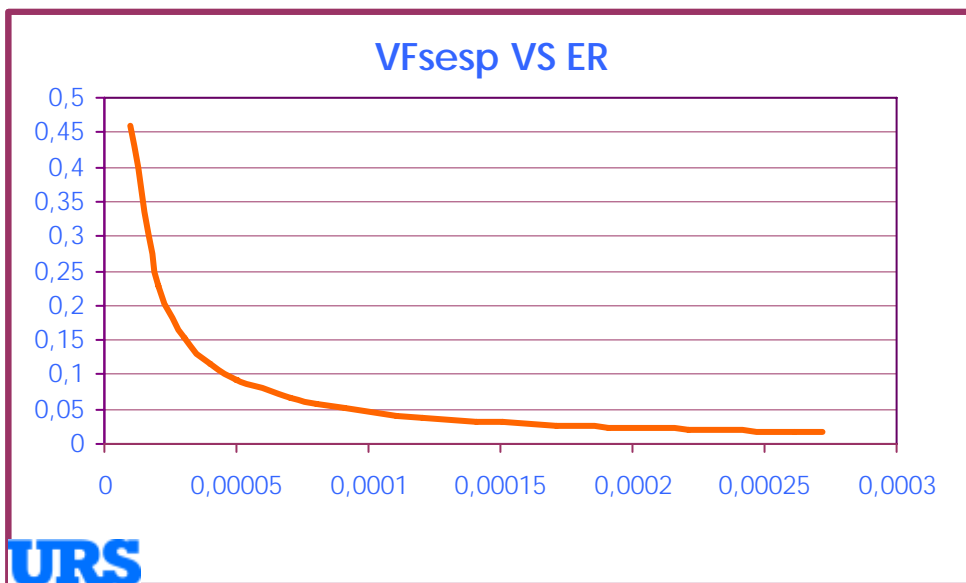
Il fattore di volatilizzazione VFsesp decresce al crescere della del contenuto volumetrico d'acqua nell'insaturo. Il decremento del fattore di volatilizzazione è dovuto al decremento della diffusività del contaminante nell'insaturo espressa dall'equazione (11). Il decremento risulta maggiore per valori bassi del parametro (<0,15).



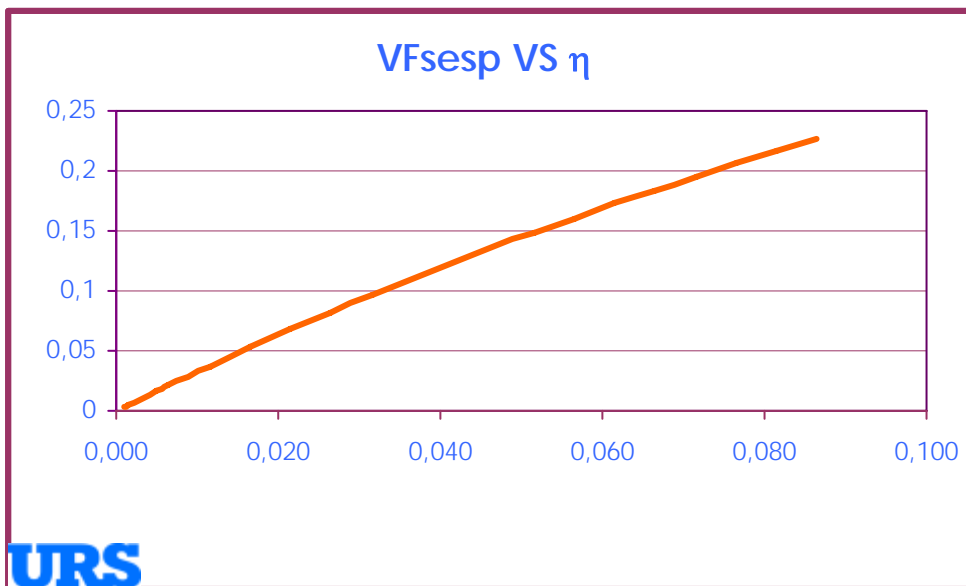
Il fattore di volatilizzazione VFsesp decresce in maniera pressochè lineare all'aumentare della profondità dell'orizzonte dei suoli contaminati. Il decremento risulta non molto marcato.



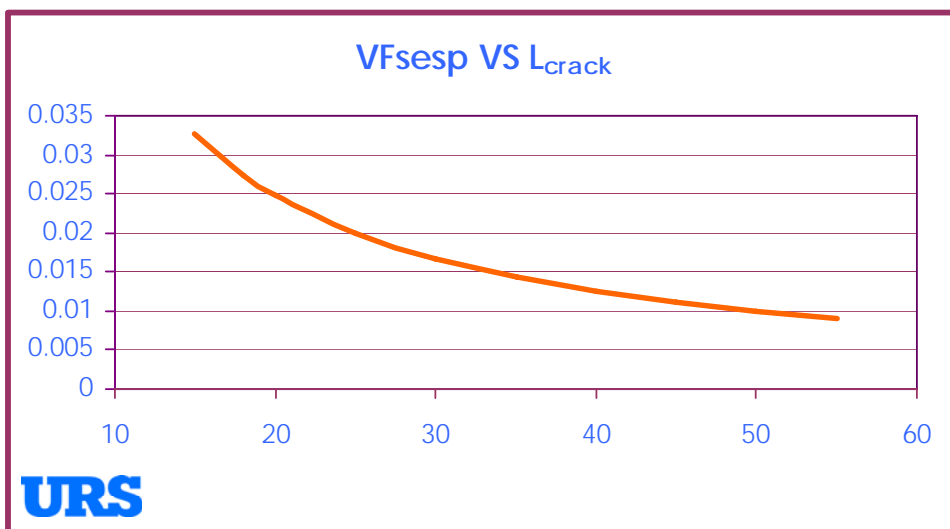
Il fattore di volatilizzazione VFsesp decresce al crescere del rapporto Volume/Area degli edifici, il decremento risulta più marcato al di sotto del valore di 300 cm.



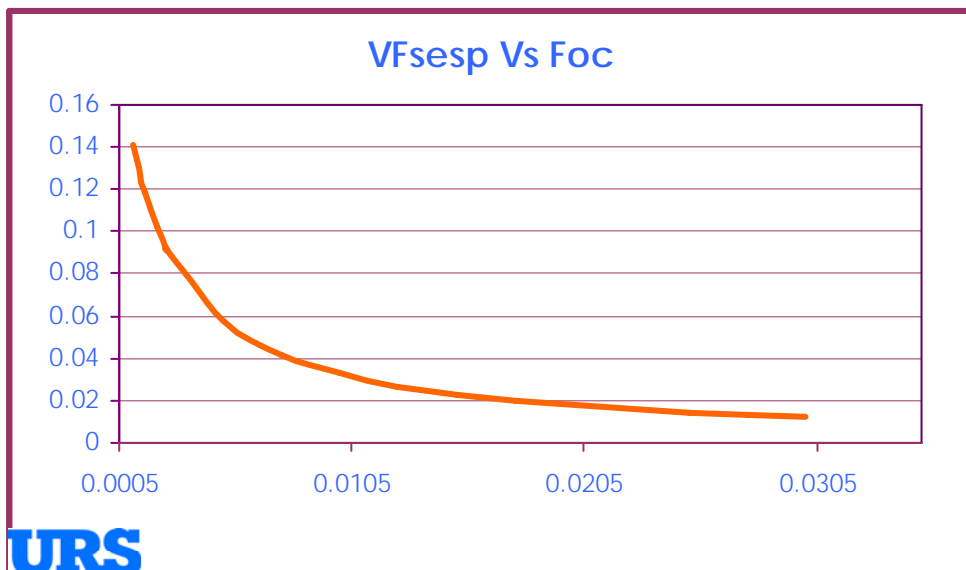
Il fattore di volatilizzazione VFsesp decresce al crescere del tasso di ricambio d'aria negli edifici, il decremento risulta molto marcato, nel caso in esame, al di sotto del valore di $5 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ corrispondente a cinque ricambi al giorno, al di sopra di tale valore, invece, le variazioni sono molto contenute. I valori di default inseriti nel database di Giuditta 3.1 sono pari a $1,4 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ per gli edifici di tipo residenziale e $2,3 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ per gli edifici di tipo industriale. Il grafico mostra che la variazione di VFsesp nel range di questi due valori indicati è bassa.



