



Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino

Appunti universitari

Tesi di laurea

Cartoleria e cancelleria

Stampa file e fotocopie

Print on demand

Rilegature

NUMERO: 1936A -

ANNO: 2016

A P P U N T I

STUDENTE: Prette Arianna

MATERIA: Dinamica degli inquinanti (Esercitazioni + Prove esame di stato) - prof. Ruffino

Il presente lavoro nasce dall'impegno dell'autore ed è distribuito in accordo con il Centro Appunti.

Tutti i diritti sono riservati. È vietata qualsiasi riproduzione, copia totale o parziale, dei contenuti inseriti nel presente volume, ivi inclusa la memorizzazione, rielaborazione, diffusione o distribuzione dei contenuti stessi mediante qualunque supporto magnetico o cartaceo, piattaforma tecnologica o rete telematica, senza previa autorizzazione scritta dell'autore.

**ATTENZIONE: QUESTI APPUNTI SONO FATTI DA STUDENTIE NON SONO STATI VISIONATI DAL DOCENTE.
IL NOME DEL PROFESSORE, SERVE SOLO PER IDENTIFICARE IL CORSO.**

DINAMICA DEGLI INQUINANTI :

ESERCITAZIONI (ANCHE PROVE ESAME DI STATO)

AUTORE : ARIANNA PRETTE

PROF. : BARBARA RUFFINO

$\frac{1}{kWh} \rightarrow$ di cui è la
prodotto

dati centrale elettrica:

2200 kcal/kWh

$PCI(CH_4) = 8600 \text{ kcal/m}^3$

con 1 m^3 di metano $\rightarrow 3,90 \frac{kWh}{m^3 CH_4}$
 $\frac{8600}{2200} = 3,90$

da $1,829 \frac{kcal}{m^3 CH_4} \Rightarrow EF = 0,46 \frac{kg CO_2}{kWh}$
 $\frac{1,829}{3,90}$

ES. 2
numero di combustibili a dividerli
GPL $EF = 1,535 \frac{kcal}{e}$ valore trovato in letteratura

$T = 293 \text{ K}$

$P = 250 \text{ atm}$



% in volume

combustione

in base alla
preparazione dei 2
comp. della
miscela
 $1 \text{ GPL} \rightarrow 3,4 CO_2$

$3 \text{ mole} \cdot 60\% \rightarrow 1,8$
 $4 \text{ mole} \cdot 40\% \rightarrow 1,6$

$1 \text{ l GPL} \rightarrow 10,4 \text{ mol}$
(a $T = 293 \text{ K}$
 $P = 250 \text{ atm}$)
 $PV = nRT$

$10,4 \cdot 3,4 = 35,3 \frac{\text{mol } CO_2}{l \text{ GPL}}$
 $1:3,4 = 10,4:x$

$1,56 \frac{kg CO_2}{l}$

ES. 3.

abitazione civile:

$S = 140 \text{ m}^2$ superf.

$H = 3 \text{ m}$ alt. locale

$W_s = 80 \text{ kJ/m}^3 \cdot h$ fabb. termico richiesto nei mesi freddi

Necessità riscaldamento
14 h per 185 d

scaldato con gasolio $PCI = 42,6 \text{ MJ/kg}$

$\% S = 0,3$ tenore di zolfo

$\eta_c = 85\%$ rendimento caldaia

Consumo gasolio e contaminanti NO_x, CO, SO_2

$EF_{NO_x} = 2,5 \frac{g}{kg}$ gasolio bruciato

$EF_{CO} = 0,6 \frac{g}{kg}$

$EF_{SO_2} = 20 \cdot \% S = 6 \frac{g}{kg}$

calcoliamo prima: F_e fabbisogno energetico annuo

$F_e = (W_s \cdot S \cdot H \cdot t) / \eta_c = \frac{80 \text{ kJ/m}^3 \cdot h \cdot (140 \cdot 3) \text{ m}^3 \cdot (185 \cdot 14) \text{ h}}{0,85}$
 $= 1,02 \cdot 10^5 \text{ MJ/a}$

ES 5

Centrale termoelettrica

$$P = 5 \cdot 500 \cdot 000 \text{ GJ/a}$$

$$\eta_e = 45\%$$

carburante combustibile PCI = 39,7 MS/kg

$$\% S = 0,9$$

diametro camino $\Rightarrow D = 4,5 \text{ m}$

velocità em. fumi $\Rightarrow v_f = 15 \text{ m/s}$

temp. emiss. fumi $\Rightarrow T_e = 120^\circ\text{C}$

coefficienti:

$$\text{NO}_x \quad EF = 2,4 \text{ g/kg}$$

$$\text{SO}_2 \quad EF = 20 \cdot \% S = 18 \text{ g/kg}$$

calcolo: 1) E_e di NO_x e SO_2 ?

2) conc. nei fumi $\rightarrow C \text{ NO}_x \text{ SO}_2$ a 120°C in cond. norm. CN ?

$$C \text{ NO}_x \text{ SO}_2 \quad (\eta = 85\%) \rightarrow \text{efficienza sist. abbattimento}$$

$$1) E_e = EF \cdot Q_{\text{comb}}$$

$$Q_{\text{comb}} = \frac{P}{\text{PCI} \cdot \eta_e} = \frac{5 \cdot 500 \cdot 000 \cdot 10^3 \text{ MS/a}}{39,7 \frac{\text{MS}}{\text{kg}} \cdot 0,45} = 0,31 \cdot 10^9 \frac{\text{kg}}{\text{a}}$$

$$E_{\text{NO}_x} = 2,4 \text{ g/kg} \cdot 0,31 \cdot 10^9 \frac{\text{kg}}{\text{a}} = 0,74 \cdot 10^9 \frac{\text{g}}{\text{a}}$$

$$E_{\text{SO}_2} = 18 \text{ g/kg} \cdot 0,31 \cdot 10^9 \frac{\text{kg}}{\text{a}} = 5,58 \cdot 10^9 \frac{\text{g}}{\text{a}}$$

* se alludo per Q_f $7,5 \cdot 10^9$ $\rightarrow C_{\text{NO}_x}$ in condizioni di emissione, non normali

$$2) C_{mq} = \frac{E_e}{Q} \rightarrow \text{portata volumetrica di fumi (da calcolare)}$$

$$Q_f = v_f \cdot S = v_f \cdot \pi \cdot \frac{D^2}{4} = 15 \text{ m/s} \cdot \pi \cdot \frac{(4,5)^2}{4} \text{ m}^2 \cdot 60 \cdot 60 \cdot 24 \cdot 365 \frac{\text{s}}{\text{a}}$$

$$= 7,5 \cdot 10^9 \text{ m}^3/\text{a} \quad \text{nelle condizioni di uscita } 120^\circ\text{C}$$

$$Q_{fN} = Q_f \cdot \frac{273}{273+120} = 5,2 \cdot 10^9 \frac{\text{Nm}^3}{\text{a}}$$

se volessi trovare quella a 120°C direi: $\frac{0,74 \cdot 10^9}{7,5 \cdot 10^9} \cdot v_f$ *

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{T_1}{T_2} \rightarrow \text{dovrei dire: } pV = nRT$$

$$C_{\text{NO}_x} = \frac{0,74 \cdot 10^9 \text{ g/a}}{5,2 \cdot 10^9 \frac{\text{Nm}^3}{\text{a}}} = 0,14 \frac{\text{g}}{\text{Nm}^3} = 140 \frac{\text{mg}}{\text{Nm}^3} \text{ m CN}$$

sist. abbattimento:

$$\text{NO}_x \quad C_c = C_m (1 - \eta_a) = 140 \frac{\text{mg}}{\text{Nm}^3} \cdot (1 - 0,85) = 21 \frac{\text{mg}}{\text{Nm}^3}$$

il sist. di abbatt. agisce sull'emissione, il volume dei fumi non cambia (CST o 120°C)

È possibile misurare emissioni in modo diretto. 2 Approcci:

- 1) Misura diretta → preferibile
- 2) Utilizzo fattore di emissione

In alcuni casi è poss. avere a disp. misure dirette in altri casi no.

quando si ha a che fare con sorgenti puntiformi come stabilimenti industriali di grandi dimensioni (es. centrale termoelettrica, inceneritori...) avendo vengono realizzati costretti a monitorare di continuo le sue emissioni

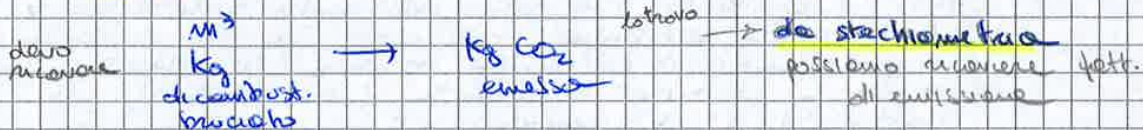
Però se non si fa riferimento a sorgenti puntiformi es. sorgenti di tipo diffuso non si hanno a disposizione misure dirette.

es. attività agricole con campi fertilizzati (sorgente diffusa) difficile stima emissioni es. di NH_3 da qst tipo di sorgente. Si usano l'approccio con fattore di emissione

es. strade con traffico, difficile fare misure puntuali → fattore di emissione

Diverse tipologie di approcci fattore di emissione:

es. piccola centrale termoelettrica in continuo delle emissioni → ^{ma abbiamo a disp. misure dirette} non è previsto monitoraggio continuo → dobbiamo usare fattore di emissione



oppure cerchiamo impianto simile al nostro es. alimentato con stesso combust. stessa tecnologia, stessa potenzialità. Immaginiamo di conoscere valori emissivi da misure dirette. Possiamo ricavare il fattore di emissione → lo trasportiamo sul nostro impianto e lo usiamo x ricavare dati emissivi

sempre possibile avere dati emissivi da misure dirette

Oppure, altro approccio, misuro fattore di emissione da letteratura

l'incertezza delle emissioni x essere trasparente deve dire tutto ad' se misura diretta o fattore di emissione (come è stato misurato)

Sei nel momento in cui se si deve intervenire su conc. misurata in un certo punto in cui si sono operate le conc. limite si va a vedere quale potrebbe essere l'origine di qst sforamento da qst tabelle → dato ogni valore di stamento emissione modellistico che dal di garantire → valore di concentrazione in 1 determinato punto → misura

se ho a disp. il inventario delle emissioni completo (intensità, ...) dove, frequenza → si interviene in un modello e si vede in un det. punto il valore di concentrazione che si può avere → si ripetono i calcoli andando a frequenze determinate sorgenti ed interviene con i parametri

è necessario che i dati siano disaggregabili (distr. spaziale o temporale) ottenere dati in un punto preciso della città

↳ a dare idee come disagg. i dati ad' come sono distribuiti fra diverse sorgenti e nel tempo. si segue un procedimento TOP-DOWN (da dato aggregato a dato non aggregato)

BOTTOM-UP - aspirati

es. abbiamo a disp. emissioni di \neq tipologie di sostanza dato (CO_2 eq) → molto simile a CO_2 → tra le \neq sostanze considerate qll \rightarrow emesse è CO_2

ES. 3 disaggregazione temporale

NO_x emessi da centrale termoelettrica

NO_x = 10130 t/a

media
annua

→ voglio conoscere l'emissione in 1 preciso
giornata: mercoledì 13-14 gennaio 01

↓
si posso ad emissione media giornaliera:

$$\frac{10130 \text{ t/a}}{24 \cdot 50 \cdot 12} = 1,16 \frac{\text{t}}{\text{h}}$$

non 365 perché
devo usare dei pesi
≠ nei vari giorni,
mesi, ora

→ dicono come peso
d'emissione in quella
particolare fascia temporale
rispetto alla media
annua e alla fascia
temporale

coefficienti:

$P_o = 1,1$
giorno
 $P_g = 1,12$
giorno
 $P_m = 0,85$
minuto

⇒ Coeff.:
come peso
rispetto a
alla fascia
temporale

→ limiti
della incertezza
delle emissioni

→ es. mediamente nel
mese di gennaio sto
emittendo meno risp.
alla media (<1)

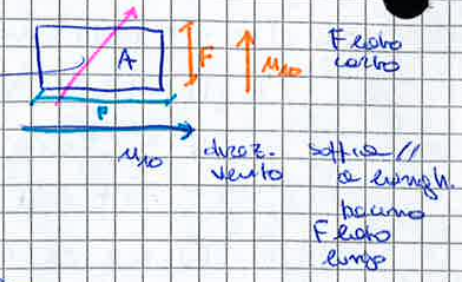
→ sto emitt.
di t della
media

$$E_{ot, \text{merc.}, 13-14} = 1,16 \cdot 1,1 \cdot 1,12 \cdot 0,85 = 1,23 \text{ t/a}$$

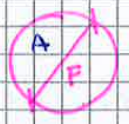
$$K_L = f\left(\frac{F}{D}, M_{10}, D_{s,w}, D_{e,w}\right)$$

↳ condiz. eq. hanno direz. vento
 Perpendicolare bacino

Come si vede F? es. bacino obliquo



condiz. bacino circolare di r. r. superficie A (bacino equidistante)



se bacino di forma irregolare oppure bacino regolare e direz. del vento che cambia o varia una direz. lungo la quale si diff. differenza la sup.

$$F/D = 24,3$$

(* ricavo in formula 2) della fotocopia)

formula empirica calcolazione (Spranger) = condiz. in galleggiare del vento; potenze combinate alcuni parametri → hanno visto effetto → poi coeff. correttivi adattatore ad altri centimetri. ↳ perpendicolare sistema, velocità del vento ...

