

NIVELES DE SANEAMIENTO PARA SUELO CON PASIVOS AMBIENTALES. ESTIMACIÓN DE FACTORES DE EXPOSICIÓN PARA MÉXICO.

Ma. Inés J. Navarro González

Instituto de Ingeniería, UNAM

Cd. Universitaria Circuito Escolar Edificio 1 2o Piso Administración, 04510 Coyoacán, D.F.
México, Telf 56 23 36 00, e-mail: ing@pumas.iingen.unam.mx

RESUMEN

Un objetivo en la restauración de suelo es obtener la mayor certidumbre en torno a los riesgos de exposición que se pretende controlar al abatir las concentraciones del contaminante presente. Este trabajo presenta la investigación realizada para caracterizar las variables relevantes en la estimación de la exposición de individuos mexicanos a sitios contaminados con residuos peligrosos. Los resultados de un estudio epidemiológico realizado a 11 comunidades rurales mexicanas, fueron funciones de distribución que muestran el comportamiento de las variables temporales de exposición y las características físicas de población potencialmente expuesta. El análisis de las funciones de distribución muestra las incertidumbres inherentes, así como las ventajas para países como México, frente a los valores típicos reportados en la literatura internacional. La aplicación de estos resultados se ejemplifica con la estimación de niveles de limpieza para suelo contaminado con benceno a partir del análisis probabilístico de riesgo de exposición con el método iterativo por truncación.

ABSTRACT

A central topic concerned with soil restorations actions is to get a confidence approach on the exposure risks levels that need to be controlled through the reduction or minimization of the concentrations of contaminant of interest. This study presents the characterization of most relevant exposure variables for Mexican people under potential risk of exposure at sites contaminated with hazardous wastes, in order to achieve more certainty on risk estimation. Data from an epidemiologic survey conducted at 11 rural Mexican communities, were used to develop empirical distribution functions to address the variability and diversity on temporal exposure variables and the body weight and height characteristics of the population of concern. The variability and uncertainty analysis of the Mexican values shows great divergence with the typical values based on the mean values for the American population. It is an evidence of the advantage of this initial approach to the variability of the most relevant exposure variables for countries like Mexico. As an example, the distribution function for exposure duration is used to develop soil cleanup levels at exposure scenario of soil contaminated with benzene by the application of probabilistic risk assessment and iterative truncation method.

Palabras clave: factores de exposición, niveles de limpieza, estimación de riesgo probabilístico, saneamiento de suelo, benceno

INTRODUCCIÓN

La restauración de suelos contaminados es una práctica reciente en México; los primeros pasos los da la empresa petrolera mexicana PEMEX en sitios con pasivos ambientales, a mediados de la década de los años noventa. Durante los primeros años, la referencia para las metas de saneamiento fueron niveles de limpieza propuestos en normatividades extranjeras; por ejemplo niveles establecidos para Texas o California, en EUA. Posteriormente, en el año de 1998, la autoridad ambiental fija unos niveles sin carácter oficial, porque no se legislaron en una norma, pero fueron la base para dictaminar cuando debía sanearse un sitio. Esos números guía se establecieron para hidrocarburos y metales; fue poco claro con base a qué criterios se recomendaban esos niveles. A partir del año 2002, los niveles para suelos contaminados con hidrocarburos se llevan a una norma emergente (DOF, 2002). En esta norma se indica que podrán modificarse los niveles máximos recomendados si se documentan con un estudio de riesgo. Actualmente está por publicarse una norma oficial mexicana (NOM) con límites máximos permisibles para suelos contaminados con hidrocarburos, obligatoria para los responsables de la contaminación y que sustituirá a la norma emergente. Ante la realidad inminente de documentar niveles de limpieza alternativos con estudios de riesgo de exposición, el alcance de esta investigación es estimar niveles de restauración para suelos con valores para las variables con mayor peso en la estimación del riesgo de exposición y que reflejen las particularidades del escenario mexicano.

METODOLOGÍA

Para ejemplificar la aplicación de los factores de exposición mexicanos desarrollados en este trabajo se adoptó un modelo matemático para benceno en suelo bajo la hipótesis de posible riesgo de desarrollo de cáncer en un entorno laboral. Se considera un modelo de exposición con tres escenarios posibles de exposición: ingestión y contacto dérmico con suelo contaminado y la inhalación de vapores de benceno que se desprenden del suelo [ecuación 1]; se asume el contacto directo con el contaminante y la exposición frecuente por largos periodos para receptores adultos (sin hacer distinción de sexo). La ecuación [1] representa este modelo para estimar el riesgo potencial de cáncer (R_c) por la exposición a benceno.

$$R_c = \frac{C_s \times ET_0 \times EF \times ED}{BW \times AT} \left[(IR_s \times FI \times GI \times FC \times Sf_i) + (IR_a \times [VF^{-1} + PEF^{-1}] \times Sf_{in}) + (CF_d \times SA \times AF \times ABS \times Sf_d) \right] \quad [1]$$

donde R_c = probabilidad de riesgo de cáncer (adimensional)

Sf_i = factor de potencia ingestión para benceno ($5.5 \text{ E-}02 \text{ (mg/kg-d)}^{-1}$) (IRIS, 2004)

Sf_{in} = factor de potencia inhalación para benceno ($2.73 \text{ E-}02 \text{ (mg/kg-d)}^{-1}$) (IRIS, 2004)

Sf_d = factor de potencia dérmico para benceno ($5.67 \text{ E-}02 \text{ (mg/kg-d)}^{-1}$) (IRIS, 2004)

C_s = concentración promedio de exposición del compuesto en suelo (mg/kg)

