

Serie Cuadernos Técnicos

3

Análisis de riesgo RBCA en Estaciones de Servicio de la Ciudad de Buenos Aires: el caso de inhalación en espacios cerrados de benceno volatizado desde la napa freática

Análisis de riesgo RBCA en Estaciones de Servicio de la ciudad de Buenos Aires: el caso de inhalación en espacios cerrados de benceno volatilizado desde la napa freática

Daniel Collasius

Serie Cuadernos Técnicos N° 3

Junio de 2007

La Serie Cuadernos Técnicos que publica ECODATA S.A. tiene por objeto presentar opiniones técnicamente fundamentadas sobre problemas ambientales de Argentina. Se han hecho todos los esfuerzos posibles para asegurar la confiabilidad de los datos y sus interpretaciones, pero expresamente se indica que ECODATA S.A. no se hace responsable de la aplicación que pueda darse a éstos.

Ninguna parte de este trabajo puede ser reproducida, almacenada o transmitida por ningún medio electrónico, mecánico, fotocopia, etc sin el permiso por escrito del editor, ECODATA S.A. Hipólito Irigoyen 1284 1ro "2", Buenos Aires, Argentina.

Todos los derechos reservados. Copyright © 2007 ECODATA S.A.

INTRODUCCIÓN

En una publicación anterior (Cuaderno Técnico Nr. 1) se mostró que la inexistencia de criterios específicos para definir la calidad del agua subterránea era la principal razón para recurrir a los Valores Guía de la Ley 24051. En ésta se avanza en ese sentido, definiendo calidad en la napa freática de la ciudad de Buenos Aires sobre la base de criterios de riesgo. Los objetivos principales son dos: discutir los parámetros y valores de los cuales depende y calcular el límite correspondiente.

Respecto a este último punto, los cálculos indican que una concentración de 0,74 mg/L de benceno en la napa freática no ofrecería riesgo a la salud humana en el escenario inhalación en espacio cerrado, el más restrictivo para situaciones en las cuales el agua subterránea no se utiliza para la ingesta como sucede en la ciudad de Buenos Aires.

Muchas personas han colaborado en este trabajo. Se agradece particularmente a Margot Bertol de GEOdata; Javier Clausen y Sofía Hernández Morales de ITESO, México;

Un resumen de este trabajo será publicado en los números junio, julio y agosto de la revista Gerencia Ambiental.

Índice

1.	EXPOSICIÓN, PELIGRO Y RIESGO AMBIENTAL PARA LA CIUDAD DE BUENOS AIRES	7
1.1.	EXPOSICIÓN	7
1.2.	TOXICIDAD	11
1.3.	RIESGO.....	11
2.	CÁLCULO DEL RBSL PARA INHALACIÓN EN ESPACIO CERRADO	12
2.1.	ECUACIONES DE TRANSPORTE Y DESTINO	13
2.2.	PARÁMETROS Y VALORES PARA LA CIUDAD DE BUENOS AIRES	15
2.2.1.	PARÁMETROS ESPECÍFICOS DE SUELO	16
2.2.2.	PARÁMETROS NO-ESPECÍFICOS DE SUELO	21
2.2.3.	PARÁMETROS RELACIONADOS A LOS RECEPTORES.....	23
2.2.4.	PARÁMETROS DE RIESGO.....	25
2.2.5.	PARÁMETROS DEL COMPUESTO DE INTERÉS	25
3.	RESULTADOS Y CONCLUSIONES.....	27
	BIBLIOGRAFÍA	31

Índice de Tablas

TABLA 1:	PARÁMETROS ESPECÍFICOS DE SUELOS	18
TABLA 2:	PARÁMETROS NO ESPECÍFICOS DE SUELO	22
TABLA 3:	PARÁMETROS DE EXPOSICIÓN.....	23
TABLA 4:	DATOS TOXICIDAD Y TRANSPORTE / DESTINO DEL BENCENO	26
TABLA 5:	RBSL PARA BENCENO	27

Índice de Ilustraciones

ILUSTRACIÓN 1:	VISUALIZACIÓN DE PARÁMETROS	15
ILUSTRACIÓN 2:	UBICACIÓN DE LAS FORMACIONES PAMPEANO Y POSTPAMPEANO (AUGE, 2004)	17
ILUSTRACIÓN 3:	CARTA GEOLÓGICA GEOTÉCNICA DE LA CIUDAD DE BUENOS AIRES (RIMOLDI, 2004)	19
ILUSTRACIÓN 4:	NIVEL FREÁTICO (RIMOLDI, 2004)	21

Análisis de riesgo RBCA en Estaciones de Servicio de la ciudad de Buenos Aires: el caso de inhalación en espacios cerrados de benceno volatilizado desde la napa freática

En Buenos Aires, como en cualquier ciudad moderna, los individuos no pueden evitar exponerse a peligros: se puede elegir no fumar, pero es prácticamente imposible evitar ser un fumador pasivo; se puede optar por no manejar automóviles, pero eso no asegura quedar exento de un accidente con uno; etc. Cualquiera de los innumerables ejemplos pueden integrarse en una expresión que combine *peligro* y *probabilidad de ocurrencia* para caracterizar el *riesgo*. También el *riesgo a la salud humana* es un caso particular de ese caso general, donde la probabilidad de ocurrencia está ligada a la exposición de un receptor con una dosis de un compuesto químico y el peligro puede asociarse a sus características toxicológicas inherentes.

La norma ASTM 1739 *Risk Based Corrective Action* explica de forma detallada el modo de desarrollar un análisis de riesgo para la salud humana en relación a derrames de hidrocarburos. En palabras más adecuadas a su objeto, para asegurar que las acciones correctivas que se tomen resulten protectoras a la salud humana, la norma establece una serie de pasos para definir la concentración de contaminantes en suelo, agua o aire que no tendría efectos negativos sobre la salud.

En una primera etapa (denominada Tier 1) los valores de concentración admisible se calculan con espíritu conservador para que puedan aplicarse a una jurisdicción con confianza respecto a su carácter protector de la salud. La ciudad de Buenos Aires presenta características diversas (desde el tipo de suelo a la profundidad de la napa freática) que implican exposiciones distintas y, por lo tanto, riesgos diferentes. En Tier 1 se seleccionan aquellos valores que aseguren que las concentraciones admitidas resulten protectoras para toda la jurisdicción generando lo que se denominan las tablas de Tier 1. Aunque los valores de Tier 1 pueden presentarse en formato de tablas de límites admisibles, no debe perderse de vista que éstos son el resultado de cálculos realizados mediante ecuaciones y criterios conocidos y controlables. Esos valores pueden modificarse si de la aplicación general se pasa a una particular. Ello ocurre a nivel Tier 2 y 3, donde el análisis se aplica a un sitio dado lo cual permite tomar en cuenta sus especificidades

Para la norma RBCA, los valores calculados en Tier 1 reciben el nombre de *Risk Based Screening Level* (RBSL) que conceptualmente puede traducirse como *niveles basados en riesgo para análisis preliminar*¹. En Tier 2 los valores calculados se denominan *Site Specific Target Levels* (SSTL), niveles objetivo específicos del sitio. Como se ve, el primero enfatiza el carácter metodológico e instrumental, mientras que el segundo no solo incluye “sitio” que indica una especificidad que no puede extenderse a otros lugares, sino que también contiene “objetivo” que implica un proceso correctivo. En efecto, si los valores de concentración de contaminantes en suelo y en agua subterránea en un sitio en particular son menores que los RBSL definidos en Tier 1, se estima que no hay riesgo para salud humana, no es necesaria ninguna acción correctiva y el sitio es considerado no-contaminado. Si los valores hallados son mayores que los RBSL, la norma contempla dos alternativas: aplicar acciones correctivas para alcanzar los RBSL o realizar un estudio en Tier 2. Si se elige esta opción, se obtendrán valores específicos del sitio (SSTL) y, de nuevo si las concentraciones halladas son mayores a los SSTL, la norma indica aplicar acciones correctivas para alcanzar esos SSTL o realizar un estudio en Tier 3 para obtener otros valores específicos.

La aproximación por etapas y la posibilidad de adaptarla a cualquier jurisdicción, constituyen las principales razones por las que la norma de ASTM se ha convertido en la base técnica de muchas legislaciones para la gestión de derrames de hidrocarburos, particularmente en los EEUU. Como puede comprobarse fácilmente, agencias ambientales de los distintos estados de ese país han tomado la norma como una base técnica, adaptándola a sus necesidades locales y requerimientos administrativos.