Il fattore di volatilizzazione VFsesp cresce al crescere in maniera pressoché lineare al crescere della frazione di fratture nelle fondazioni. Il valore di default di questo parametro è pari a 0,01.



Il fattore di volatilizzazione VFsesp decresce al crescere dello spessore delle fondazioni. Il valore di default utilizzato nel database di Giuditta 3.1 è pari a 15 cm.



Il fattore di volatilizzazione VFsesp decresce al crescere del contenuto di sostanza organica nei suoli, il decremento risulta molto marcato, nel caso in esame, al di sotto del valore di 0,01 (1%), al di sopra di tale valore, invece, le variazioni sono molto contenute. In generale il valore minimo di Foc utilizzato nei terreni è pari a 0.001 ed il valore massimo pari a 0.03.

4.3

Sintesi dei risultati

Sulla base dei grafici e delle considerazioni esposte i parametri che devono maggiormente influiscono sul fattore di volatilizzazione dal suolo in ambienti indoor sono:

- il tasso di ricambio d'aria (ER);
- la frazione di carbonio organico nei suoli (Foc);
- la frazione di fratture nelle fondazioni (η).

SEZIONE 5 INALAZIONE DI VAPORI INDOOR DALLA FALDA

5.1 Equazioni di riferimento

Il rischio relativo all'inalazione di vapori indoor dalla falda nel software Giuditta 3.1 viene calcolato attraverso la stima del fattore di volatilizzazione, la cui formula è presentata qui di seguito:

$$VF_{wesp} = \frac{H \left[\frac{D_{ws}^{eff}}{L_{GW}} \right]}{1 + \left[\frac{D_{ws}^{eff}}{L_{GW}} \right] + \left[\frac{D_{ws}^{eff}}{L_{GW}} \right] \left[\frac{D_{crack}^{eff}}{L_{crack}} \right]^\eta} * 10^3 \quad (12)$$

In cui:

$$D_{ws}^{eff} = (h_c + h_v) \cdot \left[\frac{h_c}{D_{cap}^{eff}} + \frac{h_v}{D_s^{eff}} \right]^{-1} \quad (13)$$

$$D_s^{eff} = D_a \cdot \frac{g_{as}^{3.33}}{\theta_T^2} + \frac{D_w}{H} \cdot \frac{g_{ws}^{3.33}}{\theta_T^2} \quad (14)$$

$$D_{crack}^{eff} = D_a \cdot \frac{g_{acrack}^{3.33}}{\theta_T^2} + \frac{D_w}{H} \cdot \frac{g_{wcrack}^{3.33}}{\theta_T^2} \quad (15)$$

$$D_{cap}^{eff} = D_a \cdot \frac{g_{acap}^{3.33}}{\theta_T^2} + \frac{D_w}{H} \cdot \frac{g_{wcap}^{3.33}}{\theta_T^2} \quad (16)$$

ER: Tasso di ricambio dell'aria negli edifici (1/s) (in numero di ricambi per giorno nella figura)

L_B: Rapporto volume/area degli edifici (cm)

H: Costante di Henry (adim)

θ_{ws}: Contenuto volumetrico d'acqua nell'insaturo (adim)

θ_{as}: Contenuto volumetrico d'aria nell'insaturo (adim)

θ_T: Porosità totale insaturo/fratture/ frangia capillare (adim)

θ_{wcap}: Contenuto volumetrico d'acqua nella frangia capillare i (adim)

θ_{as} : Contenuto volumetrico d'aria nella frangia capillare (adim)

θ_{wcrack} : Contenuto volumetrico d'acqua nelle fratture (adim)

θ_{acrack} : Contenuto volumetrico d'aria nelle fratture (adim)

L_{GW} : soggiacenza dei suoli contaminati (cm)

L_{crack} : spessore delle fondazioni (cm)

η : frazione areale di fratture (adim)

D_{crack}^{eff} : Diffusività efficace nelle fratture (cm²/s)

D_s^{eff} : Diffusività efficace insaturo (cm²/s)

D_{cap}^{eff} : Diffusività efficace nella frangia capillare (cm²/s)

Da : Coefficiente di diffusione in aria (cm²/s)

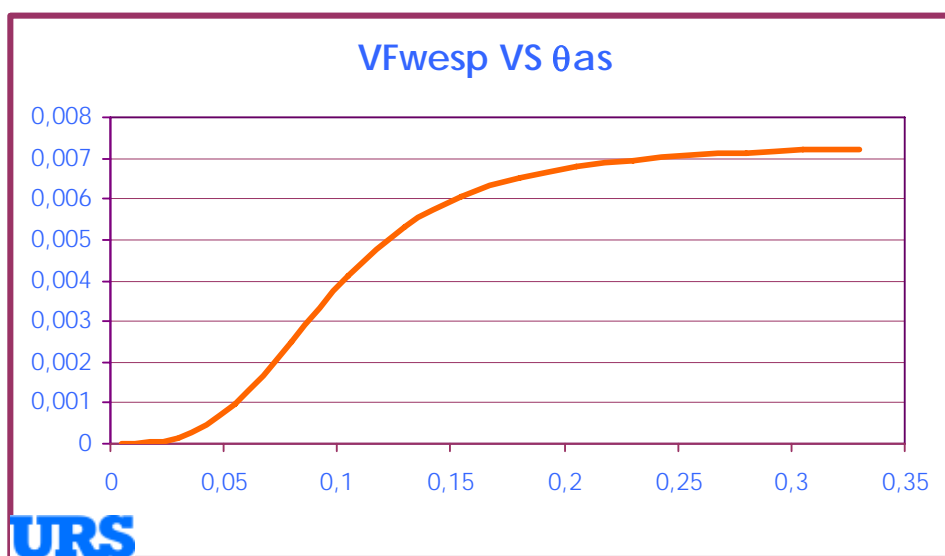
Dw : Coefficiente di diffusione in acqua (cm²/s)

Sulla base della formula evidenziata, risulta:

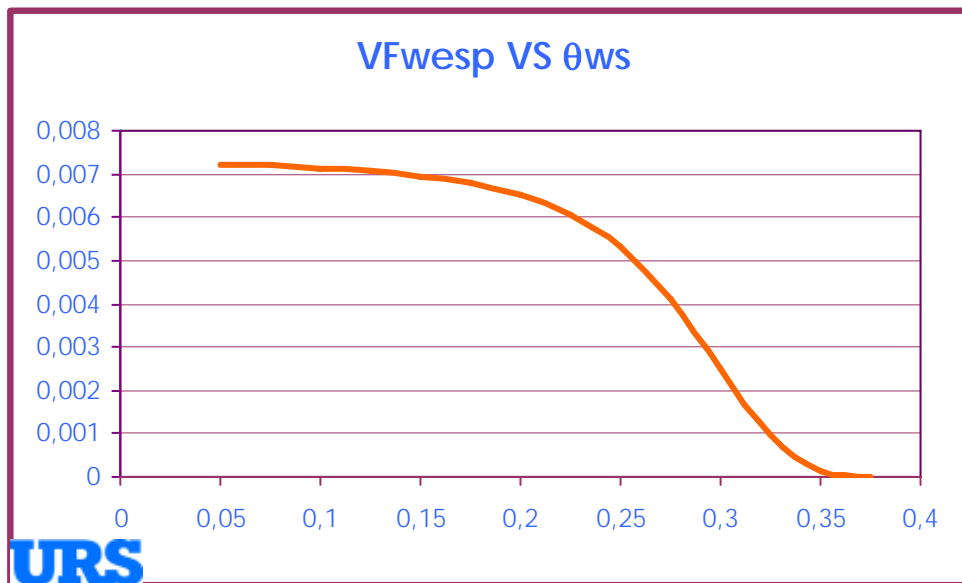
$$VF_{wesp} = f(\theta_{ws}, \theta_{as}, \theta_{wcrack}, \theta_{acrack}, \theta_{wscap}, \theta_{ascap}, L_{GW}, L_B, ER, L_{crack}, \eta)$$

