



CARACTERIZACIÓN DE LOS NIVELES DE SUBPRODUCTOS MAYORITARIOS DE LA CLORACIÓN EN MUESTRAS DE AGUA POTABLE

CHARACTERIZATION OF THE LEVELS OF MAJOR CHLORINATION BY-PRODUCTS IN DRINKING WATER SAMPLES

¹ Olga Lucía Borda Prada

² Ariel Guerrero Rodríguez

³ Andrea Carolina Moreno Merchán

Recibido: mayo 9, 2020

Aceptado: diciembre 12, 2020

Resumen

Los trihalometanos (THMs) son uno de los subproductos mayoritarios formados por la reacción del cloro residual -que permanece en el agua debido a los procesos de desinfección- y la materia orgánica que está presente de manera natural. Su determinación es de especial interés en la gestión del recurso hídrico debido al riesgo toxicológico asociado a la función reproductora y a la posibilidad de generar cáncer. En esta investigación se realizó el análisis de THMs; Cloroformo (CHCl_3), clorodibromometano (CHCl_2Br), bromodibromometano (CHClBr_2) y tribromometano (CHBr_3), y la evaluación de su impacto en la calidad del agua en una planta de tratamiento de agua potable ubicada en el municipio de Cogua, una de las más importantes del departamento de Cundinamarca, Colombia, que abastece alrededor de 170.000 habitantes. La determinación analítica se realiza a través de la adecuación de una técnica espectrofotométrica U.V – VIS. Los resultados obtenidos se correlacionan con las variables: cloro residual, carbono orgánico, ultravioleta absorbancia en 254 nm y pH. Por otro lado, la caracterización geográfica, morfología, hídrica y espacial de la zona objeto de estudio, zona de influencia y puntos de muestreo se ha

1 Universidad La Gran Colombia, Bogotá D. C. - Colombia.
Email: olga.borda@ugc.edu.co

2 Universidad La Gran Colombia, Bogotá D. C. - Colombia.
Email: ariel.guerrero@ugc.edu.co

3 Universidad La Gran Colombia, Bogotá D. C. - Colombia.
Email: andrea.moreno@ugc.edu.co

apoyado en el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y herramientas de mapeo. La implementación de las fases que constituyen la investigación permitió revisar el estado del arte sobre subproductos de la cloración, así como la caracterización de la zona de estudio e identificación de la zona de muestreo, la adecuación de ciertos parámetros analíticos y el diseño de una aplicación para la gestión de datos experimentales.

Palabras clave: Trihalometanos, cloro residual, materia orgánica, potencial de hidrógeno.

Abstract

THMs are one of the major by-products formed by the reaction of residual chlorine -which remains in water due to disinfection processes and naturally occurring organic matter. Their determination is of special interest in water resource management due to the toxicological risk associated with reproductive function and the possibility of generating cancer. In this research, the analysis of THMs Chloroform: CHCl_3 , chlorodibromomethane: CHClBr_2 , bromodichloromethane: CHCl_2Br and tribromomethane: CHBr_3 , and the evaluation of their impact on water quality in a drinking water treatment plant located in the municipality of Cogua, one of the most important in the department of Cundinamarca, Colombia, which supplies about 170,000 inhabitants. The analytical determination is carried out through the adaptation of a U.V-VIS spectrophotometric technique. The results obtained are correlated with the variables: residual chlorine, organic carbon, ultra violet absorbance at 254 nm and pH. On the other hand, the geographic, morphological, hydric and spatial characterization of the area under study, area of influence and sampling points has been supported by the use of Geographic Information Systems (GIS) and mapping tools. The implementation of the phases that constitute the research allowed reviewing

the state of the art on chlorination by-products, as well as the characterization of the study area and identification of the sampling area, the adequacy of certain analytical parameters and the design of an application for the management of experimental data.

Keywords: Trihalomethanes, residual chlorine, organic matter, hydrogen potential.

1. Introducción

La adecuada gestión del recurso hídrico resulta uno de los aspectos más fundamentales en relación con la salud pública. En este sentido, se han creado ciertos marcos legales para ejercer un control sobre el suministro y la calidad de este recurso ecosistémico.

La Organización Mundial de la Salud (OMS) se ha esforzado por explicar y difundir los procedimientos mínimos y los valores de referencia necesarios para garantizar la "inocuidad" del agua. Con cada actualización de las *Guías para la calidad del agua potable* de la OMS, se hace evidente que uno de los principales riesgos para el agua potable es el material microbiano.

Una de las técnicas más utilizadas para controlar este riesgo microbiano (bacterias, virus y protozoarios) es la cloración, aunque también se puede utilizar el ozono y la radiación ultravioleta. Esta técnica es una de las más efectivas y de bajo coste, sin embargo, puede generar algunos residuos que representan un riesgo asociado a la calidad del agua.

Así, se propone una investigación cuyo problema está relacionado con la determinación de los niveles de los residuos mayoritarios de la cloración, que se denominan trihalometanos (THMs). Esta determinación se realiza en la planta regional ubicada en el municipio de Cogua, conurbado con Zipaquirá, que abastece a un importante



número de usuarios y no cuenta con datos sobre la evaluación del riesgo de posibles niveles de THMs. Se menciona el “riesgo” porque se asocian a la posibilidad de generar cáncer, como se describe en uno de los apartados de este documento.

El enfoque de la investigación es cuantitativo, ya que consiste en evaluar los niveles de residuos de CHCl_3 , CHClBr_2 , CHCl_2Br y CHBr_2 (THMs) y correlacionarlos con las variables: pH, temperatura, cloro residual y carga orgánica.

