

Estratègia de mostreig d'agents químics a l'aire

Emilio Castejón Vilella
Xavier Guardino Solà

PID_00186763



Els textos i imatges publicats en aquesta obra estan subjectes –llevat que s'indiqui el contrari– a una llicència de Reconeixement-NoComercial-SenseObraDerivada (BY-NC-ND) v.3.0 Espanya de Creative Commons. Podeu copiar-los, distribuir-los i transmetre'ls públicament sempre que en citeu l'autor i la font (FUOC. Fundació per a la Universitat Oberta de Catalunya), no en feu un ús comercial i no en feu obra derivada. La llicència completa es pot consultar a <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/es/legalcode.ca>

Índex

Introducció.....	5
Objectius.....	7
1. Variabilitat de les concentracions ambientals.....	9
2. La distribució log-normal.....	11
2.1. Paràmetres bàsics	13
2.2. Estimació dels paràmetres d'una distribució log-normal	15
2.2.1. Estimació de la mitjana	15
2.2.2. Estimació de l'interval de confiança de la mitjana	17
2.2.3. Estimació del percentatge de mostres que superaran el valor límit	18
2.2.4. Estimació de l'interval de confiança del percentatge de mostres que superaran el valor límit	20
3. Estratègies de mostreig.....	23
3.1. Estratègia del NIOSH (1977)	24
3.2. Norma UNE 689 (1995)	28
3.2.1. Avaluació de l'exposició	28
3.2.2. Conclusions sobre l'avaluació	30
3.2.3. Propostes per a l'avaluació de les exposicions	32
3.3. Guia tècnica de l'INSHT (2003)	38
3.4. Proposta BOHS 2011	38
3.4.1. Primer capítol: "Conducting a survey for exposure evaluation"	39
3.4.2. Segon capítol: "The problem of variability"	39
3.4.3. Tercer capítol: "Recommended method of measuring compliance"	39
3.4.4. Quart capítol: "Shortcuts and their limitations"	41
3.4.5. Apèndix: "Calculations for the group and individual compliance tests"	41
3.5. Metodologies basades en el teorema de Bayes	42
Resum.....	44
Exercicis d'autoavaluació.....	45
Solucionari.....	47
Bibliografia.....	48

Avaluació de la qualitat de l'ajust d'una sèrie de dades a una llei log-normal.....	50
--	-----------

Introducció

En revisar els resultats d'un conjunt de mostres ambientals preses en un lloc de treball en diferents períodes de temps, l'experiència ens diu que els valors de la concentració ambiental que s'obtenen no sols no són coincidents sinó que, sovint, una petita part difereix notablement de la resta, que es troben agrupats en un interval relativament estret. L'experiència també ensenya que aquestes variacions de caràcter aleatori s'ajusten a patrons estadístics definits i, per tant, són susceptibles d'un estudi sistematitzat que permet obtenir avaluacions quantitatives basades en el tractament estadístic dels resultats obtinguts en les mesures ambientals. La distribució més acceptada generalment per a descriure aquest tipus de variacions és la **logarítmica normal** (log-normal), distribució en la qual el paràmetre que es "distribueix normalment" és el logaritme de les concentracions ambientals. En la primera part d'aquest mòdul repassarem els aspectes relacionats amb aquest plantejament.

Tenint en compte aquesta situació, al llarg del temps han anat apareixent diferents propostes d'estratègia per a abordar, amb criteris estadístics solvents, els càlculs necessaris per a obtenir resultats fiables en l'avaluació de l'exposició a agents químics, per inhalació, partint de mesures de la concentració ambiental, i tenint resposta a qüestions com el temps de durada de les mesures, el nombre de mesures, la ubicació, el nombre de treballadors que cal mostrejar o el nombre de jornades. També hem de tenir en compte que les eines de càlcul disponibles no són les mateixes en l'actualitat que quan es va abordar el problema per primera vegada, la qual cosa justifica dur a terme un repàs breu de les diferents iniciatives seguides al llarg del temps.

La qüestió següent que cal plantejar és que, atès que l'avaluació del risc per inhalació es duu a terme per comparació de la concentració en aire amb el valor límit ambiental de l'agent en qüestió, tal com estableixen la majoria de valors límits, i concretament els límits d'exposició professionals (LEP), aplicats habitualment al nostre país, la confirmació que no se supera el valor límit en cap jornada de treball exigiria dur a terme mesures de manera continuada. Així mateix, per a arribar a la conclusió que la probabilitat que en una jornada se superi el valor límit és petita cal mostrejar durant força jornades.

Aquest procediment és irrealitzable a la pràctica, i per això es recorre a models estadístics per a determinar la probabilitat de superar el valor límit en qualsevol jornada de treball, i s'admet que no se superarà aquest valor si aquesta probabilitat és molt petita. També es consideren "dreceres" que permeten obtenir conclusions fiables sense fer un nombre important de mesures, com, per exemple, fer-los en les condicions més desfavorables, ja que si en aquestes condicions es respecten els valors límit, és possible obtenir conclusions globals. O bé, si la feina és repetitiva i els factors que intervenen en la generació de les

concentracions ambientals no experimenten gran variació dia a dia, aplicant un sistema simplificat o basant-nos en l'experiència i el criteri professional del tècnic podem obtenir una conclusió amb dades de poques jornades.

Al llarg del mòdul revisarem, doncs, aquestes qüestions i exposarem de manera resumida les iniciatives que cal considerar sobre aquest camp: la metodologia del NIOSH de 1977, la norma UNE-EN 689 de 1996, les metodologies basades en el teorema de Bayes i la proposta BOHS (British Occupational Hygiene Society) del 2011, òbviament la iniciativa més actualitzada sobre el tema. Pel que fa a la Guia tècnica de l'Institut Nacional de Seguretat i Higiene en el Treball (INSHT) del 2003, no hi aprofundirem perquè es troba en període de revisió en el moment de redactar aquest mòdul.

Objectius

Amb l'estudi d'aquest mòdul es persegueixen els objectius següents:

1. Conèixer la mecànica del procés d'avaluació complexa de l'exposició.
2. Identificar els aspectes més bàsics que cal considerar en l'estratègia de mostreig.
3. Ser capaços de dissenyar una sèrie de mesures per obtenir un resultat fiable.
4. Aprendre els procediments matemàtics bàsics per al tractament de les dades i comparació amb els criteris de valoració.
5. Ser capaços d'obtenir conclusions raonades sobre el risc per exposició a l'agent químic.
6. Aplicar els coneixements adquirits a la resolució de situacions pràctiques sobre l'estratègia de mostreig i la valoració de l'exposició a agents químics per comparació als valors límit.

1. Variabilitat de les concentracions ambientals

L'experiència ensenya que quan, en diferents períodes de temps, es prenen diverses mostres ambientals en un lloc de treball determinat, els resultats de la concentració ambiental que s'obtenen no solament no són coincidents sinó que, sovint, alguns difereixen notablement de la resta, que es troben agrupats en un interval relativament estret.

Aquest fet era ja ben conegut pels primers higienistes industrials nord-americans, que entre les dècades de 1920 i 1960 prenen grans quantitats de mostres amb l'objectiu de caracteritzar amb detall les exposicions a les quals estaven sotmesos els treballadors.

Aquestes variacions podrien tenir l'origen en la variabilitat inherent als processos de presa de mostra i anàlisi (**variacions instrumentals**), però l'estudi del problema va posar de manifest ja fa anys que aquesta variabilitat no justificava més que en una mínima proporció les diferències oposades, i per tant aquestes s'havien d'atribuir en la seva major part a les variacions de la concentració ambiental causades per modificacions aleatòries no observables de factors determinats (corrents d'aire, canvis en la manera de fer la tasca, etc.). Les **variacions aleatòries** de la concentració ambiental són molt més importants que les causades per les variacions instrumentals.

Leidel assenyala també que:

"Les variacions aleatòries de la concentració ambiental poden ser molt superiors a les variacions aleatòries de la major part dels procediments de mostreig i anàlisi (sovint per factors de 10 a 20)."

N. A. Leidel; K. A. Busch; J. R. Lynch (1977), "Occupational exposure sampling strategy manual", *DHEW (NIOSH) Publication* (núm. 77-173).

L'experiència també ensenya que aquestes variacions de caràcter aleatori s'ajusten a patrons estadístics definits i, per tant, són susceptibles d'un estudi sistematitzat que permet obtenir avaluacions quantitatives basades en el tractament estadístic dels resultats obtinguts en les mesures ambientals.

Aquests patrons ja van ser identificats per Oldham, el qual va constatar que els resultats de les mesures de pols posaven de manifest que:

"[...] la freqüència relativa dels logaritmes dels nivells individuals de pols sembla ser governada per la llei normal."

P. Oldham (1953), "The nature of the variability of dust concentrations at the coal face". *Br. J. Ind. Med.* (núm. 10).

Quan el logaritme d'una variable aleatòria (en el nostre cas, la concentració ambiental) es distribueix segons una llei normal, es diu que aquesta variable es distribueix segons una **llei logarítmica normal** o **log-normal**. Així, doncs, la distribució log-normal de les concentracions té sempre associada una distribució normal, que és la que segueixen els seus logaritmes.

Vegeu també

L'estudi de la llei logarítmica normal s'estudia amb detall en l'apartat "La distribució log-normal" d'aquest mòdul didàctic.

La llei log-normal

A la naturalesa són freqüents els fenòmens aleatoris la distribució de probabilitat dels quals s'ajusta a una llei log-normal.

Com a exemples es poden esmentar la distribució dels elements i la seva radioactivitat en l'escorça terrestre, els períodes de latència de les malalties infeccioses, el contingut de microorganismes i d'altres contaminants en l'atmosfera, el nombre de lletres per paraula i de paraules per frase, i molts altres. També hi ha exemples en el món de les finances.

En general, els fenòmens que s'ajusten a la **llei log-normal** són aquells en els quals influeixen múltiples variables de **manera multiplicativa**, mentre que els que segueixen la **llei normal** són fenòmens en els quals influeixen múltiples variables de **manera additiva**.

2. La distribució log-normal

Donada una variable aleatòria x , quan el seu logaritme neperià y [$y = \ln(x)$] es distribueix segons una llei normal, per definició es compleix:

$$f_y(y; \mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(y-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (1)$$

en què $f_y(y; \mu, \sigma)$ és la densitat de probabilitat de la funció y , i μ i σ són, respectivament, la mitjana i la desviació estàndard de y , és a dir, dels **logaritmes** dels valors de la variable x .

En aquest cas, es pot demostrar fàcilment que la variable x s'ajusta a una llei de probabilitat la densitat de probabilitat de la qual és determinada per l'expressió:

$$f_x(x; \mu, \sigma) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (2)$$

que és l'expressió matemàtica de la densitat de probabilitat de la llei log-normal.

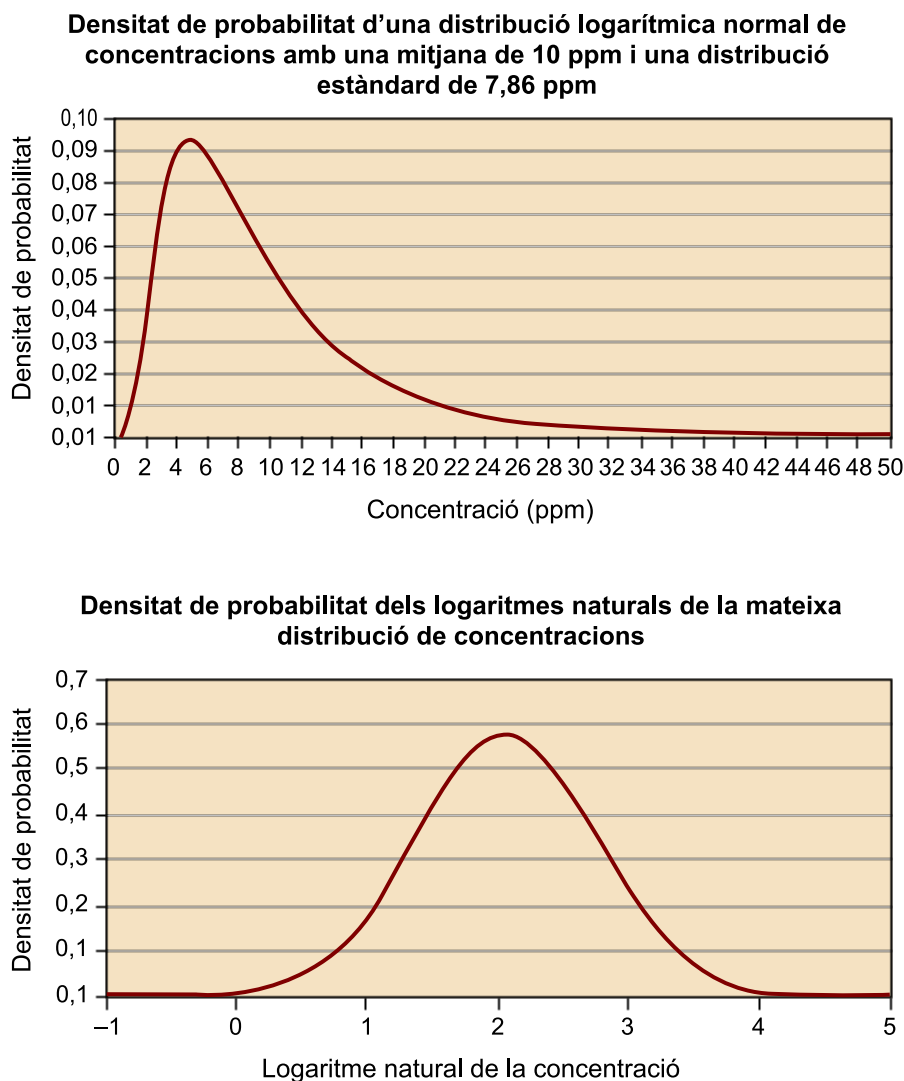
Observeu que la distribució log-normal només està definida per a $x > 0$, ja que la funció logarítmica no està definida per a valors negatius de la variable. Observeu, també, la similitud d'ambdues expressions, ja que la segona és igual a la primera dividida per x .

En la figura 1 es compara la corba de densitat de probabilitat d'una distribució de concentracions de mitjana 10 ppm i desviació estàndard 7,86 ppm (que segueixen una llei log-normal) amb la dels logaritmes naturals d'aquestes concentracions, que segueixen una llei normal de mitjana 2,062 i desviació estàndard 0,694. Els valors dels paràmetres d'una distribució i de l'altra estan relacionats mitjançant les fórmules que veurem més endavant.

Densitat de probabilitat

La densitat de probabilitat d'una variable aleatòria és una funció tal que la seva integral entre dos valors a i b de la variable val la probabilitat que els valors de la variable es trobin entre a i b . És, doncs, la derivada de la funció de probabilitat acumulada.

Figura 1. Comparació de les distribucions de densitat de probabilitat dels valors de la concentració ambiental i dels seus logaritmes naturals



Com s'observa en la figura 1, la llei logarítmica normal només està definida per a valors positius de la concentració, la qual cosa reflecteix el fet físic que la concentració ambiental **no pot** ser negativa.

Encara que la constatació experimental que els resultats de les mesures de la concentració ambiental es distribueixen “generalment” segons una llei log-normal, això no es pot considerar una veritat absoluta. Per això, és una pràctica prudent verificar en cada aplicació concreta que la hipòtesi que els resultats obtinguts es distribueixen log-normalment és acceptable, fent servir el mètode de verificació de l'ajust que es descriu en l'annex o un altre dels que es troben en els manuals d'estadística.

2.1. Paràmetres bàsics

Els paràmetres descriptius de la distribució log-normal es poden calcular a partir de les expressions següents:

- Mitjana: $m = \exp\left(\mu + \frac{\sigma^2}{2}\right)$
- Desviació estàndard: $s = m \cdot (\exp(\sigma^2) - 1)^{1/2}$
- Moda: $s = m \cdot \exp(\mu - \sigma^2)$

exp[a]

L'expressió $\exp[a]$ significa e^a i s'utilitza per a facilitar la lectura.

en què μ i σ tenen el significat que ja hem vist anteriorment.

