

Procedimiento estadístico para evaluar la exposición a mezclas de contaminantes químicos con efectos aditivos

Laborda, R.¹, Bernal, F.², Polanco, B.³

RESUMEN

El Higienista Industrial se encuentra en numerosas ocasiones con la necesidad de evaluar la exposición a mezclas de contaminantes químicos con efectos aditivos en el ambiente de trabajo. Para realizar correctamente esta evaluación se debe tener en cuenta la variabilidad espacio-temporal de las concentraciones, lo cual no es considerado por el método de evaluación propuesto para estos casos por la American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH) ni por el que aparece en el documento GT/LEP N03 sobre límites de exposición profesional para agentes químicos en España. Este trabajo presenta un método para estimar la exposición a una mezcla de agentes químicos con efectos aditivos teniendo en cuenta dicho concepto y permitiendo, a diferencia de los métodos antes citados, evaluar tanto la exposición *intradialaria* como la *interdialaria*, lo cual ofrece al higienista industrial una herramienta de trabajo no disponible hasta el momento.

PALABRAS CLAVE

Contaminantes químicos, efectos aditivos, mezclas, exposición laboral.

STATISTICAL PROCEDURE FOR EVALUATING EXPOSURE TO MIXTURES OF CHEMICAL CONTAMINANTS WITH ADDITIVE EFFECTS

SUMMARY

The Industrial Hygienist frequently needs to evaluate the exposure to chemical contaminant mixtures with additive effects in the working atmosphere. In order to realize correctly this evaluation, it must be considered the space-time concentrations variability, not considered by the evaluation method proposed for these cases by the American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH) and by the one that appears in document GT/LEP NO3 regarding to occupational exposure limits for chemicals in Spain. This paper presents a method to estimate the exposure to a chemicals mixture with additive effects considering this concept and making possible, in contrast to methods before aforementioned, to evaluate both *intradialy* exposure and *interdialy* exposure, offering to Industrial Hygienist a working tool not available at the moment.

KEY WORDS

Chemical contaminants, additive effects, mixtures, occupational exposure.

INTRODUCCIÓN

La valoración de la exposición a sustancias químicas en el ambiente de trabajo comporta siempre una notable complejidad que se hace más patente cuando se trata de evaluar la de mezclas de tales sustancias, lo que sucede con bastante frecuencia.

Los efectos que pueden ocasionar en el organismo humano los distintos componentes de una mezcla de agentes químicos, responden a cuatro tipos o modelos fundamentales: *independientes*, *aditivos*, *sinérgicos* e *inhibidores*. Los procedimientos de evaluación que habitualmente se utilizan en la práctica de la Higiene Industrial, como el que propone la *American Conference of Governmental Industrial Hygienists* (ACGIH) en su apéndice C, relativo a mezclas¹ o el que recoge el Documento GT/LEP N03 sobre *límites de exposición profesional para agentes químicos en España*², no tienen en cuenta aspectos tan esenciales como la variabilidad espacio-temporal de las concentraciones, por lo que las conclusiones obtenidas a partir de tales métodos carecen por completo de rigor y, en consecuencia, no se hallan exentas de error. La especificidad que caracteriza a los contaminantes químicos con efectos *sinérgicos* o *inhibidores* (estos últimos muy raros en el medio laboral) imposi-

¹ Ford España, S. A. Higiene y Toxicología Industrial. Valencia

² Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo. Centro Nacional de Condiciones de Trabajo. Barcelona.

³ Asepeyo. Valencia

Correspondencia:

Roberto Laborda Grima

Ford España, S. A.

Higiene y Toxicología Industrial (AS/RI-51)

46440 Almusafes (Valencia)

Trabajo recibido el 19-X-99. Aceptado el 25-1-00.

bilita, por el momento, el desarrollo de un método general orientado a evaluar la exposición a mezclas de este tipo de sustancias, siendo necesario considerar de forma individual cada nueva situación de tales características que pueda presentarse. Por otra parte, la evaluación de mezclas de contaminantes con efectos *independientes*, se reduce a valorar la exposición a cada componente por separado, pudiendo utilizarse el método propuesto en la norma UNE-EN 689/1996 para un solo contaminante, que es sobradamente conocido por los higienistas industriales.

De acuerdo con las consideraciones reseñadas, este trabajo trata de presentar un método estadístico que permita abordar, con el máximo rigor posible, el problema de valorar la exposición a mezclas de sustancias químicas con efectos *aditivos*, teniendo en cuenta la variabilidad espacio-temporal de sus concentraciones en la atmósfera de trabajo.

Características de las distribuciones de concentración de las mezclas de agentes químicos con efectos aditivos

El modelo de mezcla de sustancias químicas con efectos aditivos es uno de los que con más frecuencia puede plantearse en el medio laboral. La evaluación de la exposición a esta clase de mezclas debe realizarse siempre considerando la totalidad de las sustancias implicadas.