IR_{suelo} = tasa de ingestión diaria de suelo (100 mg/d) (EPA, 2001e) (*)

IR_{aire} = tasa de inhalación diaria de aire ($20 \text{ m}^3/\text{d}$) (EPA, 1989) (*)

FI = fracción de suelo ingerida (adimensional) (1) (EPA, 1989) (*)
GI = factor de absorción para benceno (adimensional) (0.97) (RAIS, 2003)
VF = factor de volatilización para benceno estimado ($2.7 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{kg}$) (EPA, 1996)
PEF = factor de emisión de polvos estimado ($1.32 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{kg}$) (EPA, 1996)
SA = área de la superficie de piel expuesta (m^2/d) (*)
AF = factor de adherencia a la piel ($0.2 \text{ mg}/\text{cm}^2$) (EPA, 2001d) (*)
ABS = factor de absorción en piel para benceno (adimensional) (0.1) (EPA, 1992)
ET₀ = fracción de tiempo diario en exteriores (h/24 h) (1) (EPA Region 09, 2002) (*)
EF = frecuencia de la exposición (250 d/a) (EPA Region 09, 2002) (*)
ED = duración de la exposición (a) (*)
BW = peso del cuerpo (kg) (*)
AT = periodo en el que se promedia la exposición (d) (*)
FC = factor de conversión de unidades (kg/mg)
CFd = factor de conversión de unidades ($\text{kg}\cdot\text{cm}^2/\text{mg}\cdot\text{m}^2$)

Para derivar niveles de limpieza con el método “clásico” (EPA, 1989), se resuelve el término de la concentración (C_s) para benceno en suelo en la ecuación [1]. Cada una de las variables toma valores puntuales, C_s es la incógnita en el modelo y se define un valor para R_c que corresponde al riesgo aceptable o tolerable; típicamente toma el valor de 1×10^{-6} que significa que es tolerable la ocurrencia de un caso de cáncer entre un millón de posibles receptores. Bajo este procedimiento, estimar niveles de limpieza resulta una estimación simple con muchas incertidumbres; ya que no considera la variabilidad inherente a las diferentes situaciones ni la diversidad de los receptores.

Una mejor estimación se obtiene si la variabilidad de algunas de las variables del modelo se expresa a través de una función de distribución. Este es el enfoque de la metodología de estimación probabilística de riesgo (EPA, 2001a). La sustitución de valores numéricos por una función de distribución en la ecuación [1] genera una función de distribución de riesgo. Esta metodología explícitamente indica que las variables más relevantes del modelo sean las que se expresen con una función de distribución en lugar de un valor numérico.

Con el fin de estimar niveles de restauración para suelos que reflejen las particularidades del escenario mexicano se procedió a: i) análisis de sensibilidad del modelo de exposición a benceno para identificar las variables con mayor peso en la estimación del riesgo de exposición; ii) desarrollo de funciones de distribución para caracterizar a la población mexicana; iii) analizar la variabilidad e incertidumbres presentes y iv) estimar el nivel de limpieza para benceno.

El análisis de sensibilidad consistió en el análisis de la variación en el riesgo (R_c) con respecto a cambios en los valores de las variables de exposición con el método conocido como elasticidad (SR) (EPA, 2001c) y el radio de sensibilidad normalizado (SS) (Finley & Paustenbach (1994a) y Hamby (1994)). Este análisis se usa para identificar que variable de entrada contribuye más a la variación o incertidumbre en la estimación de riesgo (Iman & Helton, 1988).

Para integrar características de la población mexicana al modelo de exposición a benceno, se analizaron los datos (350) de una encuesta epidemiológica (Navarro *et al.*, 2004) aplicada en 11 comunidades localizadas en el entorno de la ciudad de San Martín Texmelucan, Pue. Los

resultados de esa encuesta que se toman para el análisis en esta investigación son: sexo, edad, estatura, peso y tiempo de residencia en el sitio.

La variabilidad en la evaluación de riesgo, se refiere a la heterogeneidad inherente a una variable en particular; por ejemplo, hay una variación natural en el peso del cuerpo y en la estatura entre individuos en una población. El término incertidumbre se refiere a la falta, ausencia o insuficiente conocimiento acerca de parámetros, modelos o factores (Morgan & Henrion, 1990). Con frecuencia la incertidumbre puede reducirse a través de más mediciones o estudios. Lo que no puede reducirse es la variabilidad ya que esta es inherente a la variable.

Actualmente uno de los métodos más aplicados para calcular metas de remediación con el análisis probabilístico de riesgo (EPA, 2001a) es el método iterativo por truncación. El proceso iterativo, aplicado con una función de distribución de la concentración C_s , consiste en calcular el riesgo en la ecuación [1] de la siguiente manera: 1) el valor C_s máximo se remplaza por la mitad del límite analítico de detección del contaminante; 2) se calcula el 95% UCL para el nuevo conjunto de datos y es el valor que toma C_s en la ecuación [1]; 3) se calcula la función de distribución de riesgo para esa concentración; 4) se evalúa el 95 percentil de la distribución y 5) se compara con $R_c = 1 \times 10^{-6}$, si es mayor se procede a la siguiente iteración. Progresivamente se usan valores menores para el término de la concentración; el riesgo es recalculado para cada reducción sucesiva del valor más alto y el método se repite hasta que el riesgo es aceptable.