5.2 Calcolo delle variazioni

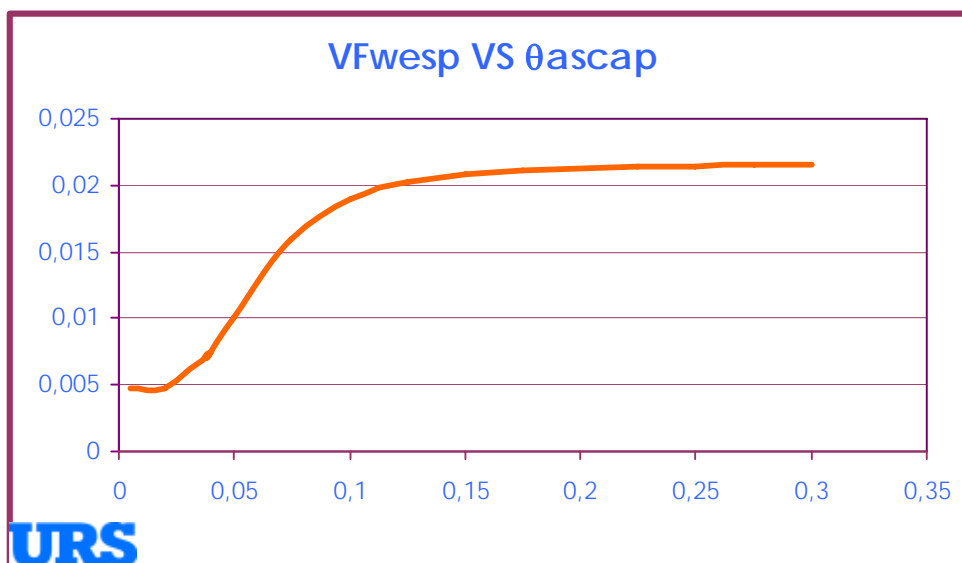
Viene di seguito messa in evidenza la variazione del fattore di volatilizzazione VF_{wesp} in funzione dei parametri elencati.



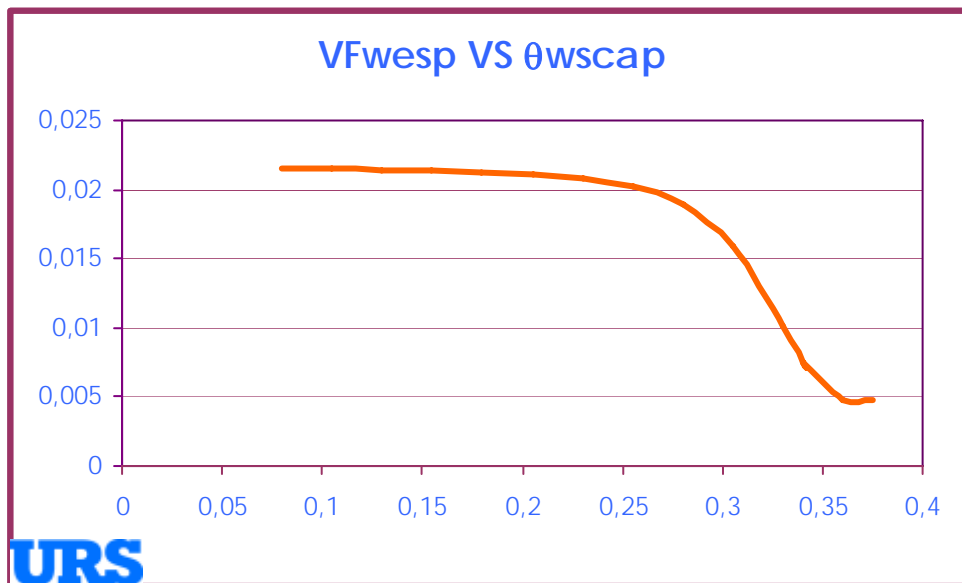
Il fattore di volatilizzazione VF_{wesp} cresce al crescere del contenuto volumetrico d'aria nell'insaturo. L'incremento del fattore di volatilizzazione è dovuto all'incremento della diffusività del contaminante nell'insaturo espressa dall'equazione (14). L'incremento risulta maggiore per valori bassi del parametro (<0,15), ovvero per terreni che vanno da argillosi a limosi.



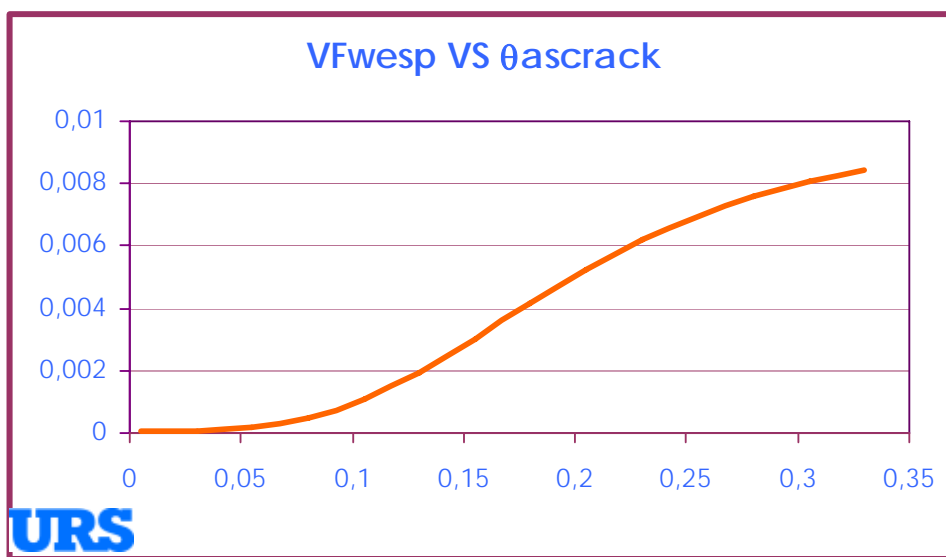
Il fattore di volatilizzazione VFwesp decresce al crescere del contenuto volumetrico d'acqua nell'insaturo. Il decremento del fattore di volatilizzazione è dovuto al decremento della diffusività del contaminante nell'insaturo espressa dall'equazione (14). Il decremento risulta maggiore per valori elevati del parametro ($> 0,2$).



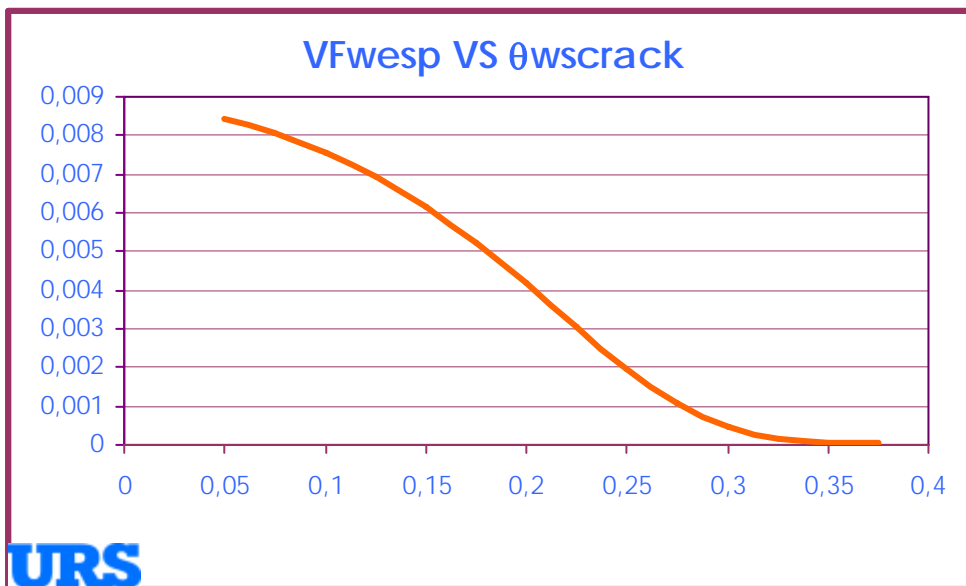
Il fattore di volatilizzazione VFwesp cresce al crescere del contenuto volumetrico d'aria nella frangia capillare. L'incremento del fattore di volatilizzazione è dovuto all'incremento della diffusività del contaminante nell'insaturo espressa dall'equazione (16). L'incremento risulta, nel caso in esame, maggiore per valori bassi del parametro ($< 0,1$).



