

Identificación de variables claves para la ubicación de estaciones de monitoreo de la calidad de agua en redes de distribución para poblaciones intermedias.

Luisa María Pimiento Gómez

Gerardo Sebastián Hoyos Perdomo

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de Ingeniero Civil

Director:

Edgar Ricardo Oviedo Ocaña

Doctor en Ingeniería, área de Énfasis Ingeniería Sanitaria y Ambiental

Universidad Industrial De Santander

Facultad de Ingeniería Físico Mecánica

Escuela de ingeniería civil

Bucaramanga

2018

Contenido

	Pág.
Introducción.....	12
1. Marco de referencia.....	15
2. Metodología.....	16
2.1. Revisión de la literatura.....	17
2.2 Entrevista a empresas prestadoras de servicio de acueductos	17
2.3 Análisis estructural para la priorización de las variables identificadas.	18
3. Resultados y discusión.....	19
3.1 Variables de la revisión de la literatura y consulta de expertos (análisis estructural).	19
3.1.1. Material de la tubería.....	20
3.1.2. Corrosión de la tubería.....	21
3.1.3. Tiempo de residencia del agua (edad del agua).....	22
3.1.4. Actos de vandalismo y terrorismo en todo el sistema de abastecimiento.	23
3.1.5. Fugas de agua en la red.....	24
3.1.6. Bajos recursos financieros.....	25
3.1.7. Amenazas naturales.....	25
3.1.8. Cruces entre redes de acueductos y alcantarillados.....	26
3.1.9. Deterioro de válvulas e hidratantes.....	27

3.1.10. Inadecuado funcionamiento de dispositivos de control del golpe de ariete.	27
3.1.11. Operación y mantenimiento de las estaciones de bombeo.	28
3.1.12. Edad de la tubería.	28
3.1.13. Acumulación de material en la red de distribución.	29
3.1.14. Variaciones de presión en la red de distribución.	30
3.1.15. Velocidad del flujo en la red.	30
3.1.16. Concentración del cloro residual.	31
3.2 Variables de las entrevistas a empresas prestadoras de servicio de acueductos.	32
3.3 Matriz de impacto cruzado. Multiplicación aplicada a una clasificación.	35
3.4 Localización de puntos de muestreo de calidad del agua	38
4. Conclusiones.	40
Referencias bibliográficas	42
Apéndices	49

Lista de figuras

	Pág.
<i>Figura 1.</i> Cruce de información	34
<i>Figura 2.</i> Grafica Mic-Mac.	37

Lista de tablas

Pág.

Tabla 1. <i>Variables destacadas en la literatura para las ubicaciones de las estaciones de monitoreo.</i>	19
Tabla 2. <i>Resultado Mic-Mac</i>	36

Lista de apéndices

	Pág.
Apéndice A. Entrevista	49
Apéndice B. Entrevista 2	55
Apéndice C. Matriz de impactos cruzados. Multiplicación aplicada a una clasificación.....	59

Resumen

Título: Identificación de variables claves para la ubicación de estaciones de monitoreo de la calidad de agua en redes de distribución para poblaciones intermedias.*

Autor: Luisa María Pimiento Gómez **
Gerardo Sebastián Hoyos Perdomo

Palabras clave: calidad del agua, estaciones de monitoreo, redes de distribución, metodología Mic-Mac, variables claves.

Descripción

El servicio de suministro de agua está constantemente propenso a sufrir eventualidades que ponen en riesgo la calidad del agua suministrada y por ende a la población beneficiada por esta. Estos problemas son en gran parte generados por la falta de un modelo que permita el monitoreo del estado del servicio de forma eficaz, garantizando una buena calidad del agua en la red de distribución para los usuarios finales.

Identificar las variables claves al momento de ubicar estaciones de monitoreo en redes de distribución de agua potable a poblaciones de 50.000 a 100.000 habitantes es el propósito de este artículo, para hallarlas, se utilizaron referentes bibliográficos y opiniones de expertos en el tema, condensando 16 variables. Seguidamente, se realizó un análisis aplicando la herramienta análisis estructural con Mic-Mac (Matriz de impacto cruzado. Multiplicación aplicada a clasificación). Los resultados muestran que la concentración de cloro, operación y mantenimiento de estaciones de bombeo, tiempo de residencia, actos de vandalismo y terrorismo en el sistema de abastecimiento, edad de la tubería, corrosión de la tubería y material de la tubería como las variables más relevantes. Estas variables pueden ser controladas, lo que permite un líquido con contenido de cloro óptimo, la concentración de cloro es la variable clave y la más dependiente, el tiempo de residencia es la más influyente que se puede controlar.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Edgar Ricardo Oviedo Ocaña, Doctor en Ingeniería, área de Énfasis Ingeniería Sanitaria y Ambiental

Abstract

Title: Identification of key variables for the location of water quality monitoring stations in distribution networks for intermediate populations.*

Author: Luisa María Pimiento Gómez **
Gerardo Sebastián Hoyos Perdomo

Keywords: water quality, monitoring stations, distribution network, Mic-Mac methodology, key variables.

Description

The water supply service is constantly prone to suffer eventualities that put at risk the quality of the water supplied and therefore to the population benefited by it. These problems are generated in large part by the lack of a model that allows an effectively monitoring of the service state, guaranteeing good water quality in the distribution network for end users.

Identify the key variables when locating monitoring stations in drinking water distribution networks to populations of 50,000 to 100,000 inhabitants is the purpose of this article, to find them, bibliographic references and opinions of experts in the subject were used, condensing 16 variables. Next, an analysis was carried out applying the structural analysis tool with Mic-Mac (Cross-impact Matrix Multiplication applied to classification). The results show that the concentration of chlorine, operation and maintenance of pumping stations, residence time, acts of vandalism and terrorism in the supply system, age of the pipe, corrosion of the pipe and pipe material are the most important variables. These variables can be controlled, which allows a liquid with optimal chlorine content, the concentration of chlorine is the key variable and the most dependent, the residence time is the most influential that can be controlled.

* Degree work

** Faculty of Mechanical Physics Engineering, School of Civil Engineering, Director: Edgar Ricardo Oviedo Ocaña, Doctor of Engineering, Area of Emphasis on Sanitary and Environmental Engineering

Introducción

Asegurar el acceso al agua potable para toda la población mundial es un objetivo global que no se ha logrado, llegando a un 68% de acceso al líquido tratado y debido a la falta de prácticas higiénicas, la poca inversión en infraestructura, la alta contaminación industrial y sanitaria se han visto afectadas el restante 32% y parte del 68%. (UNESCO, 2013)

Los sistemas de abasto están integrados por componentes que inician desde la captación, pasando por la conducción (cuya función es llevar el agua a los tanques regularizadores y/o planta de tratamiento, en donde se le realiza todas las acciones pertinentes para retirar contaminantes y potabilizar el agua), para luego pasar a la línea de alimentación (el cual regula la cantidad al sistema de red de distribución) conformado por tuberías, bombas, válvulas, almacenamientos, medidores, hidrantes, acoples y otros accesorios hidráulicos (Molía, 1987) que, en conjunto, controla el volumen de agua hasta la entrega al usuario final, en todo este proceso se debe procurar mantener una práctica integral con el fin de evitar baja calidad en el líquido, entendiéndose por ello como disminución en el contenido de cloro (Montoya, y otros, 2009), (Jiménez Terán, 2013).

A nivel mundial, en países como Estados Unidos y México se han realizado estudios para localización de estaciones de monitoreo. En Estados Unidos, entre las variables a destacar está la corrosión en tubería y edad de la misma (Chang, Gao, Wu, & Yuan, 2009) (Hallam, Hua, J.R., Foster, & Simms, 2003, págs. 78-81) y en México se destaca la variable tiempo de residencia en el agua, en donde la concentración de cloro disminuye drásticamente (Saldarriaga, y otros, 2014, págs. 39-53).

En Colombia se han realizado estudios para localizar las estaciones de monitoreo, usando sistema de información geográfica en Cali, en la cual se concluyó que la integridad física de los equipos de distribución de agua, la presión suministrada al sistema y calidad del agua al comienzo de la red de distribución, son variables claves (Pérez, Torres, & Cruz, 2009, págs. 79-85). En otro estudio realizado en la ciudad de Bogotá, resultó la concentración de cloro residual y actos vandálicos como las más importantes al momento de ubicar las estaciones de monitoreo (Saldarriaga, y otros, Scielo, (5)2, 2014, págs. 39-53).

En Colombia, en zonas urbanas, el 97% de población cuenta con el servicio de suministro de agua potable y en zonas rurales el 70% (Marines, 2017); esta población, tanto rural como urbana, puede estar propensa a enfermedades debidas a patógenos, contaminación y/o componentes no aptos para el consumo humano presentes en el agua suministrada, así como la suspensión del servicio debido a fallas en el estado físico del sistema de suministro. La prestación de servicios de suministro de agua hace parte de un sistema amplio, influenciado por distintos factores, como el análisis constante del agua, entre otras, los cuales se requiere regular para mantener la buena calidad del agua distribuida. La importancia de las estaciones de monitoreo es controlar las posibles contaminaciones del agua, detectándolas en etapas tempranas, posibilitando su manejo en pro de los consumidores (Pérez A. , 2013).

Es por esto que el desarrollo de un sistema de monitoreo adecuado y eficaz es indispensable para detectar baja calidad en el agua. El análisis de los sistemas de distribución de agua potable para emplear una apropiada técnica de monitoreo de calidad del líquido, debe seleccionar las variables que más influyen en el cambio de los parámetros de control de calidad de este durante el recorrido, desde la planta hasta el principal beneficiario, identificando las zonas de mayor vulnerabilidad, como aquellas propensas a ser focos de contaminación y con altas probabilidades

de sufrir eventualidades que dañen la integridad física de la estructura del sistema de abastecimiento, disminuyendo la calidad del agua suministrada (Ballesteros & Páez, 2015).

