Identificación y priorización de peligros como herramientas de la gestión del riesgo en sistemas de distribución de agua potable[1]

Hazard Identification and Prioritization as Tools of Risk Management in Drinking-Water Distribution Systems[2]

Identificação e priorização de perigos como ferramentas de gestão de risco em sistemas de distribuição de água potável[3]

Andrea Pérez-Vidal[4]
Claudia Patricia Amézquita-Marroquín[5]
Patricia Torres-Lozada[6]

SICI: 0123-2126(201212)16:2<449:IPPHGR>2.0.TX;2-P

---

[1] Fecha de recepción: 11 de julio de 2011. Fecha de aceptación: 15 de marzo de 2012. Este artículo se deriva del proyecto de investigación *Identificación y evaluación del riesgo en el Sistema de Abastecimiento de Agua de la red baja de la ciudad de Cali, enmarcado en un plan de seguridad del agua* (registro 1106-454 22039), desarrollado por el grupo de investigación Estudio y Control de la Contaminación Ambiental (ECCA), de la Universidad del Valle-Escuela de Ingeniería de los Recursos Naturales y del Ambiente (Eidenar). Cali, Colombia.

[2] Submitted on: July 11, 2011. Accepted on: March 15, 2012. This article is derived from the research project *Identification and Evaluation of Risk in the Drinking-Water Supply System of Cali, Colombia, framed on a Water Safety Plan* (Register 1106-454 22039). Developed by the research group *Estudy and Control of Environmental Contamination, ECCA, of Universidad de Valle, Escuela de Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente, Eidenar.* Cali, Colombia.

[3] Data de recebimento: 11 de julho de 2011. Data de aceite: 15 de março de 2012. Este artigo deriva-se do projeto de pesquisa *Identificação e avaliação do risco no Sistema de Abastecimento de Água da rede baixa da cidade de Cali, enquadrado em um plano de segurança da água* (registro 1106-454 22039), desenvolvido pelo grupo de pesquisa Estudo e Controle da Contaminação Ambiental (ECCA), da Universidade do Valle- Escola de Engenharia dos Recursos Naturais e do Ambiente (Eidenar). Cali, Colômbia.

[4] Ingeniera sanitaria, Universidad del Valle, Cali, Colombia. Magíster en Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Universidad del Valle. Estudiante becaria de Colciencias en Doctorado en Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Universidad del Valle. Cali, Colombia. Correo electrónico: andreaperezvidal@hotmail.com.

[5] Ingeniera sanitaria, Universidad del Valle, Cali, Colombia. Estudiante de la Maestría en Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Universidad del Valle. Joven investigadora de Colciencias. Cali, Colombia. Correo electrónico: claudia.patricia.amezquita@gmail.com.

[6] Ingeniera sanitaria, Universidad del Valle, Cali, Colombia. Magíster en Ingeniería Civil, énfasis en Hidráulica y Saneamiento, Universidade de São Paulo, São Paulo Brasil. Doctorada en Hidráulica y Saneamiento, Universidade de São Paulo, Brasil. Profesora titular, Universidad del Valle. Cali, Colombia. Correo electrónico: patricia.torres@correounivalle.edu.co.

Resumen

Se efectuó la identificación y priorización de peligros del sistema de distribución de agua potable (SDA) de la ciudad de Cali (Colombia) abastecido por el río Cauca, integrando los principios de los planes de seguridad del agua (PSA), los conceptos de la metodología Delphi y los sistemas de información geográfica (SIG). El análisis estadístico de los datos de calidad del agua potable evidenció el cumplimiento de la reglamentación nacional, clasificándola como "sin riesgo para la salud" (según el índice de riesgo de calidad del agua [IRCA]). Bajo operación normal del SDA, se construyeron tres mapas usando SIG: el primero corresponde a la integridad física e hidráulica; el segundo, a la integridad por calidad de agua, y el tercero, al mapa final de riesgos. En este último, los datos se concentraron entre el 5% y el 18%, lo cual indica un nivel de riesgo medio-bajo; como resultado, las comunas localizadas en el centro del mapa son más vulnerables a la pérdida de integridad del SDA. La integración del consenso de opiniones del equipo PSA y los SIG resultó ser una herramienta útil en la priorización de peligros y gestión de riesgos en los SDA. Es indispensable contar con un grupo multidisciplinario calificado y con información confiable y suficiente que permita la adecuada interpolación espacial de datos.

Palabras clave

Agua potable, calidad del agua, gestión del riesgo, identificación de peligros, plan de seguridad del agua, sistema de distribución de agua potable, sistemas de información geográfica.

Abstract

We conducted the hazard identification and prioritization of the drinking-water distribution system (DWDS) of Cali city (Colombia) supplied by Cauca River. We did this by integrating the principles of Water Safety Plans (WSP), the concepts of Delphi methodology and Geographic Information Systems (GIS). Statistical analysis of data showed that the quality of drinking-water complied with national regulations, classifying it as "no risk to health" according to IRCA Index. Under normal operation of the DWDS, three maps were constructed using GIS; the first corresponding to physical and hydraulic integrity, the second to the water-quality integrity and the third to the final risk map; the data were concentrated between 5 and 18%, indicating a medium-low risk level, resulting in greater vulnerability to loss of DWDS integrity in the communes located in the center of final risk map. The integration of the consensus views of WSP team and the GIS was a useful tool in the prioritization of hazards and risk management in the DWDS. It is essential to have a qualified multidisciplinary team with reliable and enough information that allow an adequate data spatial interpolation.

Key words

Drinking water, drinking water distribution system, geographic information systems GIS, hazard identification, risk management, water quality, water safety plan.

Resumo

Efetuou-se a identificação e priorização de perigos do sistema de distribuição de água potável (DAS) da cidade de Cali (Colômbia) abastecido pelo rio Cauca, integrando os princípios dos planos de segurança da água (PSA), os conceitos da metodologia Delphi e os sistemas de informação geográfica (SIG). O análise estadístico dos dados de qualidade da água potável evidenciou o cumprimento da regulamentação nacional, classificando-a como "sem risco para a saúde" (segundo o índice de risco de qualidade da água [IRCA]). Sob operação normal do SDA, construíram-se três mapas usando SIG: o primeiro corresponde à integridade física e hidráulica; o segundo, a integridade por qualidade de água e o terceiro, ao mapa final de riscos. Neste último, os dados concentraram-se entre 5% e 18%, o que indica um nível de risco meio-baixo. Como resultado, as comunas localizadas no centro do mapa são mais vulneráveis à perda de integridade do SDA. A integração do consenso de opiniões da equipe PSA e o SIG resultaram ser uma ferramenta útil na priorização de perigos e gestão de riscos nos SDA. É indispensável contar com uma turma multidisciplinar qualificada e informação confiável e suficiente que permita uma adequada interpolação espacial de dados.