En cuanto a la caracterización de los THMs en agua potable, se han desarrollado investigaciones que justifican la importancia de evaluar sus niveles en la planta de tratamiento. A continuación se señalan algunos estudios:

En relación con la determinación de THMs, se adecuó una técnica de Cromatografía de Gases (CG) suficientemente sensible, obteniéndose así un método que permite la cualificación y cuantificación de las especies cloradas (Pavón *et al.*, 2008).

Un estudio para evaluar la calidad del agua potable mediante la correlación de la demanda de cloro con el nivel resultante de THMs, concluyó que el tiempo de reacción del cloro y su concentración favorecen casi de manera exponencial la producción de estos subproductos (Abdullah *et al.*, 2009).

En 2008, se diseñó una técnica analítica de CG utilizando también la espectrometría de masas, esta presentó un rango lineal más amplio, lo que mejoró la repetitividad de los resultados y el límite de detección, sin embargo, el tiempo de extracción de la muestra debe ser mayor (Aguilera-Herrador *et al.*, 2008).

En el año 2000 se realizó una determinación de THMs en muestras de agua de centrales eléctricas, teniendo en cuenta que los efluentes de enfriamiento son clorados para evitar ataques microbiológicos, la investigación fue muy relevante debido al riesgo de formación de THMs que puede presentarse. En los resultados de este trabajo se reportaron concentraciones entre 0.5 y 97.5 mg l⁻¹ de THMs luego de 2 años de muestreo (Allonier *et al.*, 2000).

En 2013, se realizó una valoración de los niveles de residuos de THMs en los sistemas de abastecimiento de agua en el sur de Lazio (Italia), con la que afirmaron que el uso de predicciones empíricas no resulta tan adecuado, por lo que los modelos cinéticos son más confiables (Di Cristo *et al.*, 2013).

En 2018, se advierte sobre los riesgos de tipo cancerígeno que los THMs pueden representar para la salud humana y también se afirma que en Rusia los niveles de estos subproductos pueden exceder las normativas vigentes en ese país. Determinaron precloración 40-61 µg / l de cloroformo y poscloración 192-215 µg / l del mismo (Govorova *et al.*, 2018).

En una investigación sobre los subproductos de la cloración, se obtuvieron resultados relacionados con la descomposición de los ácidos trihaloacéticos y la formación de THMs (Zhang *et al.*, 2002).

Asimismo, otro estudio permitió determinar los niveles de THMs, correlacionando sus resultados con el contenido de carbón orgánico, cloro residual, coliformes y turbiedad. Se encontró que el nivel de THMs era superior en invierno (0.1 mg/L) y que el contenido de coliformes afecta a las trazas de cloroformo (Hernández, 2016).

Tratamiento microbiano del agua por adición de cloro

La implementación de estas técnicas de desinfección tiene por objeto garantizar la seguridad del agua, desde el punto de vista fisicoquímico y microbiológico. El primero se refiere a propiedades organolépticas, sólidos totales (disueltos y en suspensión), dureza, alcalinidad, fluoruros, metales, materia orgánica, entre otros, y, el segundo, se refiere al control de los microorganismos que puedan afectar a la calidad del agua.

Así, la adición de cloro representa uno de los tratamientos más utilizados, debido a su bajo coste y efectividad. Esto último se atribuye a la alta capacidad de oxidación y a la velocidad de difusión celular de los microorganismos (Esquivel, 2016).

A continuación, en la figura 1 se describen algunas formas de cloro que se utilizan usualmente en la desinfección del agua potable.

En la figura 1 se describen algunas formas de cloro que se utilizan usualmente en la desinfección del agua potable.

Figura 1. Algunos compuestos de cloro utilizados en la desinfección del agua



En general, los compuestos de cloro descritos presentan una importante efectividad en el tratamiento del agua potable, sin embargo, es importante diferenciar entre el efecto desinfectante y oxidante que pueden tener, por lo que, aunque estos procesos ocurren en paralelo, su comportamiento depende en gran medida de la variable pH. En este sentido, un pH alto favorece

su impacto oxidante y, en sentido contrario, su impacto como desinfectante (Martí, 2003).

Técnicas de cloración

Las muestras de agua contienen una cierta cantidad de sólidos totales, algunos de los cuales son degradados por la carga microbiana que se



encuentra de manera natural. Esta degradación requiere ciertas cantidades de cloro.

Así, en una planta de tratamiento de agua potable se pueden aplicar varios tipos de cloración y su elección está relacionada con las características del agua que se va a tratar.

Las reacciones del cloro con los sólidos de origen inorgánico son más rápidas que las que surgen con los orgánicos y, en este último caso, suele

ser necesario un exceso de demanda de cloro (Oliveira, 2011). Por lo tanto, la dosis de este desinfectante depende de la demanda mencionada y de ciertas variables como la alcalinidad, la temperatura, entre otras. Una vez finalizada la reacción entre estos sólidos y el cloro, queda un nivel residual de este desinfectante en el agua, que se denomina “cloro residual”. La figura 2 describe las técnicas de cloración más utilizadas.

Figura 2. Técnicas de cloración

CLORACIÓN SIMPLE	CLORACIÓN RESIDUAL LIBRE	CLORACIÓN RESIDUAL COMBINADA	CLORO VS. COMPUESTOS ORGÁNICOS	CLORO VS. COMPUESTOS INORGÁNICOS
· Indicada para aguas con poca materia orgánica, el cloro se constituye en el reactivo límite reaccionando rápidamente	· De manera controlada se adecuan dosis con exceso de cloro durante el proceso de desinfección, a la salida de la planta y a lo largo de la red.	· Se basa en la generación de amoníaco y cloro residual (tipo cloraminas) por adición de cloro.	· El hipoclorito reacciona actúa sobre las sustancias húmicas, dando lugar a productos orgánicos clorados y aromáticos	· Se generan reacciones del cloro con nitrógeno, hierro, magnesio y bromuro

Por lo general, en un sistema de suministro de agua, la cloración suele realizarse al final del tratamiento, después de la etapa de filtración. Esto se denomina a menudo poscloración. A veces, la cloración se realiza antes de cualquier otro tratamiento, lo que se denomina precloración (Solsona & Méndez, 2002).