1. Marco de referencia

Los sistemas de distribución de agua están compuestos por tuberías, bombas, válvulas, almacenamientos, medidores, hidrantes, acoples y otros accesorios hidráulicos (Molía, 1987) y la evaluación del riesgo es el proceso de identificar y magnificar las consecuencias negativas que pueden resultar de una acción, proporcionando información sobre los posibles impactos ecológicos o en la salud pública; la gestión del riesgo ayuda a tomar decisiones para controlar los peligros identificados en la evaluación, considerando aspectos sociales, científicos, tecnológicos, económicos, legales y políticos que faciliten la toma de decisiones y acciones de gestión; en los sistemas de abastecimiento de agua potable son de gran importancia para garantizar la seguridad del agua (Pérez, Torres, & Cruz, 2009, págs. 79-85).

La Organización Mundial de la Salud (OMS) promueve un enfoque preventivo de manejo de riesgo para proveer agua potable segura a través de planes de seguridad de agua (PSA), éstos son un planteamiento integral de evaluación y gestión de riesgo y abarcan todos los componentes del sistema de abastecimiento, los cuales son la integración de cuatro componentes: la cuenca de abastecimiento, los procesos de tratamiento, el sistema de distribución y el consumidor final, esto garantiza al consumidor agua potable o segura que cumple con las características de calidad físicas, químicas, microbiológicas, radiológicas y organolépticas establecidas en la reglamentación y que la hacen apta para el consumo humano, no ocasiona ningún riesgo significativo para la salud cuando se consume durante toda la vida y es adecuada para todo uso doméstico habitual, incluida la higiene personal (Pérez A. , 2013) (Manzur, 2002).

Las redes de distribución de agua se deben monitorear para realizar las observaciones o mediciones de parámetros de control, así evaluar si un punto de monitoreo cumple los criterios de calidad o si de lo contrario, hay disminución de contenido de cloro y/o aumento de patógenos. En estos puntos de control pueden aplicarse medidas de control para prevenir o eliminar un peligro en pro de la seguridad del agua o reducirlo a un nivel aceptable mediante el análisis de peligros. Este análisis es el proceso de reunir y evaluar información sobre peligros o condiciones que dan lugar a su presencia, se deben decidir cuales peligros son significativos para la seguridad del agua, esto se realiza para prevenir y evitar eventos peligrosos en el agua como agentes biológicos, químicos, físicos u otros contaminantes del agua con capacidad de ocasionar un efecto adverso sobre la salud de los beneficiarios, contaminando de forma directa el sistema de abastecimiento de agua (Bartram, y otros, 2009).

2. Metodología

La selección adecuada de las variables pertinentes para el tema de estudio en este artículo tuvo tres fases: i) identificación de variables a través de la revisión en la literatura, ii) consulta sobre las variables identificadas a dos encargados de la operación de la red de distribución en empresas prestadoras de servicio de acueductos, y iii) aplicación del método de análisis estructural con Mic-Mac (Matriz de impacto cruzados - Multiplicación aplicada a una clasificación) para determinar las variables más influyentes.

2.1. Revisión de la literatura

Como primera medida se realizó una revisión en la literatura en bases de datos como ScienceDirect, de temas relacionados con las variables empleadas para la ubicación de estaciones de monitoreo de la calidad del agua en redes de distribución, empleando palabras claves como: “water distribution system”, “drinking water supply system”, “hazard analysis”, “water quality” y “water safety plan”, se revisaron 35 documentos, entre artículos científicos y tesis, identificando las diferentes variables consideradas en cada estudio. Se realizó un proceso, el cual consistió en la selección de las variables utilizadas, sin obviar ninguna, lo cual es parte de la intención de este artículo. Con una matriz Mic-Mac se puede brindar un método para la escogencia de las variables más importantes al momento de la ubicación y diseño de un sistema de monitoreo en una red de abastecimiento.

2.2 Entrevista a empresas prestadoras de servicio de acueductos

Se realizaron entrevistas a dos funcionarios encargados de la red de distribución, en dos empresas prestadoras de servicio de acueductos. Esto permitió conocer los criterios empleados por dichas empresas para monitorear la calidad del agua en la red de distribución, esto con el fin de tener conocimiento más preciso sobre las redes de distribución en Colombia y que esta investigación involucre tanto la literatura como la realidad del país.

El Acueducto Metropolitano de Bucaramanga S.A E.S.P. y el del Municipio de Ciénaga Magdalena, Operadores de Servicios de La Sierra S.A E.S.P, fueron las empresas seleccionadas, dado que se contaba con la colaboración de funcionarios de dichas empresas para obtener de forma

más eficiente la información deseada. El formato de las entrevistas semiestructuradas se observa en los Anexos 1 y 2.

Al final con los resultados obtenidos en las entrevistas se realiza el cruce de información para tener un conjunto de variables generales para la ubicación de estaciones de monitoreo de la calidad del agua.

2.3 Análisis estructural para la priorización de las variables identificadas.

El análisis estructural consta de tres partes, la primera es la recopilación de la información del sistema, sin obviar ninguna, la segunda es la estrategia de los actores, en la que se define cuáles son las condiciones permisibles o aceptadas para el sistema o estudio y por último se realiza la matriz de impactos cruzados, la parte que se cuantifica las condiciones más relevantes e influyentes en el sistema. Entendiéndose condiciones, para el presente estudio, como variables (Garza & Cortéz, 2011, págs. 335-356).

La matriz de impacto cruzado, multiplicación aplicada a clasificación (Mic-Mac) permite determinar las variables que más influyen y dependen en el sistema. Al encontrar el valor cuantitativo de cada variable y después de graficarla en un plano cartesiano, se toma el número más grande obtenido en la matriz y se divide a la mitad y el resultado se escoge como los nuevos ejes de la gráfica, dividiéndolo en cuatro cuadrantes. El cuadrante uno es el superior izquierdo, el cuadrante dos es el superior derecho, el cuadrante tres es el inferior derecho y el cuadrante 4 es el inferior izquierdo. El cuadrante 1 dispone de las variables más influyentes, entre más arriba y movida a la izquierda se encuentre, mayor influencia tiene, en el cuadrante 2 y 4 no se puede decidir sobre las obtenidas allí y en el cuadrante tres se encuentran las mayormente dependientes

(Garza & Cortéz, 2011, págs. 335-356), (Arcade, Godet, Meunier, & Roubelat, 2004, págs. 165-233).

3. Resultados y discusión

3.1 Variables de la revisión de la literatura y consulta de expertos (análisis estructural).

En la Tabla 1 se presentan las 16 variables escogidas en la revisión las cuales fueron seleccionadas por los diferentes estudios como relevantes.

Tabla 1.

Variables destacadas en la literatura para las ubicaciones de las estaciones de monitoreo.

N°	Variable	Referencia
1	Material de la tubería	3, 11, 12, 14, 19, 20.
2	Corrosión en la tubería	3, 11, 12, 19, 20, 24, 29, 41.
3	Tiempo de residencia del agua (edad del agua)	3, 11, 12, 19, 24, 27, 28, 25.
4	Actos de vandalismo y terrorismo en el sistema de abastecimiento	3, 29, 43.
5	Fugas de agua en la red	3, 12, 14, 32, 33, 35, 43, 44.
6	Bajo recursos financieros	35, 51
7	Amenazas naturales	3,37
8	Cruce entre redes de acueducto y alcantarillado	3, 29, 38.

Tabla 1. *Continuación*

N°	Variable	Referencia
9	Deterioro de válvulas e hidratantes	11
10	Inadecuado funcionamiento de dispositivos de control del golpe de ariete	11
11	Operación y mantenimiento de estaciones de bombeo	11,40
12	Edad de la tubería	3, 12, 19, 20, 24, 29, 41.
13	Acumulación de material contaminante en la red de distribución	30
14	Variaciones de presión en la red de distribución	11, 44, 45, 46.
15	Velocidad de flujo en la red	47
16	Concentración de cloro residual	9, 14, 19, 31, 47, 50.

3.1.1. Material de la tubería. El decaimiento de la calidad se ve afectado en gran medida por el material de la tubería (Ballesteros & Páez, 2015), debido a su influencia en el agua y su relación con el material externo (tubería, bomba, entre otros). Por ejemplo, la liberación de plomo presentará riesgos para la salud de los consumidores, la liberación de nutrientes del material de caucho promoverá el crecimiento microbiano en el sistema de distribución y así con varios materiales de tubería muy utilizados (Knobelsdorf & Mujeriego, 1997, págs. 17-28). En todo el mundo, los materiales de tubería inorgánicos tradicionales están siendo reemplazados por orgánicos. Aunque el plomo y el material basado en cemento de asbesto está siendo eliminado y reemplazado (se encuentran aún en el 30% de la red de acueducto en Cali) (El País, 2015), todavía se utilizan longitudes sustanciales en la distribución operativa (Liu, y otros, 2017). Las interacciones entre el agua y la infraestructura utilizada para suministro son fundamentales para

producir agua potable y estas interacciones pueden modificar de manera sustancial la calidad del agua de suministro (Cerrato, Reyes, Alvarado, & Dietrich, 2006, págs. 2720–2726).

El agua potable con el hierro y acero da como resultado corrosión y biopelículas, provocando, adicionalmente, deterioro de la tubería (Ríos, Ramírez, J., & Echeverría, 2007, págs. 925-929), las tuberías reforzadas por algún metal pueden generar una reacción química sobre el flujo de agua debido a la disolución del material, reaccionando por acción del gas sulfuro, generando contaminantes químicos (Elementla, Desconocido), la tubería de asbesto, por el proceso de exfoliación en su interacción con el agua, desprende, en este caso, contaminante químico, afectando la calidad del agua, estas acciones repercuten negativamente en la calidad del agua, obligando a realizar monitoreo en proximidad a las cuales se denote alta interacción (OMS, 2003).