Los RBSL de una Tabla Tier 1 son concentraciones de contaminantes en suelo, agua o aire que no generarían riesgos para la salud humana. Su cálculo implica conocer riesgo, toxicidad y los diversos parámetros que componen la exposición. La concentración de contaminante es la incógnita que se busca resolver. Estrictamente, los RBSL son concentraciones de contaminantes de propiedades tóxicas conocidas que en determinadas condiciones ambientales de exposición y en el marco de un riesgo conocido y aceptado, no generan riesgos a la salud humana. En ese contexto es que se puede afirmar que los RBSL protegen la salud. En la sección siguiente se discuten esas condiciones, en particular los posibles escenarios de exposición y luego se calcula el RBSL para un caso, explicando las ecuaciones utilizadas y discutiendo los valores que

¹ Las expresiones en castellano no pretenden ser traducciones técnicas de las utilizadas en la norma. El IRAM trabaja en una traducción de la norma de referencia y allí podrán encontrarse las expresiones oficiales.

podrían asumir para el caso de Buenos Aires. En la última sección se discuten los resultados obtenidos.

1. Exposición, peligro y riesgo ambiental para la ciudad de Buenos Aires

La norma ASTM 1739 incluye una Tabla Tier 1 pero expresamente señala que antes de poder aplicarla deberán revisarse los criterios sobre los cuales se desarrolló. En lo que sigue se discuten los valores que podrían adoptar los parámetros involucrados para la Ciudad Autónoma de Buenos Aires en el marco de las siguientes limitaciones:

- *El análisis se restringe a Estaciones de Servicio (EESS).* Las EESS en la ciudad de Buenos Aires se componen de sistemas de almacenamiento subterráneos de hidrocarburos (SASH) cubiertos por pisos de cemento que en general brindan también servicios de mecánica ligera y comidas rápidas, entre otros. En estas instalaciones pueden ocurrir pérdidas de hidrocarburos. La limitación a un tipo particular de instalación permite acotar los compuestos de interés y establecer los escenarios de exposición de un manera más simple.
- *El análisis se limita al benceno.* Los combustibles que se expenden en la EESS de la ciudad son en general naftas de distintos octanajes y gasoil. Desde el punto de vista del riesgo a la salud humana, estos combustibles son mezclas particulares de compuestos químicos, entre los cuales se destaca el benceno, el único carcinógeno probado entre los considerados en la norma. Dado que uno de los objetivos del presente artículo es discutir los valores que se asumen en la definición de los RBSL, la selección de un compuesto en particular simplifica el proceso.
- *El análisis prioriza el esquema propuesto en ASTM 1739.* La ventaja del nivel de detalle de la norma es que los valores de los parámetros involucrados en los cálculos pueden discutirse y adaptarse. Se incluyen los valores originales, justificándose los cambios cuando resulta pertinente.

1.1. Exposición

Un análisis de riesgo se inicia con la definición de cómo un determinado compuesto se pone en contacto con un receptor. La norma RBCA incluye escenarios de exposición típicos para derrames de hidrocarburos que aplican a EESS de la ciudad, lo que permite realizar algunas consideraciones generales.

En el caso de una ES, las pérdidas del SASH afectarían el suelo que rodea los tanques y cañerías. Los hidrocarburos podrían infiltrarse por el espacio poral del suelo hasta llegar a la napa freática y ser transportados por ésta. Desde el momento que los hidrocarburos toman contacto con medios naturales comienzan a modificarse por una serie de fenómenos físicos y químicos que dependen tanto de la naturaleza de los compuestos químicos que forman parte de la mezcla original como de las características del medio ambiental afectado. Algunos compuestos químicos tenderán más rápidamente que otros a volatilizarse desde el suelo y/o desde el agua subterránea. Un receptor potencial podría inhalar estos hidrocarburos en espacios abiertos (el transeúnte que pasa por la ES, por ejemplo) o en espacios cerrados (el empleado que trabaja en las oficinas de la ES o quien habita una vivienda lindera). Cuando puede cerrarse el circuito fuente/receptor se dice que el escenario de exposición queda completo, es decir, ocurre. Es el caso del escenario *inhalación en espacios abiertos y/o cerrados de hidrocarburos volatilizadas desde el subsuelo y el agua subterránea*.

La norma incluye también el escenario *inhalación de vapores, partículas y contacto dérmico con suelo superficial*. Para una ES ubicada en la ciudad de Buenos Aires, no se considera que el suelo superficial pueda ser un medio afectado dado el carácter subterráneo de las instalaciones asociadas a una ES² y el hecho de que el piso de cemento prevendría que derrames accidentales de combustible contaminaran el suelo superficial. Un derrame sería sin duda un problema de seguridad, pero las características constructivas de la mayor parte de las EESS ubicadas en la ciudad prevendrían que partículas de suelo contaminadas con hidrocarburos entraran en contacto con la piel o fueran inhaladas por potenciales receptores.

Otra posibilidad contemplada en el esquema RBCA es la *ingestión de agua subterránea* contaminada por hidrocarburos. En la ciudad de Buenos Aires este escenario no aplica por dos motivos: primero, el agua que se utiliza para consumo humano proviene del sistema de distribución de agua potable y no de pozos de explotación domiciliaria; segundo, el agua subterránea que se contamina en un caso de pérdida del SASH es la de la napa freática, que no se utiliza para bebida en el área de referencia. Para la ingesta de agua subterránea, dado que no se verifica exposición, tampoco hay riesgo.

2 Los tanques del SASH tienen en general una tapada mínima de 1 m, mientras que el vientre del tanque puede estar entre los 2,60 m y 5,00 m de la superficie dependiendo del tipo de tanque. La legislación indica que la distancia mínima al eje de la medianera es de 1 m, aunque los sistemas de conducción pueden estar sobre el límite mismo.

Podría argumentarse que en la ciudad de Buenos Aires existen casos en los que se utiliza el agua subterránea: el Censo 2001 registra pozos en el 0,072% de los hogares. Sin embargo, la incertidumbre respecto a que el agua de esas perforaciones se utilice efectivamente para bebida, la altísima proporción de la población servida por red y dado que siempre es posible tomar en cuenta un caso particular de ingesta a nivel de Tier 2, parecen suficientes para justificar la decisión de no considerar la ingesta de agua como un escenario típico a nivel de Tier 1³.

Si bien en la ciudad el agua subterránea que se contamina en un caso de pérdida del SASH de una ES es la napa freática que no se puede utilizar como agua para consumo humano (no solo por limitaciones de calidad sino también de cantidad de agua), debe tomarse en cuenta que la primer napa pertenece a un sistema acuífero interconectado en el cual la contaminación de la capa más superficial puede afectar los acuíferos más profundos (Pampeano y Puelche) que se utilizan para la provisión de agua en amplias áreas del conurbano⁴. En ese marco, podría considerarse necesario establecer un valor

3 Si se verificara que efectivamente existiera un pozo de explotación de agua subterránea para consumo humano en las inmediaciones de una ES en la que hubieran ocurrido pérdidas de hidrocarburos que afectaron la freática, aun habría que determinar la concentración de hidrocarburos que efectivamente podrían alcanzar el agua destinada al consumo de la perforación en cuestión. Esa determinación requiere de modelos de transporte en el agua subterránea que podrían aplicarse en un nivel Tier 2, pero puede asegurarse que la concentración de hidrocarburos en el agua de consumo sería menor que la verificada en la napa freática por efectos físicos, químicos y biológicos. Dado que el agua se utiliza para la ingesta, el valor de concentración de los compuestos de interés en el pozo de explotación, deberían compararse con los límites establecidos por el Código Alimentario Argentino para agua de bebida, similares a los consignados en la Ley 24051.

4 Sala describe tres unidades hidrogeológicas: Sección Hipopuelche (inferior), Sección Puelche (media) Sección Epipuelche (superior) las que se disponen sobre el basamento cristalino impermeable. La unidad Epipuelche, ubicada en sedimentos del Pampeano y Postpampeano, posee dos capas acuíferas: una freática libre que arroja bajos caudales de explotación (inferior a 1 m³/h), con mala calidad de sus aguas producto de la contaminación superficial y la otra capa de carácter semiconfinada, limitada por sedimentos acuitardos que proporciona caudales de entre 1 y 40 m³/h según su emplazamiento y varía entre 10 y 30 m de profundidad. La sección Puelches es la segunda capa semiconfinada y se encuentra apoyada sobre sedimentos acuíclados que integran la Formación Paraná. En su techo se disponen los sedimentos acuitardos que permiten la conexión con los acuíferos superiores. La recarga y descarga del Puelches es fundamentalmente en forma vertical desde o hacia la sección Epipuelche. La recarga de agua es de tipo autóctona indirecta (Auge et al 1983) y se produce cuando el nivel piezométrico del Puelche es mas bajo que el nivel freático, dándose esta situación generalmente en los interfluvios.