Subproductos de la cloración

El “cloro libre” resultante de la cloración reacciona con la Materia Orgánica (MO) contenida en las aguas naturales, que puede estar disuelta o suspendida. Como resultado de esta reacción, se generan subproductos indeseados en las muestras de agua que interfieren con la “inocuidad” del agua.

Los subproductos que pueden formarse en concentraciones más altas son los trihalometanos (THMs), que representan un campo de estudio relevante debido a su alta toxicidad (Pavón et al., 2008). Son 4 los subproductos que forman parte de los THMs: el cloroformo (CHCl_3), el dibromoclorometano (CHClBr_2), el bromodibromometano (CHBr_2Br) y el bromoformo (CHBr_3), que son asociados con el cáncer de hígado, riñón y vejiga y con efectos sobre la reproducción. La relación causa-efecto respecto a su toxicidad aún no se ha inferido con plena certeza (Sánchez, 2008).

La normativa colombiana (Resolución 2115 de 2007) regula el nivel de THMs total, que es de 0,2 ppm. Suprime el control de, por ejemplo, el

cloroformo, que puede ser altamente peligroso. Esto contrasta con lo estipulado por la OMS, ya que ejerce un control específico de cada producto que constituye el grupo de los THMs (OMS, 2012). Véase la tabla 1.

Tabla 1. Niveles permisibles de THMs en el agua potable

Valores de referencia	
Cloroformo	0,3 mg/l
Bromoformo	0,1 mg/l
Dibromoclorometano (DBCM)	0,1 mg/l
Bromodichlorometano (BDCM)	0,06 mg/l

Nota. Tomado de Guías para la calidad del agua potable de la OMS, 2012.

Variables que favorecen la formación de trihalometanos (THMs)

La temperatura, el pH, el contenido de materia orgánica y el nivel de residuos de cloro determinan la concentración de subproductos de la desinfección, como los THMs.

Así, a altas temperaturas y con un pH superior a 7, el nivel de THMs puede aumentar y, de forma similar, cuando aumenta la cantidad de materia orgánica o concentración de cloro.

En este sentido, en las aguas superficiales durante el verano, las concentraciones de THMs pueden ser más altas que en las aguas subterráneas, debido también a la variación en la cantidad de materia orgánica. Por otro lado, la presencia de bromo en el agua también favorece la producción de THMs.

Toxicidad de los trihalometanos (THMs)

Como se ha mencionado anteriormente, el cloro es fundamental y casi insustituible para la desinfección o el control microbiano del agua

potable. Sin embargo, algunas investigaciones sugieren efectos adversos para la salud humana debido a las sospechas sobre su influencia en enfermedades como el cáncer.

En la década de 1970, se realizaron estudios epidemiológicos para determinar la relación entre el cáncer y el agua potable. En la actualidad, se sigue investigando para determinar el riesgo de contraer cáncer de vejiga y colon por la ingestión de THMs.

En este sentido, en un estudio realizado en Canadá con una muestra de 10.000 habitantes, se realizó un seguimiento de la población durante 10 años de residencia en el país. Durante este período, se determinaron las siguientes variables: fuente de agua, concentración de asbestos, carbón orgánico total, THMs con y sin cloroformo, concentración de cloro y dureza del agua. Finalmente, no se detectó ninguna asociación significativa entre las dosis de cloro y la muerte por diferentes tipos de cáncer (Calderón, 2000).

Sin embargo, los resultados mostraron un riesgo de cáncer de vejiga y de colon en los adultos mayores de 60 años.

Otros estudios (Govorova *et al.*, 2018; Aguilera-Herrador *et al.*, 2008; Allonier *et al.*, 2000) también han mostrado la creciente preocupación por los riesgos asociados a los THMs, por lo que es necesario que las plantas de tratamiento de agua potable evalúen constantemente los procesos de desinfección con cloro y los niveles de subproductos resultantes.

2. Materiales y Métodos S

En el marco de la problemática descrita, se llevan a cabo 4 fases de investigación: (1) caracterización de la zona objeto de estudio, (2) toma de muestras en la planta potabilizadora y evaluación de los parámetros de calidad in situ, (3) adecuación de una técnica analítica por espec-



trofotometría UV-VIS para la determinación de los niveles de trihalometanos (THMs), y (4) evaluación de riesgo asociado a los niveles de THMs y variabilidad de estos niveles en relación con el pH, la temperatura, el cloro residual y el carbono total.

Las fases 3 y 4 aún se encuentra en proceso de implementación.

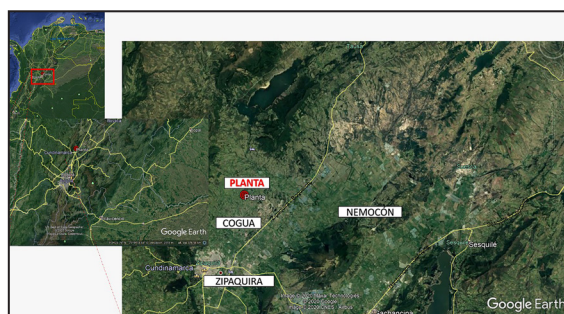
3. Resultados

A continuación, se describen los alcances por fases mencionadas:

3.1. Caracterización de la Zona Objeto de Estudio

La planta de tratamiento de agua potable está ubicada en el municipio de Cogua en el departamento de Cundinamarca, Colombia. Se encuentra a 55 km al norte de la capital de la república, Bogotá, y sus municipios vecinos a 5 km y 15 km, Zipaquirá y Nemocón, respectivamente. Véase la figura 3.

