

**EVALUACIÓN DE CLOROFORMO COMO INDICADOR DE SUBPRODUCTOS  
DE LA DESINFECCIÓN EN MONTERIA Y CERETE CORDOBA**

**EVELIN ABADÍA PALACIO**

**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS SECCIONAL TUNJA  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
MAESTRIA EN INGENIERIA CIVIL  
TUNJA  
2025**

**EVALUACIÓN DE CLOROFORMO COMO INDICADOR DE SUBPRODUCTOS  
DE LA DESINFECCIÓN EN MONTERIA Y CERETE CORDOBA**

**EVELIN ABADÍA PALACIO**

**Tesis de grado para obtener el título de Magíster en Ingeniería Civil con  
Énfasis en Hidroambiental**

**Directora: Brigid Pacheco  
Magister en Ingeniería Civil  
Codirector: Juan Pablo González Galvis  
Doctor en Ingeniería Ambiental**

**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS SECCIONAL TUNJA  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
MAESTRIA EN INGENIERIA CIVIL  
TUNJA  
2025**

## AGRADECIMIENTOS

Agradecimiento especial al Doctor Manuel Rodríguez de la Universidad de Laval Canadá, por la capacitación en la transferencia de conocimientos, el préstamo de los equipos y suministro de los reactivos para monitorear los diferentes parámetros en campo y para la determinación de cloroformo en el laboratorio. A la Universidad Pontificia Bolivariana Montería, por el préstamo de los laboratorios para el procesamiento de las muestras y a la Universidad Santo Tomás Tunja. A Christian García candidato a Doctor de la Universidad de Laval por la capacitación impartida en la determinación de cloroformo. Al Doctor Juan Pablo González profesor de la Universidad Cooperativa de Colombia y co-asesor de esta tesis, por su apoyo en el trabajo de campo y su asesoría permanente. A la Magister Brigid Pacheco, por el apoyo en la redacción y consolidación de este documento escrito y asesora de esta tesis.

## DEDICATORIA

Agradezco primeramente a Dios por brindarme sabiduría y, en los momentos de dificultad, darme el valor de seguir adelante con la certeza de que todo siempre obra para bien.

A mi madre, pilar fundamental de mi vida, mujer fuerte y valiente que me ha enseñado que siempre se puede salir adelante. A mi hijo, por ser mi motor y mi fortaleza, y por comprender que algunos momentos debía dedicarlos a este sueño.

A mis hermanas, por estar siempre conmigo y ser mi fortaleza emocional en cada paso de este camino.

Y finalmente, a cada una de las personas que han aportado su granito de arena para que este proyecto llegara a buen término.

Nota de aceptación:

---

---

---

---

---

---

---

Firma del Jurado

---

Firma del Jurado

Tunja, 04 de octubre, 2025

## CONTENIDO

ABSTRACT .....	I
INTRODUCCIÓN .....	IV
1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN .....	1
1.1 DESCRIPCIÓN DE LA PROBLEMÁTICA .....	1
1.2 PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN .....	2
1.3 JUSTIFICACIÓN .....	2
2. OBJETIVOS .....	4
2.1 OBJETIVO GENERAL .....	4
2.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS .....	4
3. ESTADO DEL ARTE .....	5
4. METODOLOGÍA .....	17
5. ANALISIS DE RESULTADOS .....	43
5.2. CARACTERIZACIÓN DE ESTACIONES DE MUESTREO .....	45
5.2.1. Cinética de Desinfección .....	46
5.3. DISTRIBUCIÓN DE DATOS .....	56
5.4. HISTOGRAMAS DE DISTRIBUCIÓN .....	66
5.5. DETERMINACION DE GRADOS DE CORRELACION .....	73
5.5.1. DETERMINACIÓN DEL GRADO DE CORRELACIÓN ENTRE UV-254 Y LA CONCENTRACIÓN DE CLOROFORMO EN MONTERÍA. ....	73
5.5.2. DETERMINACIÓN DEL GRADO DE CORRELACIÓN ENTRE TURBIEDAD Y LA CONCENTRACIÓN DE CLOROFORMO EN MONTERÍA. 75	
5.5.3. DETERMINACIÓN DEL GRADO DE CORRELACIÓN ENTRE CONDUCTIVIDAD Y LA CONCENTRACIÓN DE CLOROFORMO EN MONTERÍA.....	77
5.5.4. DETERMINACIÓN DEL GRADO DE CORRELACIÓN ENTRE CLORO RESIDUAL Y LA CONCENTRACIÓN DE CLOROFORMO EN MONTERÍA. .	78

5.5.5. DETERMINACIÓN DEL GRADO DE CORRELACIÓN ENTRE UV-254 Y LA CONCENTRACIÓN DE CLOROFORMO CERETE.....	80
5.5.6. DETERMINACIÓN DEL GRADO DE CORRELACIÓN ENTRE TURBIEDAD Y LA CONCENTRACIÓN DE CLOROFORMO EN CERETE. ..	82
5.5.7. DETERMINACIÓN DEL GRADO DE CORRELACIÓN ENTRE CONDUCTIVIDAD Y LA CONCENTRACIÓN DE CLOROFORMO EN CERETE. ....	83
5.5.8. DETERMINACIÓN DEL GRADO DE CORRELACIÓN ENTRE CLORO RESIDUAL Y LA CONCENTRACIÓN DE CLOROFORMO EN CERETE. ....	84
5.6. DISCRIMINACIÓN DE LOS PUNTOS CON MAYORES CONCENTRACIONES DE CLOROFORMO EN LA RED DE DISTRIBUCIÓN. ....	86
5.6.1. DISCRIMINACIÓN DE LOS PUNTOS CON MAYORES CONCENTRACIONES DE CLOROFORMO EN LA RED DE DISTRIBUCIÓN MONTERÍA.....	86
5.6.2. DISCRIMINACIÓN DE LOS PUNTOS CON MAYORES CONCENTRACIONES DE CLOROFORMO EN LA RED DE DISTRIBUCIÓN CERETE. ....	87
6. CONCLUSIONES.....	89
7. RECOMENDACIONES .....	92
8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	95

## LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1 Concentración de coliformes fecales en época de lluvia y estiaje.....	10
Tabla 2 Cuadro comparativo entre Método Hach y GC-MS .....	34
Tabla 3 Datos de Muestreo de la Red de Distribución de Agua Potable en Cereté .....	43
Tabla 4 Datos de muestreo de la Red de Distribución de Agua potable en Montería. ....	43
Tabla 5 Distancia y descripción de Datos de Muestreo de la Red de Distribución de Agua Potable en Montería.....	45
Tabla 6 Distancia y descripción de Datos de Muestreo de la Red de Distribución de Agua Potable en Cerete. ....	45
Tabla 7 Datos Cinética de Desinfección Orden Cero para Cereté .....	47
Tabla 8 Datos Cinética de Desinfección Orden Cero para montería.....	48
Tabla 9 Datos Cinética de Desinfección Primer Orden para Cereté .....	49
Tabla 10 Datos Cinética de Desinfección Primer Orden para Montería .....	50
Tabla 11 Datos Cinética de Desinfección Segundo Orden para Cereté.....	52
Tabla 12 Datos Cinética de Desinfección Segundo Orden para Montería .....	53
Tabla 13 Datos Cinética de Desinfección n Orden para Montería.....	55

## LISTA DE ILUSTRACIONES

	Pág.
Ilustración 1 Variación del cloro residual en los puntos muestreados .....	7
Ilustración 2 Curva de calibración y niveles preliminares de THMs.....	8
Ilustración 3 Medida de Cloroformo por punto de muestreo .....	11
Ilustración 4 Esquema de la planta potabilizadora con puntos de muestreo (P: punto de muestreo).....	13
Ilustración 5. Análisis de Cloro Residual y Trihalometanos .....	14
Ilustración 6 Mapa división política de Córdoba.....	18
Ilustración 7 Ubicación de las PTAP en el Mapa de Montería.....	24
Ilustración 8 Esquema convencional de un proceso de potabilización convencional. .....	28
Ilustración 9 Ubicación de las PTAP en el Mapa de Montería.....	29

## LISTA DE GRÁFICAS

Grafica 1 Cinética de Desinfección de Orden Cero Cereté .....	47
Grafica 2 Cinética de Desinfección de Orden Cero Montería .....	48
Grafica 3 Cinética de Desinfección de Primer Orden Cereté.....	50
Grafica 4 Cinética de Desinfección de Primer Orden Montería .....	51
Grafica 5 Cinética de Desinfección de Segundo Orden Cereté.....	52
Grafica 6 Cinética de Desinfección de Segundo Orden Montería .....	53
Grafica 7 Cinética de Desinfección de n Orden Cereté .....	54
Grafica 8 Cinética de Desinfección de n Orden Montería.....	55
Grafica 9 Comparación de Valores de pH en Redes de Distribución de Agua Potable en Cerete y Montería. ....	57
Grafica 10 Comparación de Valores de Temperatura en Redes de Distribución de Agua Potable en Cerete y Montería. ....	58
Grafica 11 Comparación de Valores de Turbiedad en Redes de Distribución de Agua Potable en Cerete y Montería. ....	59
Grafica 12 Comparación de Valores de Conductividad en Redes de Distribución de Agua Potable en Colombia. ....	61
Grafica 13 Comparación de Valores de UV-254 en Redes de Distribución de Agua Potable en Cerete y montería.....	62

Grafica 14 Comparación de Valores de Cloro Residual en Redes de Distribución de Agua Potable en Cerete y montería. ....	64
Grafica 15 Comparación de Valores de Cloroformo en Redes de Distribución de Agua Potable en Cerete y Montería. ....	65
Grafica 16 Histograma de Distribución de Valores de pH en Redes de Distribución de Montería y Cerete .....	67
Grafica 17 Histograma de Distribución de Valores de Temperatura en Redes de Distribución de Agua Potable en Cerete y Montería .....	68
Grafica 18 Histograma de Distribución de Valores de UV254 en Redes de Distribución de Agua Potable en Cerete y Montería. ....	69
Grafica 19 Histograma de Distribución de Valores de Cloro Residual en Redes de Distribución de Agua Potable en Cerete y Montería. ....	71
Grafica 20 Histograma de Distribución de Valores de Cloroformo en Redes de Distribución de Agua Potable en Cerete y Montería. ....	72
Grafica 21 Correlación entre UV-254 y concentración de cloroformo de Montería .....	73
Grafica 22 Correlación entre Turbiedad y concentración de cloroformo de Montería .....	75
Grafica 23 Correlación entre Conductividad y concentración de cloroformo de Montería.....	77
Grafica 24 Correlación entre Cloro Residual y concentración de cloroformo de Montería.....	78
Grafica 25 Correlación entre UV-254 y concentración de cloroformo de Cerete ..	80

Grafica 26 Correlación entre Turbiedad y concentración de cloroformo de Cerete .....	82
Grafica 27 Correlación entre Conductividad y concentración de cloroformo de Cerete .....	83
Grafica 28 Correlación entre Cloro Residual y concentración de cloroformo de Cerete .....	84

## LISTA DE IMAGENES

	Pág.
Imagen 1 Muestras en el laboratorio.....	39
Imagen 2 Pocket Colorimeter DR300.....	39
Imagen 3 pHTestr 30.....	40
Imagen 4 Turbidímetro portátil 2100Q de Hach.....	40
Imagen 5 medidor UV254 portátil de Real Tech.....	41
Imagen 6 Method - Method 10132 - Water Bath Method.....	41
Imagen 7 Method - Method 10132 - Water Bath Method.....	42
Imagen 8 Method - Method 10132 - Water Bath Method.....	42

## ABSTRACT

The inadvertent presence of potentially carcinogenic compounds in drinking water represents one of the greatest silent challenges for contemporary public health. Chloroform, a trihalomethane formed during water chlorination, emerges as a hidden threat in drinking water treatment systems in Colombia, especially in areas such as Cerete and Montería where this aspect has been insufficiently studied. While disinfection using chlorine is essential for eliminating pathogens and preventing waterborne diseases, the reaction between this disinfectant and organic matter generates disinfection by-products (DBPs) that may compromise the safety of water resources distributed to the population.

