

Desinfección y subproductos de desinfección⁷

Mildred F. Lemus Pérez
Manuel S. Rodríguez Susa⁸

Introducción

La desinfección como mecanismo de control patogénico ha sido una de las herramientas más importantes para la reducción de mortalidad y morbilidad por consumo de agua. Desde la masificación de la distribución de agua potable por la implementación de plantas de tratamiento en el mundo, se ha visto una reducción en las enfermedades gastrointestinales, como la enfermedad diarreica aguda (EDA). Es por esto que la desinfección hace parte obligatoria de los procesos por los que pasa el agua para ser considerada potable. La desinfección se lleva a cabo en las plantas de tratamiento, de tal forma que se garantice la calidad microbiológica del agua potable antes de ser distribuida; esta calidad microbiológica debe cumplir con la norma de calidad de agua potable específica para cada país. En el caso colombiano, la norma indica que para que el agua pueda ser consumida y no generar ningún riesgo, debe estar libre de bacterias indicadoras de la presencia de materia fecal (*E. Coli*, coliformes fecales) o bacterias ambientales de la misma familia (coliformes totales); tampoco debe haber presencia de parásitos como *Giardia* y *Cryptosporidium*. Estos son indicadores, es decir, representan al

⁷ doi: <https://doi.org/10.19053/uptc.9789586608459.4>

⁸ Centro de Investigaciones en Ingeniería Ambiental. Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental. Universidad de los Andes. Bogotá. Colombia.

grupo de microorganismos que se quieren inactivar durante el tratamiento, y sirven para hacer un seguimiento a la calidad. A nivel mundial, estos parámetros microbiológicos son ampliamente utilizados, pero también se discute su efectividad en el control de la calidad, debido a que no todas las bacterias y parásitos se inactivan de la misma forma al estar en contacto con el desinfectante.

Algunos microorganismos son más resistentes y es por esto que existen múltiples desinfectantes con diferentes mecanismos de acción. Los más utilizados por su disponibilidad y costo son a base de cloro como el hipoclorito de sodio, el hipoclorito de calcio, el cloro gaseoso, el dióxido de cloro y derivados del cloro como las cloraminas. También se usa el ozono y los rayos ultravioleta (UV) en sistemas más avanzados. La cantidad y el tiempo en que debe actuar cada uno de estos desinfectantes depende del microorganismo y la población microbiana que se quiere inactivar, por lo que técnicamente se debe hacer la evaluación con el más resistente. ¿Por qué no agregar una cantidad alta de tal forma que se inactiven todos los microorganismos presentes? Primero, económicamente no es eficiente, y segundo y más importante, se debe garantizar que no se produzcan concentraciones de sustancias no deseables, que puedan desmejorar la calidad del agua que es consumida durante la desinfección.

Las sustancias que se forman como compuestos secundarios en la desinfección se denominan subproductos de la desinfección (SPD). Los SPD se generan porque el desinfectante no tiene la capacidad de seleccionar sobre qué actúa y, así como oxida parte de la estructura de la que están hechos los microorganismos, también lo hace sobre otros compuestos orgánicos, como la materia orgánica natural (MON). La MON está presente en todos los cuerpos de agua por la lixiviación y descomposición de seres vivos o sus partes, tales como las ramas y hojas de un árbol. La MON se encuentra normalmente diluida en forma de ácidos húmicos y fúlvicos. Los ácidos húmicos (especialmente) y fúlvicos, tienen estructuras en forma de anillo que les dan una reactividad alta, las cuales, al entrar en contacto con el desinfectante, se rompen y se forman compuestos más pequeños.

El tipo y cantidad de compuestos formados por la reacción depende de múltiples variables, entre ellas, el tipo de desinfectante, la naturaleza de

la materia orgánica, la presencia de otros elementos que también puedan reaccionar como otros halógenos (p. ej. bromo, yodo) y las condiciones ambientales, entre las que se encuentran el pH, la temperatura y el tiempo que dure la reacción (1). Es así como a altas concentraciones de materia orgánica y desinfectante se van a formar más SPD; dependiendo de la temperatura y el pH se producen más o menos SPD. Algunos SPD son más estables que otros, por lo que a un tiempo mayor de reacción se incrementa su cantidad en el agua, y la presencia de bromo y yodo favorece la formación de compuestos bromados y yodados sobre los que tienen cloro en su estructura.

El cloro y, específicamente, el hipoclorito, forman principalmente los dos grupos de SPD más estudiados: los trihalometanos (THM) y los ácidos haloacéticos (AHA). Desde mediados de la década de los años 70, se viene hablando de los THM, desde su descubrimiento. A partir de ese momento, se comenzaron a estudiar los posibles efectos de la presencia de los THM en el agua potable y progresivamente de los otros compuestos que se empezaron a descubrir como parte de la reacción de desinfección. Se calcula que habría más de 700 SPD diferentes con estructuras moleculares distintas. La cantidad de los SPD en el agua es pequeña; en el orden de microgramos por litro a nanogramos por litro. Aunque bajas en comparación con el desinfectante adicionado y las normas de su concentración residual en la red, la exposición continua a estas sustancias y durante largos periodos de tiempo (años), tienen muy alto potencial de generar efectos negativos sobre la salud humana. Esto ocurre por los diferentes y recurrentes usos en los que se requiere del contacto con el agua. Por ejemplo, el baño corporal, el lavado de manos, el lavado de ropa, el lavado de loza, el consumo de agua y de alimentos preparados con ella. De esta forma, hay una exposición del consumidor a los SPD presentes en el agua por medio de lo que se ingiere (vía oral), lo que puede absorberse por la piel (vía dérmica), y lo que ingresa al respirar el vapor del agua (vía inhalatoria).

Los estudios que se han desarrollado a partir de la exposición de animales o células a los SPD, partiendo de modelos de evaluación a diferentes concentraciones, han mostrado diversas respuestas con una tendencia a que existe un incremento de la toxicidad del agua por su presencia. Los efectos a nivel toxicológico dependen del tipo de SPD analizado. Es así como los SPD que tienen nitrógeno en su estructura molecular son más perjudiciales, en

comparación con los que solo están compuestos por carbono; los compuestos clorados son menos dañinos que los que tienen bromo y yodo. Por otra parte, los estudios epidemiológicos se han enfocado principalmente en los THM debido a una mayor cantidad de información histórica de su presencia en el agua. Los resultados también son variados, mostrando que existe una relación estadísticamente significativa entre el incremento de los THM consumidos en el agua y la presencia de cáncer de vejiga, principalmente en los hombres.

Teniendo en cuenta los resultados del posible y probable efecto negativo en la salud humana de la presencia de SPD en el agua, la normatividad en calidad del agua potable ha establecido límites para algunos de estos SPD. La normatividad colombiana fijó un límite de 200 microgramos por litro de THM. Los THM se componen de cuatro sustancias principales: el cloroformo, el bromodiclorometano, el dibromoclorometano y el bromoformo. La regulación tiene en cuenta la sumatoria de estos compuestos. Sin embargo, no se exige su medición de manera frecuente al no ser parte del cálculo de los indicadores de riesgo de calidad del agua (IRCA), establecidos para controlar la calidad del agua suministrada.

Al comparar la regulación colombiana, en términos de SPD, con normas internacionales, se pueden observar diferencias especialmente con los países desarrollados. En estos lugares se establecen niveles más restrictivos, y en algunos países se ha optado por evitar ciertas formas de desinfección como la cloración para reducir la formación de THM. Por ejemplo, los Países Bajos ha reducido al mínimo su uso desde la década de los años 90, por medio de sistemas avanzados de tratamiento. El equilibrio entre garantizar la calidad microbiológica y reducir el riesgo por exposición a SPD, es parte del desafío de los sistemas de abastecimiento de agua potable; desafío que debe pasar por evaluar el tipo de fuente de captación y su calidad, la eficiencia de los sistemas de tratamiento y cómo se están operando, además del estado de las redes por donde pasa el agua, cómo se almacena y cómo se usa en cada uno de los hogares.

Este desafío se hace visible en toda Colombia, más aún por el tipo de sistemas de tratamiento con el que cuentan los municipios. Estos no son lo suficientemente adecuados para reducir la cantidad de materia orgánica en el agua a niveles bajos donde el desinfectante requerido, para garantizar la calidad microbiológica, no reaccione y forme niveles excesivos de SPD.

El departamento de Boyacá no es ajeno a esta realidad. Es por esto que el conocimiento de los procesos de desinfección que se usan para el tratamiento del agua potable, los subproductos que se forman como consecuencia y los retos asociados a una gestión adecuada para el control de la calidad del agua, son fundamentales en el área de saneamiento y salud.

