

# **CAPÍTOL 4: DISPERSIÓ D'UN NÚVOL TÒXIC**

Com ja s'ha exposat, la ràpida evolució tecnològica de la indústria química ha provocat l'aparició de nous riscos que poden originar accidents greus, amb un fort impacte sobre la població i sobre l'entorn. Molts d'aquests accidents, en la indústria química, produeixen efectes perjudicials per les substàncies químiques emmagatzemades, ja que en la majoria de casos aquestes substàncies són perilloses per a la salut i pel medi ambient. Quan són susceptibles de formar núvols tòxics de gas és important conèixer la seva evolució.

En l'anàlisi de l'estimació de les conseqüències de les emissions accidentals a l'atmosfera de contaminants procedents d'activitat industrials, un aspecte clau és la seva dispersió en el medi ambient. Així que el coneixement de la seva evolució ha de servir per poder calcular, de forma acurada, els efectes i les conseqüències d'un núvol tòxic produït pels gasos de combustió generats per un incendi, en el cas d'aquest estudi.

A continuació s'explica la dispersió d'un núvol de gas; i s'assenyala la relació que té, amb les diferents variables meteorològiques.

## **4.1. La dispersió d'un núvol de gas**

El terme *dispersió* és utilitzat en la modelització d'accidents per descriure l'evolució d'un núvol de gas tòxic o inflamable en l'atmosfera. La dispersió d'un núvol de gas segueix una difusió, o transport de la seva massa, produïda pel moviment molecular de l'aire. El núvol es va diluint a mesura que la seva concentració disminueix degut a l'entrada de noves molècules d'aire dins d'ell. La dispersió inclou el desplaçament de la massa en la direcció del vent, tant verticalment com horitzontalment.

#### 4.1.1. Variables meteorològiques que afecten a la dispersió

Les diferents variables meteorològiques afecten en major o menor grau a la dispersió atmosfèrica de contaminants. Així doncs, la velocitat i la direcció del vent, junt amb l'estabilitat atmosfèrica, condicionen especialment la dispersió de núvols de gas; la temperatura i la humitat relativa tenen efectes menors, mentre que la inversió tèrmica només influeix en casos concrets.

Totes les variables meteorològiques presenten una gran variabilitat estacional i diària. Per possibilitar la modelització de la dispersió de manera representativa, se solen prendre valors mitjos específics de l'àrea de l'estudi.

A continuació es descriuen les variables meteorològiques principals que afecten a la dispersió de núvols contaminants, i la manera en com hi influeixen.

#### (a) El vent

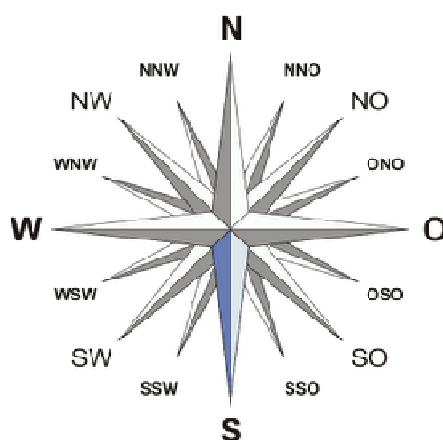
El vent té un efecte d'arrossegament que provoca la dispersió de núvols pel desplaçament de la massa de gas.

El vent influeix també, en l'estabilitat atmosfèrica, que és l'altre variable principal de la dispersió de gasos.

La informació sobre el vent d'una determinada zona geogràfica es reuneix en la denominada "*rosa dels vents*", que és una representació gràfica de la freqüència d'aquests segons la seva direcció i velocitat. Les direccions se solen donar en 8 o 16 seccions de 45° o 22,5° respectivament, denominades segons les direccions cardinals.