K_L : tanto + basso di D tanto + lungo si muove con difficoltà. Se la velocità del vento è bassa, ha poca influenza su qll che succede nel bacino (solo del liquido). Se vel. vento ↑, ha effetto su lato del liquido che cresce.

F/D: tanto + esteso il bacino nella direz. del vento tanto + facilmente si muove lungo l'ing. tanto + lungo di F tanto + il vento riesce a muovere particelle per qst ke bene se il bacino è più profondo (impatti D e denominatore)

K_g : per il gas: diametro effettivo d_e → uguale a diametro di bacino (lato che circonda)



$$K_g = f(M, S_{ca}, d_e)$$

no di Schmidt del gas

$$S_c = \frac{M_{diffusione}}{\rho D_{(gas)}} = \frac{v}{D_{(gas)}}$$

↳ v (vel. cinematica) → capacità di il fluido di sost. quantità di mat. ↳ capacità del fluido di trasferire mat. (D)

↳ possiamo calcolare c e coeff. e poi metterci in s. trovare qll globale

K_L

$$F = \left(\frac{A}{\pi}\right)^{0,5} \cdot 2 = 43,7 \text{ m}$$

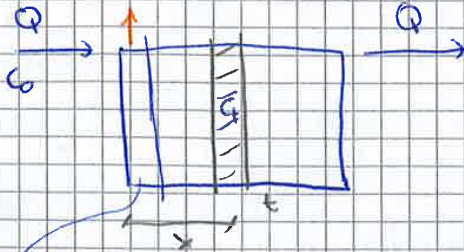


$$A = \pi r^2 \quad R = \left(\frac{A}{\pi}\right)^{\frac{1}{2}}$$

$$\frac{F}{D} = 24,3$$

$$K_L = 4,2 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (\text{uso formula 2 } K_L)$$

2)



Entrano una certa massa di contaminante che si ripartisce nel volume di fluido

Volume che si muove lungo il bacino; non scambia materia di lato, ma può cedere verso l'alto

debbiamo scrivere il bilancio prendendo in considerazione ciascun volume di fluido

ogni volume di fluido si comporta in modo

$$- \frac{d(C \cdot V)}{dt} = K A C E$$

rispetto ad il volume di fluido che ad un certo x si trova nel bacino ad x : ha la conc. C e V che diminuisce man mano che il volume si sposta ad x perché ha una costante di inquinante x volatilizzazione.

espresso variabili e integrando:

$$\frac{dC}{dx} = - \left(\frac{K A}{V} \right) dt$$

C_0 conc. a estremo SX del bacino
 C conc. nell'elemento \rightarrow man
 C_1 conc. a estremo SX del bacino
 0 costante o man il volume entra nel bacino
 \rightarrow man
 \rightarrow la variabile

tempo di residenza idraulico:

tempo che il certo volume di fluido impiega a spostarsi nel bacino

$$\tau = \frac{V}{Q}$$

$$\tau = \frac{V}{Q} = \frac{A \cdot D}{Q} \Rightarrow \frac{A}{Q} = \frac{\tau}{D}$$

$$\ln C_1 - \ln C_0 = - \frac{K A}{V} \cdot (x - 0)$$

$$\frac{C_1}{C_0} = \exp \left(- \frac{K A}{Q} \right) = \exp \left(- \frac{K \tau}{D} \right)$$

$$\frac{C_1}{C_0} = \frac{Q \cdot C_1}{Q \cdot C_0} = \frac{m_1}{m_0}$$

mi dice quanto parte di inq. è ancora presente nell'emissione dopo volatilizzazione. $m_0 \rightarrow$ quello che entra in un certo ist. $m_1 \rightarrow$ quello rimasto dopo volatilizzazione \rightarrow una frazione di m_0

quello perso per volatilizzazione è

$$Q C_0 = Q C_1 + \Phi \quad \Phi = Q C_0 - Q C_1$$

$$C_1 \leftarrow \Phi = Q \cdot C_0 \left(1 - \frac{C_1}{C_0} \right)$$

$$1 - \exp \left(- \frac{K \tau}{D} \right) = 0,98$$

$$\Phi = 0,98 \cdot 0,00156 \cdot 10 = 0,015 \frac{t}{s} = 0,47 \frac{t}{y}$$

flusso maggiore (anche in realtà) (es. muss. let.)

$\rightarrow k$ dipende che non a sua sciolto l'atmosfera e est significati che il 100% mesia che entra in 1 sec. rimane nel volume e può essere perso solo \times volatilizzazione
 \rightarrow quantità che può essere persa \times volatilizzazione

$$c) C(x, y, z) = \frac{QVD}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{y^2}{\sigma_y^2} + \frac{z^2}{\sigma_z^2} \right) \right] + C_f$$

osservatore
degiografico
(si muove lungo x
alla stessa velocità
del vento)

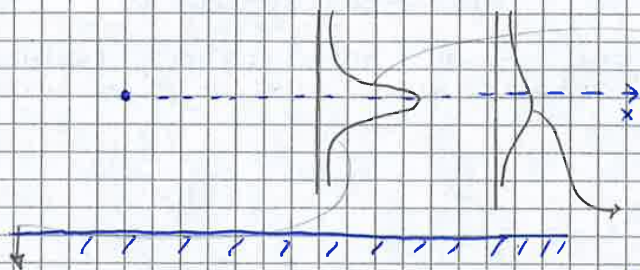
Questa sol. descrive le conc. del contaminante nello spazio dell'intorno sorgente (ma depend. del tempo).

A) Q = portata in massa contaminante (emissione) $\left[\frac{g}{s} \right]$
 $K_{yy} K_{zz} = \text{coeff. diff. + disp.}$

U = vel. del vento; unica componente lungo x costante nel tempo

$C_f =$ concentrazione di fondo conc. che potremmo avere in quel punto per la presenza di altre sorgenti lontane

B) $\sigma =$ deviat. standard nelle direz. y e z della distrib. delle concent.



> gaussiane che ha 1 max. corrisp. alla z della sorgente e ha una certa σ

lungo x la gaussiane si schiaccia

per $x \uparrow$ vedo $\sigma \uparrow$

lungo y vedo la stessa cosa

profondo di concentrazione lungo z (al passaggio di x)

terme verticale

questa gauss. se non ci fosse limite è l'ora terreno è stato limite orizzontale del CO. \rightarrow si allargherebbe infinitamente il termine (V) tiene conto di questa limitazione

L'area delle gaussiane è sempre = ; il contaminante si è distribuito su uno spazio + grande, ma non ha subito decadimento ha una x e lo successivo (l'equ. comp. ha dovrebbe tenere conto di qst. decadimento D).

Q la conosciamo \rightarrow sorgente, emissione

V dipende da geometria del dominio considerato

D dipende da relazione imp. con sist. in atmosfera

ci interessa a qst punto conoscere σ_y e σ_z :

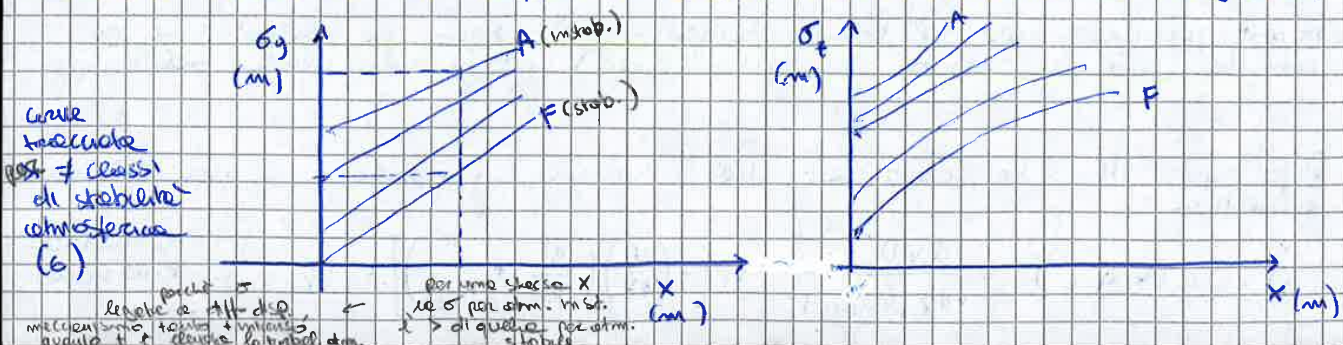
$$\sigma_y^2 = z \cdot K_{yy} \cdot \frac{x}{u}$$

costante in t e spazio
 \rightarrow al crescere di x le σ crescono

come trovare la K:

- misure dirette di turbolenza in atmosfera (raro)

- calcolo delle $\sigma \rightarrow$ Pasquill e Giffert hanno ricavato dei diagrammi:



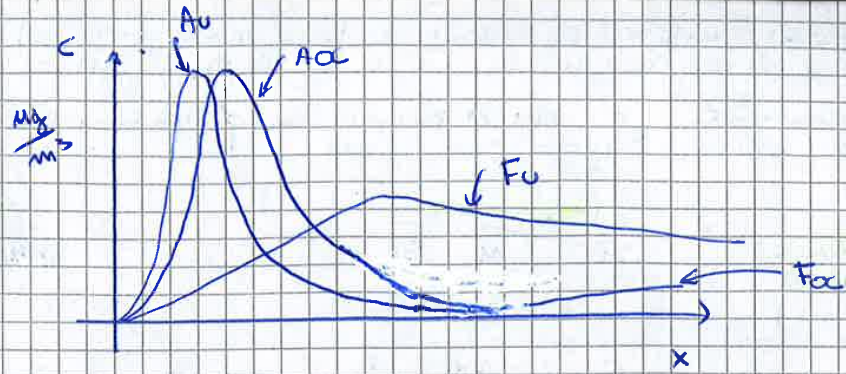
Curve tracciate per \neq classi di stabilità atmosferica (6)

per una stessa x se σ per atm. in str. $>$ di quella per atm. stabile

ES.1

$Q = 1000 \text{ m}^3/\text{s}$
 $U = 5 \text{ m/s}$
 $h = 120 \text{ m}$

OC = open country
 M = urban

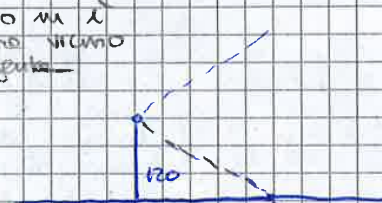


- met. A Forzando prevalenza
- AOC $\frac{Mg}{m^3}$
- AM $\frac{Mg}{m^3}$
- FOc
- Fu

	200	500	1000	5000	10000
AOC	203	1443	634	35,2	10,2
AM	727	1063	326	11,7	2,72
FOc	0	0	0	5,38	31,3
Fu	0	7,97	406	4,28	270

m dalle
 Scelta di lungo
 x ed y = ϕ

punti del grafico sopra (valori di concentrazione con formule adzionali)

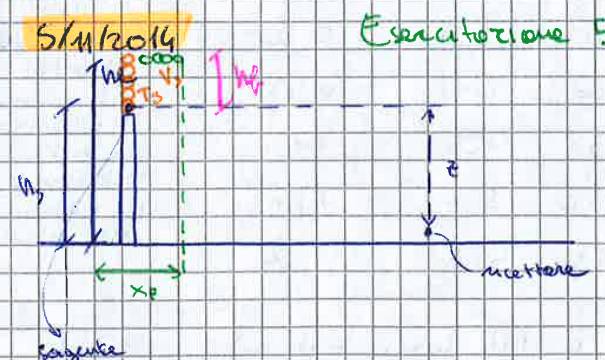


valutazione fatta HP che il suolo non c'è (non ho considerato terreno)

A molto stabile
 F molto instabile

classe F forzando prevalenza
 classe F con ostacoli vent

Esercitazione 5



imp. conoscere e perché solitamente il punto di emissione non coincide con la bocca del camino; distanza lungo la verticale h_p che è la quota effettiva di emissione. Questo perché l'effluente esce ad una $T \neq$ ed esce con una certa velocità. $T \neq T_a \rightarrow$ effluente preso, massimo verso l'alto e poi raggiunto una certa quota incontra le micelle verso valle e iniziano i meccanismi di diffusione dispersione.