Para tener un panorama de este tema en Boyacá, en este capítulo se abordarán las siguientes temáticas: i) desinfección en Boyacá, tipos de desinfectantes utilizados, en qué concentraciones y en qué tipo de sistemas de tratamiento de agua potable, esto permitirá entender el estado actual de la desinfección en el departamento; ii). Estudios realizados sobre SPD en Boyacá y desinfección, de tal forma que se tenga un inventario de la información base con la que cuenta el departamento; iii) Desafíos y perspectivas de una gestión adecuada de la calidad al afrontar retos como cambios en la calidad de la fuente de agua cruda, el cambio climático, el estado y operación de las plantas de tratamiento.

Desinfección en Boyacá

Según la base de datos de la Secretaría de Salud de Boyacá, los datos relativos a procesos de desinfección utilizados en los 123 municipios del departamento muestran que solo se llevan a cabo procesos químicos de desinfección, tanto en las plantas de potabilización de los cascos urbanos, como en las plantas de las zonas rurales. En el caso de los hogares rurales dispersos, al igual que en otras partes del país, el proceso de desinfección está mucho más inclinado hacia procesos térmicos (hervir el agua). No se tiene información sobre el uso de procesos de desinfección ultravioleta ni con ozono en ninguna de las plantas de producción de agua potable del departamento, aun cuando a nivel industrial, y quizá institucional, esta tecnología sea empleada. La planta de tratamiento de la zona urbana del municipio de Chiquinquirá cuenta con un sistema de ozonización, pero a la fecha (septiembre de 2023), no está operativo por fallos en la configuración.

Los procesos de potabilización llevados a cabo en Boyacá, son desarrollados en plantas convencionales, plantas compactas y plantas con filtración de múltiple etapa, siendo la desinfección química, la última etapa de estos procesos. El estado y operación de estos sistemas es una variable relevante

en su eficiencia; sin embargo, por ausencia de información, no se relaciona en este aparte.

Según la Secretaría de Salud de Boyacá, en el caso de los cascos urbanos, cerca del 78 % de los sistemas utilizan hipoclorito de calcio como agente de desinfección. Un 17 % afirma hacer uso de cloro gaseoso, en tanto que el restante de los municipios desinfecta con hipoclorito de sodio. Este hipoclorito de calcio tiene concentraciones entre un 65 y un 70 % de agente activo, se adquiere en fase sólida, y es preferido por su alta concentración y fácil manejo. En la mayoría de los casos es disuelto para ser aplicado en fase líquida, previa disolución, pero en muchos acueductos veredales, se adicionan pastillas en los tanques de contacto, situación que genera dosis irregulares de desinfectante en el agua a potabilizar (Figura 1).

El uso de cloro gaseoso para desinfección demanda instalaciones y estrategias de seguridad mucho más rigurosas que en el caso del hipoclorito de calcio, razón por la cual no es masivo su empleo en cascos urbanos, y no existe en el sector rural. Finalmente, el hipoclorito de sodio, siendo también un buen desinfectante químico, es poco utilizado por los bajos niveles de agente activo que se encuentran comercialmente.

Este uso masivo de sustancias cloradas para los procesos de desinfección, aunado con el muy bajo seguimiento sistemático a la concentración de materia orgánica (medida como carbono orgánico total - COT⁹), a la naturaleza de la misma (medida con indicadores de qué tan reactiva puede ser la materia orgánica UV₂₅₄¹⁰ y SUVA¹¹), y a la concentración de nitrógeno disuelto en el agua cruda, permite intuir un potencial de formación de subproductos de desinfección de las familias de los trihalometanos, ácidos haloacéticos, haloacetonas, furanonas, haloacetronitrilos e hidratos de cloro (1).

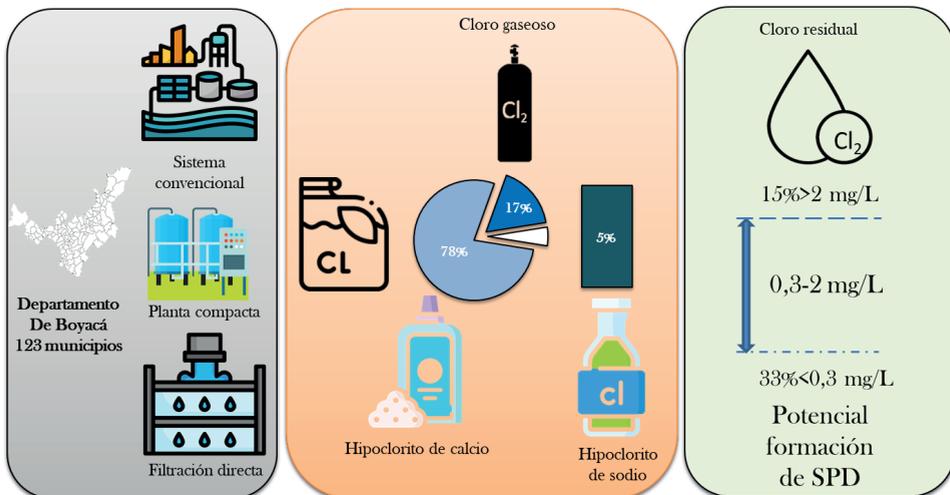
9 El indicador de carbono orgánico total mide de manera global los diferentes tipos de materia orgánica presente en el agua.

10 Este indicador se denomina absorbancia ultravioleta a una longitud de onda de 254 μm , a la cual los compuestos orgánicos más reactivos son más sensibles, es decir, absorben más de esta luz. Este indicador de forma rápida puede dar un indicio de qué tanta materia orgánica reactiva hay en el agua.

11 Este indicador se denomina absorbancia de luz ultravioleta específica y es la relación entre el UV₂₅₄ y el COT y permite clasificar el tipo de materia orgánica presente, de acuerdo a su estructura molecular global. Valores más altos indican que hay predominancia de compuestos más reactivos y, por tanto, formación de THM y AHA.

Las condiciones en las que se lleva a cabo la desinfección como pH y concentración, también son variables en los diferentes municipios del departamento. En 19 de los 123 se superó la norma de 2.0 mg/L de cloro residual, mientras 40 reportaron valores por debajo de 0.3 mg/L para el año 2022. Esto indicaría que en casi el 50 % de los municipios se están cometiendo errores en la dosificación y, por tanto, existe un potencial mayor riesgo de generación de SPD, unos por cloro residual alto y otros porque, al querer cumplir con el IRCA, pueden hacer mal uso del desinfectante. Respecto al pH, solo 1 municipio en 2022 incumplió el rango de pH (6.5-9) con 6.1 en la zona urbana de Chiquinquirá. Esto supondría la formación de sustancias, sobre todo ácidas, como los ácidos haloacéticos, no regulados en el país y con probables efectos en la salud. En general, el valor promedio de pH para los 123 municipios, está muy cerca de la neutralidad (7.3), por lo que se esperaría que bajo estas condiciones de desinfectante, dosis, pH y presencia de nitrógeno se encuentre una amplia variedad de subproductos de la desinfección (Figura 1).

Figura 1. Infografía desinfección en Boyacá



Fuente: Elaboración propia.

Estudios relacionados con subproductos de desinfección en Boyacá

La investigación y control de los subproductos de desinfección en el departamento de Boyacá ha sido incipiente, pues la aproximación que se ha hecho de la desinfección ha sido abordada exclusivamente desde la perspectiva del cumplimiento de la normatividad. En la Resolución 2115 de 2007 de calidad del agua se establece que debe existir un excedente de cloro en la red, y que, si este se encuentra por debajo o por encima del rango establecido, hay un incremento del riesgo a la salud del 15 %. Esta visión desconoce la poca efectividad del cloro residual sobre la formación y el desprendimiento de biopelículas en la red de acueducto, y las dinámicas de generación de subproductos de desinfección en el tiempo de permanencia del agua durante su distribución.

El otro parámetro determinante en la formación de subproductos de desinfección, la materia orgánica, que normalmente se cuantifica a través del carbono orgánico total (COT), no es obligatorio como indicador de riesgo. La turbiedad que se presenta por la presencia de coloides inorgánicos y el color asociado a material orgánico disuelto, son medidos regularmente y al sobrepasar la norma representan un incremento del riesgo del 10 y el 6 % respectivamente.

Se esperaría que los municipios abastecidos por sistemas con baja remoción de estos dos parámetros tengan una probabilidad más alta de presentar mayores concentraciones de subproductos de desinfección (SPD), aun si la dosificación se realiza de manera adecuada. Sin embargo, la remoción de turbidez y color a los niveles de la norma colombiana no garantizan una reducción suficiente de materia orgánica, para llevar a concentraciones mínimas los subproductos de desinfección.