Palavras-chave

Água potável, qualidade da água, gestão do risco, identificação de perigos, plano de segurança da água, sistema de distribuição de água potável, sistemas de informação geográfica.

1. Introducción

La cuarta edición de las guías de calidad de agua potable de la Organización Mundial de la Salud (OMS) (WHO; 2011), define el *agua potable* como aquella apta para consumo humano, uso doméstico e higiene personal, la cual no deberá generar riesgos en los consumidores. Para la OMS, la forma más eficaz de garantizar la integridad del agua en cada uno de los componentes del sistema de abastecimiento de agua potable (SAAP), desde la fuente de captación hasta el usuario final, es la implementación de los planes de seguridad del agua (PSA), que mediante la evaluación y gestión del riesgo garantizan el suministro de agua segura y apta para el consumo humano (WHO, 2011; Bartram *et al.*, 2009).

Aunque las plantas de tratamiento de agua potable pueden proveer agua adecuada para el consumo humano, su calidad puede ser modificada durante el paso por el sistema de distribución de agua (SDA) (Ainsworth, 2004), debido a factores como el envejecimiento de las tuberías, el inadecuado funcionamiento hidráulico y el pobre mantenimiento de las redes, lo que podría ocasionar efectos negativos en la salud pública (Lee y Schwab, 2005). La integridad del SDA debe protegerse para garantizar la calidad del agua; según el National Research Council (2006), se establecen tres niveles de integridad: física, hidráulica y de calidad del agua.

Algunos aspectos que afectan la integridad física pueden ser los procedimientos de construcción, reparación, rehabilitación y reposición de componentes de la red, debido a la fácil exposición del SDA a la intrusión de contaminantes externos (National Research Council, 2006), así como la lixiviación de metales en tuberías corroídas del SDA y las instalaciones domiciliarias (Jiménez y Rose, 2009) y las fugas de agua que comprometen tanto la integridad física como aspectos económicos (Lee y Schwab, 2005).

Las causas de pérdida de la integridad hidráulica se asocian a cambios bruscos de caudal o de presión o a cambios hidráulicos por mantenimiento, incrustaciones y emergencias (National Research Council, 2006). Un inadecuado

control operacional o de diseño del SDA puede favorecer las bajas velocidades y ocasionar edades del agua elevadas, que a su vez pueden incrementar la formación de subproductos de desinfección —SPD, recrecimiento microbiano, problemas de sabor u olor y depósitos de sedimentos (Kirmeyer *et al*., 2001)—. La adecuada presión en el SDA reduce el riesgo de deterioro de la calidad del agua por intrusión de contaminantes debidos al flujo inverso o succión durante eventos de suspensión del suministro de agua (Lee y Schwab, 2005; National Research Council, 2006; Graham y Van Derslice, 2007).

La pérdida de integridad de calidad del agua se presenta cuando existen fallas en la integridad física e hidráulica del SDA que pueden introducir contaminantes externos que actúan como inóculo, aportando sedimentos y nutrientes y reduciendo la concentración residual del desinfectante, lo que a su vez fomenta la formación de biopelículas y transformaciones dentro las tuberías y los tanques (National Research Council, 2006).

Diversas causas hacen sensibles los SDA a la intrusión de contaminación, lo que contribuye a generar epidemias y brotes transmitidos por el agua, afectando la salud de un amplio número de consumidores (Moe y Rheingans, 2006; Rizak y Hrudey, 2008). En Estados Unidos, el 51% de los brotes ocasionados por la contaminación del agua en el SDA se debe a conexiones erradas o retrosifonaje, el 39% es causado por problemas en las instalaciones domiciliarias y el 10% por la contaminación durante el almacenamiento interno del agua (Moe y Rheingans, 2006). En los países en desarrollo son pocos los estudios epidemiológicos que recopilan información sobre brotes de enfermedades relacionadas con las deficiencias en el SDA, lo que evidencia la necesidad de realizar estudios para investigar el comportamiento del agua potable al interior del SDA, orientados a buscar estrategias para garantizar la calidad del agua y proteger la salud de la población (Lee y Schwab, 2005).

Dentro del proceso de evaluación de riesgos en los SAAP, considerado en el enfoque metodológico de los PSA, es prioritario efectuar la identificación de peligros, entendiendo por *peligro* cualquier agente físico, biológico, químico o radiológico que puede afectar la salud pública, y *por evento peligroso*, aquella situación o actividad que introduce peligros o impide su eliminación en el SDA. De este modo, el riesgo puede definirse como la probabilidad de ocurrencia de un evento peligroso en un tiempo determinado (Vieira y Morais, 2005; WHO, 2011; Bartram *et al*., 2009).

Existe una amplia variedad de instrumentos usados para la identificación de peligros, como los basados en técnicas de lluvia de ideas, experiencias del

pasado y listas de chequeo (Análisis HAZID); la evaluación sistemática de causas y consecuencias de posibles desviaciones en los procesos (Análisis HAZOP) (Rosén *et al.*, 2007) y la construcción de mapas de peligros y riesgos usando los sistemas de información geográfica (SIG) (Godfrey *et al.*, 2003). En los PSA, la identificación de peligros debe ser realizada bajo la dirección del equipo PSA, el cual debe contar con amplio conocimiento y habilidades para identificar peligros y comprender cómo estos pueden controlarse en el SAAP (Davison y Deere, 2007), de este modo, las herramientas mencionadas pueden articularse y complementarse con técnicas que usan el consenso de opiniones de especialistas como la metodología Delphi.

La metodología Delphi, desarrollada por Rand Corporation en la década de 1950, es un método sistemático de predicción interactiva basada en la participación de expertos (grupos nominales y focales) con la combinación de información cualitativa y cuantitativa y el uso sistemático de cuestionarios con retroalimentación controlada, lo cual facilita la formación de escenarios coherentes (Linstone y Turoff, 2010; Landeta *et al.*, 2011) y la respuesta de preguntas de investigación (Rowe y Wrigh, 2011). Esta metodología ha sido aplicada en diferentes campos de investigación. como en la formulación de índices de calidad en sistemas de abastecimiento de agua (Lopes y Libanio, 2005) y en la gestión de los recursos naturales, permitiendo generar evaluaciones rápidas de los expertos sobre problemáticas complejas (Taylor y Ryder, 2003).