Sea una mezcla binaria formada por las sustancias A y B, cuyos efectos en el organismo responden al modelo *aditivo*. Si tanto A como B tuvieran el mismo valor límite, la concentración de A en un espacio y en un momento dado (a_i) más la concentración de B en ese mismo espacio y momento (b_i) provocarían un efecto igual al de la suma de ambas concentraciones ($a_i + b_i$) o, lo que es lo mismo, el efecto sería equivalente al que produciría una cualquiera de ellas si se presentara con una concentración igual a la suma de ambas³. Lo indicado para una mezcla binaria se considera válido para una mezcla de n contaminantes.

Se admite que las concentraciones de las sustancias que constituyen una mezcla A $\{a_1, a_2, \dots, a_n\}$, B $\{b_1, b_2, \dots, b_n\}$, ... Z $\{z_1, z_2, \dots, z_n\}$ siguen una distribución log-normal. Este hecho se basa en que los valores de la variable *concentración* son el resultado de la influencia de un gran número de factores independientes entre sí, de incidencia *uniformemente insignificante* y de signo equiprobable, que actúan de forma multiplicativa⁴.

La variación aleatoria provocada por la acción de un determinado factor es proporcional al valor que toma la variable aleatoria en el momento en que tiene lugar esa acción. Así, la concentración de una sustancia en aire, en un momento y lugar determinados, depende de factores tales como la velocidad de generación de la sustancia, temperatura ambiente, temperatura y presión del foco generador, dirección de las corrientes de aire, velocidad del aire, situación relativa del foco emisor respecto al punto de medida, etc., de manera que los mecanismos físicos que relacionan entre sí estos factores cumplen las condiciones que justifican teóricamente el modelo log-normal para describir la distribución de las cifras de concentración en el aire.

Por otra parte, son numerosos los investigadores que, en los últimos cincuenta años, han puesto de relieve, de

forma contundente, esta característica de las concentraciones ambientales de los agentes químicos^{5,9}, constituyendo un argumento de autoridad aceptado tanto por higienistas como por estadísticos.

Características de la «distribución mezcla» (m)

Volviendo de nuevo a la mezcla binaria formada por los compuestos A y B y teniendo en cuenta que cada uno de ellos tiene por lo general un valor límite diferente, se recomienda utilizar la llamada *concentración relativa*, obtenida como cociente entre los valores de concentración de cada uno de los componentes (a_i) y (b_i) de la mezcla y su correspondiente valor límite (L_i).

Con esta simple transformación se consigue independizar las distribuciones, de la naturaleza de las sustancias. Ahora bien, como los valores límite L_i son constantes, las distribuciones obtenidas seguirán siendo log-normales, de modo que se tendrá: $A_r \{a_1/L_A, a_2/L_A, \dots, a_n/L_A\}$ y $B_r \{b_1/L_B, b_2/L_B, \dots, b_n/L_B\}$. Llamando $\alpha_i = a_i/L_A$ y $\beta_i = b_i/L_B$, las dos distribuciones relativas toman la siguiente forma: $A_r \{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n\}$ y $B_r \{\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n\}$.

Sobre la hipótesis de que ambos contaminantes presentan efectos aditivos y habida cuenta de que se han independizado las concentraciones de la naturaleza de las sustancias, se asume que la concentración relativa global en un espacio y en un instante determinado es equivalente a la suma de las concentraciones relativas de ambas sustancias presentes en el espacio y en el tiempo considerado. Según esto se obtiene la *distribución mezcla m*, cuyos términos son: $m \{(\alpha_1 + \beta_1), (\alpha_2 + \beta_2), \dots, (\alpha_n + \beta_n)\}$. Llamando $m_i = (\alpha_i + \beta_i)$, la distribución considerada toma la forma: $m \{m_1, m_2, \dots, m_n\}$. Este razonamiento puede generalizarse a una mezcla de z contaminantes A, B, ... Z, con n valores de concentración cada uno, que conducirán a una *distribución mezcla* de tipo $m \{(\alpha_1 + \beta_1 + \dots + \omega_1), (\alpha_2 + \beta_2 + \dots + \omega_2), \dots, (\alpha_n + \beta_n + \dots + \omega_n)\}$ o lo que es lo mismo, $m \{m_1, m_2, \dots, m_n\}$. Al independizar las concentraciones de la naturaleza de las sustancias, la *distribución mezcla m* puede asimilarse a la procedente de un solo contaminante, que como se indicó es log-normal. Cada uno de los términos de la distribución m viene definido por la variable $m_i = \alpha_i + \beta_i + \dots + \omega_i$, que representa la suma de las concentraciones relativas de cada uno de los componentes de la mezcla presentes simultáneamente en un espacio y en un tiempo determinados. Como el valor que toma la variable m_i está sujeto a la influencia de los mismos factores independientes que actúan de forma multiplicativa sobre cada una de las sustancias individualmente consideradas, puede afirmarse que el comportamiento de la citada variable será asimismo log-normal, lo que puede fácilmente constatarse de modo empírico mediante pruebas de simulación.

