

SIMULACIÓN MONTECARLO PARA EL CÁLCULO PROBABILÍSTICO DE RIESGO EN SALUD AMBIENTAL E INOCUIDAD ALIMENTARIA

Recibido: 17 agosto, 2018
Aceptado: 26 septiembre 2018

H. Lorenzo Márquez¹
D. Leines Medina²
D.M. Hernández Benavides³
K.A. Medrano Villegas⁴

RESUMEN

Históricamente el cálculo de riesgo ha sido utilizado para simplificar la toma de decisiones complejas. Su análisis ayuda a dimensionar la situación, identificar alternativas de acción y recoger datos sobre los resultados factibles, (éxito o fracaso; ganancia o pérdida) de cada alternativa. Actualmente el cálculo de riesgo ha evolucionado siendo cada vez más preciso en sus predicciones, puesto que, se han desarrollado métodos matemáticos con los cuales las incertidumbres pueden ser reducidas al máximo, el más utilizado es el método Montecarlo. Sus usos son variados desde explorar los riesgos financieros; los riesgos de asegurar a una persona con determinadas condiciones físicas, así como estimar el riesgo en salud ya sea por ingesta de alimentos contaminados o por exposición ambiental a contaminantes. Este último será el objeto de estudio en este artículo, el objetivo es mostrar las bondades de la estimación de riesgos a través de la simulación de escenarios enfocados en salud ambiental e ingesta de alimentos contaminados utilizando la metodología propuesta por la Organización Panamericana de la Salud y reducción de incertidumbres a través del método Montecarlo.

PALABRAS CLAVE: Simulación de escenarios; Montecarlo; OPS; Ingeniería ambiental; Ingeniería en Industrias Alimentarias; Riesgo.

ABSTRACT

Historically, risk calculation has been used to simplify complex decision making. Their analysis helps to dimension the situation, identify alternative actions and collect data on the feasible results (success or failure, gain or loss) of each alternative. Currently the calculation of risk has evolved to be increasingly accurate in their predictions, since, mathematical methods have been developed with which uncertainties can be reduced to the maximum, the most used is the Montecarlo method. Their uses are varied from exploring financial risks; the risks of insuring a person with certain physical conditions, as well as estimating the risk to health either through the ingestion of contaminated food or through environmental exposure to contaminants. The latter will be the object of study in this article, the objective is to show the benefits of risk estimation through the simulation of scenarios focused on environmental health and intake of contaminated food using the methodology proposed by the Pan American Health Organization and reduction of uncertainties through the Montecarlo method.

KEYWORDS: Simulation of scenarios; Montecarlo; OPS; Environmental engineering; Engineering in food industries; Risk.

INTRODUCCIÓN

El riesgo se define como la combinación de la probabilidad de que se produzca un evento y sus consecuencias negativas. Este se compone de dos factores que son la amenaza y la vulnerabilidad; el primero se define como un peligro latente de un sistema o de un sujeto

Profesor de Asignatura. ¹Instituto Tecnológico de Ciudad Valles, habacuc.lorenzo@tecvalles.mx

Profesor de Asignatura. ²Instituto Tecnológico de Ciudad Valles, desiderio.leines@tecvalles.mx

Profesor de Asignatura. ³Centro de Estudios Tecnológicos en Aguas Continentales No. 04 dmhb0408@gmail.com

Profesor de Asignatura. ⁴Centro de Estudios Tecnológicos en Aguas Continentales No. 04, anais_medrano@hotmail.com

expuesto de exceder un nivel de ocurrencia de un suceso con una cierta intensidad, en un sitio específico y durante un tiempo de exposición determinado. Por otra parte, la vulnerabilidad se entiende, como la factibilidad de que el sujeto o sistema expuesto sea afectado por el fenómeno que caracteriza la amenaza. Así, el riesgo puede expresarse como la probabilidad de exceder un nivel de consecuencias en un cierto sitio y durante un cierto periodo de tiempo (Ricci 2006; Theodore and Dupont 2012).