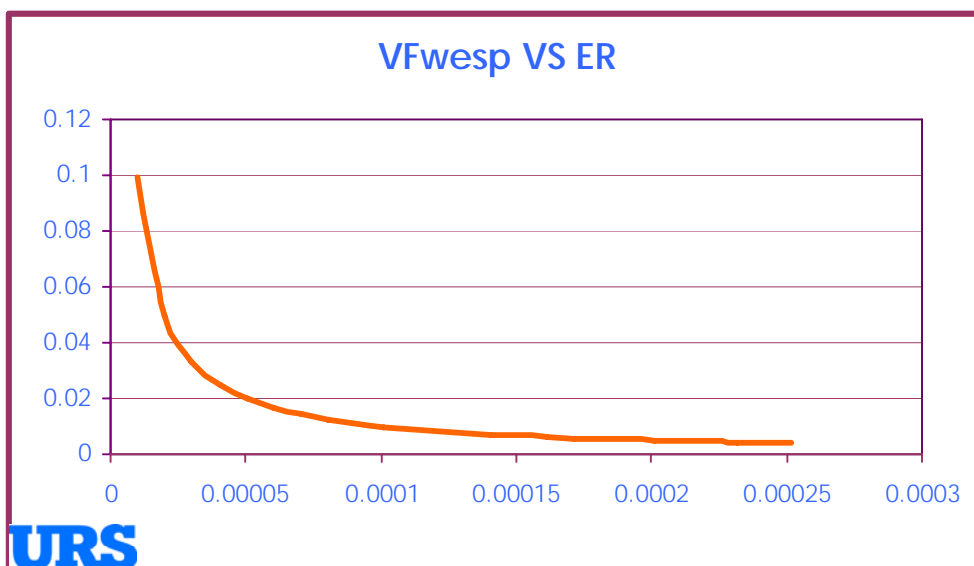
Il fattore di volatilizzazione VFwesp decresce al crescere del contenuto volumetrico d'acqua nella frangia capillare. Il decremento del fattore di volatilizzazione è dovuto al decremento della diffusività del contaminante nell'insaturo espressa dall'equazione (16). Il decremento risulta, nel caso in esame, maggiore per valori elevati del parametro ($>0,25$).



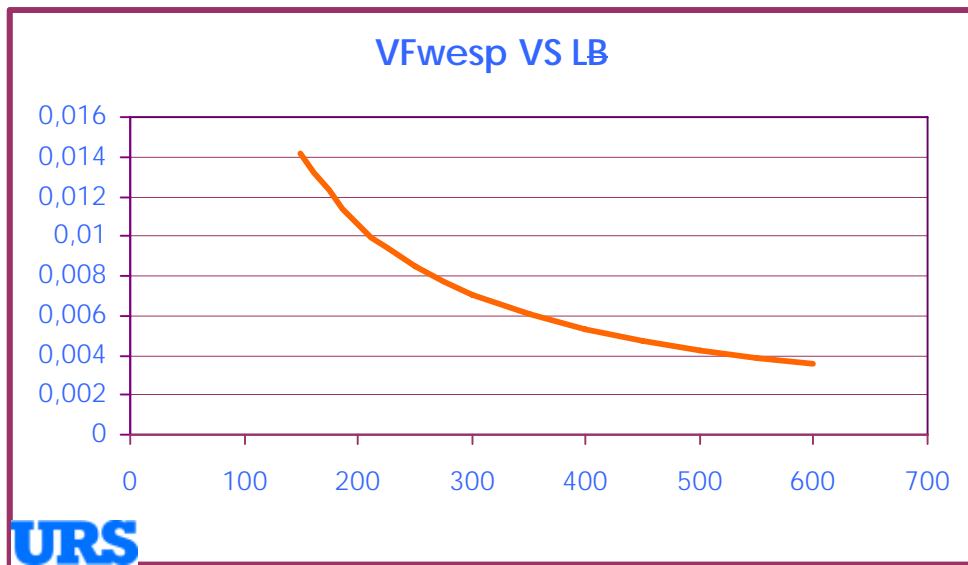
Il fattore di volatilizzazione VFwesp cresce al crescere del contenuto volumetrico d'aria nelle fratture. L'incremento del fattore di volatilizzazione è dovuto all'incremento della diffusività del contaminante nell'insaturo espressa dall'equazione (15). L'incremento risulta, nel caso in esame, marcato su tutto il range di variazione del parametro.



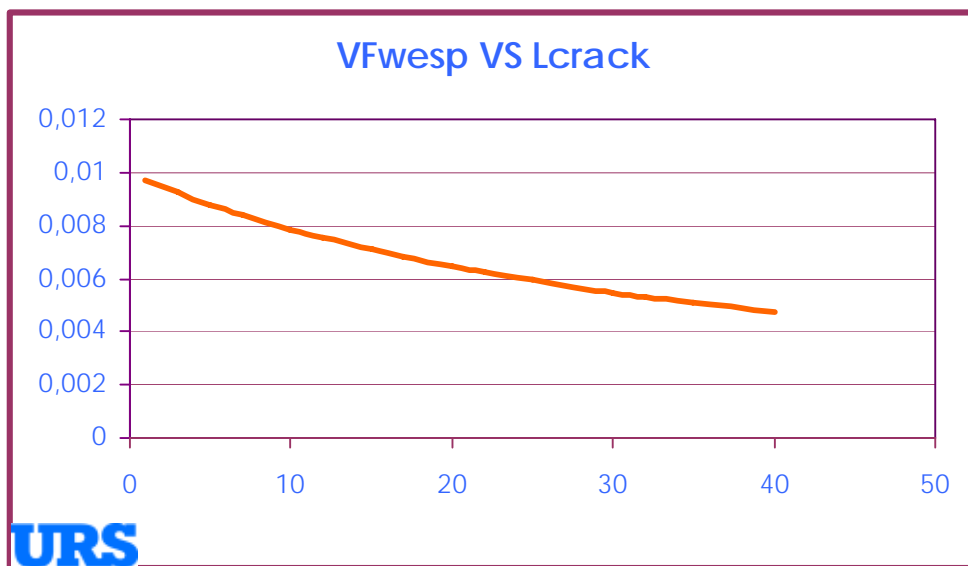
Il fattore di volatilizzazione VFwesp decresce al crescere del contenuto volumetrico d’acqua nelle fratture. Il decremento del fattore di volatilizzazione è dovuto al decremento della diffusività del contaminante nell’insaturo espressa dall’equazione (15). La variazione del fattore di volatilizzazione risulta marcata su tutto il range di variazione del parametro.



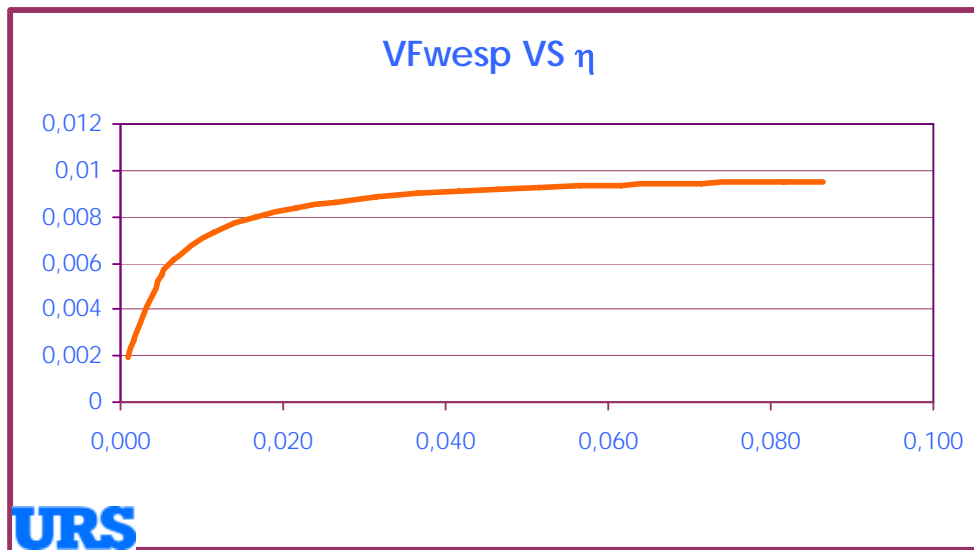
Il fattore di volatilizzazione VFwesp decresce al crescere del tasso di ricambio d’aria negli edifici, il decremento risulta molto marcato, nel caso in esame, al di sotto del valore di cinque ricambi al giorno, al di sopra di tale valore, invece, le variazioni sono più contenute. I valori di default inseriti nel database di Giuditta 3.1 sono pari a $1,4 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ per gli edifici di tipo residenziale e $2,3 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ per gli edifici di tipo industriale. Il grafico mostra che la variazione di VFwesp nel range di questi due valori indicati è bassa.