En la bibliografia sobre la distribució de les concentracions és habitual utilitzar també dos paràmetres addicionals:

- la **mitjana geomètrica** (m_g ; també identificada de vegades com a GM^1) i
- la **desviació estàndard geomètrica**, normalment representada com a GSD^2 .

⁽¹⁾ Acrònim de l'anglès *geometric mean*.

⁽²⁾ Acrònim de l'anglès *geometric standard deviation*.

La mitjana geomètrica, m_g , d'un conjunt de n valors $A_1 \dots A_n$ es defineix com a:

$$m_g = (A_1 \cdot A_2 \cdot \dots \cdot A_n)^{1/n}$$

ja que:

$$\ln(m_g) = (1/n)[\ln(A_1) + \ln(A_2) + \dots + \ln(A_n)] = \mu$$

el logaritme de la mitjana geomètrica és la mitjana aritmètica del conjunt dels logaritmes dels valors $A_1 \dots A_n$, és a dir, de μ . Després si $\ln(m_g) = \mu$, serà $m_g = e^\mu$.

La desviació estàndard geomètrica d'un conjunt de n valors $A_1 \dots A_n$ es defineix com a:

$$GSD = \exp\left(\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left(\ln \frac{A_i}{m_g}\right)^2}{n}}\right) = e^\sigma \quad (3)$$

És a dir, GSD és l'exponencial de la desviació estàndard dels logaritmes naturals de $A_1 \dots A_n$, la mitjana dels quals, com acabem de veure, és el logaritme de la mitjana geomètrica.

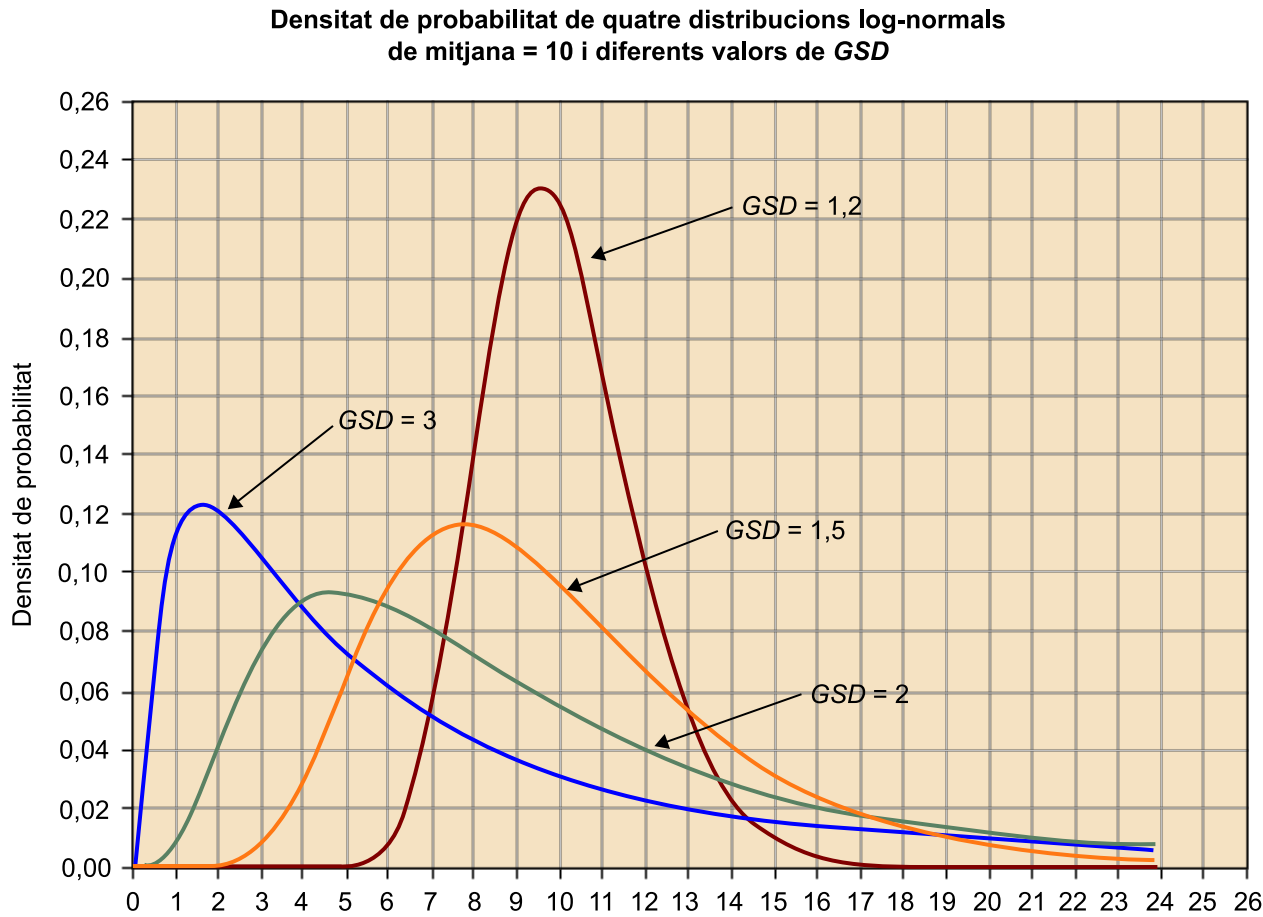
La desviació estàndard geomètrica és el paràmetre que se sol utilitzar per a mesurar la dispersió dels resultats. En el cas d'una distribució de dispersió nul·la (tots els resultats són iguals), s i σ valen zero (taula 1) i GSD val 1. Per a un valor mitjà determinat de la distribució de les concentracions, l'aspecte de la corba de densitat de probabilitat d'una distribució log-normal es va "aplatant" a mesura que creix GSD , tal com es mostra en la figura 2.

Taula 1. Fórmules per al càlcul dels paràmetres d'una de les distribucions de probabilitat a partir dels de l'altra

Paràmetres de la distribució de concentracions (lleï log-normal)	Paràmetres de la distribució dels logaritmes de les concentracions (lleï normal)
Mitjana: $m = \exp\left(\mu + \frac{\sigma^2}{2}\right)$	Mitjana: $\mu = \ln(m) - (\sigma^2)/2$
Desviació estàndard: $s = m \cdot (\exp(\sigma^2) - 1)^{1/2}$	Desviació estàndard: $\sigma = [\ln(1 + s^2/m^2)]^{1/2}$
Moda: $s = m \cdot \exp(\mu - \sigma^2)$	En una distribució normal la mitjana, la moda i la mitjana coincideixen.
Mitjana geomètrica: $m_g = e^\mu$	
Desviació estàndard geomètrica: $GSD = e^\sigma$	

μ = mitjana dels logaritmes naturals de les concentracions σ = desviació estàndard dels logaritmes naturals de les concentracions

Figura 2. Comparació de diverses distribucions log-normals de la mateixa mitjana i diferent dispersió



Les distribucions de concentració oposades a la pràctica acostumen a presentar valors de *GSD* entre 1,25 i 2,5. Valors de *GSD* superiors a 2 indiquen que el procés és molt poc estable, la qual cosa indica que està **mal controlat**. Això indica que s'haurien de sotmetre a revisió els mecanismes d'estabilitat (equips, procediments de treball, comportaments de les persones, etc.).

Els **límits de desviació** que s'indiquen en el document de valors límit que publica anualment l'INSHT per als agents químics que no tenen assignat un valor límit per a exposicions curtes (VLA-EC) s'estableixen de manera que, si la concentració mitjana diària és inferior o igual al valor límit VLA-ED, aquests límits de desviació tinguin una probabilitat molt baixa de ser superats si el valor de *GSD* és inferior a 2, és a dir, si el procés està ben controlat.

Els paràmetres de la llei normal que segueixen els logaritmes de les concentracions es poden calcular a partir dels paràmetres de la llei log-normal associada i viceversa. El conjunt de les fórmules necessàries per al càlcul dels paràmetres d'una de les lleis a partir dels de l'altra s'han recollit en la taula 1.

2.2. Estimació dels paràmetres d'una distribució log-normal

En higiene industrial els paràmetres més interessants de la distribució log-normal de les concentracions són el seu **valor mitjà**, el percentatge de mostres que superaran el valor límit i els respectius **interval de confiança**.

2.2.1. Estimació de la mitjana

Quan es prenen mostres ambientals, un dels paràmetres que és interessant determinar a partir dels resultats d'un nombre limitat de mostres és el **valor mitjà de la concentració ambiental**. Si es prenen n mostres de durada aproximadament igual en moments distribuïts aleatòriament en el temps, i la mitjana geomètrica dels resultats és m_g' i la seva desviació estàndard σ' , el valor més probable m^* de la concentració mitjana (és a dir, de la mitjana de la distribució log-normal que segueixen les concentracions) és determinat per l'expressió:

$$m^* = m_g' \cdot FI$$

en què FI val:

$$FI = 1 + \frac{(n-1)g}{n} + \frac{(n-1)^3 g^2}{n^2(n+1)2!} + \frac{(n-1)^5 g^3}{n^3(n+1)(n+3)3!} + \frac{(n-1)^7 g^4}{n^4(n+1)(n+3)(n+5)4!} + \dots \quad (4)$$

en què g és:

Nota

Si no es compleix la condició que la durada de les mostres sigui aproximadament la mateixa, la distribució no segueix la llei log-normal.

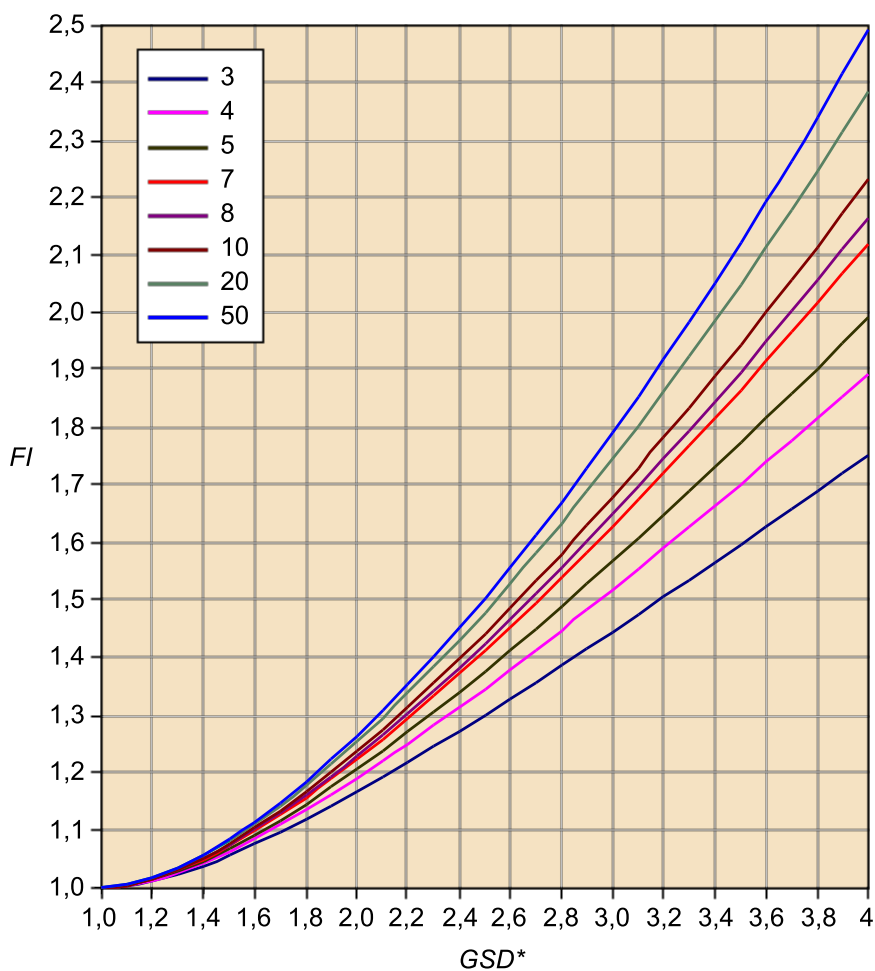
$$g = \frac{(\sigma^*)^2}{2} \quad (5)$$

En què σ^* és una estimació del valor de la desviació estàndard de la població, que es calcula mitjançant la fórmula següent:

$$\sigma^* = \sigma' \sqrt{\frac{n}{n-1}} \quad (6)$$

Per al càlcul de FI n'hi ha prou de fer servir els cinc primers termes de la sèrie, la qual cosa dóna un valor exacte fins al tercer decimal. El valor de FI es pot estimar amb prou aproximació a partir del valor més probable de la desviació estàndard geomètrica GSD^* i del nombre de mostres utilitzant el gràfic de la figura 3, tal com es mostra en l'exemple següent.

Figura 3. Valors de la funció FI



Exemple

Suposem que s'han pres sis mostres d'una hora els resultats de les quals han estat els següents, expressats en mg/m^3 : 1,63, 2,02, 2,04, 2,32, 4,28, 6,04. Per a estimar el valor més probable de la concentració mitjana amb la figura 3 hem de calcular prèviament el valor més probable de la desviació estàndard geomètrica, GSD^* .

Per a això, començarem calculant la mitjana geomètrica dels valors obtinguts:

$$m_g' = (1,63 \cdot 2,02 \cdot 2,04 \cdot 2,32 \cdot 4,28 \cdot 6,04)^{1/7} = 2,911$$

A continuació, calcularem la desviació estàndard, σ' , d'aquests valors mitjançant la fórmula habitual que es troba en els manuals d'estadística:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (m - x_i)^2}{n}} \quad (7)$$

Amb la fórmula anterior s'obté $\sigma' = 0,463$. Amb això ja podem calcular σ^* :

$$\sigma^* = \sigma' \sqrt{\frac{n}{n-1}} = 0,463 \sqrt{\frac{7}{6}} = 0,500 \quad (8)$$

i com que per definició és $GSD = e^{\sigma}$ tindrem:

$$GSD^* = e^{\sigma^*} = e^{0,5} = 1,649$$

Per a un valor de $GSD^* = 1,649$ i un nombre de mostres igual a 7, el gràfic de la figura 3 dóna per a FI un valor d'1,12 aproximadament, amb la qual cosa conclouríem que la millor estimació de la mitjana de la concentració val $1,12 \cdot 2,911 = 3,260 \text{ mg}/\text{m}^3$. Aquest és el valor més probable de la mitjana.

2.2.2. Estimació de l'interval de confiança de la mitjana

Ara bé, quin és el nostre marge d'error? Com en qualsevol procés d'inferència estadística tenim un cert grau d'incertesa respecte al valor estimat de la concentració mitjana. Per a quantificar aquest grau d'incertesa se sol recórrer al càlcul de l'anomenat *interval de confiança* de la variable el valor de la qual estimem.

L'**interval de confiança** és l'interval en el qual, amb una probabilitat coneguda (**nivell de confiança**), es troba el **vertader valor** de la variable.

Per a un nivell de confiança del 95%, l'extrem superior³ de l'interval de confiança de la mitjana de la distribució val:

$$L_{sup} = \exp \left[\mu + \frac{(\sigma^*)^2}{2} + \frac{C\sigma^*}{\sqrt{n-1}} \right] \quad (9)$$

En què μ' és la mitjana dels logaritmes de les concentracions oposades, σ^* té el significat ja comentat i C s'obté de la taula 2 segons el valor de σ^* i del nombre de mostres, n .

Desviació estàndard

La desviació estàndard, σ , d'un conjunt de n valors $x_1, x_2, \dots, x_n$, la mitjana de la qual és m és determinada per l'expressió:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (m - x_i)^2}{n}}$$

⁽³⁾En higiene industrial, l'extrem inferior manca d'interès.