DISCUSIÓN Y RESULTADOS

Variables Relevantes

El análisis de sensibilidad se realizó para las variables con (*) indicado en la descripción de la ecuación [1]. Se encontró que el modelo de exposición a benceno es muy sensible a variaciones en las variables: ED, ETo, EF, IR_{aire} y BW; son las que más peso tienen en la estimación de riesgo. Las variables AF, IR_{suelo}, FI y SA son las que menos contribuyen a la estimación. De manera que las variables más sensibles son las temporales, excepto para variable esperanza de vida E_{vida} o periodo en el que se promedia la exposición, con sensibilidad bastante menor. De estos resultados se infiere la conveniencia de representar la variabilidad inherente a la duración y frecuencia de la exposición, así como la del peso del cuerpo de los posibles receptores mexicanos a través de una función de distribución.

Funciones de Distribución

Los datos de concentración de benceno obtenidos de muestras de suelo en un sitio con pasivos ambientales varían de 0.008 a 2.890 mg/kg con una media de 0.407 mg/kg para suelo arcilloso. Para representar la incertidumbre respecto a la verdadera media de la concentración (C_s) se usa en este estudio la concentración de 0.783 mg/kg para el 95% UCL (Tabla 1), así como la función de distribución que describe el comportamiento de Benceno en el sitio (Figura 1).

Con la información de 327 encuestados (adultos) que proporcionaron los datos completos de edad, estatura y peso, se realizó el análisis estadístico de las variables: peso del cuerpo (BW), superficie de la piel con contacto con el contaminante (SA), tiempo de residencia en el sitio (ED) que expresa la duración de la exposición con el área contaminada y la esperanza de vida (E_{vida}); estos se presentan en la Tabla 1 y las funciones de distribución respectivas en las Figuras 2 a 4.

Tabla 1. Parámetros estadísticos para las variables C_s , BW, SA, ED y E_{vida}

Parámetro	Benceno (mg/kg)	BW (kg)	SA (m ²)	ED (años)	E_{vida} (años)
n	30	327	308	335	32
Max	2.890	120	0.440	86	77.3
Min	0.008	43	0.243	1	72.4
Moda	0.008	65	0.268	10	76.4
Mediana	0.065	67	0.316	29	75.4
Media	0.407	67.34	0.315	31	75.2
Desviación estándar	0.744	11.11	0.031	19	1.18
90 Percentil	1.163	81.40	0.354	58	76.4
95 Percentil	2.238	85	0.361	66	76.6
99 percentil	2.713	90	0.380	79	77.1
95% UCL - CIN	0.783	70.01	0.318	33	76.1

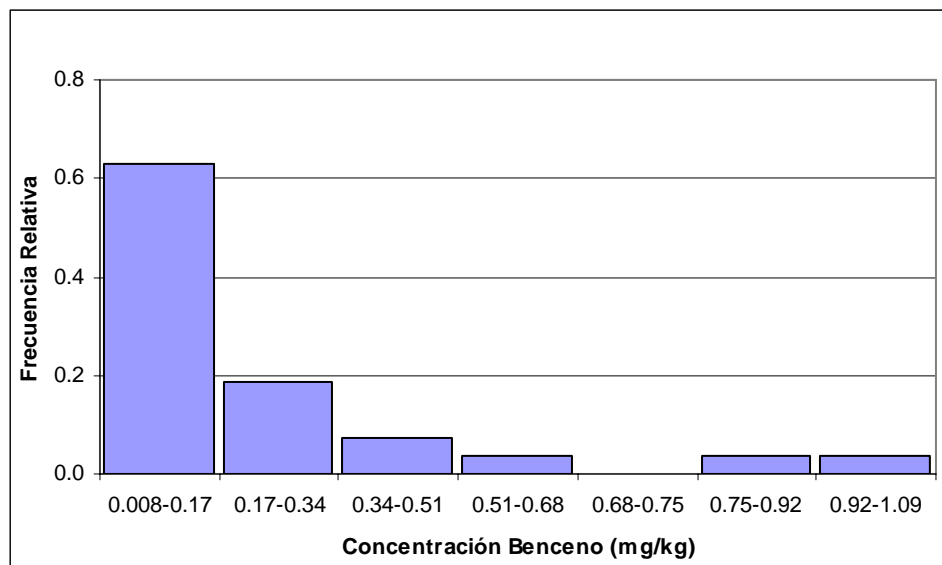


Fig. 1 Distribución de Benceno (C_s)

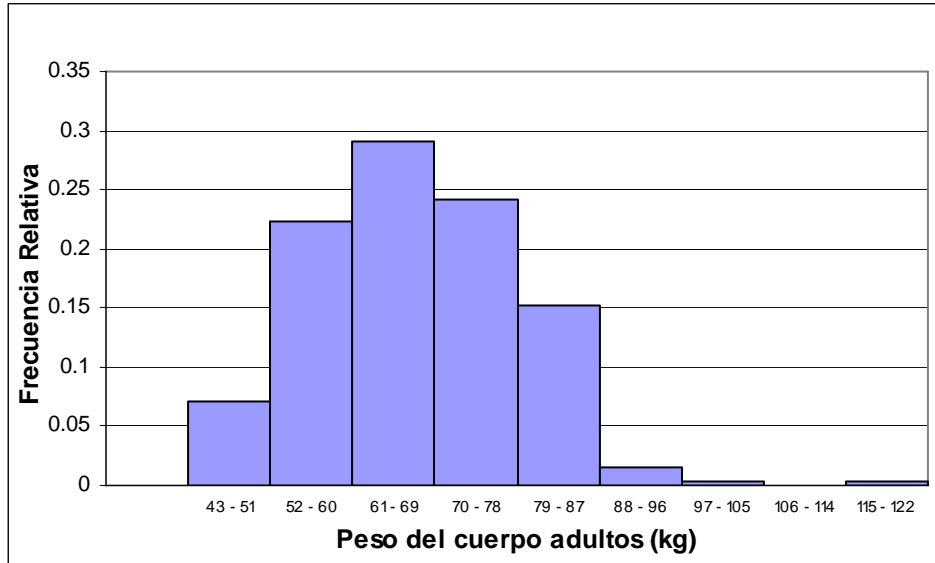


Fig. 2 Distribución del peso (BW)