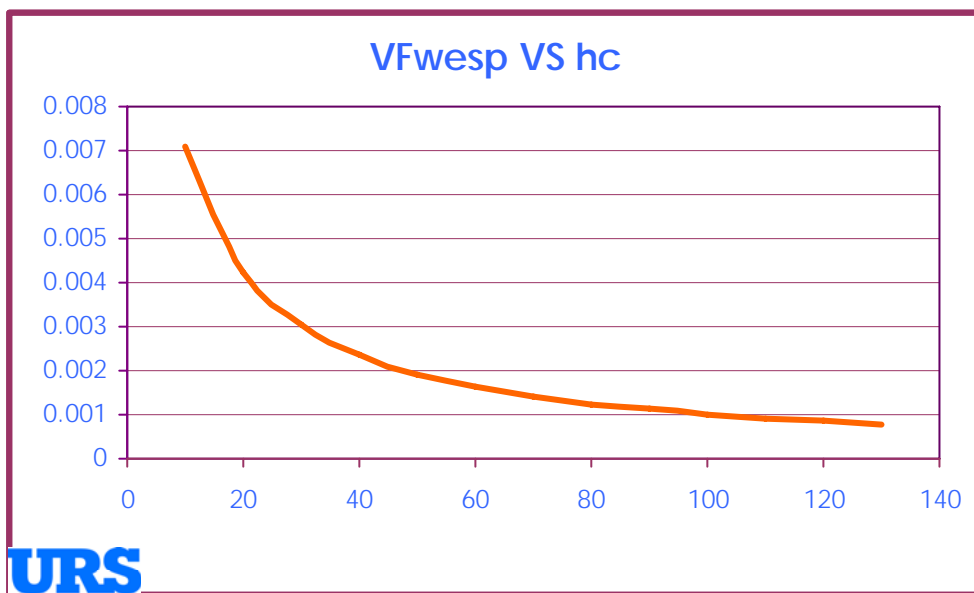
Il fattore di volatilizzazione VF_{wesp} decresce al crescere del rapporto Volume/Area degli edifici, il decremento risulta più marcato al di sotto del valore di 300 cm.



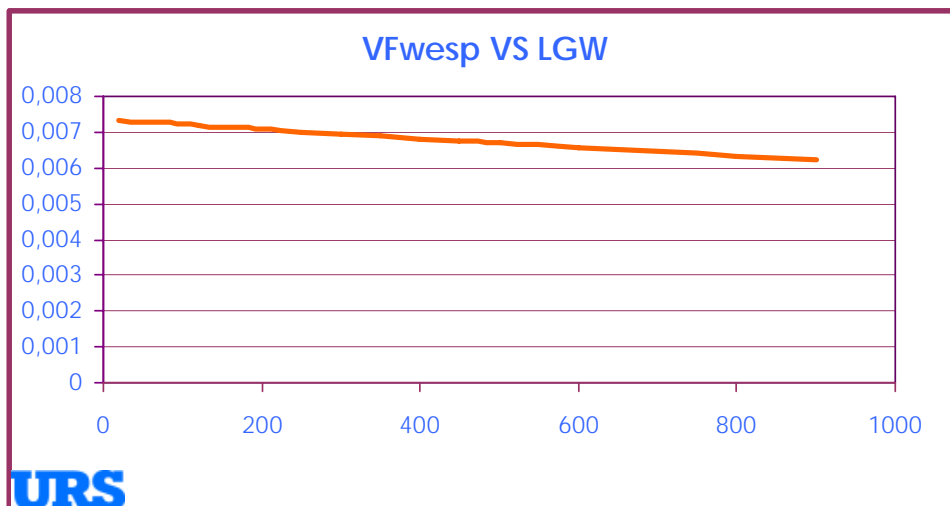
Il fattore di volatilizzazione VF_{wesp} decresce in modo pressoché lineare al crescere dello spessore delle fondazioni.



Il fattore di volatilizzazione VFswesp cresce al crescere della frazione di fratture nelle fondazioni. La variazione è pressoché lineare per valori compresi tra il 2 ed il 10%.



Il fattore di volatilizzazione VFswesp decresce sensibilmente al crescere dello spessore della frangia capillare.



Il fattore di volatilizzazione VFswesp decresce in maniera lineare al crescere della soggiacenza della falda. La variazione è, nel caso in esame, molto contenuta.

5.3

Sintesi dei risultati

Sulla base delle considerazioni esposte, i parametri che maggiormente influiscono l'andamento del fattore di volatilizzazione in ambienti confinati, dalla falda, sono:

- il tasso di ricambio d'aria degli edifici (ER);
- la frazione areale di fratture (η);
- lo spessore della frangia capillare (h).

SEZIONE 6 PERCOLAZIONE IN FALDA

6.1 Equazioni di riferimento

Il rischio relativo per la falda dovuto alla percolazione della contaminazione dal suolo viene calcolato dal software Giuditta 3.1 attraverso la stima del fattore di lisciviazione, la cui formula è presentata qui di seguito:

$$LF_{sw} = \frac{\left[\frac{\rho_s}{\theta_{ws} + K_{OC} F_{OC} \rho_s + H \theta_{as}} \right]}{\left[1 + \frac{V_{gw} \delta_{gw}}{I_f W} \right]} \quad (17)$$

In cui:

$$V_{gw} = ki \quad (18)$$

$$\delta_{gw} = \sqrt{2a_v W} + b \left[1 - \exp\left(\frac{-I_f W}{V_{gw} b}\right) \right] \quad (19)$$

$$a_v = 0.0056W \quad (20)$$

H: Costante di Henry (adim)

θ_{ws} : Contenuto volumetrico d'acqua nell'insaturo (adim)

θ_{as} : Contenuto volumetrico d'aria nell'insaturo (adim)

K_{OC} : Coefficiente di ripartizione carbonio organico/acqua (cm³/g)

F_{OC} : Frazione di carbonio organico nel suolo (g/kg)

V_{gw} : Velocità della falda (cm/)

K: Conducibilità idraulica (cm/s)

i: Gradiente Idraulico (cm/cm)

I_f : Infiltrazione efficace (cm/anno)

δ_{gw} : Spessore della zona di miscelazione in falda (cm)

a_v : Dispersione verticale in falda (cm)

b: Spessore dell'acquifero (cm)