energia cinetica con cui esce è molto alta; viene spinto sulla verticale; la palla, messa in effluente non subisce meccanismi di dispersione che andrebbero a diluire l'effluente e l'effetto della U del vento

parametro di tipo SET

definita quota effettiva di emissione h_e

parametri di tipo GALLEGGIANTE

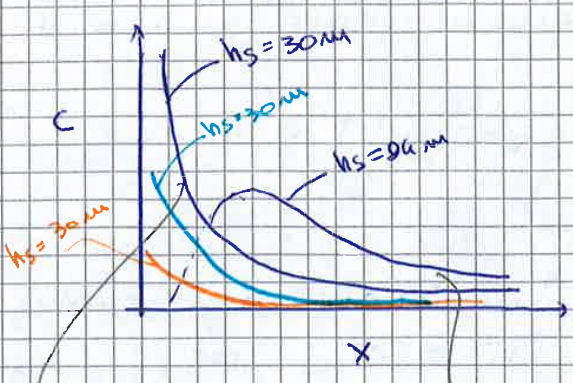
QUOTA EFFETTIVA di emissione h_e
 ASCISSA di LIVELLAMENTO x_F

hanno lo stesso comportamento, ma la causa è \neq ; risalgono a effetto della \neq temperatura; con ambiente circostante; x effetto di raffreddamento tende a scendere; scende molto e quindi il vento ha la possibilità di spingere massa effluente verso valle

$F_b \approx 10 \rightarrow$ usato formula $F_b < 55 \rightarrow (\Delta T)_c = 38$ $\Delta T = 200 - 20 = 180$

$x_f = 305$
 $h_e = 94 \rightarrow$ mite di 30 m

galleggiante



vel. vento
 $u = 3 \text{ m/s}$

ceste A: intenso rimescolamento turbolento verticale

come fraccata nell'HP che solo è chato limite ma estende nella diff. del contaminante

picco raggiunto subito e poi la $C \downarrow$
 l'instabilità cresce velocemente al suolo (classi A), con un momento di ritardo vicino al punto

3 volte + altro rispetto a z tangente; sempre elicata turbolenta; si raggiunge il picco + a valle; la turbolenza porta contaminante sempre + verso il suolo. Dispersione lungo z e anche lungo y \rightarrow per ogni valore di C + h_e , ha un tempo di diluizione \rightarrow ski e montagne
 per lo C scende, z come se il contaminante venisse trasportato oltre il suolo (ma tempo lento del percorso verticale), no una coda

$u = 10 \text{ m/s}$ e 20 m/s

\rightarrow ultimo gruppo 1^a mod 3^a mod

cambia valore di h_e

$h_e \approx 49$ $u = 10 \text{ m/s}$
 $h_e \approx 40$ $u = 20 \text{ m/s}$

come $h_s = 30 \text{ m}$ tutto stesso andamento; il vento sempre debole
 - poco in molenza + intenso le contaminante verso valle
 - momento turbolento atmosferico \rightarrow diluizione lungo y e z

ogni 2 fenomeni insieme fa sì che se C siano via via + basse

il vento è forte la velocità delle effluenti

come con correzione di h_e :
 come $h_s \approx 50 \text{ m}$
 $\approx 40 \text{ m}$

come stesso forma ma + basse (C + diluizione) lungo y

difficile cogliere differenze risultate da \neq fenomeni: $- h_s$ differenti (distanza scurete - mette) $-$ intensità vento \neq $-$ la turbolenza che $z > u$ molenza

gli che occorre al suolo si di meno

per il C

1^o gruppo $no 3$ $\Delta T < (\Delta T)_c$ per atm. instabile \rightarrow Set (curva A instabile)

per il C $\Delta T > (\Delta T)_c$ per atm. stabile \rightarrow galleggiante (curva D stabile)

scendiamo da 20 \rightarrow 50 m/s non cambia tipo di pennacchio sempre Set
 se che se stabile o instabile \rightarrow se atm. instabile non si oppone rispetto a se si che il quoziente \rightarrow z

12/11/2019

Esercitazione 6

Volume cilindrico del quale conosciamo

MODELLI A BOX

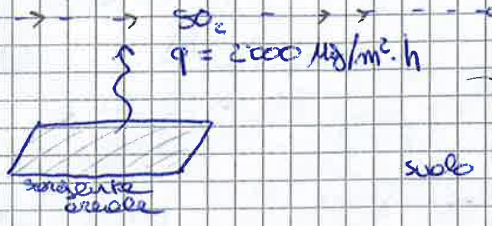
Euleriano
lagrangiano

altezza spazio ambiente di interesse $H = 1000 \text{ m}$

$Q_s = 2 \text{ Mg/s}$

limite da strada limite
- suolo
- estrazione laterale

spazio limite



Volume di interesse raccolto tra sorgente e spazio limite

HP volume perfettamente rimescolato

si vuole calcolare la concentrazione di inquinante che viene a allungarsi dal volume

$T_r = 20 \text{ h}$
tempo di residenza

da essere trasportata dal vento da almeno $5x$ o $10x$ della sorgente

$k = 0,03 \text{ h}^{-1}$

$v_s = 2 \text{ m/s} = 36 \frac{\text{m}}{\text{h}}$

concentrazione di fondo fuori dal volume C_s^0
(boschi, e monti)

fenomeno di ricaduta secca $\text{SO}_2 \rightarrow$ sottratta da volume di controllo

SO_2 adsorbita su particelle da precipitazione

osservatore euleriano:

$$\frac{dC_s}{dt} = \frac{Q_s}{H} - kC_s - \frac{v_s}{H} C_s + \frac{C_s^0 - C_s}{T_r}$$

$T_r = \frac{x}{v}$

nel tempo dell'ingresso del V di controllo osserviamo variazioni nel tempo di SO_2 (non viene nello spazio)

viene nel t perché ci viene sottratta che emette SO_2 e l'imitiamo del volume

costante cinetica
termini sorgente; ha effetto su tutta H
termine $\frac{Q_s}{H}$ contributo all'incremento di SO_2 nel volume

termini cinetica che ne determinano la scomparsa cinetica; 1° ord.

meccanismo ricaduta secca (sottrazione cinetica 2° ord.)

termini relativi al trasporto advettivo; se sono a monte del volume di controllo sono a concentrazione C_s^0 ; il vento prende il contaminante e lo porta dentro $\frac{Q_s^0}{T_r}$

1° costante cinetica; termine del 1° ordine

lo stesso vento prende il contaminante e lo porta fuori (termine negativo v_s)

Questa equazione ha 1 soluzione analitica che è la seguente:

$$C_s(t) = \frac{A}{B} + \left(C_s(0) - \frac{A}{B} \right) e^{-Bt}$$

dove: $A = \frac{Q_s}{H} + \frac{C_s^0}{T_r} \rightarrow$ termini sorgenti

$$B = k + \frac{v_s}{H} + \frac{1}{T_r}$$

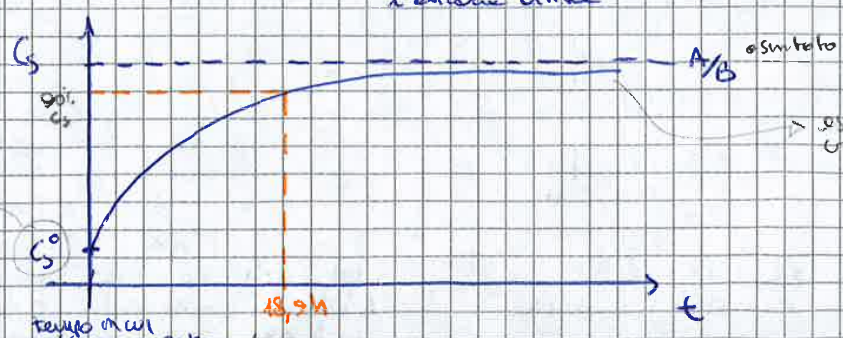
momentaneamente = istantaneamente \neq
conc. di inquinante nel volume all'istante $t=0$

$C_s(0) = C_s^0$ conc. di fondo

momentaneamente = istantaneamente \neq

conc. dentro al $t=0$; se sorgente non è ancora attiva

conc. al di fuori del volume



conc. nel volume prima che la sorgente cominci ad emettere

tempo in cui attivo sorgente $t=0$

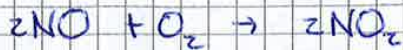
asintotico

48.45

es. 1) SUBO-FOTOCHEMICO



$$[\text{O}_3] = 40 \text{ ppbv}$$



$$[\text{NO}] = 80 \text{ ppbv}$$

$$R_1 = k_1 [\text{NO}] [\text{O}_3]$$

$$k_1 = 2 \cdot 10^{-16} \text{ cm}^3 / \text{molec} \cdot \text{s}$$

$$R_2 = k_2 [\text{NO}]^2 [\text{O}_2]$$

$$k_2 = 2 \cdot 10^{-38} \text{ cm}^6 / \text{molec}^2 \cdot \text{s}$$

$$[\text{NO}] = 80 \text{ ppbv}$$

→ verificare se $\frac{\text{molecole}}{\text{cm}^3}$

$$1 \text{ cm}^3 = 10^{-3} \text{ l}$$

$$T = 298 \text{ K} \quad p = 1 \text{ atm}$$

20°C

$$n = \frac{pV}{RT} = \frac{1 \text{ atm} \cdot 10^{-3} \text{ l}}{0,082 \frac{\text{atm} \cdot \text{l}}{\text{mol} \cdot \text{K}} \cdot 298 \text{ K}} = 4,09 \cdot 10^{-5} \frac{\text{molecole}}{\text{cm}^3}$$

$$1 \text{ mole} = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ molecole}$$

$$4,09 \cdot 10^{-5} \cdot 6,02 \cdot 10^{23} = 2,46 \cdot 10^{19} \text{ molecole / m}^3 \text{ di aria}$$

$$[\text{NO}] : 80 : 10^9 = x : 2,46 \cdot 10^{19}$$

molecole molecole
molecole molecole

$$x = 1,97 \cdot 10^{12} \text{ molec / cm}^3$$

$$[\text{O}_3] : 40 : 10^9 = x : 2,46 \cdot 10^{19}$$

molecole

$$x = 9,85 \cdot 10^{11} \text{ molec. / cm}^3$$

→ viene
ad moltip di
o il prima
(da 80 → 40)

$$R_1 = k_1 [\text{NO}] [\text{O}_3] = 2 \cdot 10^{-16} \frac{\text{cm}^3}{\text{molec} \cdot \text{s}} \cdot 1,97 \cdot 10^{12} \frac{\text{molec}}{\text{cm}^3} \cdot 9,85 \cdot 10^{11} \frac{\text{molec}}{\text{cm}^3}$$

$$= 3,88 \cdot 10^{10} \frac{\text{molec}}{\text{cm}^3 \cdot \text{s}}$$

$$R_2 = k_2 [\text{NO}]^2 [\text{O}_2]$$

$$[\text{O}_2] = 21\% \text{ v} \rightarrow 0,21 \text{ cm}^3 \text{ O}_2 / 1 \text{ cm}^3$$

1 atm
298 K

$$n = \frac{pV}{RT} = \frac{1 \text{ atm} \cdot 0,21 \cdot 10^{-3} \text{ l}}{0,082 \frac{\text{l} \cdot \text{atm}}{\text{mol} \cdot \text{K}} \cdot 298 \text{ K}} = 8,59 \cdot 10^{-6} \frac{\text{mol O}_2}{\text{cm}^3}$$

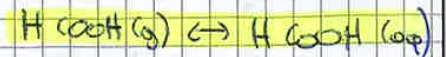
$[HCOOH] = 0,1 \text{ ppbv} = 1 \cdot 10^{-10} \text{ atm}$

$k_3 \quad k_3 = \frac{1}{H}$

$[HCOOH]_{\text{aq}} = k_3 [HCOOH_g] = 3,7 \cdot 10^{-7} \text{ mol/l}$

$K_4 \quad [H^+] = 8,16 \cdot 10^{-6} \text{ mol/l}$

$\text{pH} = 5,09$



$\frac{[H^+][HCOO^-]}{[HCOOH]} = K_4$

$[H^+]^2 = K_4 [HCOOH]$

$[CH_3COOH] = 0,1 \text{ ppbv} = 1 \cdot 10^{-10} \text{ atm}$

$k_5 \quad [CH_3COOH]_{\text{aq}} = 8,8 \cdot 10^{-7} \text{ mol/l}$



$\frac{[H^+][CH_3COO^-]}{[CH_3COOH]_{\text{aq}}} = \frac{[H^+]^2}{[CH_3COOH]_{\text{aq}}} = K_6$

$[H^+] = 3,86 \cdot 10^{-6} \text{ mol/l}$

$\text{pH} = 5,41$

tra le 3 sostanze, quella che dà il contributo è la seconda

$[H^+]_{\text{TOT}} = 1,88 \cdot 10^{-6} \frac{\text{mol}}{\text{l}} + 8,16 \cdot 10^{-6} \frac{\text{mol}}{\text{l}} + 3,86 \cdot 10^{-6} \frac{\text{mol}}{\text{l}} = 1,39 \cdot 10^{-5} \frac{\text{mol}}{\text{l}}$