3.1.2. Corrosión de la tubería. En general estudios han comprobado que la presencia de metales pesados como Cd, Cu, Fe, Hg, Mn, Ni, se deben a factores como corrosión de tuberías metálicas, depósitos de agua y sistemas de plomería (Chowdhury, Mazumder, Al-Attas, & Husain, 2016, págs. 476–488).

Así mismo se debe destacar la presencia de escamas (capas de pasivación, productos de corrosión y contaminantes asociados) formadas en las tuberías de agua potable como resultado de una combinación de procesos in situ o corrosión aguas arriba, deposición post-tratamiento de materiales sólidos y depósitos formados a través de la reacción del agua tratada y el material de la tubería con sustancias naturales que pasan a través de ella. Otro factor que influye en la corrosión y contaminación en las tuberías es la edad de las mismas, pues a un tiempo superior a 20 años, el material se corroe mucho más rápido (Liu, y otros, 2017).

3.1.3. Tiempo de residencia del agua (edad del agua). Uno de los problemas encontrados en la tubería de abastecimiento es la ocurrencia de largos tiempos de retención (Ballesteros & Páez, 2015), evidenciado especialmente en los nodos sin salida (extremidades) y en las instalaciones de plomería. El impacto simultáneo de procesos fisicoquímicos y microbiológicos causados por este tiempo de residencia, pueden resultar en el deterioro de la calidad del agua que llega al grifo del cliente en comparación con el agua original producida en la planta de tratamiento (Liu, y otros, 2017) (Zlatanović, Van der Hoek, & Vreeburg, 2017, págs. 761–772). Uno de los problemas referenciados debido a los tiempos de residencia del agua, es la disminución del cloro libre usado para desinfección del suministro después de salir de la planta de tratamiento. El residuo de cloro prácticamente puede desaparecer en varios momentos durante el día, gracias a ocurrencias más altas de concentraciones bacterianas y tiempo de retención prolongado del agua en la red, el cual aumenta al viajar desde la planta de tratamiento (Ballesteros & Páez, 2015) (Liu, y otros, 2017), siendo el decaimiento en la concentración de cloro de 0.1 a 1.1 mg/l en almacenamiento, a tiempos superiores de 1 hora (Saldarriaga J. , 2002).

Sin embargo, cabe resaltar que la evaluación de los efectos de la edad del agua en los parámetros de calidad de la misma no es una evaluación independiente de la afectación de otros factores. Es claro, que entre mayor sea el tiempo de residencia del agua en una zona específica, más cambio en los parámetros de calidad que habían sido medidos al salir de la planta habrá, a pesar de esto, estos cambios dependerán de igual forma de la variación de otros factores, como la temperatura, materiales y edad de la tubería, para causar una variabilidad inconveniente al hablar de consumo y calidad, por ello es requerido puntos de monitoreo en lugares cuyo caudal de agua sea nulo (Ballesteros & Páez, 2015) (Al-Jasser, 2007, págs. 387–396) (Rodriguez & Sérodes, 2001, págs. 1572–1586).

3.1.4. Actos de vandalismo y terrorismo en todo el sistema de abastecimiento. En general se evidencia poca percepción del riesgo y desconocimiento de la responsabilidad del usuario final en la protección de la calidad del agua, lo que puede generar conductas inadecuadas comprometiendo la integridad del sistema interno de distribución (Bartram, y otros, 2009) (Pérez-Vidal, Amézquita-Marroquín, & Torres-Lozada, 2013, págs. 237–251). Se considera que una red de distribución de agua es una infraestructura crítica de cualquier ciudad. Los ataques físicos a estas incluyen la destrucción de tuberías, estaciones de bombeo, tanques de agua y otras instalaciones; estos ataques pueden resultar en inconvenientes para los consumidores y pérdidas económicas. Por otra parte, la contaminación del suministro de agua puede tener consecuencias más graves. La contaminación puede ser accidental o intencional. La contaminación accidental ocurre debido a la rotura del ducto o al mal funcionamiento de cualquiera de las partes que componen la red de distribución. Una contaminación intencional puede ocurrir debido a actos deliberados de terrorismo. En tales ataques, el agua está contaminada por la introducción de agentes químicos o biológicos a través de puntos accesibles. Las consecuencias potenciales de la contaminación interna incluyen crisis de salud pública como enfermedad, muerte y efectos psicológicos de larga duración. Por lo tanto, es necesario detectar los contaminantes rápidamente para mitigar los efectos de tales ataques deliberados, dado que ello no se puede controlar, siempre se debe tener un plan de contingencia para esto (Reddy & Shankar, 2016, págs. 1–6).

Siempre se debe tener muy presente los puntos más accesibles para la inyección de material contaminante a la red de distribución (los cuales debe poseer la empresa encargada en la distribución de agua), dichos lugares, al ser frágiles, se debe realizar pruebas de monitoreo en la calidad del agua de forma regular (González & Neira, 2014).

3.1.5. Fugas de agua en la red. Dentro de los parámetros a cumplir a la hora de determinar la calidad y eficiencia del servicio de distribución de agua, la cantidad que realmente llega a ser distribuida debe ser la mayor posible, es decir, un sistema con pérdidas de agua es un sistema defectuoso, el cual debe pasar a evaluación con el fin de prevenir pérdidas significativas. Las pérdidas incrementan el índice de agua no contabilizada y el potencial riesgo de contaminación de la red, daños en acometidas de acueducto y alcantarillado, fluctuaciones súbitas y grandes de presión e inadecuado equilibrio hidráulico del sistema de distribución y elevada edad del agua, entre otros, provocando retrasos y prácticas inadecuadas en la reparación y reposición de componentes de la red (Montoya, y otros, 2009) (María R., Alex, Giuliana, & Van der Zaag, 2017, págs. 138–146), un gran inconveniente ocasionado es el detenimiento del suministro para la reparación de dichas redes. Las causas de pérdida de la integridad hidráulica se asocian a cambios bruscos de caudal, presión o cambios hidráulicos por mantenimiento, emergencias e incrustaciones, conexiones inadecuadas, adicionalmente el inadecuado control operacional o de diseño del sistema de distribución de agua, afectando el caudal, generando menor flujo en el sistema y posible depósito de agua o estancamiento, conllevando a la disminución de cloro (Montoya, y otros, 2009). Se debe tener en cuenta que las fugas de agua no sólo es un desperdicio de recursos hídricos, sino que también conlleva grandes costos socioeconómicos (Xu, Liu, Chen, & Li, 2014, págs. 955–961). En Colombia, la cantidad volumétrica de agua aceptada en pérdidas son del 30%, siendo este el límite máximo, según la Resolución 287 de 2004 Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico (CRA) y en países desarrollados, solo se permite hasta 15%. Sin importar lo eficaz que sea la red de distribución, siempre se encontrarán pérdidas (Ministerio Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial., 2008).

3.1.6. Bajos recursos financieros. La falta de recursos financieros compromete la integridad del sistema, desde el estado físico de la estructura, hasta la calidad del agua debido al pobre tratamiento de esta, lo que conlleva a problemas asociados a oxidación de tuberías, fugas de agua (generando más pérdidas), produciendo una disminución de contenido de cloro. Debido a la preocupación por los costos, es importante optimizar los lugares de monitoreo para utilizar el menor número de estaciones requeridas en pro de obtener el menor gasto posible en tomas de muestra del agua, sin que esto afecte el normal funcionamiento del sistema, entendiéndose por ello ubicar las estaciones de monitoreo según la Resolución 811 del 2008 y en puntos críticos, (tuberías viejas, oxidadas, puntos de estancamiento de agua y bajo concentración de cloro) (Cai, Wang, Ping, Jing, & Sun, 2015, págs. 19–27) (Diario oficial de la República de Colombia, 5 de marzo de 2008).

3.1.7. Amenazas naturales. Los regímenes hidrológicos en las regiones tropicales y subtropicales afectan los procesos biogeoquímicos en los cuerpos hídricos, alterando factores como la profundidad del agua, la temperatura, la salinidad y el pH, todos estos importantes a la hora de cuantificar y validar la calidad del agua cruda (Zhang, Thomas, & Mitsch, 2017). Eventos como inundaciones afectan la red de distribución obligándola a cerrar, para evitar captación de agua con grandes contenidos de sedimentos, ello genera racionamiento del líquido en los consumidores. Alta temperatura provoca escasez de agua, afectando la red de distribución al suministrar menor cantidad de agua a la requerida, generando capas de aire en el interior, aumentando la oxidación interna (Montoya, y otros, 2009).

Para ubicar las estaciones de monitoreo, es importante tener localizadas las zonas con posibilidad de desastre natural (sismo, inundación, deslizamiento, entre otros), siendo más común

para sismo, eligiendo los sectores con alta probabilidad de ocurrencia para dicho fenómeno y poniendo estaciones en puntos críticos estadísticamente (con gran porcentaje de probabilidad) (González & Neira, 2014).

Daños estructurales causados por terremotos, deslizamientos de tierra entre otros, pueden ocasionar daños en las instalaciones de tratamiento del agua, produciendo rupturas en tuberías de alcantarillado y de conducción de agua, ocasionando la contaminación del agua de consumo en el sistema de distribución. Es importante tomar muestras de la calidad del agua con mayor frecuencia después de estos sucesos, en pro de detectar los posibles contaminantes (OMS, 2006).