Figura 3. Localización general del área, Cogua, Cundinamarca, Colombia



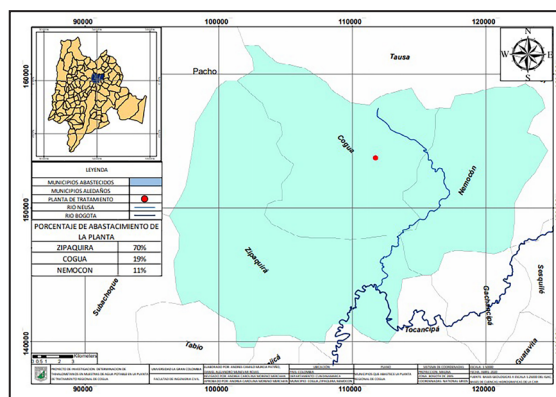
Nota. Tomado de: Google Earth®.

La planta suministra agua potable a los municipios de Zipaquirá, Cogua y Nemocón, y presta el servicio en la siguiente proporción: para Zi-

paquirá el 70% del agua para 80.000 habitantes, para Cogua el 19% para 9.000 habitantes y para Nemocón el 11% para 4.000 habitantes. Véase la figura 4.

El río Neusa es el principal afluente de abastecimiento de la planta. La figura 5 muestra la subcuenca de este río, que tiene un área de 44.734 hectáreas y un cauce principal con una longitud aproximada de 45,1 km. En esta figura también se muestran los afluentes que llegan al río Neusa y forman el drenaje de esta cuenca desde su inicio hasta su desembocadura en el río Bogotá.

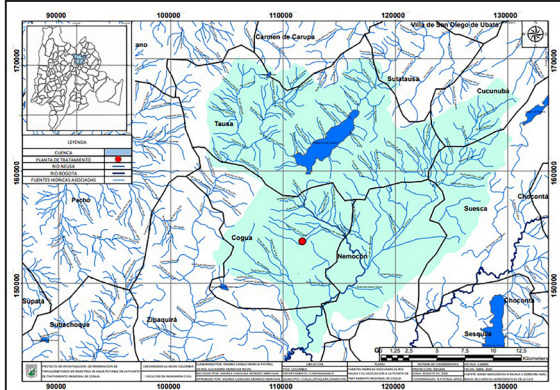
Figura 4. Localización de la planta de tratamiento de agua potable



Los servicios de agua, alcantarillado y aseo en los municipios de Cogua, Nemocón y Zipaquirá son prestados por la Empresa de Acueducto, Alcantarillado y Aseo de Zipaquirá (EAAAZ ESP).

La Corporación Autónoma Regional (CAR), el Instituto de Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) y la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB) son las entidades encargadas de los registros a nivel ambiental y climatológico de la zona de la subcuenca.

Figura 5. Fuentes hidrológicas asociadas al río Neusa, subcuenca hidrográfica del río Neusa



En el marco de la evaluación de la calidad del agua, también es importante conocer la calidad del agua que se va a tratar y, a su vez, si tiene algún tipo de contaminante que pueda incrementar el contenido de THMs al hacer su procesamiento, por ejemplo, por contenido de materia orgánica o cualquier otro tipo de residuo asociado al desarrollo antrópico de la zona. Por lo tanto, se realizó una evaluación de la amenaza, la vulnerabilidad y el riesgo de contaminación en la zona asociado al uso del suelo como un marco probable de cambio en las condiciones iniciales del agua a tratar.

Se utilizó una metodología diferenciada para valorar la amenaza y la vulnerabilidad de la zona. Para la amenaza, se realizó de acuerdo con el manual *Metodología para evaluar los riesgos* del Departamento Nacional de Planeación de la República de Colombia (Lozano & Caicedo, 2019). Para la evaluación de la vulnerabilidad del recurso hídrico superficial a la contaminación, se empleó una adaptación del método del índice GOD

(Groundwater hydraulic confinement, Overlaying strata, Depth to groundwater table) (Vargas & Tosse, 2010). Finalmente, el riesgo se obtuvo como producto de la relación de la amenaza y la vulnerabilidad.

De acuerdo con el manual *Metodología para evaluar los riesgos* para la evaluación de la amenaza de contaminación del recurso hídrico, se consideró el peligro latente de algún tipo de evento físico y la determinación del criterio de frecuencia para la priorización de las amenazas, se procedió a estimar la amenaza en la zona de estudio, teniendo en cuenta el uso del suelo (CAR, 2015), que para nuestro caso de estudio es el factor asociado a la contaminación de las fuentes superficiales y sus efectos. Una vez realizada la evaluación, se determinaron las zonas con valores de amenaza homogéneos, que se muestran en el mapa de la figura 6.

Con la metodología adaptada del índice GOD, se determina que el valor de la vulnerabilidad varía, este resultado oscila entre 0 y 1, y se calcula mediante la ecuación 1:

$$\text{Índice GOD} = G * O * D = 0 - 1$$

Ecuación 1. Índice GOD

Se consideró entonces que la vulnerabilidad asociada a la contaminación del recurso hídrico superficial por el uso del suelo está en función de diferentes características, como la distancia del punto de contaminación al acuífero (D), la condición del acuífero, es decir, su grado de confinamiento (G) y, por último, su substrato litológico (O), que tendrá la capacidad de atenuar por retención o reacción fisicoquímica a los contaminantes.