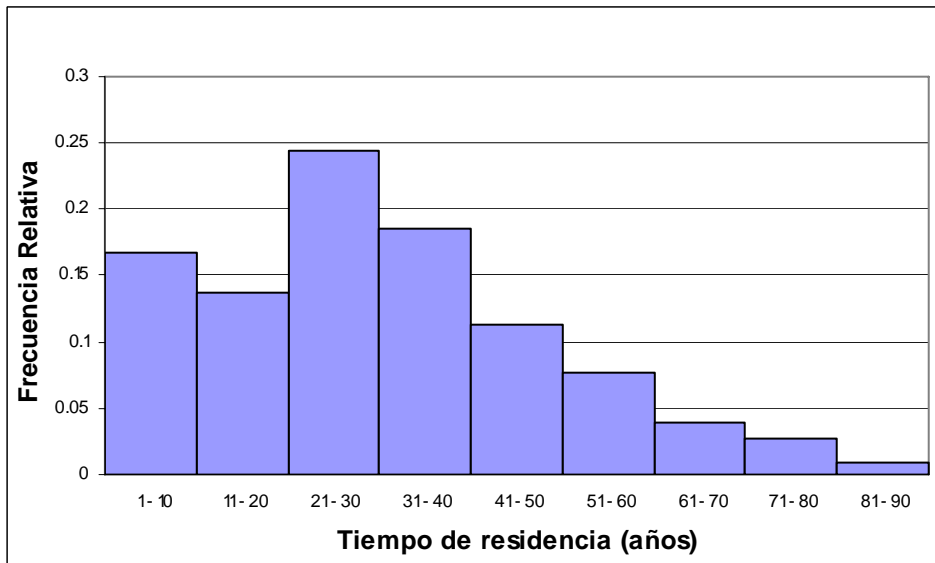


Fig. 3 Distribución Tiempo de residencia (ED)

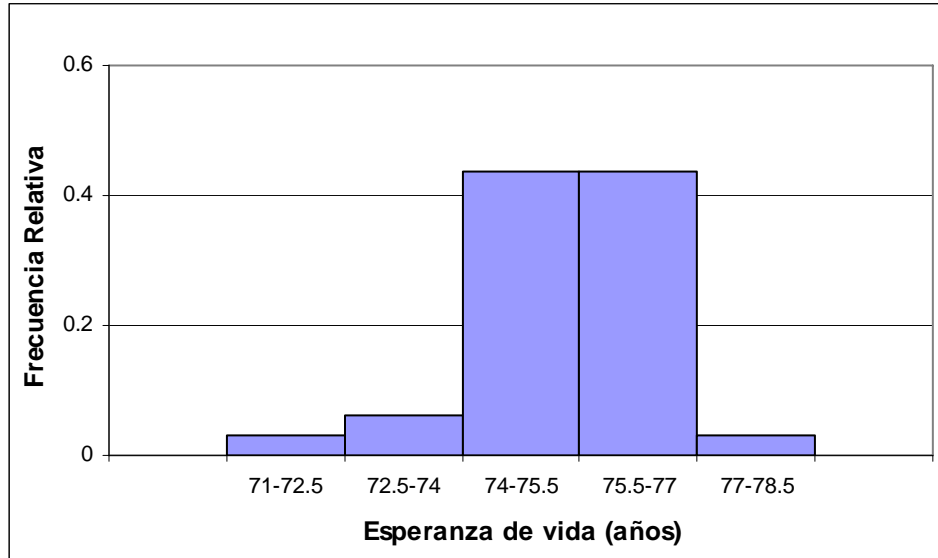


Fig. 4 Distribución Esperanza de vida (E_{vida})

Un ejemplo de la aplicación de estos resultados es la distribución de riesgo (Figura 5) estimada con los valores típicos indicados en descripción de las variables de la ecuación [1], excepto para el término de la concentración C_s de benceno que se cuantificó con la función de distribución desarrollada (Figura 1). Se observa que para el 90 % de las concentraciones la probabilidad de riesgo es menor a 1×10^{-6} y para concentraciones mayores a 2 mg/kg el riesgo es inaceptable.

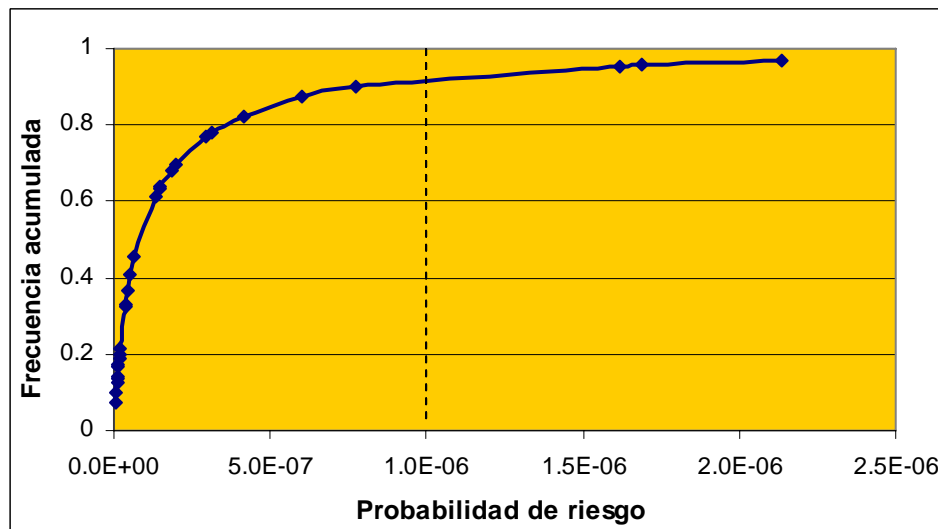


Fig. 5 Distribución de riesgo (variación en C_s)