3.1.8. Cruces entre redes de acueductos y alcantarillados. Se han asociado efectos adversos para la salud significativos con la presencia instalaciones de alcantarillado inadecuadas debido a su diseño deficiente, instalación incorrecta, alteraciones o mantenimiento inadecuado. Pueden producirse brotes de enfermedades del aparato digestivo por la contaminación fecal del agua de consumo como consecuencia de defectos de los depósitos de almacenamiento en los tejados y de conexiones cruzadas con tuberías de aguas residuales, por ejemplo. Las instalaciones de alcantarillado mal diseñadas pueden ocasionar el estancamiento de agua y proporcionar un medio adecuado para la proliferación de bacterias y microorganismos. Son puntos de riesgo significativos los lugares en los que tuberías de agua de consumo atraviesan alcantarillas u otros lugares con acumulación de agua estancada, sin importar la gravedad o contaminación del alcantarillado, es primordial analizar la calidad del agua lo más próximo a este cruce en el ducto. La empresa de acueducto y alcantarillado, debe poseer mapas de sus tuberías, resaltando así la ubicación de los cruces y disponiendo la estación de monitoreo en donde la contaminación del alcantarillado es alta o grave. El riesgo de contaminación asociado a estas situaciones puede controlarse reduciendo

tales acumulaciones de agua estancada y evitando que la red de distribución atravesase estos lugares. (OMS, 2006)

3.1.9. Deterioro de válvulas e hidrantes. Las válvulas e hidrantes en mal estado generan retraso en los tiempos de atención a daño y la ampliación de la población afectada, pérdida de integridad hidráulica y física, acumulación de depósitos indeseables por formación de zonas muertas o puntos ciegos; generan dificultades en la operación y mantenimiento del sistema de distribución (Pérez A. , 2013). Las válvulas o hidrantes pueden fallar en operación, generando obstrucción (para el caso de las válvulas), cierre defectuoso, aperturas inesperadas y mal funcionamiento del mismo, de igual forma pueden fallar por rotura, la cual es causada por la vibración de las válvulas, generando corrosión externa y en casos graves, explosión. Es importante analizar el funcionamiento de las válvulas, dado ello, si se encuentra algo no convencional, realizar las acciones correctivas pertinentes y análisis de control después de la válvula (Ruis, 1999).

3.1.10. Inadecuado funcionamiento de dispositivos de control del golpe de ariete. Los cambios rápido de la velocidad del agua en las tuberías. Ocurren, por ejemplo, cuando una válvula se cierra demasiado rápido o cuando se ve afectada la estación de bombeo por interrupciones en la alimentación de energía u operación y mantenimiento inadecuado. Lo que ocasiona súbitas y grandes variaciones de presión, pérdida de integridad física e hidráulica de las estaciones de bombeo y en el Sistema de distribución (daños en tuberías y equipos) e interrupción del suministro de agua. Con el paso del tiempo en las paredes internas de las tuberías se forma una película muy delgada de microorganismos. Cuando los cambios de presión son elevados, esta fina película se

desprende de la pared de la tubería y permanece en suspensión afectando la calidad del agua (Pérez A. , 2013).

3.1.11. Operación y mantenimiento de las estaciones de bombeo. Los errores de operación y/o daños en los equipos que limitan la operación de las estaciones de bombeo y el suministro continuo a la población, se aumenta con la antigüedad de los mismos.

Estas fallas en la operación pueden ocasionar excesiva edad del agua, deterioro de su calidad y la discontinuidad en el servicio por daños en equipos, tuberías y accesorios, generando riesgos para la integridad del sistema y la salud de la población. Se deben ubicar puntos de monitoreo después de las bombas, tuberías viejas y en general, en los equipos que puedan fallar (Pérez A. , 2013) (Kapelan, Savić, & Mahmoud, 2017, págs. 218–227).

3.1.12. Edad de la tubería. La vida útil del diseño de las tuberías de distribución, independientemente del material utilizado, es de 65 a 90 años. La mayoría de las tuberías de distribución en los países desarrollados (por ejemplo, los EE.UU.) llegará al final de su vida útil en los próximos 20 años. Se puede afirmar que la edad de las tuberías conlleva a problemas como que, las tuberías viejas son más vulnerables a los contaminantes, ya que, en casos de presiones bajas o negativas en las tuberías, el agua contaminada, las aguas residuales y otros contaminantes que rodean las tuberías pueden ser atraídos hacia estas a través de grietas. Además de esto se encontró que el material acumulado en un sistema de distribución se desarrolla con el tiempo. Por lo tanto, cuanto más viejas sean las tuberías, mayor será la acumulación de material en forma de escamas de tubos, matriz de biofilm y depósitos sueltos, así como el consumo de cloro, su presencia y reacción. Es pertinente conocer la edad de las tuberías de la red (realizando un mapa

con las tuberías y sus respectivas edades) y en donde se tenga números superiores de 20 años, realizar muestras de control lo más próximo a esos ductos (Liu, y otros, 2017) (Al-Jasser, 2007) (Baum, Amjad, Luh, & Bartram, 2007). La vida útil de la tubería es para el PVC hasta 70 años, las de cemento de asbesto son unos 40 años, hierro dúctil alrededor de 60 años. (La Patria, 2012)

3.1.13. Acumulación de material en la red de distribución. La distribución de agua tratada de buena calidad puede generar, en muchos casos, la formación de depósitos sueltos no deseados en los reservorios y tuberías de los sistemas de distribución.

Los depósitos parecen contener una reserva de materia orgánica capaz de soportar el desarrollo de bacterias, así como depredadores bacterianos, lo cual es probable que proporcione condiciones favorables para la contaminación del agua transportada por el sistema de distribución. Por lo tanto, la prevención de estas acumulaciones es un factor a tener en cuenta a la hora de verificar la calidad del agua, considerando así mismo variables como edad y tipo de tuberías, edad del agua, cambios en la presión entre otras, que favorecen este tipo de acumulaciones indeseadas. La manera de detectar material acumulado es la caída de presión en una sección en la red de distribución sin que se encuentre fuga alguna, conllevando a problemas asociados al mismo. Esto genera posible estancamiento, mal funcionamiento de equipos de bombeo y bajo flujo, posibilitando la disminución del contenido de cloro. La ubicación de puestos de control de agua se realiza en aquellas zonas críticas con acumulación de material identificados en la red de distribución, entendiéndose crítico aquellos que puedan generar un bajo o nulo flujo de agua (inferior a 1 m/s). (Reddy & Shankar, Exploiting Sensor Response Times to Design Sensor Networks for Monitoring Water Distribution Networks, 2016, págs. 1–6)

3.1.14. Variaciones de presión en la red de distribución. La distribución del agua a una presión elevada es un inconveniente que debe supervisarse debido a que estas pueden causar riesgos de roturas, fugas en la tubería y turbiedad del agua, incrementando la posibilidad de contaminación del agua de suministro (Pérez A. , 2013) (Samir, Kansoh, Elbarki, & A., 2017). Debido a las variables afectadas (acumulación de material en la red, corrosión en la tubería, cruce entre redes de acueducto y alcantarillado, deterioros de equipos y tiempo de residencia del agua) por variaciones de presión en la red, es indispensable el control de calidad del agua para evitar contaminantes que afecten directamente la calidad del agua para los usuarios finales. La presión se modela hidráulicamente y se determinan zonas con bajas y altas presiones para ubicar las estaciones de monitoreo (OS. 050., Desconocido) (EPM, 2009).

3.1.15. Velocidad del flujo en la red. La determinación de la velocidad de circulación del agua resulta esencial en el diseño de una red de abastecimiento toda vez que, para un caudal establecido, depende de la misma la elección del diámetro de la tubería. Por razones funcionales, la velocidad de circulación del agua debe quedar limitada entre un valor máximo y un valor mínimo. Si la velocidad resulta excesivamente alta se producen elevadas pérdidas de carga y las sobrepresiones derivadas de los posibles golpes de ariete pueden resultar importantes y provocar roturas en las conducciones. Por otra parte, evitar la erosión de los materiales de la tubería o del revestimiento constituye otra de las razones que justifican la limitación de la velocidad máxima de circulación del agua. Por el contrario, cuando la velocidad resulta excesivamente baja, además de la infrutilización de la tubería que ello supone y a la sensible disminución del cloro residual en el agua, se facilita la formación de depósitos de materias en suspensión que pueden provocar obstrucciones e incrustaciones de carbonatos en las paredes, con lo que se reduce la sección útil

de paso [47]. Se aceptan 3 m/s como velocidad máxima en tuberías (OS. 050., Desconocido) y velocidad mínima de 1m/s (EPM, 2009).

Mediante simulación se realiza la distribución de velocidad en el sistema, esto permite identificar las zonas por debajo de velocidad mínima, caracterizando las zonas críticas (inferior a 1 m/s), lo cual conlleva a tomar los puntos de control de agua donde el flujo sea crítico (González & Neira, 2014).

3.1.16. Concentración del cloro residual. El cloro ha sido determinado como un componente importante para desinfección del agua. A pesar de que el agua que sale de la planta de tratamiento y entra a la red de distribución va con niveles de calidad adecuados, los cuales son medidos en gran parte por medio de la concentración de cloro residual presente en la corriente, estos niveles van decreciendo a medida que la corriente se aleja de la planta (Saldarriaga, y otros, Localización de puntos de monitoreo de calidad de agua en sistemas de distribución. , 2014).

El umbral en el cual el cloro presente en el agua debe estar para asegurar su calidad es de 0.3 mg/L hasta 2 mg/L y es notorio que en las zonas más distantes y aisladas la concentración no cumple con esta condición, permitiendo la contaminación, incremento de actividad bacteriana y presencia de microorganismos (Ballesteros & Páez, 2015). Esto es resultado de cambios en la temperatura a lo largo de la red, reacciones químicas entre los diferentes componentes presentes en el sistema, cambios en la presión y velocidad de la corriente y edad del agua (Ballesteros & Páez, 2015) (Liu, y otros, 2017).

Con simulación, es posible hallar las zonas donde la concentración de cloro es de 0.3 mg/L, y en estas zonas es obligatorio disponer las estaciones de monitoreo (González & Neira, 2014).