Taula 2. Valors de C (Land, 1975) per a diferents valors de n i $\ln(GSD)$

ln(GSD)	Valors de n								
	3	4	5	7	8	10	20	40	60
0,01	2,415	2,054	1,918	1,807	1,779	1,745	1,689	1,666	1,659
0,1	2,750	2,222	2,035	1,886	1,849	1,802	1,725	1,691	1,680
0,2	3,295	2,463	2,198	1,992	1,943	1,881	1,776	1,728	1,712
0,3	4,109	2,777	2,402	2,125	2,058	1,977	1,838	1,775	1,753
0,4	5,220	3,175	2,651	2,282	2,195	2,089	1,922	1,832	1,803
0,5	6,495	3,658	2,947	2,465	2,354	2,220	1,999	1,898	1,862
0,6	7,807	4,209	3,287	2,673	2,534	2,368	2,097	1,974	1,930
0,7	9,120	4,801	3,662	2,904	2,735	2,532	2,205	2,058	2,007
0,8	10,430	5,414	4,062	3,155	2,952	2,710	2,324	2,151	2,090
0,9	11,740	6,038	4,478	3,420	3,184	2,902	2,451	2,251	2,181
1	13,050	6,669	4,905	3,698	3,426	3,103	2,586	2,357	2,277
1,25	16,330	8,265	6,001	4,426	4,068	3,639	2,952	2,648	2,542
1,5	19,600	9,874	7,120	5,184	4,741	4,207	3,347	2,966	2,832
1,75	22,870	11,490	8,250	5,960	5,432	4,795	3,763	3,303	3,142
2	26,140	13,110	9,387	6,747	6,131	5,396	4,193	3,654	3,465
2,5	32,690	16,350	11,670	8,339	7,563	6,621	5,079	4,384	4,139
3	39,230	19,600	13,970	9,945	9,006	7,864	5,988	5,138	4,838
3,5	45,770	22,850	16,270	11,560	10,460	9,118	6,910	5,907	5,552
4	52,310	26,110	18,580	13,180	11,920	10,38	7,841	6,685	6,276

Exemple

Si agafem les dades de l'exemple anterior, tenim:

$$\mu' = 1,07$$

$$\sigma^* = \ln(GSD) = 0,500$$

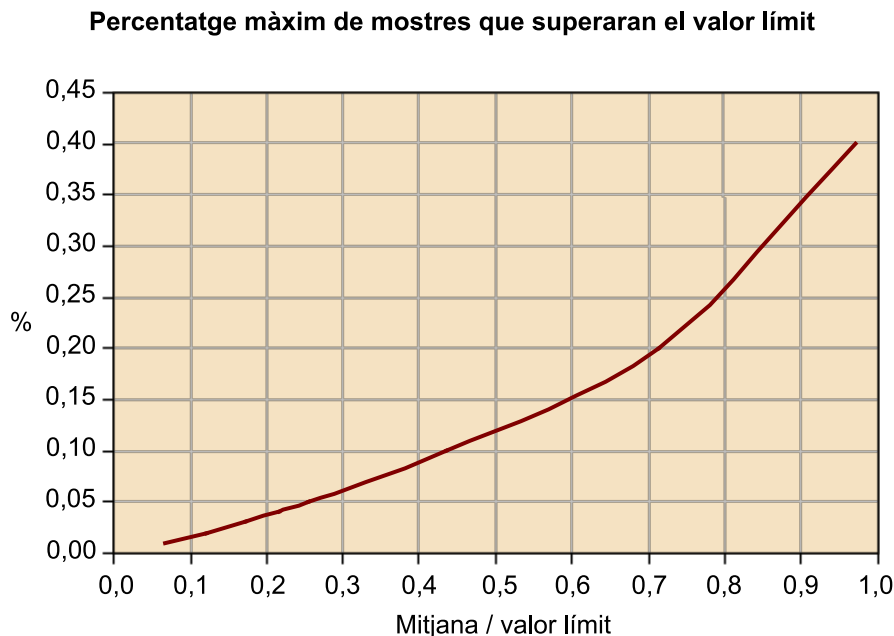
amb la qual cosa, en la taula 2, per a $n = 7$ i $\ln(GSD) = 0,500$, obtenim $C = 2,465$ i la fórmula dona $L_{sup} = 5,456 \text{ mg/m}^3$, que representa el valor de la mitjana, que només serà superat en un 5% dels casos.

2.2.3. Estimació del percentatge de mostres que superaran el valor límit

Les propietats de la llei log-normal també permeten calcular quin és el **valor més probable** del percentatge **màxim** de mostres el resultat de les quals superarà el valor límit segons el valor mitjà de la concentració en relació amb aquest valor. Els resultats es mostren en la figura 4, de la qual es pot concloure

que, perquè el percentatge de mostres que no superi el valor límit no sigui superior al 5%, és necessari que la concentració mitjana sigui inferior al 25% d'aquest valor límit.

Figura 4. Percentatge màxim de mostres que superaran el valor límit segons la relació entre la mitjana i aquest valor



En altres paraules, aconseguir que la **majoria** dels dies la concentració mitjana sigui inferior al valor límit (de fet, la normativa espanyola exigeix que s'estigui **tots els dies** en aquestes condicions, encara que això és tècnicament impossible) exigeix que la concentració mitjana a llarg termini sigui molt inferior al valor límit.

Bases estadístiques

A França, l'Ordre de 15 de desembre del 2009 estableix els criteris de compliment sobre bases estadístiques, la qual cosa és tècnicament molt més apropiada.

Observeu que la figura 4 dona el valor **màxim** del percentatge de mostres el resultat del qual superarà el valor límit, **sigui quin sigui el valor de GSD**. També és possible estimar aquest percentatge (i el seu interval de confiança) en cada cas concret recorrent al mètode descrit per Hewett i Ganser (1997) que descrivim a continuació.

Per a estimar el **valor més probable** del percentatge de mostres que superaran el valor límit (VL) es calcula el valor:

$$t = \frac{\ln(VL) - \mu'}{\sigma^*} \quad (10)$$

i amb una taula de la llei normal es calcula la probabilitat que se superi t ; el valor d'aquesta probabilitat és el corresponent al percentatge buscat.

Exemple

Continuant amb l'exemple anterior, si suposem que $VL = 5 \text{ mg/m}^3$, serà $\ln(VL) = 1,609$, amb els valors ja coneguts de μ' i σ^* resulta $t = 1,078$, valor al qual segons la taula de la llei normal correspon una probabilitat acumulada de 0,86. La proporció de mostres que superaran el valor límit es pot estimar que serà $d'1 - 0,86 = 0,14$, és a dir, el 14%.

2.2.4. Estimació de l'interval de confiança del percentatge de mostres que superaran el valor límit

Tal com ens ha succeït amb la mitjana, també podem calcular l'interval de confiança en el qual es mourà l'estimació del percentatge de mostres que superaran el valor límit.

Per a això es calcula el paràmetre t tal com hem vist, i a partir del seu valor i de la grandària de mostra, n , l'extrem inferior de l'interval de confiança es llegeix directament en la taula 3. Per a obtenir el valor de l'extrem superior s'utilitza la mateixa taula fent servir el valor $-t$. L'extrem superior és el complement a 1 del valor llegit en la taula 3.

Taula 3. Càlcul de l'interval de confiança del percentatge de mostres que superaran el valor límit (Odeh i Owen 1980)

t	n								
	3	4	5	7	8	10	21	40	60
3	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00001	0,00001	0,00006	0,00016	0,00024
2,8	0,00000	0,00000	0,00000	0,00001	0,00002	0,00004	0,00017	0,00037	0,00054
2,6	0,00000	0,00000	0,00002	0,00005	0,00007	0,00011	0,00041	0,00085	0,00118
2,4	0,00000	0,00001	0,00006	0,00014	0,00020	0,00031	0,00097	0,00182	0,00244
2,2	0,00000	0,00003	0,00018	0,00041	0,00054	0,00080	0,00214	0,00373	0,00481
2	0,00002	0,00011	0,00052	0,00107	0,00135	0,00191	0,00447	0,00723	0,00904
1,8	0,00008	0,00038	0,00140	0,00257	0,00315	0,00424	0,00881	0,01334	0,01617
1,6	0,00030	0,00115	0,00344	0,007400	0,00682	0,00879	0,01641	0,02341	0,02761
1,4	0,00106	0,00311	0,00772	0,01187	0,01372	0,01701	0,02889	0,03909	0,04499
1,2	0,00317	0,00753	0,01589	0,02277	0,02571	0,03079	0,04814	0,06219	0,05005
1	0,00820	0,01629	0,03006	0,04055	0,04488	0,05220	0,07602	0,09436	0,10434
0,8	0,01831	0,03164	0,05236	0,06719	0,07315	0,08305	0,11396	0,13674	0,14884
0,6	0,03544	0,05534	0,08424	0,10394	0,11168	0,12433	0,16250	0,18958	0,20367
0,4	0,05997	0,08771	0,12581	0,15071	0,16028	0,17574	0,22101	0,25206	0,26790
0,2	0,09006	0,12725	0,17559	0,20594	0,21740	0,23566	0,28768	0,32224	0,33956
0	0,12240	0,17114	0,23099	0,26707	0,28044	0,30148	0,35982	0,39740	0,41592
-0,2	0,15403	0,21648	0,28913	0,33120	0,34649	0,37027	0,43444	0,47450	0,49389

t	n								
	3	4	5	7	8	10	21	40	60
-0,4	0,18342	0,26118	0,34762	0,39580	0,41299	0,43938	0,50867	0,55056	0,57048
-0,6	0,21024	0,30413	0,40483	0,45898	0,47795	0,50671	0,58014	0,32608	0,64311
-0,8	0,23469	0,34491	0,45976	0,51947	0,54001	0,57076	0,64703	0,69010	0,70978
-1	0,25712	0,38345	0,51188	0,57648	0,59829	0,63052	0,70809	0,75027	0,76913
-1,2	0,27784	0,41982	0,56090	0,62954	0,65226	0,68537	0,76255	0,80283	0,82041
-1,4	0,29713	0,45416	0,60671	0,67839	0,70162	0,73498	0,81008	0,84755	0,86347
-1,6	0,31819	0,48661	0,64929	0,72292	0,74625	0,77921	0,85068	0,88461	0,89861
-1,8	0,33219	0,51732	0,68867	0,76315	0,78616	0,81812	0,88463	0,91454	0,92648
-2	0,34828	0,54640	0,72489	0,79913	0,82146	0,85187	0,91243	0,93809	0,94797
-2,2	0,36356	0,57398	0,75806	0,83104	0,85234	0,88077	0,93473	0,95614	0,96407
-2,4	0,37814	0,60013	0,78826	0,85905	0,87906	0,90516	0,95224	0,96963	0,97581
-2,6	0,39207	0,62495	0,81563	0,88341	0,90192	0,92547	0,96569	0,97946	0,98412
-2,8	0,40543	0,64851	0,84028	0,90440	0,92125	0,94215	0,97582	0,98642	0,98984
-3	0,41828	0,67087	0,86237	0,92229	0,93741	0,95565	0,98328	0,99123	0,99366
-3,2	0,43064	0,69210	0,88204	0,93740	0,95077	0,96643	0,98866	0,99447	0,99615
-3,4	0,44258	0,71224	0,89946	0,95003	0,96168	0,97491	0,99246	0,99660	0,99772
-3,6	0,45411	0,73134	0,91478	0,96048	0,97049	0,98149	0,99508	0,99796	0,99869
-3,8	0,46527	0,74945	0,92818	0,96903	0,97752	0,98652	0,99685	0,99880	0,99926
-4	0,47609	0,76661	0,93883	0,97596	0,98306	0,99031	0,99803	0,99932	0,99960
-4,2	0,48658	0,78285	0,94988	0,98151	0,98737	0,99313	0,99879	0,99962	0,99979
-4,4	0,49677	0,79821	0,95849	0,98592	0,99069	0,99519	0,99927	0,99979	0,99989
-4,6	0,50668	0,81272	0,96584	0,98938	0,99321	0,99668	0,99957	0,99989	0,99994
-4,8	0,51633	0,82641	0,97205	0,99207	0,99510	0,99774	0,99975	0,99994	0,99997
-5	0,52572	0,83932	0,97727	0,99413	0,99651	0,99848	0,99986	0,99997	0,99999
-5,2	0,53488	0,85147	0,98164	0,99570	0,99754	0,99899	0,99992	0,99999	0,99999
-5,4	0,54381	0,86290	0,98525	0,99688	0,99829	0,99934	0,99996	0,99999	1,00000
-5,6	0,55252	0,87363	0,98823	0,99776	0,99882	0,99958	0,99998	1,00000	1,00000
-5,8	0,56103	0,88369	0,99067	0,99841	0,99920	0,99973	0,99999	1,00000	1,00000
-6	0,56935	0,89311	0,99265	0,99888	0,99946	0,99983	0,99999	1,00000	1,00000

Referències web

A Internet es poden trobar recursos gratuïts per a fer automàticament els càlculs anteriors i d'altres de més sofisticats. Així, per exemple, en l'arxiu "LognormalAS.xls" (en línia) és possible baixar un full de càlcul (en anglès) que proporciona el valor del límit superior de l'interval de confiança de la mitjana d'una distribució log-normal.

Una altra aplicació més completa és el full de càlcul IHSTAT que ha creat l'American Industrial Hygiene Association (AIHA) i que està disponible en línia en diverses versions idiomàtiques, entre les quals hi ha el castellà. En aquest cas, a partir dels valors de les mesures i del valor límit, el programa calcula l'estimació de la mitjana de la població, els límits superior i inferior del seu interval de confiança, el valor del percentatge de mostres que superaran el valor límit i el seu interval de confiança, i altres valors. L'AIHA també disposa d'altres productes similars de baixada lliure.

S'ha de tenir en compte que els resultats obtinguts mitjançant aquests programes o d'altres de similars i el càlcul "manual" que hem fet en els exemples poden diferir lleugerament a causa de diferències en el nombre de decimals usats en els càlculs i, sobretot, de diferències en les tècniques d'interpolació en les taules quan això és necessari.

Exemple

En el nostre exemple, amb $t = 1,078$ i $n = 7$, en la taula 3 llegim (per a $t = 1,078$ interpolant entre els valors corresponents a $t = 1,0$ i $t = 1,2$), per a l'extrem inferior, 0,02970, és a dir, el 2,9%. Per a l'extrem superior, amb $t = -1,078$ (interpolant igual que abans), llegim 0,59717, amb la qual cosa l'extrem superior serà $1 - 0,59717 = 0,4$ aproximadament, és a dir, el 40%.

Així, doncs, podem assegurar que en el 95% dels casos el percentatge de mostres que superarà el valor límit es trobarà entre el 3% i el 40%. Evidentment, l'amplitud d'aquest interval és massa gran per a tenir un interès pràctic. Això és a causa de l'escàs nombre de mostres que hem pres.

Si en lloc de sis haguéssim pres quaranta mostres, la mateixa taula, amb el mateix valor de t i $n = 40$ ens dona per a l'extrem inferior prop de 0,78, és a dir, el 7,8%, i per a l'extrem superior $1 - 0,77 = 0,23$ aproximadament, és a dir, el 23%.

L'interval de confiança s'estén encara molt, entre el 7,8% i el 23%. Si el volem reduir encara més, haurem de prendre més mostres o bé recórrer a estratègies de mostreig més elaborades.

3. Estratègies de mostreig

En les primeres dècades del segle XX no hi havia amb prou feines normatives legals que obliguessin a respectar nivells màxims de contaminació als llocs de treball. Com a excepcions que confirmen la regla, es podrien esmentar la reglamentació sud-africana de 1916 sobre els nivells de pols a les mines d'or i la limitació nord-americana a l'exposició de pols d'alt contingut en quars de 1917.

Per això, l'objectiu de les mesures dutes a terme per la majoria dels primers higienistes industrials era quantificar les exposicions a fi de poder relacionar els resultats amb l'aparició de manifestacions patològiques i poder inferir de tot això quins eren els nivells de contaminació que es podien considerar segurs.