Al considerar la función empírica desarrollada para la duración de la exposición (ED), la más importante en el análisis de sensibilidad, y que el término de la concentración C_s tome el valor

correspondiente al 95% UCL, con los valores típicos para las demás variables, se observa que el comportamiento del riesgo tiene una distribución (Figura 6) diferente al de la Figura 5. La gráfica ejemplifica el peso importante que tiene la variable ED en la distribución de riesgo; la probabilidad de riesgo o de desarrollo de cáncer se estima menor a 10^{-6} para el 75% de los receptores potenciales que son aquéllos con menos de 44 años de residencia en el sitio contaminado.

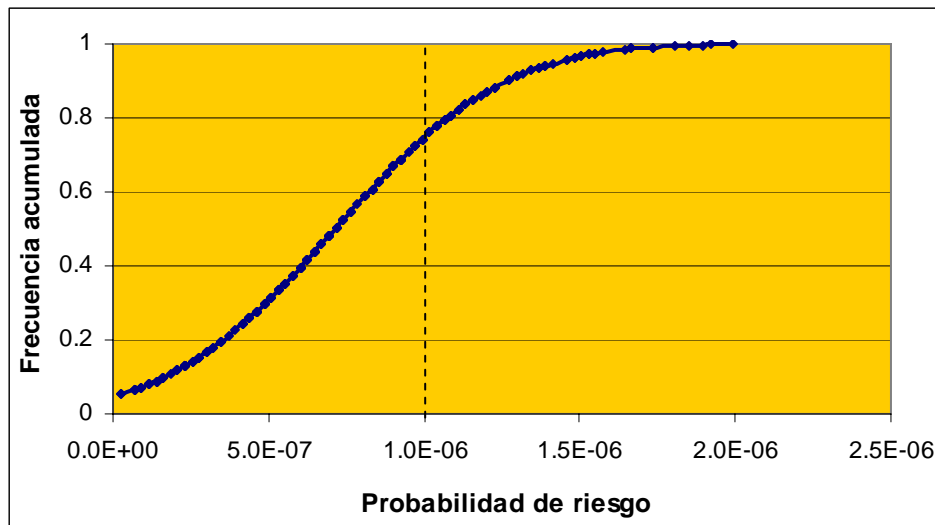


Fig. 6 Distribución de riesgo (variación en ED)

La variable de peso del cuerpo (BW) con menor efecto que ED en la estimación de riesgo se advierte en la Figura 7; en este caso todas las estimaciones indican un riesgo aceptable; el mismo comportamiento se observó en la distribución de riesgo para la variable de la superficie expuesta (SA).

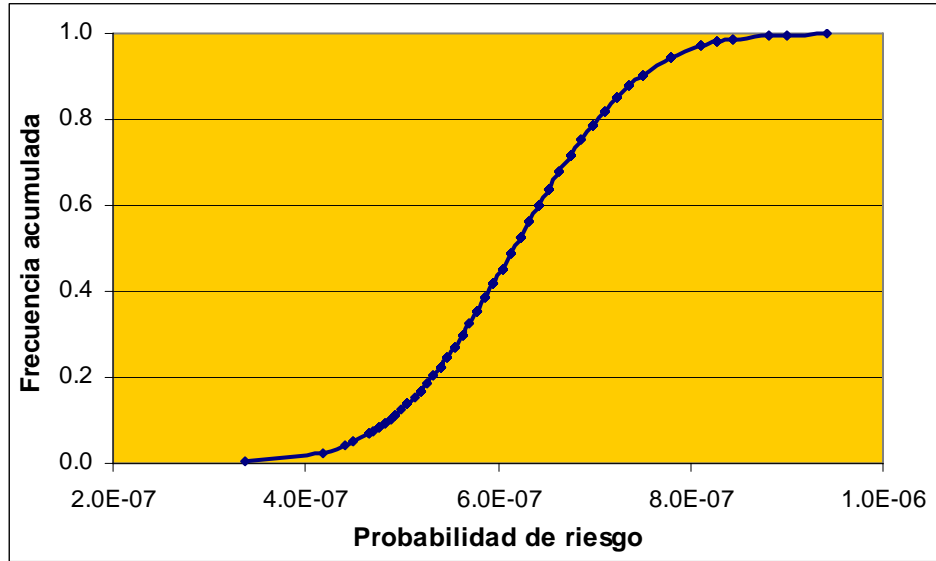


Fig. 7 Distribución de riesgo (variación en BW)

La estimación de riesgo calculado con las funciones de distribución desarrolladas para el término de concentración C_s , para la duración de la exposición (ED) y para el peso del cuerpo (BW) con las variables restantes con el valor típico, se obtiene la distribución de riesgo representada en la Figura 8. La gráfica muestra que la estimación de riesgo se acerca a valores de 10^{-5} e indica que para el 60% de la combinación de datos la probabilidad de riesgo es menor a 10^{-6} .