Figura 6. Mapa de la amenaza de la subcuenca del río Neusa utilizando los usos del suelo de la zona

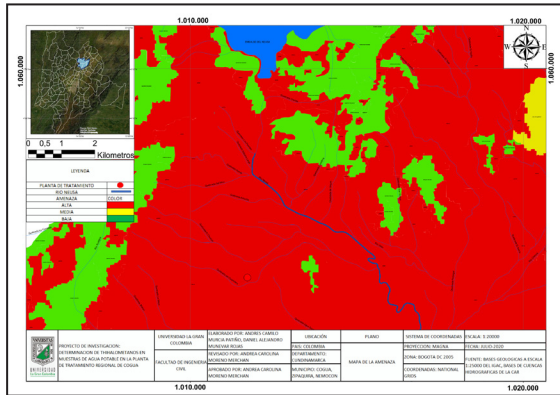
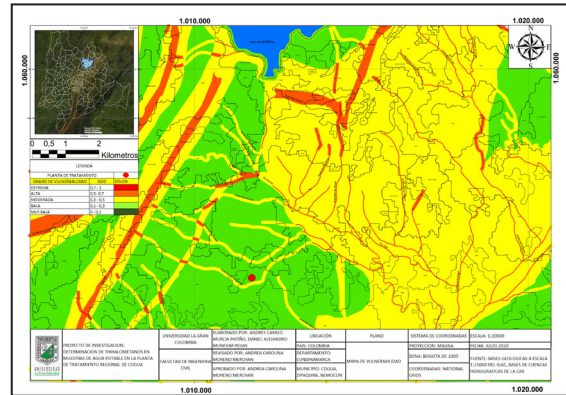


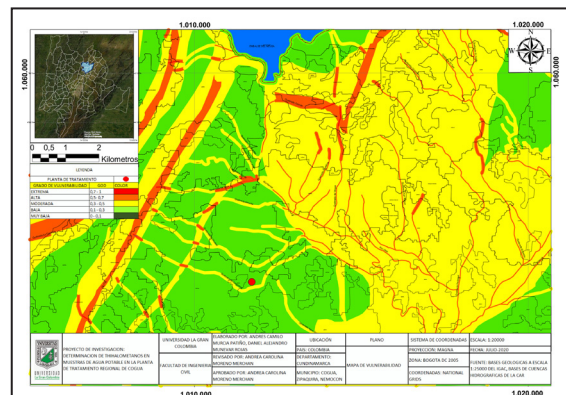
Figura 7. Mapa de vulnerabilidad de la zona de estudio utilizando los resultados dados por el índice GOD



Para el valor de G, en la zona de estudio, se determinó que para todo el acuífero el valor de G será 1 porque el estudio considera solo los afluentes superficiales del río Neusa, que son considerados no confinados por este en superficie. Para hallar el valor de O, se asocia a las condiciones litológicas del terreno, de acuerdo con el mapa geológico, plancha 209 – Zipaquirá (1:100.000, 2003) del Servicio Geológico Colombiano y el informe de la geología de la plancha 209 – Zipaquirá (Montoya & Reyes, 2003). Se procedió a estimar los valores según esta litología registrada y los valores para cálculo de vulnerabilidad según el método GOD. Finalmente, se calculó el valor de D, donde se analizó con lo dado por el método GOD, en el cual se asocia las distancias de las fuentes hídricas y su valor para el método. Estas se calcularon usando el programa ArcMap 10.7, teniendo como punto principal la planta de tratamiento regional de Cogua. Una vez obtenidos estos valores, se realizó el producto y se obtuvieron áreas con valores homogéneos de vulnerabilidad para la zona, que se muestran en el mapa de la figura 7.

Para la estimación de riesgo se utilizó el producto de la relación entre la amenaza y la vulnerabilidad, los valores de riesgo se tomaron con base en Vargas y Tosse (2010), donde se consideran valores desde muy bajos (verde oscuro) hasta extremos (rojo). Utilizando los resultados y haciendo la integración de los mismos, se obtuvieron los resultados de riesgo de la zona, que se muestran en el mapa de la figura 8.

Figura 8. Mapa del riesgo de la zona de estudio de la zona



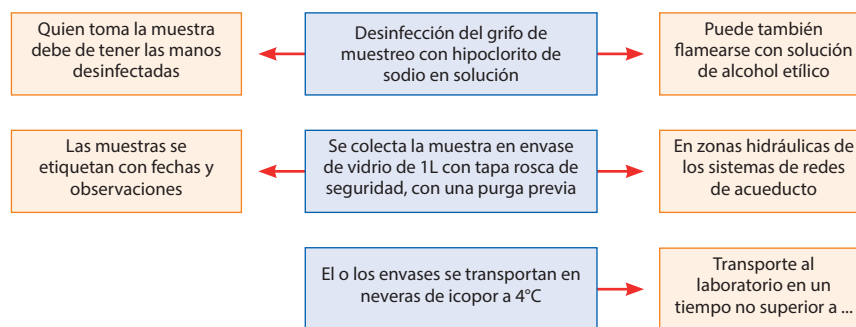
3.2. Muestreo en Planta de Tratamiento de Agua Potable

El muestreo se realiza en la planta de tratamiento de agua potable durante un período de 7 meses con una frecuencia de dos veces al mes (EPA, 2014). Esta frecuencia de muestreo se debe a que los niveles de THMs varían en relación con

el factor climático, el pH, el cloro residual, entre otros.

La figura 9 presenta la generalidad del protocolo de muestreo que se está implementando.

Figura 9. Protocolo general de muestreo



Nota. Adaptado del Instituto Nacional de Salud, 2011.

Las muestras se recogieron en los grifos conectados con la red de distribución de la planta de tratamiento compacta y convencional.