$\text{pH} = 4,87$

rimbo
3

$1 \cdot 10^{12} \frac{\text{mol S}}{\text{y}}$

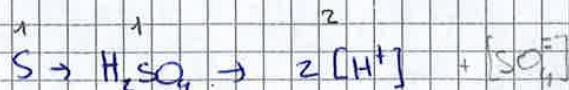
$1 \cdot 10^{12} \frac{\text{mol N}}{\text{y}}$

$S = 510 \cdot 10^6 \cdot 10^6 \text{ m}^2$

$y = 2 \text{ mm/y} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ m/y}$

precipitazioni

$Q(H^+)$
quantità
ioni H^+



$1 \cdot 10^{12} \frac{\text{mol}}{\text{y}} \cdot \frac{1}{365} \frac{\text{y}}{\text{d}} \cdot 2 = 5,48 \cdot 10^9 \frac{\text{mol}}{\text{d}}$

da 1 molecola di acido solforico → 2 molecole H^+

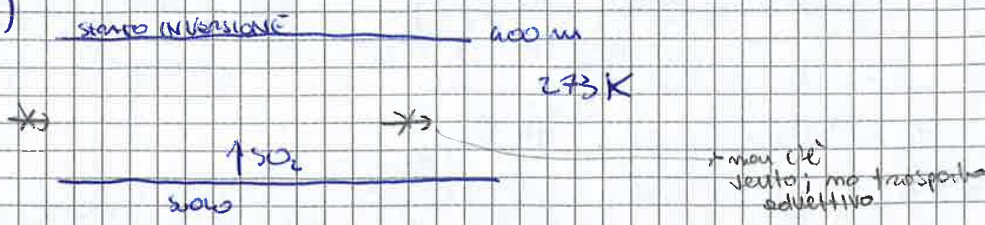
$Q(SO_4^{2-})$
quantità
ioni SO_4^{2-}

$\rightarrow 1 [SO_4^{2-}]$

stesso calcolo mol non per 2

$= 2,74 \cdot 10^9 \frac{\text{mol}}{\text{d}}$

es. 4)



$$E = 4 \cdot 10^2 \frac{\text{mol SO}_2}{\text{km}^2 \cdot \text{d}}$$

- SO₂ in massa chimica
- deposizione secca $k_d = 0,5 \text{ d}^{-1}$
 - ossidazione ad H₂SO₄ $k_o = 1 \text{ d}^{-1}$
- cinetica 1° ordine

$$\frac{dC}{dt} = \frac{E}{h} - k_d \cdot C - k_o \cdot C$$

variazione C nel tempo dell'intero del sistema

effetto di contaminazione (effetto costante)

stato stazionario

$$C(t) = \frac{A}{B} + \left(C(0) - \frac{A}{B} \right) e^{-Bt}$$

$$A = \frac{E}{h} \quad \text{fattori SO}_2$$

$$B = k_d + k_o \quad \text{tempo perso}$$

$$C_{ss} \left(\frac{dC}{dt} = 0 \right) = \frac{A}{B}$$

conc. in stato stazionario (all'uscita richiesta)

$$A = \frac{4 \cdot 10^2 \cdot 10^{-6} \frac{\text{mol}}{\text{m}^2 \cdot \text{d}}}{400 \text{ m}} = 1 \cdot 10^{-6} \frac{\text{mol}}{\text{m}^3 \cdot \text{d}}$$

$$C_{ss} = 6,67 \cdot 10^{-7} \frac{\text{mol}}{\text{m}^3} \quad (293 \text{ K } 1 \text{ atm})$$

$$B = 1,5 \text{ d}^{-1}$$

$$1 \text{ mol} = 22,4 \text{ l}$$

$$6,67 \cdot 10^{-7} \frac{\text{mol}}{\text{L} \cdot \text{m}^3} = 1,5 \cdot 10^{-5} \text{ l/m}^3 = 1,5 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3/\text{m}^3$$

$$15 \cdot 10^{-8} \frac{\text{m}^3 \text{ SO}_2}{\text{m}^3 \text{ di aria}} = 15 \text{ ppbV}$$

< per 2 standard di riferimento

caso stazionario

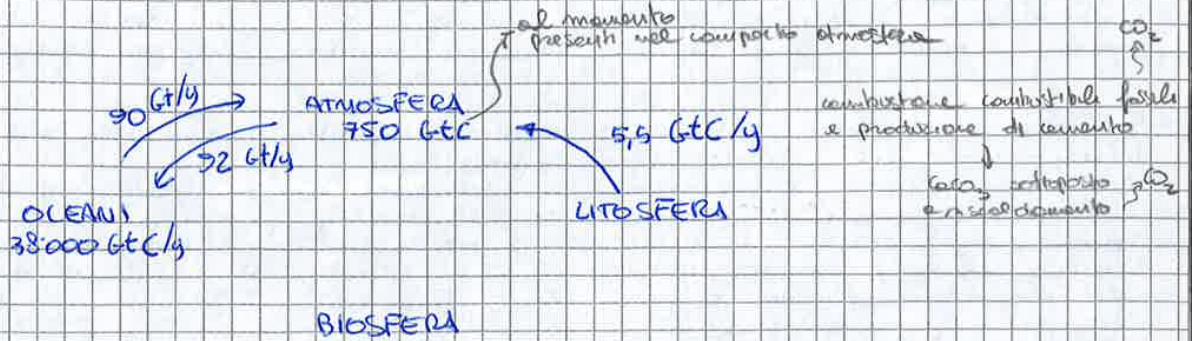
$$\phi = \frac{E}{h} - k_d \cdot C - k_o \cdot C$$

$$\text{dep. secca } k_d \cdot C_{ss} = 3,33 \cdot 10^{-7} \frac{\text{mol di SO}_2}{\text{m}^2 \cdot \text{d}}$$

27/11/2014

Esercitazione 7

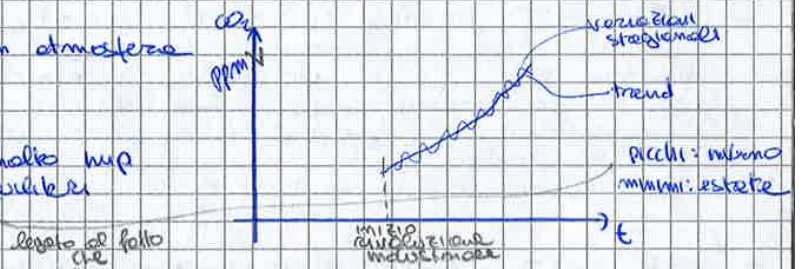
CICLO DEL CARBONIO



Così un comparto si comporta come un serbatoio (reservoir) che può essere o sorgente o pozzo del carbonio; tra i 4 comparti si instaurano dei flussi. Alcuni si comportano da sorgenti nei confronti di altri, altri come pozzi.

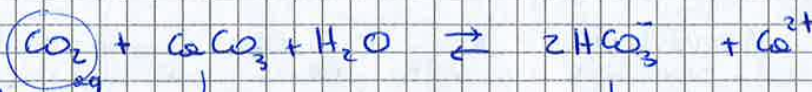
Concentrazione
 Inizialmente presenti 307,5 ppm in atmosfera
 (anni '60 320)
 Iniziativa industriale 250 ppm

Comparto biosfera ha un ruolo molto più all'interno del ciclo e per gli equilibri nei vari comparti ambientali



Scambio oceani - atm: il meccanismo è la legge di Henry → stabilizza anche il verso del flusso. Dipende anche dai coeff. di massa transfer tra fase gassosa e acquosa. Scambio coinvolge strato superficiale.

In base alle concentraz. che ci sono in H2O e in atm



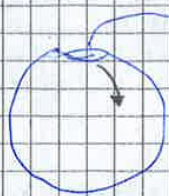
che atm si discioglie in oceano

si trova allo stato solido nell'oceano

ione bicarbonato

che determina anche il livello di saturazione (in ppm, HCO₃⁻)
 dell'intero degli oceani 2 meccanismi
 - SOLUBILITY PUMP fisico
 - BIOLOGICAL PUMP biologico

solubility pump f(T, salinità, H₂O) = circolazione termohalina



ai poli basse T e alta salinità H₂O; equilibrio di scambio spostato verso fase acquosa (T basse). H₂O superficiali molto ricche di CO₂ disciolta e molto salina, molto dense: tendono a sprofondare. Sprofondando, viene presa via corrente oceaniche e dai poli parte verso latitudini + basse, ed un'altra parte tendono a tornare verso la superficie e a cedere CO₂ assorbita in zone lontane da dove esse ottenute elettricamente. meccanismo di ciclo termohalina

↑ CO₂ fa effetto serra su piante di tipo C₃; se ↑ CO₂ l'enzima diventa + efficiente per reazioni che usano CO₂, le piante crescono + rapidamente, producono + biom., assorbono ↑ CO₂.
 nel processo fotosintetico
 l'enzima che media la fissazione di CO₂

Alle lunghe le piante hanno effetto su atmosfera → metano organico in decomposizione → zone prodotte, processi di degradazione → combustibili fossili. Salvo temperature estreme.

ES: immobilità risorse energetiche, riserva e stock

220 kg petrolio equivalente → 1 MW en. elettrica (consumo di 1 abitante all'anno)

produciamo qst energia usando:

risorse	1 t	→ Tep	G	V(y)
carbone	1 t	→ 9,74 Tep	300 kg/y	100 · 10 ⁶
gas naturale	1000 Nm ³	→ 9,82 Tep	270 Nm ³ /y	10 · 10 ⁶
legno	1 t	→ 9,45 Tep	490 kg/y	10

capacità di produrre energia se convertiamo al petrolio

grandezza V(y): velocità di sostituzione dello stock

velocità con cui si rinnova carbonio

Se ho qst quantità sono in grado di produrre 1 MW in un anno: FABBRICANO G

Se ho a disposizione uno stock pari a G · V → ho una riserva di immobilità

$Q = G \cdot V$ se si equivalgono = risorse rinnovabile

$Q \text{ (kg/Nm}^3\text{)} = 3 \cdot 10^{10} \text{ kg}$
 $2,7 \cdot 10^9 \text{ Nm}^3$
 $4,9 \cdot 10^9 \text{ kg}$

quantità di materiale a disposizione

velocità di ricost. + bassa; quantità di legno dello stock è stesso ordine di grandezza di legno in biosfera usata a produrre energia

Se un abitante ha a disposizione uno stock pari a qst, potrà considerare rinnovabile la risorsa

ES: dato a livello nazionale (all'anno)

Energie: 45 · 10¹³ kcal
 termica di cui ho bisogno

legno PCI = 1200 - 1300 kcal/kg
 servirebbero 105 - 110 · 10⁶ t/y

quantità energie da carbone → 6,3 · 10¹³ kcal

gas naturale → 19,8 · 10¹³ kcal

carbone combustibile → 12,1 · 10¹³ kcal

biomassa sostitutiva (escluso)

14,9 · 10⁶ t

47 · 10⁶ t

45,5 · 10⁶ t

107,5 · 10⁶ t → biom. di cui ho bisogno in 1 anno

3/12/2014

Esercizio 8

ES. esone di stato

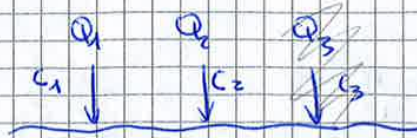
portata fiume
 $Q = 838 \text{ m}^3/\text{s}$

formulazione

obiettivo finale

1 mg/l

nel corpo idrico



diversi scarichi da recepire

$Q_1 = 0,095 \text{ m}^3/\text{s}$

$Q_2 = 0,476 \text{ m}^3/\text{s}$

abbiamo 2 effluenti

dobbiamo decidere come ridurre gli effluenti e con quale tecnologia di formulazione scendere

si possono usare 3 criteri differenti:

1° criterio) $M_1 = M_2$

portata in massa

costo degli effluenti, tecnologia stessa portata in massa che dev'essere compatibile con l'obiettivo di qualità

2° criterio) $C_1 = C_2$

trattiamo gli effluenti in modo da portarli allo stesso valore di concentrazione compatibile

in modo da portarli allo stesso valore di concentrazione compatibile sempre con il valore obiettivo

3° criterio) minore costo

compatibilità sempre con 1 mg/l

1) $M = Q \cdot C$
portata fiume
obiettivo di qualità

$M = 838 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot \frac{1 \text{ mg}}{\text{m}^3} = 838 \frac{\text{mg}}{\text{s}}$

portata max ammissibile che può essere il corpo idrico

come ripartire tra i 2 effluenti? seguendo il 1° criterio voglio solo che M sia lo stesso nei 2 effluenti → divido M per 2