Colombian regulations, through Resolution 2115 of 2007, establish the monitoring of trihalomethanes as a reference parameter for drinking water quality. However, the problem lies in the high costs associated with the analysis of these compounds through standardized procedures (EPA 5030C, EPA 8260C), which make systematic surveillance in drinking water treatment plants (DWTPs) and their corresponding distribution networks impossible. This situation creates a significant gap in the comprehensive evaluation of the quality of the water supplied.

The main objective of this research is to determine the occurrence of chloroform as a disinfection by-product in two drinking water treatment plants and their respective distribution networks in the municipalities of Cerete and Montería, establishing its relationship with physicochemical parameters of water and evaluating its spatiotemporal behavior in the distribution system.

For methodological development, the low-cost colorimetric method developed by HACH Company (Trihalomethane Formation Potential - THMFP Method 10224) was implemented, which represents an economically viable alternative for continuous monitoring of these compounds. Samples were collected at strategic points in the distribution system where multiple parameters were evaluated: pH, temperature, turbidity, conductivity, UV-254 absorbance, residual chlorine, and chloroform. This comprehensive characterization allows for establishing correlations between operational treatment parameters and chloroform formation in treated water.

The analysis of the obtained results provides crucial information about the dynamics of chloroform formation in the studied treatment systems, allowing identification of critical points in the network where higher concentrations are recorded. These findings support the development of operational strategies to minimize the formation

of disinfection by-products, thus optimizing the quality of supplied water without compromising its microbiological safety. The implementation of lower-cost analytical methods represents a significant contribution to sustainable management of drinking water quality in municipalities with limited resources for monitoring specialized parameters.

**Keywords:** Chloroform, Disinfection By-products, Drinking Water Treatment Plants (DWTP), Trihalomethanes (THM), Water Quality.

## RESUMEN

La presencia inadvertida de compuestos potencialmente cancerígenos en el agua potable representa uno de los mayores desafíos silenciosos para la salud pública contemporánea. El cloroformo, un trihalometano formado durante la cloración del agua, emerge como una amenaza oculta en los sistemas de tratamiento de agua potable en Colombia, especialmente en zonas como Cerete y Montería donde este aspecto ha sido insuficientemente estudiado. Si bien la desinfección mediante cloro resulta indispensable para eliminar patógenos y prevenir enfermedades transmitidas por el agua, la reacción entre este desinfectante y la materia orgánica presente genera subproductos de la desinfección (SPD) que pueden comprometer la inocuidad del recurso hídrico distribuido a la población.

La normatividad colombiana, a través de la Resolución 2115 de 2007, establece el monitoreo de trihalometanos como parámetro de referencia para la calidad del agua potable. Sin embargo, la problemática radica en que los elevados costos asociados al análisis de estos compuestos mediante procedimientos estandarizados (EPA 5030C, EPA 8260C) imposibilitan su vigilancia sistemática en las plantas de tratamiento de agua potable (PTAP) y sus correspondientes redes de distribución. Esta situación genera un vacío significativo en la evaluación integral de la calidad del agua suministrada.

La presente investigación tiene como objetivo principal determinar la ocurrencia de cloroformo como subproducto de la desinfección en dos plantas de tratamiento de agua potable y sus respectivas redes de distribución en los municipios de Cerete y Montería, estableciendo su relación con parámetros fisicoquímicos del agua y evaluando su comportamiento espaciotemporal en el sistema de distribución.

Para el desarrollo metodológico se implementó el método colorimétrico de bajo costo desarrollado por la compañía HACH (Trihalomethane Formation Potential - THMFP Method 10224), el cual representa una alternativa económicamente viable para el monitoreo continuo de estos compuestos. Se recolectaron muestras en puntos estratégicos del sistema de distribución donde se evaluaron múltiples parámetros: pH, temperatura, turbiedad, conductividad, absorbancia UV-254, cloro residual y cloroformo. Esta caracterización integral permite establecer correlaciones entre los parámetros operacionales del tratamiento y la formación de cloroformo en el agua tratada.

El análisis de los resultados obtenidos proporciona información crucial sobre la dinámica de formación del cloroformo en los sistemas de tratamiento estudiados, permitiendo identificar puntos críticos en la red donde se registran concentraciones más elevadas. Estos hallazgos fundamentan el desarrollo de estrategias operativas para minimizar la formación de subproductos de desinfección, optimizando así la calidad del agua suministrada sin comprometer su seguridad microbiológica. La implementación de métodos analíticos de menor costo representa una contribución significativa para la gestión sostenible de la calidad del agua potable en municipios con recursos limitados para el monitoreo de parámetros especializados.

**Palabras Clave:** Cloroformo, Subproductos de Desinfección, Plantas de Tratamiento de Agua Potable (PTAP), Trihalometanos (THM), Calidad del Agua.

## INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso esencial para la vida y desempeña un papel fundamental en diversos aspectos de la existencia humana, social y ambiental. Su disponibilidad y calidad son cruciales para la salud, la agricultura, la industria y el bienestar general de las comunidades (OMS, 2020). El agua, aunque vital, puede representar un riesgo importante para la salud pública si contiene microorganismos patógenos o sustancias químicas tóxicas. Por lo tanto, para mitigar estos riesgos, el tratamiento del agua desempeña un papel preventivo crucial en la protección de la salud pública (Gleick, 2014).

La desinfección constituye una fase crítica en el tratamiento del agua potable, ya que permite eliminar microorganismos patógenos y prevenir enfermedades de origen hídrico. La implementación de la cloración a principios del siglo XX representó un avance significativo en salud pública al reducir drásticamente las infecciones transmitidas por el agua (Crittenden et al., 2012). El uso sistemático del cloro para tratar el agua de consumo humano ha sido fundamental para controlar la propagación de enfermedades de transmisión hídrica, como el cólera, la fiebre tifoidea, la disentería y diversas formas de diarrea (Richardson, 2003). Sin embargo, aunque la cloración es altamente eficaz en la eliminación de patógenos, este proceso conlleva la formación de subproductos de desinfección (SPD), entre los que destacan los trihalometanos (THM), compuestos que han generado preocupación por sus potenciales efectos adversos en la salud humana (Villanueva et al., 2017).

Los trihalometanos son los subproductos de desinfección formados en mayor concentración durante el proceso de cloración del agua y se utilizan comúnmente como indicadores de la cantidad total de subproductos clorados presentes en el agua tratada. Este grupo de compuestos incluye el cloroformo ( $\text{CHCl}_3$ ), bromodiclorometano ( $\text{CHBrCl}_2$ ), dibromoclorometano ( $\text{CHBr}_2\text{Cl}$ ) y bromoformo ( $\text{CHBr}_3$ ), siendo el cloroformo generalmente el más prevalente (Singer, 1999). Diversos estudios epidemiológicos han asociado la exposición prolongada a estos compuestos con un mayor riesgo de cáncer de vejiga y problemas reproductivos (Villanueva et al., 2015).

Las concentraciones de THM en el agua tratada con cloro pueden variar significativamente en función de diversas variables, como las características fisicoquímicas del agua de origen, la concentración de materia orgánica natural, la dosis de cloro aplicada, el tiempo de contacto, la temperatura y el pH. Típicamente, estas concentraciones oscilan desde menos de 10  $\mu\text{g/L}$  en aguas subterráneas hasta más de 200  $\mu\text{g/L}$  en aguas superficiales con alto contenido de materia

orgánica (Richardson et al., 2007). Esta variabilidad resalta la importancia de implementar programas de monitoreo sistemático que permitan caracterizar y controlar la formación de estos compuestos en los sistemas de abastecimiento de agua potable.

En este contexto, el municipio de Cereté, ubicado en el departamento de Córdoba, Colombia, representa un caso de estudio particularmente relevante para el análisis de la formación de THM en sistemas de tratamiento de agua potable. Este municipio es conocido como "La capital del Oro Blanco" por su tradicional producción algodonera, constituye el segundo municipio más poblado del departamento con aproximadamente 96.252 habitantes y forma parte del área metropolitana de Montería. Su ubicación estratégica en el valle medio del río Sinú, a tan solo 18 kilómetros de la capital departamental, lo convierte en un importante centro agroindustrial de la región.

El Río Sinú constituye la principal fuente de abastecimiento para los municipios de Cereté y Montería en el departamento de Córdoba, Colombia. Este río se caracteriza por presentar variaciones estacionales en sus características fisicoquímicas y microbiológicas, lo que supone un reto para el tratamiento adecuado del agua (Corporación Autónoma Regional de los Valles del Sinú y San Jorge, 2019).

En Cereté opera una planta convencional localizada dentro del casco urbano, con capacidad de diseño de 750 L/s, donde se implementan procesos estándar de potabilización: coagulación mediante hidroxiclورو de aluminio, floculación, sedimentación, filtración y desinfección con cloro gaseoso. La infraestructura de esta PTAP comprende un canal de mezcla rápida donde el caudal captado es medido a través de un vertedero, dos unidades de floculadores tipo Alabama, dos sedimentadores de alta tasa con placas en asbesto cemento planas y paralelas inclinadas, canales de recolección de aguas clarificadas y ocho filtros rápidos de tasa descendente (Aguas de Córdoba, 2018).

Para el control de calidad, esta PTAP cuenta con un laboratorio donde se monitorean constantemente parámetros como turbiedad, color, pH, conductividad, alcalinidad, sulfatos, dureza, cloruros y cloro residual, además de realizar ensayos de prueba de jarras para determinar la dosificación óptima de coagulante según las características del agua cruda. Sin embargo, es importante destacar que este laboratorio carece de equipamiento especializado para la medición rutinaria de trihalometanos, lo que representa una limitación significativa en la evaluación

integral de la calidad del agua distribuida (Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, 2020).

Esta limitación técnica evidenciada en la PTAP de Cereté no es un caso aislado, sino que refleja una problemática extendida en el panorama nacional de los sistemas de tratamiento de agua potable. De acuerdo con estudios realizados en diferentes regiones del país, muchas plantas de tratamiento enfrentan desafíos similares en cuanto a la capacidad analítica especializada para la cuantificación de subproductos de la desinfección. Esta situación cobra particular relevancia cuando se analiza en el contexto del marco regulatorio colombiano, el cual establece parámetros específicos para el control de estos compuestos, pero cuya implementación práctica enfrenta barreras técnicas y económicas significativas. En este sentido, resulta fundamental examinar las disposiciones normativas vigentes y su aplicabilidad en el contexto de las capacidades técnicas actuales de los sistemas de tratamiento, con el fin de comprender las implicaciones regulatorias y operativas que enmarcan el presente estudio.

Montería representa el caso más complejo y relevante para el estudio de la formación de THM en la región del valle del río Sinú. Su sistema de gran escala, capacidades técnicas avanzadas y excelentes indicadores de calidad la posicionan como el modelo de referencia regional, pero también evidencian las limitaciones técnicas compartidas con otros sistemas del país en cuanto al monitoreo específico de subproductos de desinfección.

La dependencia del río Sinú como fuente única, el uso de cloro gaseoso como desinfectante principal, y las extensas redes de distribución constituyen factores determinantes que requieren análisis especializado para evaluar el potencial de formación de THM y desarrollar estrategias de control apropiadas.

El laboratorio acreditado de Veolia Montería presenta la plataforma técnica más sólida de la región para implementar capacidades de análisis de THM, representando una oportunidad única para establecer protocolos de monitoreo que puedan replicarse en otros sistemas del departamento y la región Caribe. (Veolia Colombia, agosto 2025.)

La evidencia recopilada confirma que Montería, con sus 531,424 habitantes proyectados para 2025 y su sistema de 1,390 L/s de capacidad, constituye el caso de estudio más representativo y técnicamente viable para desarrollar investigación

aplicada sobre formación de trihalometanos en el contexto de las condiciones operativas, climáticas y regulatorias del valle del río Sinú. (Macrotrends, mayo 2025)

En Colombia, la Resolución 2115 del 22 de junio de 2007 establece los criterios de calidad del agua para consumo humano. Esta normativa específica que "el valor aceptable del cloro residual libre en cualquier punto de la red de distribución del agua para consumo humano deberá estar comprendido entre 0,3 y 2,0 mg/L", y que "la dosis de cloro por aplicar para la desinfección del agua y asegurar el residual libre debe resultar de pruebas frecuentes de demanda de cloro" (Ministerio de la Protección Social y Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2007). Esta misma resolución establece un valor de trihalometanos totales (TTHMs) de 200 µg/L, con lo cual no se requiere medir de forma independiente cada compuesto que conforman los TTHMs.