En el estudio Índice de riesgo de la calidad del agua para consumo humano en zonas urbanas del departamento de Boyacá, Colombia 2004-2013, del Grupo de Investigación del Laboratorio de Salud Pública de Boyacá (2), se reporta una reducción del IRCA desde el año 2004 hacia niveles de riesgo bajo; sin embargo, se hacen recomendaciones sobre el seguimiento a otros parámetros microbiológicos (*Giardia* y *Cryptosporidium*) y sustancias

químicas (metales, pesticidas) que deben ser medidos para establecer el riesgo real por consumo de agua potable. Existe la posibilidad que como los parámetros microbiológicos son los que más pesan en el cálculo del índice de riesgo por calidad del agua (IRCA), los prestadores del servicio, intentando minimizar los valores de IRCA, utilicen mucho más cloro en sus procesos de desinfección, lo cual se ha comprobado tiende a generar muchos más SPD y en mayor concentración.

Debido a este vacío en la investigación y el control de los subproductos de desinfección en el departamento de Boyacá, se desarrolló el proyecto *Análisis de riesgo por exposición de la población boyacense a subproductos de desinfección presentes en el agua potable y la fracción atribuible al cáncer*. En este primer trabajo se seleccionaron 15 municipios (uno por provincia): Chiquinquirá (Provincia Occidente), Duitama (Provincia Tundama), El Cocuy (Provincia Gutiérrez), Guateque (Provincia Oriente y Neira), Labranzagrande (Provincia La Libertad), Miraflores (Provincia Lengupá), Nobsa (Provincia Sugamuxi), Puerto Boyacá (Zona de Manejo Especial), Ráquira (Provincia Ricaurte), Soatá (Provincia Norte), Socha (Provincia Valderrama), Sogamoso (Provincia Sugamuxi), Sutamarchán (Provincia Ricaurte), Tunja (Provincia Centro) y Viracachá (Provincia Márquez). Dentro de esta selección se encuentran municipios de todos los rangos poblacionales: gran tamaño entre 80.001 y 150.000 habitantes, intermedio entre 20.001 y 80.000 habitantes, pequeño entre 2.501 y 10.000 habitantes y muy pequeño de menos de 2.500 habitantes.

En este proyecto se caracterizaron tres (3) grupos de SPD: los ácidos haloacéticos (AHA), los trihalometanos (THM) y algunos subproductos emergentes (SPDe). Estas sustancias tienen un probable efecto negativo en la salud, de acuerdo a los diversos estudios internacionales que se han realizado. Los resultados que indican probable efecto en salud se basan en ensayos con animales (*In vivo*), células (*In vitro*) o seguimiento poblacional (epidemiología). En los ensayos *In vivo* de los AHA, se ha identificado que estos elevan la probabilidad de la presencia de lesiones en el hígado de los roedores evaluados (3), que los AHA pueden generar daños en los espermatozoides (4,5). Además, la Oficina de Evaluación de Peligros para la Salud Ambiental de los Estados Unidos ha asociado a estas sustancias

efectos cancerígenos, anomalías reproductivas, retraso del crecimiento, genotoxicidad, citotoxicidad, y daño al bazo, al hígado y al riñón.

A partir de los ensayos *In vivo* con roedores, se ha podido observar que su exposición a los THM por vía oral puede generar tumores en hígado, riñón e intestino (1,6,7). Por otra parte, los estudios epidemiológicos de Villanueva y Jones han mostrado una relación positiva entre la exposición a THM y el desarrollo de cáncer (8,9).

Los ensayos *In vitro* realizados a los haloacetnitrilos (HAN), que hacen parte del grupo de SPDe, han arrojado como resultado que su exposición induce daño en el ADN de las células, es decir, en el material genético (8,9). Adicionalmente, en pruebas *In vivo* se encontró una relación directa entre la cantidad de halógenos (bromo, yodo, cloro) y el potencial de inducción de daño en el ADN, y una mayor influencia por parte de los compuestos bromados que los clorados (10), es decir, una mayor toxicidad.

Selección de puntos de muestreo. Al no tener datos preliminares de SPD, a excepción de los suministrados por la empresa prestadora de la ciudad de Tunja para aquellos regulados por la norma (trihalometanos), fue necesaria la caracterización de la calidad del agua en diferentes sectores de la zona urbana de los 15 municipios, en distintas épocas del año. Se llevaron a cabo 4 campañas de muestreo distribuidas en los meses de abril-mayo, junio-julio, septiembre-octubre y octubre-noviembre de 2022. A partir del protocolo descrito en el *Stage 2 DBP* de la Agencia para la Protección Ambiental de los Estados Unidos, USEPA, de 2006 (11), el cual tiene en cuenta al tamaño de la población abastecida (Tabla 1), se estableció un número mínimo de subsectores a muestrear para cada municipio. La localización de los subsectores se realizó tomando como base las actas que generan los prestadores del servicio de acueducto y la Secretaría de Salud del departamento para el seguimiento rutinario de la calidad, donde se establecen unos puntos concertados. Los puntos concertados están conectados directamente a la red de suministro y distribuidos al inicio, al intermedio y en la parte final de la red. En paralelo, se caracterizó la calidad de los puntos de uso cercanos a los concertados. En total se tomaron 448 muestras distribuidas en los 15 municipios (Tabla 1).

Tabla 1. Distribución de muestras caracterizadas en los 15 municipios de Boyacá, de acuerdo a su población

Rango de población (1)	Provincia	Municipio	Población urbana (2)	Subsectores por muestreo (3)	Muestras totales (4)
80.001 – 150.000	Centro	Tunja	130.167	8 (6)	64
	Sugamuxi	Sogamoso	89.345	8	64
	Tundama	Duitama	85.988	8 (6)	64
20.001 – 80.000	Occidente	Chiquinquirá	37.271	8	64
	Zona de Manejo especial	Puerto Boyacá	25.122	4	32
2.501 – 10.000	Oriente	Guateque	6.067	2	16
	Norte	Soatá	4.909	2	16
	Sugamuxi	Nobsa	4.264	4 (5)	32
	Lengupá	Miraflores	4.225	2	16
	Valderrama	Socha	3.139	2	16
< 2.500	Ricaurte	Ráquira	1.874	2	16
	Ricaurte	Sutamarchán	1.687	2	16
	Gutiérrez	Cocuy	1.684	2	16
	La Libertad	Labranzagrande	939	2	16
	Márquez	Viracachá	333	2	16
				Total	448

- (1) Rangos de población establecidos para agrupar a los municipios de acuerdo a su tamaño, para la presentación y análisis de resultados.
- (2) Datos de proyección DANE para 2022. Orden de los 15 municipios de mayor a menor población, que se seguirá en la presentación de resultados (12).
- (3) Subsectores seleccionados de acuerdo con el protocolo USEPA 2006.
- (4) Las muestras totales son el producto del total de subsectores por el número de campañas (cuatro) y por los puntos tomados en cada subsector (dos).
- (5) El municipio de Nobsa tuvo un incremento de subsectores de 2 a 4 por los reportes históricos del IRCA que indicaban un mayor riesgo. El 50 % de las muestras de este municipio se tomaron en la zona rural.
- (6) En los municipios de Tunja y Duitama se tomaron muestras en la zona rural; se mantienen los 8 subsectores para la zona urbana. Las muestras rurales representaron el 12.5 % del total.

Toma de muestras y análisis. Los métodos para la toma de muestras, preservación y análisis fueron los establecidos en los protocolos utilizados en el Laboratorio de Ingeniería Civil y Ambiental de la Universidad de los Andes. La toma de muestras se realizó en frascos de vidrio ámbar de 125 mL, los cuales se llenaron en su totalidad, previa apertura de la llave y a bajo caudal para evitar burbujeo y pérdida de compuestos volátiles; posteriormente, fueron refrigeradas y trasladadas a los laboratorios dentro de las 24 horas de la toma. Se midieron tres grupos de SPD por técnicas cromatográficas que permiten la detección de sustancias a bajas concentraciones: i. trihalometanos (THM) (técnica de purga y trampa; Método 5030 y 8260 de la USEPA (5,11): cloroformo (CF), bromoformo (BF), bromodichlorometano (BDCM) y dibromoclorometano (DBCM); ii. ácidos haloacéticos (AHA) (técnica de extracción líquida y cromatografía de gases Método 552.3 de la USEPA (idem): ácido monocloroacético (AMCA), ácido dicloroacético (ADCA), ácido tricloroacético (ATCA), ácido monobromoacético (AMBA), ácido dibromoacético (ADBA), ácido bromocloroacético (ABCA), ácido bromodichloroacético (ABDCA), ácido clorodibromoacético (ACDBA) y ácido tribromoacético (ATCA); iii. Subproductos No Regulados o emergentes (SPE) (técnica de extracción líquida y cromatografía de gases; Método 551 de la USEPA): dicloroacetoneitrilo (DCAN), tricloroacetoneitrilo (TCAN), bromocloroacetoneitrilo (BCA), 1,1,1, tricloro 2 propanona (TCP), 1,1-dicloro 2 propanona (DCP) y cloropicrina (CPK). Los AHA seleccionados fueron los mismos que son regulados internacionalmente. En el caso de los emergentes, se escogieron sustancias no reguladas, pero con alto nivel de toxicidad.