Auge (Auge, 2004), por su parte, indica que el comportamiento hidráulico del Postpampeano es el de un acuífero de baja productividad en los horizontes arenosos y areno-arcillosos, mientras que en los horizontes limosos y arcillosos se comporta como acuitardo-acuíclado. El agua contenida en el Postpampeano es de elevada salinidad. Esta característica sumada a la baja productividad y su vulnerabilidad a la contaminación hacen que no sea utilizado como fuente de provisión de agua. El Pampeano se comporta como un acuífero de baja a media productividad. Su sección saturada

límite de concentración de hidrocarburos en la napa freática con el objeto de proteger la calidad de los acuíferos interconectados subyacentes. No es el objeto de estas líneas, pero si se realizaran los cálculos podría comprobarse que la concentración de compuestos en la napa freática con el objeto de proteger los acuíferos es mayor que la derivada del escenario inhalación en espacios cerrados. Es decir, si se toma como límite de calidad en el agua de la napa freática a los valores vinculados al escenario “inhalación en espacio cerrado”, esos valores resultarán protectores también del escenario “ingesta de agua subterránea” para los casos en los que, como en Buenos Aires, la napa de agua afectada no es la misma que se consume.

Como se ve para pérdidas de hidrocarburos en las EESS ubicadas en la ciudad, el único escenario completo es la inhalación de hidrocarburos que se evaporan del subsuelo y del agua de la napa freática. Esta inhalación puede darse en espacios abiertos y/o en espacios cerrados. En el primer caso, los receptores potenciales pueden ser tanto quienes llegan con su automóvil a cargar combustible como los empleados que trabajan en la playa o los transeúntes que circulan. La inhalación en espacios cerrados podría verificarse tanto para quienes trabajan en las oficinas de la ES como para quienes vivan en las cercanías del lugar. Si se comparan los RBSL para espacios abiertos con los que se aplican en espacios cerrados, éstos últimos son siempre más restrictivos dado que los factores de dispersión que afectan la concentración de compuestos en espacios abiertos (el viento, por ejemplo) no aplican en espacios cerrados. Por lo tanto, cualquier concentración que se considere protectora de la salud humana para espacios cerrados lo será también para espacios abiertos.

Como se describiera, las pérdidas de combustible contaminarían el suelo circundante al tanque o las cañerías donde se verifique la pérdida. Inicialmente, la ruta preferencial de los hidrocarburos sería vertical, filtrándose por el espacio poral del suelo por acción de la gravedad. Una vez que alcanzan la napa freática, parte de los hidrocarburos se disolverán en el agua y desde ese momento la ruta preferencial de transporte será horizontal, dependiendo de la velocidad de la napa freática. Una vez que los hidrocarburos son transportados por el agua subterránea pueden alcanzar estructuras edilicias por lo cual los vapores de hidrocarburos pueden llegar a espacios cerrados, tanto de uso comercial como residencial. Dado que los tanques y cañerías de una ES típica están ubicados en el área de playa, es menos probable que los vapores alcancen espacios cerrados.

1.2. Toxicidad

Todas las sustancias químicas pueden resultar tóxicas dependiendo de la dosis y de las características de la exposición. La evaluación de toxicidad de una sustancia implica una evaluación dosis-respuesta para caracterizar la relación entre la dosis efectivamente recibida y la importancia de los efectos adversos en la población expuesta. La evidencia disponible consiste en investigaciones toxicológicas publicadas de los cuales se derivan valores numéricos de referencia. Las sustancias no carcinogénicas presentan un umbral definido por el NOAL (No Observed Adverse Effect Level) que deriva de estudios epidemiológicos y pruebas de laboratorio. Las sustancias carcinogénicas no tienen umbral: pequeñas dosis pueden causar efectos adversos en la salud y se expresan como Slope Factor (SF).

La norma RBCA describe algunos aspectos toxicológicos de los compuestos que incluye (BTEX, naftaleno y benzo(a)pireno) con datos de IRIS (Integrated Risk Information System). Desde 1995, fecha de publicación de la norma, IRIS introdujo una serie de modificaciones al perfil toxicológico del benceno. El benceno es clasificado por IRIS como un cancerígeno probado (Categoría A) para todas las rutas de exposición sobre la base de evidencias de estudios con seres humanos y animales. Los estudios epidemiológicos, principalmente vinculados a salud ocupacional, prueban asociaciones causales entre la exposición al benceno y ciertos tipos de cáncer, en particular leucemia (IRIS, 2007).

Se seleccionó el benceno como compuesto de interés porque es un compuesto químico presente en los combustibles gestionados en las EESS; porque es el único catalogado como A entre los compuestos cancerígenos que podrían formar parte de los combustibles y porque en general domina los riesgos a la salud humana cuando se verifica su presencia. Aunque en lo que sigue solo se tiene en cuenta al benceno, los criterios adoptados podrá aplicarse fácilmente a otros compuestos químicos presentes en los combustibles tomando en cuenta sus características de toxicidad y de transporte y destino.

1.3. Riesgo

Para la norma ASTM 1739, los riesgos carcinógenos se expresan como probabilidad de contraer cáncer. Esta probabilidad se define como la *tendencia creciente de que un individuo desarrolle cáncer a lo largo de su vida como resultado de la exposición a posibles carcinógenos*. *Creciente* se refiere al riesgo de contraer cáncer que *excede* el riesgo normal de un individuo sin esta exposición.

Para la norma el riesgo aceptado varía entre 10^{-4} y 10^{-6} . Cuando el riesgo aceptado es, por ejemplo, 10^{-6} es equivalente a establecer una incidencia en exceso de cáncer en un millón de personas.

La norma ASTM incluye una serie de consideraciones sobre el valor de riesgo y parece apoyar la idea de que un valor adecuado es el de 10^{-5} . Sin embargo, la mayor parte de los estados de los EEUU que utilizan la norma como base para sus estrategias de gestión de derrames de hidrocarburos, adoptaron el valor de 10^{-6} para el desarrollo de valores RBSL en Tier 1.

No existen razones estrictamente técnicas que apoyen un valor de riesgo aceptado por sobre otro. Los argumentos que se presentan hacen hincapié en la racionalidad técnica y económica de las acciones correctivas y por eso podría afirmarse que su definición pertenece más a la esfera política y administrativa que a la técnica. La cuestión no es menor porque la decisión sobre el valor de riesgo aceptado implica cambios en dos órdenes de magnitud en un valor RBSL dado. Se verá más adelante cual es el nivel de riesgo propuesto para el caso de Buenos Aires y las razones que lo justifican.

2. Cálculo del RBSL para inhalación en espacio cerrado

En la sección anterior se ha argumentado en favor de que entre los escenarios de exposición aplicables a la ciudad de Buenos Aires, el vinculado a inhalación en espacios cerrados de hidrocarburos volatilizados desde el agua subterránea y desde el subsuelo son los más probables y relevantes.

Para detallar los parámetros relacionados en la definición de los RBSL se ha seleccionado la vaporización de hidrocarburos desde el agua subterránea por dos motivos. Primero, tomando en cuenta las características constructivas de las EESS en la ciudad, es menos probable que la fuente de vapores inhalados en espacios cerrados sea el subsuelo. Segundo, a pesar de su creciente importancia, el agua subterránea no cuenta en el país con ningún tipo de límite de calidad, por lo cual es importante describir un criterio que puede servir de base para hacerlo.

En esta sección primero se describen las ecuaciones y luego se analizan los parámetros físicos que intervienen en la definición del RBSL para “inhalación en espacios cerrados de benceno volatilizado desde la napa freática” y los valores que pueden adquirir para Buenos Aires.

2.1. Ecuaciones de transporte y destino

Se ha establecido que el receptor se pone en contacto con el benceno inhalándolo en un espacio cerrado. Según RBCA, el valor máximo admisible de concentración en aire interior se calcula mediante la siguiente expresión:

$$RBSL_{air} = \frac{TR \times BW \times AT_c \times 365 \frac{días}{año}}{SF_i \times IR_{air} \times EF \times ED} \quad (1)$$

Aunque inicialmente no lo parezca, esta ecuación también responde a la expresión general Riesgo = Peligro x Probabilidad de Ocurrencia donde *peligro* se relaciona a la naturaleza tóxica del compuesto y la *probabilidad de ocurrencia* se vincula a la exposición. Esta, a su vez, es función directa de la concentración de los contaminantes en un medio ambiental dado; la duración de la exposición (ED en años); la frecuencia de la exposición (EF en días/año) y la tasa de inhalación de aire interior (IR_{air} en m³/hr) y función inversa del peso del cuerpo (BW en Kg) y del tiempo promedio para cancerígenos (AT_c en años). Despejando la concentración del contaminante (todos los demás valores son datos –incluyendo el riesgo aceptado (TR) y el SF en unidades inversas de mg/kg-day), se obtiene el RBSL correspondiente en mg/m³.