MÉTODO

El método que se propone para estimar la exposición a una mezcla de agentes químicos con efectos aditivos

depende de que se trate de evaluar la exposición *intradía* (durante una sola jornada) o la *interdiaria* (a lo largo de varias jornadas). Los pasos a seguir son los siguientes:

1. Comprobar que la exposición a los distintos componentes de la mezcla no supera el valor límite asignado a cada uno. Para ello se procede como si se tratara de contaminantes cuyos efectos fueran independientes, considerando los dos supuestos mencionados, es decir:

a) *Exposición intradiaria*: puede utilizarse el criterio que establece la norma UNE-EN 689/1996. Si algún contaminante presenta un índice de exposición $I > 1$, no se continúa con el método propuesto para mezclas, adoptándose de inmediato acciones correctoras. Cuando el índice (I) de cada contaminante cumple que $I \leq 1$, se continúa con el punto siguiente (2). El índice (I) se calcula como cociente entre la concentración media ponderada para 8 horas o *concentración de la exposición laboral* (CEL) y el valor límite (L).

b) *Exposición interdiaria*: se calcula previamente la llamada *probabilidad de sobreexposición* (PS) para cada componente de la mezcla por separado, como se indicará oportunamente, a partir de los valores medios de concentración registrados a lo largo de varias jornadas. La PS representa la probabilidad de que uno de esos valores medios supere el límite establecido. Si $PS > 0,05$ para uno cualquiera de los contaminantes, se recomienda la adopción inmediata de acciones correctoras y no se evalúa la exposición a la mezcla. Si $PS \leq 0,05$ para todos, se sigue con el punto 2 del presente método.

2. Determinar las *concentraciones relativas* de los distintos contaminantes que constituyen la mezcla. Para ello, se calcula el cociente entre las cifras de concentración de cada sustancia y su valor límite (L_i).

3. Obtener la distribución m , sumando las concentraciones relativas de cada muestra o los valores medios de los distintos contaminantes registrados en cada jornada.

4. Realizar la transformación logarítmica de dicha distribución m , con lo que se obtendrá una distribución normal caracterizada por su media aritmética (μ) y su desviación típica muestral (σ). Utilizar preferentemente logaritmos neperianos.

5. Evaluar la exposición a la mezcla, teniendo en cuenta las dos situaciones posibles (*exposición intradiaria e interdiaria*):

Exposición intradiaria

El concepto implícito en la definición de *valor límite* (VLA-ED, TLV-TWA, etc.) asume que éste puede ser sobrepasado en algún momento de la jornada laboral. Si ello ocurre, para que la exposición se mantenga por debajo de dicho valor deberán existir períodos en los que la concentración alcance cifras lo suficientemente bajas

como para compensar los valores superiores al límite, de forma que la concentración media de la jornada sea inferior a éste. Esta situación determina que para valorar la exposición dentro de una jornada es necesario calcular un intervalo de confianza de la media, es decir unos límites de confianza, superior (LCS) e inferior (LCI), entre los que se debe encontrar el verdadero valor de la variable, con una probabilidad conocida.

Por supuesto, deben respetarse además, los límites de concentración para períodos cortos de exposición (VLA-EC) que sean aplicables a cada sustancia en particular.

Como la distribución de concentraciones de un solo contaminante registradas a lo largo de una jornada es de tipo log-normal, el criterio planteado anteriormente puede aplicarse también a la *distribución mezcla* m , ya que es igualmente log-normal.

Los límites de confianza pueden calcularse utilizando un sencillo procedimiento basado en el que se describe en la NTP 347-1994¹⁰. Una vez obtenida la distribución m , se realiza la transformación logarítmica de sus términos, con lo que se obtiene una distribución normal, de la que se calcula su media aritmética (μ) y su desviación típica (σ). A partir de estos parámetros se determina la media geométrica de la distribución (MG) y la desviación típica geométrica (DTG) del siguiente modo: $MG = e^\mu$ y $DTG = e^\sigma$.