$C_1 = \frac{838 \frac{\text{mg}}{\text{s}}}{2 \cdot 0,095 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}} = 4,41 \frac{\text{mg}}{\text{l}}$

parciali si ripartisce equamente tra i 2 effluenti

con concentrazioni ammissibili nei 2 effluenti

$C_2 = \frac{838 \frac{\text{mg}}{\text{s}}}{2 \cdot 0,476 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}} = 0,88 \frac{\text{mg}}{\text{l}}$

portata + grande = conc. ammissibile + bassa

2) $C_1 = C_2 = C$

$(Q_1 + Q_2) \cdot C \cdot 10^3 = 838 \frac{\text{mg}}{\text{s}}$

$(Q_1 \cdot C + Q_2 \cdot C) \cdot 10^3 = 838 \frac{\text{mg}}{\text{s}}$

portata massima ammissibile

unica incognita è C

$C = 1,46 \text{ mg/l}$

3) definiamo il costo = il trattamento di ciascun effluente:

costo proporz. a

$P = Q \cdot C$

⊗

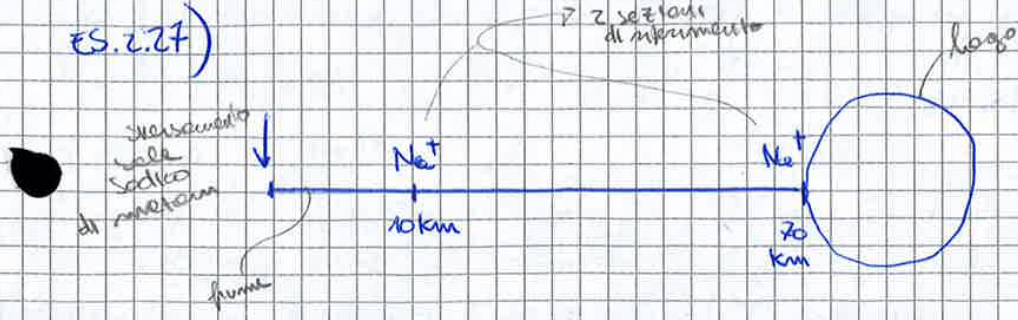
→ tipo di trattamento eseguito

⊙

→ concentraz. da raggiungere

portata

ES. 2.27)

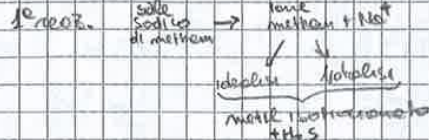


$l = 1,2 \text{ m}$ larghezza superficiale
 $d = 0,3 \text{ m}$ profondità
 $A = 0,36 \text{ m}^2$ sezione
 $Q = 75 \text{ m}^3/\text{min}$
 $v = 208,3 \text{ m}/\text{min}$
 $D = 160 \text{ m}^2/\text{min}$ coeff. di dispersione longitudinale

sversamento 49.205 l

$\rho = 1 \text{ kg/l}$

$M = 49.205 \text{ kg}$



impeso 33%
 \rightarrow $\frac{M}{M_{\text{metano}}}$
 principio attivo

$M = 16238 \text{ kg}$

tenuto conto di M_{metano}

$M_{\text{sal}} = 125678 \text{ mol}$

$D = 160 \text{ m}^2/\text{min}$
 coeff. di dispersione longitudinale

quantità principio attivo nel fiume

$M_{\text{Na}} = 170,2 \text{ g/mol}$
 sale sodico metano

da M_{Na}
 Sodium salt of methano

Punto 1)

calcolare max conc. Na^+ \downarrow Na^+
 conservativa

x (km)	t (min)	C (mol/m ³)
10	48	1124
70	330	425

tenuto conto della v del fiume

Sonda per attenuazione \times meccanismi di diffusione dispersione lungo

per calcolare la concentrazione uso:

$$C(x,t) = \frac{M}{\sqrt{4tD}} \cdot e^{-\frac{(x-vt)^2}{4Dt}}$$

solte. equazione disp.-adv. - diff. in una direzione (*)

lungo la sezione ho l'istensione concentrazione

AP. lce diff. e disp. lungo x e y
 sono superiori rispetto a z

$M = 349107 \text{ mol/m}^2$
 M_{mol}/A

se HP che il conti si ripartisce in modo uniforme su superficie

Punto 2)

allavate. Na^+ SO_4^{2-} CH_4
 \rightarrow Na^+ SO_4^{2-} CH_4
 scomposta. Na^+ SO_4^{2-} CH_4
 \rightarrow Na^+ SO_4^{2-} CH_4

IPROUSI

$k_a \approx 300 / \text{M s}$

$k_m = 1 \cdot 10^{-8} / \text{s}$

FOTOLISI

$k_{\text{FH}} = 1 \cdot 10^{-4} / \text{s}$

k e z costanti: k_m ambiente neutro
 k_a ambiente acido

so che le altre cosa 7,8:

$$k_{\text{ide}} = k_m + k_a [\text{H}^+]$$

meccanismo lo ordine rispetto a $[\text{H}^+]$

$$[\text{H}^+] = 1,58 \cdot 10^{-8} \text{ mol/l}$$

$$k_{\text{ide}} = 4,76 \cdot 10^{-6} / \text{s}$$

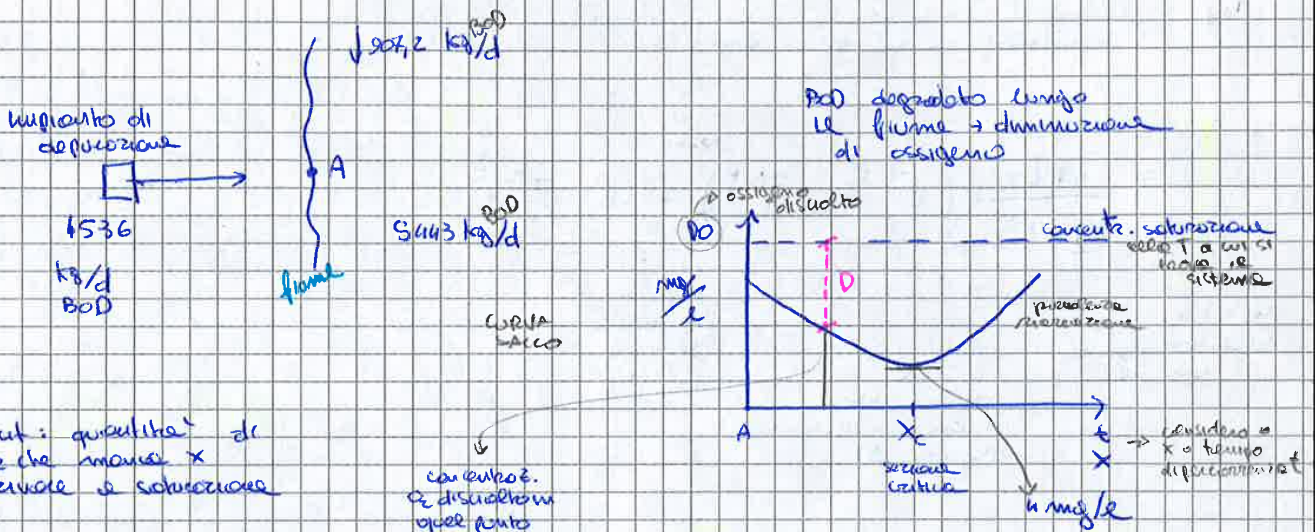
7.17

se mi metto a 70 km e un certo periodo non vedo MIT, l'urto e vedo solo verso i 325 minuti → ulteriore portata di 75 m³/min → concentrazione da concentrazione corrispondente a C
 $M = Q \cdot C$ portata in massa che entra

dopo // → concentrazione superiore → costi via fino a 325

ottengo tante portate in massa, se le sommo tutto = 125.678 moli circa X → massa che entra traora 110 e 72 moli di MIT

10/12/2014 **Esercizio 9**



minimo della curva ma deve essere sotto un certo valore critico (es. 1 mg/l)
 Obiettivo: per le condizioni di portanza calcolare il profilo della curva BOD.
 In corso di q/c punto estremo e calcolare D₀ → da est individuare il valore di minimo.
 ↳ da cui calcolabile di h mg/l
 ↳ trova la curva BOD
 ↳ il punto è il sistema globale non dipende
 ↳ velocità ridotta

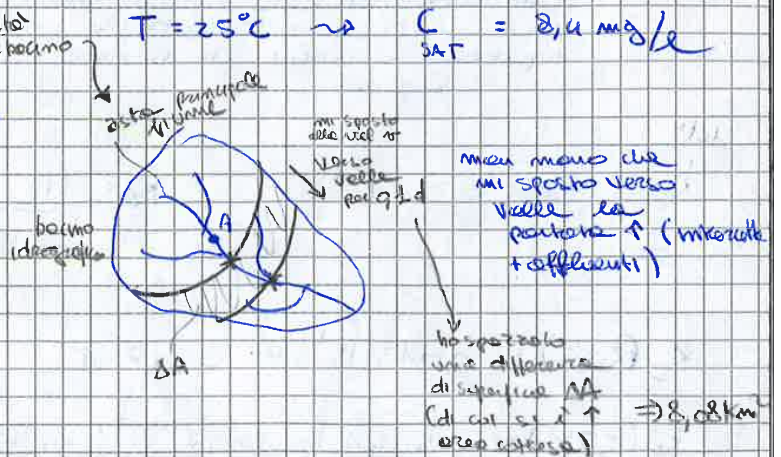
Conditt. sistema fiume:

$q = 4,37 \text{ l/km}^2$

$v = 0,216 \text{ m/s} = 18,5 \text{ km/d}$

$H = 3,20 \text{ m}$ profondità

t e t+0,1d
 ho 1 misurazione della superficie del bacino per
 $\Delta A = 8,08 \text{ km}^2$



sezione
A

$$A = 482 \text{ km}^2 \text{ (dato)}$$

$$d = 2,0 \text{ mg/l (dato)}$$

a deficit
di ossigeno

$$Q_A = q \cdot A = 4,37 \text{ l/s} \cdot \text{km}^2 \cdot 482 \text{ km}^2 = 2106 \text{ l/s} = 181990 \text{ m}^3/\text{d}$$

$$(BOD) = \frac{L_0}{Q_A} = \frac{5463 \text{ kg/d}}{181990 \frac{\text{m}^3}{\text{d}}} = 29,9 \text{ mg/l}$$

$$D_0 = d \cdot Q_A = 2,0 \text{ mg/l} \cdot 2106 \text{ l/s} = 4212 \text{ mg/s} = 364 \text{ kg/d}$$

ripetiamo calcolo per altre sezioni:

B

0,3 d di cammino da A

$$AB = 0,3 d \cdot 18,5 \frac{\text{km}}{\text{d}} = 5,55 \text{ km}$$

5 fiume

perché ogni 0,1 incremento di 8,08
0,1/0,1

sezione di fiume sottesa:

$$A_B = 482 \text{ km}^2 + (8,08 \cdot 3) \text{ km}^2 = 506 \text{ km}^2$$

$$Q_B = q \cdot A_B = 4,37 \text{ l/s} \cdot \text{km}^2 \cdot 506 \text{ km}^2 = 191050 \text{ m}^3/\text{d}$$

la formula
di prima
(*)

$$D_0 = 675 \text{ kg/d} \quad k_1, k_2, k_2, D_0, L_0 \rightarrow \text{noti}$$

$$d_0 = \frac{675 \text{ kg/d}}{191050 \frac{\text{m}^3}{\text{d}}} = 3,53 \frac{\text{mg}}{\text{l}}$$

deficit
come
concentrazione

la conc.
di saturazione
a 25°C
 $C_{SAT} = 8,4 \text{ mg/l}$ dato

$$C_2(B) = 8,4 - 3,53 = 4,87 \frac{\text{mg}}{\text{l}}$$

C

1,2 d di cammino da A

$$AC = 1,2 d \cdot 18,5 \frac{\text{km}}{\text{d}} = 22,2 \text{ km}$$

$$A_C = 482 + 8,08 \cdot 12 = 579 \text{ km}^2$$

$$Q_C = q \cdot A_C = 4,37 \cdot 579 = 218600 \text{ m}^3/\text{d}$$

de (*)

$$D_0 = 1361 \text{ kg/d}$$

$$d_c = \frac{1361 \text{ kg/d}}{218600 \frac{\text{m}^3}{\text{d}}} = 6,23 \frac{\text{mg}}{\text{l}}$$

$$C_2(C) = 8,4 - 6,23 = 2,17 \frac{\text{mg}}{\text{l}}$$

siano sotto
valore soglia
inquinato

terza iterazione:

$t_{cr}'' = 3,76 \text{ d}$ cfr $t_{cp}' = 3,76 \text{ d}$ sono relativi a convergenza
→ siamo arrivati a convergenza
 $L_0'' = 3446 \text{ kg BOD/d}$

$A \rightarrow 5443,2 \text{ kg BOD/d}$

↓

$A_{new} \rightarrow 3446 \text{ kg BOD/d} - 907,2 \text{ kg/d} = 2538,8 \text{ kg/d}$

→ tutto perché che viene da meno

$4536 \rightarrow 2538,8 \text{ kg/d}$

se riusciamo ad ottenere la portata che esce dall'impianto
 tutto a quel valore sono
 sicuri di uscire poi una
 conc. minima di 4 mg/l
 mantenibile \rightarrow