3.2 Variables de las entrevistas a empresas prestadoras de servicio de acueductos

En la entrevista realizada a un Ingeniero Civil de la Universidad Industrial de Santander, Magíster de la Universidad Politécnica de Madrid, Jefe de mantenimiento hidráulico en el Acueducto Metropolitano de Bucaramanga S.A E.S.P. (Ver anexo 1), se encontró que el acueducto cuenta 41 tanques, 36 distritos sectorizados en 80 sectores, pero son hidráulicos, estos son manejados por un tanque o una estación reguladora. Se presentan diversos tipos de tubería debido a que no hay una específica entonces no hay una que predomina. Los puntos de monitoreo son acordados tentativamente con la secretaria de salud siguiendo los lineamientos de la Resolución 811 de 2008, por ejemplo, puntos muertos en la red que también son monitoreamos pero no están dentro de los estipulados, entonces donde se pierde el cloro es donde el agua no recircula como en las colas, en los apéndices de la red, en todos los sectores de las extremidades de red debido a que la tubería va a quedar como un tapón.

El entrevistado expresa que:

Hay unos materiales que afectan más la formación de biopelículas que otros, por ejemplo los materiales de hierro fundido, hierro galvanizado, los que son metales, los que son más rugosos ayudan más a la formación de biopelículas, en los materiales lisos como el PVC son menos probables la formación de biopelículas, de eso depende la calidad del agua y de otros factores también que son menos probables que se llegue a contaminar el agua. Como la contaminación de un tanque, que esto suceda no es habitual. Adicionalmente que lo importante es que el agua contenga cloro residual y lo que pueda afectar que se pierda el cloro residual es la presencia de biopelículas en las tuberías y esa biopelícula al final es la que va a terminar consumiendo el cloro residual y esto depende también del tiempo de permanencia del agua en la red, pues a mayor tiempo de permanencia de agua en la red pues hay más pérdida de cloro y digamos si no hay cloro el agua empieza a contaminarse por patógeno.

Se logró identificar, que las variables más importantes utilizadas por los funcionarios para el monitoreo de la calidad del agua junto con la opinión del experto son las siguientes:

- ✓ Concentración de cloro residual.
- ✓ Acumulación de material contaminante en la red de distribución.
- ✓ Tiempo de residencia del agua (edad del agua).
- ✓ Material de la tubería.
- ✓ Edad de la tubería.
- ✓ Corrosión en la tubería.
- ✓ Velocidad de flujo en la red.

En la entrevista realizada a un Ingeniero ambiental, Coordinador de Redes en Operadores de Servicios de la Sierra S.A E.S.P (Ver anexo 2), funcionario del acueducto del municipio de Ciénaga Magdalena el cual está en el orden 17500 usuarios, maneja dos zonas de operación, Sur y Norte del Municipio, sumando el corregimiento de Cordobita. Contando en la actualidad con 16 puntos de muestreo concertados con la Secretaria Seccional de Salud del Magdalena. Los cuales fueron establecidos siguiendo la Resolución 811 del 05 de marzo de 2008, por medio de la cual se definen los lineamientos a partir de los cuales la autoridad sanitaria y las personas prestadoras, concertadamente definirán en su área de influencia los lugares y puntos de muestreo para el control y la vigilancia de la calidad del agua para consumo humano en la red de distribución.

En la entrevista se identificó que las variables más representativas que afectan la calidad del agua en la red de distribución junto con la opinión del experto son las siguientes:

- ✓ Conexiones fraudulentas
- ✓ Disminución en la concentración del cloro residual

Al realizar el cruce de la información obtenida en la revisión en la literatura y las entrevistas a empresas prestadoras de servicio de acueductos

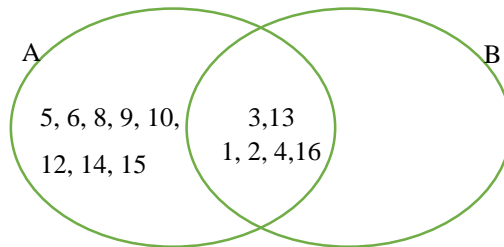


Figura 1. Cruce de información

Se enumeran las variables de acuerdo a la tabla 1.

Siendo:

A: Revisión de la literatura.

B. Entrevista a empresas prestadoras de servicio de acueductos.

Se establece que las siguientes variables son claves para la ubicación de puntos de monitoreo en la red de distribución:

- Tiempo de residencia del agua (edad del agua)
- Acumulación de material contaminante en la red de distribución.
- Material de la tubería.
- Edad de la tubería.

- Corrosión en la tubería.
- Concentración de cloro residual.
- Actos de vandalismo y terrorismo en todo el sistema de abastecimiento.

3.3 Matriz de impacto cruzado. Multiplicación aplicada a una clasificación.

Al aplicar la matriz, cada variable puede tener un valor de 0 a 3 con respecto a otra, tanto en dependencia como en influencia, siendo 0 nada de importancia (ya sea dependencia o influencia) y 3 para total dependencia o influencia. La manera de implantar los valores, requiere gran conocimiento por parte de las variables y su relación entre ellas, entendiendo esto como dependiente o influyente, según sea el caso. El conocimiento del tema se obtuvo leyendo 52 referente bibliográficos e información por parte de expertos del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga S.A E.S.P. y Operadores de Servicios de La Sierra S.A E.S.P. Se realiza una (Mic-Mac) en Excel, se disponen a colocar los valores de cada variable y se realiza la suma como lo muestra el Anexo 3, se organizan los resultados de cada variable como lo ilustra la Tabla 2 y luego se grafica en dispersión, y sin línea continua (Garza & Cortéz, 2011, págs. 335-356).

X – Dependencia.

Y – Influencia

No. – Número de variable

Tabla 2.

Resultado Mic-Mac

No.	X	Y
1	8	17
2	8	15
3	27	9
4	1	19
5	22	14
6	10	19
7	2	21
8	5	8
9	23	11
10	14	9
11	8	23
12	10	12
13	18	15
14	25	22
15	26	22
16	35	6

En la Tabla 2 se enumeran las variables de acuerdo a la Tabla 1, el eje X, Y, el cual representa el valor de dependencia e influencia respectivamente de Mic-Mac, la cual se encuentra en el anexo 3, entre más inferior e izquierda se encuentre (cuadrante III) más dependiente es y cuanto más a la izquierda y arriba se encuentre (cuadrante I), influye en gran medida en el sistema. Se ilustra, a manera de ejemplo, la variable 7 (Amenazas naturales), ubicada en el cuadrante 1, el cual no es

influenciado por nada (lo cual es válida con respecto a las otras variables), pero sí bastante influyente.

Siguiendo el método Mic-Mac, se grafica en un plano cartesiano cada par de resultados de la Tabla 2, se escoge el valor más grande, el cual es 33, se divide en 2, dando 17.5 y en el punto (17.5, 17.5) se coloca el nuevo eje, obteniendo el Grafico 1.

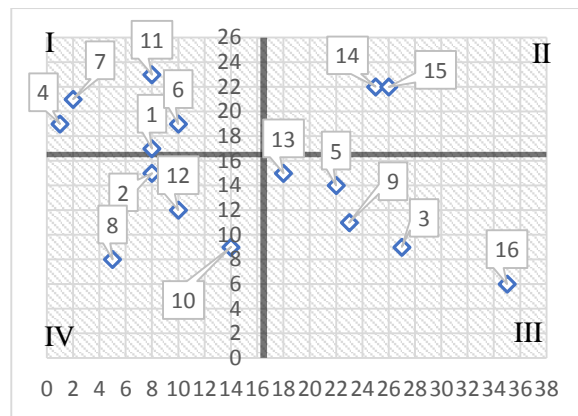


Figura 2. Grafica Mic-Mac.

Los valores más cercanos al centro, se consideran irrelevantes, los del cuadrante II, en el cual se encuentra variación de la presión en la red y velocidad de flujo, ambas, generan gran dependencia, aunque también influyen en el sistema (siendo poco relevantes), el cuadrante IV, de las cuales se encuentra 6 variables, no influyen ni generan dependencia (convirtiéndolas en poco importantes para este estudio, entendiéndose esto como aquello que no lo afecta), en este sistema, descartando el 6, 8, 12, 10, 9, 3, 5, 13, y el cuadrante I y III son los más influyentes y dependientes respectivamente, obteniendo, al valor de la concentración de cloro, como el más dependiente de todos, y los más influyentes, en orden son amenazas naturales, Inadecuada operación y

mantenimiento de estaciones de bombeo, Actos de vandalismo y terrorismo en el sistema de abastecimiento, edad y corrosión de la tubería y material de la tubería.

Dado que amenazas naturales, no es un valor controlable, no se debe descartar, pero tampoco priorizar.

3.4 Localización de puntos de muestreo de calidad del agua

Para poblaciones entre los 20.001 a 100.000 habitantes, se deben localizar, cuanto menos, 8 puntos de muestreo siguiendo estos criterios:

- ✓ El punto donde terminan las tuberías de conducción y comienza con la red de distribución.
- ✓ En los puntos más alejados de la red de distribución y que al tiempo represente la calidad del agua.
- ✓ En lugares físicos donde haya estancamiento del agua, como tanques y sistemas de bombeos.
- ✓ En la entrada de cada sector.
- ✓ En puntos de mezcla de distintas aguas (Diario oficial de la República de Colombia, 5 de marzo de 2008).

En el estudio realizado con la matriz Mic-Mac, las variables más influyentes son:

- ✓ Inadecuada operación y mantenimiento de estaciones de bombeo (en caso de que las haya, de lo contrario, obviarla).
- ✓ Actos de vandalismo y terrorismo en el sistema de abastecimiento
- ✓ Edad de la tubería

- ✓ Corrosión de la tubería

- ✓ Material de la tubería.

Las variables más dependientes son:

- ✓ Tiempo de residencia del agua (edad del agua)

- ✓ Concentración de cloro residual

Estas 7 variables son las más importantes en el sistema, ahora, la localización de los puntos de control debe seguir, en primera instancia lo pronunciado en la Resolución 811 del 2008, luego, se mira las variables halladas, con lo cual, dado la importancia de ellas, se localiza los puntos muertos o de estancamiento de agua en la red de distribución y se toman los más críticos, el mismo proceso se realiza para la concentración de cloro, el cual, al ser altamente dependiente, solo se puede realizar a través de las demás variables.