Los SIG son usados en ciencias ambientales por su facilidad en el manejo espacial de datos para describir y analizar peligros y han servido de apoyo en el desarrollo de los PSA para la toma de decisiones, formulación de programas de monitoreo de agua, priorización de zonas más vulnerables y evaluación de riesgos microbiológicos y fisicoquímicos en los SAAP (Kistemann *et al.*, 2001; Godfrey *et al.*, 2003; Sturm *et al.*, 2008; Moreno, 2009), además de la generación de mapas de riesgo por intrusión de contaminación en los SDA (Vairavamoorthy *et al.*, 2009). Existen otras experiencias reportadas que también evidencian su utilidad, como los estudios asociados a la calidad de aguas subterráneas (Asadi *et al.*, 2007), la localización y priorización de lugares potencialmente contaminados (Shields, 2010) y el uso en la agricultura (Pierce *et al.*, 2010)

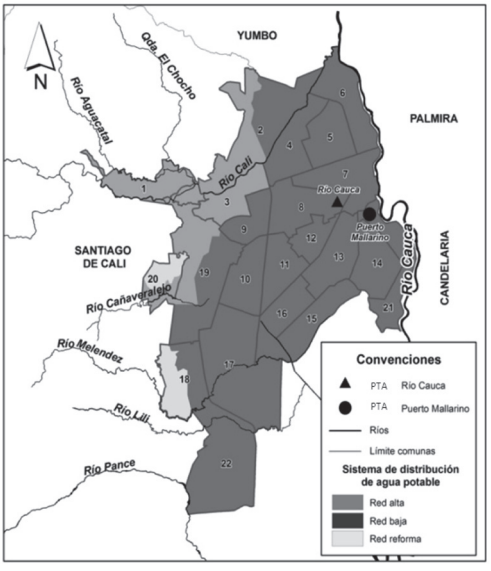
El presente estudio tuvo como objetivo identificar y priorizar los peligros asociados al SDA de la ciudad de Cali (Colombia), abastecido por el río Cauca, que puedan representar un riesgo en el deterioro de la calidad del agua potable suministrada a la población; se fundamentó en garantizar la integridad del SDA (física, hidráulica y de calidad del agua) y la aplicación articulada de los

conceptos de la metodología Delphi y las herramientas de los SIG para la construcción de mapas de peligros; a lo largo de todo el estudio se contó con el soporte del equipo PSA.

1. Metodología

El SAAP de Cali abastece aproximadamente a 2,5 millones de habitantes mediante cuatro fuentes superficiales: ríos Cauca, Cali, Meléndez y Pance; el SDA está conformado por las redes Baja, Alta, Reforma y Pance, como se muestra en la figura 1.

Figura 1. Esquema general del SAAP de Cali



Fuente: adaptado de Montoya *et al.* (2009)

El estudio se concentró en la red Baja, la cual suministra agua potable a cerca del 80% de la población, usando como fuente de abastecimiento el río Cauca, cuya agua es tratada para su potabilización en las plantas de tratamiento de Río Cauca y Puerto Mallarino (Montoya *et al*., 2009). Comprendió tres etapas: 1) identificación de peligros asociados al deterioro de la calidad del agua, 2) análisis estadístico de la información recopilada y definición de rangos de vulnerabilidad y 3) elaboración de mapas en SIG; las dos últimas etapas estuvieron soportadas por los conceptos de la metodología Delphi con la participación del equipo PSA, conformado por un grupo multidisciplinario de profesionales e investigadores,

en el que participó la entidad prestadora del servicio y la institución educativa (Universidad del Valle).

Los integrantes del equipo contaron con amplio conocimiento del SDA evaluado y con experiencia en temas relacionados con el aseguramiento de la calidad del agua potable y la evaluación de riesgos en sistemas de distribución, lo que proporcionó soporte técnico en la toma de decisiones durante la ejecución del estudio (definición de rangos de vulnerabilidad y asignación de peso a los criterios usados en los mapas en SIG) y facilitó el acceso a la información en diferentes dependencias de la entidad prestadora del servicio.

1.1. Identificación de peligros asociados al deterioro de la calidad del agua

Se realizaron visitas técnicas en torno al SDA, consultando información histórica de diez años registrada en la entidad prestadora del servicio de acueducto y alcantarillado y en instituciones de salud, ambientales, educativas y de planeación municipal. Se consideraron los eventos peligrosos que podrían alterar la calidad del agua en los SDA, cuyas consecuencias no siempre se reflejan en los datos de calidad del agua. La tabla 1 resume los principales eventos peligrosos y los peligros identificados en el SDA objeto de estudio, incluidos algunos comunes a todos los SDA.

Tabla 1. Eventos peligrosos y peligros asociados a los SDA

Evento peligroso	Peligros asociados
Falla durante el tratamiento de agua	Deterioro de la calidad del agua
Daños de acueducto y alcantarillado (redes y acometidas)	Entrada de contaminación
Ausencia de información sobre cruces y distancias entre redes de acueducto y alcantarillado	Entrada de contaminación
Redes de acueducto antiguas y reposiciones pendientes	Deterioro de la calidad del agua
Prácticas inadecuadas para la reparación y reposición de componentes del SAAP	Entrada de contaminación
Elevado porcentaje de fugas y pérdida de agua	Entrada de contaminación
Predominio de tuberías de asbesto y cemento (lixiviación, rotura de tuberías e infiltraciones)	Entrada de contaminación, deterioro de la calidad del agua
Fluctuaciones de presión	Entrada de contaminación
Intermitencia del suministro (actividades de mantenimiento y reparación; variación de la calidad del agua cruda, cambio climático)	Entrada de contaminación

Continúa

Evento peligroso	Peligros asociados
Inadecuada apertura y cierre de válvulas	Perturbación de depósitos por la inversión o modificación del flujo
Material de tuberías y tanques de almacenamiento	Lixiviación de sustancias tóxicas
Almacenamiento inadecuado en el SDA (elevada edad del agua, cortocircuitos y zonas muertas)	Deterioro de la calidad del agua
Elevada edad del agua en el SDA	Deterioro de la calidad del agua
Conexiones erradas no autorizadas o cruzadas dentro de las edificaciones con fuentes alternas (aljibes, pozos, etc.)	Contaminación por contraflujo, entrada de contaminación, deterioro de la calidad del agua
Recrecimiento de biopelícula y sedimentación en la red	Contaminación microbiológica
Acceso no restringido, falta de seguridad o vandalismo	Entrada de contaminación
Ausencia de información sistematizada de acueducto y alcantarillado	Deterioro de la calidad del agua por una inadecuada atención frente a fallas en el alcantarillado y acueducto
Baja frecuencia de medición de sustancias de interés sanitario	Deterioro de la calidad del agua
Inundaciones	Entrada de contaminación
Fallas geológicas (sismos, licuación y corrimiento lateral de suelos)	Entrada de contaminación, colapso del sistema

Fuente: adaptado de Vieira y Morais (2005), Pitkänen *et al.* (2008), Bartram *et al.* (2009) y Ballantyne (2010).