Los procedimientos generales de muestreo se describen a continuación (INS, 2011):

- Limpieza y desinfección del grifo de muestreo con una solución de hipoclorito de sodio al 10% de cloro activo.
- Drenaje del agua estancada durante 1 o 2 minutos.
- Lavado de los recipientes de muestreo, con agua y detergente comercial, que son de vidrio en borosilicato.
- Para la medición del pH *in situ*, se recogen 50 mL de la muestra en un recipiente de plástico y se registra este valor en un tiempo máximo de 15 minutos.
- Para la determinación de los THMs, se utiliza un recipiente con tapa rosca en el que se recogen 1.000 mL de muestra por réplica y se refrigera a una temperatura cercana a los 4°C, la determinación se realiza en un máximo de 14 días.
- Para el análisis de carbono total, se utiliza un recipiente de vidrio y se añade una solución de HCl hasta que el pH se ajusta por debajo de 2, además, cada réplica se refrigera y el tiempo máximo de la muestra es de 7 días.
- Para la medición *in situ* del cloro residual libre, se utiliza un recipiente de vidrio en el que se deposita un volumen mínimo de 500 mL.
- Para la medición *in situ* de la temperatura, se recogen 50 mL de la muestra en un recipiente de plástico y se registra este valor en un tiempo máximo de 15 minutos.



3.3. Adecuación de una Técnica Analítica para la Determinación de THMs por Espectrofotometría UV-VIS

La determinación se basa en la implementación del método *Fujiwara* (Huang *et al.*, 1984), cuyas generalidades se describen a continuación:

Preparación de la curva de calibración:

1. Preparar una solución de 1 uL/mL de cloroformo (CHCl_3) en metanol⁴.
2. En balones aforados de 500 mL se adiciona las siguientes cantidades de la solución metanólica de cloroformo con una micropipeta (10 – 100 uL). Aforar con agua desionizada.

La tabla 2 presenta la concentración en (ug/L) con respecto al volumen en (mL) de CHCl_3 .

Tabla 2. Curva de calibración

Volumen de CHCl_3 (mL)	Concentración (ug/L)
0	0
10	29,7
25	74,2
50	148,3
70	207,6
100	296,7

En la ecuación (1) se presentan los cálculos de muestra:

$$\frac{50 \text{ ug } \text{CHCl}_3}{50 \text{ mL de } \text{CH}_3\text{OH}} \times \frac{1,483 \text{ mg } \text{CHCl}_3}{1 \text{ uL de } \text{CHCl}_3} \times \frac{0,05 \text{ mL } \text{CH}_3\text{OH}}{0,5 \text{ L de } \text{H}_2\text{O}} \times \frac{1000 \text{ ug } \text{CHCl}_3}{1 \text{ mg de } \text{CHCl}_3}$$

4 Para 50 uL de CHCl_3 , llevar a un volumen de 50 mL con metanol.

3. En un embudo de decantación se adiciona una alícuota de 50 mL de la solución acuosa del paso anterior y se adicionan 5 mL de n-pentano, se agita varias veces y se deja en reposo.
4. Separar la fase orgánica en un tubo de ensayo.
5. Adicionar al tubo de ensayo 1,5 mL de piridina y 1,0 mL de hidróxido de sodio (NaOH) 50%.
6. Agitar 3 minutos en vórtex.
7. En baño termostático, coloque los tubos de ensayo en los siguientes intervalos:
 - 45°C por 30 minutos
 - 55°C por 45 minutos
 - 92°C por 45 minutos

Tras este paso, se generará una fase superior de color rosado. Con ayuda de una pipeta Pasteur, transferir el líquido de color rosado a una celda de 1 cm para su lectura en un espectrofotómetro UV-VIS a una longitud de onda de 550 nm.

Algunas precauciones sobre el método

- Controlar el tiempo entre la transferencia del complejo coloreado y la lectura en el espectrofotómetro UV-VIS (30 segundos – 1 minuto).
- No retire el medio básico del tubo de ensayo, ya que esto provocará la pérdida de color del complejo.
- Intentar realizar la lectura a 550 nm en caliente.
- Utilice siempre una máscara de protección a partir del paso número 3 de este protocolo.

Evaluación de riesgo asociado a los niveles de THMs y a la variabilidad de estos niveles en relación con el pH, la temperatura, el cloro residual y el carbono total.

Determinación de parámetros preliminares

Los análisis preliminares arrojaron una correlación entre los niveles de pH y los niveles de residuos de cloroformo. Por lo tanto, este nivel se mostró superior en la medida que el pH es mayor. Por otro lado, la cantidad de este subproducto presentó una tendencia positiva con respecto al aumento de la temperatura ambiental.

3.4. Diseño de una Aplicación en Visual Basic - Excel como Herramienta de Recolección, Consulta y Análisis de los Datos Recolectados en el Campo y en el Laboratorio

La aplicación cuenta con diferentes perfiles de usuario; en el momento de ingresar, se valida el

usuario y la contraseña, esta validación permite dar los permisos según el perfil de usuario (figura 10).

A partir del registro de los datos en la aplicación, se realiza un análisis comparativo con respecto al máximo admisible descrito en la Resolución 2115 de 2007.

Inducción al aplicativo

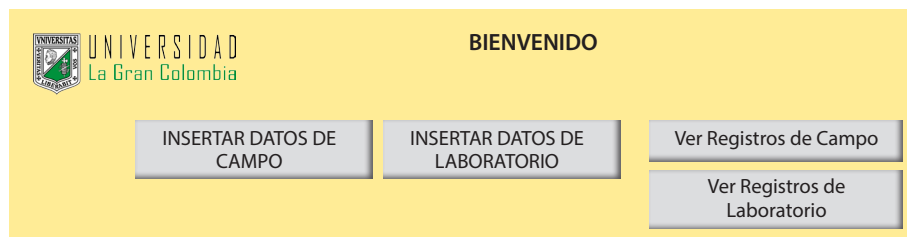
- El usuario ingresa en la aplicación y, dependiendo del perfil, tendrá opción de administrador (registro, consulta, modificación de registros), digitador (registro de datos en la aplicación), consultor (puede verificar los datos registrados).

Figura 10. Ventana de validación

- Una verificado de usuario, se desplegará una ventana de diálogo que permitirá ingresar los datos de campo o de laboratorio (figura 11).
- La información queda almacenada para ser revisada posteriormente por el ente encargado de generar los respectivos informes.
- Solo el personal designado del laboratorio o de la oficina tendrá acceso a los datos registrados, como medida de seguridad para el manejo de la información.