Resultados

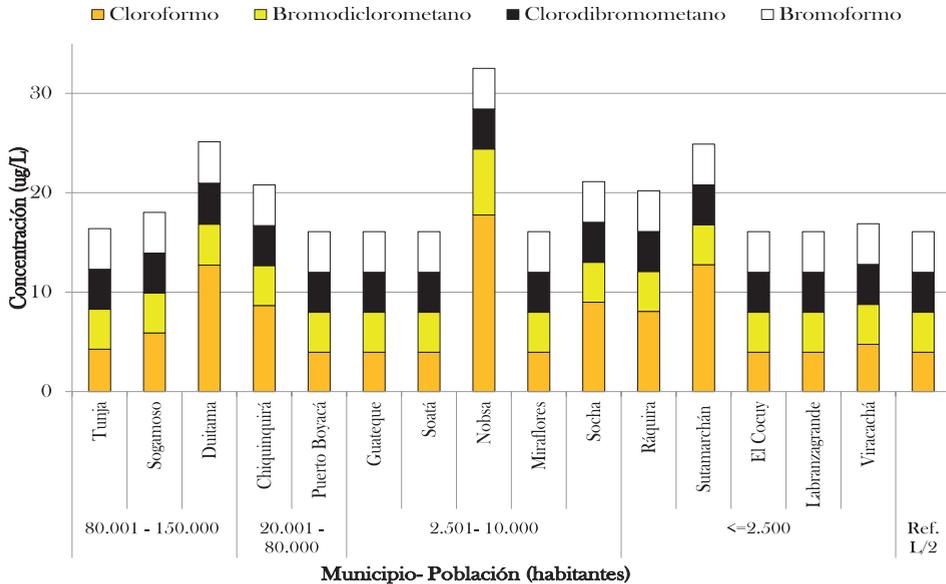
Los resultados se basan en los datos reportados por el laboratorio y los límites de detección de cada uno de los métodos; estos corresponden al valor promedio de concentración de cada sustancia en cada uno de los 15 municipios. El límite de detección (LD), es el valor mínimo que se puede reportar de manera precisa y que se determina a partir de la estandarización del protocolo usado en el laboratorio. Cuando una muestra reporta un valor menor a LD, indica que la concentración de la sustancia no se puede

detectar por el método utilizado, aunque esta esté presente. Por esta razón, los reportes de las muestras por debajo de LD se reemplazaron por la mitad de este valor (13), ya que no es posible asegurar la ausencia de estos SPD. Tanto los valores reportados como aquellos reemplazados por LD/2 fueron sumados para establecer los promedios de cada uno de los SPD medidos en los 15 municipios. Se calculó un valor promedio para cada uno de los cuatro periodos de muestreo con el fin de determinar el valor promedio anual (VPA), que equivale al promedio de los cuatro valores calculados. Se estableció el valor promedio anual (VPA) como el valor que representa los resultados obtenidos, ya que es el usado por el “*Disinfectants and Disinfection By Products Rules*” de la USEPA para establecer el cumplimiento de la norma.

A partir de los VPA de los SPD medidos en los 15 municipios (Anexo 1), se pudo determinar que las sustancias que se forman en mayor concentración son los ácidos haloacéticos, seguidos de los trihalometanos y en menor concentración los subproductos emergentes. Se calculó la concentración total de cada grupo de SPD, obteniendo para cada municipio: a. el TAHA9 como la suma de los VPA de los nueve AHA medidos, b. el TTHM4 igual a la suma de los VPA de los cuatro THM medidos c. el TSPDe6 equivalente a la suma de los VPA de los seis SPD medidos. Los rangos encontrados, incluyendo los 15 municipios, fueron: a. TAHA9 entre 6.8 µg/L reportado para Labranzagrande y 66.7 µg/L para Nobsa; b. TTHM4 entre 16.1 µg/L (El Cocuy, Guateque, Labranzagrande, Miraflores, Puerto Boyacá y Soatá) y 32.5 µg/L (Nobsa); c. TSPDe6 entre 1.69 µg/L de Labranzagrande y 14.3 µg/L de Nobsa.

Trihalometanos. Para los 15 municipios analizados, el THM que tuvo el mayor número de resultados por encima del límite de detección fue el cloroformo (rango VPA entre 3.96 µg/L y 17.76 µg/L), seguido del bromodiclorometano (rango VPA de 4.02 µg/L a 6.63 µg/L). El clorodibromometano y el bromoformo solo se detectaron en una muestra de Duitama. La suma de los valores promedio para los THM (TTHM4) fue mayor para Nobsa (TTHM4 = 32.5 µg/L), Duitama (TTHM4 = 25.1 µg/L) y Sutamarchán (TTHM4 = 24.9 µg/L), mientras que, en El Cocuy, Guateque, Labranzagrande, Miraflores, Puerto Boyacá y Soatá, todas las muestras analizadas estuvieron por debajo de LD (Figura 2).

Figura 2. TTHM4 para los 15 municipios de estudio de acuerdo al tamaño de la población. Ref. L/2: Límite de detección/2



Fuente: Elaboración propia.

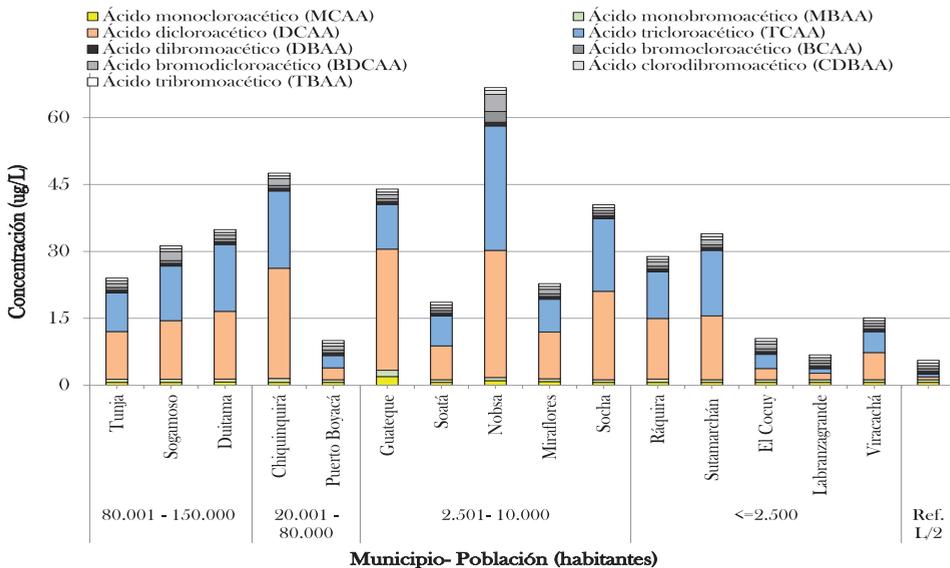
A diferencia de los AHA, los THM muestran promedios ponderados entre grupos más homogéneos, TTHM4: 18.9 µg/L (20.001 y 80.000 habitantes); 19.3 µg/L (80.001 y 100.000 habitantes) 19.6 µg/L (menores a 2.500 habitantes); 19.9 µg/L (2.501 y 10.000 habitantes).