La ecuación (1) permite calcular la concentración máxima admisible de benceno en espacios cerrados, pero nada dice sobre la relación entre la concentración del benceno en el agua subterránea y en el aire interior. Para establecer esa relación es necesario definir un Factor de Volatilización desde el agua subterránea al aire interior.

$$RBSL_{asubt} = \frac{RBSL_{aireint}}{FV_{asubtaireint}} \times 10^{-3} \frac{mg}{ug} \quad (2)$$

Este factor permite estimar de la concentración en el aire interior de un edificio típico que resulta de la evaporación de hidrocarburos desde el agua subterránea contaminada a través de la zona capilar, el suelo y el piso de la edificación. La relación entre la concentración en el aire interior de un edificio y la concentración disuelta en las aguas subterráneas se define por medio de la siguiente expresión:

$$FV_{wesp} \frac{mg/m^3}{mg/L} = \frac{H \left[\frac{D_s^{eff}}{L_{gw}} \right]}{1 + \left[\frac{D_s^{eff}}{L_{gw}} \right] + \left[\frac{D_s^{eff}}{L_{gw}} \right] + \left[\frac{D_{crack}^{eff}}{L_{crack}} \right] \eta} \times 10^3 \frac{L}{m^3} \quad (3)$$

En la ecuación (3) intervienen parámetros vinculados al compuesto (H, constante de Henry); a las características de la región (L_{gw}, profundidad del agua subterránea) y a las estructuras edilicias (ER, velocidad de intercambio del aire interior; L_B, ratio volumen de la habitación sobre el área de la habitación; L_{CRACK}, espesor del piso y η , la fracción de grietas en el piso)⁵.

También intervienen los denominados coeficientes efectivos de difusión, en este caso D_s^{eff} (del suelo al aire), D_{ws}^{eff} (entre el agua subterránea y la superficie del suelo) y D_{crack}^{eff} (en grietas). Estos coeficientes se calculan mediante las siguientes expresiones.

$$D_{ws}^{eff} = (h_{cap} + h_v) \left[\frac{h_{cap}}{D_{cap}^{eff}} + \frac{h_v}{D_s^{eff}} \right]^{-1} \quad (4)$$

$$D_{cap}^{eff} = D^{air} \frac{\theta_{acap}^{3.33}}{\theta_T^2} + D^{wat} \frac{1}{H} \frac{\theta_{wcap}^{3.33}}{\theta_T^2} \quad (5)$$

5 Esta expresión asume que la concentración de hidrocarburos disueltos es constante; partición lineal de equilibrio entre el contaminante disuelto y la fase vapor en el nivel freático; difusión estacionaria a través de la franja capilar, la zona no saturada y las grietas del pavimento; ningún proceso de biodegradación y dispersión atmosférica estacionaria en el espacio cerrado, donde el transporte convectivo de entrada a través de las grietas del piso es despreciable respecto a la difusión.

$$D_s^{eff} = D^{air} \frac{\theta_{as}^{3.33}}{\theta_T^2} + D^{wat} \frac{1}{H} \frac{\theta_{ws}^{3.33}}{\theta_T^2} \quad (6)$$

$$D_{crack}^{eff} = D^{air} \frac{\theta_{acrack}^{3.33}}{\theta_T^2} + D^{wat} \frac{1}{H} \frac{\theta_{wcrack}^{3.33}}{\theta_T^2} \quad (7)$$

Para estas ecuaciones también resultan necesarios datos del compuesto (coeficientes de difusión en agua y en aire, D^{air} y D^{wat}); de las características de la región (h_v y h_{cap} espesor de la zona no saturada y de la franja capilar respectivamente) y del contenido de agua y aire en la zona no saturada, en la franja capilar y en las grietas (respectivamente θ_{ws} , θ_{as} ; θ_{wcap} , θ_{acap} y θ_{wcrack} , θ_{acrack}).

Los parámetros indicados se visualizan en el siguiente esquema.

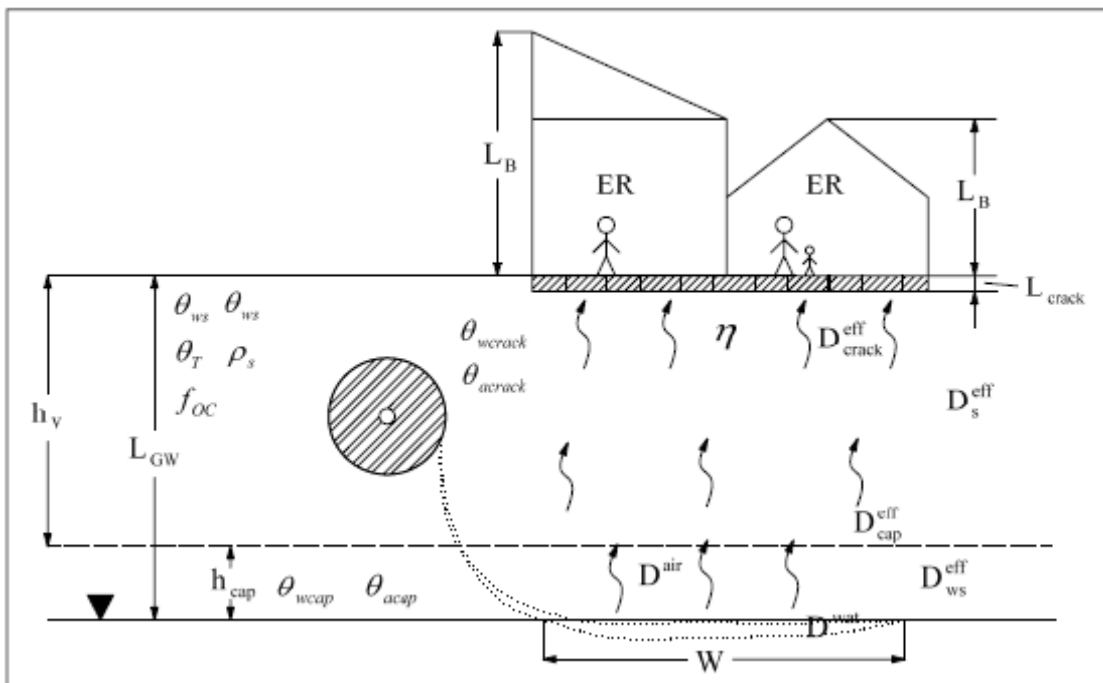


Ilustración 1: Visualización de parámetros

2.2. Parámetros y valores para la ciudad de Buenos Aires

Todos los parámetros que forman parte de las ecuaciones anteriores se refieren a cinco categorías: específicos y no-específicos del suelo; específicos de los receptores; niveles de riesgo y específicos de los compuestos químicos.

En esta sección se discuten los valores adoptados para la ciudad de Buenos Aires. En las tablas también se determina cómo influye cada uno en el cálculo del RBSL: una relación *directa* implica que valores mayores o menores del parámetro resultarán en valores mayores o menores de RBSL, respectivamente; una relación *inversa* implica que un valor mayor del parámetro resulta en un RBSL menor y viceversa. Si bien esto no constituye un análisis de sensibilidad, al menos permite controlar que se utilice la relación que tienda a que el RBSL represente la situación más conservadora en cada caso⁶.

2.2.1. Parámetros específicos de suelo

Para Auge (Auge, 2004), en la configuración geológica superficial de la ciudad de Buenos Aires participan dos unidades, el Pampeano y el Postpampeano. La unidad Pampeano, integrado por las formaciones Ensenada y Buenos Aires, está constituida por limo de tonalidad castaño claro en seco. La formación Querandí, la más moderna de la unidad Postpampeano, está representada por sedimentos arcillosos y arenosos finos de tonalidades grises oscuras y verdosas con cordones conchales hacia el estuario del Río de la Plata. Ocupa la llanura de inundación del Matanza Riachuelo y la planicie costera del Río de la Plata.

⁶ Cuando el parámetro indicado se utiliza solo como cálculo intermedio se indica que no aplica (NA). Si la norma ASTM no lo consigna originalmente, se indica por NC.

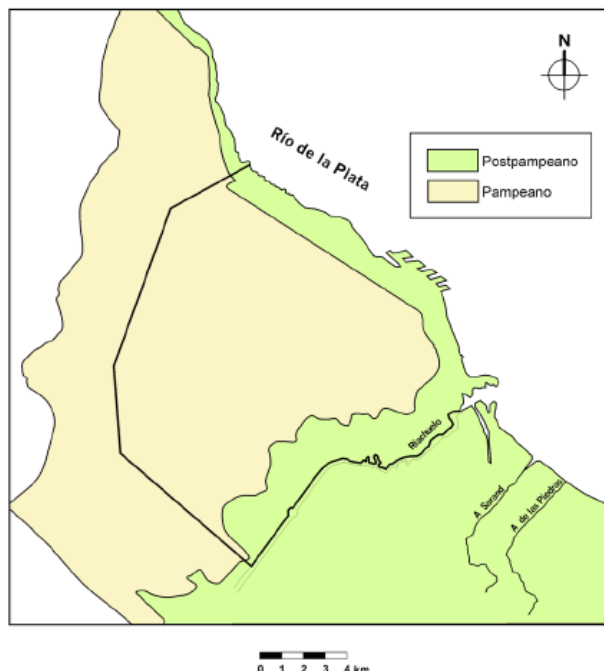


Ilustración 2: Ubicación de las formaciones Pampeano y Postpampeano (Auge, 2004)

Por su parte, en la Carta Geológica Geotécnica de la Ciudad de Buenos Aires (Rimoldi, 2001) se destacan tres formaciones: Ensenada, Buenos Aires, y Querandí. La primera está formada por limos predominantes y arcillas; la formación Buenos Aires está formada por limos loessoides mientras que la Querandí está integrada por limos plásticos y conchales.