Diversos estudios realizados en Colombia han empleado técnicas analíticas como la cromatografía de gases para caracterizar los THMs en sistemas de agua potable, identificando concentraciones variables de cloroformo y otros compuestos relacionados (García, J. C., & Jiménez, G. (2016). Estos estudios han demostrado que la concentración de dichos compuestos fluctúa significativamente en función de factores como la temperatura ambiental, el pH del agua y las condiciones operativas de las plantas de tratamiento (Sánchez et al., 2016). Sin embargo, la mayoría de estas investigaciones se han centrado en grandes urbes, existiendo un vacío de conocimiento respecto a la situación en ciudades intermedias y pequeñas como Cereté y Montería.

A pesar de los beneficios indiscutibles de la cloración en términos de control microbiológico, la formación de subproductos como el cloroformo representa un desafío para la gestión sostenible de la calidad del agua potable. La exposición crónica a estos compuestos ha sido asociada con efectos adversos para la salud, incluyendo mayor riesgo de cáncer de vejiga, colorrectal y potenciales efectos sobre el desarrollo fetal (Nieuwenhuijsen et al., 2009). Considerando estos riesgos potenciales, resulta fundamental caracterizar la concentración de trihalometanos en los sistemas de abastecimiento de agua potable, particularmente en contextos donde este monitoreo no se realiza de manera rutinaria.

La principal limitación para la implementación de programas de monitoreo sistemático de THMs radica en los elevados costos asociados a las técnicas analíticas convencionales, como la cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas, que requieren equipamiento sofisticado, personal altamente capacitado y procedimientos estandarizados como los métodos EPA

5030C y EPA 8260C (USEPA, 2018). Esta limitación es particularmente relevante en el contexto de plantas de tratamiento de agua potable de municipios intermedios y pequeños, donde las restricciones presupuestarias dificultan la implementación de programas de monitoreo exhaustivos.

En este contexto, la presente investigación se enfoca en el estudio de las concentraciones de cloroformo como principal subproducto de la desinfección en las redes de distribución de Cereté y Montería, analizando su comportamiento en relación con diferentes parámetros operacionales y su variabilidad espaciotemporal en los sistemas de distribución. Para desarrollar este estudio, se implementó el método colorimétrico desarrollado por la compañía HACH (Trihalomethane Formation Potential - THMFP Method 10224), que representa una alternativa analítica de menor costo en comparación con las metodologías tradicionales (HACH Company, 2019). Este enfoque metodológico permite realizar un monitoreo más frecuente y accesible en términos económicos, proporcionando información valiosa para la optimización de los procesos de tratamiento y la protección de la salud pública en las comunidades abastecidas por estos sistemas.

Los resultados de esta investigación contribuirán significativamente al conocimiento sobre la ocurrencia de trihalometanos y otros SPD en sistemas de abastecimiento de agua potable en el contexto colombiano, aportando información relevante tanto para los operadores de las plantas de tratamiento como para las autoridades sanitarias y ambientales. Asimismo, la implementación de metodologías analíticas asequibles facilitará la incorporación del monitoreo rutinario de estos compuestos en los protocolos de control de calidad de las plantas de tratamiento estudiadas, promoviendo así la mejora continua en la gestión de la calidad del agua potable y la protección de la salud de las poblaciones servidas.

# 1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

## 1.1 DESCRIPCIÓN DE LA PROBLEMÁTICA

El abastecimiento de agua potable en Colombia enfrenta el desafío de garantizar la calidad del recurso suministrado a la población, especialmente en lo que respecta a la presencia de subproductos de desinfección (SPD) como los trihalometanos (THMs), entre los cuales el cloroformo (CF) es el compuesto más frecuente y relevante desde el punto de vista sanitario (Rodríguez & Sérodes, 2001; OMS, 2017). El cloroformo se forma principalmente durante la etapa de desinfección, cuando el cloro reacciona con la materia orgánica natural (MON) presente en el agua, proceso que puede variar según la calidad del agua fuente, la eficiencia del tratamiento y las condiciones de la red de distribución (Li et al., 2021; Crittenden et al., 2022).

En Colombia, la Resolución 2115 de 2007 regula la concentración máxima de THMs totales en el agua potable (200 µg/L), un valor superior a los estándares internacionales recomendados (100 µg/L) (Ministerio de Salud y Protección Social, 2007; Richardson, 2011). Sin embargo, estudios recientes han demostrado que, incluso cumpliendo la normativa nacional, la exposición crónica a niveles elevados de cloroformo puede representar riesgos para la salud humana, incluyendo efectos sobre el sistema nervioso, el hígado y los riñones, así como potenciales efectos carcinogénicos (OMS, 2017; Guzmán et al., 2015).

En el departamento de Córdoba, las ciudades de Montería y Cereté se abastecen del río Sinú, una fuente hídrica que puede presentar variaciones en la carga de materia orgánica debido a factores ambientales y actividades antrópicas en la cuenca. Estas condiciones, sumadas a las diferencias en los procesos de tratamiento y operación de las plantas, pueden influir significativamente en la formación y distribución de cloroformo en las redes de agua potable de ambos municipios.

Por lo tanto, el problema central de esta investigación es determinar en qué medida se forman y distribuyen los subproductos de desinfección, particularmente el cloroformo, en las redes de distribución de agua potable de Montería y Cereté, identificando los factores que inciden en su concentración y evaluando el cumplimiento de la normativa vigente. Para ello, se realizará un monitoreo sistemático de la concentración de cloroformo en seis puntos estratégicos de la red de distribución de cada municipio, con el fin de aportar información relevante para

la gestión del riesgo sanitario y la optimización de los procesos de tratamiento en la región.

## 1.2 PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

¿Cuáles son los niveles de concentración de cloroformo como indicador de la formación de SPD en dos diferentes redes de distribución que corresponden a los municipios de Cereté y Montería, y en qué medida se ajusta a los estándares de calidad establecidos por la normativa colombiana?

## 1.3 JUSTIFICACIÓN

La medición y control de la materia orgánica natural (MON) en las plantas de tratamiento de agua potable (PTAP) representa un proceso complejo y costoso, debido a la necesidad de equipos especializados y personal técnico capacitado para realizar análisis como carbono orgánico total (COT), carbono orgánico disuelto (COD) y absorbancia a 254 nm (UV-254). Estas limitaciones técnicas y económicas implican que muchas PTAP, especialmente en municipios pequeños o con recursos limitados, no monitoreen de manera continua ni precisa la concentración de MON, dificultando la evaluación real del potencial de formación de subproductos de desinfección (SPD) en el agua tratada (Richardson et al., 2007; WHO, 2017).

Los subproductos de desinfección, particularmente los trihalometanos (THMs), son generados cuando el cloro, desinfectante ampliamente empleado por su eficacia y bajo costo, reacciona con la materia orgánica presente en el agua. El cloroformo (CF) es el compuesto THM más prevalente en las redes de distribución y se ha asociado con efectos adversos para la salud, desde toxicidad hepática y renal, hasta potenciales riesgos carcinogénicos en exposiciones prolongadas. Organismos internacionales, como la Organización Mundial de la Salud (OMS), han establecido límites máximos permisibles para su concentración en agua potable (OMS, 2017; Guzmán et al., 2015).

En Colombia, la regulación vigente fija un límite máximo de 200 µg/L para la concentración total de THMs, superando los estándares internacionales como el límite de 100 µg/L recomendado por la OMS (Ministerio de Salud y Protección Social, 2007; Richardson, 2011). Esta discrepancia normativa evidencia la necesidad de generación de estudios científicos locales y regionales que permitan evaluar la formación de SPD y aporten evidencia relevante para la posible actualización de la normativa nacional.

Además de su importancia sanitaria, esta temática está estrechamente alineada con la Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de las Naciones Unidas, particularmente con el ODS 6 (Agua limpia y saneamiento), que busca garantizar para el 2030 el acceso universal y equitativo al agua potable segura y asequible, así como mejorar la calidad del agua y reducir la contaminación (ONU, 2024; DNP Colombia, 2021). El control efectivo de subproductos de desinfección es clave para cumplir estas metas, ya que la calidad del agua es un componente vital para garantizar el derecho humano al agua y contribuir al desarrollo social y económico sostenible.

La presente investigación, enfocada en Montería y Cereté, municipios que comparten la cuenca hídrica del río Sinú, aborda un contexto con condiciones ambientales y antropogénicas específicas que afectan la calidad del agua cruda y la formación de MON y SPD. La caracterización y control de estos aspectos son esenciales para fortalecer la gestión ambiental local y para que las autoridades sanitarias nacionales puedan diseñar políticas públicas basadas en evidencia, promoviendo así la alineación con el ODS 6 (Agua limpia y saneamiento) y contribuyendo al fortalecimiento del sistema nacional de agua potable (Crittenden et al., 2022; Ministerio de Vivienda, 2025).

Dado que la medición directa de MON y el control de formación de SPD mediante técnicas convencionales como la cromatografía de gases son costosos y de difícil acceso en municipios con recursos limitados, esta tesis valida el método colorimétrico THMFP 10224 desarrollado por HACH para la determinación de cloroformo. Este método permite monitoreos económicos y eficientes en múltiples puntos estratégicos, facilitando la implementación de medidas de control y contribuyendo directamente a la gestión del riesgo sanitario (García & Jiménez, 2016).

Finalmente, esta investigación representa un aporte para cerrar la brecha en monitoreo y control de SPD en municipios pequeños y medianos, promoviendo políticas públicas de agua potable más inclusivas y efectivas. El fortalecimiento institucional para la mejora continua en la calidad del agua potable es crucial para asegurar la salud pública, la sostenibilidad ambiental y el cumplimiento de los compromisos internacionales asumidos por Colombia bajo la Agenda 2030 (ONU, 2024; DNP Colombia, 2021).

## 2. OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GENERAL

Determinar la concentración de cloroformo como indicador de la formación de subproductos de la desinfección en dos diferentes redes de distribución Cerete y Montería mediante la aplicación de un método colorimétrico de bajo costo.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- 2.2.1. Determinar los parámetros fisicoquímicos de calidad del agua como temperatura, pH, turbiedad, conductividad, UV254nm y cloro residual en puntos estratégicos de la red de distribución en Cerete y Montería y comparar con la natividad vigente nacional.
- 2.2.2. Determinar el grado de correlación entre las concentraciones de materia orgánica natural, medida indirectamente como UV254nm, y la formación de cloroformo encontrado en las redes de distribución.
- 2.2.3. Identificar los puntos críticos con las mayores concentraciones de cloroformo en las dos redes de distribución de agua potable y el posible impacto de la distancia a la planta de tratamiento en su formación.

### 3. ESTADO DEL ARTE

Para recopilar la información existente sobre el tema de investigación, se realizó una exhaustiva revisión en bases de datos como Scielo y en repositorios universitarios nacionales e internacionales. El foco principal estuvo en la desinfección del agua potable, el uso del cloro y la formación de subproductos de desinfección (SPD), en particular los trihalometanos (THMs) y el cloroformo.