17/12/2014

Esercizio 10

$V = 150 \cdot 10^6 \text{ m}^3$
 $Q = 936 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{d}$
 $I = 0,90 \text{ mol/d}$
 $A = 8,6 \cdot 10^6 \text{ m}^2$

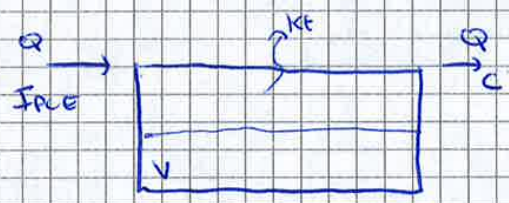
HP che non variano nel tempo
 caso stazionario
 portata in massa in PCE che entra ogni giorno nel lago

lago: può trovarsi in perfetta miscelaz. o stratificato.
 2 parti che interagiscono e reattori comp. miscelati

tempo di residenza idraulica $\tau_w = \frac{V}{Q}$
 $K_w = \frac{Q}{V} = \frac{1}{\tau_w} = 2,3 \cdot 10^{-3} \text{ d}^{-1}$

die quanto è efficace una PCE trasporto collettivo
 costante cinetica dimensionale \rightarrow quanto tempo rimane nel lago una certa particella di acqua

$K_t = 0,155 \text{ m/d}$ \rightarrow coeff. scambio di materia tra la fase liquida e la fase gassosa



parte del PCE assorbita e parte rimasta nel lago; PCE è volatile \rightarrow meccanismo di assorbimento \times volatilizzazione $\rightarrow K_t$
 in parte viene anche assorbito \rightarrow trasporto collettivo dovuto a portata Q che produce una parte di PCE e la parte al di fuori del lago

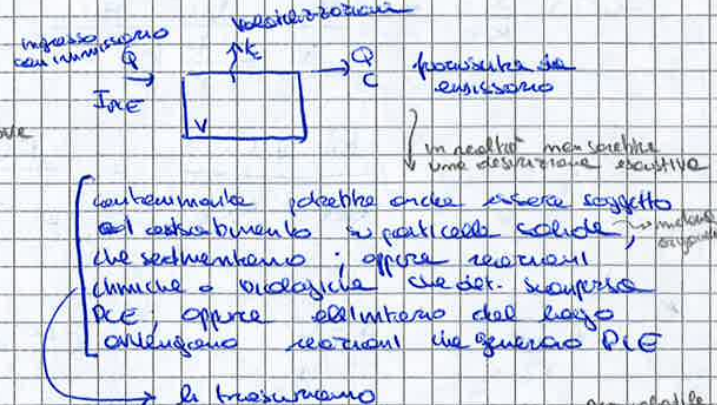
$h = \text{profondità lago}$
 $H = 0,727$ \rightarrow PCE ha una costante di Henry senza dimensioni per ogni
 $k_g = K_t/h = 8,9 \cdot 10^{-3} \text{ d}^{-1}$

quanto solo la concentrazione, in condizioni di stazionarietà non 2 cost? Dopo quanto tempo le raggiunge?

① CASO PERFETTAMENTE MISCELTO

$\frac{dy}{dt} = S - Ky$

S = funzione di tutti i processi nel bacino
 Ky = agenti esterni al sistema (terra esterne)
 C = concentrazione contemporanea
 M = massa contemporanea
 in qst caso tra M e C del lago V vale per C una cost. (e' indiff. parziale di C o M)
 in qst caso $y = C$



forze esterne $S_c = \frac{I}{V} + \frac{A}{V} \cdot K_t \cdot \frac{C_g}{H}$

è una parte della volatilizzazione e deriva
 flusso di PCE da atmosfera verso bacino (flusso assoluto non netto)
 assolutamente bisogna trovare conto ma vale nullo
 il flusso netto si intende dal bacino verso atmosfera

7/10/2015

Esercizio 11 (imp. ciclo x rec. ammoniacale)

HQ = $\frac{CE}{RfD}$

Hazard quotient [1]

conc. che troviamo nel mezzo ambientale che viene inalato o assunto con il soggetto recettore

preferenza dose x um del continuamente e percorso di esposizione → presenza di inalterazione contatto diretto

fattore di esposizione

quantità di mezzo ambientale che viene inalato o assunto con il recettore

$C \cdot E = \text{dose}$

$\frac{mg}{d \cdot kg}$

unità di misura C e E dipendono dal sistema che si considera

es. $C \frac{mg}{l}$
 $E \frac{l}{d \cdot kg}$

se $HQ = 1$ significa che ^{il sogg. riceve} la max ammissibile dose per quel tipo di continuamente e percorso di esposizione ogni giorno

(ES.1) continuamente in H₂O di falda
 contatto diretto

soggetto recettore
 ingerisce H₂O (contatto diretto)

1,1, 1 TCA

conc. max che può avere in modo che il soggetto non ne sia indotto

$RfD = 0,035 \frac{mg}{kg \cdot d}$

per la TCA il più ingiustificato di H₂O continuamente

$E = 0,027 \frac{l}{kg \cdot d}$

→ peso corporeo

$C = \frac{HQ \cdot RfD}{E} = \frac{1 \cdot 0,035}{0,027} = 1300 \frac{mg}{l}$

(ES.2)



una parte di sceglie Y continuamente e lo porta in falda e determina una certa concentrazione di contaminante in falda

ipotesiamo $HQ = 1$

Qual è C_1 max ammissibile nel terreno tale che det. alle fue un $HQ = 1$ in esposizione

zona di terreno continuamente in zona falda (sorgente puntuale 1+1 TCA)

imp. Analisi per i meccanismi di trasporto inq. da suolo e falda e la successiva diluizione

superficie passaggio a rischio \rightarrow C_{suolo} max ammissibile

$C_{GN} = \frac{HQ \cdot RfD}{E}$

conc. in falda max ammissibile $\frac{mg}{cu^3}$

$C_{suolo} = \frac{C_{GN}}{F_{su}}$

conc. max nella sorgente (suolo) $\frac{mg}{g \text{ suolo}}$

fattore ridotta percolato in falda $\frac{g \text{ suolo}}{cu^3 \text{ H}_2\text{O}}$

$C_s = K_{sw} \cdot C_p$

$K_{sw} = \frac{\rho_w + (k_d \rho_b) + H^* \rho_a}{\rho_b}$

→ coeff. riflett. H₂O-Suolo
 → dens. bulk
 → H* cost. Henry [-]
 → da contenuto di ossigeno dello zona vadose

↓ conc. contum. sorgente
 ↓ conc. cont. nel percolato

↓ contenuto d'H₂O nella fase percolato
 ↓ zona vadose

$C_s = \frac{M}{\rho_b \cdot V_s}$

→ massa tot. contaminante nelle sorgente
 → massa sorgente

$C_s = \frac{M}{\rho_b \cdot V_s} = \frac{M_p + M_s + M_g}{\rho_b \cdot V_s}$

→ diverse forme in cui troviamo contaminante
 p = liquida g = gassosa s = solida

$M = M_p + M_s + M_g$
 $= (\rho_w + \rho_b k_d + H^* \rho_a) C_p V_s$

volume sorgente

perché:

$M_p = \rho_w V_s C_p$
 $M_s = k_d C_p V_s \cdot \rho_b$
 $M_g = H^* \rho_a C_p V_s$

→ volume fase gassosa

$C_s = \frac{(\rho_w + \rho_b k_d + H^* \rho_a) C_p V_s}{\rho_b \cdot V_s}$

→ volume fase gassosa
 → rimane solo tra C_s e C_p
 data rispetto alla K_{sw}

ipotesi HQ=1
 voglio trovare C_s

$I = 30 \text{ cm/y}$
 $U_{gw} = 6,85 \text{ cm/y}$
 $W = 4500 \text{ cm}$
 $S_{gw} = 200 \text{ cm}$

contenuto d'H₂O
 $\rho_w = 0,12 \frac{\text{cm}^3 \text{ acqua}}{\text{cm}^3 \text{ suolo}}$

contenuto di ossigeno
 $\rho_a = 0,26 \frac{\text{cm}^3 \text{ ossigeno}}{\text{cm}^3 \text{ suolo}}$

$\rho_b = 1,7 \text{ g/cm}^3$
 $k_d = 1,10 \text{ cm}^3/\text{g}$
 $H^* = 0,705$

da questi dati trovare:
 $K_{sw} = 1,28 \text{ cm}^3 \text{ H}_2\text{O}/\text{g suolo}$
 $f_{sw} = 0,78$
 $C_{gw} = 1300 \text{ mg/L (HQ=1)}$
 $C_s = 1670 \text{ mg/kg}$

Tracciante Na^+F^-

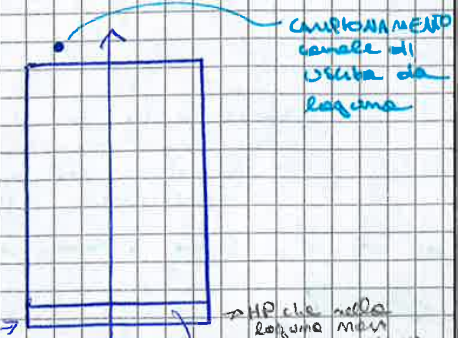
ione fluorato è il vero tracciante: è una sost. conservativa, non reattiva e il fluoro è comunq. accumulato nelle H₂O potabili sotto a certa limite (1,5 mg/l)

raggiunta con il carico ma la solubilità è di qlc mg; della specie se ne forma poca, trascurabile

sostanze eluite con un pct di H₂O di riserva;

concentraz. dalle scorie 1,5 mg/l (sgaio x H₂O potabile)

volume miscelato in riserva



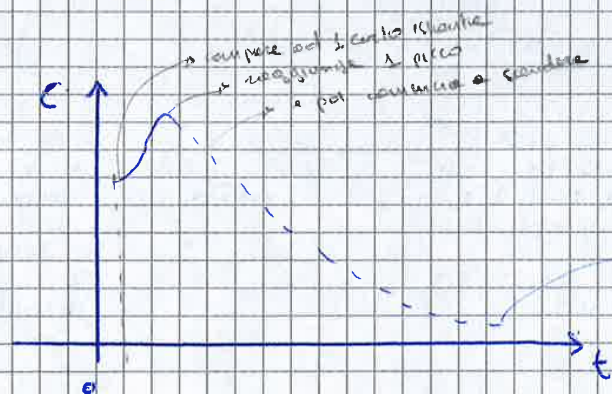
se la laguna richiede di restare a pistone (condizione peggiore → non ammortizzato)

con la cur. con cui parte arriva in fondo a laguna (ost. conservativa)

inmissione di tracciante è impulsiva (istante molto breve di tempo di attuazione) → 12 h
 → HP che nella laguna non ottiene nessun beneficio per cui qst volume abbia la possibilità di diluere → reazione PLUG-FLOW
 → d'alt. che dovrebbe essere in tempo di attuazione

Ad t certo punto ha raggiunto eluito

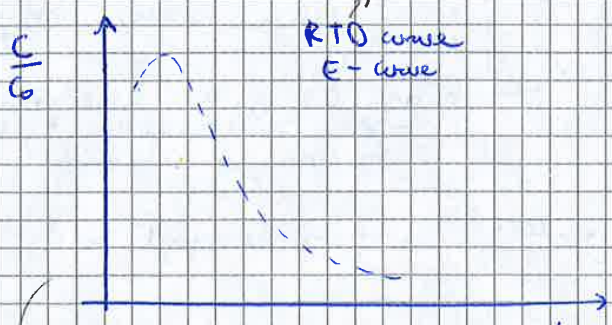
CAMPIONAMENTO canale d'uscita



istante in cui parte prova di tracciante

dato grezzo; qst curva viene poi trasformata in curva adimensionale x t/tau
 C/C₀ = M/V
 M → massa tracciante
 V → volume miscelato
 Cont. che caratterizza del tracciante se si comportasse come sostanza perfettamente miscelata

Residence time distribution



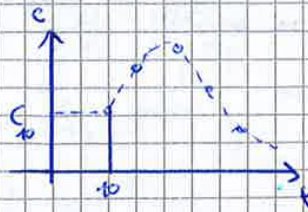
uso info da qst curve → misura tempo di intervento nelle:

t/C0 → tempo di residenza teorico

Domande riassuntive:

- ho usato la info contenuta dalle curve:

es C_0 ho



- conosco solamente C_0 usato al giorno 10
multiplico per $\frac{1}{2}$ e trovo c_0

\rightarrow = tutti i dati di caratterizzazione

- \bar{c} \rightarrow media pesata di tutti i tempi di arrivo delle 7 messe, pesate
secondo l'importanza della messa

\rightarrow mi dice che la > parte della messa o della comunicazione è avvenuta in qst 2 gg \rightarrow 11-12

La quantità di trascritto è $c_{mq} <$ di qst iniziale 20

- 0,5 pesi pesati in uscita dalle bobine la conc. era trascritto bobine che costrinse non altre lettere
- resistori in bobine che fanno sporcizia trascritto