Estas descripciones generales se confirman en los cotejos de los perfiles litológicos de casi 40 perforaciones realizadas en la ciudad por Obras Sanitarias entre 1940 y 1955 y por el CFI (1962).

Sobre esa base, se ha considerado que las formaciones Ensenada y Buenos Aires están representadas por una granulometría franco limosa (silt loam en términos del Departamento de Agricultura de EEUU) mientras que la formación Querandí es más heterogénea y puede estar representada por fracciones netamente arenosas, arcilloso arenosas, arcillosas y arcilloso limosas (sand, sandy clay, clay and silty clay).

En ese marco y tomando en cuenta el carácter conservador de Tier 1, se considera que una granulometría arenosa resulta la más adecuada, a pesar de que no sea el tipo de suelo más representativo de la ciudad. Un suelo arenoso reúne el conjunto de condiciones que aseguran cálculos conservadores de RBSL y aunque representa una porción menor de los suelos de la ciudad, están efectivamente presentes.

Tabla 1: Parámetros específicos de suelos

Medio	Parámetro	Unidad	ASTM	Ciudad de Buenos Aires	Relación
Zona no saturada	Espesor	cm	295	295	DIRECTA
	Contenido agua	cm ³ /cm ³	0,12	0,12	DIRECTA
	Contenido aire	cm ³ /cm ³	0,26	0,26	INVERSA
	Porosidad Total		0,38	0,38	NO APLICA
	Fracción de carbono orgánico	g/g	0,010	0,010	DIRECTA
	Densidad del suelo	g/cm ³	1,7	1,7	INVERSA
Franja capilar	Espesor	cm	5	5	DIRECTA
	Contenido agua	cm ³ /cm ³	0,342	0,342	DIRECTA
	Contenido aire	cm ³ /cm ³	0,038	0,038	INVERSA
Agua subterránea	Profundidad	cm	300	300	DIRECTA

A continuación se describen los parámetros de la Tabla 1, justificándose los valores que se adoptan para el caso de la ciudad de Buenos Aires.

- *Espesor y contenido de aire y agua en zona no saturada:* estos parámetros se relacionan a la porosidad total del suelo, siendo ésta igual a la suma del contenido de agua y de aire. El espesor de la zona vadosa está determinado por la profundidad a la napa freática y el espesor de la franja capilar.
- *Espesor y contenido de aire y agua de la franja capilar:* La franja capilar es el área saturada inmediatamente superior al nivel del agua subterránea. Cuanto menores sean las partículas de suelo, menos aire y más agua contendrán. El espesor de la franja capilar también aumenta con la presencia de partículas finas. El modelo que subyace a las ecuaciones de transporte aplicables considera que la franja capilar no está contaminada, por lo cual su espesor funciona como una barrera (EPA, 2002).

En ambos casos se seleccionaron los valores de ASTM 1739 como aplicables para el caso de Buenos Aires.

- *Fracción carbón orgánico del suelo:* la fracción de carbono orgánico se relaciona a la capacidad de sorción de un contaminante al suelo. Es el único proceso de retardación incluido en RBCA. El valor de 0,010 corresponde al contenido de carbono orgánico en suelo arenoso consignado.

- **Densidad del suelo:** la densidad del suelo da cuenta del espacio poral del suelo. Se aplica el valor consignado por RBCA coherente con el tipo de suelo considerado.

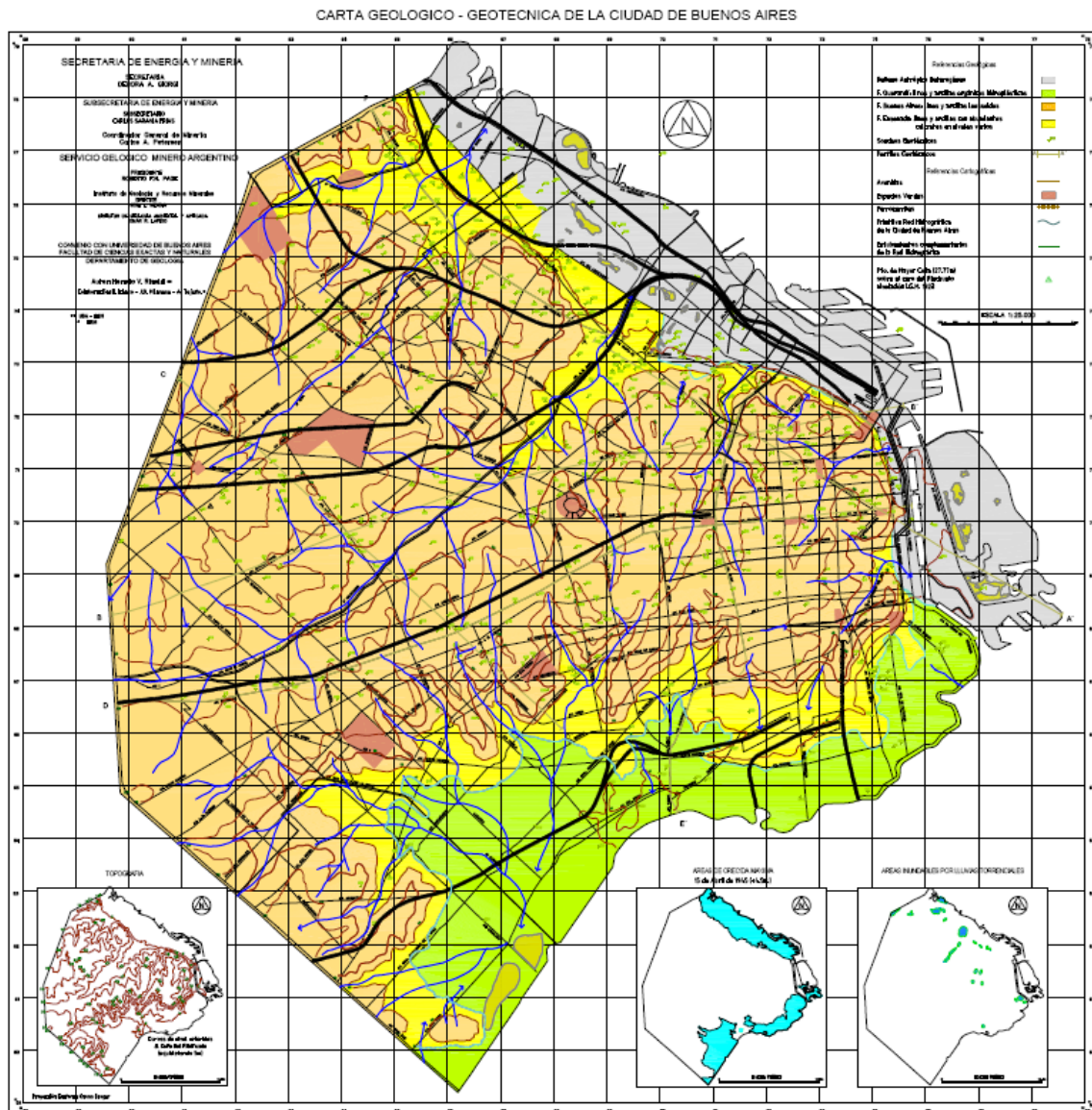


Ilustración 3: Carta Geológica Geotécnica de la Ciudad de Buenos Aires (Rimoldi, 2004)

- **Profundidad de las aguas subterráneas:** para la norma RBCA, la profundidad al agua subterránea es igual al espesor de la zona vadosa y el espesor de la franja

capilar. El valor consignado en RBCA es 300 cm. Para la ciudad de Buenos Aires, la profundidad de la napa freática varía mucho, desde alrededor de 20 m en la zona NO de la ciudad hasta prácticamente aflorar en el área que se corresponde al Postpampeano.