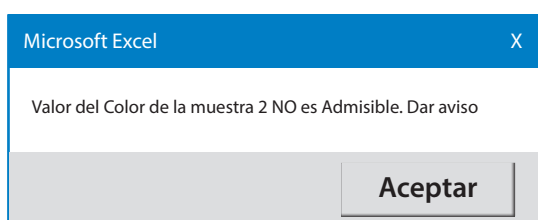
Figura 11. Ventana de inicio de la aplicación



El programa dará la posibilidad de comparar los datos ingresados y arrojar una alerta cuando la información ingresada supere los rangos máximos establecidos por la OMS y la Resolución 2115 de 2007, como se observa en la figura 12.

Igual con las características de las muestras como color, turbidez, pH, si un valor esta fuera de rango, la aplicación muestra un aviso de alerta indicado el parámetro fuera de rango, pero hace el registro de la información.

Figura 12. Ventana de alerta



La gran ventaja de esta aplicación es que se podrán consultar y comparar los datos históricos, por ejemplo, permitirá el análisis de los resultados de las muestras en las diferentes temporadas (invierno y verano) o con más detalle en las zonas con estaciones climáticas.

4. Conclusiones

Existe una amplia diversidad de usos del suelo para la zona de estudio, el uso de esta subcuenta está asociada principalmente a los pastos, lo que puede determinar la presencia de ganado en el sector, también en una gran proporción los cultivos e invernaderos están presentes en la zona. Para la amenaza en la subcuenca, se tuvo en cuenta la frecuencia y el potencial de daño del uso del suelo en la zona, como resultado, más del 70% de la subcuenca tiene un nivel de amenaza alto, asociado al uso del suelo y donde la contaminación es causada principalmente por fuentes antrópicas.

Para la vulnerabilidad de la zona donde se ubica la planta de tratamiento, según la adaptación del método del índice GOD, se obtuvo un mapa de vulnerabilidad que dio como resultado una vulnerabilidad moderada y baja, que indica la capacidad de la zona para resistir los efectos de la contaminación, asociada a las condiciones geológicas y edáficas y a la distancia del punto de captación.

En cuanto a la evaluación del riesgo de la zona mencionada, el resultado fue que tiene un riesgo moderado a bajo, con todos estos resultados, se puede decir que no hay un alto grado de riesgo

para las fuentes hídricas superficiales. Esto con la información disponible y considerando que no ocurre ningún evento particular que pueda generar una modificación a los procesos aquí considerados, como por ejemplo una temporada de lluvias intensas que modifiquen las condiciones del terreno o un derrame o exceso de productos químicos usados para el pastoreo o la agricultura que afecten o modifiquen las condiciones aquí consideradas.

En general, la planta de tratamiento que se abastece de esta subcuenca no está expuesta a un alto riesgo de contaminación asociada al uso del suelo, por lo que la comunidad cuenta con un recurso hídrico de buena calidad que debe procurar preservar las condiciones actuales y tratar de mejorar en lo posible en cuanto a la gestión ambiental, asegurando la conservación y no alteración del medio natural, tomando medidas correctivas para minimizar esos factores contaminantes. Esta caracterización del agua cruda es de gran importancia para adecuar e implementar los procesos de tratamiento de la planta de tratamiento.

El método de *Fujiwara* mostró una respuesta adecuada a los ensayos preliminares, lo que supone una innovación importante, teniendo en cuenta que los antecedentes mostraban casi exclusividad en la aplicación de técnicas cromatográficas.

Aunque algunos ensayos en ciertas investigaciones muestran que la tendencia principal es encontrar niveles de cloroformo dominantes en relación con los otros THMs, es importante diferenciarlos en los procesos de análisis, debido al importante riesgo toxicológico que representan.

Se encontró una correlación directa entre los niveles de residuos de cloroformo y el pH, lo que requiere un muestreo periódico (en temporada de invierno y verano) para confirmar esta premisa. Así mismo, es importante evaluar las varia-

bles de cloro residual y carbono total, teniendo en cuenta que investigaciones anteriores indican que estas pueden afectar significativamente el nivel de THMs.

La aplicación diseñada en Visual Basic favorece la gestión de los datos obtenidos in situ y en el laboratorio, la que proporciona alertas de las muestras con respecto a la normativa local e internacional. En un siguiente paso esta aplicación evolucionará a una APP para ser utilizada desde dispositivos móviles y con almacenamiento en la nube para su registro y consulta en línea desde cualquier otro lugar.

La evaluación de los subproductos mayoritarios en la planta de tratamiento de agua potable es uno de los principales referentes para el control de calidad de los procesos de desinfección, que se basan principalmente en la aplicación de técnicas de cloración.

5. Referencias

- Abdullah, M. P., Yee, L. F., Ata, S., Abdullah, A., Ishak, B., & Abidin, K. N. Z. (2009). The study of interrelationship between raw water quality parameters, chlorine demand and the formation of disinfection by-products. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 34(13), 806-811. Recuperado de <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.pce.2009.06.014>
- Aguilera-Herrador, E., Lucena, R., Cárdenas, S., & Valcárcel, M. (2008). Determination of trihalomethanes in waters by ionic liquid-based single drop microextraction/gas chromatographic/mass spectrometry. *Journal of Chromatography A*, 1209(1), 76-82. Recuperado de <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.chroma.2008.09.030>
- Aguilera-Herrador, E., Lucena, R., Cárdenas, S., & Valcárcel, M. Determination of trihalomethanes in waters by ionic liquid-based single drop microextraction/gas chromatographic/mass spectrometry. *Journal of Chromatography A*, 1209(1), 2008 (consulta, 10 de mayo de 2020). Available at: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.chroma.2008.09.030>
- Allonier, A.-S., Khalanski, M., Bermond, A., & Camel, V. (2000). Determination of trihalomethanes in chlorinated sea water samples using a purge-and-