El resultat d'aquests treballs va cristal·litzar el 1946 amb la publicació de la primera llista de valors MAC (*maximal allowable concentrations*) per part de l'American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH), llista que contenia 150 substàncies. El 1948 l'ACGIH va rebatejar la llista amb el nom de *threshold limit values* (TLV), amb el qual ha estat coneguda universalment des de llavors.

L'aparició de la primera llista de valors TLV va començar a transformar la tasca dels higienistes, que va tendir a centrar-se en si les recomanacions de l'ACGIH eren o no respectades i, en aquest últim cas, efectuar les modificacions oportunes perquè ho fossin.

Això exigia el mostreig periòdic dels llocs de treball i la comparació dels resultats obtinguts amb aquests límits, la qual cosa es feia sense plantejar-se gaires preguntes sobre la fiabilitat dels mètodes de mostreig i anàlisi o, fins i tot, la significació estadística dels resultats: es tractava, bàsicament, d'una qüestió de **bones pràctiques**. A falta d'exigències legals definides, sembla que molts higienistes entenien que n'hi havia prou d'efectuar mesures periòdiques i verificar que **a llarg termini** s'estava raonablement per sota del valor TLV corresponent. Com hem vist (figura 4), aquesta manera de procedir implicava que més d'un 40% de les mesures fos per sobre del valor TLV.

Vegeu també

La figura 4 pertany al subapartat "Estimació del percentatge de mostres que superaran el valor límit" d'aquest mòdul didàctic.

Encara que la definició de TLV de l'ACGIH no explicitava clarament que els valors de la llista s'havien de respectar **cada dia**, la lectura del text en conjunt deixava pocs dubtes sobre aquesta qüestió: la concentració mitjana en qualsevol jornada laboral havia de ser inferior al valor TLV corresponent. Si no hagués estat així, no hauria tingut sentit que s'especificuessin els **límits de desviació** respecte al valor TLV que eren admissibles **dins de cada jornada** sempre que la mitjana diària respectés el valor TLV.

En aquestes condicions, conèixer quin era el **vertader valor** de la concentració a llarg termini es va convertir en una qüestió d'importància secundària. La nova pregunta era: quines condicions ambientals s'han de mantenir perquè la probabilitat que un inspector, en un dia qualsevol, trobi una concentració mitjana per sobre del que és tolerable sigui inferior a x ? En què x és el risc de sanció que l'empresa està disposada a assumir, un valor que no pot ser zero perquè, com que la distribució de les concentracions és log-normal, hi ha una probabilitat potser petita però finita que una mostra presa a l'atzar pugui donar un valor de concentració molt elevat.

Les reaccions a la nova situació van ser immediates en forma de la publicació de metodologies que van incorporar tractaments estadístics a la tasca dels higienistes: les anomenades **estratègies de mostreig**.

Una **estratègia de mostreig** és una metodologia que estableix les característiques del mostreig (nombre, durada, etc. de les mostres) i el tractament estadístic dels resultats amb la finalitat de determinar, amb un cert nivell de confiança, si el valor límit aplicable és o no superat.

Una de les primeres recomanacions en aquest sentit va ser l'efectuada pel National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH) dels Estats Units el 1972, digna de passar a la història perquè s'hi considerava que els resultats de les mostres preses es distribuïen segons una **lleï normal**. Poc temps després el mateix NIOSH va esmenar més que àmpliament l'error publicant la primera obra de referència sobre el tema, de la qual tractarem a continuació.

3.1. Estratègia del NIOSH (1977)

L'**estratègia del NIOSH** era un manual pràctic redactat amb l'objectiu d'"ajudar els empresaris a comprendre millor l'esperit i els objectius de les regles federals existents i propostes per a controlar les exposicions" dels treballadors, i reconeixia que "els recursos [per a això] no són il·limitats", per la qual cosa "una estratègia de mostreig apropiada [...] pot comportar el millor ús dels recursos disponibles per a la mesura de les exposicions". El document va ser objecte d'una àmplia difusió i d'un estudi subsegüent en els mitjans pro-

Llei OSHA

El 1970, el fet que l'Administració laboral nord-americana adoptés els valors TLV de 1968 com a límits legals que s'havien de respectar **cada jornada laboral** (Llei OSHA) va canviar radicalment el panorama. En efecte, la tasca dels higienistes va deixar de tenir un horitzó de llarg termini per a centrar-se en l'anàlisi de quina era la probabilitat que una inspecció laboral (que s'efectuava en un dia concret i s'orientava a verificar si **en aquest dia** es complia la norma) dictaminés que s'incomplia la norma, la qual cosa podia implicar una sanció.

Lectura recomanada

L'estratègia del NIOSH la trobareu en:

N. A. Leidel; K. A. Busch; J. R. Lynch (1977). "Occupational exposure sampling strategy manual" [document en línia]. DHEW (NIOSH) Publication (núm. 77-173).

fessionals, fins al punt que “al cap de pocs anys el manual del NIOSH s’havia convertit en la publicació més citada i discutida en el camp de la higiene industrial”.

El document aportava solucions als principals problemes de qualsevol estratègia de mostreig i va introduir molts conceptes que encara avui continuen vigents:

1) Mostreig dels treballadors: encara que “en una situació ideal s’hauria de mostrejar qualsevol treballador potencialment exposat”, la millor situació a la pràctica “és mostrejar l’empleat que presumptament està exposat a un risc més gran”, la qual cosa redueix sensiblement els costos. Atès que sovint la determinació d’aquest treballador no és possible, l’alternativa és establir grups de treballadors l’exposició dels quals sigui presumptament homogènia, els anomenats *grups homogenis d’exposició* (GHE), i seleccionar aleatòriament dins del grup els individus que cal mostrejar, en una proporció que, segons la grandària del grup, oscil·laria entre la totalitat dels individus per a un grup de vuit individus i un terç, aproximadament, per a grups de cinquanta individus.

Encara que la idea dels GHE és atractiva, a la pràctica seleccionar grups realment homogenis quant a l’exposició dels individus que el componen no és fàcil. Com que les variables emprades usualment per a definir l’homogeneïtat d’exposició del grup (lloc de treball, tipus de contaminant, naturalesa del procés, mobilitat del treballador, etc.) es relacionen només marginalment amb les diferències existents entre les exposicions de diferents treballadors que ocupen llocs “aparentment” equivalents, sovint l’exposició real dels individus d’un grup suposadament homogeni dista molt de ser equivalent.

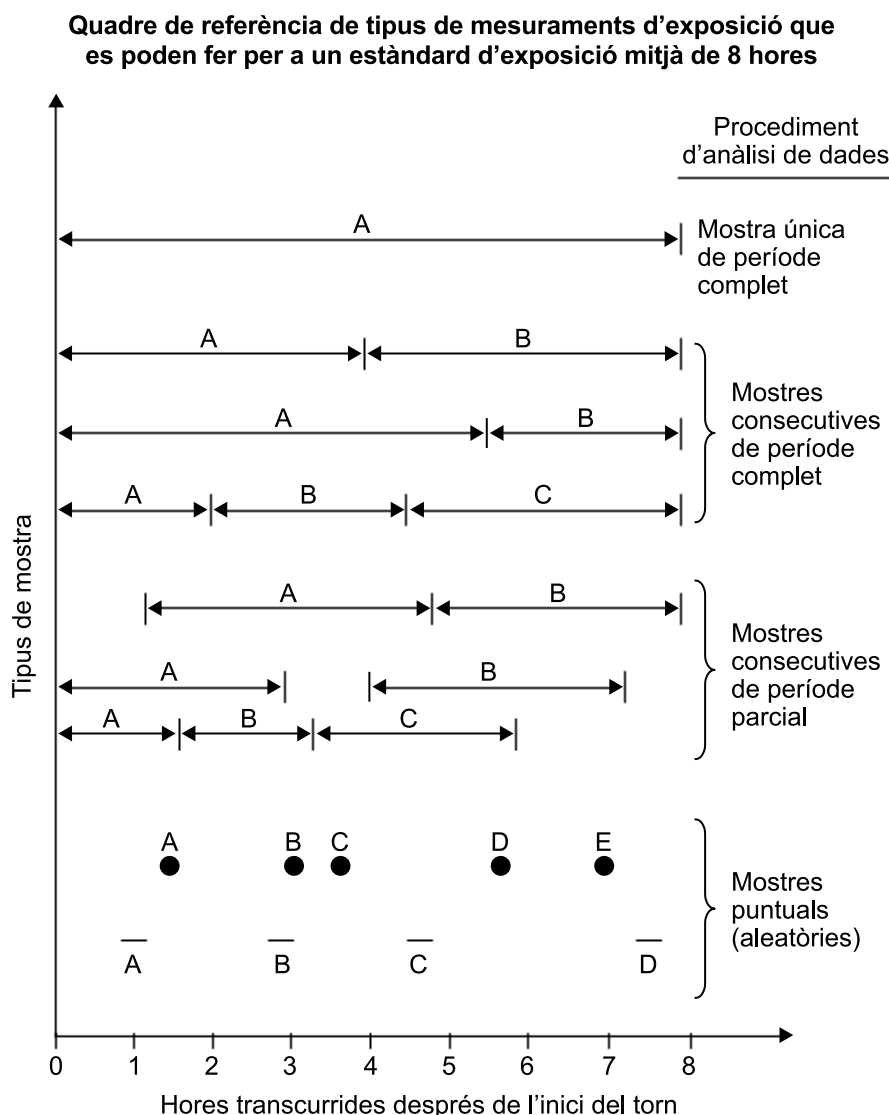
Els esquemes basats únicament en l’**observació** s’haurien de complementar, doncs, amb una utilització assenyalada dels resultats de preses de mostres efectuades en treballadors seleccionats aleatòriament.

2) Tipus de mostreig en una jornada de treball: per a comparar el resultat de la mesura amb el valor límit, la durada de la mostra **hauria de ser** de la totalitat de la jornada laboral; tanmateix, això pot ser que no sigui possible per moltes raons. Si el temps de mostreig és inferior a la totalitat de la jornada laboral, l’exposició dins del període no mostrejat s’ha d’estimar d’alguna manera. El NIOSH va classificar els mostrejos en quatre categories que continuen essent recollides en els manuals actuals (figura 5):

- mostra única de jornada completa,
- diverses mostres consecutives que comprenen la jornada completa,
- diverses mostres, consecutives o no, que no comprenen la jornada completa i

- mostres de curta durada que, normalment, no comprenen la jornada completa.

Figura 5. Opcions de mostreig proposades pel NIOSH (Leidel 1977)



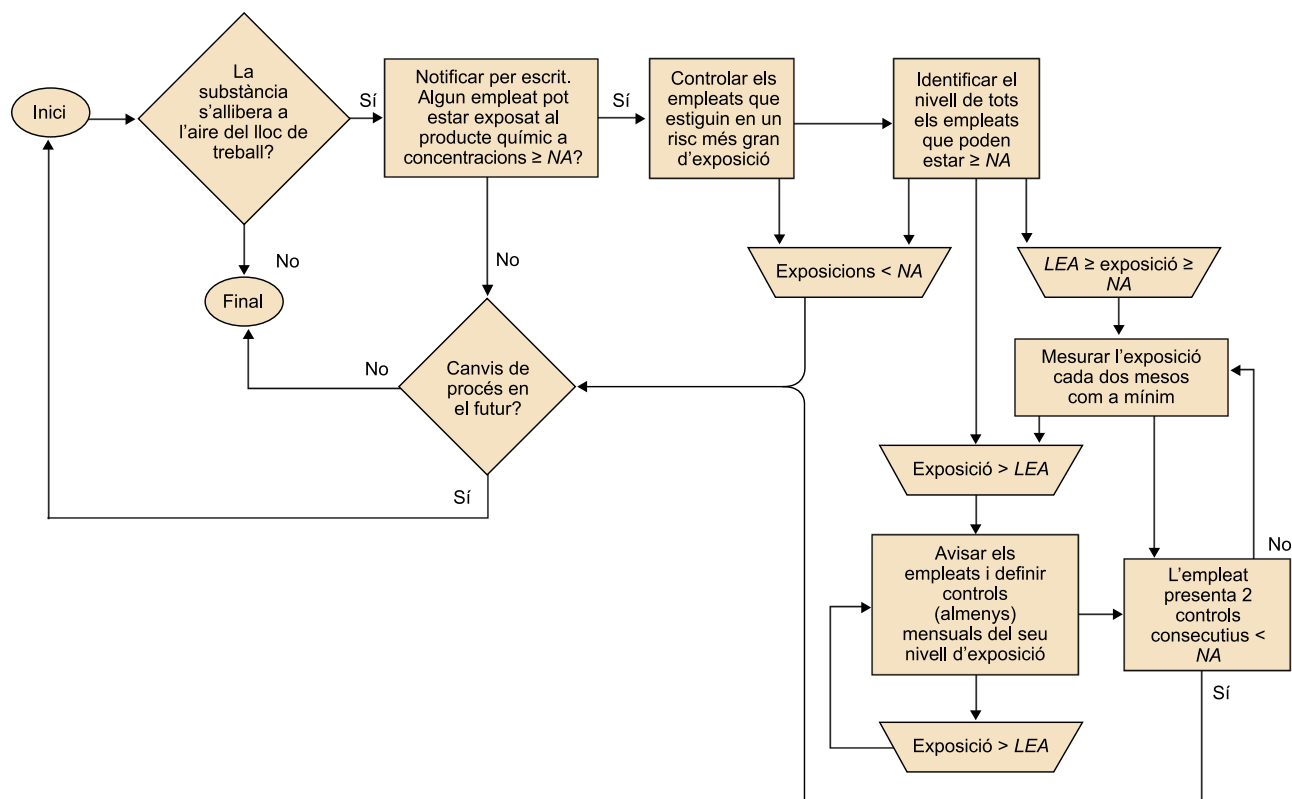
Font: adaptada de N. A. Leidel; K. A. Busch; J. R. Lynch (1977). "Occupational exposure sampling strategy manual". DHEW (NIOSH) Publication (núm. 77-173).

3) Anàlisi estadística dels resultats del mostreig: per a cadascuna de les quatre categories de mostreig es presentaven els criteris de decisió sobre si, amb un nivell de confiança determinat, es pot concloure que se supera o no el valor límit. Es diferenciaven els criteris que hauria d'utilitzar l'empresari (que davant la possible visita d'un inspector s'hauria de situar sempre en el pitjor escenari) dels que hauria d'utilitzar l'inspector, que hauria de prendre decisions considerant l'escenari més benigne. Així, per exemple, si el mostreig permetia calcular que l'interval de confiança del valor real de la concentració es trobava entre 1,5 i 2,5 mg/m³, l'empresari hauria d'actuar (segons les recomanacions del NIOSH) com si el vertader valor fos 2,5 i l'inspector (si era ell qui prenia la mostra) com si fos 1,5.

Recomanacions de l'estratègia de mostreig

Malgrat la incorporació d'innovacions conceptuals notables per a l'època i d'eines estadístiques sofisticades, les recomanacions que constitueixen pròpiament l'**estratègia de mostreig** proposada pel NIOSH eren d'una simplicitat notable, com es pot veure en la figura 6, reproduïda de Leidel (1977): si la primera mesura donava un resultat inferior a la meitat del valor límit (nivell d'acció) s'havia de concloure que la situació era acceptable per al grup de treballadors de l'exposició dels quals era representativa la mesura efectuada. Si la primera mesura era superior al valor límit, s'havia de concloure que la situació era inacceptable i s'havien de prendre mesures correctores. En qualsevol altre cas, s'havien de prendre mesures addicionals a intervals regulars fins que dues mesures successives fossin inferiors a la meitat del valor límit (i es conclouria en aquest cas que l'exposició era acceptable) o bé alguna de les mesures fos superior al valor límit, i en aquest cas es conclouia que la situació era inacceptable i havia de ser corregida.