En Colombia, estudios como el desarrollado por Torres (2021) analizaron la calidad del agua para consumo humano proveniente de las plantas de tratamiento Cariongo y Monteadentro y la red de distribución del municipio de Pamplona. Se evaluaron parámetros microbiológicos, fisicoquímicos y el índice de riesgo para consumo humano (IRCA) siguiendo la normatividad vigente (Decreto 1575 de 2007 y Resolución 2115 de 2007). El análisis fisicoquímico utilizó el método colorimétrico con fotómetro HACH DR300, mostrando valores promedio de cloro residual dentro de los límites permitidos. La norma exige que el cloro residual libre en la red esté entre 0,3 y 2,0 mg/L, evidenciando que el valor máximo de cloro registrado en la red de distribución corresponde al punto 0003 con una concentración de 2 mg Cl<sub>2</sub>/L, como se evidencia en la ilustración 1. Por lo tanto, se puede concluir para este caso que, aunque algunos puntos de la red excedieron la concentración de cloro residual exigida en la normativa, el resto de las características microbiológicas y fisicoquímicas cumplen a cabalidad con lo estipulado y teniendo en cuenta el porcentaje obtenido, se determinó que el agua potable suministrada a los usuarios del municipio de Pamplona corresponde a un agua sin riesgo de acuerdo a la clasificación del nivel de riesgo en salud establecido en la Resolución 2115 de 2007, lo que la hace apta para el consumo humano, pero que aún se debe tener mayor control en la dosificación de cloro gaseoso para evitar la formación de la formación de trihalometanos (THMs). Sin embargo, este estudio no evaluó la incidencia del cloro en la formación de subproductos de desinfección, tema clave para una evaluación integral.

A nivel global, las tendencias más recientes en el control de SPD incluyen la aplicación de tecnologías avanzadas como la fotocatalisis solar, oxidación avanzada y sistemas de monitoreo en tiempo real, que permiten minimizar la formación de THMs sin comprometer la seguridad microbiológica (Pérez-Lucas et al., 2022; Emasesa, 2025). Estas tecnologías, junto con métodos colorimétricos asequibles, facilitan un monitoreo frecuente y económico, vital para plantas de tratamiento con recursos limitados (HACH Company, 2019).

En Colombia, esta problemática es particularmente evidente en plantas pequeñas y medianas, como la de Cereté, que cuenta con infraestructura estándar, pero carece de equipamiento especializado para la medición rutinaria de trihalometanos (Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, 2020). Por otro lado, Montería dispone de un laboratorio acreditado que representa un modelo a nivel regional para protocolos de monitoreo replicables (Veolia Colombia, 2025; Macrotrends, 2025). La dependencia del río Sinú como fuente única de agua y el uso constante de cloro gaseoso hacen que el control de THMs sea un reto operativo y sanitario fundamental.

La Resolución 2115 de 2007 establece límites de cloro residual entre 0,3 y 2,0 mg/L y un máximo de 200 µg/L para trihalometanos totales, aunque en la práctica, la implementación enfrenta desafíos técnicos y económicos (Ministerio de la Protección Social y Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2007). Estudios en grandes urbes colombianas revelan que las concentraciones de cloroformo y otros THMs varían según temperatura, pH y condiciones operativas (García & Jiménez, 2016; Sánchez et al., 2016); sin embargo, hay un vacío en ciudades intermedias como Cereté y Montería.

Pese a los beneficios del cloro en control microbiológico, la formación de THMs como el cloroformo representa un riesgo para la salud pública, asociado a cáncer de vejiga, colorrectal y efectos adversos en el desarrollo fetal (Nieuwenhuijsen et al., 2009). La detección y caracterización sistemática de estos compuestos es esencial, especialmente donde no se realiza monitoreo rutinario.

Los altos costos y requerimientos técnicos de la cromatografía de gases con espectrometría de masas limitan el monitoreo sistemático, especialmente en municipios pequeños y medianos (USEPA, 2018). Por eso, esta investigación utiliza el método colorimétrico HACH (THMFP Method 10224) como alternativa económica y de alta frecuencia, promoviendo un control eficiente que apoye la gestión de la calidad del agua y la salud pública en las comunidades estudiadas.

Ilustración 1 Variación del cloro residual en los puntos muestreados



Fuente. Tomado de (Torres, 2021, pág. 57)

Borda et al. (2021) desarrollaron un estudio sobre la calidad del agua en la planta de tratamiento del acueducto regional de Zipaquirá-Cogua-Nemocón, enfocándose en el municipio de Cogua para caracterizar los subproductos de desinfección mayoritarios mediante espectrofotometría ultravioleta-visible durante un periodo de siete meses con frecuencia bimensual. Los resultados revelaron una concentración de cloroformo de 0,62 ppm, como se observa en la ilustración 2, valor que supera significativamente el límite recomendado por la OMS (0,30 ppm). Este estudio identificó una correlación inversa entre la temperatura y la formación de cloroformo, observando concentraciones menores en períodos con temperaturas inferiores a 12°C, aunque no estableció correlaciones específicas entre parámetros fisicoquímicos y la formación de este subproducto.

En el contexto internacional, las tendencias actuales para el control de subproductos de desinfección incluyen la implementación de tecnologías avanzadas de oxidación (AOPs), que han demostrado efectividad para reducir la formación de THMs sin comprometer la desinfección microbiológica (Zhang et al., 2024). La fotocatálisis heterogénea con TiO<sub>2</sub> y la ozonización seguida de filtración con carbón activado granular representan enfoques prometedores para minimizar la formación de cloroformo en plantas de tratamiento convencionales (Li et al., 2023; Rodríguez-Chueca et al., 2022).

A nivel mundial, países como Alemania y los Países Bajos han implementado sistemas de monitoreo en línea utilizando sensores de absorbancia UV-254 combinados con modelos predictivos que permiten ajustar automáticamente las dosis de desinfectante para optimizar el balance entre eficacia microbiológica y minimización de SPD (European Water Association, 2023). Estas tecnologías han

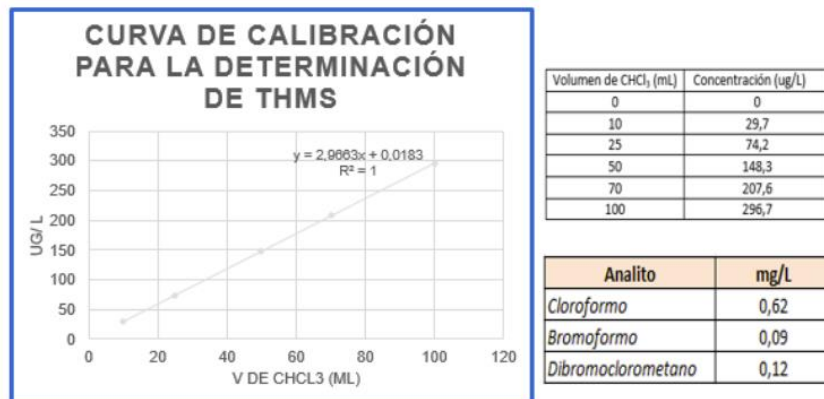
reducido las concentraciones promedio de THMs en un 40-60% en comparación con sistemas convencionales (Water Research Foundation, 2024).

En América Latina, estudios recientes en Brasil, Chile y México han documentado la efectividad de métodos alternativos como la desinfección combinada cloro-dióxido de cloro y el uso de radiación UV como desinfección secundaria para reducir la dependencia del cloro y, consecuentemente, la formación de THMs (Santos et al., 2023; Morales-González et al., 2024). Particularmente, el estudio de Hernández-López et al. (2023) en plantas mexicanas demostró que la optimización del pH durante la coagulación puede reducir hasta un 35% la formación de precursores de THMs, manteniendo la eficiencia de remoción de turbidez.

En Colombia, investigaciones complementarias como las de Gómez-Ramírez et al. (2022) en Medellín y Vargas-Castellanos et al. (2023) en Bogotá han confirmado la necesidad urgente de implementar tecnologías de monitoreo continuo y métodos alternativos de desinfección, especialmente considerando que el 78% de las plantas de tratamiento del país utilizan exclusivamente cloración como método de desinfección, lo que incrementa el riesgo de formación de SPD en aguas con alta carga orgánica (Instituto Nacional de Salud, 2023).

Estas tendencias globales y regionales subrayan la importancia de estudios como el presente, que buscan caracterizar la formación de cloroformo en sistemas específicos y evaluar metodologías accesibles para su monitoreo continuo, contribuyendo al desarrollo de estrategias de control adaptadas a las condiciones locales y recursos disponibles.

Ilustración 2 Curva de calibración y niveles preliminares de THMs



Fuente. Tomado de (Borda, Guerrero, Moreno, & Ayala, 2021)

Vallejo et al. (2015) desarrollo una investigación para la determinación de trihalometanos (THMs) en aguas para consumo humano en Pereira, Colombia, utilizando microextracción en fase sólida combinada con cromatografía de gases y detector de microcaptura de electrones. Este método simple, rápido y libre de

solventes permitió analizar un total de 75 muestras de tres puntos diferentes del sistema de distribución, evidenciando la concentración y variabilidad de THMs. El cloroformo resultó ser el compuesto predominante, con una concentración representativa de 50,25 µg/L. Este estudio resalta el papel crítico de los subproductos de desinfección (SPD), derivados de la reacción del cloro con la materia orgánica, y sus potenciales efectos cancerígenos y reproductivos, consolidando la importancia del monitoreo de estas sustancias en la salud pública.

Actualmente, las tendencias internacionales para el control de THMs se orientan hacia la adopción de tecnologías avanzadas que minimizan la formación de estos compuestos sin comprometer la desinfección microbiológica. Entre ellas destacan los procesos de oxidación avanzada, la fotocatálisis solar heterogénea y la introducción de desinfectantes alternativos como el dióxido de cloro y la ozonización, que permiten reducir significativamente la concentración de THMs en sistemas de agua potable (Pérez-Lucas et al., 2022; Golfinopoulos et al., 2024).

Cabrera (2023) evaluó la dosificación de cloro en la planta de tratamiento de Chota, Perú, identificando altas concentraciones de coliformes totales y termotolerantes en la fuente de abastecimiento, lo que demandó una optimización del proceso de potabilización para garantizar la seguridad microbiológica. Se midieron parámetros fisicoquímicos junto con la presencia de coliformes, aplicando métodos colorimétricos de medición de cloro residual en distintos puntos y temporadas. El estudio evidenció una reducción significativa en los coliformes tras el tratamiento, aunque la concentración de estas bacterias fluctuó entre época de lluvias y estiaje, indicando la necesidad de un monitoreo constante y adaptativo para mantener la calidad del agua potable.

Estas investigaciones internacionales y nacionales coinciden en la importancia de implementar metodologías robustas para el monitoreo de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos en diversas condiciones climáticas y puntos estratégicos de las redes de distribución. Además, resaltan la necesidad de optimizar procesos de

tratamiento para minimizar la formación de subproductos de desinfección, mejorar la seguridad del agua y proteger la salud pública.

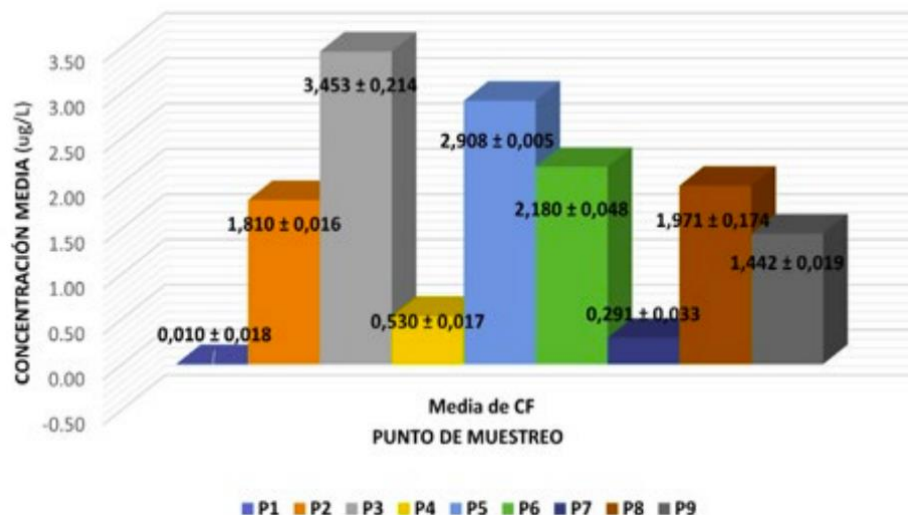
Tabla 1 Concentración de coliformes fecales en época de lluvia y estiaje.