Ácidos haloacéticos. Tomando como base los resultados de los 15 municipios, de las nueve sustancias analizadas, las más prevalentes fueron el ácido dicloroacético (rango VPA entre 1.4 µg/L de Labranzagrande y 28.5 µg/L de Nobsa) y el ácido tricloroacético (rango VPA entre 1.0 µg/L de Labranzagrande y 27.9 µg/L de Nobsa), mientras el ácido tribromoacético estuvo siempre por debajo de límite de detección. A partir de la suma de los promedios de los nueve AHA (TAHA9), se observó que Nobsa (66.7 µg/L), Chiquinquirá (47.5 µg/L) y Guateque (44 µg/L), fueron los municipios con mayores concentraciones, mientras los de menores concentraciones fueron: Labranzagrande (6.8 µg/L), Puerto Boyacá (10 µg/L) y El Cocuy (10.5 µg/L). Respecto a la presencia de un mayor número de sustancias analizadas,

Nobsa tuvo al menos un reporte por encima del LD en ocho (8) de las nueve sustancias, mientras Viracachá y Labranzagrande solo reportaron al ácido dicloroacético y al ácido tricloroacético (Figura 3).

Si se tiene en cuenta los grupos de municipios por rango poblacional, se observa que tres (3) de los que reportan mejor calidad: El Cocuy, Labranzagrande y Viracachá, pertenecen a poblaciones de menos de 2.500 habitantes. Para determinar diferencias entre grupos se calculó el promedio ponderado de cada uno, el cual se basa en el valor de TAHA9 y el peso poblacional de cada municipio sobre el total. El promedio ponderado para el grupo de municipios de menor población es igual a 21.54 µg/L, seguido por el de mayor población (80.000-150.000 habitantes) con 29.15 µg/L, 32.43 µg/L para aquellos con entre 20.001 y 80.000 habitantes y, finalmente, de 38.3 µg/L para los municipios pequeños entre 2.001 y 10.000 habitantes. Existe una diferencia de 17 µg/L entre los dos grupos de mayor y menor TAHA9 ponderado.

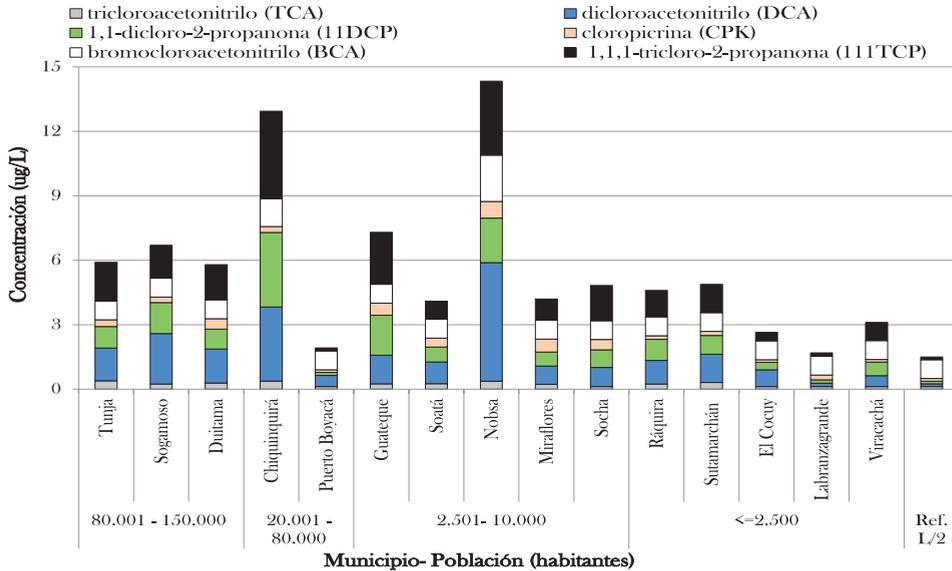
Figura 3. TAHA9 para los 15 municipios de estudio de acuerdo al tamaño de la población. Están organizados de mayor a menor población de izquierda a derecha.
 Ref. L/2: Límite de detección/2



Fuente: Elaboración propia.

Subproductos emergentes. Teniendo en cuenta los resultados de los municipios de estudio, los subproductos dicloroacetoniitrilo (DCAN) (rango VPA entre 0.159 $\mu\text{g/L}$ y 5.5 $\mu\text{g/L}$), 1,1,1, tricloro 2 propanona (TCP) (rango VPA entre 0.145 $\mu\text{g/L}$ y 4.07 $\mu\text{g/L}$) y 1,1-dicloro 2 propanona (DCP) (rango VPA entre 0.141 $\mu\text{g/L}$ y 3.47 $\mu\text{g/L}$), fueron los SPDe que mostraron los valores promedio de concentración más altos. Por el contrario, la cloropicrina (rango VPA entre 0.12 $\mu\text{g/L}$ y 0.77 $\mu\text{g/L}$) fue la sustancia con valores más bajos y el bromocloroacetoniitrilo (BCA), el que fue reportado en un mayor número de muestras por debajo de LD; solo en Nobsa (VPA=2.16 $\mu\text{g/L}$) y Chiquinquirá (VPA =1.29 $\mu\text{g/L}$), el promedio fue superior al LD/2 de 0.87 $\mu\text{g/L}$. Acorde con esto, en Nobsa (TSPDe6 =14.33 $\mu\text{g/L}$) y Chiquinquirá (TSPDe6 =12.93 $\mu\text{g/L}$), además de Guateque (TSPDe6 = 7.3 $\mu\text{g/L}$), las muestras de agua tuvieron la concentración total promedio de los 6SPDe más alta. Adicionalmente, Nobsa y Chiquinquirá mostraron resultados superiores a los LD en todos los SPDe, en al menos una muestra. Por otra parte, la mejor calidad del agua potable, a partir de estos parámetros, fue la muestreada en Labranzagrando (TSPDe6 =1.69 $\mu\text{g/L}$) y Puerto Boyacá (TSPDe6 =1.92 $\mu\text{g/L}$), ya que tuvo la cantidad más baja de estas sustancias. Las muestras tomadas en Puerto Boyacá y Viracachá solo reportaron valores por encima de los LD para los 3 SPDe más prevalentes: DCAN, TCP y DCP (Figura 4).

Figura 4. TSPDe6 para los 15 municipios de estudio de acuerdo al tamaño de la población. Ref. L/2: Límite de detección/2



Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con el tamaño de la población, el valor promedio ponderado basado en el TSPDe6 es menor para los municipios más pequeños ($3.67 \mu\text{g/L}$), le sigue el promedio para los de mayor tamaño ($6.1 \mu\text{g/L}$), los pequeños entre 2.500 y 10.000 habitantes con $7.1 \mu\text{g/L}$ y, finalmente, los medianos entre 20.000 y 80.000 habitantes con un TSPDe6 ponderado de $8.5 \mu\text{g/L}$. Las diferencias son significativas entre grupos, sin embargo, es importante tener en cuenta el efecto de los valores de Chiquinquirá y Nobsa que pueden llegar a ser hasta 8 veces el valor más bajo reportado por Labranzagrande.

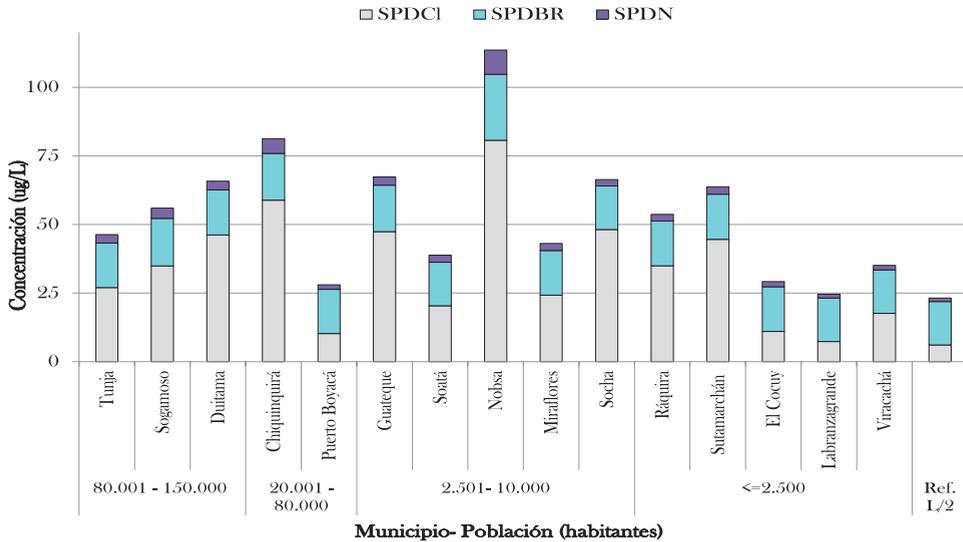
Subproductos totales. Es importante diferenciar la estructura de los SPD, ya que la toxicidad de los compuestos clorados es menor a la de aquellos subproductos bromados o los que tienen nitrógeno en su estructura. Para esta clasificación se agruparon los valores de VPA para cada municipio así:

- SPD-Cl: cloroformo (CF), ácido monocloroacético (MCA), ácido dicloroacético (DCA), ácido tricloroacético (TCA), 1,1,1, tricloro 2 propanona (TCP) y 1,1-dicloro 2 propanona (DCP).