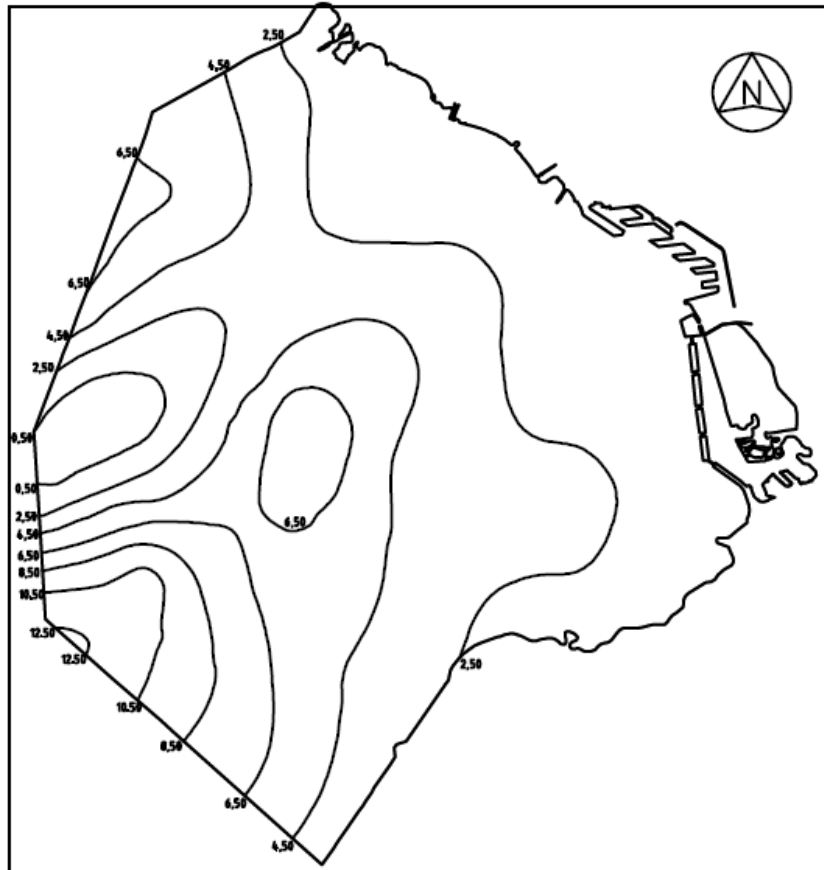
Desde el punto de vista de la aplicación de las ecuaciones de transporte la profundidad de la napa freática presenta un problema. Por un lado, una postura conservadora indicaría tomar la menor profundidad posible de modo de asegurar que el valor de RBSL fuera más restrictivo. La menor profundidad debería ser cercana a cero, dado que el agua freática emerge de la superficie en algunas zonas de la ciudad. Pero aun tomando una profundidad mayor, digamos 3 metros, es posible que el agua subterránea se ponga en contacto con cimientos o bases de edificaciones⁷. En esos casos, los criterios asumidos para aplicar el modelo de transporte no se cumplen (EPA, 2002).

Para salvar esta cuestión podría considerarse que para el Tier 1 de la ciudad de Buenos Aires la profundidad de la napa freática sea definida en 300 cm (suma del espesor de la zona no saturada y de la franja capilar) como en RBCA, pero, en el caso de que la napa freática se encuentre a una profundidad menor a los 3 m y el escenario de exposición completo que se verifique sea “*inhalación en espacio cerrado de hidrocarburos volatilizados desde la napa freática*”, entonces deberá pasarse a un estudio de nivel Tier 2 para tomar en cuenta las especificidades del sitio y verificar cómo influyen en el escenario definido.⁸

⁷ “El abandono de pozos de explotación de agua potable y la salida de servicio de otros empleados por al industria en muchos partidos del Conurbano hizo que se produjera un lento ascenso del agua freática hasta profundidades que comprometen sótanos, cocheras subterráneas y cimientos de edificios, situación que en gran cantidad de casos obliga a drenar por bombeo y en forma permanente el agua freática.” (Auge, 2004).

⁸ Este es un buen ejemplo de cómo la norma puede servir de base técnica pero queda en manos de la autoridad de aplicación su adaptación a cada caso, no solo respecto a valores para los parámetros, sino también en relación a su instrumentación concreta.

NIVEL ISOFREATICO



Valores promedio entre 1967 y 1980, referidos al
cero del Riachuelo.
(Equidistancia 2m)

Ilustración 4: Nivel freático (Rimoldi, 2004)

2.2.2. Parámetros no-específicos de suelo

Estos parámetros se relacionan a las características edilicias en la jurisdicción analizada y a la geometría de la contaminación.

Tabla 2: Parámetros no específicos de suelo

Parámetro	Unidad	ASTM	Ciudad de Buenos Aires	Relación
Fracción grietas en pared o fundamentos	cm ² /cm ²	0,01	0,001	INVERSA
Contenido agua en grietas	cm ³ /cm ³	0,26	0,26	DIRECTA
Contenido aire en grietas	cm ³ /cm ³	0,12	0,12	INVERSA
Espesor piso	cm	15	15	DIRECTA
Ancho del suelo contaminado paralelo a la dirección del agua subterránea	cm	1500	1500	INVERSA

La descripción de los parámetros y valores de la Tabla 2 se realiza a continuación.

- *Fracción grietas en pared o fundamento:* las grietas en paredes y pisos permiten que los vapores de hidrocarburos ingresen a espacios cerrados. Originalmente en la norma ASTM 1739 estableció un valor de 0,01 cm²/cm² pero ese valor fue reducido en prácticamente un orden de magnitud por EPA (EPA, 2002). Si bien en el documento citado se señala que no se aplica a EESS, también es cierto que diversas agencias ambientales de los EEUU han adoptado ese valor para ese tipo de instalaciones. No se ha podido hallar antecedentes que permitan decidir si ese valor resulta adecuado para la ciudad de Buenos Aires. Se toma el valor de EPA de 0,001 cm²/cm², aunque debería investigarse más a fondo si es representativo de casos locales.
- *Contenido aire y agua en grietas:* a mayor cantidad de aire presente en las grietas, más fácilmente los hidrocarburos podrán infiltrarse en un edificio. En el modelo de transporte subyacente se asume que las grietas del piso y los cimientos están llenos de un material que tiene la misma densidad, porosidad y contenido de humedad que el suelo que los sostiene. Con ese criterio, se mantienen los valores de RBCA definidos antes.
- *Espesor piso:* el espesor del piso afecta la concentración en aire de hidrocarburos volatilizados desde subsuelo o el agua subterránea. Se mantienen el valor de 0,15m, dado que diversas consultas realizadas aseguran que es un valor representativo localmente.
- *Ancho del suelo contaminado paralelo a la dirección del agua:* hace referencia a la extensión horizontal de la contaminación. Los 15 metros considerados en la norma parecen adecuados para el caso de derrames en EESS.

2.2.3. Parámetros relacionados a los receptores

Para la ciudad de Buenos Aires se consideran tres posibles receptores típicos: niños y adultos residenciales y adultos para el uso comercial/industrial de las EESS. A diferencia de lo incluido en la norma de ASTM 1739, para el uso residencial se combina al receptor niño y adulto para efectos carcinogénicos, es decir, el receptor es considerado un niño por seis años de los 30 años de la duración de la exposición y un adulto por los 24 años restantes, lo cual refleja mejor la situación real que el esquema propuesto por ASTM originalmente.

Tabla 3: Parámetros de exposición

	Unidades	ASTM			Ciudad de Buenos Aires			Relación
		Residencial		Com/Ind	Residencial		Com/Ind	
		Niño	Adulto		Niño	Adulto		
Tiempo promedio para efectos cancerígenos	años	NC	70	70	70	70	70	INVERSA
Peso del cuerpo	Kg	NC	70	70	15	70	70	DIRECTA
Ratio volumen interior del edificio / área piso	cm ³ /cm ²	NC	200	300	210	210	300	DIRECTA
Duración de la exposición	años	NC	30	25	6	24	25	INVERSA
Frecuencia de la exposición	días/año	NC	350	250	350	350	250	INVERSA
Tasa de inhalación en espacio cerrado	m ³ /día	NC	15	20	10	15	20	INVERSA
Tasa de intercambio aire interior	Vol/s	0,00014		0,00023	0,00014		0,00023	DIRECTA

Los parámetros y valores adoptados de la Tabla 3 son los siguientes.

- *Tiempo promedio para efectos cancerígenos*: es el periodo de tiempo utilizado para normalizar estadísticamente la incorporación de un compuesto carcinógeno. Se basa en una expectativa de vida de 70 años, asumiendo que la concentración permanece constante por toda la duración de la exposición (30 años para residencial; 25 años para comercial/industrial).

- **Peso del cuerpo:** el peso del cuerpo del individuo expuesto influye sobre el efecto de una concentración dada de contaminante. Se asume que el peso de un niño es de 15 Kg. El peso del adulto residencial y comercial es de 70 Kg.
- **Ratio volumen interior del edificio / área del piso:** espacios cerrados más amplios permiten una reducción en la concentración de un contaminante volatilizado en el aire interior. El volumen de aire respecto al área del piso resulta aproximadamente en la altura del techo. Los valores utilizados son los establecidos por el Código de Edificación de la Ciudad de Buenos Aires para alturas mínimas de locales de segunda (residenciales) y de tercera clase (comerciales), muy cercanos a los valores de originales.
- **Duración de la exposición:** este parámetro establece el periodo de tiempo que se asume un receptor está expuesto a un contaminante. Los valores en RBCA se modifican porque se considera a un niño que se desarrolla en un adulto durante el periodo de exposición.
- **Frecuencia de la exposición:** es el número de días por año que se asume un individuo se expone a contaminantes. Los valores son iguales a los de ASTM que consideran un periodo de vacaciones de dos semanas y que el individuo esta en su casa las 24 horas del día. El valor para receptores tipo comercial/industrial toma en cuenta cinco días de trabajo a la semana por 50 semanas al año.
- **Tasa de intercambio aire interior:** este parámetro determina cuanto aire fresco es intercambiado con el aire al interior de una vivienda. A mayor intercambio, mayor ventilación y menos restrictivo resultaría el RBSL. Este parámetro depende de varios factores, incluyendo las condiciones climáticas de la jurisdicción que se considere. La temperatura media en la ciudad de Buenos Aires es de 17,6°C y en situaciones climáticas similares, los valores fueron cuatro veces mayores para viviendas residenciales y casi seis veces mayores para el caso de comerciales (Spence y Gómez, 1999) aunque ese tipo de asignación ha recibido críticas (Nazaroff, 2003).