1.2 Análisis estadístico de la información y definición de rangos de vulnerabilidad

El análisis estadístico de los datos históricos de calidad del agua incluyó su comparación con la reglamentación nacional (MPS y MAVDT, 2007) relacionada con criterios organolépticos, físicos, químicos y microbiológicos (MPS y MAVDT, 2007). Para el análisis de peligros, el equipo PSA estableció los rangos de vulnerabilidad apoyados en la metodología Delphi (Landeta *et al.*, 2011). Esto permitió, mediante reuniones técnicas, concertar las opiniones de los integrantes del grupo y asignar puntuaciones a los criterios seleccionados para la elaboración de los mapas en SIG, los cuales se basaron en evidencias encontradas en la literatura técnica, el conocimiento del SDA, la experiencia de los participantes y su importancia para reflejar algún peligro en el SDA, en función de la disponibilidad, la confiabilidad de la información y su posibilidad de representación espacial.

La tabla 2 muestra los criterios seleccionados y, para algunos casos, sus parámetros representativos, así como los rangos de vulnerabilidad establecidos en

función de su proximidad al incumplimiento de la legislación nacional para los criterios reglamentados y la variación de los percentiles y cuartiles para los criterios restantes; los criterios se clasificaron en cuatro categorías: muy alto, alto, medio y bajo.

Tabla 2. Criterios y rangos de vulnerabilidad establecidos para su representación espacial en SIG

Criterio	Unidad	Resolución 2115/07		Rangos de vulnerabilidad			
				Muy alto	Alto	Medio	Bajo
Presión[1]	mca	Máximo	60	≤16 o ≥60	17-20 o 59-55	21-25 o 54-40	26-40
		Mínimo	15				
Daños de acueducto[2]	—	—	—	percentil 95%	percentil 75%	percentil 50%	percentil 25%
Daños de alcantarillado[2]	—	—	—	percentil 95%	percentil 75%	percentil 50%	percentil 25%
Daños en acometidas[2]	—	—	—	percentil 95%	percentil 75%	percentil 50%	percentil 25%
Quejas de calidad[2]	—	—	—	percentil 95%	percentil 75%	percentil 50%	percentil 25%
Material de la tubería [3]	—	—	—	> 70%	69-50%	49-20%	<20%
Fisicoquímico: parámetros							
Turbiedad	UNT	Máximo	2	≥1,9	1,8-1,5	1,4-0,9	<0,9
Cloro residual libre[4]	mg/L	Máximo	2	≤0,35 o ≥2,0	0,36-0,6	0,7-0,9	1,0-1,9
		Mínimo	0,3				
Microbiológico: parámetros							
Bacterias heterotróficas	UFC/100 cm^3	Máximo	100	99	79	59	<59
E. Coli		Máximo	0	>0	>0	>0	0
Nutrientes: parámetros							
Nitritos	mg/L	Máximo	0,1	≥0,09	0,08-0,06	0,05-0,04	<0,04
Nitratos	mg/L	Máximo	10	≥9,0	8,0 -7,0	6,0 -4,0	<4,0
Hierro total	mg/L	Máximo	0,3	≥0,29	0,28-0,23	0,22-0,14	<0,14
Fosfatos	mg/L	Máximo	0,5	≥0,49	0,48-0,39	0,4-0,24	<0,24
Riesgo crónico: parámetros							
Aluminio	mg/L	Máximo	0,2	≥0,19	0,18-0,15	0,14-0,09	<0,09

[1] Valores establecidos por el Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS, 2000) para un nivel de complejidad alto.

[2] Los datos fueron analizados en términos de su comportamiento en percentiles y cuartiles del total de datos de cada criterio.

[3] Sumatoria en porcentaje de los materiales de la tubería ∑% asbesto + % hierro fundido + % hierro galvanizado.

[4] Para el rango bajo se consideró la meta operativa interna del prestador del servicio, que implica garantizar mínimo 1 mg/L a la salida de las plantas de tratamiento de agua potable.

1.3 Elaboración de mapas en SIG

Los mapas en SIG se crearon partiendo de condiciones normales de operación del SDA, sin la ocurrencia de eventos de contingencia o emergencia, y teniendo en cuenta los niveles de integridad del SDA citados por el National Research Council (2006) y empleados también en el estudio de Moreno (2009) para la evaluación del riesgo en el SDA de Itatinga, Brasil. Se construyeron tres mapas con los datos del año más reciente: el primero corresponde a la integridad física e hidráulica; el segundo, a la integridad por calidad de agua, y el tercero, al mapa final, resultado de la sobreposición de los dos primeros y la densidad poblacional. El mapeo de datos espaciales se realizó con ayuda del *software* ArcGiS 9.3.1®.

Para la construcción del mapa por integridad física e hidráulica del SDA se tuvo en cuenta lo recomendado por Lauer (2010), quien sugiere el uso de indicadores como "daños" para evaluar la integridad física y "presión mínima" para la integridad hidráulica; así mismo se tomó en consideración lo aplicado por Moreno (2009) en su evaluación de riesgos, donde se incluyeron estos mismos indicadores, entre otros. La tabla 3 muestra los parámetros usados para su representación espacial, la importancia y el peso asignado a cada uno de ellos, cuyo indicador de riesgo osciló entre 0 y 100 y la sumatoria en porcentaje de cada criterio fue del 100%.

Tabla 3. Criterios seleccionados para el mapa de integridad física e hidráulica

Criterio	Rango de vulnerabilidad	Peso del indicador (0-100)	Peso final del criterio en %	Importancia del criterio
Presión mínima	Muy Alto Alto Medio Bajo	60 30 10 0	30	Aumento edad del agua, sedimentación en las tuberías, succión de contaminación (Kirmeyer *et al*., 2001;Lee y Schwab, 2005; National Research Council, 2006; Moreno, 2009; Lauer, 2010)
Daños de acueducto			30	La presión baja a cero; esto genera presiones negativas y ocasiona la succión de contaminantes (Moe y Rheingans, 2006; National Research Council 2006; Moreno, 2009; Lauer, 2010)
Daños de alcantarillado			15	Dejan expuesto el SDA a la intrusión de contaminantes microbiológicos y fisicoquímicos (Lee y Schwab, 2005; Moe y Rheingans, 2006; National Research Council, 2006;)
Daños en acometidas			20	
% de material de la red			5	Deterioro de los materiales, podría ocasionar efectos hidráulicos negativos (Lee y Schwab, 2005; National Research Council, 2006; Moreno, 2009)

Los criterios con mayor peso asignado fueron la presión mínima y los daños en acueducto, por su gran implicación en las integridades física e hidráulica (Moreno, 2009; Lauer; 2010). Los criterios seleccionados para la construcción del mapa de integridad por calidad de agua se basaron en pruebas encontradas en la literatura técnica, como se muestra en la tabla 4, en la cual se indican los respectivos pesos y la importancia de cada criterio. Es importante anotar que para este mapa se empleó la interpolación espacial para las comunas que no contaban con punto de monitoreo de calidad.