Con la desviación típica geométrica (DTG) y con el número de muestras disponibles (n), se entra en las tablas 1 y 2, a fin de determinar los factores de corrección F_1 y F_2 , que servirán para calcular los dos extremos del intervalo (LCS y LCI) respectivamente, con un nivel de confianza del 95%. El cálculo de ambos límites se lleva a cabo mediante las siguientes expresiones¹⁰⁻¹¹:

$$\begin{aligned} LCS &= MG \cdot F_1 \\ LCI &= MG \cdot F_2 \end{aligned}$$

A continuación y teniendo en cuenta que se viene trabajando con el logaritmo neperiano de las concentraciones relativas, se procede a comparar con la unidad el valor de los límites de confianza calculados, pudiendo presentarse los tres supuestos que se indican a continuación:

- Supuesto A: $LCS < 1$. Existe la suficiente evidencia de que la exposición es inferior al límite.
- Supuesto B: $LCI > 1$. Existe la suficiente evidencia de que la exposición es superior al límite.
- Supuesto C: $LCS > 1$ y $LCI < 1$. No existe la suficiente evidencia de que la exposición sea inferior o superior al límite.

En el supuesto A puede afirmarse que la situación es higiénicamente aceptable y por consiguiente, no se requiere tomar acción preventiva o correctora alguna mientras no cambien las condiciones existentes. El supuesto B indica claramente una situación en la que existe riesgo higiénico, siendo preciso aplicar acciones correctoras para eliminarlo o reducirlo a límites tolerables. Por úl-

Tabla 1. Valores del factor de corrección F_1 para el cálculo del límite de confianza superior (LCS) de la media con un nivel de confianza del 95%

Desviación típica geométrica (DTG)	Número de muestras (n)							
	3	4	5	6	7	8	9	10
1,1	1,3	1,2	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1
1,2	2,2	1,6	1,5	1,5	1,4	1,4	1,3	1,2
1,3	3,3	1,9	1,7	1,6	1,5	1,5	1,4	1,3
1,4	4,9	2,3	1,9	1,7	1,6	1,6	1,5	1,4
1,5	7,3	2,8	2,1	1,9	1,7	1,6	1,6	1,5
1,6	17,0	3,9	2,7	2,2	2,0	1,9	1,8	1,6
1,7	35,0	5,2	3,3	2,7	2,4	2,2	2,0	1,9
1,8	75,0	7,2	4,0	3,2	2,7	2,5	2,3	2,1
1,9		9,7	4,9	3,7	3,1	2,9	2,6	2,4
2,0		12,8	5,8	4,1	3,4	3,0	2,7	2,6
2,1		19,0	7,6	5,2	4,1	3,7	3,3	2,9
2,2		28,0	9,5	6,5	4,7	4,2	3,8	3,3
2,3		39,0	12,0	7,6	5,4	4,8	4,2	3,6
2,4		56,0	16,0	9,1	6,4	5,5	4,7	4,0
2,5		78,0	19,0	10,0	7,2	5,8	5,0	4,4
2,6			25,0	14,0	8,6	7,4	6,1	5,0
2,7			30,0	17,0	9,9	8,4	6,9	5,7
2,8			39,0	19,0	12,0	9,6	7,8	6,2
2,9			50,0	23,0	14,0	10,7	8,6	7,1
3,0			62,0	25,0	15,5	11,3	9,1	7,8
3,1			70,0	34,0	18,0	15,0	11,5	8,8
3,2			100,0	40,0	22,0	17,0	13,0	9,7
3,3				48,0	26,0	19,0	15,0	11,6
3,4				57,0	29,5	21,0	16,0	12,5
3,5				63,0	33,0	22,0	16,6	13,5

timo, el supuesto C corresponde a una situación de incertidumbre, en la que no es posible extraer conclusiones acerca de que la exposición sea inferior o superior al límite, siendo necesario realizar mediciones periódicas adicionales que permitan dilucidar la cuestión.

Exposición interdiaria

Teniendo en cuenta la propia definición de *valor límite* y las consideraciones reseñadas en el apartado anterior, para que la exposición se mantenga por debajo de dicho valor a lo largo de diversas jornadas de trabajo es condición necesaria, pero no suficiente que cada media de concentración registrada sea inferior al límite en cuestión. Este planteamiento conduce a evaluar la exposición *interdiaria*, como ya se indicó, determinando la *probabilidad de sobreexposición (PS)* a la mezcla.