**Taula 5.** Seccions de les direccions cardinals.

1.	N	9.	NNE
2.	S	10.	ENE
3.	E	11.	ESE
4.	O	12.	SSE
5.	NE	13.	SSO
6.	SE	14.	OSO
7.	NO	15.	ONO
8.	SO	16.	NNO

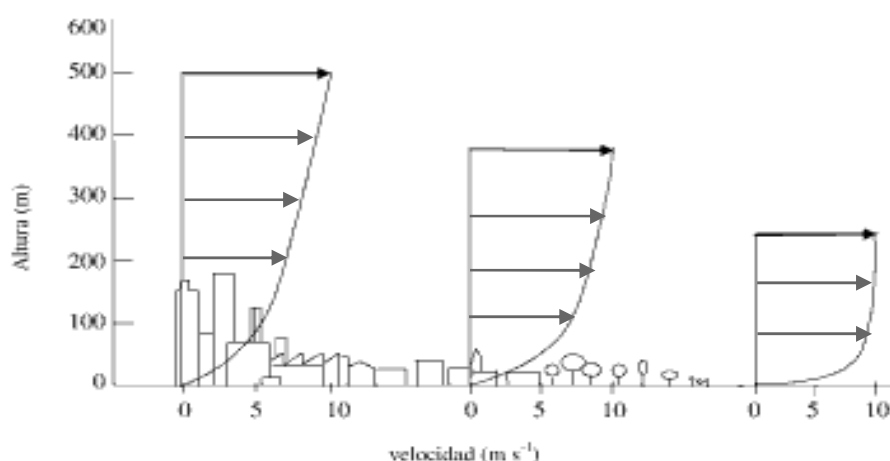


**Figura 5.** Rosa dels vents.

Aquestes direccions indiquen d'on prové el vent; per exemple, un vent del nord (N) bufa de nord a sud.

Així doncs, les dades necessàries per a l'estudi dels efectes i conseqüències en la dispersió del núvol de gas tòxic són, la velocitat mitjana del vent i la direcció del vent més freqüent durant l'any en la zona de l'estudi. Aquestes dades les facilita El Servei Meteorològic de Catalunya.

Les dades del vent es prenen a una determinada alçada, ja que varien en funció de l'alçada, segons l'estabilitat atmosfèrica i la rugositat del terreny.



**Figura 6.** Variació de la velocitat del vent segons l'alçada.

Generalment la velocitat registrada pels Serveis meteorològics es refereix a una alçada de 10m. Aquest és el valor que se sol utilitzar en els models de dispersió. La utilització d'aquest valor es basa en que les fugues accidentals dels gasos susceptibles de formar núvols tòxics o inflamables es produeixen a ran de terra; per tant, per tant, per la modelització d'accidents es necessiten dades relatives a aquesta situació.

Generalment la velocitat registrada pels Serveis meteorològics es refereix a una alçada de 10m. Aquest és el valor que se sol utilitzar en els models de dispersió. La utilització d'aquest valor es basa en que les fugues accidentals dels gasos susceptibles de formar núvols tòxics o inflamables es produeixen a ran de terra; per tant, per tant, per la modelització d'accidents es necessiten dades relatives a aquesta situació.

### **(b) L'estabilitat atmosfèrica**

L'estabilitat atmosfèrica és una variable que s'estableix per a definir la capacitat que l'atmosfera té per a dispersar un contaminant; en realitat el que representa és el grau de turbulència existent en un moment determinat. Així doncs, és una estimació de l'estat de l'atmosfera, que no es pot mesurar directament com la velocitat del vent, la temperatura, per exemple; ja que no és quantificable. S'ha establert una classificació segons el tipus d'estabilitat, que es defineix a la taula següent.

**Taula 6.** Definició del tipus d'estabilitat.

Classe d'estabilitat	Definició
A	Molt inestable
B	Inestable
C	Lleugerament inestable
D	Neutra
E	Lleugerament estable
F	Estable

Existeixen diferents mètodes per estimar la classe d'estabilitat a partir de variables atmosfèriques meteorològiques tradicionals, que s'explicaran breument tenir-ne el coneixement.