Figura 6. Esquema de decisió de l'estratègia de mostreig de NIOSH



Per a conèixer amb detall els requisits de cada substància, cal consultar les normes sanitàries relatives a la substància esmentada.

AL = nivell d'acció; LEA = límit d'exposició acceptable

Font: adaptada de Leidel, Busch i Lynch (1977). "Occupational exposure sampling strategy manual". DHEW (NIOSH) Publication (núm. 77-173).

Les limitacions de l'estratègia del NIOSH van ser aviat posades de manifest. La principal era la seva escassa capacitat per a detectar situacions inacceptables, especialment en ambients amb una variabilitat relativament elevada (valors de *GSD* elevats). Així, Tuggle (1981) va demostrar que en un ambient amb una *GSD* = 2, en el qual el percentatge de mostres que sobrepassés el valor límit fos del 25% (una cosa clarament inacceptable), l'estratègia del NIOSH conduiria a la decisió equivocada en el 50% dels casos.

Probablement, els autors de l'estratègia del NIOSH eren conscients d'aquesta limitació, però van efectuar la seva proposta en un entorn en el qual les pressions perquè es recomanés una estratègia "simple", i per tant barata de posar en pràctica, eren molt fortes; si haguessin proposat un model més fiable, però

més sofisticat (i per tant més car d'implementar) probablement haurien estat criticats durament per haver recomanat un model inaplicable en empreses amb recursos limitats.

En conjunt, es pot dir que l'estratègia del NIOSH està desfasada perquè se centra únicament en el compliment de la normativa (*compliance*), no té en compte adequadament la variabilitat de les exposicions i té una potència escassa per a detectar perfils d'exposició amb un percentatge elevat d'exposicions superiors al valor límit, la qual cosa és clarament inacceptable.

A la fi de l'any 2006 el NIOSH va anunciar la intenció d'actualitzar el seu vell manual de 1977, però fins ara (maig del 2012) no s'ha publicat cap resultat.

3.2. Norma UNE 689 (1995)

A Espanya, la **norma UNE-EN 689** és la de referència a l'hora d'establir l'estratègia de mostreig adequada per a avaluar l'exposició a agents químics per inhalació per a poder dur a terme la comparació dels resultats obtinguts en la mesura dels contaminants amb els valors límit.

A aquesta norma es fa referència en la Guia de l'INSHT del Reial decret 374/2001, transposició de la Directiva 98/24/CE.

A continuació, resumim breument els aspectes més importants de la norma, amb referència a l'estratègia del mostreig tal com l'hem definit amb anterioritat. També hi incloem, a tall d'exemple, alguns dels "Annexos informatius".

3.2.1. Avaluació de l'exposició

L'avaluació de l'exposició laboral es duu a terme en tres etapes:

- 1) Identificació de les exposicions potencials a partir de la llista de substàncies que es poden trobar presents en el medi de treball.
- 2) Determinació dels factors d'exposició al lloc de treball.
- 3) Avaluació de les exposicions.

Pel que fa al punt 3, l'avaluació de les exposicions, la norma especifica que s'ha de fer amb un enfocament estructurat i que es pot dur a terme en tres etapes:

- a) Estimació inicial

Norma UNE-EN 689

Norma UNE-EN 689. Març de 1996. Atmosferes al lloc de treball. Directrius per a l'avaluació de l'exposició per inhalació d'agents químics per a la comparació amb els valors límit i estratègia de la mesura.

Lectura recomanada

Reial decret 374/2001, de 6 d'abril, sobre la protecció de la salut i seguretat dels treballadors contra els riscos relacionats amb els agents químics durant la feina. BOE núm. 104, d'1 de maig del 2001.

b) Estudi bàsic**c) Estudi detallat**

No sempre cal dur a terme cadascuna de les etapes de l'avaluació. Si es preveu que l'exposició excedeix el valor límit o és molt clarament per sota, es pot donar per conclosa l'avaluació de l'exposició i aplicar-hi directament les conclusions que comentem més endavant.

Estimació inicial

S'obté una primera idea de la possible exposició a partir de la llista de substàncies que es poden trobar presents i els factors d'exposició existents (tasques, tècniques, processos, característiques del lloc de treball, càrrega de treball, temps d'exposició, ventilació, etc.). Les variables que cal considerar s'agrupen de la manera següent:

1) Les relacionades amb les actuacions i els comportaments individuals:

- Proximitat a la font
- Temps de permanència
- Hàbits individuals

2) Les que afecten les concentracions de les substàncies en l'aire que presumiblement respirarà el treballador:

- Nombre de fonts emissores
- Ritme de producció amb relació a la capacitat de producció
- Grau d'emissió de cada font
- Tipus i emplaçament de cada font
- Dispersió de l'agent químic segons el moviment de l'aire
- Tipus i eficàcia dels sistemes d'extracció i ventilació

Estudi bàsic

L'estudi bàsic proporciona informació quantitativa sobre l'exposició dels treballadors tenint en compte, principalment, les tasques amb més exposició. S'obté a partir de mesures anteriors, per comparació amb mesures en instal·lacions o processos de treball comparables o càlculs fiables basats en dades quantitatives apropiades.

Si la informació obtinguda no és suficient per a poder fer una comparació vàlida amb els valors límit, l'estudi s'ha de completar amb mesures en el mateix lloc de treball.

Estudi detallat

L'estudi detallat té per objecte subministrar informació vàlida i fiable sobre l'exposició quan aquesta es troba propera al valor límit.

3.2.2. Conclusions sobre l'avaluació

L'**exposició laboral**, expressada en termes de concentració, és la mitjana aritmètica dels valors de mesura en una mateixa jornada de treball, respecte al període de referència corresponent al valor límit de l'agent considerat. En el cas de temps de mostreig diferents, s'han de ponderar els valors en el temps.

Exemple 1. Temps de mostreig iguals

La determinació de l'exposició laboral d'un treballador a pols insoluble o poc soluble s'ha dut a terme prenent vuit mostres d'1 hora de durada durant la jornada laboral d'aquest treballador. Els resultats obtinguts en les vuit mostres han estat de 2,3, 1,7, 0,4, 0,6, 0,3, 0,7, 0,6, 0,4 mg/m³. Quina és l'exposició, expressada com a índex (*I*) d'exposició (vegeu-ne la definició a continuació), d'aquest treballador?

La concentració mitjana a la qual ha estat exposat el treballador és:

$$C = (2,3 + 1,7 + 0,4 + 0,6 + 0,3 + 0,7 + 1,1 + 0,9) / 8 = 1 \text{ mg/m}^3$$

Exemple 2. Temps de mostreig diferents

S'han pres quatre mostres de monòxid de carboni durant la jornada laboral d'un treballador d'un taller d'automòbils. Els mostrejos s'han dut a terme amb un monitor específic i la durada de la presa de mostres ha estat de 2,5 h, 1 h, 3 h i 1,5 h. Les concentracions mitjanes per a cada període de mostreig han estat de 20, 20, 10 i 8 ppm. Calcularem la concentració mitjana a la qual ha estat exposat el treballador durant la jornada.

La concentració mitjana a la qual ha estat exposat el treballador és:

$$C = ((20 \times 2,5) + (20 \times 1) + (10 \times 3) + (8 \times 1,5)) / 8 = 50 + 20 + 30 + 12 = 112 / 8 = 14 \text{ ppm}$$

Per a comparar les exposicions amb els valors límit, es poden utilitzar diferents esquemes, el més utilitzat dels quals és el càlcul de l'**índex d'exposició**.

L'índex d'exposició (I)

L'índex d'exposició, I , es fa servir per a comparar l'exposició mesurada amb un valor límit. Normalment aquest procés es fa mitjançant la divisió d'ambdós valors i la interpretació d'aquest resultat és evident: un valor de $I = 1$ significa que l'exposició és igual al límit; com més s'apropa al valor nul, més baixa és l'exposició, i com més gran és, més gran és l'exposició. En termes matemàtics, es defineix de la manera següent:

$$I = \frac{C_8}{VLA - ED} \quad (11)$$

en què VLA-ED indica el valor límit ambiental per a l'exposició diària i C_8 indica el valor de la concentració mitjana referida a la jornada estàndard de vuit hores.

Algunes fórmules inclouen el càlcul de C_8 , i col·loquen en el numerador la concentració (mitjana) mesurada, C , el temps d'exposició, t_e , i 8 (hores) i el VLA-ED en el denominador.

$$I = \frac{C \times t_e}{VLA - ED \times 8} \quad (12)$$

En el supòsit d'exposicions de curta durada, o d'exposicions d'intensitat elevada, les expressions de càlcul són:

$$I = \frac{C_{15}}{VLA - EC} \quad (13)$$

en què VLA-ED indica el valor límit ambiental per a l'exposició curta i C_{15} indica el valor de la concentració determinada durant un període de 15 minuts d'"interès", és a dir, aquell o aquells en què se suposa que la concentració del contaminant a l'aire pot ser més elevada.

No obstant això, sigui quin sigui el sistema utilitzat, s'ha de formular una de les tres conclusions següents:

a) L'exposició és superior al valor límit. En aquest cas, s'haurien d'identificar les raons per les quals s'ha sobrepassat aquest valor i prendre les mesures apropiades per a remeiar la situació tan aviat com sigui possible. L'avaluació de l'exposició s'hauria de repetir, una vegada aplicades les mesures apropiades.

b) L'exposició és molt inferior al valor límit i és probable que continuï així a llarg termini a causa de l'estabilitat de les condicions del lloc de treball i de la distribució dels processos de treball. En aquest cas, no són necessàries les mesures periòdiques, encara que cal comprovar regularment que l'avaluació de l'exposició laboral que va originar aquesta conclusió encara és aplicable.

c) L'exposició no s'ajusta a a) o b). En aquest cas, es necessiten mesures periòdiques, tot i que sigui possible que l'exposició sigui inferior al valor límit.

L'objecte de les mesures periòdiques és comprovar la validesa de l'avaluació de l'exposició laboral i identificar els canvis que es produeixin en l'exposició mitjançant un procediment de mesura prèviament definit. En certs casos, depenent de les propietats de l'agent i del procés de treball, es poden descartar sempre que es pugui justificar d'acord amb directrius tècniques.

3.2.3. Propostes per a l'avaluació de les exposicions

Com hem comentat en la presentació d'aquest apartat, l'UNE-EN 689 conté una sèrie d'annexos, qualificats com a informatius, que inclouen diferents exemples de metodologies relacionades per a determinar l'avaluació d'exposició laboral a agents químics i que són solament exemples de bones pràctiques en aquest procés. A continuació, en comentem, també a tall d'exemple, tres.

Nombre mínim de mostres segons la durada de la mostra (annex A informatiu)

En l'annex A de l'UNE 698 es presenta una proposta per a establir el mínim nombre de mostres que cal prendre en una jornada amb relació a la durada de l'obtenció d'aquestes mostres, ja que quan la durada d'una mostra individual és considerablement inferior a la durada total de l'exposició, el tractament estadístic permet disminuir el nombre de mostres per jornada de treball. Es presenta una relació durada de la mostra / nombre de mostres per jornada (vegeu la taula 4), que és el resultat de combinar els fonaments estadístics aplicats a les tècniques de mostreig amb l'experiència pràctica.

Taula 4. Nombre mínim de mostres per jornada de treball segons la durada d'una mostra

Durada de la mostra	Nombre mínim de mostres per jornada de treball
10 s	30
1 min	20
5 min	12
15 min	4
30 min	3
1 h	2
≥ 2 h	1

Per a elaborar la taula 4 s'ha partit del supòsit que el temps de mostreig sigui, com a mínim, del 25% del temps que dura l'exposició i que, òbviament, aquesta sigui homogènia (exposició controlada). No obstant això, mostres de

10 s de durada, implicarien prendre'n 720, quantitat molt elevada, per la qual cosa s'han restringit a 30, quantitat amb la qual s'aconsegueix prou estabilitat estadística.

Finalment, la norma recorda que la durada dels mostrejos de la taula s'ajusta als diferents tipus d'ús més corrent:

- 10 s per a mostrejos puntuals,
- d'1 a 5 min per a tubs detectors (colorimètrics),
- de 15 a 60 min per a mostrejos amb tubs adsorbents i
- a partir d'1 hora per a mostrejar pols amb filtres.

Exemple

En l'avaluació inicial de riscos en un treball de perforació d'un túnel, s'ha conclòs que hi ha un risc d'exposició al gas radó i a pols insoluble o poc soluble. Quin és el nombre mínim de mostres que cal prendre per a dur a terme l'estudi d'un grup de treballadors amb exposició homogènia a ambdós contaminants? Es disposa d'un mesurador de lectura directa de radó i d'un sistema de presa de mostres i anàlisi per a determinar l'exposició a pols insoluble.

Atenent el que s'ha exposat en la taula 4, per a la determinació de l'exposició al gas radó s'hauran de fer un mínim de trenta lectures durant la jornada, mentre que, per a determinar l'exposició a pols amb mostrejos de prop d'1 hora, s'hauran de prendre, com a mínim, dues mostres. Tot això, evidentment, si el nivell d'exposició a ambdós contaminants és constant al llarg de la jornada (procés controlat).

Procediment formal per a l'avaluació de les exposicions (annex C informatiu)

Atès que l'objectiu final de l'avaluació és la recomanació de les mesures preventives que cal implantar, abans de decidir que una exposició és perfectament acceptable i no requereix mesures preventives, convé tenir presents dues coses:

- 1) que hi ha una exposició sempre que $I > 0$ i
- 2) que la filosofia d'actuació requereix reduir l'exposició al mínim, i evitar la simplificació que un índex inferior a 1 significa una exposició segura.

Ambdues situacions, portades a l'extrem, farien impracticable obtenir conclusions.

L'empresari ha de garantir l'eliminació o **reducció al mínim** del risc que comporti un agent químic perillós per a la salut i seguretat dels treballadors durant la feina. Per a això, l'empresari ha d'evitar, preferentment, l'ús d'aquest agent i substituir-lo per un altre o per un procés químic que, segons les seves condicions d'ús, no sigui perillós o ho sigui en menor grau. Quan la naturalesa de l'activitat no permeti eliminar el risc per substitució, **l'empresari ha de garantir la reducció al mínim d'aquest risc** aplicant mesures de prevenció i protecció que siguin coherents amb l'avaluació dels riscos.

Article 5, apartat 2, de l'RD 374/2001, de mesures específiques de prevenció i protecció

D'altra banda, hi ha raons tècniques que justifiquen la necessitat de repetir l'avaluació al cap d'un període, fins i tot si s'ha obtingut un resultat inferior al valor límit, ja que, com hem comentat a bastament, la concentració ambiental

és sempre una magnitud molt variable i, d'altra banda, el dany del qual es vol protegir es manifesta normalment després d'un període d'exposició llarg. En conseqüència, el fet que un dia, o un conjunt de dies propers en el temps, s'obtingui una exposició inferior al límit admissible no és una garantia que al llarg del temps l'exposició serà inferior al límit.

La norma UNE 689, en l'annex C informatiu titulat "Exemple de l'aplicació d'un procediment formal per a l'avaluació de l'exposició dels treballadors basat en mesures preses durant l'avaluació de l'exposició laboral", aborda el tema i recomana un procediment per a avaluar exposicions laborals a agents químics, si es compleixen les condicions següents:

- que la concentració referenciada a una jornada de vuit hores representi realment l'exposició laboral,
- que tots els índexs d'exposició siguin inferiors a la unitat,
- que les condicions al lloc de treball es repeteixin regularment,
- que les característiques de l'exposició no canviïn amb el temps,
- que les diferents condicions de treball s'hagin avaluat separatament.

La presa de decisions es resumeix en la taula 5.