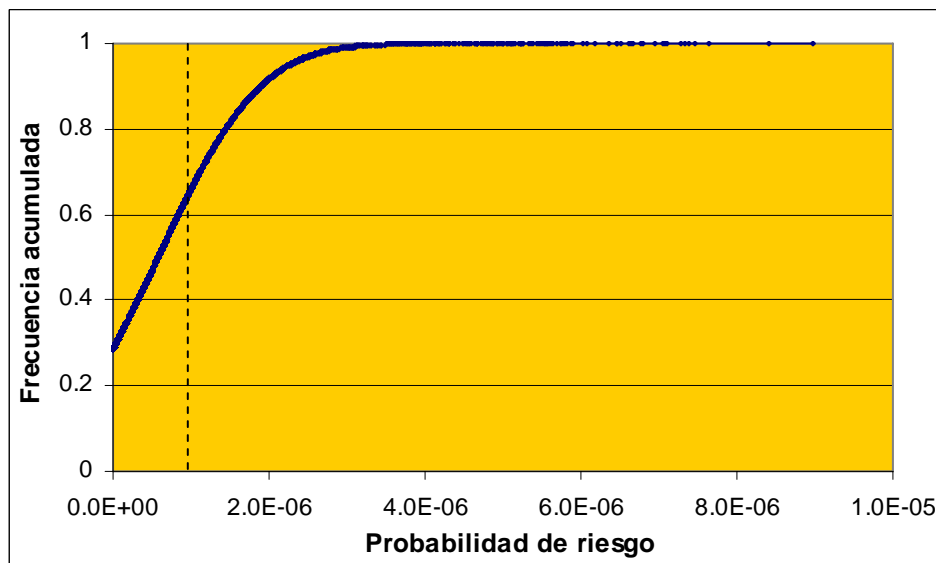


Fig. 8 Distribución de riesgo (variación en C_s , ED y BW)

Variabilidad e Incertidumbres

En la metodología de evaluación de riesgo, la fuente de incertidumbre más importante está en el valor de la concentración (C_s) la cual deberá representar la concentración de exposición promedio, dentro de un área de exposición, durante todo el tiempo que dure. Las principales fuentes de incertidumbre en el término de la concentración (C_s), son: incertidumbres en la muestra de datos, en la localización del área de exposición, en el comportamiento del receptor y en la variación temporal y espacial de la concentración en suelo.

Para expresar la incertidumbre en el término de la concentración (C_s) a partir de una muestra de datos, se usa generalmente el límite superior del intervalo con 95% de confianza para la media (95% UCL) (EPA, 2001b); otra opción es a través de una función de distribución (EPA, 2001a) que exprese la variabilidad en las concentraciones.

El valor típico que se usa para la estimación de riesgo es de $BW = 70$ kg, valor que recomienda EPA para representar a la población de EUA (EPA, 1989). Se observa que el valor típico coincide con el 95% UCL para la media de la población mexicana encuestada. Estas diferencias no sorprenden; la variabilidad en el peso de cualquier núcleo de población depende de factores como la edad, sexo, antecedentes étnicos, hábitos alimenticios, estado de salud, hábitos sedentarios, etc. La distribución empírica que resulta de los datos de la encuesta analizada con una media de 67.3 kg y una desviación estándar de 11.1 kg, correspondería a una primera aproximación al contexto mexicano.

El análisis estadístico de la información (Tabla 1) indica que el arraigo de la población al lugar es muy importante con una media de 31 años. El valor típico para ED es de 30 años (EPA, 1989) y corresponde al 95 percentil para la población estadounidense (EPA, 1997), con una mediana de 9 años (el 50 % de la población permanece en un sitio no más de 9 años). Estos datos revelan la alta movilidad de la población en EUA que contrasta con los patrones de residencia mexicanos. La variación de esta variable responde a patrones culturales, fuerzas migratorias, existencia de fuentes de trabajo, niveles de bienestar, etc.

La variable temporal E_{vida} es importante para la estimación de la exposición a tóxicos con efectos carcinogénicos, porque el riesgo se promedia a lo largo del tiempo de vida promedio de un individuo (AT). Esto obedece al hecho de que la posibilidad de desarrollo de cáncer está latente siempre aún cuando la exposición al contaminante haya ocurrido muchos años atrás. En el modelo de exposición *clásico* se promedia a 70 años (EPA, 1989). Ante la incertidumbre sobre ese valor se analizaron los datos mexicanos para el año 2000 (Tabla 1); el resultado es que la media nacional de la esperanza de vida es de 75 años. Hay incertidumbre respecto a estos datos porque muestran una gran homogeneidad en todo el país; parecieran no representar a la población que vive en condiciones de extrema pobreza (mayor al 30%).

Las variables específicas a la vía de contacto indican la cantidad de contaminante que ingresa al organismo humano por la ingestión de suelo (IR_{suelo} , FI, GI) o que entra al sistema respiratorio por la inhalación de vapores o polvos que emite el suelo contaminado (IR_{aire} , VF, PEF) o la cantidad de suelo contaminado que tiene contacto con la piel (SA, AF, ABS). Algunos de los

factores que influyen en la variabilidad de estas variables, son: la diversidad de actividades que puede realizar el individuo expuesto; el tipo de contaminante en el suelo, la diversidad en el tipo de suelos contaminados; la diversidad de condiciones climáticas. Estos factores introducen incertidumbre en la estimación de riesgo y también variabilidad. La discusión detallada sobre la variabilidad y fuentes de incertidumbres para estas variables del modelo puede consultarse en Navarro (2004), así como las posibles representaciones a través de funciones de distribución.

Para benceno se han derivado factores de toxicidad a partir de estudios en humanos, de carácter epidemiológico, realizados con datos de exposición laboral para la vía de inhalación (factor Sf_{ih}); para este caso las evidencias son suficientes para estimar la toxicidad por el posible desarrollo de cáncer (leucemia). La extrapolación a otras vías (Sf_i , Sf_d) fue posible a partir de metodologías que con ese fin se han desarrollado con la incertidumbre que introducen al modelo de exposición.