Se debe realizar un análisis de la edad de las tuberías, las cuales, si son mayores a 20 años, es indispensable realizar un seguimiento de esta con tomas de muestra de la calidad de agua en zonas muy próximas y realizar un análisis del cumplimiento en el tiempo de vida de la tubería, pues culminado su ciclo, se debe cambiar.

En cuanto a la oxidación, todo equipo adquirido tiene su vida útil y los metales no es la excepción, según el análisis de estos equipos metálicos, cuando se detecta oxido, es menester localizar los puntos de muestreo lo más próximo aguas abajo.

Toda red de distribución debe tener un mapa localizando los puntos o zonas donde es más probable ocurra sismo, derrumbe, y en general, desastres naturales, siendo necesario ubicar los puntos de muestreo en la zona con la más alta certidumbre de ocurrencia del mismo.

En actos vandálicos, la toma de muestra de la calidad del agua se realiza de manera constante en todos los puntos disponibles o pertinentes, hasta tomar acciones correctivas eficaces que normalicen la calidad del líquido en la red.

Ahora, la población contribuye en gran medida a mantener el orden correcto, pues la inconformidad por la baja calidad del agua por parte del consumidor, obliga a la empresa a buscar la causa de ello, siendo indispensable tomar muestras de calidad del agua en zonas próximas, analizar la causa que lo está generando y solucionarlo.

Dado el presente análisis, es indispensable, que al momento de instalar los puntos de monitoreo de control del agua, se tengan muy presente las variables que aquí se mencionan: amenazas naturales, Inadecuada operación y mantenimiento de estaciones de bombeo, actos de vandalismo y terrorismo en el sistema de abastecimiento, edad de la tubería, corrosión de la tubería, material de la tubería y edad del agua (Saldarriaga, y otros, 2014) (Ballesteros & Páez, 2015) (González & Neira, 2014).

4. Conclusiones

El análisis de las 16 variables, generó como las más dependientes y controlables al mismo tiempo el contenido de cloro y tiempo de residencia del agua (edad del agua), la más influyente en esta medida es bajo recurso financiero, siendo estas tres las más importantes en todo el sistema.

Los actos de vandalismo y desastres naturales son, entre las variables más relevantes, pero, las que no se pueden controlar, no obstante, se puede prevenir, razón por la cual su papel importante en este proceso.

La información por parte de los expertos fundamentó bastante para tener en cuenta la concentración de cloro y tiempo de residencia en el agua.

Referencias bibliográficas

- Al-Jasser, A. O. (2007). Chlorine decay in drinking-water transmission and distribution systems: Pipe service age effect. *Water Research*, 41(2), 387–396.
<https://doi.org/10.1016/j.watres.2006.08.032>
- Arcade, J., Godet, M., Meunier, F. y Roubelat, F. (2004). Análisis estructural con el método MICMAC, Y estrategia de los actores con el método MACTOR. *Future Research Methodology*, 4(1). 165-233.
- Ballesteros, O., Páez, L. (2015). Propuesta metodológica para la ubicación de puntos de monitoreo de la calidad del agua en una red de distribución bajo los parámetros de los planes de seguridad del agua (tesis pregrado). Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.
- Bartram, J., Corrales, L., Davison, A., Deere, D., Drury, D., Gordon, B., Howard, G., Rinehold, A., Stevens, M. (2009). Manual para el desarrollo de planes de seguridad del agua: metodología pormenorizada de gestión de riesgos para proveedores de agua de consumo. Organización Mundial de la Salud. Ginebra.
http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/75142/1/9789243562636_spa.pdf
- Baum, R., Amjad, U., Luh, J., & Bartram, J. (2007). An examination of the potential added value of water safety plans to the United States national drinking water legislation. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 218(8).
<https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2014.12.004>

- Blokker, M., Smeets, P., & Medema, G. (2014). QMRA in the Drinking Water Distribution System. In 16th Conference on Water Distribution System Analysis, WDSA 2014 (Vol. 89, pp. 151–159). Procedia Engineering.
- Cai, L., Wang, R., Ping, J., Jing, Y., & Sun, J. (2015). Water supply network monitoring based on demand reverse deduction (DRD) technology. In Procedia Engineering (Vol. 119, pp. 19–27). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.848>
- Cerrato, J. M., Reyes, L. P., Alvarado, C. N., & Dietrich, A. M. (2006). Effect of PVC and iron materials on Mn(II) deposition in drinking water distribution systems. *Water Research*, 40(14), 2720–2726.
- Chang, K., Gao, L. Wu, W.Y. Y Yuan, Y.X. (2009) Water quality comprehensive evaluation method for large water distribution network based on clustering analysis. *Proceedings of Computer and Control in the Water Industry*.
- Chen, Q., Wu, W., Blanckaert, K., Ma, J., & Huang, G. (2012). Optimization of water quality monitoring network in a large river by combining measurements, a numerical model and matter-element analyses. *Journal of Environmental Management*, 110, 116–124. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.05.024>
- Chowdhury, S., Mazumder, M. A. J., Al-Attas, O., & Husain, T. (2016). Heavy metals in drinking water: Occurrences, implications, and future needs in developing countries. *The Science of the Total Environment*, 569–570, 476–488.
- Díaz, B. (2002). Decaimiento de la calidad del agua por variaciones del cloro residual entre la red de distribución distrital y la red de distribución interna de los usuarios. Phd proposal. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

El País. (2015). El drama que esconden las tuberías viejas en Cali. <http://www.elpais.com.co/california/el-drama-que-esconden-las-tuberias-viejas-en.html>.

Elementla. (Desconocido). Tubería de concreto reforzado. Recuperado de http://www.comecop.com.mx/pdf/fc_tub_reforzado.pdf

En Domingo. (2012) Échele ojo al funcionamiento de las tuberías. <http://www.lapatria.com/en-domingo/echele-ojo-al-funcionamiento-de-las-tuberias-17232>.

EPM. (2009). Normas de Diseño de Sistemas de Acueducto de EPM. Recuperado de https://www.epm.com.co/site/Portals/0/centro_de_documentos/NormasDisenoSistemasAcueducto.pdf.

Garza, J. y Cortéz, D. (2011). El uso del método MICMAC y MACTOR análisis prospectivo en un área operativa para la búsqueda de la excelencia operativa a través del Lean Manufacturing. *InnOvaciOnes de NegOciOs*, 8(16). 335-356.

González, D.A, Neira, O.I. (2014). Simulación y modelamiento del cloro residual en el agua de la red de distribución del sector distrito estadio del área metropolitana de Bucaramanga (Tesis). Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga Santander, Colombia.

Hallam, N.B., Hua, F., West. J.R., Foster, C.F. y Simms, J. (2003). Bulk decay of chlorine in water distribution systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*. (Vol. 129, No. 1, pp. 78-81). ASCE.

<https://doi.org/10.1016/j.aej.2017.07.008>

[https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(13\)60569-0](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(13)60569-0)

Jiménez Terán, M. (2013). Manual para el diseño de sistemas de agua potable y alcantarillado sanitario (tesis). Universidad Veracruzana, Veracruz, México.

- Kapelan, Z., Savić, D., & Mahmoud, H. (2017). A Response Methodology for Reducing Impacts of Failure Events in Water Distribution Networks. In *Procedia Engineering* (Vol. 186, pp. 218–227). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.03.231>
- Knobelsdorf, J. y Mujeriego, R. (1997). Crecimiento bacteriano en las redes de distribución de agua potable: una revisión bibliográfica. (Vol. 4, pp. 17-28). Universidad Politécnica de Cataluña.
- Liu, G., Zhang, Y., Knibbe, W. J., Feng, C., Liu, W., Medema, G., & van der Meer, W. (2017, June 1). Potential impacts of changing supply-water quality on drinking water distribution: A review. *Water Research*. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.03.031>
- Manzur, C. (2002). Gestión del Riesgo en los Sistemas de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Lima, Perú. <http://www.bvsde.paho.org/bvsade/e/fulltext/uni/conf20.pdf>.
- María R., Akosua S. B-A., Alex L., Giuliana F., Pieter van der Zaag. (2017). An interdisciplinary political ecology of drinking water quality. Exploring socio-ecological inequalities in Lilongwe's water supply network, *Geoforum* 84 (2017) 138–146. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoforum.2017.06.013>
- Marines, N. (2017). Informe sectorial: Agua potable y Saneamiento básico. Recuperado de <https://www.findeter.gov.co/descargar.php?idFile=253376>.
- Min. Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2008). Comisión de regulación agua potable y saneamiento básico – CRA. <https://www.metering.com/wp-content/uploads/Cristian.pdf>
- Molía, R. (17 de noviembre de 1987). Redes de distribución. Recuperado de <https://www.eoi.es/es/file/18411/download?token=gX0xQ45Q>

- Montoya, C., Loaiza, D., Cruz, C., Torrez, P., Escobar, C. y Delgado, L. (2009). Propuesta metodológica para localización de estaciones de monitoreo de calidad de agua en redes de distribución utilizando sistemas de información geográfica. *Redalib*, 5(49). 129-140.
- OMS. (2003). Asbestos in drinking-water. Recuperado de http://www.bvsde.paho.org/cd-gdwq/docs_quimicos/Amianto.pdf
- OS. 050. (Desconocido). Redes de distribución de agua para consumo humano. Recuperado de www.sencico.gob.pe/descargar.php?idFile=189.
- Pérez, A. (2013). Estrategias de implementación de los planes de seguridad del agua para la gestión del riesgo en sistemas de abastecimiento de agua potable (Tesis Doctoral). Universidad del Valle, Santiago De Cali, Colombia.
- Pérez, A., Torres, P., Cruz, C. (2009). Planes de seguridad del agua. Fundamentos y perspectivas de implementación en Colombia. *Revista ingeniería e investigación*, 29(3), 79-85. Recuperado de: <http://www.scielo.org.co/pdf/iei/v29n3/v29n3a13.pdf>.
- Pérez-Vidal, A., Amézquita-Marroquín, C., & Torres-Lozada, P. (2013). Water Safety Plans: Risk assessment for consumers in Drinking Water Supply Systems. 15(2), 237–251. <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=a9h&AN=93686757&lang=es&site=ehost-live>
- Reddy, V., & Shankar, P. (2016). Exploiting Sensor Response Times to Design Sensor Networks for Monitoring Water Distribution Networks, 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.03.102>
- Reddy, V., & Shankar, P. (2016). Exploiting Sensor Response Times to Design Sensor Networks for Monitoring Water Distribution Networks, 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.03.102>
- Resolución N° 811. Diario oficial de la república de Colombia, Bogotá D.C. Colombia, 5 de marzo de 2008.