- trap system coupled to gas chromatography. *Talanta*, 51(3), 467-477. Recuperado de [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0039-9140\(99\)00296-9](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0039-9140(99)00296-9)
- Allonier, A.-S., Khalanski, M., Bermond, A., & Camel, V. Determination of trihalomethanes in chlorinated seawater samples using a purge-and-trap system coupled to gas chromatography. *Talanta*, 51(3), 2000 (Consulta, 20 de abril de 2020). Available at: [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0039-9140\(99\)00296-9](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0039-9140(99)00296-9)
- Calderon RL. The epidemiology of chemicals contaminants of drinking water. *Food Chem Toxicol* 38(12): S13- S20, 2000.
- CAR, C. E. (2015). Elaboración del diagnóstico, prospectiva y formulación de la cuenca hidrográfica del río Bogotá Subcuenca Río Alto Bogotá-2120-19, Subcuenca Río Neusa.
- Di Cristo, C., Esposito, G., & Leopardi, A. (2013). Modelling trihalomethanes formation in water supply systems. *Environmental Technology*, 34(1), 61-70. Recuperado de <https://doi.org/10.1080/09593330.2012.679702>
- EPA US Environmental Protection Agency. Integrated Risk Information System (IRIS), A-Z List of Substances, 2014, (consulta, 29 de marzo de 2020) Available at: http://cfpub.epa.gov/ncea/iris/index.cfm?fuseaction=iris.showSubstanceList&list_type=alpha
- EPA US Environmental Protection Agency. Manual Guía para la Evaluación de Riesgos en el Superfund, 20213 (consulta, 14 de mayo de 2020). Available at: <http://superfund.pharmacy.arizona.edu/toxamb/>
- Esquivel L. Modelos de predicción de trihalometanos (THMs) para la red de distribución del acueducto de Cartago, 2016 (consulta, 15 de agosto. De 2019). Available at: <https://www.tec.ac.cr/en/proyectos/modelos-prediccion-trihalometanos-thms-red-distribucion-acueducto-cartago-fase-1>
- Govorova, Z., Gorenko, G., Rudich, U., & Govorov, V. (2018). Evaluation of barrier functions of traditional water supply facilities in relation to toxic trihalomethanes. *MATEC Web of Conferences*, 251, 03032. Recuperado de <https://doi.org/10.1051/matec-conf/201825103032>
- Govorova, Z., Gorenko, G., Rudich, U., & Govorov, V. Evaluation of barrier functions of traditional water supply facilities in relation to toxic trihalomethanes. *MATEC Web of Conferences*, 251, 03032, 2018 (Consulta, 15 de mayo de 2020), Available at: <https://doi.org/10.1051/matecconf/201825103032>
- Hernández Cogollo, M. E., & Marrugo Negrete, J. L. (2016). Trihalomethanes and arsenic in drinking water in Chinú and Corozal municipalities in Colombia: health risk assessment. *Ingeniería y Desarrollo*, 34(1), 88-115. Recuperado de <https://doi.org/10.14482/inde.34.1.7949>
- Huang, Jerry YC, and Gary C. Smith. "Spectrophotometric determination of total trihalomethanes in finished waters." *Journal-American Water Works Association* 76.4 (1984): 168-171
- Instituto Nacional de Salud. Manual de Instrucciones para la Toma, Preservación y Transporte de Muestras de Agua de Consumo Humano para Análisis de Laboratorio, 2011, July [consulta, 2º de febrero de 2020]. Available at: <http://www.ins.gov.co/sivicap/Documentacion/Manual%20instrucciones%20toma,%20>
- Lozano, H., & Caicedo, H. (2019). Caja de herramientas: Incorporando la gestión del riesgo de desastres y la adaptación al cambio climático en proyectos de inversión pública. Departamento Nacional de Planeación. Metodología para evaluar los riesgos.
- Martí JM. (2003). Water treatment/Tratamiento de aguas. Barcelona: STENCO
- Oliveira M. Subproductos de la cloración inorgánicos y orgánicos en las aguas de Castilla y León. Salamanca España, 2011.
- OMS. (2012). Guías para la calidad del agua potable. Organización Mundial para la Salud.
- Pérez Pavón, J. L., Herrero Martín, S., García Pinto, C., & Moreno Cordero, B. (2008). Determination of trihalomethanes in water samples: A review. *Analytica Chimica Acta*, 629(1), 6- 23. Recuperado de <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.aca.2008.09.042>
- Sánchez A. Efectos de los trihalometanos sobre la salud, 2008 (consulta, el 15 de abril de 2020), Available at: [https://www.salud-publica.es/secciones/revista/revistaspdf/bc51018a2311531_Hig.Sanid.Ambient.8.280-290\(2008\).pdf](https://www.salud-publica.es/secciones/revista/revistaspdf/bc51018a2311531_Hig.Sanid.Ambient.8.280-290(2008).pdf)
- SGC. Montoya, D., & Reyes, G. (2003). Geología de la plancha 209 Zipaquirá. INGEOMINAS, Bogotá, Colombia.
- Solsona F. y Méndez JP. Desinfección del Agua. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente, División de Salud y Ambiente, Organización Panamericana, 2002.

Vargas, M. C., & Tosse, O. (2010). Propuesta metodológica para la evaluación de la vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos a la contaminación. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Territorial, Bogotá

Zhang, X., & Minear, R. A. (2002). Decomposition of trihaloacetic acids and formation of the corresponding trihalomethanes in drinking water. *Water Research*, 36(14), 3665-3673. Recuperado de [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(02\)00072-6](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0043-1354(02)00072-6).