- Segons el gradient vertical de temperatura (taula 7);
- Segons les fluctuacions de la direcció del vent (taula 8);
- Segons la radiació solar i la direcció del vent (taula 9).

**Taula 7.** Classe d'estabilitat atmosfèrica segons el gradient tèrmic vertical.

Classe estabilitat	Gradient vertical de temperatura (°C/100m)
A	menys de -1.9
B	de -1.9 a -1.7
C	de -1.7 a -1.5
D	de -1.5 a -0.5
E	de -0.5 a 1.5
F	més de 1.5

**Taula 8.** Classe d'estabilitat atmosfèrica segons la variació de la direcció del vent.

Classe estabilitat	Variació horitzontal de la direcció del vent (°)
A	25,0
B	20,0

C	15,0
D	10,0
E	5,0
F	2,5

**Taula 9.** Classe d'estabilitat atmosfèrica segons la velocitat del vent i la radiació solar.

Velocitat del vent a la superfície $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ (nudos)	Dia			Nit	
	Nivell de radiació solar			Cobertura del cel	
	Elevat	Moderat	Baix	Més del 50%	Menys del 50%
<2 (4)	A	A-B	B	E	F
2-3 (4-7)	A-A	B	C	E	F
3-5 (7-11)	B	B-C	C	D	E
5-6 (11-13)	C	C-D	D	D	D
>6 (13)	C	D	D	D	D

Per poder comprendre millor aquest concepte, es fa una breu explicació acompanyada d'un exemple.

Durant el dia, la temperatura de l'aire disminueix amb l'alçada. Així, si una massa d'aire s'eleva verticalment es refreda de manera adiabàtica per efecte de la disminució de pressió. Aquest comportament de l'aire provoca que l'aire calent, de menor densitat, tingui la tendència d'eleva-se i el fred de baixar, produint-se una mescla en sentit vertical.

Doncs, bé, una condició atmosfèrica inestable, estabilitat de classe B, es caracteritza per l'existència d'un moviment important de massa d'aire, un gradient de temperatura vertical negatiu (la temperatura disminueix amb l'alçada), variacions freqüents en la direcció del vent, una forta insolació, etc. Un exemple de inestabilitat atmosfèrica seria un dia d'estiu molt solejat, on la radiació solar calenta la superfície de la Terra i aquesta les capes baixes de l'atmosfera, el que genera corrents tèrmiques, que són les corrents verticals d'aire; per tant, existeix una elevada turbulència a ran de terra.

En canvi, una condició atmosfèrica estable, estabilitat de classe F, es caracteritza per l'absència de turbulència, un gradient de temperatura positiu (inversió tèrmica), variacions mínimes en la direcció del vent, un nivell baix d'insolació, etc. En aquest cas, un exemple d'estabilitat atmosfèrica seria una nit clara d'estiu, on la Terra es refreda ràpidament per radiació amb l'espai exterior i produeix un refredament de les capes baixes de l'atmosfera; el que genera lleugeres brises d'aire de comportament horitzontal que no produeixen turbulències.

### **(c) La temperatura i la humitat relativa**

La temperatura i la humitat relativa tenen, també, un efecte significatiu, tot i que menor que el vent i l'estabilitat atmosfèrica, en la dispersió dels núvols de gas.

La humitat de l'aire només té efectes significatius sobre la dispersió d'un contaminant si el producte reacciona amb el vapor d'aigua de l'atmosfera. La humitat té també un altre efecte significatiu si el gas que es dispersa està a una temperatura inferior que la temperatura ambient. Es quan, la humitat afecta al balanç energètic de les masses de gas i aire implicades en la dispersió, i això provoca problemes de condensació de vapor d'aigua.

### **(d) La inversió tèrmica**

La inversió tèrmica es caracteritza per un augment irregular de temperatura a les capes altes atmosfèriques; és a dir, que a una certa alçada, aproximadament de 100m, la temperatura és superior a la de les capes d'aire de més a baix.