Por lo tanto, el riesgo está compuesto de dos factores con un mutuo condicionamiento, en este caso la amenaza y la vulnerabilidad. Dicho de otra forma, no se puede estar en riesgo si no existe amenaza e individuos vulnerables, ni se puede ser vulnerable si no se está amenazado y no existe una condición de amenaza para un elemento, sujeto o sistema si no se está expuesto y es vulnerable a la acción potencial que representa dicha amenaza. No existe amenaza o vulnerabilidad independientemente, pues son situaciones mutuamente condicionantes que se definen en forma conceptual de manera independiente para efectos metodológicos y para una mejor comprensión del riesgo. Así, al intervenir uno o los dos componentes del riesgo se está interviniendo el riesgo mismo.

El riesgo ha sido utilizado históricamente con la finalidad de simplificar la toma de decisiones. Su análisis ayuda a dimensionar la situación, identificar alternativas de acción y recoger datos sobre los resultados factibles, (éxito o fracaso; ganancia o pérdida) de cada alternativa (Ricci 2006; Theodore and Dupont 2012).

Actualmente en la esfera sanitaria el cálculo del riesgo ha tenido una mayor participación, puesto que, las evaluaciones de factores de riesgo dan como resultado estimados con los cuales se pueden adoptar medidas de prevención. Esto se traduce para los tomadores de decisiones en un ahorro significativo de los recursos limitados; lo cual, es un enfoque nuevo al tradicional abordaje paliativo, donde una parte importante de la labor científica y la mayor parte de los recursos sanitarios se dirigían hacia el tratamiento, lo que representa un gasto importante de recursos (Organización Panamericana de la salud 1999).

Así, por ejemplo, la estimación del riesgo genera información fiable, comparable y de interés local sobre la magnitud de los diferentes riesgos para la salud, lo cual conduce a los tomadores de decisiones a establecer orientaciones generales en materia política e investigación sanitaria.

Una de las principales preocupaciones a nivel mundial en términos de salud es el consumo de alimentos inocuos, este atributo es considerado un requisito básico de la calidad que implica la ausencia de contaminantes, adulterantes, toxinas y cualquier otra sustancia que pueda hacer nocivo el alimento para la salud, o bien unos niveles inocuos o aceptables de los mismos. Actualmente la inocuidad de los alimentos es considerada un tema de alta prioridad para todos los países y gobiernos (Friedrich 2014).

En respuesta a esta problemática, los gobiernos de los diferentes países han desarrollado una serie de normativas que buscan establecer los límites máximos permisibles para algunos componentes añadidos intencional o involuntariamente considerados inseguros.

En todos los casos, el propósito principal de cada autoridad es establecer un marco regulatorio y mantener/hacer cumplir regulaciones para asegurar que los alimentos consumidos y

vendidos dentro de sus respectivos países sean seguros. Sin embargo, esta es una medida política además de científica que responde a términos comerciales (Magnuson et al. 2013). En este marco regulatorio no se consideran los organismos más sensibles o vulnerables.

Por ello, realizar estimaciones de riesgo, en las cuales se consideran las vulnerabilidades de los individuos presenta una mejor opción en la búsqueda de prevenir problemas de salud asociados a la ingesta de alimentos.

En México ante la escasa regulación y las grandes disparidades sociales, es necesario implementar métodos que apoyen las regulaciones desarrolladas y que puedan considerar la vulnerabilidad de la población objetivo tomando en cuenta que la mayoría de los casos de intoxicación no laboral se dan por ingesta de alimentos contaminados o por exposición crónica de contaminantes ambientales, es aquí donde la metodología que se propone cobra relevancia. Por tal motivo se analizarán datos publicados de algunos contaminantes en alimentos como en diversas matrices ambientales; con lo cual esperamos guiar al lector en el desarrollo de esta metodología para futuras intervenciones.