Tabla 4. Criterios seleccionados para el mapa de integridad por calidad de agua

Criterio	Rango de vulnerabilidad	Peso del indicador (0-100)	Peso final del criterio en %	Importancia del criterio
Fisicoquímico*	Muy alto Alto Medio Bajo	60 30 10 0	30	Indicador de riesgo ante la posible intrusión de contaminación microbiológica (Lee y Schwab, 2005; National Research Council 2006; Graham y Van Derslice, 2007; Silva *et al*., 2009; Moreno, 2009; Lauer, 2010)
Microbiológico*			25	Indicador de la presencia de microorganismos patógenos (Ainsworth, 2004; National Research Council, 2006; Pitkänen *et al*., 2008; Moreno, 2009)
% de material de la red **			15	Deterioro de la calidad del agua por lixiviación de contaminantes (National Research Council, 2006; Jiménez y Rose, 2009; Moreno, 2009)
Nutrientes*			10	Favorecen el desarrollo de microorganismos (biopelículas) (Howard *et al*., 2006; Itoh *et al*., 2006; National Research Council, 2006)
Quejas de calidad			10	Indicador de posibles problemas en el SDA (Gundry *et al*., 2004; National Research Council, 2006; Silva *et al*., 2009)
Riesgo crónico			10	Efectos en la salud por exposición prolongada (National Research Council, 2006; Sobsey, 2006; Jiménez y Rose, 2009)

*El peso de cada parámetro dentro del criterio corresponde a 100/núm. total de parámetros agrupados.

** El material de la tubería puede asociarse con problemas de corrosión en el SDA que indirectamente se relacionan con las variables de calidad de agua, como pH, alcalinidad y dureza.

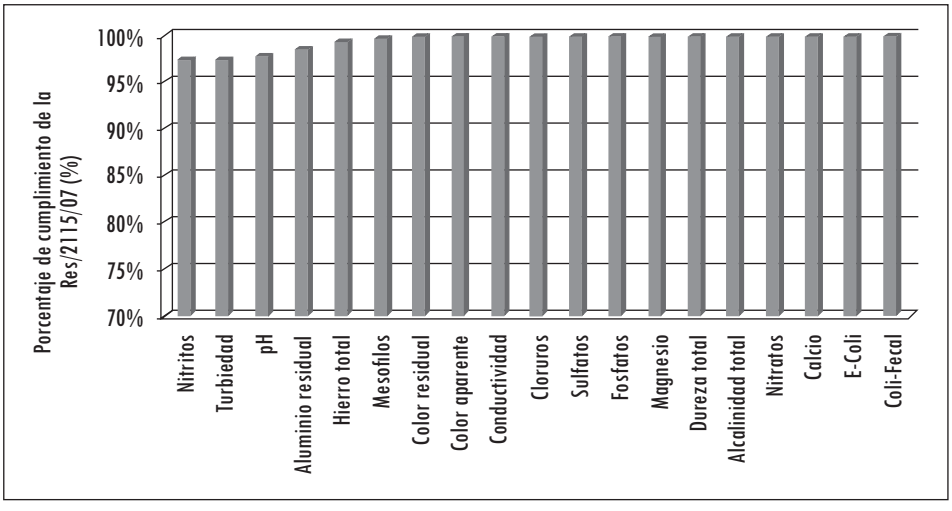
El mayor peso se asignó al criterio fisicoquímico, compuesto por el cloro residual y la turbiedad, teniendo en cuenta lo indicado tanto por Lauer (2010) como por Moreno (2009), seguido del criterio microbiológico asociado al riesgo agudo (Godfrey *et al*., 2003; Moreno; 2009).

Para la construcción del mapa final se sobrepusieron los dos mapas por integridad, con un peso del 40% a cada uno, y el mapa de densidad poblacional, con un peso del 20%, para un total del 100%. Este mapa final permitió identificar las zonas de mayor vulnerabilidad en el SDA por rangos (bajo: 0%-15%; medio: 15%-30%; alto: 30%-45%; muy alto: 45%-100%), los cuales se obtuvieron mediante el análisis de simulación de escenarios críticos.

2. Resultados y discusión

El análisis estadístico de la información histórica de calidad del agua de la red Baja del SDA en el periodo 2000-2007 evidenció el cumplimiento de la reglamentación vigente hasta la fecha (Decreto 475/98); para el periodo restante (2008-2010), el análisis de los datos se realizó frente a la actual reglamentación (Resolución 2115/07), y mostró cumplimiento, en promedio, del 99,4% de los datos, lo cual garantiza una adecuada calidad del agua potable para los consumidores. Los parámetros de nitritos, turbiedad, pH, aluminio residual, hierro total, mesófilos y cloro residual presentaron porcentajes de incumplimiento entre 2,5% y 0,1%, como lo muestra la figura 2.

Figura 2. Porcentaje de cumplimiento de la actual reglamentación colombiana



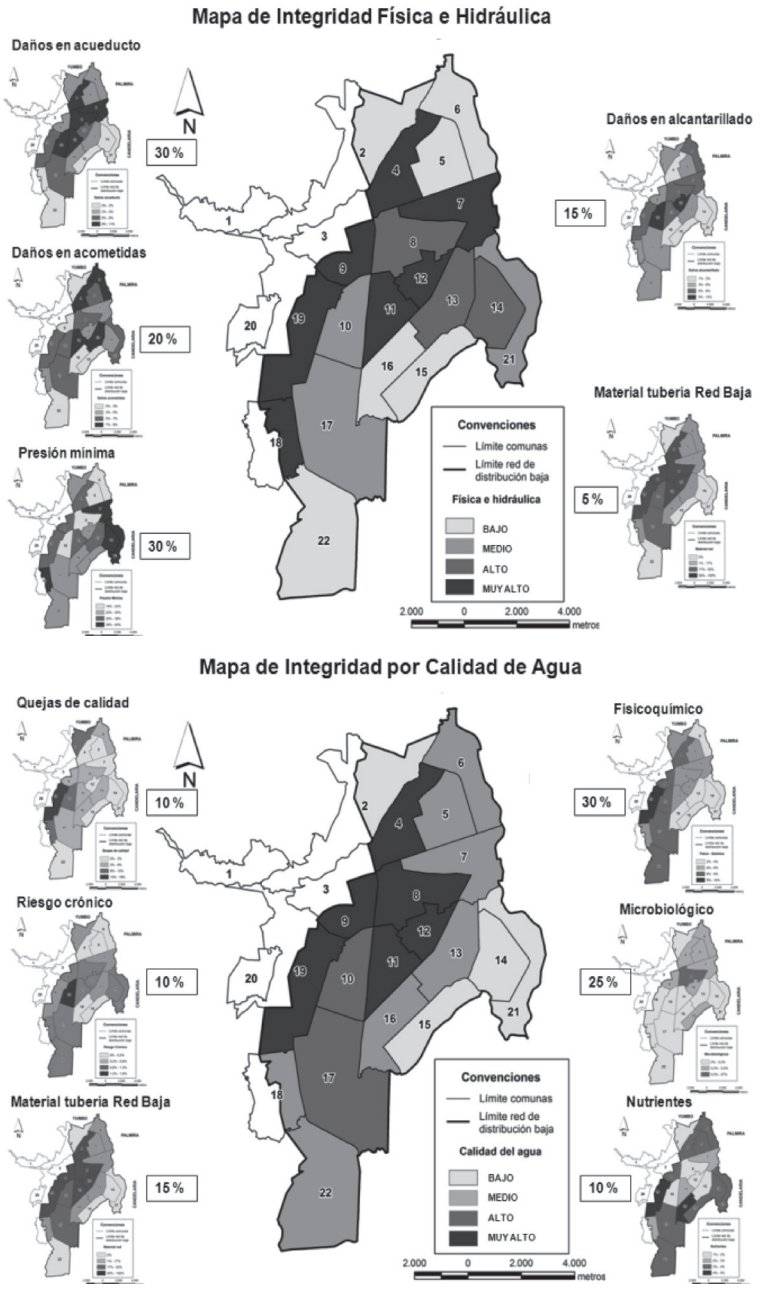
Fuente: presentación propia de los autores.