- Ríos, J., Ramírez, E., Caldero J. y Echeverría, F. (2007). Sistema piloto para estudiar la corrosión de metales empleados en la distribución de agua potable. *Ciencia y tecnología* (Vol. 36, pp. 925-929). Scientia.
- Rodriguez, M. J., & Sérodes, J. B. (2001). Spatial and temporal evolution of trihalomethanes in three water distribution systems. *Water Research*, 35(6), 1572–1586. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(00\)00403-6](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(00)00403-6)
- Ruis, S. (1999). Fallo de componentes: Válvulas. http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/NTP/Ficheros/401a500/ntp_446.pdf
- Ruiz, Boulevard. (2016). Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. México. D.F., México. Insurgentes sur.
- Saldarriaga, J. (2002). Decaimiento de la calidad del agua por variación del cloro residual entre la red de distribución distrital y la red de distribución interna de los usuarios. Universidad de los Andes, aplicado a Bogotá. D.C., Colombia
- Saldarriaga, J., Hernández, M., Prieto, C., Jurado, M., Gacharna, S. y Páez, D. (2014). *Scielo*, (5)2. 39-53.
- Saldarriaga, J., Hernández, M., Prieto, C., Jurado, M., Gacharná, S. y Paez, D. (2014). Localización de puntos de monitoreo de calidad de agua en sistemas de distribución. *Tecnología y ciencia del agua* (Vol. 2, pp. 39-53). Redalyc.
- Saldarriaga, J., Páez, D., Bohórquez, J., Prieto, C., Jurado, C. (2005). Localización de puntos de monitoreo de la calidad del agua en sistemas de distribución de agua potable. Universidad de los Andes Aplicación en Bogotá, Colombia.
- Salud, O. M. de la. (2006). Guías para la calidad del agua potable - Volumen 1. Retrieved from http://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/gdwq3_es_fulll_lowsres.pdf

- Samir N, Kansoh R, Elbarki W, Fleifle A. (2017). Pressure control for minimizing leakage in water distribution systems. *Alexandria Engineering Journal*. Published by Elsevier B.V.
- Starczewska, D., Collins, R., & Boxall, J. (2015). Occurrence of transients in water distribution networks. In *Procedia Engineering* (Vol. 119, pp. 1473–1482). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.01.001>
- UNESCO. (2013). Informe de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídrico en el mundo. Recuperado de <http://unesdoc.unesco.org/images/0012/001295/129556s.pdf>.
- Xu, Q., Liu, R., Chen, Q., & Li, R. (2014). Review on water leakage control in distribution networks and the associated environmental benefits. *Journal of Environmental Sciences (China)*, 26(5), 955–961.
- Zhang, L., Thomas, S., & Mitsch, W. J. (2017). Design of real-time and long-term hydrologic and water quality wetland monitoring stations in South Florida, USA. *Ecological Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.06.021>
- Zlatanović, L., van der Hoek, J. P., & Vreeburg, J. H. G. (2017). An experimental study on the influence of water stagnation and temperature change on water quality in a full-scale domestic drinking water system. *Water Research*, 123, 761–772. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.07.019>

Apéndices

Apéndice A. Entrevista

Fecha: 29 de noviembre de 2017

Entrevistado: Ingeniero Civil de la Universidad Industrial de Santander, Magíster de la Universidad Politécnica de Madrid, Jefe de mantenimiento hidráulico en el Acueducto Metropolitano de Bucaramanga S.A E.S.P.

Empresa: Acueducto Metropolitano de Bucaramanga S.A E.S.P.

Objetivo:

Encontrar los criterios empleados por la empresa para monitorear la calidad del agua en la red de distribución, además de la opinión profesional del experto en este tema.

Preguntas:

Parte A. Conocimiento actual del sistema de Bucaramanga

1. ¿El área metropolitana en la que ustedes tienen la cobertura de acueducto en cuantas zonas puede dividirse? ¿Cada zona, cuantos suscriptores agrupa aproximadamente? ¿Qué tipo de materiales de tubería presentan? ¿Qué material predomina?.

Rta: Nosotros tenemos 41 tanques, 36 distritos sectorizados en 80 sectores pero son hidráulicos, estos son manejados por un tanque o una estación reguladora.

Bueno en la empresa hablamos de qué tipo de tubería se presentan en cada zona y pues es diversa debido a que no hay una específica entonces no hay una que predomina, pero igual digamos que esto tiene que ser un cruce espacial ósea donde tenemos redes o tuberías o material y diámetro en el sector hidráulico en el punto asociado.

2. ¿En cada una de esas zonas cuántos puntos de monitoreo de la calidad del agua en la red de distribución están operando?

Rta: Nosotros tenemos aproximadamente 36 puntos de monitoreo de la calidad del agua en la red de distribución.

3. Qué criterios emplean para la ubicación de cada uno de los puntos de monitoreo de la calidad del agua en la red de distribución?

Rta: Los puntos de monitoreo son acordados tentativamente, por ejemplo nosotros tenemos puntos muertos en la red que también los monitoreamos pero no están dentro de los estipulados, entonces donde se pierde el cloro es donde el agua no recircula como por ejemplo en las colas, en los apéndices de la red, en todos los sectores de las extremidades de red debido a que la tubería va a quedar como un tapón.

Debido a esto el agua no recircula entonces en esas zonas se van a presentar velocidades muy bajas donde el cloro se pierde entonces lo que nosotros hacemos es abrir hidrantes para ir renovando el agua que se va acumulando ahí , pero tenemos unos puntos acordados con la secretaria de salud que son los que monitoreamos todos los días, para realizar el monitoreo tenemos unas rutas definidas y se realiza el siguiente proceso: vamos en una camioneta y tomamos las muestras en los puntos acordados, las llevamos al laboratorio y de ahí se saca unos indicadores que establecen como está el agua si es apta o no es apta para el consumo humano.

Estos indicadores nos dan una calificación que es el IRCA el cual es el encargado de calificarnos a nosotros como prestadores de servicios públicos, es decir ellos dicen el agua del acueducto tiene un IRCA alto por lo tanto es buena para el consumo de la población.

4. En cada punto de monitoreo, qué variables se determinan o monitorean? (que las enumere todas las consideradas, indagar en la importancia que tiene el análisis del material de las tuberías para la calidad del agua).

- Material de la tubería.
- Edad de la tubería.
- Corrosión en la tubería.
- Tiempo de residencia del agua (edad del agua)
- Acumulación de material contaminante en la red de distribución.
- Concentración de cloro residual.

Hay unos materiales que afectan más la formación de biopelículas que otros, pues digamos los materiales de hierro fundido, hierro galvanizado, los que son metales, los que son más rugosos ayudan más a la formación de biopelículas, en los materiales lisos como el PVC son menos probables la formación de biopelículas, bueno pues de eso depende la calidad del agua y de otros factores también que son menos probables que se llegue a contaminar el agua. Como por ejemplo por la contaminación de un tanque, pues que esto suceda no es habitual.

5. Por qué es importante el monitoreo de cada una de esas variables? (ojalá una explicación de cada variable)

Rta: Lo importante es que el agua contenga cloro residual y lo que pueda afectar que se pierda el cloro residual es la presencia de biopelículas en las tuberías y esa biopelícula al final es la que va a terminar consumiendo el cloro residual y pues esto depende también del tiempo de permanencia del agua en la red, pues a mayor tiempo de permanencia de agua en la red pues hay más pérdida de cloro y digamos si no hay cloro el agua empieza a contaminarse por patógeno.

6. En su concepto, ¿cuál es la variable más importante de las mencionadas?

Rta: En mi concepto la variable más importante de las mencionadas anteriormente es la concentración del cloro residual.

7. ¿Usted excluiría alguna de las variables que actualmente consideran para la ubicación?

Rta: En la resolución 811 de 2018 se piden una serie de parámetros que hay que monitorear y se le ha dado un peso en función de que esos pueden ser también contaminantes para la salud, entonces excluir una variable como tal es difícil porque hay que medir esa variable si se llega a presentar, por lo tanto no se puede excluir una variable, porque la ley ya estipula unos parámetros que hay que medir, entonces decir que esta variable no es tan importante como otra es difícil, de pronto uno pudiera decir con esta variable también mido otros problemas que se presenten pero eliminarla como tal no.

Parte B. Metodologías para escoger los Puntos de Monitoreo de Calidad de agua

1. La ubicación de los puntos de Monitoreo de calidad del agua es un proceso dinámico pues ésta cambia en el tiempo según el patrón de demandas y el modo de operación de la red en el instante de monitoreo. ¿Cada cuánto ustedes analizan las variaciones de los criterios expuestos anteriormente?

Rta: Generalmente los puntos son acordados con la secretaria de salud, ellos nos dicen o nos establecen por medio de la resolución 811 de 2008, esta dice que en función del área si se debe o no colocar puntos de monitoreo, pero digamos si es con consentimiento de ellos para la instalación de esos puntos igualmente nosotros tenemos como por buenas practicas hacer un purgado en los hidrantes y sobre todo en las áreas muertas por que a veces por los mismos reportes de la comunidad, digamos las personas pueden decir es que el agua está saliendo de otro color entonces de una vez va el móvil y toma muestra de la calidad del agua y puede decir aquí el problema es por estas causas y decir que paso en ese sector y enseguida damos una solución al problema.