\rightarrow primo dei 100 o dopo 111d

\rightarrow manutenzione successiva

se sono misure di intensità + alt

95% del trascritto

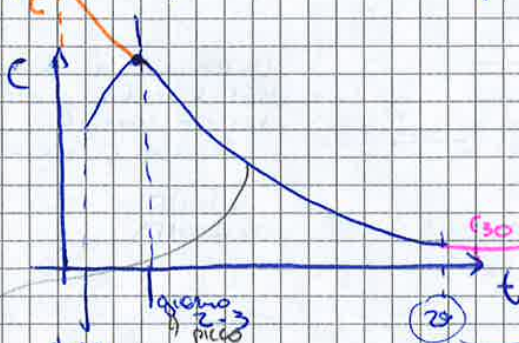
in qst caso: 20kg 95% \rightarrow 19kg

\rightarrow sono sopra il 95%

$\bar{c} = 11,7d$ di un livello costruttivo

se sono sopra qst valore il trascritto è consistente

Nel caso reale V_{u1} è il villo che il trascritto recuperato era solo l'88% \rightarrow in qst caso cosa si fa:



dopo 1 poche ore conc. non trascrivibile (altitudine alta)

ultimo gg in cui si è visto conc. \rightarrow limiti di sopravvivenza

è probabile aver perso un codice che intende: in corso si può che a fornire conc. trascritto bobine da non altre lettere

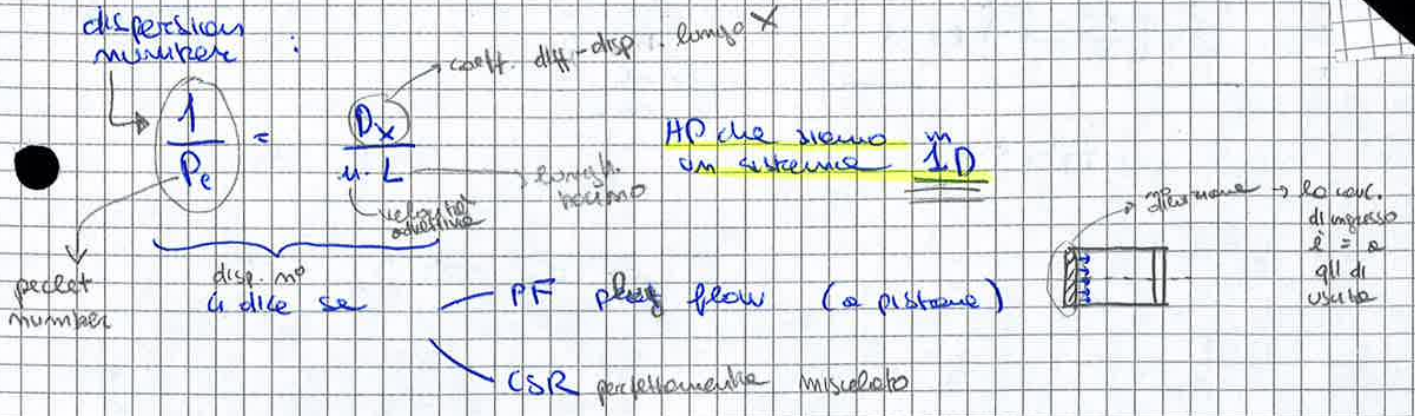
con Centroz. alta misurazione

Per aumentare da 88% a 95% si sono extrapolati i dati dopo le gg. 29. Interpolazione utilizzando che dopo il gg 3 la curva ha un andamento decrescente che può essere modellato con una legge del 1° ordine del tipo:

$c(t) = C_0 - kt$
 \rightarrow meno C_0 ma \rightarrow interesse se prolungo curva \rightarrow inizio

potrebbe più essere descritto con legge di qst tipo

uso ff qst dati di gg 3 e 29 \rightarrow successivamente curva spot per extrapolare caso succede dopo



Per PF: $D_x \rightarrow 0$ → è qll responsabile della dispersione

le dispersione non avviene, D_x molto piccolo

Disp. Number molto piccolo ($< 0,2$)

u e L sono fissate → 700 m

dipende dai parametri che incidono sul dimensionamento da \bar{t} e portata

→ caso: se solo la parte del volume presente al flusso (è una velocità reale, non teorica)

Per CSR: Disp. Number $> 0,5$ ($0,5 - 1$)

è stato tra $0,2 \div 0,5$ siamo in una via di mezzo: serie di reattori CSR in cascata

come si calcola dispersione no della curva? ↓

Calcoliamo VARIANZA CURVA

per calcolare σ_t^2 si devono calcolare momenti di 1° ordine

momento primo della distrib.

Disp. Number legato a varianza della distrib. mosse

diverso D_x (nel sistema)

momento 2° ordine: dice quanto sono lontane gli istanti rispetto al tempo di residenza (tempo medio di arrivo)

perché avere altre configuraz:

coeff. D_x + altro

potrebbe essere che L e u di residenza è 11,7 ma scart dispersione

le mosse sono vicine, arrivano tutte e allo stesso tempo, la diff. disp. ha avuto poco effetto nel sistema

formule che lega VARIANZA a DISPERSION NUMBER:

$$\sigma_t^2 = 2 \frac{D_x}{u \cdot L} = 2 \left(\frac{D_x}{u \cdot L} \right) \left[1 - \exp\left(-\frac{u \cdot L}{D_x}\right) \right] \quad (*)$$

disp. number

Il "termine verticale" - V

Soluzione dell'equazione di advezione, diffusione-dispersione per un OSSERVATORE LAGRANGIANO

K: fattore di scala, 10^6 (Q, g/s \rightarrow c, $\mu\text{g}/\text{m}^3$)
 V: termine verticale
 D: termine di decadimento

$$c = \frac{QKVD}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} \exp \left[-0.5 \left(\frac{y}{\sigma_y} \right)^2 \right]$$

termine relativo a dispersione nel termine verticale

$$V = \exp \left[-0.5 \left(\frac{z_r - h_e}{\sigma_z} \right)^2 \right] + \exp \left[-0.5 \left(\frac{z_r + h_e}{\sigma_z} \right)^2 \right] + \sum_{i=1}^{\infty} \left\{ \exp \left[-0.5 \left(\frac{H_1}{\sigma_z} \right)^2 \right] + \exp \left[-0.5 \left(\frac{H_2}{\sigma_z} \right)^2 \right] + \exp \left[-0.5 \left(\frac{H_3}{\sigma_z} \right)^2 \right] + \exp \left[-0.5 \left(\frac{H_4}{\sigma_z} \right)^2 \right] \right\}$$

Soluce K tra (pointing to the first term)
2 termini simmetrica (pointing to the first two terms)
simmetrica di termini (pointing to the sum)

z_i = altezza suolo - strada
 h_e = altezza sorgente rispetto al suolo
 z_r = quota ricevitore dal suolo

Termine verticale semplificato

$$V = \frac{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_z}{z_i}$$

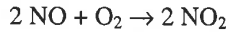
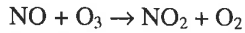
utilizzabile quando $\frac{\sigma_z}{z_i} \geq 1.6$

- Con:
- $h_e = h_s + \Delta h$
 - $H_1 = z_r - (2iz_i - h_e)$
 - $H_2 = z_r + (2iz_i - h_e)$
 - $H_3 = z_r - (2iz_i + h_e)$
 - $H_4 = z_r + (2iz_i + h_e)$

COV
NOX

Sullo smog fotochimico *→ sole e concentrazioni
unito di misura*

La costante cinetica di reazione per l'ossidazione del monossido di azoto da parte dell'ozono è pari a $2 \cdot 10^{-14} \text{ cm}^3/\text{molecola} \cdot \text{s}$, mentre per la reazione in cui il monossido di azoto è ossidato dall'ossigeno (in competizione con la precedente) la costante cinetica di reazione è pari a $2 \cdot 10^{-38} \text{ cm}^6/\text{molecola}^2 \cdot \text{s}$.



Sulla base delle concentrazioni di ozono (pari a 40 ppbv) e monossido di azoto (pari a 80 ppbv) tipiche di episodi di smog in ore diurne (antimeridiane) calcolare la velocità delle due reazioni R e dire quale delle due prevale sull'altra.

$$R_1 = k_1 \cdot [\text{NO}] \cdot [\text{O}_3]$$

$$R_2 = k_2 \cdot [\text{NO}]^2 \cdot [\text{O}_2]$$

Trasformare la concentrazione da ppbv a molecole/cm³

$$[\text{NO}] = 80 \text{ ppbv}$$

$$[\text{NO}] = 80 \text{ molecole di NO per } 10^9 \text{ molecole di aria}$$

$$[\text{NO}] = 80 \text{ moli di NO per } 10^9 \text{ moli di aria}$$

$$[\text{NO}] = 80 \cdot 10^{-9} \text{ atm (pressione parziale della NO per 1 atm di pressione totale)}$$

$$[\text{NO}] = 80 \text{ litri di NO su } 10^9 \text{ litri di aria (in assegnate condizioni)}$$

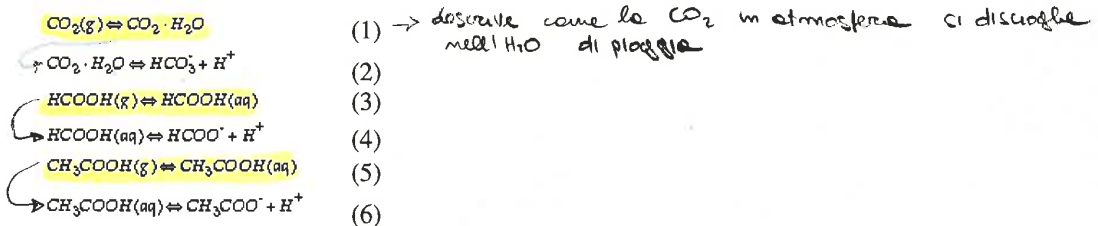
Sulle piogge acide

Problem 1: What goes up must come down

1. The United States presently emit to the atmosphere 1.3×10^9 moles day⁻¹ of NO_x and 1.0×10^9 moles day⁻¹ of SO₂. We assume that all of the emitted NO_x and SO₂ are precipitated back over the United States as HNO₃ and H₂SO₄, respectively (this is not a bad approximation). The area of the United States is $1.0 \times 10^7 \text{ km}^2$ and the mean precipitation rate is 2 mm day^{-1} . Assuming that HNO₃ and H₂SO₄ are the only impurities in the rain, show that the resulting mean pH of precipitation over the United States is 3.8.

Problem 2: Acid rain: the preindustrial atmosphere

This problem examines the acidity of rain in the preindustrial atmosphere. Make use of the following equilibria:



with equilibrium constants $K_1 = 3.0 \times 10^{-2} \text{ M atm}^{-1}$, $K_2 = 4.2 \times 10^{-7} \text{ M}$, $K_3 = 3.7 \times 10^3 \text{ M atm}^{-1}$, $K_4 = 1.8 \times 10^{-4} \text{ M}$, $K_5 = 8.8 \times 10^3 \text{ M atm}^{-1}$, $K_6 = 1.7 \times 10^{-5} \text{ M}$.

1. The preindustrial atmosphere contained 280 ppmv CO₂. Calculate the pH of the rain at equilibrium with this concentration of CO₂.

ES. 4

BRIGGS OPEN COUNTRY (terreno pianeggiante)

Stabilità ↓

Categorie di stabilità	σ_y	σ_z
A	$0,22x (1+0,0001x)^{-1/2}$	$0,20x$
B	$0,16x (1+0,0001x)^{-1/2}$	$0,12x$
C	$0,11x (1+0,0001x)^{-1/2}$	$0,08x (1+0,0002x)^{-1/2}$
D	$0,08x (1+0,0001x)^{-1/2}$	$0,06x (1+0,0015x)^{-1/2}$
E	$0,06x (1+0,0001x)^{-1/2}$	$0,03x (1+0,0003x)^{-1}$
F	$0,04x (1+0,0001x)^{-1/2}$	$0,016x (1+0,0003x)^{-1}$

BRIGGS URBAN (ostacoli lungo z)

Categorie di stabilità	σ_y	σ_z
A - B	$0,32x (1+0,0004x)^{-1/2}$	$0,24x (1+0,001x)^{+1/2}$
C	$0,22x (1+0,0004x)^{-1/2}$	$0,20x$
D	$0,16x (1+0,0004x)^{-1/2}$	$0,14x (1+0,0003x)^{-1/2}$
E - F	$0,11x (1+0,0004x)^{-1/2}$	$0,08x (1+0,0015x)^{-1/2}$

X: distanza dalla sorgente.

Formule per il calcolo dell'innalzamento del pennacchio e dell'ascissa di livellamento

- v_s : velocità di uscita dal camino dell'effluente (m/s);
- u_s : velocità del vento (m/s);
- d_s : diametro interno del camino (m);
- h_s : quota della bocca del camino rispetto al suolo (altezza geometrica del punto di emissione) (m);
- ϑ : temperatura potenziale dell'atmosfera (K);
- T_s : temperatura dell'effluente (K);
- T_a : temperatura dell'aria (K).