El cálculo del índice de riesgo de calidad del agua (IRCA), establecido en la actual Resolución 2115 de 2007, permite medir el nivel de riesgo de ocurrencia de enfermedades relacionadas con el consumo de agua potable por el incumplimiento de los parámetros físicos químicos y microbiológicos. En el presente estudio, el IRCA fue de 0,4% para 2008, 0,1% para 2009 y 0,03% para el 2010. Esto indica una tendencia descendente y siempre un nivel sin riesgo para la salud (IRCA = 0%-5%) del agua potable suministrada por la empresa prestadora del servicio.

Aunque los datos de calidad de agua medidos en el IRCA indiquen la ausencia de riesgos para la salud y la calidad del agua cumpla con lo establecido en la reglamentación, existen otros factores que no se incluyen dentro del cálculo y pueden alertar sobre posibles riesgos para la salud; por lo tanto, es importante considerar el fundamento de los PSA en los cuales la prevención y/o minimización de la contaminación a lo largo del SAAP es la prioridad, y no solamente el monitoreo de la calidad final del agua. Con la elaboración de los mapas en SIG se pretendió identificar posibles eventos peligrosos en el SDA que probablemente no quedan registrados en el monitoreo rutinario de calidad y que pueden orientar la gestión de riesgos hacia las zonas más vulnerables del sistema.

La figura 3 esquematiza los criterios o capas que conformaron los mapas por integridad física e hidráulica y de calidad de agua en las comunas, construidos a partir de la información del año más reciente al momento de hacer estudio. Algunos de estos criterios se tuvieron en cuenta en el estudio de Moreno (2009). Es importante anotar que la incorporación de nuevas variables, como en este caso de estudio, complementa los resultados del consenso de opiniones de los especialistas. Estos mapas de vulnerabilidad dan una idea del comportamiento de los criterios incluidos a lo largo de la red Baja del SDA.

Figura 3. Mapeo de los criterios asociados a la integridad física e hidráulica y por calidad de agua del SDA



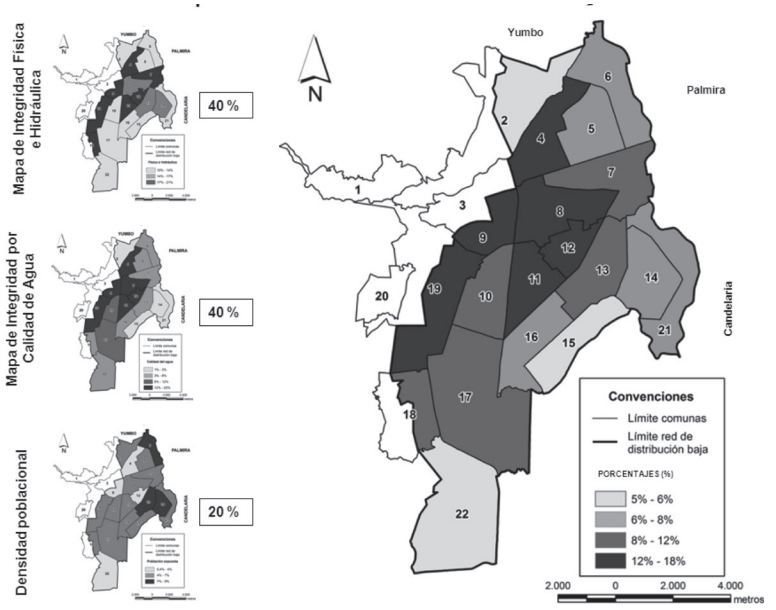
Fuente: presentación propia de los autores.

Las comunas de color más intenso en el mapa de integridad física e hidráulica (4, 7, 9, 11, 12 y 19) y en el mapa de integridad por calidad del agua (4, 8, 9, 11, 12 y 19) muestran las zonas de mayor vulnerabilidad al comportamiento de las variables, y se casifican en el nivel *muy alto*. En el mapa por calidad de agua, las comunas 14, 15, 16, 21 y 22, ubicadas en el nivel *bajo*, podrían estar influenciadas por la ausencia de suficientes puntos de monitoreo de la red en estos sectores, lo que puede afectar la distribución final del mapa y disminuir la sensibilidad de la interpolación espacial realizada.

Teniendo en cuenta que las enfermedades diarreicas agudas (EDA) están asociadas a diferentes factores de riesgo —como calidad del agua, hábitos de higiene, condiciones de salud y saneamiento de la población—, es necesario integrar la información epidemiológica con la calidad del agua para descartar esta posible ruta de exposición. De acuerdo con la Secretaría de Salud Municipal (2010) de Cali, la mayoría de casos reportados de hospitalizaciones en niños menores de 5 años por EDA en el 2009 se concentraron en las comunas 6, 8, 14 y 21 (entre 18 y 23 casos), seguidas de las comunas 10, 11, 12, 13, 15 y 16 (entre 10 y 17 casos). Al comparar esta información con la obtenida en el mapa de integridad por calidad de agua, se observa coincidencia en las tres comunas (8, 11 y 12) que presentan el mayor porcentaje.

La figura 4 muestra el mapa final conformado por la combinación de los dos mapas anteriores y la densidad poblacional. El color más oscuro corresponde a las comunas con mayor vulnerabilidad a la intrusión de peligros en el SDA.