METODOLOGÍA

A continuación, describiremos de forma general los pasos necesarios para generar el cálculo de riesgo; debemos iniciar describiendo un par de fórmulas matemáticas que son desarrolladas por la Organización Panamericana para la Salud (OPS):

Para la estimación de riesgo por ingesta de contaminantes en alimentos o exposición ambiental se utiliza como guía el método determinístico descrito en la Metodología de Identificación y Evaluación de Riesgos para la Salud en Sitios Contaminados, de la Organización Panamericana de la Salud (Díaz-Barriga, 1999) en la cual es necesario obtener una dosis calculada de la ingesta del contaminante considerando algunos aspectos como los que se describen en la siguiente ecuación:

$$Dosis\ calculada = \frac{\left[Conc. \frac{mg}{kg} \right] * TI \left(\frac{kg}{día} \right)}{PC \text{ (en kg)}} * FE$$

Donde:

- *Dosis calculada* = Dosis estimada de exposición (mg/kg-día).
- *Conc.* = Concentración ambiental del contaminante en el medio analizado (Alimentos, agua, suelo, aire, entre otros) expresado en mg/kg.
- *TI* = Tasa de ingesta diaria del elemento del medio contaminado, (Alimentos, agua, suelo, aire, entre otros) expresado en kg/día.
- *PC* = Peso corporal de la población receptora (kg).
- *FE* = Factor de exposición = 1, máximo riesgo.

Los datos de TI y PC deben ser colectados en campo para tener referencia del sitio evaluado o bien pueden ser datos extraídos de literatura.

Para el cálculo del riesgo es necesario tomar como referencias dosis consideradas como de seguridad; pueden utilizarse las Dosis de Referencia generadas por la Agencia de Protección al Medio Ambiente de los Estados Unidos de Norte América o usar los Niveles de Riesgo Mínimo por sus siglas en inglés RfD ó MRL respectivamente en las cuales no se ha detectado un daño en la salud ó cualquier otra dosis que tenga un sustento científico.

El siguiente paso fue dividir cada dosis estimada de exposición entre la dosis de referencia (RfD) para obtener un cociente de riesgo (CR), como podemos ver a continuación:

$$\text{Cociente de Riesgo (CR)} = \frac{\text{Dosis calculada}}{\text{Dosis de referencia (RfD)}}$$

La interpretación del nivel de riesgo se basa en que un $CR > 1$ significa que la exposición estimada para un individuo supera los límites de seguridad propuestos para el contaminante de interés (RfD), por lo que hay un riesgo alto de manifestar los efectos adversos descritos para cada contaminante. Mientras que un $CR < 1$ significa que el riesgo de exposición es bajo por lo que la posibilidad de ocurrencia de un efecto adverso en la población es mínima.

Sin embargo, esta fórmula es un modelo determinístico en el cual no se toman en cuenta los individuos más sensibles, puesto que, al tratarse de valores puntuales, el cálculo del riesgo es específico para los valores seleccionados lo cual limita el estudio. Para ello es necesario utilizar la simulación de Montecarlo con la cual podemos reducir dichas incertidumbres.

A continuación, se describe el proceso de la estimación probabilística en la estimación de riesgo; esto es en términos generales, un procedimiento que utiliza modelos matemáticos para representar la probabilidad de encontrar las diferentes dosis de exposición en una población con características altamente variables. La principal ventaja del método probabilístico es que provee una descripción cuantitativa del grado de variabilidad para los estimados de las dosis. El análisis cuantitativo de la variabilidad, proporciona más información de la exposición que cuando se realiza por medio de una estimación puntual (EPA 1997).