Las concentraciones medias registradas en el transcurso de diversas jornadas de trabajo se distribuyen también de modo log-normal, por razones similares a las aducidas en apartados anteriores. En este sentido, el cálculo de la PS a la mezcla, se realiza a partir de la distribución log-normal m , obtenida mediante la suma de las concentraciones medias relativas de los componentes de la mezcla registradas en cada jornada. Para ello, se procede a la

transformación logarítmica de sus términos, con lo que se obtendrá una distribución normal de media (μ) y desviación típica (σ). Como todas las magnitudes disponibles están en escala logarítmica, la media obtenida (μ) debe compararse con el logaritmo neperiano del valor límite, pero teniendo en cuenta que se viene operando con las concentraciones relativas, la media se compara con el ln 1, es decir con 0, mediante la siguiente expresión:

$$z = \frac{|0 - \mu|}{\sigma} = \frac{|\mu|}{\sigma}$$

siendo z la distancia expresada en desviaciones típicas entre 0 y la media (μ). Con el valor z calculado, se entra en la tabla III de la distribución normal tipificada, obteniendo un valor (G) que permite calcular la PS cuando $\mu < 0$ del siguiente modo: $PS = 1 - G$. Si $\mu \geq 0$, el valor de la PS coincide con el propio G de la tabla 3.

Como ya se indicó, PS representa la probabilidad de que una de las cifras de concentración media registradas a lo largo de las diversas jornadas de trabajo consideradas supere el valor límite de la mezcla. Un criterio de evaluación a tener en cuenta podría ser el que establece la propia norma UNE-EN 689/1996 para un solo contaminante, extendido al supuesto considerado de una mezcla:

Tabla 2. Valores del factor de corrección F_2 para el cálculo del límite de confianza inferior (LCI) de la media con un nivel de confianza del 95%

Desviación típica geométrica (DTG)	Número de muestras (n)							
	3	4	5	6	7	8	9	10
1,1	0,8	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
1,2	0,7	0,8	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
1,3	0,7	0,8	0,8	0,8	0,9	0,9	0,8	0,9
1,4	0,6	0,7	0,8	0,8	0,9	0,8	0,8	0,9
1,5	0,5	0,6	0,7	0,7	0,8	0,8	0,8	0,8
1,6	0,5	0,6	0,7	0,7	0,8	0,8	0,8	0,8
1,7	0,5	0,6	0,7	0,7	0,8	0,8	0,8	0,8
1,8	0,5	0,6	0,7	0,7	0,7	0,8	0,8	0,8
1,9	0,5	0,6	0,7	0,7	0,7	0,8	0,8	0,8
2,0	0,4	0,5	0,6	0,7	0,7	0,8	0,8	0,8
2,1	0,4	0,5	0,6	0,7	0,7	0,8	0,8	0,8
2,2	0,4	0,5	0,6	0,7	0,7	0,8	0,8	0,8
2,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,7	0,8	0,8	0,8
2,4	0,4	0,5	0,6	0,7	0,7	0,8	0,8	0,8
2,5	0,4	0,5	0,6	0,7	0,7	0,7	0,8	0,8
2,6	0,4	0,5	0,6	0,7	0,7	0,8	0,8	0,8
2,7	0,4	0,5	0,6	0,7	0,7	0,8	0,8	0,8
2,8	0,4	0,5	0,6	0,7	0,7	0,8	0,8	0,8
2,9	0,4	0,5	0,6	0,7	0,7	0,8	0,8	0,9
3,0	0,4	0,5	0,6	0,7	0,7	0,8	0,8	0,9
3,1	0,4	0,5	0,6	0,7	0,7	0,8	0,8	0,9
3,2	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,8	0,8	0,9
3,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,8	0,8	0,9
3,4	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,8	0,9	0,9
3,5	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,8	0,9	0,9

• Situación verde: $PS \leq 0,001$. La exposición es claramente inferior al valor límite. No se requieren más mediciones, salvo que se produzca un cambio significativo en las condiciones de trabajo. En tal caso se precisa una nueva evaluación de la exposición.

• Situación naranja: $0,001 < PS \leq 0,05$. La exposición puede ser inferior al valor límite, pero debe confirmarse mediante mediciones periódicas.

• Situación roja: $PS > 0,05$. La probabilidad de exceder el valor límite es demasiado alta y en consecuencia deben adoptarse acciones correctoras tan pronto como sea posible. Tras la aplicación de dichas acciones, se realizará una nueva evaluación de la exposición.

RESULTADOS

Aplicación del método a un ejemplo de evaluación de la exposición intradiaria a una mezcla binaria

Considérese una operación de pintado, en la que se utiliza un disolvente constituido por una mezcla de xileno y tolueno. La evaluación de la concentración en la atmósfera de trabajo a lo largo de una jornada se ha llevado a cabo tomando cinco muestras de ambas sustancias sobre tubos de carbón activo. Las cifras de concentración regis-

tradas simultáneamente en cada muestra se indican en la tabla 4. Asumiendo que ambas sustancias presentan efectos aditivos y tomando como valores límite los VLA-ED que se establecen en el Documento GT/LEP N03, es decir, 100 ppm para el xileno y 50 ppm para el tolueno, se pretende evaluar la exposición de la mezcla en el transcurso de dicha jornada.