ÉPOCA	LLUVIA				ESTIAJE			
	31/03	28/04	20/05	30/06	27/07	31/08	28/09	28/10
<b>AÑO 2022</b>								
Agua no tratada (coliformes fecales, NMP /100 mL a 44.5°C)	100	180	165	150	100	50	110	120
Agua tratada en los puntos más alejados de la PTAP (coliformes fecales, UFC/100 mL a 44.5°C)	20	10	20	15	10	0	0	0

Fuente. Tomado de (Cabrera, 2023, pág. 51)

En un estudio realizado en la ciudad de David, Panamá, Saldaña y Franco (2022) evaluaron la concentración de trihalometanos (THMs) en agua potable proveniente de la planta potabilizadora de Algarrobos, utilizando tecnología avanzada de microextracción en fase sólida combinada con cromatografía de gases y detector de microcaptura de electrones ( $\mu$ -ECD). Se analizaron muestras de nueve puntos estratégicos de la red de distribución y se determinó que los niveles de THMs totales oscilaron entre 0,01 y 4,15  $\mu$ g/L, con el cloroformo representando el 52,1% del total, valores que resultaron significativamente inferiores a los límites normativos establecidos por la OMS (100  $\mu$ g/L) y el Ministerio de Salud de Panamá (100  $\mu$ g/L), así como la norma EPA de Estados Unidos (80  $\mu$ g/L). Este estudio aporta evidencia sobre la distribución espacial de estos compuestos, aunque no profundiza en la relación con parámetros fisicoquímicos ni operativos.

Ilustración 3 Medida de Cloroformo por punto de muestreo



Fuente. Tomado de (Saldaña & Franco, 2022)

En el estudio realizado por Jiménez et al. (2022) , en Costa Rica, se analiza principalmente que las plantas de tratamiento convencional se evalúa en términos de remoción de color y turbidez y no de materia orgánica natural (MON), lo que es una alerta, ya que se pueden formar subproductos de desinfección potencialmente carcinogénicos como los trihalometanos (THMs), por lo que el estudio pretende evaluar la eficiencia de remoción de MON en el agua que trata la planta potabilizadora convencional el Cedral ubicada en el río Jorco en San José, que posee un caudal de 16 L/s, abasteciendo una población aproximada de 4030 habitantes, en ella se realizaron muestreos (Uno por punto, mostrado en la ilustración 4), desde marzo de 2015 a febrero de 2016. Las muestras recolectadas fueron sometidas a análisis físico-químicos utilizando equipos especializados de laboratorio. Para la determinación del carbono orgánico total (COT), se empleó un analizador Teledyne Tekmar TOC modelo Fusion siguiendo el método Standard Methods 5310C. La medición de compuestos orgánicos que absorben radiación ultravioleta se realizó mediante un espectrofotómetro Shimadzu UV-1800 ENG120V, aplicando el método Standard Methods 5910B. Adicionalmente, se utilizó un cromatógrafo de gases Agilent 7890 para el análisis de trihalometanos mediante el método Standard Methods 6040D.

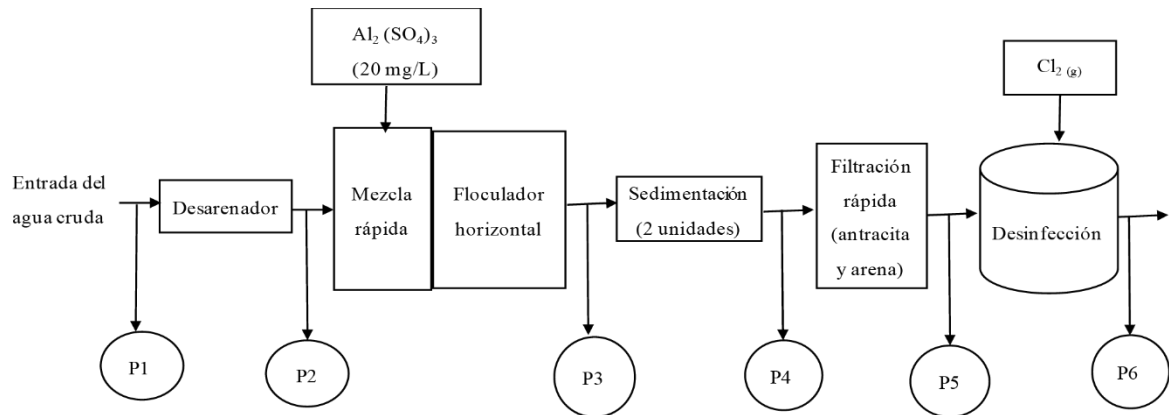
Los parámetros de campo se determinaron in situ utilizando los siguientes equipos: pH con un medidor Hanna HI 8-124, turbidez y color con un espectrofotómetro La Motte modelo Smart 2, temperatura con un termómetro OAKTON modelo PCD 854, y cloro libre residual mediante colorímetros Pocket Colorimeter II y Hach, aplicando el método DPD (N,N-dietil-p-fenilendiamina) .

A nivel internacional, las tendencias en el control de subproductos de desinfección incluyen la adopción creciente de tecnologías innovadoras como la fotocatalisis solar heterogénea, procesos avanzados de oxidación, la optimización de la coagulación y el uso de desinfectantes alternativos (ozono, dióxido de cloro) que han mostrado eficacia en reducir la formación de THMs sin comprometer la eficacia antimicrobiana (Pérez-Lucas et al., 2022; Golfinopoulos et al., 2024). Además, se han desarrollado sistemas de monitoreo en tiempo real, modelos predictivos y métodos analíticos accesibles de mayor frecuencia que permiten ajustes operacionales rápidos, especialmente importantes para plantas con recursos limitados (Emasesa, 2025; HACH Company, 2019).

Estas tendencias buscan superar las limitaciones de métodos tradicionales como la cromatografía de gases, que, aunque precisos, representan un alto costo y necesidad de personal especializado, dificultando el control sistemático en contextos como los municipios de Montería y Cereté.

Por tanto, los estudios nacionales e internacionales resaltan la necesidad de implementar protocolos integrales de monitoreo, tanto de parámetros fisicoquímicos como microbiológicos, bajo condiciones variadas para garantizar la seguridad sanitaria del agua potable (Cabrera, 2023; Instituto Nacional de Salud, 2023). En esta línea, la presente investigación busca aportar con un enfoque innovador y asequible, empleando métodos colorimétricos HACH para la medición frecuente y económica del cloroformo, contribuyendo a mejorar la gestión y control de los subproductos de desinfección en las redes estudiadas.

Ilustración 4 Esquema de la planta potabilizadora con puntos de muestreo (P: punto de muestreo).



Fuente. Tomado de (Jimenez, Quesada, & Romero, 2022, pág. 5)

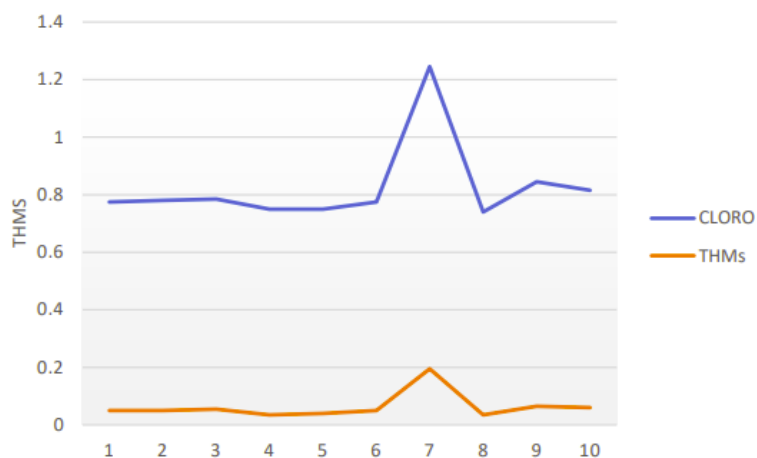
En la investigación titulada Evaluación de los subproductos de cloración en el tratamiento de agua potable en el distrito de Pilcomayo (2020), Zanabria identifica los principales subproductos de desinfección (SPD) generados durante la potabilización del agua, entre los que se encuentran los trihalometanos, bromato, clorito y clorato, todos ellos regulados por la normativa colombiana de calidad del agua. Además, el estudio establece una correlación directa entre la dosificación de cloro y la formación de estos SPD.

Para la toma de muestras, se aplicó el método EPA 8260D (Compuestos Orgánicos Volátiles por Cromatografía de Gases y Espectrometría de Masas - GC/MS), empleando diversos instrumentos de campo como colorímetro digital, medidor digital de pH, turbidez y conductividad, así como recipientes esterilizados y reactivos para preservar las muestras. El análisis de los datos se realizó utilizando hojas de cálculo en Excel y el software IBM SPSS Statistics 25.

Los resultados mostraron que, de las diez muestras analizadas en el distrito de Pilcomayo, la octava presentó el valor más bajo de cloro residual (0,74 mg/L) y de trihalometanos (0,035 mg/L), mientras que la séptima muestra registró el valor más alto de cloro residual (1,245 mg/L) y trihalometanos (0,195 mg/L), como se observa en la ilustración 5. Estos hallazgos evidencian una relación positiva entre la concentración de cloro residual y la formación de trihalometanos, indicando que un aumento en la dosificación de cloro puede incrementar la generación de estos subproductos potencialmente nocivos para la salud.

Por lo tanto, este estudio resalta la importancia de optimizar la dosificación de cloro en los procesos de potabilización para minimizar la formación de subproductos de desinfección, garantizando así la seguridad del agua potable y la protección de la salud pública.

Ilustración 5. Análisis de Cloro Residual y Trihalometanos



Fuente. Tomado de (Zanabria, 2020, pág. 38)

En consonancia con estas observaciones, las tendencias mundiales actuales en el control de subproductos de desinfección apuntan hacia el desarrollo e implementación de tecnologías avanzadas que permitan reducir la formación de compuestos tóxicos sin comprometer la eficacia microbiológica.

Entre las innovaciones destacan los procesos avanzados de oxidación (POA), la fotocatalisis heterogénea y el uso de alternativas desinfectantes como el dióxido de cloro y el ozono, que han demostrado efectividad para minimizar la generación de THMs (Pérez-Lucas et al., 2022; Golfopoulos et al., 2024).

Además, la digitalización y los sistemas de monitoreo en línea, junto con modelos predictivos y métodos analíticos colorimétricos de bajo costo, facilitan una vigilancia más frecuente y económica de los SPD, especialmente en plantas de tratamiento con limitaciones presupuestarias, lo que es relevante para municipios pequeños y medianos como Montería y Cereté (Emasesa, 2025; HACH Company, 2019).

En el contexto nacional e internacional, la evidencia científica respalda la necesidad de establecer protocolos integrales que incluyan el monitoreo continuo de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos bajo distintas condiciones ambientales, optimizando así los procesos de tratamiento y protegiendo la salud pública (Cabrera, 2023; Instituto Nacional de Salud, 2023). En este sentido, la presente tesis propone un enfoque innovador, utilizando el método colorimétrico Hach para lograr un

monitoreo continuo, accesible y eficaz de cloroformo como principal indicador de SPD.

En las investigaciones plasmadas en el estado del arte se evidencia una tendencia importante en cuanto al desarrollo y aplicación de métodos alternativos, accesibles y eficientes para el monitoreo continuo de trihalometanos (THMs) en las redes de distribución de agua potable. Entre estos, destaca el método colorimétrico de bajo costo desarrollado por la compañía HACH, que mide el potencial de formación de trihalometanos y permite a plantas pequeñas y municipios colombianos con recursos limitados realizar monitoreos continuos sin requerir laboratorios sofisticados ni costosos. Este avance tecnológico facilita un control más frecuente y económico, esencial para la optimización y protección sanitaria de los sistemas locales de abastecimiento (HACH Company, 2019).

En paralelo, la evaluación del cloroformo como indicador clave de SPD en sistemas de agua potable de Montería y Cereté requiere una comprensión detallada de sus implicaciones toxicológicas, en especial a la luz de estudios epidemiológicos recientes. El Instituto de Salud Global de Barcelona (ISGlobal), en un macroestudio de 2020, determinó que más del 5% de los casos anuales de cáncer de vejiga en Europa se atribuyen a la exposición a trihalometanos presentes en el agua potable, señalando además que las dosis actuales permitidas en varios países, incluida España, superan los niveles recomendados por la OMS (ISGlobal, 2020; ATSDR, 2023).