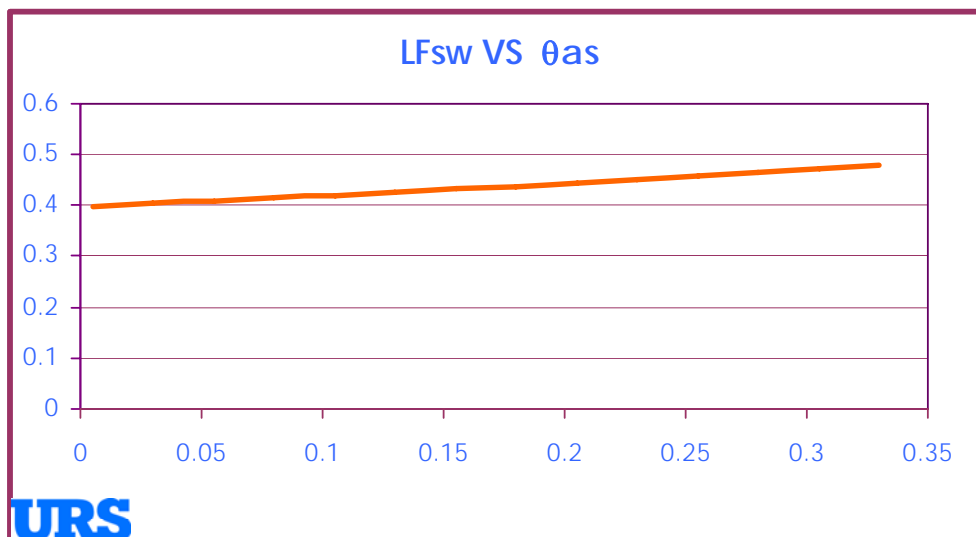
W: Dimensione longitudinale della contaminazione nella direzione di deflusso della falda (cm)

Sulla base della formula evidenziata, risulta:

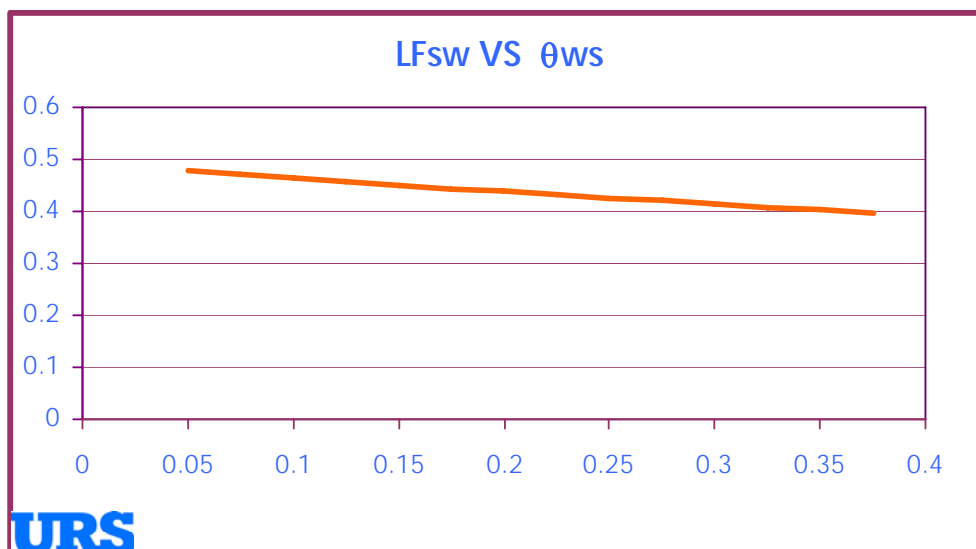
$$LF_{sw} = f(\theta_{ws}, \theta_{as}, k, i, W, I_f, L_1, L_2, b)$$

6.2 Calcolo delle variazioni

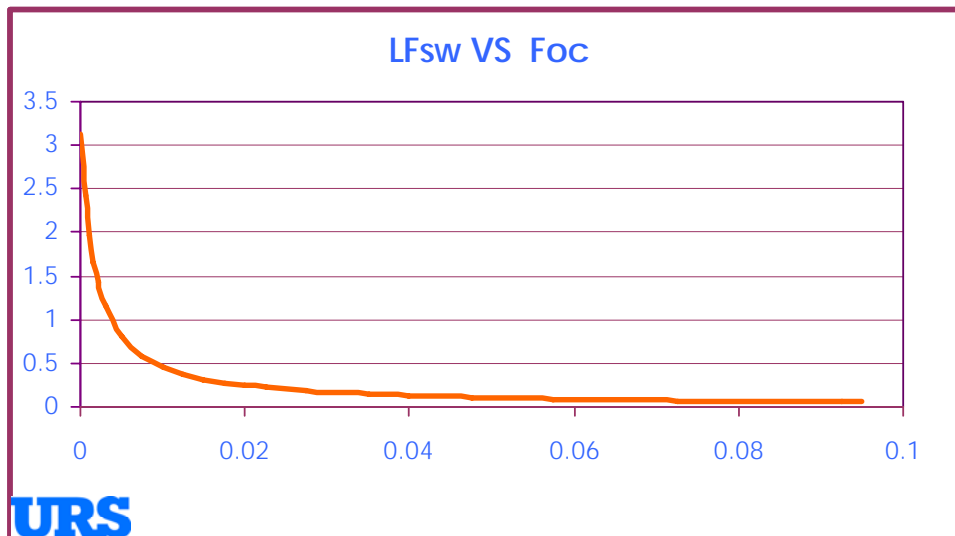
Viene di seguito messa in evidenza la variazione del fattore di percolazione LFsw in funzione dei parametri elencati.



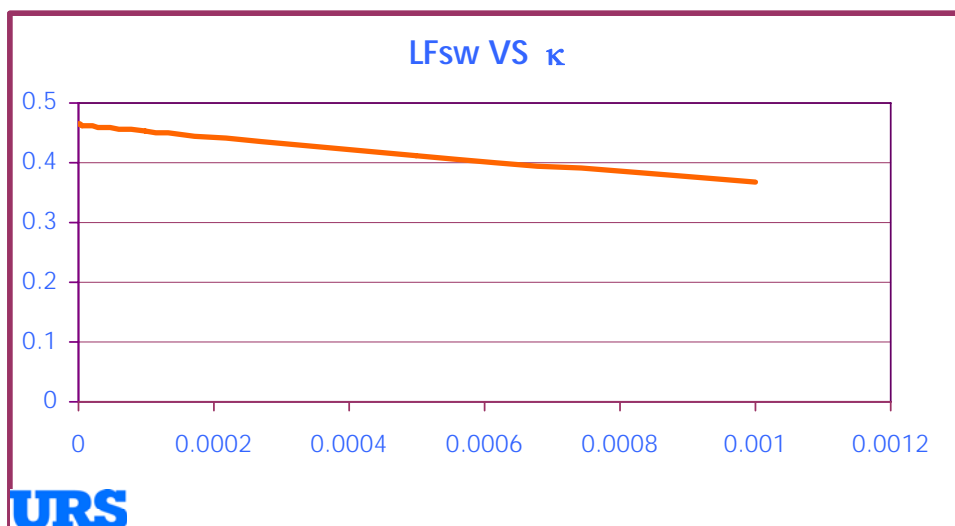
Il grafico evidenzia che il fattore di lisciviazione dai suoli alla falda aumenta linearmente all'aumentare del contenuto volumetrico d'aria nell'insaturo. La pendenza della curva è, nel caso in esame, modesta.



Il grafico evidenzia che il fattore di lisciviazione dai suoli alla falda diminuisce linearmente all'aumentare del contenuto volumetrico d'acqua nell'insaturo. La pendenza della curva è, nel caso in esame, modesta.



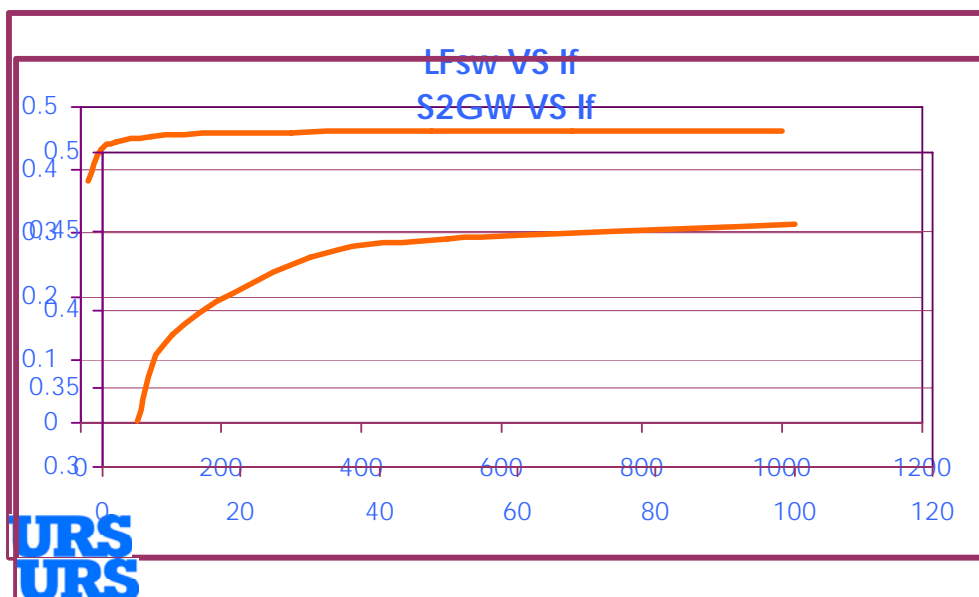
Il grafico evidenzia che il fattore di lisciviazione dai suoli alla falda diminuisce all'aumentare della frazione di carbonio organico nel suolo. La pendenza della curva è, nel caso in esame, molto marcata per valori del foc prossimi all'1%.