En primer lugar, se descarta que la exposición a cada componente de la mezcla por separado supere su valor límite. En este sentido, utilizando el índice de exposición (I) que establece la norma UNE-EN 689/1996, se tiene que: $I_{(xileno)} = 0,21$ e $I_{(tolueno)} = 0,17$. Como en ambos casos $I < 1$, se procede a evaluar la exposición a la mezcla, siguiendo las instrucciones expresadas en los puntos 2 a 5 del método propuesto. La tabla 5 muestra las concentraciones relativas, los términos de la distribución m y la transformación logarítmica de ésta. Entrando con $DTG = 1,7$ y $n = 5$ en las tablas 1 y 2, se obtienen $F_1 = 3,3$ y $F_2 = 0,7$ que permiten calcular los límites de confianza.

$$LCS = MG \cdot F_1 = 0,3401 \cdot 3,3 = 1,1223$$

$$LCI = MG \cdot F_2 = 0,3401 \cdot 0,7 = 0,2381$$

En este caso la situación corresponde al supuesto C, en que $LCS > 1$ y $LCI < 1$, no existiendo la suficiente evidencia de que la exposición sea inferior o superior al límite.

Tabla 3. Áreas en la cola de una distribución normal tipificada

Z	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
0,0	0,5000	0,5040	0,5080	0,5120	0,5160	0,5199	0,5239	0,5279	0,5319	0,5359
0,1	0,5398	0,5438	0,5478	0,5517	0,5557	0,5596	0,5636	0,5675	0,5714	0,5753
0,2	0,5793	0,5832	0,5871	0,5910	0,5948	0,5987	0,6026	0,6064	0,6103	0,6141
0,3	0,6179	0,6217	0,6255	0,6293	0,6331	0,6368	0,6406	0,6443	0,6480	0,6517
0,4	0,6554	0,6591	0,6628	0,6664	0,6700	0,6736	0,6772	0,6808	0,6844	0,6879
0,5	0,6915	0,6950	0,6985	0,7019	0,7054	0,7088	0,7123	0,7157	0,7190	0,7224
0,6	0,7257	0,7291	0,7324	0,7357	0,7389	0,7422	0,7454	0,7486	0,7517	0,7549
0,7	0,7580	0,7611	0,7642	0,7673	0,7704	0,7734	0,7764	0,7794	0,7823	0,7852
0,8	0,7881	0,7910	0,7939	0,7967	0,7995	0,8023	0,8051	0,8078	0,8106	0,8133
0,9	0,8159	0,8186	0,8212	0,8238	0,8264	0,8289	0,8315	0,8340	0,8365	0,8389
1,0	0,8413	0,8438	0,8461	0,8485	0,8508	0,8531	0,8554	0,8577	0,8599	0,8621
1,1	0,8643	0,8665	0,8686	0,8708	0,8729	0,8749	0,8770	0,8790	0,8810	0,8830
1,2	0,8849	0,8869	0,8888	0,8907	0,8925	0,8944	0,8962	0,8980	0,8997	0,9015
1,3	0,9032	0,9049	0,9066	0,9082	0,9099	0,9115	0,9131	0,9147	0,9162	0,9177
1,4	0,9192	0,9207	0,9222	0,9236	0,9251	0,9265	0,9279	0,9292	0,9306	0,9319
1,5	0,9332	0,9345	0,9357	0,9370	0,9382	0,9394	0,9406	0,9418	0,9429	0,9441
1,6	0,9452	0,9463	0,9474	0,9484	0,9495	0,9505	0,9515	0,9525	0,9535	0,9545
1,7	0,9554	0,9564	0,9573	0,9582	0,9591	0,9599	0,9603	0,9616	0,9625	0,9633
1,8	0,9641	0,9649	0,9656	0,9664	0,9671	0,9678	0,9686	0,9693	0,9699	0,9706
1,9	0,9713	0,9719	0,9726	0,9732	0,9738	0,9744	0,9750	0,9756	0,9761	0,9767
2,0	0,9772	0,9778	0,9783	0,9788	0,9793	0,9798	0,9803	0,9808	0,9812	0,9817
2,1	0,9821	0,9826	0,9830	0,9834	0,9838	0,9842	0,9846	0,9850	0,9854	0,9857
2,2	0,9861	0,9864	0,9868	0,9871	0,9875	0,9878	0,9881	0,9884	0,9887	0,9890
2,3	0,9893	0,9896	0,9898	0,9901	0,9904	0,9906	0,9909	0,9910	0,9913	0,9916
2,4	0,9918	0,9920	0,9922	0,9925	0,9927	0,9929	0,9931	0,9932	0,9934	0,9936
2,5	0,9938	0,9940	0,9941	0,9943	0,9945	0,9946	0,9948	0,9949	0,9951	0,9952
2,6	0,9953	0,9955	0,9956	0,9957	0,9959	0,9960	0,9961	0,9962	0,9963	0,9964
2,7	0,9965	0,9966	0,9967	0,9968	0,9969	0,9970	0,9971	0,9972	0,9973	0,9974
2,8	0,9974	0,9975	0,9976	0,9977	0,9977	0,9978	0,9979	0,9979	0,9980	0,9981
2,9	0,9981	0,9982	0,9982	0,9983	0,9984	0,9984	0,9985	0,9985	0,9986	0,9986
3,0	0,9987	0,9987	0,9987	0,9988	0,9988	0,9989	0,9989	0,9989	0,9990	0,9990
3,1	0,9990	0,9991	0,9991	0,9991	0,9992	0,9992	0,9992	0,9992	0,9993	0,9993
3,2	0,9993	0,9993	0,9994	0,9994	0,9994	0,9994	0,9994	0,9995	0,9995	0,9995
3,3	0,9995	0,9995	0,9995	0,9996	0,9996	0,9996	0,9996	0,9996	0,9996	0,9997
3,4	0,9997	0,9997	0,9997	0,9997	0,9997	0,9997	0,9997	0,9997	0,9997	0,9998