Entonces también ya detectamos puntos como muertos así los llamamos en la empresa y colocamos un punto en la red aunque no sea acordado por la secretaria de salud y lo monitoreamos, entonces digamos que esta es la manera correctiva para que las personas que llamen y den reporte del mal estado del agua, y en las colas que son las zonas en los extremos de la red, tenemos también como preventivos ir abriendo hidrantes con cierta periodicidad para ir recirculando el agua sobre todo en las colas

2. La concentración de cloro en una red de distribución de agua potable decae una vez que el agua sale de la planta de potabilización; por lo tanto, en los sitios más alejados de la red la concentración del cloro residual puede estar por debajo de cierto umbral exponiendo al agua al aumento de niveles bacterianos. Estos cambios en la concentración del cloro son resultado de la

convección y la reacción química o bioquímica entre el cloro, el agua, las paredes de la tubería y los microorganismos. ¿Ustedes como controlan estos cambios en la concentración de cloro residual?

Rta: Digamos en una operación normal lo que incide en que el agua sea potable es el cloro, bueno que el cloro salga con una buena calidad desde la planta obviamente porque desde la planta debe salir un cloro residual que le permita soportar el tiempo de residencia del agua durante la red pero también ella debe cumplir con todos los parámetros de calidad que establece la resolución para que el agua sea apta para el consumo humano.

3. ¿Conoce el software TEVA-SPOT (Evaluación de la vulnerabilidad ante un conjunto de amenazas y herramientas para la optimización en la localización de sensores)? ¿Han usado o pensado en usarlo? (Breve explicación del software en caso que no lo conozcan: Este software permite definir los PMC necesarios para reducir el riesgo de incidentes de contaminación bajo el lineamiento de una función objetivo. Usando como plataforma de cálculo hidráulico a EPANET, se simulan eventos de contaminación suponiendo una inyección de contaminante biológico en algunos puntos del sistema durante 24 horas)

Rta: hemos escuchado sobre el software TEVA-SPOT pero no lo trabajamos, en la empresa la herramienta que utilizamos para la optimización en la localización de sensores es EPANET.

Apéndice B. Entrevista 2

Fecha: 31 de enero de 2018

Entrevistado: Ingeniero ambiental, Coordinador de Redes en Operadores de Servicios de la Sierra S.A E.S.P

Empresa: Operadores De Servicios De La Sierra S.A E.S.P

Objetivo:

Encontrar los criterios empleados por la empresa para monitorear la calidad del agua en la red de distribución, además de la opinión profesional del experto en este tema.

Preguntas:**Parte A.** Conocimiento actual del sistema

1. ¿El área en la que ustedes tienen la cobertura de acueducto en cuantas zonas se puede dividir? Cada zona, cuantos suscriptores agrupa aproximadamente? Qué tipo de materiales de tubería presentan? Qué material predomina?

R// Se manejan dos zonas de operación, Sur y Norte del Municipio de Ciénaga, sumando el corregimiento de Cordobita.

El total de suscriptores del municipio está en el orden 17500 usuarios.

Las tuberías de distribución son de materiales de PEAD, AC, HF y HD, predominando el AC.

2. ¿En cada una de esas zonas cuántos puntos de monitoreo de la calidad del agua en la red de distribución están operando? ¿Cómo fueron establecidos?

R// El municipio de Ciénaga en la actualidad cuenta con 16 puntos de muestreo concertados con la Secretaria Seccional de Salud del Magdalena. Los cuales fueron establecidos según lo establecido en la Resolución 811 del 05 de marzo de 2008, por medio de la cual se definen los lineamientos a partir de los cuales la autoridad sanitaria y las personas prestadoras, concertadamente definirán en su área de influencia los lugares y puntos de muestreo para el control y la vigilancia de la calidad del agua para consumo humano en la red de distribución.

3. ¿En cada punto cómo se monitorea la calidad del agua? (Por ejemplo diariamente toman muestras en puntos establecidos y las llevan a el laboratorio).

R// Según la frecuencia de monitoreo, son 3 muestras diarias para control por parte del laboratorio de calidad de aguas de la empresa prestadora que al final del mes se debió haber cubierto el 100% de los puntos. Por otro lado por parte de la Secretaria Seccional de Salud del Magdalena, se toman 5 muestras tanto microbiológicas como fisicoquímicas para vigilancia una vez por semana o siendo el caso, dos frecuencias al mes.

4. ¿En su concepto, cuál es o cuales son la variable más importante que afectan la calidad del agua en la red de distribución? ¿Por qué? (Por ejemplo el cloro residual, tiempo de permanencia del agua en la red, el material de la tubería)

R// La variable más representativa y detectada que afecta la calidad del agua en la red de distribución, son las conexiones fraudulentas que por no hacerse técnicamente y además por el alto

uso de turbinas para captación de aguas de la red, filtra cualquier cantidad de agua servida del suelo aledaño a la red.

Parte B. Metodologías para escoger los Puntos de Monitoreo de Calidad de agua

1. La ubicación de los puntos de Monitoreo de calidad del agua es un proceso dinámica pues ésta cambia en el tiempo según el patrón de demandas y el modo de operación de la red en el instante de monitoreo. ¿Cada cuánto ustedes analizan las variaciones de los criterios expuestos anteriormente?

R// Anualmente se hace inspección con la Secretaria Seccional de Salud para revisión del estado de los puntos, con el fin de establecer criterios de su funcionamiento y ubicación, para con ello realizar las actas de concertación y acreditación. Por otro lado, según el seguimiento que se hace diario por parte del prestador, se lleva un registro de los puntos que no cumplieron con lo establecido por norma y se estudia la posibilidad de reubicación.

2. La concentración de cloro en una red de distribución de agua potable decae una vez que el agua sale de la planta de potabilización; por lo tanto, en los sitios más alejados de la red la concentración del cloro residual puede estar por debajo de cierto umbral exponiendo al agua al aumento de niveles bacterianos. Estos cambios en la concentración del cloro son resultado de la convección y la reacción química o bioquímica entre el cloro, el agua, las paredes de la tubería y los microorganismos. ¿Ustedes como controlan estos cambios en la concentración de cloro residual?

R// Actualmente no son controlados directamente en la red, se lleva registro diario de los niveles de cloro en los 16 puntos de muestreo concertado y de ello se establecen los niveles de dosificación en salida de la PTAP.

3. ¿Conoce el software TEVA-SPOT (Evaluación de la vulnerabilidad ante un conjunto de amenazas y herramientas para la optimización en la localización de sensores)? ¿Han usado o pensado en usarlo? (Breve explicación del software en caso que no lo conozcan: Este software permite definir los PMC necesarios para reducir el riesgo de incidentes de contaminación bajo el lineamiento de una función objetivo. Usando como plataforma de cálculo hidráulico a EPANET, se simulan eventos de contaminación suponiendo una inyección de contaminante biológico en algunos puntos del sistema durante 24 horas).

R// No lo conocía.

4. Históricamente estos puntos de Monitoreo de calidad del agua han sido seleccionados empíricamente sin tener en cuenta la dinámica del cloro residual o los contaminantes en la red, ¿considera eso adecuado para tamaños de poblaciones intermedias, las cuales suponemos están en un rango de 50.000 a 100.000 habitantes? ¿por qué?

R// Si sería necesario tener en cuenta la dinámica de los niveles de cloro en la red, debido a que con ello garantizamos una desinfección completa del agua y tuberías logrando con así, un suministro acorde con la normatividad colombiana.

Apéndice C. Matriz de impactos cruzados. Multiplicación aplicada a una clasificación

Referencia	Nº	Variable
1,3,4,6,9,10,11	1	Material de la tubería
1,3,4,9,12,13,14,15,16,17	2	Corrosión de la tubería
1,3,4,9,16,18,19,20.	3	Tiempo de residencia del agua (edad del agua)
1,17,21,22	4	Actos de vandalismo y terrorismo en el sistema de abastecimiento
1,4,6,14,22,23,24,25,26	5	Fugas en la red
23.27	6	Recursos financieros
1.28	7	Amenazas naturales
1,17,29	8	Proximidad y cruce entre redes de acueducto y alcantarillado
1	9	Deterioro de válvulas e hidratantes
1	10	Inadecuado funcionamiento de dispositivos de control del golpe de ariete
1.3	11	Operación y mantenimiento de estaciones de bombeo
6.31	12	Edad de la tubería
22	13	Acumulación de material en la red de distribución
1,3,6,26,32	14	Variaciones de presión en la red de distribución
33	15	Velocidad del agua en la red
4,6,9,33,34,35	16	Concentración de cloro residual

		Dependencia																
Influencia		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	Total
	1	0	0	0	1	1	3	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0	8
	2	3	0	0	0	0	2	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	8
	3	0	0	3	1	2	1	1	2	0	3	2	3	3	3	3	3	27
	4	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
	5	2	2	0	3	3	3	0	1	0	2	1	1	2	2	0	0	22
	6	1	3	0	2	2	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	10
	7	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
	8	0	0	1	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	5
	9	3	3	0	1	1	1	1	1	1	2	1	2	2	2	2	2	23
	10	1	1	1	0	1	1	2	0	1	2	2	0	1	1	0	0	14
	11	0	1	0	1	0	2	2	0	0	0	0	0	1	1	0	0	8
	12	0	0	0	0	0	1	1	0	1	1	1	1	2	2	0	0	10
	13	2	0	2	0	0	0	3	1	2	0	2	0	3	3	0	0	18
	14	1	1	0	3	3	0	3	1	1	2	3	2	2	3	0	0	25
	15	0	1	2	3	3	0	3	1	1	2	3	2	2	3	0	0	26
	16	2	3	3	2	2	1	2	2	2	2	3	2	3	3	3	0	35
Total	17	15	9	19	14	19	21	8	11	9	23	12	15	22	22	6		