La estimación probabilística se realiza por medio de la técnica numérica de la Simulación Montecarlo (SMC). La SMC es una técnica cuantitativa que hace uso de la probabilidad para imitar, mediante modelos matemáticos, el comportamiento aleatorio de fenómenos (procesos o eventos) reales. La clave consiste en crear un modelo global del proceso que se quiere analizar, identificando aquellas variables (parámetros) cuyo comportamiento aleatorio determina la conducta del fenómeno. Una vez identificados dichos parámetros o variables aleatorias, se lleva a cabo un ensayo que consisten en:

1. Generar con ayuda de la computadora muestras semi-aleatorias (valores) para cada uno de los parámetros.
2. Analizar el comportamiento del sistema ante los valores generados.

Tras repetir “n” veces el experimento, se dispone de “n” observaciones sobre el comportamiento del modelo, que serán de utilidad para entender el funcionamiento del mismo. El análisis será más preciso cuanto mayor sea el número de “n” experimentos que se

lleven a cabo, hay que mencionar que los programas computacionales permiten desarrollar un gran número de repeticiones (cientos de miles de operaciones) lo que simplifica este proceso.

Usando el método probabilístico, cada parámetro de la ecuación estará definido como variables aleatorias con una distribución probabilística. La Fig 1. Esquematiza el cálculo de la dosis de exposición utilizando Montecarlo.

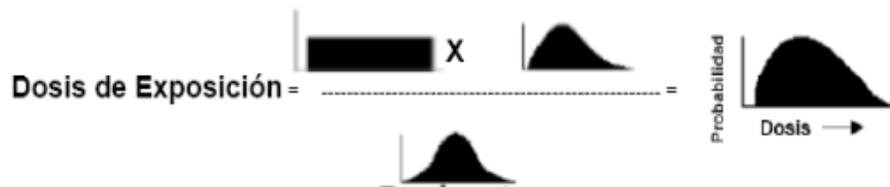


Figura 1. Estimación Probabilística de la Dosis de Exposición.

La etapa fundamental en este método es identificar las distribuciones probabilísticas que definen cada variable en las ecuaciones (parámetros como la concentración del contaminante, ingesta, peso corporal, entre otros).

Al llegar a este punto de la metodología ya se realizaron las cuantificaciones de los contaminantes en la entidad a evaluar, los cuales podrían ser residuos de xenobioticos en alimentos o contaminantes ambientales; y posiblemente en este momento también se genere información adicional acerca de la biodisponibilidad. Utilizando los datos obtenidos, se busca la distribución probabilística que mejor los ajuste (Log-Normal, Exponencial, Normal, entre otras).

Como ya se señaló, la simulación Montecarlo se realiza por medio de programas computacionales, actualmente existen diversos paquetes comerciales que facilitan el proceso (Oracle Crystal Ball, R, @RISK, Risk Software entre otros). Cualquiera que se utilice deberá contar con un procedimiento para ajustar los valores a las diferentes distribuciones probabilísticas, en caso de que el software no cuente con esta opción, se puede auxiliar con distintos programas de análisis estadísticos para esta finalidad.

En cuanto a las tasas de ingesta, el peso corporal de los individuos y las otras consideraciones de la exposición, deben medirse directamente en la población de estudio; o bien, se puede hacer uso de los valores citados en la literatura científica o en diversos manuales.

Una vez que se han definido todos los parámetros de las ecuaciones, se procede a realizar la primera iteración del modelo. Una iteración representa una combinación específica de valores de cada parámetro, realizar “n” veces la iteración se denomina modelar o dicho en otras palabras construir la simulación por Montecarlo.

El método Probabilístico genera un intervalo de valores expresado como una distribución de probabilidad de padecer un efecto adverso derivado del arreglo matemático.

RESULTADOS

Para ejemplificar las bondades de la metodología se utilizarán los datos expuestos como límites máximos permisibles de la NOM-127-SSA1-1994 “Agua para uso y consumo humano” para cadmio (Cd) un metal pesado considerado altamente tóxico el cual será tomado como dato ambiental y alimento potencialmente contaminado; así como, datos de Cd en Peces de ríos de Tabasco, México. Los datos se ilustran en la Tabla 1.