Des del punt de vista de la dispersió de gasos, aquest és un efecte que impedeix la dispersió cap amunt, i provoca la seva deliberació a les capes baixes atmosfèriques. Tot i així, en els casos de curta durada a ran de terra, la inversió tèrmica és un efecte que generalment no arriba a influir en la dispersió del contaminant.

#### *4.1.2. Emissió atmosfèrica*

#### **Què és una emissió atmosfèrica?**

Una emissió atmosfèrica és la descàrrega a l'aire d'una substància o element en estat sòlid, líquid o gasós, o en alguna combinació d'aquests, provinent d'una font fixa o mòbil.

Tota descàrrega o emissió de contaminants a l'atmosfera només podrà efectuar-se dins dels límits permissibles i en les condicions senyalades per la llei i els reglaments.

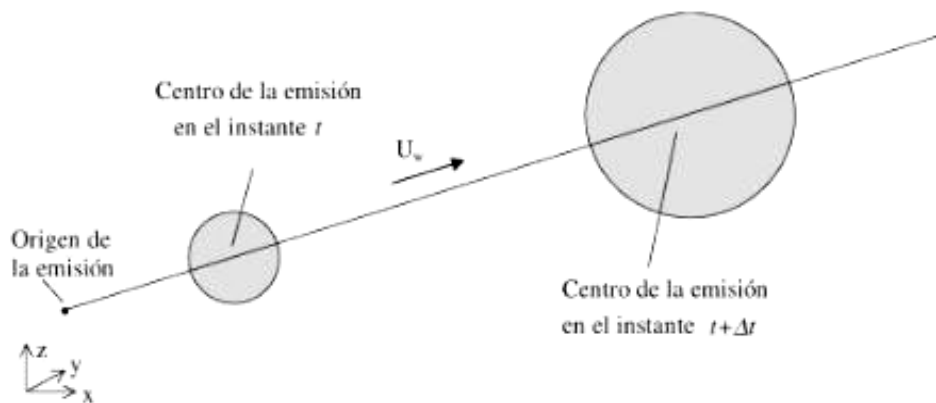
#### **Tipus d'emissió atmosfèrica**

Segons el temps de fuga dels productes, les emissions poden classificar-se en emissió instantània o emissió contínua.

Els dos tipus d'emissió s'expliquen seguidament, per tal de conèixer què les caracteritza, i es mostra una representació gràfica per a cadascuna.

- Emissió instantània:

Aquest tipus d'emissió es dona quan el temps necessari per a què el núvol arribi a un punt determinat és major que el temps de descàrrega del producte. Produeix un núvol que es va dispersant amb el temps. La seva representació gràfica, figura 7, pot assimilar-se a un núvol gairebé esfèric que es dispersa traslladant el seu centre d'emissió en la direcció del vent.