- SPD-Br: bromoformo (BF), bromodichlorometano (BDCM), dibromoclorometano (DBCM), ácido monobromoacético (MBA), ácido dibromoacético (DBA), ácido bromocloroacético (BCA), ácido bromodichloroacético (BDCA), ácido clorodibromoacético (CDBA) y ácido tribromoacético (TBA).
- SPD-N: dicloroacetoniitrilo (DCAN), tricloroacetoniitrilo (TCAN), bromocloroacetoniitrilo (BCA) y cloropicrina (CPK).

De acuerdo con esta clasificación, se puede ver que los SPD-Cl son los que aportan la mayor concentración del total de SPD (entre un 29 % y un 72 %), seguido de los bromados con una participación del 20 al 64 % y, por último, los nitrados que representan del 4.4 al 7.7 % de los 19 SPD medidos en este estudio. La calidad del agua que se vio más comprometida por la presencia de estas sustancias fue la de Nobsa (SPD-Cl: 80.67 µg/L; SPD-Br: 24.06 µg/L; SPD-N: 8.82 µg/L; Total 113.56 µg/L) y Chiquinquirá (SPD-Cl: 58.86 µg/L; SPD-Br: 17.01 µg/L; SPD-N: 5.39 µg/L; Total 81.27 µg/L). Caso contrario, la mejor calidad del agua respecto a concentración de estos SPD fue la del municipio de Labranzagrande (SPD-Cl: 7.35 µg/L; SPD-Br: 15.85 µg/L; SPD-N: 1.38 µg/L; Total 24.57 µg/L). Existe una brecha de casi cinco veces entre el de mejor calidad y el de más baja calidad (Figura 5).

Figura 5. Concentraciones totales promedio de SPD para los 15 municipios de estudio. Suma de los VPA de SPD clorados, bromados y nitrados.
 Ref. L/2: Límite de detección/2



Fuente: Elaboración propia.

Se determinó el promedio total ponderado por subgrupo, tomando como base la suma de los VPA de los 19 SPD medidos (SPDt) y el peso poblacional de cada municipio. Para los municipios más pequeños el SPDt promedio es de 44.8 µg/L, seguido del SPDt de los municipios más grandes con 54.6 µg/L, el SPDt de 59.8 µg/L de los municipios de tamaño intermedio y, por último, el SPDt de los municipios pequeños de 65.2 µg/L. Existe una diferencia aproximada del 50 % entre los grupos de menor y mayor promedio.

Discusión

Debido a que la desinfección con cloro (hipoclorito de sodio y de calcio, y cloro gaseoso) se utiliza en el proceso de potabilización de todos los municipios estudiados (Tabla 2), es de esperar que se encuentren en mayor concentración los dos grupos que se han reportado como más prevalentes: los THM y los AHA; mientras que la mayor presencia del grupo de emergentes se podría

asociar principalmente a la disponibilidad de nitrógeno en el agua afluente a las plantas de potabilización. Los SPD son un parámetro de calidad al que no se le ha dado la suficiente importancia a nivel nacional; esto se ve reflejado en la poca información de su concentración en el agua potable, en los nulos reportes del riesgo que ocasiona su presencia en el agua de consumo, y en que no se incluye como un indicador relevante en el cálculo del índice de riesgo de calidad del agua (IRCA).

Tabla 2. Características y concentración total de SPD de los sistemas muestreados, de acuerdo con la población urbana proyectada para el año 2022

Población (1)	Municipio	SPDt (µg/L)	IRCA (2)	Fuera de norma (2)	Tratamiento	Empresa (2)	Fuente (2)
130.167	Tunja	46,32	1	Manganeso, Aluminio, COT	Convencional, cloro gaseoso, hipoclorito de calcio	Veolia S.A. E.S.P.	Represa Teatinos, pozos
89.345	Sogamoso	55,96	1	Aluminio, Hierro	Planta Chacón: convencional; Planta Sur: filtración directa; Planta El Mode: compacta cloro gaseoso	Compañía de Servicios Públicos de Sogamoso S.A. E.S.P.	Pozo profundo, Río Tejar, Lago de Tota
85.988	Duitama	65,8	2	Aluminio	2 convencionales y una compacta, cloro gaseoso, hipoclorito de calcio	Empresa de Servicios Públicos Domiciliarios de Duitama S.A. E.S.P.	Río Surba, río Chicamocha, pozos quebrada Boyacogua

Desinfección y subproductos de desinfección
Mildred F. Lemus Pérez | Manuel S. Rodríguez Susa

Población (1)	Municipio	SPDt (µg/L)	IRCA (2)	Fuera de norma (2)	Tratamiento	Empresa (2)	Fuente (2)
37.271	Chiquinquirá	81,27	3	Manganeso aluminio COT	Convencional, cloro gaseoso	Empresa Industrial y Comercial de Servicios Públicos de Chiquinquirá	Río Suárez, pozos profundos (2)
25.122	Puerto Boyacá	28,02	2	Color aparente turbiedad	Aireación, filtración, desinfección, cloro gaseoso	Empresas Públicas de Puerto Boyacá E.S.P.	Pozos (7)
6.067	Guateque	67,35	9	Color Turbiedad Aluminio Hierro	Convencional, Cloro gaseoso	Dependencia Empresa de Servicios Públicos de Guateque.	Quebrada La Tocola
4.909	Soatá	38,79	7	Color, Turbiedad, Aluminio, COT	Compacta, Cloro gaseoso	Emposoatá E.S.P.	Quebrada Las Minas
4.264	Nobsa	113,56	0	Ninguno	Compacta convencional modular, hipoclorito de sodio	Empresa de Servicios de Nobsa S.A. E.S.P.	Laguna de Tota y río Chicamocha
4.225	Miraflores	43,05	5	Ninguno	Convencional, hipoclorito de calcio	Servilengupá S.A. E.S.P.	Laguna El Ramo
3.139	Socha	68,09	3	Aluminio color	Convencional, cloro gaseoso	Municipio de Socha	Quebrada El Tirque, nacimiento Ojo de Agua, nacimiento pozo de Las Hojas

Calidad del agua de consumo, subproductos de desinfección
y riesgo de cáncer digestivo en Boyacá

Población (1)	Municipio	SPDt (µg/L)	IRCA (2)	Fuera de norma (2)	Tratamiento	Empresa (2)	Fuente (2)
1.874	Ráquira	53,66	28	Color aparente turbiedad aluminio hierro	Convencional hipoclorito de sodio	Administración pública Ráquira E.S.P.	Río Dulce
1.687	Sutamarchán	67,39	24	Color aparente turbiedad	Convencional; compacta, hipoclorito de calcio	Unidad administradora de servicios públicos del municipio de Sutamar-chán	Río La Cebada, pozo profundo, reservorio La Capellanía
1.684	El Cocuy	29,19	1	Aluminio, calcio	Planta compacta, cloro gaseoso	Municipio de El Cocuy	Quebrada la Rincónada
939	Labranza-grande	24,58	0	Ninguno	Filtros rápidos a presión + hipoclorito de calcio	Empresa de Acueducto. Alcantarillado y Aseo de Labranzagrande S.A. E.S.P.	Nacimiento Vijagual, nacimiento El Chuscal y nacimiento El Zorro.
333	Viracachá	37,53	15	Manganeso, aluminio, COT	Modular convencional, hipoclorito de Sodio	Aguas de Márquez	Quebrada Juyasia, quebrada El Chuscal

(1) Población urbana proyectada por el DANE para el año 2022.

(2) Datos reportados por la Secretaría Departamental de Salud entre el 1 enero y el 25 de diciembre de 2022.

Fuente: Elaboración propia.

La fórmula del IRCA, que establece si el agua es apta o no para consumo humano, se enfoca primordialmente en el riesgo agudo, es decir, el ocasionado por la exposición en cortos periodos de tiempo, por presencia de algunos

microorganismos patógenos. Ninguno de los acueductos urbanos muestreados estuvo entre el consolidado de parámetros que mayoritariamente incumplen a los coliformes fecales, coliformes totales o al cloro residual. Por otra parte, el COT es reportado como parámetro que afecta la calidad en Chiquinquirá, Soatá, Tunja y Viracachá. Sin embargo, no se encuentra ningún tipo de relación entre el reporte positivo de este parámetro y mayores valores de SPD, excepto para Chiquinquirá. Los parámetros que más frecuentemente se incumplen son el aluminio, la turbiedad y el color, lo que podría estar asociado con la eficiencia de los sistemas, en su mayoría convencionales y su operación. Es de esperar que el IRCA no tenga ninguna relación con los valores de SPD; por ejemplo, se observan valores muy bajos para los municipios de Chiquinquirá (IRCA = 3) y Nobsa (IRCA=0) pero las concentraciones más altas de SPD totales, AHA y SPDe.