Parametro di galleggiamento $F_b = g \cdot v_s \cdot d_s^2 \cdot \left(\frac{T_s - T_a}{4T_s} \right)$

Parametro di flusso inerziale $F_m = v_s^2 \cdot d_s^2 \cdot \frac{T_a}{4T_s}$

Parametro di stabilità di Briggs $s = g \cdot \frac{\partial \vartheta / \partial z}{T_a}$

→ gradiente di T lungo z
 → class. di stabilità (si calcola solo a maggior stabilità)
 $\frac{\partial \vartheta}{\partial z} = 0,020 \frac{K}{m}$ (E)
 $\frac{\partial \vartheta}{\partial z} = 0,035 \frac{K}{m}$ (F)

↓ inventario
x nessuna pratica

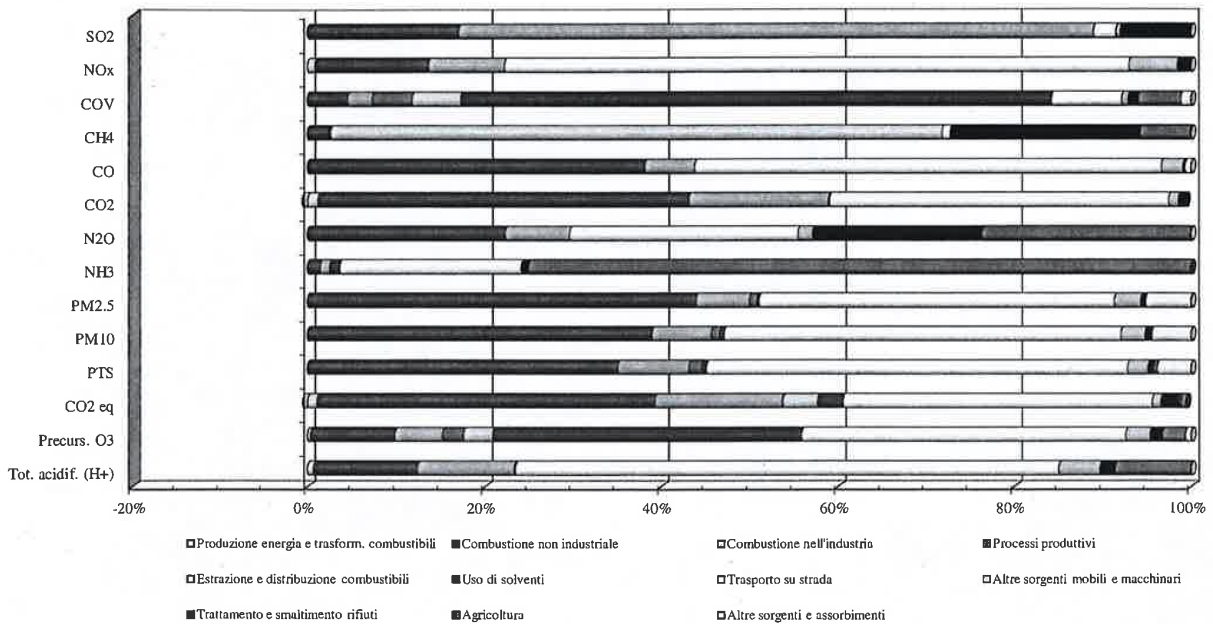
ultimo disponibile
di dati

ES. 2

Emissioni in provincia di Monza e Brianza nel 2010 - public review (Fonte: INEMAR ARPA LOMBARDIA)

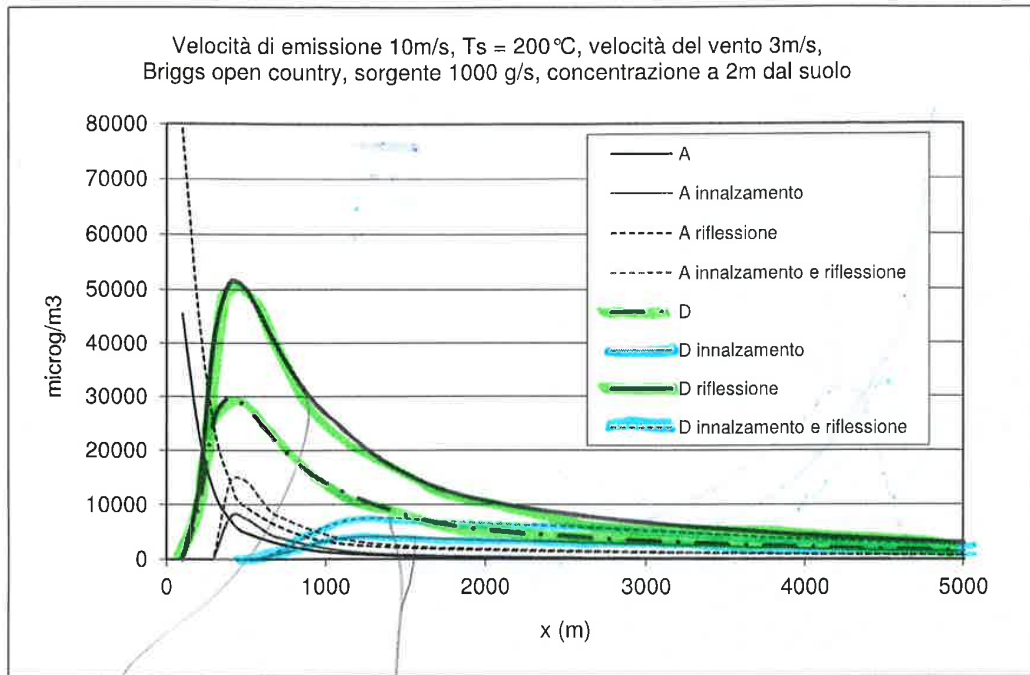
particolarmente insieme con le altre categorie

macrocategorie di attività	SO ₂	NO _x	COV	CH ₄	CO	CO ₂	N ₂ O	NH ₃	PM2.5	PM10	PTS	CO ₂ eq	Precurs. O ₃	Tot. acidif. (H+)
	t/anno	t/anno	t/anno	t/anno	t/anno	kt/anno	t/anno	t/anno	t/anno	t/anno	t/anno	kt/anno	t/anno	kt/anno
Produzione energia e trasform. combustibili	0,2	69	2,0	2,0	16	44	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	44	88	1,5
Combustione non industriale	58	1.042	546	264	3.479	1.555	37	5,9	363	372	391	1.572	2.204	25
Combustione nell'industria	246	706	338	24	515	586	12	4,5	50	64	90	591	1.256	23
Processi produttivi			549	1,4		3,7		0,0	6,9	9,2	16	3,7	549	0,0
Estrazione e distribuzione combustibili			669	7.737								162	778	
Uso di solventi	0,1	0,1	8.169					4,5	1,9	4,5	5,6	116	8.169	0,3
Trasporto su strada	8,7	5.785	969	106	4.848	1.428	43	85	333	429	531	1.444	8.561	131
Altre sorgenti mobili e macchinari	1,7	452	87	1,3	223	41	2,8	0,1	25	27	27	42	663	10
Trattamento e smaltimento rifiuti	27	119	143	2.397	19	29	32	3,4	3,8	5,0	7,5	89	324	3,6
Agricoltura		0,9	590	640			40	311	0,9	2,2	4,1	26	600	18
Altre sorgenti e assorbimenti	0,6	3,0	138	4,7	63	-22	0,1		42	42	42	-22	149	0,1
Totale	342	8.176	12.200	11.177	9.164	3.665	167	414	827	955	1.114	4.067	23.340	213



Distribuzione percentuale delle emissioni in provincia di Monza e Brianza nel 2010 - public review

	SO ₂	NO _x	COV	CH ₄	CO	CO ₂	N ₂ O	NH ₃	PM2.5	PM10	PTS	CO ₂ eq	Precurs. O ₃	Tot. acidif. (H+)
Produzione energia e trasform. combustibili	0 %	1 %	0 %	0 %	0 %	1 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	1 %	0 %	1 %
Combustione non industriale	17 %	13 %	4 %	2 %	38 %	42 %	22 %	1 %	44 %	39 %	35 %	39 %	9 %	12 %
Combustione nell'industria	72 %	9 %	3 %	0 %	6 %	16 %	7 %	1 %	6 %	7 %	8 %	15 %	5 %	11 %
Processi produttivi			4 %	0 %		0 %		0 %	1 %	1 %	1 %	0 %	2 %	0 %
Estrazione e distribuzione combustibili			5 %	69 %								4 %	3 %	
Uso di solventi	0 %	0 %	67 %					1 %	0 %	0 %	1 %	3 %	35 %	0 %
Trasporto su strada	3 %	71 %	8 %	1 %	53 %	39 %	26 %	20 %	40 %	45 %	48 %	35 %	37 %	62 %
Altre sorgenti mobili e macchinari	1 %	6 %	1 %	0 %	2 %	1 %	2 %	0 %	3 %	3 %	2 %	1 %	3 %	5 %
Trattamento e smaltimento rifiuti	8 %	1 %	1 %	21 %	0 %	1 %	19 %	1 %	0 %	1 %	1 %	2 %	1 %	2 %
Agricoltura		0 %	5 %	6 %			24 %	75 %	0 %	0 %	0 %	1 %	3 %	9 %
Altre sorgenti e assorbimenti	0 %	0 %	1 %	0 %	1 %	-1 %	0 %		5 %	4 %	4 %	-1 %	1 %	0 %
Totale	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %



Le velocità di emissione e la velocità del vento sono bassi

innalzamento; sorgente è alta, ha + possibilità di diluizione

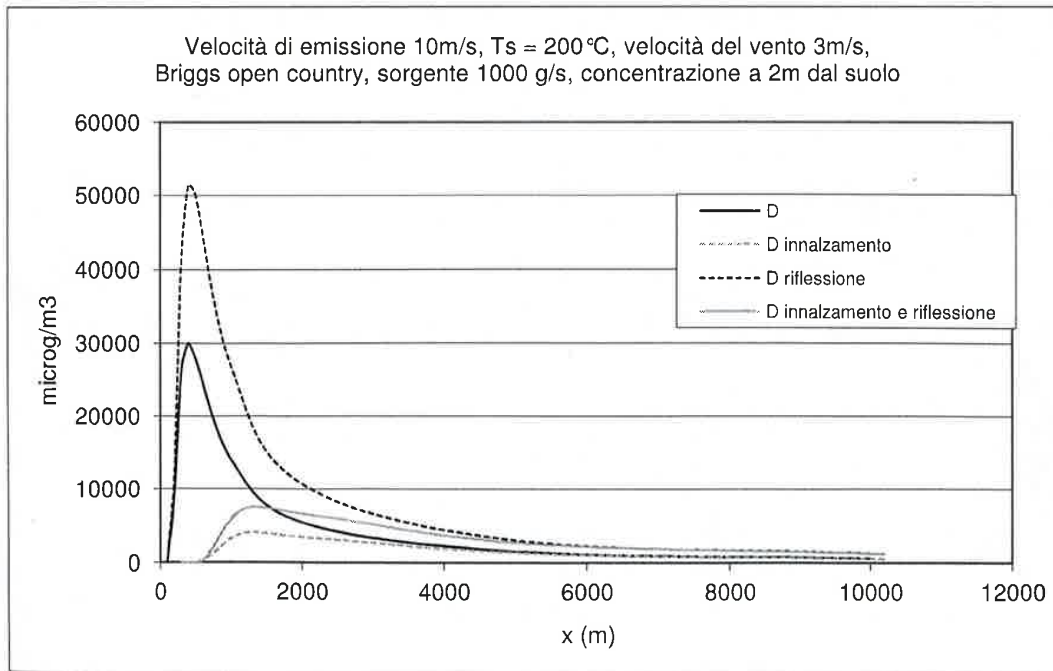


TABLE 4-1 (continued)

ρ_G = density of air, g/cm³

D_a = diffusivity of constituent in air, cm²/s

d_e = effective diameter of impoundment = $\left(\frac{4A}{\pi}\right)^{0.5}$, m

A = area of impoundment, m².

Liquid phase

Mackay and Yeun⁶ (for $F/D < 14$ and $U_{10} > 3.25$ m/s):

$$k_L = 1.0 \times 10^{-6} + 34.1 \times 10^{-4} U^* Sc_L^{-0.5} (U^* > 0.3) \text{ (m/s)}$$

$$k_L = 1.0 \times 10^{-6} + 144 \times 10^{-4} U^{*2.2} Sc_L^{-0.5} (U^* < 0.3) \text{ (m/s)}$$

where

$$U^* = \text{friction velocity (m/s)} = 0.01 U_{10} (6.1 + 0.03 U_{10})^{0.5}$$

U_{10} = windspeed at 10 m above the liquid surface, m/s

$$Sc_L = \text{Schmidt number on liquid side} = \frac{\mu_L}{\rho_L D_w}$$

μ_L = viscosity of water, g/cm·s

ρ_L = density of water, g/cm³

D_w = diffusivity of constituent in water, cm²/s.