Estimación de Niveles de Limpieza

El método iterativo con truncación se aplicó para la distribución de las concentraciones de benceno (Figura 1); cada valor máximo se sustituyó por el 50% del valor del límite de detección analítica (0.00055 mg/kg); en cada iteración se obtuvo una base de datos de concentración diferente y se recalculó el valor de $C_s = 95\%$ UCL. Las distribuciones de riesgo se obtuvieron (Figura 9) a partir de la ecuación [1] donde la variable ED tomó los valores de la distribución (Figura 2) y a las variables restantes correspondieron al valor típico; las gráficas muestran que en la segunda iteración, para $C_s = 0.388$ mg/kg, se cumple que el 95 percentil de la distribución de riesgo es menor a 10^{-6} y, por lo tanto, ese valor corresponde al nivel de limpieza. Esto quiere decir en el terreno práctico, que la remediación en el sitio con suelo contaminado con benceno deberá de sanearse hasta que la concentración promedio en el sitio sea de 0.388 mg/kg.

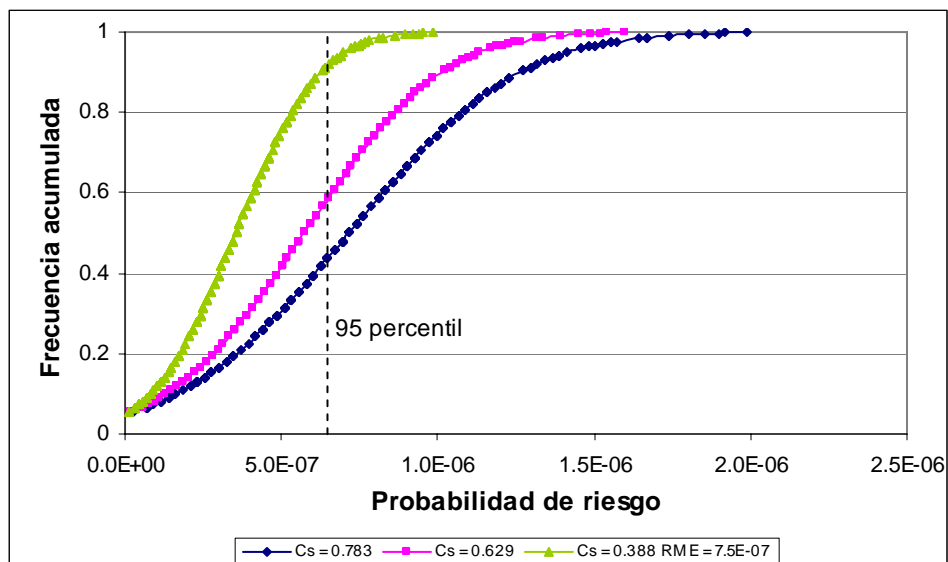


Fig. 9 Distribución de riesgo con el método iterativo

CONCLUSIONES

Las funciones de distribución desarrolladas para la duración de la exposición (ED) peso del cuerpo (BW) y esperanza de vida (E_{vida}) muestran la heterogeneidad observada en adultos de los núcleos de población mexicana estudiados. Los datos obtenidos de la encuesta epidemiológica son una aportación para comprender numéricamente las diferencias que siempre se ha sospechado que existen entre la diversidad de nuestro país y los valores típicos derivados de la población norteamericana.

Los resultados obtenidos pueden aplicarse a futuros estudios de sitios específicos. Se recomienda usar las funciones de distribución para las variables desarrolladas en este trabajo para obtener una estimación preliminar de riesgo más cercana a la heterogeneidad del país y con menos incertidumbres. Para mejorar la estimación se sugiere realizar estudios que documenten la variabilidad de las variables temporales de exposición (ED, ET_0 y EF) para la población específica del sitio. Para las variables restantes, que tienen menor influencia en la estimación de riesgo, se sugiere usar los valores típicos para ambas situaciones.

El acercamiento logrado en este trabajo puede mejorarse con estudios epidemiológicos a otros núcleos de la población para derivar funciones de distribución para las variables ED, BW, SA y AT. Estudios a otros grupos de población representativos en el país permitirán caracterizar mejor la variabilidad de dichas variables; con atención especial a la población infantil por el alto nivel de vulnerabilidad que presentan. Estos estudios adicionales proporcionarán mayor confianza (menor incertidumbre) en la caracterización cuantitativa del comportamiento (variabilidad) de estas variables y en la estimación de riesgo que se pretende controlar en los sitios con pasivos ambientales.

La colección de datos en la perspectiva de una encuesta nacional deberá considerar la diversidad de la población mexicana en términos de: identificar diferentes niveles urbanos y rurales, zonas marginales rurales y núcleos de población marginada en las ciudades, zonas de expulsión de habitantes (elevada migración), zonas de alta recepción de población y otras con mucha movilidad de los individuos con asentamiento temporal, además de la selección de individuos por edad, sexo, ocupación e ingreso.

Una base de datos con esas características permitirá obtener funciones de distribución representativas de la variabilidad en peso del cuerpo, duración de la exposición, superficie de la piel y la esperanza de vida para cualquier núcleo de mexicanos. Se lograría representar la diversidad y reducir las incertidumbres para obtener indicadores confiables de riesgo. De manera que sería suficiente con contar con datos de concentración del contaminante en suelo para estimar niveles de riesgo por exposición a contaminantes tóxicos en sitios específicos, así como estimar niveles de limpieza para la remediación.

Por último, en estudios posteriores de aplicación de la metodología de estimación probabilística de riesgo es importante pasar a la identificación de la función de distribución que mejor represente la variabilidad de cada variable; esto es, a través de un análisis de sensibilidad e

incertidumbres del modelo de exposición que típicamente se realiza con el modelo Monte Carlo (EPA, 2001c) o puede realizarse con otros modelos como Cristal Ball o @Risk.