Il grafico evidenzia che il fattore di lisciviazione dai suoli alla falda diminuisce linearmente all'aumentare della conducibilità idraulica. La pendenza della curva è, nel caso in esame, modesta.



Il grafico evidenzia che il fattore di lisciviazione dai suoli verso la falda diminuisce linearmente e sensibilmente all'aumentare gradiente idraulico.



Il grafico evidenzia che il fattore di lisciviazione dai suoli alla falda aumenta all'aumentare dell'infiltrazione efficace. La pendenza della curva è, nel caso in esame, modesta.



Il grafico evidenzia che il fattore di lisciviazione dai suoli alla falda diminuisce all'aumentare dello spessore dell'acquifero. La pendenza della curva è, nel caso in esame, modesta.



Il grafico evidenzia che il fattore di percolazione dai suoli alla falda aumenta all'aumentare della dimensione longitudinale della contaminazione nella direzione di deflusso della falda.

6.3 Sintesi dei risultati

Sulla base delle considerazioni espone i parametri che maggiormente influiscono sull'andamento del fattore di trasporto dal suolo alla falda sono:

- la frazione di carbonio organico (Foc);
- la conducibilità idraulica (k);
- il gradiente idraulico (i);
- l'infiltrazione efficace (If).

SEZIONE 7 TRASPORTO IN FALDA

7.1 Equazioni di riferimento

Il fattore di trasporto della contaminazione dissolta in falda viene calcolato nel software Giuditta 3.1 applicando la formula di Domenico, come segue:

$$AF_{GW} = \exp\left(\frac{x}{2\alpha_x} \left[1 - \sqrt{1 + \frac{4\lambda_i \alpha_x R_i}{v}}\right]\right) \operatorname{erf}\left(\frac{Sw}{4\sqrt{\alpha_y x}}\right) \operatorname{erf}\left(\frac{Sd}{4\sqrt{\alpha_z x}}\right) \quad (21)$$

In cui:

$$\alpha_x = 0.83[\log_{10} x]^{2.414} \quad (22)$$

$$\alpha_y = 0.1\alpha_x \quad (23)$$

$$\alpha_z = 0.01\alpha_x \quad (24)$$

$$v = \frac{Ki}{\vartheta_e} \quad (25)$$

$$R = 1 + \frac{k_{oc} F_{oc} \rho_s}{\vartheta_e} \quad (26)$$

x: Distanza dalla sorgente al punto di conformità (cm) (in ascissa in m nei grafici)

α_x : Dispersività Longitudinale (cm)

α_y : Dispersività Trasversale (cm)

α_z : Dispersività Verticale (cm)

λ_i : Fattore di degradazione del primo ordine (1/s)

R: Fattore di ritardo (adim)

v: Velocità effettiva della Falda (cm/s)

Sw: Larghezza della sorgente in falda (cm) (in m nel grafico)

Sd: Spessore della sorgente in falda

K: Conducibilità idraulica (cm/s)

I: Gradiente idraulico (cm/cm)

Koc: Coefficiente di ripartizione carbonio organico/acqua (cm³/g)

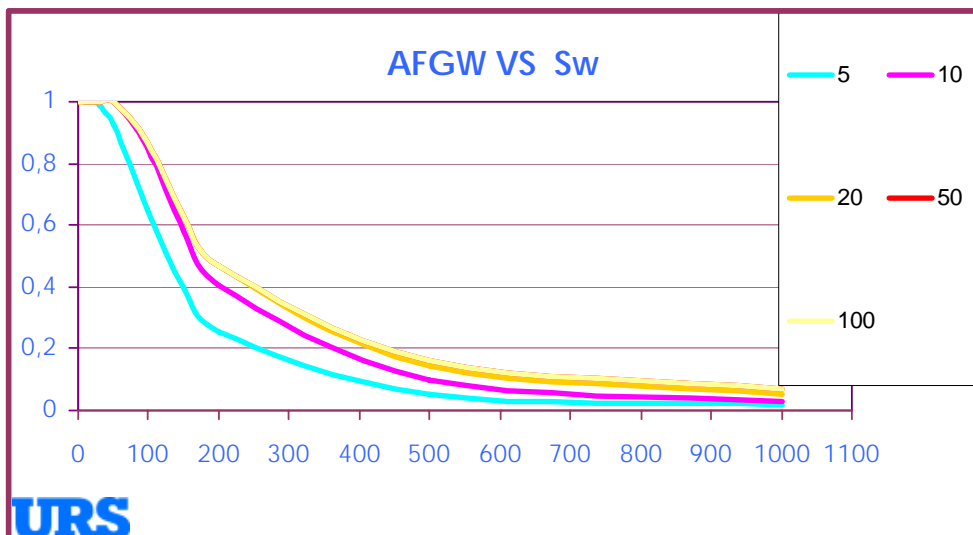
Foc: Frazione di carbonio organico nel suolo (g/kg)

ρ_s : Densità del suolo (g/cm³)

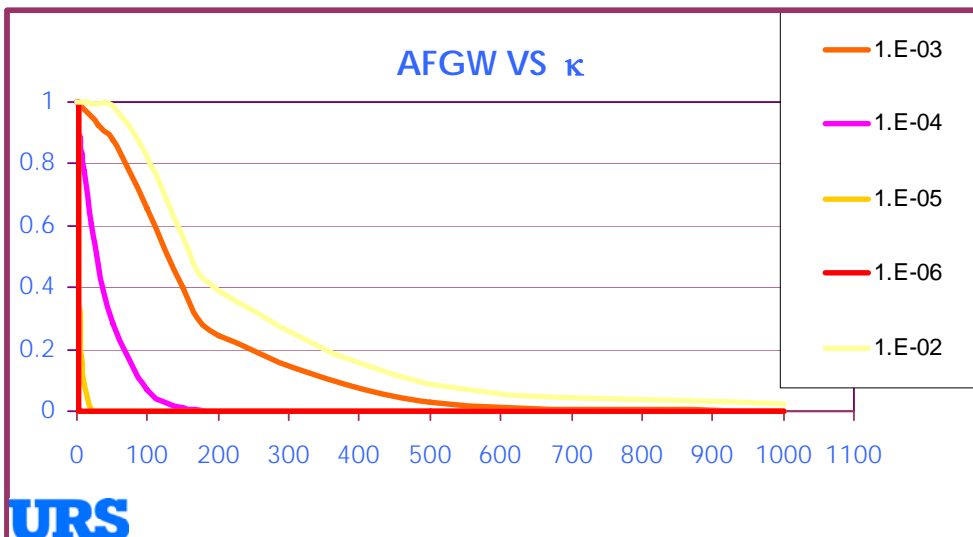
θ_e : Porosità efficace (adim)