Tabla 1. Parámetros utilizados para estimar la exposición por ingesta de contaminantes.

Parametro	Referencia	Distribución	Media	DE	Mínimo	Máximo
Cd en agua de consumo humano	NOM-127-SSA1-1994	-	0.005 mg/kg	-	-	-
RfD Cd en agua de consumo humano	USEPA IRIS, 2018	Proteinuria significativa (USEPA, 1994)	0.0005 mg/kg/día	-	-	-
TI agua mg/kg niños 36 meses	USEPA, 2008	Triangular	380 mL/día	-	98 mL/día	834 mL/día
PC niños 36 meses kg	USEPA, 2008	Triangular	18.6	-	13.5	26.2

$$Dosis\ calculada = \frac{\left[0.005 \frac{mg}{kg}\right] * TI \left(0.380 \frac{mg}{día}\right)}{18.6 \text{ (en kg)}} * 1 = 0.0001$$

Fórmula 1. Cálculo de dosis de exposición usando los datos de la NOM-127-SSA1-1994

$$Cociente\ de\ Riesgo\ (CR) = \frac{0.0001 \frac{mg}{kg} / día}{0.0005 \frac{mg}{kg} / día \text{ (RfD)}} = 0.2043$$

Fórmula 2. Cálculo determinístico de cociente de Riesgo.

Los datos obtenidos en la fórmula 2 representan el escenario estimado sin tomar en cuenta las fuentes de incertidumbre inherentes a una población como son el peso y la tasa de ingesta. Para poder sortear esas fuentes de incertidumbre es necesario utilizar el modelo probabilístico Monte-Carlo en el cual se generara una distribución de frecuencias la cual considerara los organismos que tienen un menor peso y menor tasa de ingesta así como aquellos que tienen

un mayor peso y tasa de ingesta; con lo cual el cálculo de riesgo cambia considerablemente. Dicho cálculo se representa como una probabilidad en una función de densidad. Como se ilustra en la Figura 1.