Tabla 4. Concentraciones de xileno y tolueno registrados en cada muestra.

Muestra n.º	Concentración (ppm)	
	Xileno (X_i)	Tolueno (T_i)
1	29	11
2	16	3
3	39	15
4	12	8
5	9	6
Promedio (CEL)	21	8,6

CEL: Concentración de la exposición laboral, expresada como media ponderada para 8 horas, de las concentraciones registradas durante la jornada. En este caso, se ha tomado la propia media aritmética de dichas concentraciones como una aproximación válida de CEL.

Aplicación del método a un ejemplo de evaluación de la exposición interdiaria a una mezcla ternaria

Sea una operación de pintado en la que se utiliza un disolvente compuesto por xileno, tolueno y acetato de n-butilo. La tabla 6 muestra la concentración media de cada sustancia, procedente de su evaluación simultánea a lo largo de cuatro jornadas. Asumiendo que sus efectos son aditivos y que el VLA-ED para el acetato de n-butilo es de 150 ppm, se pretende evaluar la exposición a la mezcla.

Los valores de PS de cada contaminante individualmente considerados son: $PS_{(xileno)} = 0,0022$, $PS_{(tolueno)} = 0,0063$ y $PS_{(acet. but.)} < 10^{-4}$, es decir inferiores a 0,05 en todos los casos. Por su parte, la tabla 7 muestra las cifras obtenidas en los diferentes pasos que se han seguido para evaluar la exposición a la mezcla, según se indicó en el método propuesto. A continuación, entrando en la ta-

Tabla 5. Concentraciones relativas, de xileno y tolueno, distribución m y transformación logarítmica de m (distribución normal)

Concentraciones relativas		Distribución m	Transformación logarítmica de m
$x_i = X_i / 100$	$t_i = T_i / 50$	$m = (x_i + t_i)$	$\ln m$
0,29	0,22	0,51	-0,6733
0,16	0,06	0,22	-1,5141
0,39	0,30	0,69	-0,3711
0,12	0,16	0,28	-1,2730
0,09	0,12	0,21	-1,5606

$MG_m = 0,3401$; $DTG_m = 1,6994$.

Tabla 6. Concentraciones promedio de xileno, tolueno y acetato de n-butilo registradas en cada jornada.

Jornada n.º	Concentración (ppm)		
	Xileno (X_i)	Tolueno (T_i)	Acet. n-butilo (A_i)
1	15	27	16
2	19	12	28
3	42	18	32
4	34	9	11

bla 3 con $z = 1,29$ se obtiene un valor $G = 0,9015$, lo que da una $PS = 1 - 0,9015 = 0,0985$.

De acuerdo con el criterio antes reseñado, como $PS > 0,05$ se trata de una situación, en que la exposición a la mezcla supera el límite, siendo necesario aplicar acciones correctoras.

DISCUSIÓN

A diferencia del procedimiento establecido por la ACGIH para evaluar la exposición a mezclas de contaminantes químicos con efectos aditivos o del que se indica en el Documento GT/LEP N03, muy similar al ante-

rior, el método propuesto en el presente trabajo realiza dicha evaluación teniendo en cuenta la variabilidad espacio-temporal de sus concentraciones. Mientras que aquéllos valoran la exposición comparando una medida de centralización, como la media aritmética de las concentraciones o la CEL (media ponderada para 8 horas) con el valor límite, el método propuesto introduce en la evaluación elementos de medida de la dispersión de los datos, tales como la desviación típica geométrica utilizada en la *distribución mezcla* m o la desviación típica muestral aplicada en la resultante de su transformación logarítmica.