No se han podido hallar datos empíricos de intercambio de aire o de ventilación natural para viviendas y edificios comerciales/industriales en la ciudad de Buenos Aires. Para el caso de los receptores de tipo comercial podrían tomarse los requerimientos de ventilación incluidos en la Ley de Higiene y Seguridad 19587. El menor valor de intercambio corresponde a 12 m³/h por persona en un local de 15m³ por persona (actividad sedentaria), lo que resulta en 0,8 ACH (air change per hour). Un ACH es equivalente a 0,00028 volúmenes del edificio por segundo, por lo cual la norma RBCA utiliza un valor de 0,83 ACH, muy cercano al valor de 0,8 requerido por la legislación local. Por analogía, podría considerarse que el valor de 0,5 ACH de la norma también puede aplicarse al

caso local para viviendas residenciales. Por esas razones se consideran aplicables los valores originales de la norma ASTM, pero sería importante confirmarlo con datos empíricos representativos del caso local.

- *Tasa de inhalación en espacio cerrado*: este parámetro mide el volumen promedio de aire interior inhalado por hora. Difiere del valor RBCA porque se considera como receptor potencial a un niño. Los datos provienen del Exposure Factors Handbook de la US EPA.

2.2.4. Parámetros de riesgo

Se indicó que para ASTM los valores de riesgo aceptado varían de 10^{-4} a 10^{-6} . Esta demostrado que en el caso del agua que se utiliza para consumo humano, tanto el Código Alimentario Argentino como los Valores Guía vinculados a la Ley 24051 tomaron un nivel de riesgo de 10^{-5} (Collasius, 2006). En ese mismo artículo se defendía la idea de que si ese era el valor que se utilizó como base para definir la concentración de benceno en agua de bebida, el mismo nivel podría utilizarse para otros análisis de riesgo para la salud humana. Por lo tanto, el nivel de riesgo aceptado se define en 10^{-5} .

2.2.5. Parámetros del compuesto de interés

Los datos de caracterización físico-química, de toxicidad y de transporte y destino del benceno se indican en las Tabla 4. En cada caso se especifican las fuentes utilizadas. Los datos para RBCA provienen de la tabla X2.7 de la norma ASTM 1739. Para toxicidad, la fuente para la ciudad de Buenos Aires fue IRIS (EPA, 2007) mientras que los datos para los parámetros de transporte y destino se tomaron de USEPA Region 9 Preliminary Remediation Goals (PRG) Table.

Tabla 4: Datos toxicidad y transporte / destino del benceno

		Unidad	ASTM		Ciudad de Buenos Aires		Relación
				Fuente		Fuente	
Toxicidad	Slope Factor Inhalación	1/(mg/Kg-d)	2,9E-02	ASTM 1739 Tabla X2.7	2,7E-02	IRIS	INVERSA
Características de Transporte y Destino	Constante de Henry	cm ³ -agua / cm ³ -aire	2,2E-01	ASTM 1739 Tabla X2.7	2,28E-01	PGR-R9	INVERSA
	Koc	ml/g	3,8E+01	ASTM 1739 Tabla X2.7	5,89E+01	PGR-R9	DIRECTA
	Coeficiente de difusión en aire	cm ² /s	9,30E-02	ASTM 1739 Tabla X2.7	8,80E-02	PGR-R9	INVERSA
	Coeficiente de difusión en agua	cm ² /s	1,10E-05	ASTM 1739 Tabla X2.7	9,80E-06	PGR-R9	INVERSA

3. Resultados y conclusiones

Se señaló que el objetivo de estas líneas no es tanto definir el RBSL para el benceno en el escenario definido como discutir parámetros clave y los valores que pueden asumir para la Ciudad de Buenos Aires. Sin embargo es importante llegar a resultados numéricos porque sobre esa base surgen algunas conclusiones relevantes.

La introducción de los valores establecidos para la ciudad en las ecuaciones descriptas dan los siguientes resultados para el benceno en el agua de la napa freática cuando se verifica que la exposición es por inhalación en espacio cerrado.

Tabla 5: RBSL para benceno

Medio	Exposición	Receptor	RBSL del Benceno (mg/L)
Agua Subterránea	Inhalación en espacio cerrado	Residencial (niños y adultos)	0,74
		Comercial/Industrial (adultos)	4

En rigor, estos valores deberían leerse tomando en cuenta los criterios sobre los cuales se construyeron. Por ejemplo, como la concentración de benceno en agua de la napa freática que resulta protectora de la salud humana en el escenario inhalación en espacio cerrado, si el riesgo de 10^{-5} es aceptable. Otro modo correcto sería recordar los parámetros de exposición tomados en cuenta: para el caso de viviendas residenciales el valor de 0,74 mg/L aplica a un niño de 15 kilos de peso durante 6 años y a un adulto de 70 kg durante 24 años, que inhalan benceno que se volatiliza desde el agua subterránea durante ese período de 30 años, 24hs al día, 50 semanas al año.

Como se ha visto, la aplicación de criterios de riesgo tipo RBCA permite generar resultados de un modo discutible pero transparente. La alternativa, el uso de tablas de estándares ambientales, muchas veces no deja ver los criterios utilizados en su definición, como ya se señaló para el valor de riesgo aceptado de 10^{-5} que subyace a la Ley 24051 (Collasius, 2006).

El valor de 0,74 mg/L de benceno es sensiblemente mayor a los 0,01 mg/L establecidos por la Ley 24051. La razón de esta diferencia radica en que representan exposiciones distintas: 0,74 mg/L de benceno en agua de la napa freática da cuenta del escenario de exposición “inhalación en espacio cerrados” mientras que 0,01 mg/L se aplica al escenario “ingesta de agua”. La aplicación de los Valores Guía establecidos en la Ley 24051 obedece a la falta de límites específicos para el agua de subterránea en general y de la napa freática en particular y no porque resulten pertinentes. En ese marco, es

importante destacar la importancia de contar con criterios adecuados, entre los cuales se encuentran los derivados de la aplicación de la norma RBCA.

Una vez fundamentada la necesidad y la pertinencia de la norma, pueden considerarse las circunstancias de su aplicación. En ese sentido, se ha intentado justificar que el uso de una granulometría arenosa para caracterizar el suelo de la ciudad es la más adecuada no tanto por su representatividad (se ha visto que el suelo mayormente presente a las profundidades que resultan de interés es de tipo limoso), sino por el requerimiento de maximizar la protección a la salud humana en el nivel de Tier 1.

Es posible argumentar que ésta es una posición demasiado conservadora, que deriva en RBSL exageradamente restrictivos. Aun sin introducir los problemas metodológicos que una afirmación de ese tipo depararía (contra qué se lo compara, por ejemplo) es imprescindible recordar que la secuencia Tier 1, 2 y 3 resuelve este tipo de observaciones: multiplicar estudios Tier 2 y 3 por una tabla de Tier 1 exigente es más coherente con el criterio de proteger la salud humana que la alternativa contraria.

Una vez que los valores de los diversos parámetros han sido definidos, pueden analizarse para adecuarlos mejor a situaciones reales. Una modificación de ese tipo es la incorporación de niños como receptores al esquema de exposición original de la norma. Otra modificación pertinente podría ser, por ejemplo, la duración de la exposición: en la norma RBCA no está indicado de forma expresa, pero considera que los receptores residenciales y comercial/industriales estarían 24hs al día inhalando el benceno que se evapora de la freática. Para el caso del receptor de tipo comercial podría asumirse de forma justificada que ese período es equivalente a su jornada laboral. Si solo se hace ese cambio, modificando 24hs por 9hs, el valor de RBSL correspondiente sería 11 mg/L.

Los RBSL son concentraciones de contaminantes en un medio que no representan riesgos a la salud humana y, por ese mismo motivo, pueden ser utilizados como Objetivos de Remediación: 0,74 mg/L de benceno representa tanto el valor hasta el cual el agua de la napa freática del sitio puede considerarse como no-contaminada o como el valor que hay que alcanzar si el sitio está contaminado, es decir si presenta concentraciones mayores.