7.2 Calcolo delle variazioni

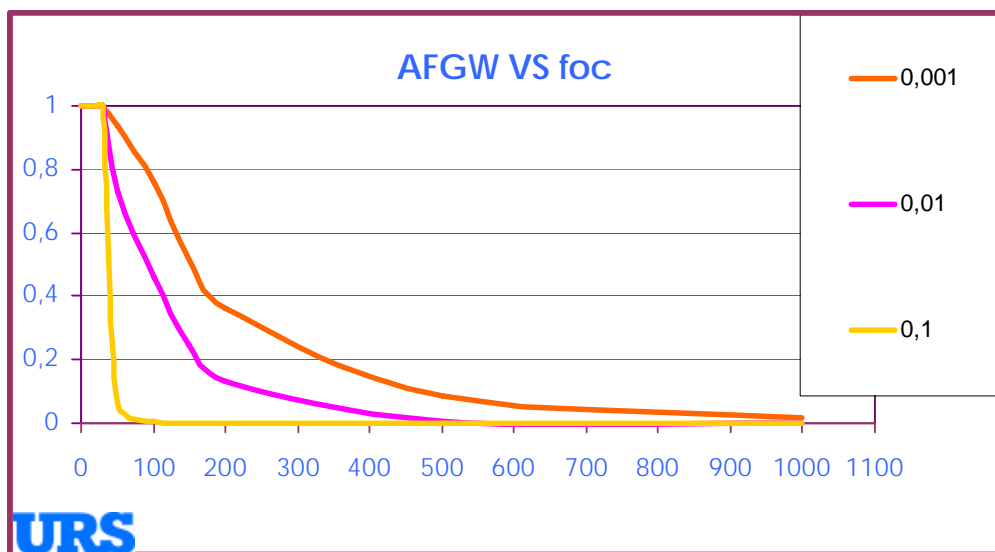
I grafici riportati qui di seguito presentano l'andamento del fattore di trasporto in funzione della distanza dalla sorgente al punto di conformità (in ascissa) per i valori del parametro in esame riportati in legenda.



Questo grafico riporta l'andamento del fattore di trasporto in falda per distanze comprese tra la sorgente e 1 km da essa, per valori della larghezza della sorgente in falda pari a 5m, 10m, 20m, 50m e 100m. Dall'andamento delle curve si evince come la larghezza della sorgente influisca maggiormente sul fattore di trasporto per distanze del punto di conformità dalla sorgente stessa comprese tra i 100 ed i 400m.



Questo grafico riporta l'andamento del fattore di trasporto in falda per distanze comprese tra la sorgente e 1 km da essa, per valori della conducibilità idraulica compresi tra $1 \cdot 10^{-2}$ cm/sec e $1 \cdot 10^{-6}$ cm/sec . Il grafico evidenzia che il fattore di trasporto in falda aumenta all'aumentare della conducibilità idraulica, in modo più significativo per distanze prossime alla sorgente fino a circa 400m da essa.



Questo grafico riporta l'andamento del fattore di trasporto in falda per distanze comprese tra la sorgente e 1 km da essa, per valori della frazione di carbonio organico pari a 0,001, 0,01 e 0,1. L'andamento delle curve mostrano l'alta sensibilità del fattore di trasporto a questo parametro per distanze del punto di conformità dalla sorgente stessa comprese tra i 50 ed i 400m.

7.3

Sintesi dei risultati

Sulla base delle considerazioni espone i parametri che maggiormente influiscono sull'andamento del fattore di trasporto dal suolo alla falda sono:

- la larghezza della sorgente in falda (S_w);
- la conducibilità idraulica (k);
- la frazione di carbonio organico (F_{oc}).

SEZIONE 8 SINTESI DEI RISULTATI

La tabella seguente illustra in modo sinottico i risultati acquisiti.

VIA DI ESPOSIZIONE	FATTORE DI TRASPORTO	PARAMETRO	SENSITIVITÀ
Inalazione vapori outdoor dal suolo superficiale	VFss	θ_{as} - Contenuto volumetrico d'aria nell'insaturo	Bassa
		θ_{ws} - Contenuto volumetrico d'acqua nell'insaturo	Bassa
		foc - Frazione di carbonio organico	Alta
		W (cm) - Lunghezza della contaminazione nella direzione del vento dominante	Alta
		Uair (cm/s) - Velocità del vento	Alta
		δ_{air} (cm) - Spessore della zona di miscelazione	Alta
		τ (anni) - Tempo di esposizione	Bassa
Inalazione vapori outdoor dal suolo profondo	VF samb	θ_{as} - Contenuto volumetrico d'aria nell'insaturo	Bassa
		θ_{ws} - Contenuto volumetrico d'acqua nell'insaturo	Bassa
		foc - Frazione di carbonio organico	Alta
		W (cm) - Lunghezza della contaminazione nella direzione del vento dominante	Alta
		Uair (cm/s) - Velocità del vento	Alta
		δ_{air} (cm) - Spessore della zona di miscelazione	Alta
		Ls (cm) - Profondità del terreno contaminato	Media
Inalazione vapori outdoor dalla falda	VFwamb	θ_{as} - Contenuto volumetrico d'aria nell'insaturo	Bassa
		θ_{ws} - Contenuto volumetrico d'acqua nell'insaturo	Bassa
		W (cm) - Lunghezza della contaminazione nella direzione del vento dominante	Alta
		Uair (cm/s) - Velocità del vento	Alta
		δ_{air} (cm) - Spessore della zona di miscelazione	Alta
		θ_{ascap} - Contenuto volumetrico d'aria nella frangia capillare	Bassa
		θ_{wscap} - Contenuto volumetrico d'acqua nella frangia capillare	Bassa
		Lgw (cm) - Soggiacenza della falda	Media
		hc (cm) - Spessore della frangia capillare	Media
Inalazione vapori indoor dal suolo	VFsesp	θ_{as} - Contenuto volumetrico d'aria nell'insaturo	Bassa
		θ_{ws} - Contenuto volumetrico d'acqua nell'insaturo	Bassa
		$\theta_{ascrack}$ - Contenuto volumetrico d'aria nelle fratture	Media
		$\theta_{wscrack}$ - Contenuto volumetrico d'acqua nelle fratture	Media
		Ls (cm) - Profondità del terreno contaminato	Media
		Lb (cm) - Rapporto volume/area degli edifici	Media
		ER (1/s) - Tasso di ricambio d'aria negli edifici	Alta
		Lcrack (cm) - Spessore delle fondazioni	Media
		Foc - Frazione di carbonio organico	Alta

SEZIONE 8 – CONCLUSIONI

Inalazione vapori indoor dalla falda	VFwesp	η - Frazione areale di fratture	Alta
		θ_{as} - Contenuto volumetrico d'aria nell'insaturo	Bassa
		θ_{ws} - Contenuto volumetrico d'acqua nell'insaturo	Bassa
		$\theta_{ascrack}$ - Contenuto volumetrico d'aria nelle fratture	Media
		$\theta_{wscrack}$ - Contenuto volumetrico d'acqua nelle fratture	Media
		θ_{ascap} - Contenuto volumetrico d'aria nella frangia capillare	Bassa
		θ_{wscap} - Contenuto volumetrico d'acqua nella frangia capillare	Bassa
		L _{gw} (cm) - Soggiacenza della falda	Media
		h _c (cm) - Spessore della frangia capillare	Media
		L _b (cm) - Rapporto volume/area degli edifici	Media
		ER (1/s) - Tasso di ricambio d'aria negli edifici	Alta
		L _{crack} (cm) - Spessore delle fondazioni	Media
		η - Frazione areale di fratture	Alta
Percolazione in falda	LFsw	θ_{as} - Contenuto volumetrico d'aria nell'insaturo	Bassa
		θ_{ws} - Contenuto volumetrico d'acqua nell'insaturo	Bassa
		foc - Frazione di carbonio organico	Alta
		k (cm/s) - Conducibilità idraulica	Alta
		i - Gradiente idraulico	Alta
		If (cm/anno) - Infiltrazione efficace	Alta
		b (cm) - Spessore dell'acquifero	Media
		W (cm) - Dimensione longitudinale della contaminazione nella direzione di deflusso della falda	Media
Migrazione della fase dissolta in falda	AFgw	foc - Frazione di carbonio organico	Alta
		k (cm/s) - Conducibilità idraulica	Alta
		Sw (cm) - Larghezza della sorgente in falda	Alta

SEZIONE 9 BIBLIOGRAFIA

APAT "Criteri metodologici per l'applicazione dell'analisi di rischio assoluta ai siti contaminati", 2005.

Herd, *at al.* "Evaluation of the Johnson and Ettinger model for prediction of indoor air quality", Groundwater Monitoring and Remediation, 1993.