Figura 4. Mapa de riesgos de la red Baja de Cali



Fuente: presentación propia de los autores.

Los máximos porcentajes alcanzados en la zona de color más intenso, fueron entre 12% y 18%, lo que indica un riesgo medio-bajo para las comunas localizadas en esta zona, considerando los rangos de riesgo establecidos en este estudio (bajo: 0%-15%; medio: 15%-30%; alto: 30%-45%; muy alto: 45%-100%). Es importante resaltar que el mapa de riesgo evidencia una mayor probabilidad de intrusión de peligros al SDA en las comunas 4, 8, 9, 11, 12 y 19, ubicadas en la zona centro del mapa, seguidas de las comunas 7, 10, 12, 13, 17 y 18; es necesario, entonces, que las medidas de control y estrategias de gestión del riesgo enmarcadas en el PSA consideren estas zonas como prioritarias. Este análisis coincide con el realizado por Montoya *et al*. (2009), el cual esquematiza mediante SIG un mapa de zonas prioritarias para la localización de estaciones de monitoreo del SDA de Cali, asignando un valor alto de prioridad a las estaciones en sectores de las comunas 2, 6, 8, 10, 11, 12 y 19, y un nivel medio de prioridad a las comunas 7 y 9.

La comuna 22, por ser un punto extremo de la red, presenta edades del agua elevadas, lo que podría estar afectando la calidad del agua (Sánchez *et al.*, 2011); sin embargo, la ausencia de suficientes puntos de monitoreo de calidad del agua en este sector podría estar disminuyendo la sensibilidad del mapa en SIG.

Aunque los mapas se elaboraron bajo condiciones operativas normales, es importante anotar que se confrontaron las zonas de mayor vulnerabilidad obtenidas con la información sobre microzonificación sísmica de Cali, suministrada por el Departamento Adminsitrativo de Gestión del Medio Ambiente (DAGMA) (2006), mostrando que parte de las comunas 10 y 19 se ubican en una zona crítica en cuanto a sismos y que las comunas aledañas al río Cauca son vulnerables a licuación de suelos, entre las que se encuentran las comunas 8 y 21, donde se sitúan las plantas de tratamiento Río Cauca y Puerto Mallarino. Frente a este tipo de peligros, desde finales de la década de 1990 se han realizado estudios de sismorresistencia y se han efectuado las obras y adecuaciones correspondientes de refuerzo antisísmico en las plantas. Esta información debe ser considerada dentro del plan de gestión de riesgos que debe tener todo SAAP como parte del PSA, con el fin de establecer medidas de control frente a este tipo de eventos.

3. Conclusiones

La calidad del agua suministrada por la empresa prestadora del servicio ha cumplido con la reglamentación estipulada por la Resolución 2115/07, entregando agua potable calificada según el IRCA como sin riesgo para la salud; sin embargo, es evidente la importancia de contar con una gestión integral de riesgos en el SDA, fundamentándose en enfoques preventivos como los planes de seguridad del agua y no solo en el enfoque tradicional de control de la calidad final del agua potable (monitoreo fisicoquímico y microbiológico).

El mapa final de riesgo de la red baja mostró que aunque todas las comunas se ubican en un porcentaje de vulnerabilidad medio-baja (5%-18%), se pudieron identificar zonas más vulnerables y susceptibles a la intrusión de peligros, principalmente en las comunas ubicadas en la zona centro de la ciudad.

Es importante contar con información confiable que represente la realidad del SDA, por lo que las empresas prestadoras del servicio deben tener un control adecuado de recopilación y procesamiento de información sobre el funcionamiento del sistema de distribución que permita estimar los riesgos. La implementación de estaciones rutinarias de monitoreo a lo largo del SDA reguladas por la Resolución 0811 de 2008 son fundamentales para tener un registro más preciso sobre la calidad del agua potable suministrada al usuario final y lograr mayor representatividad espacial de la información.

La participación del equipo PSA, fundamentada en los conceptos de la metodología Delphi e integrada a herramientas como los sistemas de información

geográfica, mostró su importancia y utilidad en la identificación de peligros, priorización de zonas vulnerables a la pérdida de la integridad física, hidráulica y de calidad de agua y en la gestión integral de riesgos en los sistemas de distribución de agua potable. Los resultados del estudio también sirven de insumo para que la empresa prestadora del servicio identifique y evalúe las medidas de control existentes y la necesidad de implementar medidas adicionales para controlar los riesgos, elementos de gran utilidad durante el desarrollo de un plan de seguridad del agua.

Referencias

AINSWORTH, R. *Safe piped water: Managing microbial water quality in piped distribution systems*. London: IWA Publishing, 2004. 18-433-9039-6.

ASADI, S.; VUPPALA, P. y REDDY, M. Remote sensing and GIS techniques for evaluation of groundwater quality in municipal corporation of Hyderabad (Zone-V), India. *International Journal of Environmental Research and Public Health.* 2007, vol. 4, num. 1, pp. 45-52.

BALLANTYNE, D. Seismic vulnerability assessment and design of pipelines. *Journal American Water Works Association*. 2010, vol. 102, núm. 5, pp. 88-97.

BARTRAM, J.; CORRALES, L.; DAVISON, A. *et al*. *Manual para el desarrollo de planes de seguridad del agua: metodología pormenorizada de gestión de riesgos para proveedores de agua de consumo*. Ginebra: Organización Mundial de la Salud, 2009.

DAVISON, A. y DEERE, D. *Water safety plan workbook: wsp training of trainer.* Singapur: PUB, 2007.

DEPARTAMENTO DE GESTIÓN DEL MEDIO AMBIENTE (DAGMA), INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN E INFORMACIÓN GEOCIENTÍFICA, MINERO-AMBIENTAL Y NUCLEAR (INGEOMINAS) y ASOCIACIÓN DE INGENIEROS DEL VALLE (AIV). *Microzonificación sísmica Santiago de Cali.* Cartilla de divulgación. 2006. 1- 27 (24 y 25).

GODFREY, S.; KIZITO, F. y HOWARD, G. Static risk mapping using a geographic information system. *29th WEDC International Conference: Towards the millennium development goals.* Nigeria: 2003. pp.107-110.

GRAHAM, J. y VANDERSLICE, J. The effectiveness of large household water storage tanks for protecting the quality of drinking water. *Journal of Water and Health.* 2007, vol. 5, núm. 2, pp. 307-314.

GUNDRY, S.; WRIGHT, J. y CONROY, R. A systematic review of the health outcomes related to household water quality in developing countries. *Journal of Water and Health.* 2004, vol. 2, núm. 1, pp. 1-14.

HOWARD, G.; PEDLEY, S. y TIBATEMWA, S. Quantitative microbial risk assessment to estimate health risks attributable to water supply: Can the technique be applied in developing countries with limited data? *Journal of Water and Health*. 2006, vol. 4, núm. 1, pp. 49-66.