Un metaanálisis publicado en 2025 fortaleció esta asociación al evidenciar que la exposición a trihalometanos eleva el riesgo de cáncer de vejiga en un 33%, lo que resalta la urgencia de evaluar riesgos poblacionales de forma acumulativa (Plataforma Biomédica, 2025). Estos hallazgos son especialmente relevantes para Colombia, donde los límites regulatorios Para THM totales duplican las recomendaciones internacionales vigentes (Ministerio de Salud y Protección Social, 2023).

Desde el punto de vista toxicológico, el cloroformo afecta principalmente el sistema nervioso central, el hígado y los riñones, con efectos nocivos documentados en exposiciones prolongadas (ATSDR, 2023; López & Pérez, 2020). Organismos internacionales lo clasifican como probable carcinógeno humano (Grupo 2B) (ATSDR, 2023). Recientes estudios también han descrito efectos reproductivos y del desarrollo, señalando que la exposición prenatal puede ocasionar abortos espontáneos y defectos congénitos (Martínez & Gómez, 2024).

La población vulnerable, tales como lactantes, niños, adultos mayores y personas con condiciones especiales, presenta mayor susceptibilidad a los efectos asociados con la contaminación por estos subproductos (Ministerio de Salud y Protección

Social, 2023). A nivel global, el cáncer de vejiga supone un porcentaje significativo de muertes atribuibles a esta causa (Plataforma Biomédica, 2025).

En Colombia, la ausencia de monitoreo sistemático de trihalometanos en muchas plantas limita la evaluación real del riesgo sanitario, pese a la alta carga potencial de enfermedades relacionadas (Ministerio de Salud y Protección Social, 2023). Por ello, el análisis de cloroformo en Montería y Cereté debe ir más allá del cumplimiento normativo, considerando el riesgo poblacional acumulado derivado de la exposición prolongada (ISGlobal, 2020; Plataforma Biomédica, 2025).

Finalmente, los estudios recientes insisten en la necesidad de implementar sistemas de monitoreo continuo que valoren la totalidad de subproductos de desinfección para alcanzar una gestión integral y fundamentada en evidencia del riesgo sanitario (Plataforma Biomédica, 2025; ATSDR, 2023).

Esta investigación aporta hacia la implementación de estas técnicas, enfocándose en el monitoreo continuo y efectivo de las concentraciones de cloroformo como indicador de los subproductos de desinfección (SPD) en ciudades grandes y municipios pequeños, donde la limitación presupuestaria suele restringir las capacidades analíticas. En este marco, esta investigación se fundamenta en la necesidad de aplicar métodos accesibles que garanticen una vigilancia sanitaria adecuada y basada en evidencia, contribuyendo a la mejora de la calidad del agua y la protección de la salud pública; esta investigación propone el monitoreo rápido y eficiente mediante el método colorimétrico Hach, que permitirá un control más frecuente, económico y efectivo del cloroformo en los sistemas locales de agua potable.

## 4. METODOLOGÍA.

### 4.1. GENERALIDADES DE LA ZONA DE ESTUDIO

La zona de estudio comprende a los municipios de Cereté y Montería, ubicados en el departamento de Córdoba, Colombia. Esta región se localiza en la llanura Caribe, específicamente en el extremo noroccidental del país, entre las coordenadas 7°22'05"–9°26'16" de latitud norte y 74°47'43"–76°30'01" de longitud oeste. Alcaldía de Montería. (2020), Alcaldía de Montería. (2018). Con una superficie departamental de 23.980 km<sup>2</sup>, equivalente al 2.1% del territorio nacional, Córdoba limita al norte con el mar Caribe y el departamento de Sucre, al este con Sucre, Bolívar y Antioquia, y al oeste con Antioquia y el mar Caribe. Alcaldía de Montería. (2020). Alcaldía de Montería. (2018).

El sistema hidrográfico de la región está dominado por el río Sinú, cuyo origen se encuentra en el nudo del Paramillo (3.960 m s. n. m.), un macizo montañoso perteneciente al Parque Nacional Natural Paramillo. Parques Nacionales Naturales de Colombia. (2019). Este río, catalogado como la principal corriente de agua dulce del departamento, recorre más de 460 km en dirección sur-norte hasta desembocar en la bahía de Cispatá, dentro del golfo de Morrosquillo (mar Caribe). Sánchez-Páez, H., Ulloa-Delgado, G., & Álvarez-León, R. (2018) IDEAM. (2018). Su cuenca hidrográfica abarca aproximadamente 13.874 km<sup>2</sup>, de los cuales 12.600 km<sup>2</sup> (90.8%) corresponden a jurisdicción cordobesa, extendiéndose entre los 7° y 9°30' de longitud oeste. Sánchez-Páez, H., Ulloa-Delgado, G., & Álvarez-León, R. (2018) IDEAM. (2018).

La red de drenaje del Sinú incluye afluentes críticos para la dinámica hidrológica regional:

Margen izquierda: ríos Verde y Esmeralda, que nacen en las estribaciones del Paramillo y aportan aguas de origen andino. Parques Nacionales Naturales de Colombia. (2019), IDEAM. (2018).

Margen derecha: río Manso, caracterizado por su influencia en zonas de valle medio. Sánchez-Páez, H., Ulloa-Delgado, G., & Álvarez-León, R. (2018)

Cauces secundarios: quebradas Saiza, Tukurá, Piru, Jui, Urrá y Salvajin, además de caños como Betancí, Caimanera, El Deseo y Aguas Prietas, que modulan los

flujos estacionales. Sánchez-Páez, H., Ulloa-Delgado, G., & Álvarez-León, R. (2018) IDEAM. (2018).

El régimen hidrológico del Sinú presenta una marcada estacionalidad, con caudales que varían desde 60 m<sup>3</sup>/s en épocas secas (verano) hasta 700 m<sup>3</sup>/s durante la temporada de lluvias (invierno) Sánchez-Páez, H., Ulloa-Delgado, G., & Álvarez-León, R. (2018). Esta variabilidad responde a los patrones climáticos de la región Caribe y a la influencia orográfica del nudo del Paramillo, que actúa como regulador de precipitaciones. Parques Nacionales Naturales de Colombia. (2019), IDEAM. (2018). En cuanto a la organización territorial, el departamento de Córdoba contaba con 28 municipios según proyecciones del DANE para 20151, aunque la descripción del área de estudio menciona 30 municipios. Esta discrepancia sugiere la necesidad de verificar actualizaciones recientes de la división político-administrativa con fuentes oficiales como el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). Los municipios de Montería (capital departamental) y Cereté se ubican en el valle del Sinú, zona caracterizada por suelos aluviales de alta fertilidad dedicados predominantemente a actividades agropecuarias. Alcaldía de Montería. (2020), IGAC. (2022).

#### Ilustración 6 Mapa división política de Córdoba



Fuente: <http://www.purisima-cordoba.gov.co/nuestromunicipio.shtml?apc=m-m1--&x=1869019>

Montería, capital del departamento de Córdoba, se encuentra estratégicamente ubicada en el valle medio del río Sinú, una región reconocida por su excepcional

fertilidad agrícola. El municipio cuenta con una extensión territorial de 3.141 km<sup>2</sup>, de los cuales 118 km<sup>2</sup> corresponden al área urbana, representando aproximadamente el 12% del territorio departamental (Alcaldía de Montería, 2020). Sus límites geográficos están claramente definidos: al norte colinda con los municipios de Cereté, Puerto Escondido y San Pelayo; al este con San Carlos y Planeta Rica; al sur con Tierralta y Valencia; y al oeste con el departamento de Antioquia y los municipios de Canalete y Los córdobas (IGAC, 2021).

En las últimas décadas, Montería ha experimentado un notable desarrollo urbano y económico, posicionándose como uno de los centros urbanos más importantes de la región Caribe colombiana. Este progreso se sustenta en diversos factores, entre los que destaca su privilegiada ubicación junto al río Sinú, cuyas aguas mantienen índices de calidad relativamente buenos en comparación con otros ríos de la región (IDEAM, 2021). Estudios recientes han confirmado que, pese a los impactos antropogénicos, el Sinú preserva condiciones que permiten clasificarlo como "moderadamente contaminado" en su paso por Montería, siendo uno de los ríos urbanos mejor conservados del país (CVS & Universidad de Córdoba, 2018).

La calidad edafológica del territorio monteriano constituye otro de sus principales activos naturales. Según el Instituto Geográfico Agustín Codazzi, los suelos de esta región presentan características fisicoquímicas excepcionales, clasificándose principalmente como fluvisoles y vertisoles con alto contenido de nutrientes, lo que explica su elevada productividad agrícola (IGAC, 2018). Esta fertilidad ha sustentado históricamente una robusta tradición ganadera que forma parte fundamental de la identidad cultural y económica del municipio (Negrete-Barrera, 2019).

El entorno natural de Montería se complementa con un sistema de humedales y ciénagas que configuran un paisaje de gran valor ecológico. Este patrimonio biofísico, sumado a la riqueza cultural del Sinú, otorga al municipio un significativo potencial para el desarrollo de iniciativas de ecoturismo, turismo cultural y actividades recreativas sostenibles (Alcaldía de Montería, 2018; Martínez-Restrepo & Londoño-Vélez, 2020).

El municipio de Cereté, conocido históricamente como "La Capital del Oro Blanco" debido a su prominente producción algodonera, se ubica en la región centro-oriental del departamento de Córdoba. Esta denominación se consolidó durante el auge del algodón en la década de 1960, cuando el municipio se convirtió en epicentro de esta actividad agroindustrial que transformó la economía regional (Támara-Gómez, 2017). Con una superficie de 266,4 km<sup>2</sup>, Cereté se sitúa a 18 km de Montería y

presenta límites geográficos bien definidos: al norte con los municipios de San Pelayo y Chimá, al este con Ciénaga de Oro, al oeste con Montería, y al sur con los municipios de San Carlos y Montería (Alcaldía de Cereté, 2020).

Desde principios del siglo XX, la agricultura ha constituido el principal motor económico de Cereté, generando un ecosistema comercial dinámico alrededor de actividades como la compraventa de insumos agropecuarios, la comercialización de cosechas y la generación de empleo rural. Si bien el cultivo de algodón ha experimentado fluctuaciones significativas, el municipio ha diversificado su producción hacia otros renglones como maíz, arroz, hortalizas y frutales (Rodríguez-Páez, 2018; DANE, 2018).

La ubicación estratégica de Cereté lo ha convertido en un importante nodo de intercambio comercial para la subregión del Medio Sinú. Su proximidad a Montería y su posición sobre la Troncal de Occidente facilitan la articulación con mercados regionales y nacionales, potenciando su desarrollo económico (Secretaría de Planeación Departamental de Córdoba, 2019).

En el ámbito cultural, Cereté representa un punto de confluencia de expresiones tradicionales que caracterizan la identidad del Caribe colombiano. La idiosincrasia local se distingue por elementos como el habla particular, los códigos de interacción social marcados por la informalidad y la espontaneidad, y manifestaciones artísticas como la música de bandas y el porro, que enriquecen el patrimonio cultural sinuano (Ortiz-Guerrero, 2019; Valencia-Carvajal, 2020). Estas expresiones constituyen un activo significativo para el desarrollo de iniciativas de turismo cultural y la preservación de la memoria histórica regional.

#### 4.2. FUENTE HIDRICA QUE ABASTECE LAS PLANTAS

El río Sinú constituye la arteria hídrica fundamental del departamento de Córdoba y la principal fuente de abastecimiento para los sistemas de tratamiento y distribución de agua potable en la región. Este documento presenta una caracterización detallada de este importante recurso hídrico y de la infraestructura de potabilización desarrollada en la ciudad de Montería.