En el caso que se analiza aquí puede darse un paso más. Tomando en cuenta lo discutido en la sección de exposición respecto a que el escenario "inhalación en espacio cerrado de benceno volatilizado desde la napa freática" genera el RBSL más restrictivo para agua subterránea cuando ésta no se utiliza para la ingesta, si se verifica que la concentración de benceno en la napa freática de cualquier ES de la ciudad de Buenos Aires es igual o menor que 0,74 mg/L, puede considerarse que el sitio esta no-contaminado. Para decirlo en términos más adecuados a la norma, en caso que se compruebe que el agua de la napa freática en una ES de la ciudad presenta una

concentración menor o igual a 0,74 mg/L, no existen riesgos a la salud humana en las condiciones definidas, no es necesario aplicar ninguna acción correctiva y el sitio puede considerarse no-contaminado.

Si la concentración de benceno fuera mayor que 0,74 mg/L, la norma ASTM 1739 permite optar por remediar la freática hasta ese valor o desarrollar un estudio a nivel de Tier 2. Evidentemente, cuando se optara por remediar hasta ese valor, el RBSL se utiliza como Objetivo de Remediación.

Las concentraciones de benceno encontradas efectivamente en un sitio pueden también ser mayores o menores que los valores SSTL. En el primer caso, la norma prevé remediar para alcanzar el SSTL definido (por lo que también funcionan como Objetivos de Remediación) o por desarrollar un estudio tipo Tier 3⁹. Si las concentraciones en el sitio fueran menores que los SSTL, entonces ese sitio se considera no-contaminado porque los SSTL definen qué concentración de contaminante no presenta un riesgo a la salud.

Los SSTL pueden ser iguales o mayores que los RBSL (es decir igual o menos restrictivos que los RBSL) pero esto no debe interpretarse como un relajamiento del principio de protección a la salud humana sino como una consecuencia metodológica. Los SSTL dan cuenta de las condiciones de un sitio en particular; es posible que en ese lugar las condiciones de exposición sean distintas a las utilizadas en Tier 1, lo que a su vez modifica el riesgo. Como en el proceso de definición de los RBSL se toma en cuenta el escenario de máxima exposición para maximizar la protección a la salud, una consecuencia metodológica necesaria es que el SSTL resulte igual o menos restrictivo que el RBSL. De hecho, si se comprueba que el SSTL para un sitio es más restrictivo que el RBSL correspondiente, entonces éste han sido mal calculado, es decir, los valores de los parámetros de las ecuaciones de transporte y destino han sido mal definidos.

Se insistió antes que el uso de la metodología de análisis de riesgo no debe hacer que se pierda de vista que el objeto de la norma es tomar decisiones adecuadas respecto a las acciones correctivas a aplicar. Un elemento importante es la secuencia Tier 1 , 2 y 3 y sus resultados en términos de Objetivos de Remediación. Pero existen maneras menos evidentes de utilizar los procedimientos delineados en la norma.

⁹ La secuencia termina en ese nivel. Los SSTL que se obtienen en un Tier 3 deberán ser alcanzados mediante la aplicación de alguna acción correctiva.

Por ejemplo, la *tasa de intercambio de aire interior* (ER) es una variable importante en la definición del RBSL y también una de las pocas que puede ser modificada de forma eficiente, económica y controlable. Supongamos que en una ES se dan todas las condiciones definidas hasta el momento, incluida ER, por lo cual el RBSL sería 0,74 mg/L. Ahora supongamos que se diseña un sistema de ventilación para forzar a que el intercambio de aire interior en el edificio residencial afectado fuera el doble que el considerado inicialmente. En esa situación, el agua de la napa freática podría contener hasta 1,9 mg/L de benceno y aun así no presentar riesgos a la salud humana porque la concentración de benceno que efectivamente se inhalaría sería menor como resultado de esa ventilación.

Lo anterior podría ser un ejemplo de acción correctiva que no es una remediación que podría aplicarse como acción inmediata para reducir el riesgo a niveles aceptables hasta tomar medidas definitivas. Pero también es un ejemplo de los criterios que deben ser definidos por la autoridad de aplicación para aceptar ese tipo de acciones.

Se insiste en la importancia de la secuencia Tier 1, 2 y 3 no solo porque la aproximación por etapas cada vez más específicas constituye uno de los elementos principales para el análisis de riesgos según RBCA, sino porque en su desarrollo pueden describirse y justificarse el alcance del problema y su solución, incorporando también los elementos necesarios para su control. De ese modo, el ejemplo sobre la ventilación forzada para la gestión del riesgo podría proponerse como acción inmediata, pero sería discutible que pudiera sostenerse en el tiempo porque no lleva la concentración en el agua de la napa freática al valor de RBSL (o SSTL) que se son los criterios de limpieza aceptables.

Se recordará que un análisis de riesgo se apoya en la definición de los escenarios de exposición. En términos prácticos esto significa que requiere de un sólido estudio de caracterización de suelo y agua subterránea que establezca de forma justificada cuál es el nivel de contaminación en esos medios que alcanza a potenciales receptores y genere los datos necesarios para aplicar en el sitio las ecuaciones de transporte y destino que correspondan. A su vez, ello requiere lineamientos tanto para el desarrollo del estudio (número, distribución y tipos de muestreos; técnicas analíticas, etc.) como para el control de la calidad del mismo (Cadenas de Custodia en las muestras; equipos calibrados; etc.).

En suma, la aplicación del esquema contenido en la norma RBCA de ASTM para el desarrollo de análisis de riesgo permitirá contar tanto con criterios para definir si un sitio está o no contaminado y como con una base técnica para definir Objetivos de Remediación. En ambas situaciones se podrá superar la situación actual en la que estos criterios no existen.

Bibliografía

- Air Conditioning Contractors of America. 2004. *Addendum D to ACCA Manual J Residential Load Calculation*. Eight Edition. ANSI/ACCA Man J 2-2004.
- American Society for Testing and Materials. 1995. *Estándar Guide for Risk-Based Corrective Action Applied at Petroleum Release Sites*. ASTM E1739-95.
- Auge, M.P. 2004. *Hidrogeología de la Ciudad de Buenos Aires*. Departamento de Ciencia Biológicas. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires. Buenos Aires.
- Consejo Federal de Inversiones. 1962. *Recursos hidráulicos Subterráneos*. Serie Evaluación de los Recursos naturales de la Argentina. Primera Etapa. Tomo V. Volumen I. Buenos Aires.
- Hazardous Waste Program (HWP). 2004. *Technical Memorandum to Vapor Pathway Subgroup: Update and Recomendation*.
- Integrated Risk Information System. *25 de enero de 2007 Benzene (CASRN 71-43-2), EPA*.
- Ginkel J. y Hasseleaar E. 2006. *Indoor Air Quality Influenced by Ventilation System Design*. OTB Research Institute for Housing, Urban and Mobility Studies. Netherlands.
- González, N., Hernández, M. A. y Vilela, C. R. 1986. *Léxico Hidrogeológico*. Publicación Especial. Provincia de Buenos Aires Comisión de Investigaciones Científicas. La Plata. Buenos Aires.
- Kozak D. y Fernández A. 2001. *Resultados de la Aplicación de una Metodología de Evaluación de Movimiento de Aire en Espacios Interiores*. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente. Vol. 5. Centro de Investigación Hábitat y Energía. Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo. Universidad de Buenos Aires. Argentina.
- Nazaroff W. 2003. *Review of "Application of Risk –Based Screening Levels and Decision Making to Sites with Impacted Soil and Groundwater"*. Department of Civil and Environmental Engineering University of California at Berkeley. USA.
- Rimoldi, H. V. 2001. *Carta Geológico-Geotécnica de la Ciudad de Buenos Aires*. Serie Contribuciones Técnicas Geología Ambiental 3. Tomo I. Servicio Geológico Minero Argentino. Instituto de Geología y Recursos Naturales. Buenos Aires.

-
- Secretaría de Estado de Obras Públicas. *Capital y Buenos Aires A-E. Clasificaciones hasta 1955 Inclusive*. División Geología. Dirección de Estudios y proyectos. Administración General de Obras Sanitarias de la Nación. Argentina.
 - Spence, L. R y Gomez, M. M. 1999. *Oakland Risk Based Corrective Action: Technical background Document*. City of Oakland. Environmental Service Division. Oakland.
 - Spengler J.D. 1999. *Buildings Operations and ETS Exposure*. Environmental Health Perspectives Supplements. Volume 107. Number S2. Department of Environmental Health. Harvard School of Public Health. Boston. Massachusetts. USA.
 - U.S. Environmental Protection Agency. 2002. *OSWER Draft Guidance for Evaluating the Vapor Intrusion to Indoor Air Pathway from Groundwater and Soils (Subsurface Vapor Intrusión Guidance)*. EPA530-D-02-004.
 - U.S. Environmental Protection Agency. 2002. *Uncertainty and the Johnson-Ettinger Model for Vapor Intrusion Calculations*. EPA Office of Research and Development, EPA600-R-05-110.