ITOH, S.; NAKANO, A. y ARAKI, T. Reevaluation of the toxicity of chlorinated water and the usefulness of MX as an index. *Journal of Water and Health.* 2006, vol. 4, núm. 4, pp. 523-531.

JIMÉNEZ, B. y ROSE, J. *Urban water security: managing risks*. UNESCO-IHP. Taylor & Francis, 2009.

KIRMEYER, G.; FRIEDMAN, M.; MARTEL, K. *et al*. Practical guidelines for maintaining distribution system water quality. *Journal American Water Works Association.* 2001, vol. 93, núm. 7, pp. 62-73.

KISTEMANN, T.; DANGENDORF, F. y EXNER, M. A Geographical Information System (GIS) as a tool for microbial risk assessment in catchment areas of drinking water reservoirs. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*. 2001, vol. 203, núm. 3, pp. 225-233.

LANDETA, J.; BARRUTIA, J. y LERTXUNDI A. Hybrid Delphi: a methodology to facilitate contribution from experts in professional contexts. *Technological Forecasting & Social Change.* 2011, vol. 78, pp.1629-1641.

LAUER, B. Partnership offers new distribution system optimization program. *American Water Works Association Journal*. 2010, vol. 102, núm. 12, pp. 32-36.

LEE, E. y SCHWAB, K. Deficiencies in drinking water distribution systems in developing countries. *Journal of Water and Health.* 2005, vol. 3, núm. 2, pp. 109-127.

LINSTONE, H. y TUROFF, M. Delphi: a brief look backward and forward. *Technological Forecasting & Social Change*. 2010, vol. 78, pp. 1712-1719.

LOPES, V. y LIBANIO, M. Proposição de um Índice de Qualidade de Estações de Tratamento de Água (IQETA). *Revista Engenharia Sanitária e Ambiental.* 2005, vol. 10, núm. 4, pp. 318-328.

MOE, C. y RHEINGANS, R. Global challenges in water, sanitation and health. *Journal of Water and Health.* 2006, vol. 4, núm. 1, pp. 41-57.

MONTOYA, C.; LOAIZA, D.; CRUZ, C. *et al.* Propuesta metodológica para localización de estaciones de monitoreo de calidad de agua en redes de distribución utilizando sistemas de información geográfica. *Revista facultad de ingenieria Universidad de Antioquia.* 2009, núm. 49, pp. 129-140.

MORENO, J. *Avaliaçao e gestao de riscos no controle da qualidade da água em redes de distribuçao: estudo de caso*. Tese (Doutorado). Sao Carlos: Universidade de Sao Paulo, Escola de Engenharia de Sao Carlos, 2009.

NATIONAL RESEARCH COUNCIL OF THE NATIONAL ACADEMIES. *Drinking water distribution systems: assessing and reducing risks.* Washington: The National Academies Press, 2006.

PIERCE, L; NEMANI, R; MICHAELIS, A. *et al*. GIS and modeling tools: Enhancing agricultural water use efficiency. *Water efficiency*. 2010, vol. 5, núm. 3, pp. 42-45.

PITKÄNEN, T.; MIETTINEN, I.; NAKARI, U. *et al*. Faecal contamination of a municipal drinking water distribution system in association with Campylobacter jejuni infections. *Journal of Water and Health*. 2008, vol. 6, núm. 3, pp. 365-376.

REPÚBLICA DE COLOMBIA; MINISTERIO DE DESARROLLO ECONÓMICO (MDE). *Reglamento técnico de agua potable y saneamiento básico* (*RAS*). Bogotá, MDE, 2000.

REPÚBLICA DE COLOMBIA; MINISTERIO DE PROTECCIÓN SOCIAL (MPS) y MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL (MAVDT). *Resolución 2115 de 2007*. Bogotá: MPS; MAVDT, 2007.

REPÚBLICA DE COLOMBIA; MINISTERIO DE SALUD. Decreto 475 de 1998.

REPÚBLICA DE COLOMBIA; SECRETARÍA DE SALUD MUNICIPAL (SSM), CALI. *Comunicado 4145.0847 de 13 de mayo 2010*. Cali: SSM, 2010.

RIZAK, S. y HRUDEY, S. Drinking-water safety: challenges for community-managed systems. *Journal of Water and Health.* 2008, vol. 6, núm. 1, pp. 33-41.

ROSÉN, L., HOKSTAD, P., LINDHE, A., *et al. Generic framework and methods for integrated risk management in water safety plans.* Normandía: Techneau, 2007, Deliverable number D, 4(3).

ROWE, G. y WRIGH, G. The Delphi technique: Past, present, and future prospects Introduction to the special issue. *Technological Forecasting & Social Change.* 2011, vol. 78, pp.1487-1490.

SÁNCHEZ, L. RODRÍGUEZ, S. ESCOBAR, J. *et al*. Modelación del cloro residual y subproductos de la desinfección en un sector piloto del sistema de distribución de agua potable de la ciudad de Cali. *Ingeniería y Competitividad*. 2011, vol. 12, núm. 4, pp. 127-138.

SHIELDS, B. GIS system aids in pinpointing potentially contaminated sites. *Environmental Solutions Magazine*. 2010, núm. 2, pp. 30-31.

SILVA, S.; HELLER, L.; VALADARES, J. *et al*. O cuidado domiciliar com a água de consumo humano e suas implicações na saúde: percepções de moradores em Vitória (ES), Brazil. *Revista Engenharia Sanitária e Ambiental*. 2009, vol. 14, núm. 4, pp. 521-532.

SOBSEY, M. Drinking water and health research: a look to the future in the United States and globally. *Journal of Water and Health*. 2006, vol. 4, núm. 1, pp. 17-21.

STURM, S.; KIEFER, J. y BALL, T. *Risk assessment case study. Freiburg-Ebner*. *Techneau*. Karlsruhe: DVGW Water Technology Center (TZW), 2008.

TAYLOR, J. y RYDER, S. Use of the Delphi Method in resolving complex water resources issues. *Journal of the American Water Resources Association (JAWRA).* 2003, vol. 39, núm. 1, pp.183-189.

VAIRAVAMOORTHY, K; YAN, J.; GALGALE, H. *et al*. IRA-WDS: A GIS-based risk analysis tool for water distribution systems. *Environmental Modelling & Software*. 2007, vol. 22, núm. 7, pp. 951-965.

VIEIRA, J. y MORAIS, C. *Planos de segurança da água para consumo humano em sistemas públicos de abastecimiento*. Universidade do Minho, Instituto Regulador de Águas e Resíduos, 2005.

WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). *Guidelines for Drinking-water Quality: 4th edition.* Genéve; WHO, 2011.