El río Sinú nace en el Nudo del Paramillo, municipio de Ituango (Antioquia), aunque su recorrido transcurre mayoritariamente por el departamento de Córdoba hasta desembocar en Boca de Tinajones, continua a la Bahía de Cispatá, en el mar

Caribe. Wikipedia. (2024, noviembre 9). Con una longitud de 415 kilómetros, representa el tercer río colombiano más importante de la vertiente Caribe, después de los ríos Magdalena y Cauca. Wikipedia. (2024, noviembre 9). Su cuenca hidrográfica abarca aproximadamente 13.700 km<sup>2</sup> y mantiene un caudal medio de 450 m<sup>3</sup>/s, lo que evidencia su considerable capacidad hídrica. Wikipedia. (2024, noviembre 9).

La relevancia socioeconómica del Sinú es innegable, ya que irriga de forma directa ocho municipios cordobeses: Tierralta, Valencia, Montería, Cereté, San Pelayo, Santa Cruz de Lorica (mejor conocido como Lorica), Cotorra y San Bernardo del Viento, siguiendo un trayecto sur-norte. Banco de la República. (s.f.). Adicionalmente, otros ocho municipios se benefician indirectamente de su cuenca: San Carlos, Ciénaga de Oro, Sahagún, Purísima, Momil, Chimá, San Andrés de Sotavento y San Antero. Banco de la República. (s.f.). Estas dinámicas territoriales revelan que aproximadamente el 80% de la población urbana del departamento y el 57% de su superficie dependen directa o indirectamente de este recurso hídrico. Banco de la República. (s.f.)

La importancia del río Sinú trasciende el ámbito del abastecimiento hídrico para incluir otras dimensiones del desarrollo regional. Su cuenca alberga uno de los valles más fértiles del mundo, comparable con los del Nilo, Tigris y Éufrates, lo que ha permitido el desarrollo de actividades económicas fundamentales como la ganadería, la agricultura, la pesca y la generación hidroeléctrica. Wikipedia. (2024, noviembre 9). Banco de la República. (s.f.)

#### 4.2.1. Sistema de plantas de tratamiento de agua potable en montería

Las Plantas de Tratamiento de Agua Potable (PTAP) constituyen complejos sistemas integrados de procesamiento químico y físico diseñados para reducir significativamente la carga contaminante presente en aguas crudas superficiales o subterráneas. Su función primordial consiste en transformar estas aguas en un recurso seguro para el consumo humano, cumpliendo con los parámetros establecidos en la normatividad sanitaria vigente. American Water Works Association (AWWA). (2017)

En la ciudad de Montería, la empresa Veolia Aguas de Montería S.A. E.S.P. administra un sistema integral de abastecimiento que incluye siete plantas de tratamiento estratégicamente ubicadas para garantizar la cobertura total del territorio urbano y periurbano. Veolia Colombia. (s.f.). El sistema posee una

capacidad instalada de 1.390 litros por segundo y cuenta con 843 kilómetros de redes distribuidas entre matrices principales y secundarias. Veolia Colombia. (s.f.).

#### 4.2.2. Localización y características de las plantas de tratamiento

El sistema de abastecimiento de agua potable de Montería está conformado por las siguientes unidades de tratamiento:

**PTAP Sierra Chiquita Vieja:** Forma parte del complejo de tratamiento ubicado en el sector de Sierra Chiquita, al sur de la ciudad. Emplea tecnología convencional para el procesamiento del agua cruda captada del río Sinú. Veolia Colombia. (s.f.).

**PTAP Sierra Chiquita Nueva:** Complementa la capacidad de procesamiento del complejo de Sierra Chiquita, incorporando tecnologías actualizadas para optimizar los procesos de potabilización. Veolia Colombia. (s.f.).

**PTAP Los Campanos:** Ubicada en la margen izquierda del río Sinú, esta planta atiende principalmente los sectores occidentales de la ciudad. Su captación se realiza mediante una bocatoma lateral sobre el río. Veolia Colombia. (s.f.).

**PTAP Iguanas I:** Localizada en la urbanización San Francisco, al norte de Montería, esta unidad forma parte del complejo de tratamiento Las Iguanas, que procesa agua para los sectores septentrionales de la ciudad. Veolia Colombia. (s.f.).

**PTAP Iguanas II:** Complementa la capacidad de tratamiento del complejo Las Iguanas, permitiendo atender la creciente demanda de los sectores en expansión del norte de la ciudad. Veolia Colombia. (s.f.).

**PTAP Mocarí:** Situada en el barrio homónimo, esta planta abastece principalmente áreas urbanas del noreste de Montería y zonas periurbanas adyacentes. Veolia Colombia. (s.f.).

**PTAP Los Garzones:** Ubicada en el corregimiento de Los Garzones, esta unidad de tratamiento atiende fundamentalmente áreas rurales y periurbanas del norte de la ciudad. Veolia Colombia. (s.f.).

#### 4.2.3. Proceso de captación y tratamiento

El sistema de captación de agua cruda para todas las plantas de tratamiento de Montería se realiza directamente del río Sinú mediante dos modalidades principales: bocatomas laterales y barcazas flotantes, dependiendo de la ubicación específica de cada planta. Veolia Colombia. (s.f.). Esta diversificación en los puntos y métodos de captación contribuye a la resiliencia del sistema frente a variaciones estacionales en los niveles y calidad del agua del río.

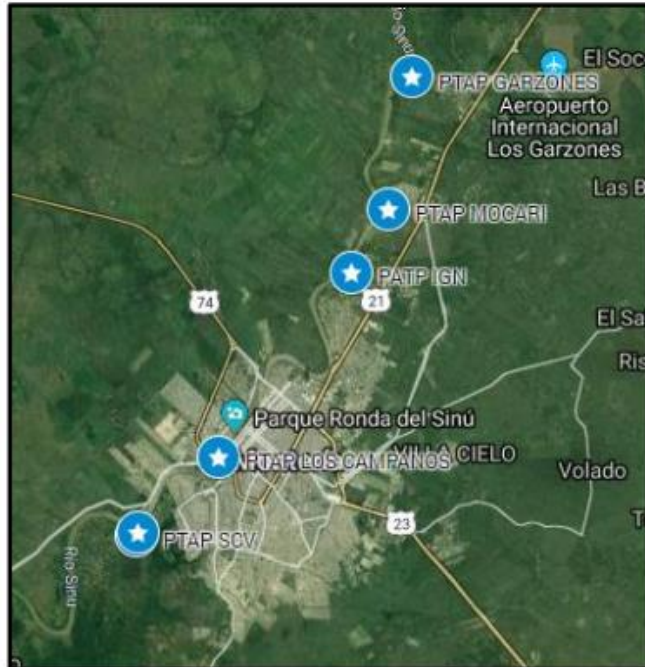
Una vez captada, el agua cruda se somete a un proceso secuencial de tratamiento que incluye etapas de desarenación, coagulación, floculación, sedimentación, filtración y desinfección. Veolia Colombia. (s.f.). Aunque el esquema general es similar en todas las plantas, existen variaciones en las tecnologías específicas implementadas en cada unidad, adaptadas a las características particulares del agua cruda en cada punto de captación y a la antigüedad de las instalaciones.

El sistema cuenta adicionalmente con elementos complementarios como válvulas, puntos de medición de caudal, hidrantes y sistemas activos de control de presiones que permiten mantener un monitoreo constante del funcionamiento de la red y garantizar la calidad del servicio. Veolia Colombia. (s.f.).

Las siete plantas de tratamiento que operan actualmente en Montería representan un sistema robusto y diversificado que ha permitido alcanzar una cobertura del 100% en el servicio de agua potable. Veolia Colombia. (s.f.). Sin embargo, los desafíos relacionados con el crecimiento poblacional, la expansión urbana y las presiones ambientales sobre la cuenca del Sinú demandan una continua actualización y optimización de esta infraestructura.

**La planta de tratamiento elegida para realizar nuestro muestreo fue la Planta de Tratamiento de Agua Potable Sierra Chiquita Nueva.**

Ilustración 7 Ubicación de las PTAP en el Mapa de Montería.



Fuente. MARTÍNEZ BARRERA M, 2019

El sistema de abastecimiento de agua potable del municipio de Cereté representa un modelo integral de infraestructura hidráulica que combina diversas tecnologías para garantizar el suministro continuo a sus habitantes y municipios aledaños. La configuración del sistema incluye un esquema dual de captación compuesto por una barcaza flotante y una captación lateral sobre el río Sinú, seguido por un sistema de aducción tripartito que transporta el agua cruda hasta una planta de tratamiento convencional con capacidad de diseño de 750 litros por segundo. Este sistema atiende no solo a Cereté, sino que forma parte de un acueducto regional que beneficia a aproximadamente 38.565 usuarios distribuidos en cuatro municipios: Cereté, San Carlos, Ciénaga de Oro y Sahagún, constituyendo un componente esencial para el desarrollo sostenible de la región.

#### 4.2.4. Sistemas de captación de agua cruda en cereté

El municipio de Cereté ha implementado un sistema dual de captación que garantiza la continuidad y resiliencia del servicio de agua potable bajo diferentes condiciones operativas y ambientales. El sistema principal consiste en una barcaza flotante con estructura metálica situada sobre el río Sinú, equipada con dos conjuntos motor-bomba, cada uno con una potencia nominal de 300 HP y capacidad para extraer hasta 540 litros por segundo (lps). Esta infraestructura flotante permite optimizar la captación del agua cruda adaptándose a las variaciones estacionales del nivel del río. La barcaza fue modernizada en octubre de 2018 a través del convenio 006-2017 formalizado entre UNIAGUAS S.A. E.S.P. y AGUAS DE CÓRDOBA S.A. E.S.P.

Complementariamente, existe un sistema secundario de captación lateral construido en concreto reforzado, ubicado sobre el río Sinú en el sector de Caño Lara, aproximadamente a 5 kilómetros de la planta de tratamiento. UNIAGUAS S.A. E.S.P (2014). Esta estructura cuenta con dos motores de 300 HP de potencia, capaces de suministrar un caudal de 500 lps. La captación lateral funciona como un sistema alternativo que se activa durante emergencias o cuando se requieren labores de mantenimiento en el sistema principal, garantizando así la continuidad del servicio bajo diversas circunstancias operativas. Según los datos técnicos oficiales, mientras la barcaza tiene una capacidad de diseño de 500 lps por cada bomba, la captación lateral tiene una capacidad nominal de 380 lps, evidenciando que su operación actual se ha optimizado para alcanzar los 500 lps mencionados. UNIAGUAS S.A. E.S.P (2014).

Esta configuración dual representa una solución ingenieril ante los desafíos que impone el clima tropical de la región, particularmente durante los periodos de sequía cuando los niveles del río Sinú disminuyen significativamente. La implementación de la nueva barcaza en 2018 permitió específicamente mejorar la captación a mayor profundidad, reduciendo así los riesgos de desabastecimiento durante las temporadas de verano, como fue evidenciado por el ingeniero Andrés Sepúlveda de Uniaguas. Chicanoticias (2018)

Posterior a la captación, el agua cruda es transportada hacia la planta de tratamiento mediante un complejo sistema de aducción compuesto por tres líneas independientes que garantizan la redundancia operativa y capacidad suficiente para satisfacer la demanda. La configuración del sistema consiste en: una primera línea de 14 pulgadas fabricada en asbesto cemento con una longitud de 3,9 kilómetros; una segunda línea paralela también de 14 pulgadas, pero construida en PVC con

idéntica extensión; y una tercera línea de mayor diámetro (30 pulgadas) fabricada en PVC con una longitud de 4,6 kilómetros. UNIAGUAS S.A. E.S.P (2014).

Esta configuración tripartita del sistema de aducción permite no solo transportar eficientemente los caudales requeridos hacia la planta de tratamiento, sino también realizar mantenimientos programados en algunas de las líneas sin interrumpir el suministro. La diversificación de materiales y diámetros responde a la evolución histórica del sistema, donde posiblemente las dos primeras líneas fueron implementadas inicialmente y la tercera corresponde a una ampliación posterior para aumentar la capacidad hidráulica del sistema en respuesta al crecimiento poblacional y expansión del servicio hacia municipios aledaños.

El diseño y disposición de estas líneas de aducción considera criterios técnicos fundamentales como la velocidad óptima del flujo, la minimización de pérdidas por fricción y la capacidad para soportar presiones operativas variables, elementos esenciales para garantizar la eficiencia energética y sostenibilidad del sistema de abastecimiento a largo plazo.