Por el contrario, un IRCA que indica riesgo medio como el de Viracachá (IRCA=15), no refleja la calidad que se pudo observar a partir de las concentraciones de SPDt (37.5 µg/L). Otro escenario se ve en los municipios donde la calidad de la fuente es óptima como Labranzagrande y El Cocuy, que tienen IRCA muy bajos e igualmente las menores concentraciones de SPDt. Esto refleja el efecto directo de la calidad del agua a ser tratada en la formación de estas sustancias, donde las características químicas del agua de fuentes superficiales tan afectadas como el río Suárez o el río Chicamocha, no son eficazmente removidas en el tratamiento.

Por otra parte, se observó que existe una variabilidad en los resultados al comparar el SPDt de las cuatro campañas, con una desviación estándar entre el 5 % para Puerto Boyacá y el 70 % para Guateque. Puerto Boyacá, al ser el único municipio que se abastece únicamente de fuentes subterráneas, cuenta con una calidad de agua cruda con características más estables a lo largo del año y concentraciones más bajas de carbono orgánico total, lo que también se ve reflejado en valores bajos de SPD.

En general, las características de calidad no superan las normas internacionales de 80 µg/L para la suma de los 4THM: bromoformo (BF), bromodichlorometano (BDCM), dibromoclorometano (DBCM), y de 60

$\mu\text{g/L}$ para la suma de los 5AHA: ácido monocloroacético (MCA), ácido dicloroacético (DCA), ácido tricloroacético (TCA), ácido monobromoacético (MBA), ácido dibromoacético (DBA). Los promedios VPA en ningún caso superan la norma, pero al ver las muestras de manera individual, se puede decir que algunas de ellas superan estos valores establecidos por la USEPA, especialmente para los AHA. Este es el caso de Nobsa (37.5 % de las muestras superan a los $60 \mu\text{g/L}$), Chiquinquirá (34 %), Guateque (25 %), Sutamarchán (12.5 %), Socha (6.25 %), Duitama (5 %) y Sogamoso (4.7 %). Para el caso de los THM el valor de $80 \mu\text{g/L}$ solo es superado en el 6.25 % de las muestras de Sutamarchán y el 3.12 % de Nobsa. La variación de resultados entre municipios, obedece a la calidad del agua cruda, a los procesos de potabilización utilizados y a las características de la red de distribución. Para un mismo municipio, estos mismos resultados de concentración de SPD varían en función de cómo cambia la condición del agua cruda por efectos climáticos (lluvia y estiaje), y por los parámetros operativos con lo que se opera el sistema de potabilización.

Adicionalmente, los municipios de Chiquinquirá, Guateque y Nobsa tuvieron promedios por campaña superiores a la norma internacional de 5AHA. Chiquinquirá reportó $72.7 \mu\text{g/L}$ en la campaña 2; Guateque $105.4 \mu\text{g/L}$ en la campaña 1 y Nobsa $78.8 \mu\text{g/L}$ en la campaña 2, lo que indicaría un probable efecto temporal sobre el cumplimiento de este parámetro de calidad. Por lo general, periodos de más alta precipitación sobre la cuenca abastecedora, generan más arrastre de material en el agua cruda, lo que puede aumentar el contenido de materia orgánica natural, la cual es precursora en la formación de SPD. Nobsa, al ser el único municipio con el mismo número de datos para la zona urbana que, para un acueducto rural, permite establecer diferencias entre estos dos sistemas. El agua suministrada por el acueducto rural supera en un 52 % el SPDt del sistema urbano. Es así como el SPDt rural es de $137 \mu\text{g/L}$ mientras el urbano de $90.1 \mu\text{g/L}$. Los parámetros de mayor diferencia porcentual fueron el bromodichlorometano (130 %) en el grupo de THM, el ácido bromocloroacético (147 %) en el de AHA, y el 1,1,1, tricloro 2 propanona (322 %) seguido del bromocloroacetoneitrilo (293 %) en el de SPDe. Las diferencias en la calidad del agua suministrada por el acueducto urbano y rural son notorias, sobre todo en sustancias que pueden generar un

efecto toxicológico mayor, como son los bromados y los que tienen nitrógeno en su estructura molecular.

Por otra parte, es relevante ver el impacto de la calidad del agua potable en la población y de los asentamientos sobre las fuentes de abastecimiento. Es por esto que se clasificó la información de acuerdo al tamaño de la población de los municipios analizados. Los municipios de menor tamaño poblacional, menores o iguales a 2.500 habitantes, muestran los promedios ponderados de TAHA9, TSPDe6, y SPDt más bajos. Por otro lado, los de mayor población, 80.001 a 150.000 habitantes, tienen los segundos promedios ponderados de TAHA9, TTHM4, TSPDe6, y SPDt más bajos. Lo anterior se podría asociar a un menor efecto antropogénico sobre las fuentes en aquellos con menor cantidad de habitantes y una buena gestión del servicio en los más grandes, en parte por su capacidad financiera y el acceso a fuentes con una tratabilidad aceptable. Esta gestión permite que una gran cantidad de población se vea beneficiada de una buena calidad del agua, ya que la población de Tunja, Sogamoso y Duitama representa el 77 % de la población total evaluada. Caso contrario, el grupo de municipios de 2.501 a 10.000 es el que presenta los valores de promedios ponderados más altos de TAHA9, TTHM4, y SPDt. Los municipios pequeños se pueden estar viendo afectados por un desarrollo intermedio no controlado y una baja capacidad de las empresas prestadoras para la producción de agua potable baja en subproductos de desinfección de forma permanente.

Es importante prestar atención a todos los municipios, pero con especial enfoque en aquellos con mayor prevalencia de muestras por encima de la norma como Nobsa y Chiquinquirá, y los que prestan el servicio a un mayor número de habitantes, haciendo un seguimiento más frecuente a la operación y mantenimiento de los sistemas y el control de parámetros como carbono orgánico total y cloro residual, que para el caso del seguimiento llevado a cabo por la Secretaría Departamental, tiene una frecuencia que se rige por la norma, pero que para el control operativo puede ser insuficiente.

Es relevante tener en cuenta que, aunque los resultados muestran un cumplimiento generalizado de las normas internacionales, estas no se ajustan a la misma velocidad que exigen los resultados de reportes epidemiológicos.

De acuerdo a Villanueva *et al.* (8), la exposición crónica a los THM fue asociada a un riesgo dos veces mayor a contraer cáncer de vejiga en comparación a población no expuesta (THM > 49 µg/L Vs. THM < 8µg/L). Por otra parte, Jones *et al.* (14) encontraron una asociación positiva entre la exposición más alta a THM y el cáncer rectal (7.83 µg/L Vs. THM < 0.68 µg/L). Esto quiere decir que a partir de valores superiores a 8 µg/L de THM se podrían observar efectos, lo que indicaría un riesgo probable en todos los municipios. Lo anterior genera una pequeña alarma y un llamado al seguimiento y control de la operación de los sistemas de potabilización, en términos de producción de este tipo de sustancias no deseadas.

Desafíos y perspectivas

La diversidad de condiciones en el departamento de Boyacá (i.e. tamaño de municipios, fuentes de abastecimiento, operadores de los sistemas de producción, estado y operación de los trenes de tratamiento y producción, etc.) hacen de la gestión del agua todo un desafío. Para el caso del agua potable, la gestión debe ir ligada a un manejo adecuado de las diferentes etapas del sistema, un control desde la fuente hasta el usuario. Esta gestión incluye el control de la calidad del agua potable, en este caso particular, de las sustancias que no hacen parte del índice de riesgo de la calidad del agua (IRCA), tales como los subproductos de desinfección.

Si bien la mayoría de los datos de concentración de subproductos de desinfección encontrados en los 15 municipios del departamento cumplen con la norma nacional (caso de los THM), y con normas y valores de referencia internacionales (caso de los AHA y algunos SPDE), esto no es sinónimo de bajo riesgo de afectación en la salud pública, pues en el cálculo del riesgo no solo es importante la concentración de las sustancias, sino también la exposición a las mismas y los diversos efectos negativos que sobre la salud humana tiene cada una de estas sustancias.