Taula 5. Presa de decisions segons la determinació de l'índex d'exposició (I)

Obtenir la concentració mitjana d'una jornada: $I_1 = C_8/VLA-ED$	
1) Si $I_1 \leq 0,1$	Risc acceptable: improbable que se superi el VL
2) Si $I_1 > 1$	Risc inacceptable: corregir l'exposició
3) Si $0,1 < I_1 \leq 1$	Obtenir-ne dos (I_2, I_3) més
4) Si I_1 i I_2 i $I_3 \leq 0,25$	Risc acceptable
5) Si I_1 o I_2 o $I_3 > 1$	Risc inacceptable: corregir l'exposició
6) Si I_1 i I_2 i $I_3 \leq 1$	Trobar la mitjana geomètrica: $GM = (I_1 \times I_2 \times I_3)^{1/3}$
7) Si $GM \leq 0,5$	Risc acceptable
8) Si $GM > 0,5$	Risc incert: obtenir dos I més i tornar a 3

La presa de decisions d'aquest annex de la norma es pot resumir en la idea que, sempre que es tracti d'unes condicions de treball totalment repetitives:

- És el mateix un dia $I < 0,1$, tres dies $I < 0,25$ o mitjana geomètrica (GM) de I de tres dies diferents $< 0,5$.
- Només que un valor de mesura estigui per sobre d'1, cal corregir.

- En tots els casos en què hi hagi incertesa, a la pràctica es pot controlar l'exposició a còpia d'efectuar mesures freqüents per a assegurar-nos que no superem el límit. No tenim una situació **segura** però sí **controlada**.

Alguns autors han calculat la probabilitat d'error en la conclusió obtinguda amb aquest procediment i han comprovat que hi ha una probabilitat bastant alta de concloure que se supera el límit ($C > VL$) encara que en realitat no sigui així. És a dir, que es tracta d'una prova amb tendència cap al costat de la seguretat, cosa que cal considerar, en principi, com a positiva.

Exemple 1

En un estudi de l'exposició a toluè en una operació de síntesi orgànica en un procés discontinu, se n'ha estudiat un cicle complet i s'ha determinat, per a un grup homogeni d'exposició n , un índex de 0,8. Quines són les conclusions que es poden treure i les accions corresponents?

La conclusió és d'indeterminació (incerta). S'han de fer dos mostres més en diferents jornades.

Exemple 2

Una vegada duts a terme dos mostres més en diferents jornades, s'han obtingut com a resultats $I_2 = 0,5$ i $I_3 = 0,4$. És possible treure en aquestes circumstàncies una conclusió?

No; s'han de continuar duent a terme mostres nous, ja que la mitjana geomètrica dels resultats (MG) és 0,54, superior a 0,5.

Exemple 3

Vista la situació exposada en el cas anterior, l'empresa decideix instal·lar un sistema d'extracció localitzada nou. Una vegada engegat i fetes les comprovacions oportunes sobre el seu funcionament, es duu a terme un mostreig nou d'un cicle complet, i s'obté com a resultat $I = 0,09$. Quina és la conclusió?

Podem considerar la situació com a acceptable.

Exemple 4

Al cap d'un temps, i seguint el pla de control periòdic corresponent dels riscos higiènics a l'empresa, es duu a terme un estudi de l'exposició, i es torna a mostrejar al llarg d'un cicle, i s'obté com a resultat $I = 1,1$. Quina és la conclusió?

El risc és inacceptable. S'han de prendre mesures per a corregir l'exposició.

Exemple 5

Es va comprovar que el sistema d'extracció localitzada havia estat alterat en unes obres de manteniment en una altra secció de l'empresa. Un cop corregida la situació, es va tornar a mostrejar un cicle i es va obtenir com a resultat $I = 0,6$. Quines són les conclusions que es poden treure i les accions corresponents?

La conclusió és d'indeterminació (incerta). S'han de fer dos mostres més en diferents jornades.

Exemple 6

Es van prendre dues mostres més en dues jornades no consecutives i els resultats van ser $I_2 = 0,3$ i $I_3 = 0,4$. És possible treure en aquestes circumstàncies una conclusió?

Sí. Es pot considerar la situació com a acceptable, ja que la mitjana geomètrica (MG) dels índexs obtinguts en les diferents jornades és 0,42, < 0,5.

Comparació de les concentracions de l'exposició laboral amb els valors límit (annex D informatiu)

Amb el títol d'“Exemple d'un possible enfocament per a la comparació de les concentracions de l'exposició laboral amb els valors límit” en l'annex D de la norma 689 s'exposa un exemple, basat en criteris estadístics, de comparació amb el valor límit segons el model de distribució logarítmica normal de les concentracions i utilitzant una estadística bàsica per a determinar la probabilitat que en un dia qualsevol es pugui excedir el valor límit. Igual que en els casos anteriors sempre se suposa que es tracta de situacions repetides o estables, típiques dels centres de treball amb tasques ben definides o planificades.

1) Mesures al lloc de treball

Les mesures al lloc de treball impliquen les etapes següents:

- a) Selecció d'un grup de treballadors amb exposició homogènia: GHE.
- b) Realització de sis mesures personals dins del GHE.
- c) Ajust a un model d'exposició logarítmica normal, utilitzant un gràfic de probabilitat acumulada i comprovant que es compleix aquesta distribució.
- d) Càlcul de la probabilitat d'excedir el valor límit, tenint-ne en compte l'interval de confiança.

2) Conclusió de l'avaluació de l'exposició laboral

- a) **Probabilitat $\leq 0,1\%$** : situació verda. Exposició clarament inferior al valor límit. Si no hi ha canvis significatius en les condicions de treball no són necessàries altres mesures.
- b) **Probabilitat $> 0,1\%$ i $\leq 5\%$** : situació taronja. Exposició inferior al valor límit, però que ha de ser confirmada mitjançant mesures periòdiques.
- c) **Probabilitat $> 5\%$** : situació vermella. Probabilitat massa alta d'excedir el valor límit; s'han de prendre mesures per a corregir la situació i dur a terme una avaluació nova.

Si l'interval de confiança de la probabilitat és molt ampli, és recomanable fer un examen crític de l'homogeneïtat real del GHE (mitjançant la comprovació de la qualitat de l'ajust logarítmic normal i el valor de la desviació estàndard geomètrica, generalment < 3), una revisió de la qualitat de les mesures i planificar mostres personals addicionals.

3) Mesures periòdiques

S'estableix un calendari ajustable de mesures personals periòdiques en el GHE, i s'augmenta la freqüència amb la proximitat al valor límit, fent servir unitats de temps iguals o inferiors a setmanes, i segons quina sigui la feina habitual en la unitat, el tipus de valor límit (mitjana de vuit hores o valor de curta durada) i el temps de resposta del laboratori. La periodicitat inicial (calendari bàsic) es fixa en vuit unitats de temps i es va modificant d'acord amb els resultats obtinguts en comparar el valor de mesura previ (C) amb el valor límit (VL), i es prenen les decisions que es resumeixen en la taula 6.

Taula 6. Decisions possibles

Situació	Resultat de les mesures periòdiques	Decisió
1	$C \leq 0,4VL$, dues vegades consecutives	Les tres mesures programades següents no s'efectuen.
2	$C \leq 0,7VL$	Es continua amb el calendari bàsic.
3	$0,7VL < C \leq 1,5VL$	Una mesura addicional durant la unitat de temps establerta.
4	$0,7VL < C \leq 1,5VL$, per dues unitats de temps consecutives	Una mesura addicional en cadascun dels quatre intervals programats següents. Si els intervals són unitats de temps, s'han d'aplicar accions immediates per a reduir l'exposició.
5	$1VL < C \leq 1,5VL$, dues vegades consecutives	Actuació immediata per a reduir l'exposició.
6	$C > 1,5VL$	Actuació immediata per a reduir l'exposició.

Nota

En les situacions 3 i 4, si $C > 1VL$ s'han d'identificar les raons per les quals el valor límit s'ha excedit i prendre les accions apropiades per a remeiar la situació tan aviat com sigui possible.

Exemple

S'ha establert un calendari bàsic de mesures dins d'un grup homogeni d'exposició en un procés continu de treball en una secció de pintada d'una indústria automobilística. Les mesures consisteixen en mostrejos de vuit hores un dia de la setmana durant vuit setmanes. Quines decisions s'han de prendre segons els resultats següents, per a un contaminant de $VL = 1$?

1) Concentracions: 0,3; 0,2

Es poden suprimir les tres mesures programades següents.

2) Concentracions: 0,6; 0,6; 0,5; 0,2; 0,5; 0,5; 0,6; 0,5

Cal continuar amb el calendari bàsic.

3) Concentracions: 0,8; 1,2

Cal fer una mesura addicional durant la setmana.

4) Concentracions: 0,8; 1,2; 0,8; 1,2

Cal aplicar mesures immediates per a reduir l'exposició.

5) Concentracions: 1,2; 1,4

Cal aplicar mesures immediates per a reduir l'exposició.

6) Concentracions: 1,8

Cal aplicar mesures immediates per a reduir l'exposició.

3.3. Guia tècnica de l'INSHT (2003)

La Guia tècnica per a l'avaluació i prevenció dels riscos presents als llocs de treball relacionats amb agents químics de l'INSHT va ser publicada l'any 2003.

L'objectiu de la Guia és proporcionar criteris i recomanacions que poden facilitar als empresaris i als responsables de prevenció la interpretació i aplicació del Reial decret 374/2001, de 6 d'abril, sobre la protecció de la salut i seguretat dels treballadors contra els riscos relacionats amb els agents químics durant la feina, especialment pel que fa a l'avaluació de riscos per a la salut dels treballadors involucrats i pel que fa a mesures preventives aplicables.

Per a aconseguir aquest objectiu, la Guia proporciona eines per a identificar les situacions de risc per exposició o presència d'agents químics perillosos amb la finalitat de facilitar les accions preventives que cal prendre i proposa procediments específics d'avaluació del risc. Així mateix, proposa procediments de mesura per als supòsits en què sigui necessari per a avaluar el risc i, concretament, en l'apèndix 4, "Mètode d'avaluació de l'exposició a agents químics per inhalació", es reproduïx una part important de la norma UNE 689.

Guia tècnica de l'INSHT

En el moment de redactar aquest mòdul (maig del 2012), la Guia es troba en període de revisió, motiu pel qual no en detallarem el contingut, sinó que ens hi referirem solament de manera general.

Lectura recomanada

La Guia tècnica per a l'avaluació i prevenció dels riscos presents als llocs de treball relacionats amb agents químics (accessible en línia) es pot baixar en PDF.

3.4. Proposta BOHS 2011

La British Occupational Hygiene Society (BOHS), juntament amb Nederlandse Vereniging voor Arbeidshygiëne (NVvA), va publicar el 20 de desembre del 2011 el document *Testing compliance with occupational exposure limits for airborne substances*, preparat per un grup de treball d'ambdues societats, que es pot considerar com l'aportació més actual (maig del 2012).

Lectura recomanada

El document *Testing compliance with occupational exposure limits for airborne substances* (accessible línia) es pot baixar en PDF.

L'objectiu de la Guia és proporcionar una orientació sobre el compliment o no de límits d'exposició laboral per vuit hores (LEP) de les substàncies presents a l'aire. Es parteix de la idea que ja s'ha dut a terme un estudi general de lloc de treball i que se n'ha conclòs la necessitat d'aquesta comprovació.

Com hem comentat, el problema és que els LEP es defineixen generalment com a límits que no han de ser superats, però la variabilitat de l'exposició implica que ocasionalment es produeixin resultats per sobre del LEP, tot i que l'exposició la puguem considerar controlada. La Guia assumeix que es compleix un LEP si la probabilitat de superar-lo és inferior al 5%, i recorda sempre que la legislació exigeix que les mesures eficaces de control s'apliquin encara que el límit d'exposició es compleixi.

La Guia consta de quatre capítols i un apèndix:

- 1) Primer capítol: "Conducting a survey for exposure evaluation"
- 2) Segon capítol: "The problem of variability"

3) Tercer capítol: “Recommended method of measuring compliance”

4) Quart capítol: “Shortcuts and their limitations”

5) Apèndix: “Calculations for the group and individual compliance tests”

3.4.1. Primer capítol: “Conducting a survey for exposure evaluation”

Està dedicat als aspectes inicials de l'avaluació dels llocs de treball, i fa referència als mètodes de bandes de conformitat (*control banding*) per a l'avaluació inicial de riscos, als LEP de referència i als mètodes de presa de mostres i anàlisis existents.

Bandes de conformitat

Els models simplificats d'avaluació del risc per exposició a agents químics s'utilitzen per a obtenir una estimació inicial del risc i poden permetre discriminar una situació acceptable d'una situació no acceptable i, en aquest segon cas, a més poden permetre evidenciar situacions clares de risc, per a les quals es poden prendre mesures preventives abans o en lloc de passar a avaluar el risc de manera més exhaustiva, de manera que s'eviten costos innecessaris. Entre els mètodes existents, la Guia recomana la utilització de l'**Stoffenmanager**.

3.4.2. Segon capítol: “The problem of variability”

Està dedicat a l'estudi de la variabilitat dels resultats dels mostrejos, exposat amb anterioritat. També s'hi inclouen diferents programes de càlcul per a dur a terme les avaluacions.

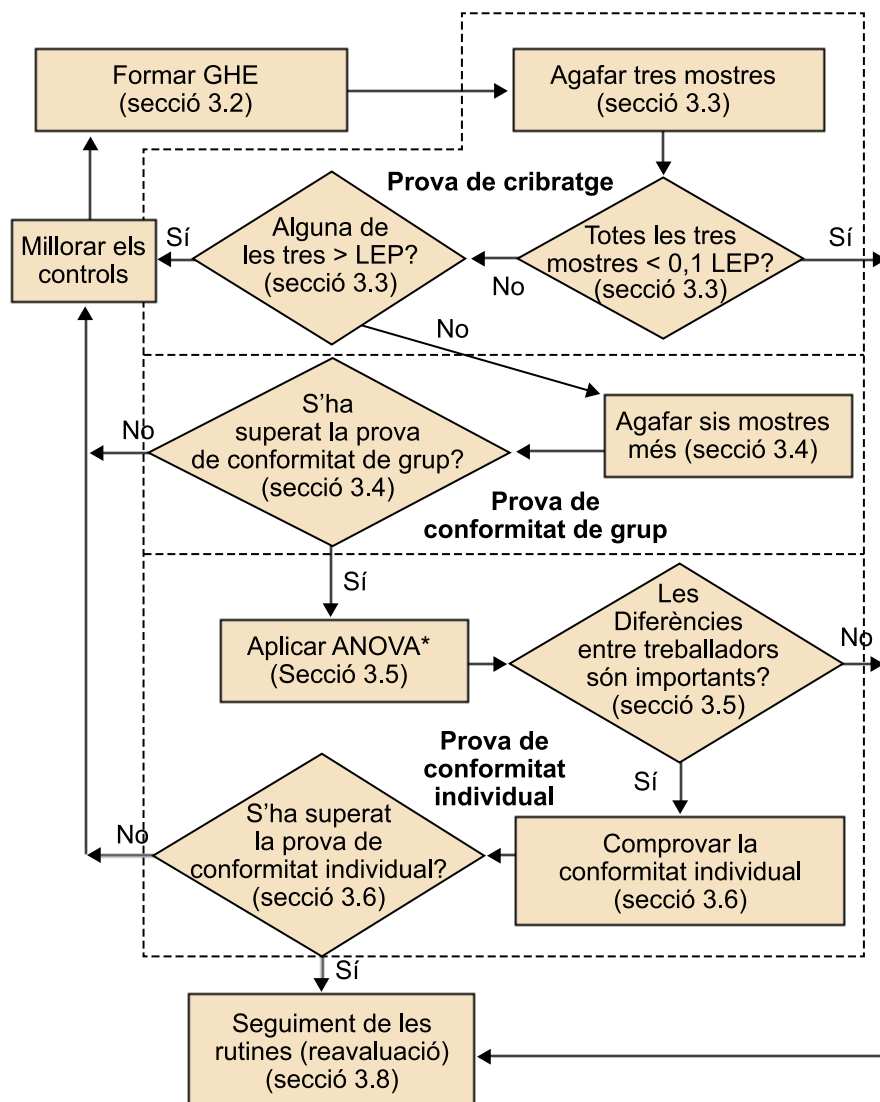
Programes de càlcul

- IHSTAT (AIHA)
- HYGINIST (Holanda)
- IHDataAnalyst (Paul Hewett)
- AltrexChimie (INRS)

3.4.3. Tercer capítol: “Recommended method of measuring compliance”

Està dedicat al mètode proposat, que consta de cinc passos, i que resumim a continuació. Presentem el diagrama del mètode en la figura 7.