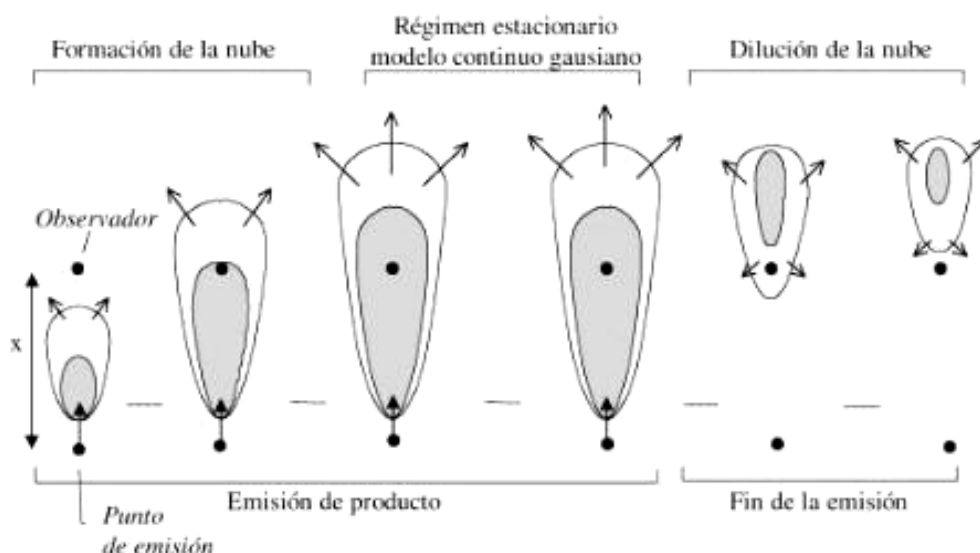


**Figura 7.** Representació gràfica de la evolució d'un núvol de gas procedent d'una fuga instantània.

Un exemple, per aquest tipus d'emissió, podria ser l'explosió d'un recipient que conté gas a pressió.

- Emissió contínua:

Es dona quan el temps d'emissió és major que el temps necessari per a què el núvol arribi a un punt determinat. Produeix un núvol en forma allargada que arriba a un règim estacionari durant un cert temps, quan la quantitat de gas subministrada a l'interior del núvol des del punt de fuga és igual a la massa de contaminant en l'ambient, i finalment es dispersa el núvol, tal i com es representa a la següent figura.



**Figura 8.** Representació gràfica de la evolució d'un núvol tòxic procedent d'una fuga contínua.

Un exemple d'aquest altre tipus d'emissió, podria ser el plomall d'una xemeneia, o l'emissió de gasos d'un incendi.

Cal a dir, que a efectes pràctics, aquesta classificació és relativament artificial i subjectiva, ja que, en realitat, la majoria d'emissions presenten un estat intermedi donat que el temps de fuga és finit, assumint un estat estacionari durant un cert temps i dispersant-se finalment. A més, hi ha altres aspectes que dificulten encara més aquesta distinció, com ara la disminució del cabal i concentració de la fuga: mentre que per un observador proper al punt de fuga, l'emissió pot ser contínua, per un observador més allunyat, pot ser considerada instantània.

## 4.2. Models de vulnerabilitat

L'anàlisi de conseqüències d'accidents majors es pot realitzar mitjançant models de càlcul que intenten preveure què succeirà davant d'un determinat accident. Així, s'ha ideat models de simulació d'escapaments de substàncies tòxiques e inflamables, models de dispersió d'aquestes substàncies i models d'explosions e incendis que proporcionen les dades necessàries per avaluar els danys a persones i edificis a través dels anomenats models de vulnerabilitat.

### 4.2.1. *Mètode Probit*

Una vegada coneguts els efectes d'un accident, com l'emissió dels gasos de combustió tòxics generats per l'incendi del magatzem de productes tòxics, s'ha de conèixer les seves conseqüències. S'ha de realitzar una estimació del que tindrà a lloc quan aquests efectes actuïn sobre les persones, el medi ambient, sobre els edificis o les instal·lacions, etc.

Per a realitzar una estimació de les conseqüències es requereix una funció que relacioni la magnitud d'impacte amb el grau de dany causat pel mateix. Significa que s'ha d'establir una relació entre la dosis i la resposta.

El mètode de vulnerabilitat més utilitzat és el de l'anàlisi pròbit, que és un mètode estadístic que dona una relació entre la funció de probabilitat i la variable probit, una determinada càrrega d'exposició a un risc.

Aquest, és un model de dispersió, amb el que es calculen les concentracions que podrien tenir lloc dels materials tòxics, per a un període de temps determinat, igual a la duració de l'exposició de la gent en l'àrea, en funció d'un tant per cent de mortalitat

El valor de pròbit (Pr) és una mesura del percentatge de la població vulnerable sotmesa a un fenomen perjudicial d'exposició d'una determinada intensitat, que rep un dany determinat.