Los dos procedimientos aludidos están concebidos para evaluar la exposición *intradía*. En este sentido, si se pretendiera valorar la exposición a la mezcla considerada en el primer ejemplo mediante cualquiera de ellos, bastaría con sumar los dos índices de exposición (I) de los dos contaminantes, cuyo resultado sería 0,38. Al ser esta cifra inferior a la unidad no puede afirmarse que la exposición sea superior al límite, si bien en ninguno de los dos métodos se dice expresamente lo contrario, dando lugar a una situación tácita de incertidumbre. Asimismo, en ninguno de los dos se indica el modo de abordar la evaluación de la exposición *interdiaria*, lo que supone una grave limitación.

Volviendo de nuevo al primer ejemplo, cabe señalar que ninguna de las cifras de concentración registradas supera el valor límite establecido para cada contaminante. Sin embargo, a la vista de los índices anteriormente citados ($I_{\text{xileno}} = 0,21$ e $I_{\text{tolueno}} = 0,17$) y de acuerdo con la norma UNE-EN 689/1996, no es posible inferir que la exposición a cualquiera de las dos sustancias, consideradas de modo independiente, sea inferior al valor límite, ya que $I > 0,1$ en ambos casos. El método de evaluación propuesto en el presente trabajo viene a corroborar esta situación de incertidumbre para la mezcla, al obtenerse $LCS > 1$ y $LCI < 1$.

Considerando ahora el segundo ejemplo, tampoco los valores de las concentraciones medias superan el límite de cada contaminante y además, las PS individuales son inferiores a 0,05 en todos los casos, lo que a efectos del método propuesto son dos condiciones necesarias, pero no suficientes para que pueda evidenciarse que la exposición a la mezcla es inferior al límite.

Tabla 7. Concentraciones relativas, de xileno, tolueno y acetato de n-butilo, distribución m y su transformación logarítmica (distribución normal)

Concentraciones relativas			Distribución m	Transformación logarítmica de m
$x_i = X_i / 100$	$t_i = T_i / 50$	$a_i = A_i / 150$	$m = (x_i + t_i + a_i)$	$\ln m$
0,15	0,54	0,11	0,80	-0,2273
0,19	0,24	0,19	0,62	-0,4834
0,42	0,36	0,21	0,99	-0,0067
0,34	0,18	0,07	0,59	-0,5220

$\mu = 0,3099$; $\sigma = 0,2407$; $z = 1,29$.

Estos ejemplos ponen de relieve la sensibilidad del método en cuestión, que brinda la posibilidad de evaluar, con el suficiente rigor estadístico, la exposición tanto *intradía* como *interdiaria* a mezclas de contaminantes químicos con efectos aditivos, ofreciendo al higienista industrial una herramienta de gran utilidad para el correcto desempeño de sus funciones.

BIBLIOGRAFÍA

1. American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH). Threshold Limit Values for Chemical Substances and Physical Agents (TLVs). Cincinnati: ACGIH; 1999. p. 81-3.
2. Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (INSHT). Documento GT/LEP N03 sobre Exposición Profesional para Agentes Químicos en España. Valencia: Generalitat Valenciana; 1999.
3. Laborda R, Balasch S. Valoración de la exposición a mezclas de agentes químicos con efectos aditivos. Propuesta de un método estadístico. *Prevención* 1999; 147: 35-42.
4. Aivazian S, Énukov I, Méchalkine L. Éléments de modélisation et traitement primaire des données. Moscú: Éditions Mir; 1986.
5. Olham P. The nature of the variability of dust concentrations at the coal face. *Br J Ind Med* 1953; 10: 227-334.
6. Roach SA. Measuring dust exposure with the thermal precipitator in collieries and foundries. *Br J Ind Med* 1959; 16: 104-22.
7. Leidel NA, Busch KA, Crouse WE. Exposure measurement, action level and occupational environmental variability. Publicación N.º 76-131, NTIS Pub. No. PB-267-509. National Technical Information Service, Springfield; 1975.
8. Bar-Shalom Y, Segall A, Budenaers D. Decision and estimation procedures for air contaminants. *Am Ind Hyg Assoc J* 1976; 8: 469-73.
9. Rappaport S M. Assessment of long-term exposures to toxic substances in air. *Ann Occup Hyg* 1991; 35: 61-121.
10. Castejón E. Contaminantes químicos: evaluación de la concentración ambiental. NTP 347-1994. Barcelona: INSHT; 1994.
11. Armstrong B G. Confidence intervals for arithmetic means of lognormally distributed exposures. *Am Ind Hyg Assoc J* 1992; 8: 481-5.