Figura 7. Esquema del procediment proposat per BOHS



* ANOVA: Anàlisi de variància

Font: adaptada de BOHS; NVvA (2011). *Testing compliance with occupational exposure limits for airborne substances*.

1) Formar els GHE.

2) Dur a terme tres mesures personals representatives de l'exposició a l'atzar en el GHE. Si les tres exposicions són inferiors a 0,1LEP, es pot suposar que el LEP es compleix. Si en aquesta etapa, o després de qualsevol mesura representativa, s'obté un valor superior al LEP, el LEP no es compleix.

3) Fer un test de compliment del GHE. Per a això, s'han de prendre un mínim de sis mostres més en el GHE, almenys, de dos treballadors escollits a l'atzar. Utilitzar, com a mínim, les nou mostres per a aplicar un test que estableixi, amb un nivell de confiança del 70%, que hi ha una probabilitat inferior al 5% que l'exposició determinada a l'atzar dins del GHE sigui superior al LEP. Si no se supera, es conclou que no es compleix i s'han d'augmentar les mesures de control.

4) Si se supera, s'ha de dur a terme una anàlisi de variància de les nou (o més) mesures efectuades per a determinar si la variància entre els treballadors és superior a 0,2 vegades la variància total. Si és així, es continua amb el pas 5. En cas contrari, significa que no s'ha format correctament el GHE i s'ha de tornar a iniciar l'estudi.

5) Analitzar els nou (o més) resultats per a fer una prova de compliment individual. Ha de resultar que la probabilitat que qualsevol individu del GHE tingui més d'un 5% de les exposicions superiors al LEP sigui inferior al 20%.

Si el LEP no es compleix, s'han de potenciar les accions de control. Si es compleix, s'ha d'iniciar un programa de control periòdic, amb una freqüència que s'estableix segons els resultats de la prova i, concretament, en la proximitat de la mitjana geomètrica (MG) al valor del LEP:

- Si $GM < 0,1LEP$: dos anys
- Si $0,1LEP < GM < 0,25LEP$: un any
- Si $0,25LEP < GM < 0,5LEP$: sis mesos
- Si $0,5LEP < GM$: tres mesos

3.4.4. Quart capítol: "Shortcuts and their limitations"

Està dedicat a proposar mètodes directes (dreceres) per a arribar a conclusions efectives sobre l'avaluació, sense haver de recórrer als sistemes de càlcul més complexos:

- 1) Prendre unes poques mostres del treballador més exposat i utilitzar un programa d'avaluació.
- 2) Prendre poques mostres i veure si són inferiors al valor $LEP/3$.
- 3) AIHA i Bayes.

3.4.5. Apèndix: "Calculations for the group and individual compliance tests"

Es presenten dos mètodes de càlcul de compliment, l'SPEED i un altre de basat en el full de càlcul Excel, que s'exposa detalladament en el mateix text.

Vegeu també

Els mètodes d'AIHA i Bayes s'exposen en el subapartat 3.5 d'aquest mòdul didàctic.

Exemple

Seguint el procediment "Recommended method of measuring compliance" establert pel document *Testing compliance with occupational exposure limits for airborne substances*, indicarem la periodicitat amb la qual s'han de dur a terme les determinacions en un GHE, del qual s'ha comprovat prèviament la idoneïtat, en les circumstàncies següents:

1) Un valor de $I > LEP$: augmentar les mesures de control (corregir)

2) Un valor de $I < LEP$ i:

- $GM < 0,1LEP$: cada dos anys
- $0,1LEP < GM < 0,25LEP$: cada any
- $0,25LEP < GM < 0,5LEP$: cada sis mesos
- $GM > 0,5LEP$: cada tres mesos

3.5. Metodologies basades en el teorema de Bayes

En la seva manera habitual de procedir, els higienistes prenen decisions sobre la necessitat d'adoptar mesures preventives addicionals en una situació concreta, tenint en compte els resultats dels mostrejos ambientals i les observacions efectuades sobre diferents aspectes de la situació. La integració d'ambdós tipus d'informacions ha estat tradicionalment informal; per aquest motiu, en les definicions antigues, la *higiene industrial* es denominava *ciència i art*.

Entre les observacions que s'inclouen en les característiques observables del procés es troben les apreciacions sobre l'existència i qualitat dels sistemes de ventilació, les característiques del procés de generació del contaminant (projectat violentament o alliberat lentament, per exemple), el grau de neteja del local, les dades sobre altres llocs de treball similars i molts altres paràmetres que l'higienista sol observar.

El problema de l'escassetat de recursos per a prendre un nombre de mostres prou elevat per a poder concloure a partir dels resultats obtinguts si la situació és acceptable o requereix l'adopció de mesures preventives ha comportat en els últims anys diverses propostes orientades a permetre prendre decisions fent servir d'una manera formalitzada no sols els resultats de les mesures, sinó també les observacions empíriques sobre la situació efectuades per l'higienista.

Higiene industrial

Actualment, la International Occupational Hygiene Association (IOHA) defineix la *higiene industrial* com la disciplina d'anticipar, identificar, avaluar i controlar els perills per a la salut en el medi ambient de treball amb l'objectiu de protegir la salut i el benestar del treballador i protegir la comunitat en conjunt.

Es tracta encara de propostes que són lluny de constituir un cos de doctrina consolidat, per la qual cosa no les descriurem amb detall, si bé s'ha de fer constatar que estan despertant un gran interès entre els professionals, pressionats per prendre decisions "justificables" fent servir un mínim de recursos.

Aquestes propostes utilitzen sistemes de càlcul basats en el conegut **teorema de Bayes** o de la **probabilitat de les hipòtesis**, que es pot trobar en els manuals d'estadística.

Essencialment, el teorema de Bayes dóna la fórmula que, quan un succeís B s'ha produït i no pot ser provocat més que per la intervenció d'una de les m causes qualsevol $A_1, A_2, \dots, A_k, \dots, A_m$, permet calcular la probabilitat que l'esdeveniment B en qüestió hagi estat efectivament provocat per la intervenció de A_1 o per $A_2 \dots$ o per A_m .

La complexitat dels càlculs que cal fer exigeix sempre que es duguin a terme mitjançant un ordinador fent servir algun dels programes de càlcul existents al mercat. En alguns casos aquests programes es poden baixar gratuïtament d'Internet, si bé les prestacions de les versions gratuïtes solen ser limitades respecte a les versions comercials disponibles.

L'aplicació d'aquestes tècniques requereix establir prèviament unes **bandes de conformitat** (per exemple, situació acceptable, situació dubtosa, situació inacceptable) i permet concloure quina és la probabilitat que la situació es trobi en cadascuna d'aquestes bandes.

Només l'experiència permetrà verificar si aquestes tècniques i d'altres de semblants són eficaces en el compliment de la missió bàsica de la higiene industrial: la protecció de la salut dels treballadors.

Lectures complementàries

Els lectors interessats poden consultar la bibliografia especialitzada. Per exemple:

G. Ramachandran (2008b). "Bayesian thinking in exposure assessment". *The Occup. Hyg. Newsletter* (vol. 4, núm. 21, pàg. I-IV).

P. E. Sottas i altres (2009). "An empirical hierarchical bayesian unification of occupational exposure assessment methods". *Statist. Med.* (núm. 28, pàg. 75-93).

Programes de càlcul accessibles

- Exposure Assessment Solutions, Inc.
- Institute for Work and Health

Resum

A tall de resum del que hem exposat fins aquí, s'haurien de retenir les conclusions següents:

- La variabilitat dels resultats de les mesures de la concentració ambiental fa impossible verificar amb **certesa absoluta** si en una situació determinada es respecta o no el valor límit ambiental aplicable. Per aquest motiu a la pregunta de si es respecta (o no) el valor límit, només és possible respondre científicament en termes de probabilitat.
- Les diferents estratègies disponibles es diferencien en el nivell de certesa que exigeixen per a arribar a una conclusió. L'elecció entre una o l'altra, al marge d'obligacions legals, s'ha de fer segons el nivell de certesa que es vulgui aconseguir.
- És molt freqüent que arribar a una conclusió amb un nivell de certesa elevat exigeixi, sigui quina sigui l'estratègia de mostreig triada, prendre un nombre considerable de mostres, la qual cosa representa un cost important.
- Com que en tot cas l'aplicació d'una estratègia de mostreig que permeti concloure amb un nivell elevat de certesa és un procés costós, és recomanable verificar prèviament que s'han implementat les mesures **raonables** de control. A aquesta verificació prèvia poden contribuir sense gairebé cap cost els procediments abreujats d'avaluació que es coneixen amb el nom de **bandes de conformitat** (*control banding*).

Exercicis d'autoavaluació

Exercicis

1. Per a avaluar l'exposició a diòxid de sofre s'han pres, en tres dies successius, dotze mostres de 15 minuts a raó de quatre mostres cada dia. Els resultats, expressats en ppm, són els següents:

- Dia 1: 2,0 – 2,9 – 1,9 – 3,8
- Dia 2: 3,0 – 2,9 – 4,2 – 4,6
- Dia 3: 1,0 – 2,0 – 1,6 – 1,8

Fent servir el programa IHSTAT, calculeu el valor més probable de la mitjana i el seu interval de confiança amb un nivell de confiança del 95% considerant:

- a) Només els resultats del primer dia.
- b) Els resultats dels dies 1 i 2.
- c) Els resultats dels tres dies.

2. Amb les mateixes dades del problema anterior, calculeu amb el mateix programa i en els casos a, b i c el percentatge de mostres que superaran el valor límit i el seu interval de confiança.

3. Preneu les dades del problema 1 per al conjunt dels tres dies. Es tracta de trobar per quin factor (inferior a 1) caldria multiplicar totes les concentracions perquè el percentatge màxim de mostres que superaran el valor límit no superi el 5%. Quin seria el valor més probable de la mitjana en aquest cas?

Preguntes obertes

4. Per què teòricament els resultats de les mostres ambientals no es poden distribuir segons una llei normal?
5. Quins canvis va induir en les pràctiques dels higienistes la promulgació el 1970 de la Llei OSHA?
6. En quines condicions es poden obtenir conclusions sobre el compliment del valor límit en una jornada, prenent molt poques mostres?

Elecció múltiple

7. En general, els valors de la concentració ambiental deduïts de les mostres ambientals preses en un lloc de treball...

- a) es distribueixen segons una llei log-normal.
- b) es distribueixen segons una llei normal.
- c) no segueixen cap llei definida.
- d) es distribueixen segons una llei log-normal només si es compleixen certes condicions.

8. Perquè els valors de la concentració ambiental deduïts de les mostres ambientals preses en un lloc de treball es distribueixin segons una llei log-normal és necessari que...

- a) les mostres es prenguin simultàniament.
- b) siguin de caràcter personal.
- c) siguin aproximadament de la mateixa durada.
- d) s'analitzin al mateix laboratori.

9. Si després de prendre una sèrie de mostres concloem que la desviació estàndard geomètrica de la seva distribució és superior a 3, haurem de deduir que...

- a) ens hem equivocat.
- b) és un resultat normal.
- c) es tracta d'un procés molt poc variable.
- d) es tracta d'un procés mal controlat.

10. Perquè el percentatge de mostres de jornada completa que no superi el valor límit no sigui superior al 5% és necessari que la mitjana de la distribució sigui...

- a) superior al valor límit.
- b) inferior al 25% del valor límit.
- c) inferior al 50% del valor límit.
- d) No és possible saber-ho sense conèixer el valor de GSD.

11. Les estratègies de mostreig tenen com a objectiu general...

- a) conèixer el valor real de la concentració amb la màxima exactitud.
- b) minimitzar el cost del mostreig.
- c) minimitzar el risc de sancions de l'Administració.
- d) b) i c) simultàniament.

12. La principal limitació de l'estratègia del NIOSH era que...

- a) no detectava gaires situacions inacceptables.
- b) era molt complicada.
- c) era molt cara.
- d) no considerava l'evolució de la situació a llarg termini.

13. Quin és el valor màxim de la concentració de la primera mostra que, per a l'estratègia del NIOSH, permet concloure que no se supera el valor límit?

- a) El 5% del valor límit.
- b) El 15% del valor límit.
- c) El 30% del valor límit.
- d) El 50% del valor límit.

14. S'ha determinat l'índex d'exposició a TDI (diisocianat de toluè) durant una jornada laboral d'un treballador exposat a aquest producte, i s'ha obtingut com a resultat un valor de 0,09. Quina és l'acció adequada, segons aquest resultat?

- a) Donar-lo per bo; no hi ha risc.
- b) Comprovar si les condicions d'exposició són repetitives i, si és així, considerar que la probabilitat que hi hagi una exposició $I > 1$ és molt petita.
- c) Prendre dues mostres més, ja que així ho estableix l'annex corresponent de la norma UNE-EN 689.
- d) Corregir. Cal tenir en compte que qualsevol exposició a TDI amb $I > 0$ ha de ser considerada perillosa per l'important efecte sensibilitzant que té.

15. S'ha determinat l'índex d'exposició a 2-hexanona durant tres jornades laborals a treballadors d'un GHE exposats a aquest producte, i s'ha obtingut com a resultat un valor de 0,3, 1,1 i 0,3. Quina és l'acció adequada, segons aquest resultat?

- a) Cal corregir, ja que un dels índexs és superior a 1.
- b) La situació és correcta, ja que la mitjana geomètrica (MG) és $< 0,5$.
- c) La situació és indefinida ja que la mitjana geomètrica és $> 0,5 < 1$.
- d) Cal corregir, ja que la mitjana geomètrica és > 1 .

16. La norma UNE-EN 689...

- a) és d'obligat compliment a Espanya perquè està específicament esmentada en l'RD 374/2001.
- b) és d'obligat compliment a Espanya perquè està específicament esmentada en la Guia de l'RD 374/2001.
- c) és simplement una recomanació que proposa metodologies i posa exemples de la manera com cal abordar l'estratègia de mostreig.
- d) està actualment descatalogada.

Solucionari

Exercicis d'autoavaluació

1.a) Amb els resultats del primer dia s'obté una mitjana de 2,65 i un interval de confiança d'1,96-4,69.

b) Amb els resultats dels dies 1 i 2 s'obté una mitjana de 3,17 i un interval de confiança de 2,6-4,1.

c) Amb els resultats dels tres dies, s'obté de mitjana 2,65 i un interval de confiança de 2,1-3,5.

A mesura que augmenta el nombre de mostres, l'interval tendeix a estreñyer-se. Si el valor límit fos, per exemple, 4 ppm, no podríem assegurar que probablement (amb un nivell de confiança del 95%) no se supera, fins a arribar al tercer dia.

2.a) Amb els resultats del primer dia, s'obté que el valor més probable del percentatge de mostres que superaran el valor límit és el 8,7%, amb un interval de confiança de 0,6-46.

b) Amb els resultats dels dies 1 i 2, s'obté que el valor més probable del percentatge de mostres que superaran el valor límit és el 19,3%, amb un interval de confiança de 6-44.

c) Amb els resultats dels tres dies, s'obté que el valor més probable del percentatge de mostres que superaran el valor límit és el 13,1%, amb un interval de confiança de 4-31%.