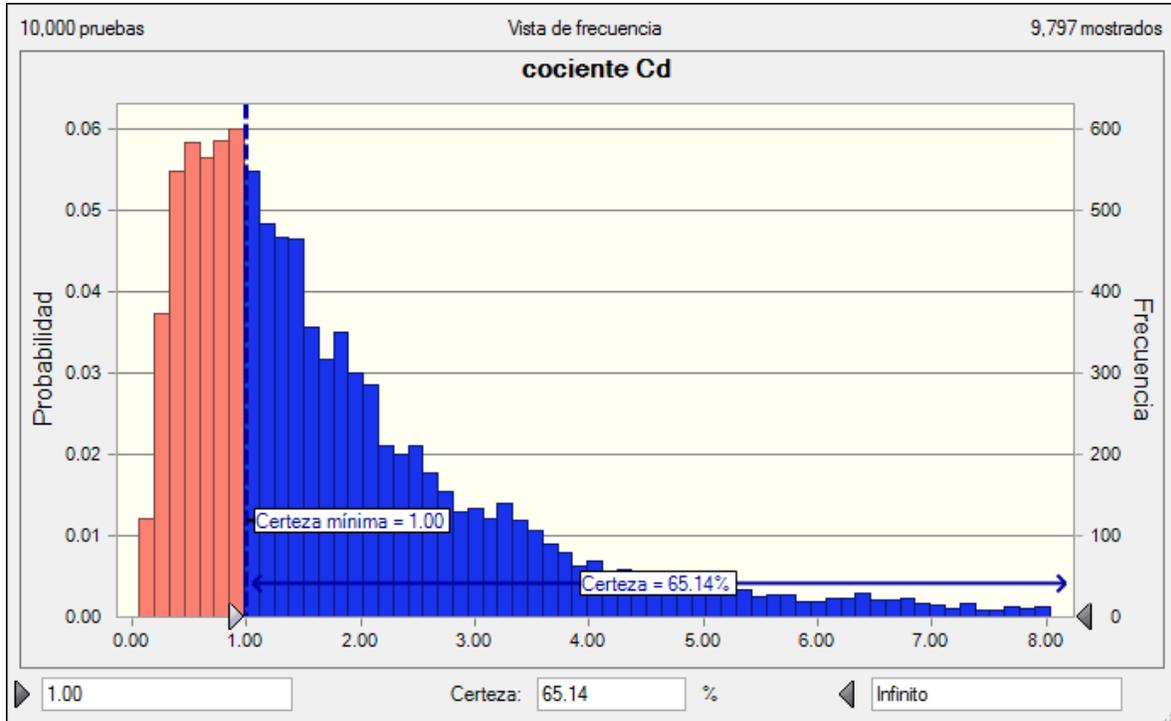


Figura 1. Estimación de riesgo usando los valores de la NOM-127-SSA1-1994.

En la Figura 1 se muestra que existe un 65.14 % de probabilidad de sufrir los efectos adversos (Proteinuria significativa) asociados a la ingesta de Cd en agua con los datos propuestos para este escenario Tabla 1.

Con este breve, pero sustancial ejemplo esperamos demostrar las bondades de la metodología. Puesto que, los valores considerados como máximos permisibles establecidos en las NOM en ocasiones no denotan la protección necesaria sobre todo cuando se consideran los organismos más sensibles como pueden ser niños y personas de la tercera edad, sin embargo, dichos organismos son parte importante al momento de gestionar valores que sean orientados en la protección a la salud.

CONCLUSIONES

Lo que se busca con la simulación de escenarios es estimar el riesgo de una población que se encuentra bajo condiciones específicas o determinar qué sucedería si las condiciones cambiasen de un momento a otro. El método de estimación de riesgo probabilístico captura la incertidumbre inherente a los parámetros utilizados en el modelo determinístico y logra disminuirlas al considerar toda una función de densidad probabilística, esto utilizando el

poder de repetición por números semi-aleatorios generados a través de los algoritmos del método Montecarlo.

Si bien lo obtenido será una simulación de un escenario posible el resultado es una herramienta de gestión importante, para ello se parte del principio precautorio en donde se antepone la salud de los individuos.

Con lo anterior mencionado se espera que el cálculo de riesgo por métodos probabilísticos sea considerado como una alternativa para la solución de problemas complejos en donde los recursos son limitados. El planteamiento se abordó de forma genérica, esto debido a que la estimación de riesgos en salud no es específica para los campos de Industrias Alimentarias y Ciencias Ambientales, dicho de otra forma, no se limita a la inocuidad de los alimentos o la exposición a contaminantes ambientales, se puede evaluar cualquier tipo de riesgo que pueda ser modelado matemáticamente siempre y cuando se logren identificar correctamente las fuentes de incertidumbre.

BIBLIOGRAFÍA

- Díaz Barriga F. 1999. Metodología de identificación y evaluación de riesgos para la salud en sitios contaminados. Primera. Organización Panamericana de la Salud, Editor. Lima, Perú: Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente.
- EPA Technical Panel. 1997. Guiding Principles for Monte Carlo Analysis.
- Friedrich T. 2014. La seguridad alimentaria: retos actuales. *Rev. Cuba. Cienc. Agric.* 48:319–322.
- Magnuson B, Munro I, Abbot P, Baldwin N, Lopez-Garcia R, Ly K, McGirr L, Roberts A, Socolovsky S. 2013. Review of the regulation and safety assessment of food substances in various countries and jurisdictions. *Food Addit. Contam. Part A. Chem. Anal. Control. Expo. Risk Assess.* 30:1147–220.
- Ricci PF. 2006. *Environmental and Health Risk Assessment and Management: Principles and Practices*. 1ra edición. Alloway BJ, Trevors JT, editors. Springer.
- Theodore L, Dupont RR. 2012. *Environmental Health and Hazard Risk Assessment: Principles and Calculations*.