Finalmente, con estos resultados se pretende dar un paso en la comprensión de la estimación de riesgo probabilística. Es una contribución inicial para su aplicación y dejar evidencias de las ventajas de su uso; así como de la necesidad de un mayor conocimiento y manejo de esta metodología para que se convierta en una herramienta de apoyo en las decisiones de saneamiento de sitios contaminados. En particular si se considera, que hasta ahora, la autoridad mexicana ha establecido niveles de limpieza con base en el enfoque de la estimación puntual de riesgo.

BIBLIOGRAFÍA

Diario Oficial (2002) *Norma Oficial Mexicana de Emergencia NOM-EM-138-ECOL-2002 Límites máximos permisibles de contaminación en suelos afectados por hidrocarburos, la caracterización del sitio y procedimientos para la restauración*, Martes 20 Agosto 2002, pp 43

EPA (1989) *Risk Assessment Guidance for Superfund. Volume 1. Human Health Evaluation Manual (Part A). Interim Final*, Office of Emergency and remedial response. Washington DC, EPA/540/1-89/002, December 1989

EPA (1992) *Dermal Exposure Assessment: Principles and Applications*, Office of Research and Development, Washington DC, EPA/600/8-91/011B, January, 1992

EPA (1996) *Soil Screening Guidance: Technical Background Document, Second Edition*, Office of Solid Waste and Emergency Response, Washington D.C., EPA/540/R-95/128, May 1996

EPA (1997) “*Exposure Factors Handbook*” en EPA [On line] Available: <http://www.epa.gov/ncea/exposfac.htm> actualizada al 9 enero de 2000, [2001, Marzo 20]

EPA(2001a) *Risk Assessment Guidance for Superfund: Volume III - Part A. Process for Conducting Probabilistic Risk Assessment, Chapter 5 “Probabilistic Risk Assessment and Preliminary Remediation Goals”*, Office of Emergency and Remedial Response USEPA, Washington DC, EPA 540-R-02-002, OSWER 9265.7-45, PB2002 963302, December 31, 2001

EPA(2001b) *Risk Assessment Guidance for Superfund: Volume III - Part A. Process for Conducting Probabilistic Risk Assessment, Appendix C “Characterizing Variability and Uncertainty in the Concentration Term”*, Office of Emergency and Remedial Response USEPA, Washington DC, EPA 540-R-02-002, OSWER 9265.7-45, PB2002 963302, December 31, 2001

EPA (2001c) *Risk Assessment Guidance for Superfund: Volume III - Part A. Process for Conducting Probabilistic Risk Assessment, Appendix A “Sensitivity Analysis: How do we know what’s important?”*, Office of Emergency and Remedial Response USEPA, Washington DC, EPA 540-R-02-002, OSWER 9265.7-45, PB2002 963302, December 31, 2001

EPA (2001d) *Risk Assessment Guidance for Superfund, Volume I: Human Health Evaluation Manual, Part E, Supplemental Guidance for Dermal Risk Assessment, Interim Guidance*, Office of Solid Waste and Emergency Response, Washington DC, EPA/540/R-99/005 PB99-963312

EPA (2001e) *Supplemental Guidance for Developing Soil Screening Levels for Superfund Sites. Interim Guidance*, Office of Solid Waste and Emergency Response. Washington DC. OSWER 9355.4-24, March, 2001

EPA Region 9 (2002) *PGRs Exposure Parameters en Region 9* on line [updated October, 2002] <http://www.epa.gov/region9/waste/sfund/prg/files/02userguide.pdf> [consultada 7 Junio, 2004]

Finley B & D. Paustenbach (1994) *The Benefits of Probabilistic Exposure Assessment: Three Case Studies Involving Contaminated Air, Water and Soil*, Risk Analysis Journal **14** (1), 53-73

Hamby D.M (1994) *A Review of Techniques for Parameter Sensitivity Analysis of Environmental Models*, Environmental Monitoring and Assessment **32**, 135-154

IRIS (2004) *Toxicity Data for Benzene* en Integrated Risk Information System on line <http://www.ep.gov/iris/subst/0276.htm> [updated July, 2004] [consultada 20 Septiembre, 2004]

Morgan M.G. & M. Henrion (1990) *Uncertainty: A Guide to Dealing with Uncertainty in Quantitative Risk and Policy Analysis*, Cambridge University Press, New York, 332 pp

Navarro I (2004) *Criterios para el Desarrollo de Niveles de Limpieza en Sitios Contaminados por Hidrocarburos*, Tesis, Maestría en Ciencias con Especialidad en Sistemas Ambientales, ITESM, Noviembre 2004

Navarro I, Flores E. & Valladares R. (2004) *Documentación y Seguimiento de Casos de Leucemia y Trombocitopenia por Contaminación en el Río Atoyac. Estudio Ambiental y Epidemiológico*, elaborado para el Centro Fray Julián Garcés con financiamiento del Fondo de América del Norte para la Cooperación Ambiental (FANCA), Abril 2004

RAIS (2003) *Chemical-Specific Toxicity Values*, en RAIS on line http://risk.lsd.ornl.gov/tox/tox_values.shtml [September, 2003] [consultada 19 Septiembre, 2003]

PEMEX (2001). Derrame de Hidrocarburos en Seguridad, Salud y Medio Ambiente, 1999. *En Informe de Labores, 1999*. PEMEX [On line]. Available: <http://www.pemex.gob.mx/rpyderr2.pdf> actualizada con fecha 23 de marzo 2001. [2001, Marzo 27]