3. Si es redueixen totes les concentracions en un 50%, es conclou que el percentatge de mostres que superarà el valor límit serà del 0,4%, amb un interval de confiança $< 0,1-5,5\%$. En aquest cas, doncs, sabrem que, amb un 95% de confiança, no més del 5,5% de les mostres superarà el valor límit. El valor estimat de la mitjana es redueix també un 50% (abans era de 2,65, vegeu el problema 1) i se situa en 1,32.

4. Perquè la concentració no pot ser negativa, i la llei normal està definida per a valors de x tant positius com negatius. A la pràctica, per a distribucions log-normals que siguin poc disperses (GSD petits), la diferència entre la distribució log-normal i la normal és petita. Observem en la figura 2 que la llei log-normal amb $GSD = 1,2$ té un aspecte molt semblant a la llei normal de la figura 1.

5. Els va induir a substituir el control de les exposicions a llarg termini per estratègies orientades a curt termini, ja que aquesta Llei exigia que els valors límit que establia es respectessin cada dia.

6. Estudiant detalladament el procés que implica l'exposició a agents químics per via inhalatòria i prenent mostres en els moments més desfavorables (de més exposició). Si del resultat es dedueix que no hi ha exposició o és molt baixa, es pot concloure que en el conjunt de la jornada serà petita.

7. a

8. c

9. d

10. b

11. d

12. a

13. d

14. b

15. a

16. c

Bibliografia

Aguilar, J. i altres (2010). *Riesgo químico. Sistemática para la evaluación higiénica*. Madrid: INSHT.

Armstrong, B. G. (1991). "Confidence intervals for arithmetic means of lognormally distributed exposures". *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.* (vol. 8, núm. 53, pàg. 481-485).

Attfield, M. D.; Hewett, P. (1992). "Exact expressions for the bias and variance of estimators of the mean and lognormal distribution". *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.* (núm. 53(7), pàg. 432-435).

Bar-Shalom, Y.; Segall, A.; Budenaers, D. (1976). "Decision and estimation procedures for air contaminants". *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.* (vol. 8, núm. 37, pàg. 469-473).

Burdorf, A.; Tongeren, M. van (2003). "Variability in workplace exposures and the design of efficient measurement and control strategies". *Ann. Occup. Hyg.* (vol. 2, núm. 47, pàg. 95-99).

Corn, M. (1985). "Strategies of air sampling". *Scand J. Work Environ Health* (vol. 3, núm. 11, pàg. 173-180).

Filliben, J. J. (1975). "The probability plot correlation coefficient test for normality". *Technometrics* (núm. 17, pàg. 111-117).

Hewett, P. (1997). "Mean testing I: Advantages and disadvantages". *Appl. Occup. Environ. Hyg.* (vol. 5, núm. 12, pàg. 339-355).

Hewett, P. (2001). "Industrial Hygiene exposure assessment – Data analysis and interpretation". A: Alaimo, R. J. (editor). *Handbook of chemical health and safety* (cap. 16). ACS Oxford University Press.

Hewett, P. i altres (2006). "Rating exposure control using bayesian decision analysis". *J. Occup. Env. Hyg.* (vol. 10, núm. 3, pàg. 568-581).

Hewett, P.; Ganser, G. H. (1997). "Simple procedures for calculating confidence intervals around the sample mean and exceedance fraction derived from lognormally distributed data". *Appl. Occup. Environ. Hyg.* (vol. 2, núm. 12, pàg. 132-142).

Land, C. E. (1975). "Tables of confidence limits for linear functions of the normal mean and variance". A: H. Harter; D. Owen (ed.). *Selected tables in mathematical statistics* (vol. III; pàg. 385-419).

Leidel, N. A.; Busch, K. A.; Lynch, J. R. (1977). "Occupational exposure sampling strategy manual". *DHEW (NIOSH) Publication* (núm. 77-173).

Limbert, E.; Stahel, W. A.; Markus, A. (2001). "Log-normal distributions across the sciences: keys and clues". *Bioscience* (vol. 5, núm. 51, pàg. 341-352).

Nicas, M.; Simmons, B. P.; Spear, R. C. (1991). "Environmental versus Analytical variability in Exposure Measurements". *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.* (vol. 12, núm. 52, pàg. 553-557).

NIOSH (1972). "Occupational exposure to carbon monoxide". *NIOSH HSM 73-1100. VIII-2*. GPO No 1733-00006.

Odeh, R. E.; Owen, D. B. (1980). *Statistics: textbooks and monographs series, volume 32 - Tables for normal tolerance limits, sampling Plans and screening*.

Oldham, P. (1953). "The nature of the variability of dust concentrations at the coal face". *Br. J. Ind. Med.* (núm. 10, pàg. 227-234).

Ramachandran, G. (2008a). "Toward Better Exposure Assessment Strategies - The New NIOSH Initiative". *Ann. Occup. Hyg.* (vol. 5, núm. 52, pàg. 297-301).

Ramachandran, G. (2008b). "Bayesian thinking in exposure assessment". *The Occup. Hyg. Newsletter* (vol. 4, núm. 21, pàg. I-IV).

Rappaport, S. M. (1984). "The Rules of the Game: An Analysis of OSHA's Enforcement Strategy". *Am. J. Ind. Med.* (núm. 6, pàg. 291-303).

Rappaport, S. M. (1991). "Assessment of long-term exposures to toxic substances in air". *Ann. Ocup. Hyg.* (vol. 1, núm. 35, pàg. 61-121).

Rappaport, S. M. (2009, juliol). "Assessing workplace exposures: turning to the past for guidance". *Occup. Env. Med.* (vol. 7, núm. 66, pàg. 429-430).

Rappaport, S. M.; Kromhout, H.; Symanski, E. (1993). "Variation of Exposure between Workers in Homogeneous Exposure Groups". *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.* (núm. 54, pàg. 654-662).

Royston, P. (1993). "A pocket-calculator algorithm for the Shapiro-Francis test for non-normality: an application to medicine". *Statistics in Medicine* (núm. 12, pàg. 181-184).

Sottas, P. E. i altres (2009). "An empirical hierarchical bayesian unification of occupational exposure assessment methods". *Statist. Med.* (núm. 28, pàg. 75-93).

Spear, R. C.; Selvin, S.; Francis, M. (1986). "The influence of averaging time on the distribution of exposures". *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.* (núm. 47, pàg. 365-368).

Tuggle, R. M. (1981). "The NIOSH decision scheme". *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.* (núm. 42, pàg. 493-498).

Vicén Carreño, M.; Bernal Domínguez, F. (1998). "Estudio de la fiabilidad del método propuesto en el apéndice C de la Norma UNE-EN 689 para la evaluación de la exposición de los trabajadores a contaminantes químicos". *Arch. Prev. Riesgos Labor.* (núm. 1, pàg. 22-32).

Zhou, X. H. (1998). "Estimating the mean value of occupational exposures". *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.* (vol. 11, núm. 59, pàg. 785-788).

Avaluació de la qualitat de l'ajust d'una sèrie de dades a una llei log-normal

Avaluar l'ajust d'un conjunt de dades a una llei de probabilitat és un problema clàssic d'estadística per a la solució del qual hi ha multitud de proves que es poden trobar en els manuals especialitzats. Per a valorar si un conjunt de dades s'ajusta a la llei log-normal, es recomana utilitzar la **prova de Filliben**, que és molt fàcil de fer utilitzant un simple full de càlcul. La prova de Filliben es pot aplicar per a un nombre de mostres entre 3 i 100. Per a valors superiors és recomanable utilitzar la **prova de Royston**. El procediment és el següent:

- 1) Ordenar de més petits a més grans els valors de la concentració obtinguts en les mesures.
- 2) Assignar a cadascun dels valors un nombre d'ordre i .
- 3) Calcular per a cada valor i el valor de la variable p_i definida com a:

$$p_i = (i - 0,375) / (n + 0,25)$$

en què i és el nombre d'ordre assignat al valor de què es tracti i n el nombre de valors.

- 4) Per a cada valor de p_i calcular el valor d'una variable normal centrada i reduïda t la probabilitat acumulada de la qual correspongui al valor de p_i (funció DISTR.NORM.ESTAND.INV d'Excel).
- 5) Calcular el logaritme de cadascun dels valors de la concentració.
- 6) Representar gràficament la relació entre els logaritmes de les concentracions (en ordenades) i els seus valors de t corresponents (en abscisses).
- 7) Dibuixar la recta de regressió i calcular el coeficient de regressió.

Si les dades es distribueixen log-normalment, s'observarà que el conjunt de punts del gràfic queda molt proper a la recta de regressió dibuixada. Sovint aquesta confirmació "visual" es considera suficient per a donar per bona la hipòtesi de log-normalitat.

La prova de Filliben permet objectivar el grau d'ajust, i per a això s'acceptarà la hipòtesi que les dades s'ajusten a una llei log-normal si el valor del coeficient de regressió és superior al que indica la taula 7 segons el valor de n .

Taula 7. Prova de Filliben per a determinar l'ajust a una llei log-normal. Valors de R que s'han de superar per a cada valor de n

N	R	n	R
3	0,879	32	0,966
4	0,868	33	0,967
5	0,880	34	0,968
6	0,888	35	0,969
7	0,898	36	0,969
8	0,906	37	0,970
9	0,912	38	0,971
10	0,918	39	0,971
11	0,923	40	0,972
12	0,928	41	0,973
13	0,932	42	0,973
14	0,935	43	0,974
15	0,939	44	0,974
16	0,941	45	0,974
17	0,944	46	0,975
18	0,946	47	0,976
19	0,949	48	0,976
20	0,951	49	0,976
21	0,952	50	0,977
22	0,954	55	0,979
23	0,956	60	0,980
24	0,957	65	0,981
24	0,959	70	0,983
26	0,960	75	0,984
27	0,961	80	0,985
28	0,962	85	0,985
29	0,963	90	0,986
30	0,964	95	0,987
31	0,965	100	0,987

En un estudi sobre la concentració ambiental de plom en una planta de repro-
cessament de metalls s'han trobat els valors (ja ordenats) que es representen
en la columna "Concentració" en la taula següent. En la columna de la dreta
s'han situat els valors corresponents de p_i i en la següent els valors de t calcu-
lats tal com s'ha indicat. En la columna següent s'han situat els valors dels
logaritmes neperians de les concentracions.

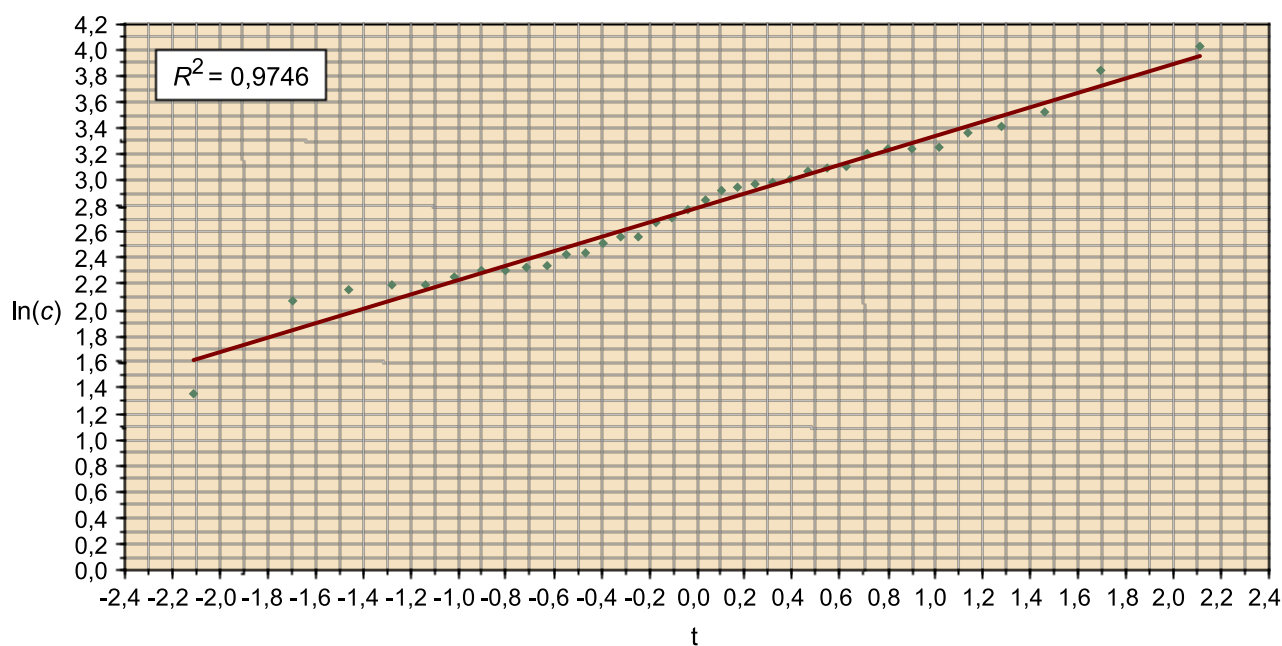
Taula 8

Núm. d'ordre	Concentració	p_i	t	$\ln(c)$
1	3,9	0,017241	-2,11438	1,360977
2	7,9	0,044828	-1,69722	2,066863
3	8,6	0,072414	-1,45805	2,151762
4	9	0,1	-1,28155	2,197225
5	9	0,127586	-1,13788	2,197225
6	9,5	0,155172	-1,0145	2,251292
7	10	0,182759	-0,9049	2,302585
8	10	0,210345	-0,80523	2,302585
9	10,2	0,237931	-0,71297	2,322388
10	10,4	0,265517	-0,62643	2,341806
11	11,3	0,293103	-0,54434	2,424803
12	11,4	0,32069	-0,46577	2,433613
13	12,4	0,348276	-0,38998	2,517696
14	12,9	0,375862	-0,31637	2,557227
15	13	0,403448	-0,24443	2,564949
16	14,4	0,431034	-0,17374	2,667228
17	15	0,458621	-0,10391	2,70805
18	15,9	0,486207	-0,03458	2,766319
19	17,1	0,513793	0,034581	2,839078
20	18,6	0,541379	0,103909	2,923162
21	19,1	0,568966	0,173741	2,949688
22	19,5	0,596552	0,244432	2,970414
23	19,6	0,624138	0,316367	2,97553
24	20,2	0,651724	0,389979	3,005683
25	21,5	0,67931	0,465771	3,068053
26	21,9	0,706897	0,544341	3,086487
27	22,2	0,734483	0,626428	3,100092

Núm. d'ordre	Concentració	p_i	t	$\ln(c)$
28	24,6	0,762069	0,712974	3,202746
29	25,4	0,789655	0,805225	3,234749
30	25,6	0,817241	0,904902	3,242592
31	25,7	0,844828	1,014499	3,246491
32	28,9	0,872414	1,137876	3,363842
33	30,4	0,9	1,281552	3,414443
34	34	0,927586	1,458047	3,526361
35	46,9	0,955172	1,697219	3,848018
36	56,4	0,982759	2,114381	4,032469

A continuació, s'ha representat el gràfic $\ln(c) - t$, la recta de regressió corresponent i el quadrat del coeficient de regressió (que és la variable que calcula l'Excel quan, tenint seleccionat el gràfic, es va a **Gràfic > Afegir línia de tendència > Lineal** i en opcions se selecciona **Presentar el valor de R quadrat en el gràfic**).

Figura 8. Captura del gràfic resultant



Com que en el gràfic es llegeix $R^2 = 0,9746$, resulta $R = 0,987$.

Segons la taula 7, per a $n = 36$ el valor màxim de R val 0,969, que és inferior a 0,987, per la qual cosa acceptarem la hipòtesi de log-normalitat.

Els valors de la taula 7 estan calculats per a un valor de $\alpha = 0,05$, la qual cosa significa que si la distribució és realment log-normal, només rebutjarem la hipòtesi que ho és en un 5% dels casos.

Observeu que la prova de Filliben també es pot utilitzar per a verificar si un conjunt de dades s'ajusta a una distribució normal. En aquest cas, el gràfic es traçaria amb els valors de la variable, i amb els seus logaritmes.