La cuantificación del riesgo permite una mejor toma de decisión sobre el nivel de medidas requerido, y la focalización de estas, para minimizar los efectos negativos sobre la salud pública asociables a diversos tipos de sustancias.

Por tanto, se hace indispensable complementar este ejercicio de cuantificación de concentraciones de algunos subproductos de desinfección, con estudios sobre la forma como la población boyacense se expone a estos por la vía inhalatoria, de forma dérmica y por ingesta. Es decir, se requiere estudios sistemáticos relativos al uso del agua potable que hacen las personas en el departamento.

A partir de este análisis de exposición, y teniendo los datos de concentración, se puede realizar la cuantificación del riesgo, la cual demanda muchos datos técnicos específicos, que no existen para Boyacá, ni para Colombia. En este caso, se pueden hacer diversos tipos de suposiciones bajo diferentes escenarios, que permitan una aproximación de esta cuantificación del riesgo. A partir de este segundo mejor, se podrán tomar decisiones para minimizar el riesgo sobre la salud pública, asociable a los efectos de estos subproductos de desinfección. No es excusa la ausencia de información específica para todas las variables que demanda este tipo de ejercicios. Es urgente el uso de los estudios de cuantificación de riesgo que orienten sobre mejores prácticas que lleven hacia la minimización del riesgo en salud pública.

Este primer ejercicio de cuantificación de subproductos de desinfección con respecto a Boyacá, requiere ser mejorado. Es recomendable hacer medidas sistemáticas de este tipo de subproductos, y de otros aun más tóxicos (p. ej. halonitrometanos, halofuranonas, halocetonas, entre otros), en todos los municipios del departamento. Por supuesto, medir tantas sustancias en tan diversos puntos urbanos y rurales demanda una gran inversión de recursos, por lo que una alternativa puede ser la medición del nivel de toxicidad, la cual permite evidenciar el efecto negativo en la salud pública, de la exposición a la mezcla de diversas sustancias presentes en el agua potable (p. ej. ensayos con células humanas o de homínidos). De igual manera, es imperativo el desarrollo de estudios en todo el departamento, en cascos urbanos y en zonas rurales, sobre el nivel de exposición que al agua potable tiene la población. Estos estudios pueden ser actualizados cada 10 años. Aparece entonces el desafío de implementar las técnicas analíticas adecuadas con bajos límites de detección en los laboratorios del departamento, para la medición de subproductos o toxicidad, que permitan un mejor acceso a los municipios

y a la población al conocimiento de la presencia de estas sustancias. Como las sustancias precursoras de estos subproductos de desinfección son los desinfectantes clorados, la cantidad de materia orgánica y el nitrógeno en el agua cruda, se pueden considerar estrategias de desinfección alternativas al uso de sustancias cloradas, como la desinfección por radiación UV, la cual se hace cada día más asequible, y la búsqueda de fuentes de agua cruda alternativas. Igualmente, se debe llegar al monitoreo permanente de la materia orgánica por medio de los indicadores COT, UV₂₅₄, SUVA y de las sustancias nitrogenadas en el agua cruda, que permitan garantizar que las fuentes de abastecimiento tienen y mantienen un bajo potencial de formación de subproductos de desinfección. Debido al alto coste de hacer mediciones en línea de COT, la alternativa de mediciones *In situ* de UV₂₅₄ como un indicador global para tomar decisiones rápidas ha sido extendida y ampliamente sugerida.

Finalmente, es muy importante capacitar de manera recurrente a los usuarios y los operadores de los sistemas de generación y suministro de agua potable (urbanos y rurales) en el tema de los subproductos de desinfección, sus orígenes, sus efectos en salud y su control, así como a los tomadores de decisión. Por supuesto, todas estas estrategias de gestión y el reconocimiento de las áreas de mejora requieren del trabajo conjunto y el compromiso de todos los actores del sistema, desde la fuente hasta el punto de uso como operadores, reguladores, gestores y usuarios, más aún con efectos externos que pueden modificar abruptamente las condiciones de los sistemas de abastecimiento como el cambio climático.

Referencias

- 1) Richardson SD, Plewa MJ, Wagner ED, Schoeny R, DeMarini DM. Occurrence, genotoxicity, and carcinogenicity of regulated and emerging disinfection by-products in drinking water: A review and roadmap for research. *Mutation Research - Reviews in Mutation Research*. 2007. 636, 178-242. [https://doi: 10.1016/j.mrrev.2007.09.001](https://doi.org/10.1016/j.mrrev.2007.09.001).
- 2) Dueñas-Celis, MY, Dorado-González LM, Espinosa-Macanal P, Suescún-Carrero SH. Índice de riesgo de la calidad del agua para consumo

humano en zonas urbanas del departamento de Boyacá, Colombia 2004-2013. 2018. *Revista Facultad Nacional De Salud Pública*, 36(3). <https://doi.org/10.17533/udea.rfnsp.v36n3a10>.

3) Crosby LM, Simmons JE, Ward WO, Moore TM, Morgan, KT, DeAngelo AB. Integrated disinfection by-products (DBP) mixtures research: Gene expression alterations in primary rat hepatocyte cultures exposed to DBP mixtures formed by chlorination and ozonation/postchlorination. 2008. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A* 71: 1195-1215. <https://doi.org/10.1080/15287390802182581>.

4) Donohue JM, USEPA. Toxicological Review of Dichloroacetic Acid (CAS No. 79-43-6): In Support of Summary Information on the Integrated Risk Information System (IRIS). 2003. US Environmental Protection Agency.

5) USEPA. Preparing Your Drinking Water Consumer Confidence Report: Revised Guidance for Water Suppliers: United States Environmental Protection Agency, Office of Water. 2001.

6) WHO. Guidelines for drinking-water quality: World Health Organization, Distribution and Sales Geneva 27 CH-1211. 2004. Switzerland.

7) Olmedo MT. Subproductos de la desinfección del agua por el empleo de compuestos de cloro. Efectos sobre la salud. 2008. *Higiene y Sanidad Ambiental*, 8, 335-342. ISSN 1579-1734.

8) Villanueva CM, Cantor KP, Grimalt JO, Malats N, Silverman D, Tardon A, Garcia-Closas, R, Serra C, Carrato A, Castaño-Vinyals G, Marcos R, Rothman N, Real FX, Dosemeci M, Kogevinas M. Bladder cancer and exposure to water disinfection by-products through ingestion, bathing, showering, and swimming in pools. 2007. *American Journal of Epidemiology*, 165(2):148-56. <https://doi: 10.1093/aje/kwj364>.

9) Villanueva CM., Espinosa A, Gracia-Lavedan E, Vlaanderen J, Vermeulen R, Molina A. J, Amiano P, Gómez-Acebo I, Castaño-Vinyals G, Vineis P, Kogevinas M. Exposure to widespread drinking water chemicals, blood inflammation markers, and colorectal cancer. 2021. *Environment International*, 157, 106873. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106873>.

10) Le Curieux F, Giller S, Gauthier L, Erb F, Marzin D. Study of the genotoxic activity of six halogenated acetonitriles, using the SOS chromotest, the Ames-fluctuation test and the newt micronucleus test. 1995. *Mutation Research/Genetic Toxicology*, 341, 289-302. [https://doi: 10.1016/0165-1218\(95\)90100-0](https://doi.org/10.1016/0165-1218(95)90100-0).

11) USEPA. Stage 2 Disinfectants and Disinfection Byproducts Rule: A Quick Reference Guide for Schedule 1 Systems. 2006. Disponible en: <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi?Dockey=P100A2D4.txt>.

12) DANE. Proyecciones de población. 2023. Disponible en: <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/demografia-y-poblacion/proyecciones-de-poblacion>.

13) Antweiler RC, Taylor HE. Evaluation of statistical treatments of left-censored environmental data using coincident uncensored data sets: I. Summary statistics. 2008. *Environmental Science and Technology*, 42(10):3732-8. doi: 10.1021/es071301c. PMID: 18546715.

14) Jones RR, DellaValle CT, Weyer PJ, Robien K, Cantor KP, Krasner S, Beane-Freeman LE, Ward MH. Ingested nitrate, disinfection by-products, and risk of colon and rectal cancers in the Iowa Women's Health Study cohort. 2019. *Environment international*, 126, 242-251. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.02.010>.

15) Onstad GD, Weinberg HS, Krasner SW. Occurrence of Halogenated Furanones in U.S. Drinking Waters. 2008. *Environmental Science & Technology* 42: 3341-3348. <https://doi.org/10.1021/es071374w>.