Normalment la probabilitat (que varia de 0 a 1) és substituïda per un percentatge (de 0 a 100), més pràctic en els anàlisis de risc. La relació entre percentatge de la població exposada que es veurà afectada a un determinat nivell de lesions o el percentatge per mort a causa d'un fenomen perjudicial d'exposició i pròbit es pot veure a la taula següent:



**Taula 10.** Relació entre pròbit i percentatge.

%	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0		2,67	2,95	3,12	3,25	3,36	3,45	3,52	3,59	3,66
10	3,72	3,77	3,82	3,87	3,97	3,96	4,01	4,05	4,08	4,12
20	4,16	4,19	4,23	4,26	4,29	4,33	4,36	4,39	4,42	4,45
30	4,48	4,50	4,53	4,56	4,59	4,61	4,64	4,67	4,69	4,72
40	4,75	4,77	4,80	4,82	4,85	4,87	4,90	4,92	4,95	4,97
50	5,00	5,03	5,05	5,08	5,10	5,13	5,15	5,18	5,20	5,23
60	5,25	5,28	5,31	5,33	5,36	5,39	5,41	5,44	5,47	5,50
70	5,52	5,55	5,58	5,61	5,64	5,67	5,71	5,74	5,77	5,81
80	5,84	5,88	5,92	5,95	5,99	6,04	6,08	6,13	6,18	6,23
90	6,28	6,34	6,41	6,48	6,55	6,64	6,75	6,88	7,05	7,33
-	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
99	7,33	7,37	7,41	7,46	7,51	7,58	7,65	7,75	7,88	8,09

L'expressió que se sol utilitzar en aquest anàlisi pròbit es basa en una funció matemàtica lineal de caràcter empíric extreta d'estudis experimentals, i es la següent.

$$Pr = A + B \cdot \ln V \quad (2)$$

On:

Pr = "Pròbit" o funció de probabilitat de danys sobre la població sotmesa.

A = constant pròbit, dependent del tipus de lesió i tipus de fenomen perjudicial d'exposició.

B = constant pròbit del tipus de fenomen perjudicial d'exposició.

V = variable que representa el fenomen perjudicial d'exposició que causa danys.

Aquest mètode d'anàlisi pròbit es pot emprar per a determinar el percentatge de persones afectades per intoxicació, per radiació tèrmica o per sobrepressió.

En el nostre estudi s'empra el mètode Pròbit de vulnerabilitat a la inhalació de substàncies tòxiques, ja que el fenomen perjudicial d'exposició al que està sotmesa la població, es refereix a una certa concentració tòxica en un cert període de temps en una certa àrea geogràfica.

Per tant, la variable V de l'expressió (2) estarà formada per la combinació de dues variables, concentració i temps.

Així doncs, l'anàlisi pròbit calcula els efectes letals en éssers humans exposats a la inhalació a través d'una determinada concentració durant un cert període de temps. El model va ser desenvolupat en l'assignació dels Països Baixos per la Comissió per a la Prevenció d'accidents greus.

L'equació de l'anàlisi probit amb el que basarem els càlculs queda de la següent manera:

$$Pr = A + B \cdot \ln(C^N \cdot t) \quad (3)$$

On:

$Pr$  = "Pròbit" o funció de probabilitat de danys sobre la població sotmesa.

$A$  = constant pròbit, dependent del tipus de lesió i tipus de fenomen perjudicial d'exposició.

$B$  = constant pròbit del tipus de fenomen perjudicial d'exposició, fixada o predeterminada amb el valor 1.

$N$  = constant de pròbit, fixada o predeterminada amb el valor 2.

$C$  = concentració del producte químic en  $\text{mg}/\text{m}^3$ .

$t$  = temps d'exposició en minuts.

Les constants  $A$ ,  $B$  i  $N$  es determinen experimentalment a partir de la informació procedent d'accidents ja passats o, en determinats casos, a partir de l'experimentació amb animals.

La finalitat de l'anàlisi pròbit en aquest estudi és la de conèixer la concentració letal de cadascun dels quatre productes tòxics involucrats en l'incendi del magatzem de productes tòxics, per a diferents percentatges de població afectada, segons el temps d'exposició, que com s'ha repetit al llarg del projecte, aquest serà de 30 minuts i de 60 minuts.