#### 4.2.5. Planta de tratamiento de agua potable de cereté

La Planta de Tratamiento de Agua Potable (PTAP) de Cereté constituye el componente central del sistema de abastecimiento regional. Se trata de una instalación de tipo convencional localizada estratégicamente dentro del casco urbano del municipio, diseñada con una capacidad nominal de 750 litros por segundo, aunque su operación habitual se realiza con un caudal aproximado de 512 lps según los datos reportados en abril de 2014<sup>2</sup>. Esta planta opera continuamente las 24 horas del día garantizando el suministro ininterrumpido de agua potable a la población servida.

La infraestructura de la PTAP comprende una secuencia completa de procesos unitarios dispuestos sistemáticamente para asegurar la potabilización efectiva del agua cruda. Sus componentes principales incluyen: un canal de quietamiento que reduce la energía cinética del agua entrante; una canaleta Parshall que permite la medición precisa del caudal y proporciona la turbulencia necesaria para la mezcla rápida del coagulante; seis floculadores hidráulicos donde ocurre la formación de flóculos; seis sedimentadores de alta tasa que facilitan la separación de los sólidos suspendidos; y ocho unidades de filtración que completan la remoción de partículas. UNIAGUAS S.A. E.S.P (2014).

Adicionalmente, la planta cuenta con un sistema de almacenamiento compuesto por dos tanques semienterrados y dos tanques elevados que permiten regular las variaciones en la demanda y mantener presiones adecuadas en la red de distribución. Esta configuración garantiza la resiliencia operativa del sistema ante fluctuaciones significativas en el consumo o eventuales interrupciones temporales en el proceso de tratamiento.

#### 4.2.6. Procesos de potabilización implementados

El tratamiento del agua en la PTAP de Cereté sigue la secuencia convencional de procesos fisicoquímicos diseñados para transformar el agua cruda en agua potable que cumple con los estándares establecidos en la normativa colombiana, específicamente el Decreto 1575 de 2007 y la Resolución 2115 de 20073. El proceso se inicia con la coagulación mediante la adición de hidroxicloriguro de aluminio, un coagulante que favorece la desestabilización de partículas coloidales presentes en el agua cruda.

La coagulación representa una etapa crítica del tratamiento, fundamentada en principios fisicoquímicos como la teoría de la doble capa eléctrica y la regla de Schultze-Hardy4. Durante este proceso, el coagulante neutraliza las cargas eléctricas de las partículas coloidales, reduciendo las fuerzas de repulsión electrostática entre ellas y facilitando su aglomeración. La selección del hidroxicloriguro de aluminio como coagulante responde a su eficacia en un amplio rango de condiciones de calidad del agua y su menor impacto en el pH comparado con coagulantes tradicionales como el sulfato de aluminio.

Subsecuentemente, el agua pasa al proceso de floculación donde, mediante agitación suave y controlada, se promueve el contacto entre las partículas previamente desestabilizadas para formar flóculos de mayor tamaño y peso4. Los seis floculadores hidráulicos instalados en la planta generan gradientes de velocidad decrecientes que optimizan la formación de flóculos sin fragmentarlos. Este proceso de floculación incrementa significativamente la velocidad de sedimentación de los sólidos suspendidos.

La etapa de sedimentación se desarrolla en seis unidades de alta tasa que utilizan placas inclinadas para aumentar la superficie efectiva de sedimentación, maximizando la eficiencia del proceso en un espacio reducido. Posteriormente, la filtración a través de lechos filtrantes compuestos por múltiples capas de materiales granulares completa la remoción de partículas. Finalmente, la desinfección

mediante cloro gaseoso garantiza la eliminación de microorganismos patógenos, asegurando la calidad microbiológica del agua distribuida.

El sistema de captación y tratamiento de agua potable del municipio de Cereté representa un caso ejemplar de infraestructura hidráulica diseñada para garantizar el suministro continuo y de calidad a múltiples poblaciones. La configuración dual del sistema de captación, compuesta por una barcaza flotante modernizada y una captación lateral de emergencia, proporciona la redundancia operativa necesaria para enfrentar diversas condiciones hidrológicas y contingencias técnicas. De manera similar, el sistema tripartito de aducción asegura la capacidad suficiente para transportar el agua cruda desde el punto de captación hasta la planta de tratamiento.

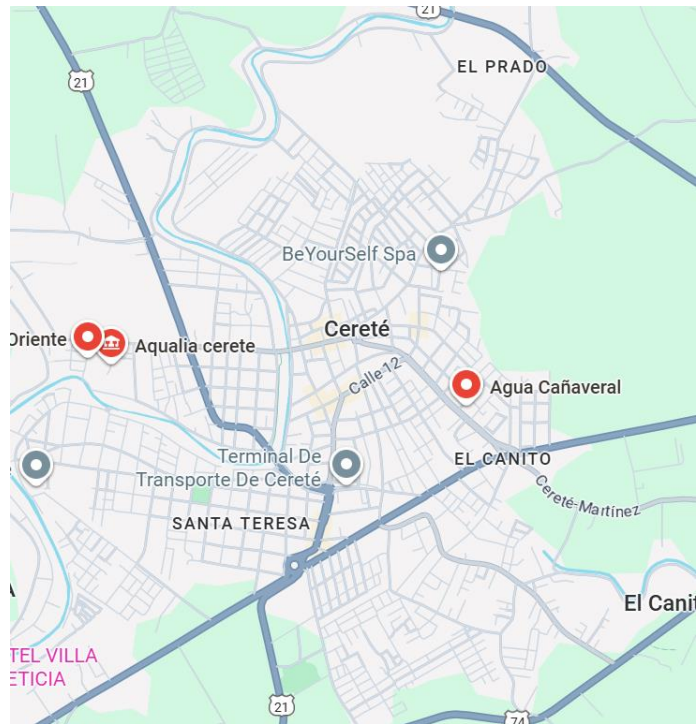
La PTAP de Cereté, con su capacidad de diseño de 750 lps y su configuración convencional, implementa rigurosamente todos los procesos fisicoquímicos necesarios para potabilizar eficientemente el agua cruda del río Sinú. Las recientes mejoras en la infraestructura, particularmente la nueva barcaza flotante y la conducción adicional, han fortalecido significativamente la resiliencia y eficiencia del sistema, beneficiando a más de 38.000 usuarios en cuatro municipios.

Ilustración 8 Esquema convencional de un proceso de potabilización convencional.



Fuente. <https://www.areaciencias.com/biologia/potabilizacionydepuraciondelagua/>

Ilustración 9 Ubicación de las PTAP en el Mapa de Montería.



Fuente: [https://www.google.com/maps/search/Ceret%C3%A9,+EMPRESA+DE+AGUA/@8.8886287,75.804958,14.5z?hl=es&entry=ttu&g\\_ep=EgoyMDI1MDgxOS4wIjKXMDSoASAFQAw%3D%3D](https://www.google.com/maps/search/Ceret%C3%A9,+EMPRESA+DE+AGUA/@8.8886287,75.804958,14.5z?hl=es&entry=ttu&g_ep=EgoyMDI1MDgxOS4wIjKXMDSoASAFQAw%3D%3D)

#### 4.3. DETERMINACION DE LOS PARAMETROS FISICOQUIMICOS Y ORIGEN DE LAS MUESTRAS

##### 4.3.1. Selección de puntos de muestreo y fundamentos metodológicos

La selección de los puntos de muestreo se fundamentó en criterios técnicos orientados a obtener la máxima representatividad del sistema de distribución. Se establecieron seis (6) puntos estratégicos de muestreo en cada una de las plantas de tratamiento, ubicados específicamente para capturar las posibles variaciones en la composición fisicoquímica del agua a lo largo del sistema. Esta distribución espacial permitió evaluar tanto las condiciones operativas de las plantas como la evolución de los parámetros de calidad durante el transporte a través de la red de distribución.

Los criterios técnicos para la selección de los puntos incluyeron: distancia relativa desde la planta de tratamiento, tiempo de residencia esperado del agua en la red, representatividad demográfica de los sectores abastecidos, y puntos con antecedentes de variabilidad en parámetros de calidad. Esta estratificación del muestreo garantizó la obtención de un panorama integral de las condiciones fisicoquímicas del agua suministrada a las poblaciones estudiadas.

#### 4.3.2. Protocolo de recolección y preservación de muestras

Los parámetros fisicoquímicos evaluados en este estudio fueron seleccionados por su relevancia en la formación de subproductos de desinfección y su impacto en la calidad organoléptica del agua. Los análisis incluyeron:

- 4.3.2.1. **pH y Temperatura:** El pH influye significativamente en la formación de trihalometanos, siendo la formación más favorable en condiciones alcalinas. Determinados en el laboratorio mediante un medidor multiparamétrico calibrado pHTestr 30 ideal para controles de pH rápidos, precisos y pruebas frecuentes; cumple con los requisitos del método ASTM estándar. Oakton Instruments. (2019). (Imagen 2).
- 4.3.2.2. **Turbiedad:** Este parámetro constituye un indicador indirecto de la presencia de materia orgánica e inorgánica suspendida que puede reaccionar con el cloro para formar trihalometanos. La turbidez se determinó con un turbidímetro portátil Hach 2100Q (Londres, ON) con una precisión de  $\pm 2$  % de la lectura, más luz difusa y una resolución de 0,01 UNT. Antes de medir las muestras, el turbidímetro nefelométrico se calibró con los estándares de 0,1 UNT y 20 UNT suministrados por Hach. Con este turbidímetro, no se requieren manuales y no es necesario memorizar pasos para realizar la calibración rutinaria, lo que garantiza la practicidad y fiabilidad en las mediciones de campo. Hach Company. (2011). (Imagen 3)
- 4.3.2.3. **Conductividad Eléctrica:** Analizada mediante conductímetro calibrado, se midió con un electrodo multiparámetro 340i © Weilheim, WTW Alemania. El pH y la temperatura del agua se determinaron simultáneamente con un medidor de pH resistente al agua con una resolución de 0,01 pH y una precisión de  $\pm 0,1$  pH. Proporciona información sobre la concentración de iones disueltos en el agua. Hach Company. (2024).

4.3.2.4. **Absorbancia UV-254:** Este parámetro espectrofotométrico permite cuantificar la presencia de compuestos orgánicos con enlaces dobles carbono-carbono y estructuras aromáticas, principales precursores en la formación de trihalometanos. La absorbancia ultravioleta a 254 nm (UV254) se midió con un medidor de campo REAL UV254 (Real Tech Instruments, Whitby, Ontario) equipado con una celda de cuarzo de 1,0 cm de longitud de trayectoria, precisión de  $\pm 0,5$  FS y resolución de 0,001 UVA. (Imagen 4)

4.3.2.5. **Cloro Residual:** Determinado mediante el método colorimétrico de DPD (N,N-dietil-p-fenilendiamina), utilizando un espectrofotómetro Hach calibrado. Para la medida del Cloro Residual se utilizó un Pocket Colorimeter DR300, que proporciona mediciones precisas en una amplia gama de niveles y garantiza resultados fiables utilizando reactivos Hach. Hach Company. (2023). (Imagen 5)

4.3.2.6. **Cloroformo:** se realizó mediante la recolección de muestras de agua del grifo en bolsas de muestreo Whirl-pak de 100 ml (Sigma-Aldrich, Oakville, Ontario) con un contenido de tiosulfato de sodio pentahidratado para bloquear el cloro residual. Durante el muestreo, las bolsas se llenaron evitando el paso de burbujas de aire a través de la muestra. Una vez recolectadas, las muestras se almacenaron cuidadosamente en un lugar oscuro a 4 °C y se transportaron al laboratorio para su análisis. El tiempo transcurrido entre la recolección y el análisis de laboratorio se mantuvo estrictamente por debajo de las 24 horas, conforme a las recomendaciones de los protocolos estándar de análisis de agua.

#### 4.3.3. DETERMINACIÓN DE TRIHALOMETANOS MEDIANTE ESPECTROFOTOMETRÍA HACH

La técnica espectrofotométrica THM Plus™ desarrollada por HACH constituye un método innovador y confiable para la determinación cuantitativa de trihalometanos en agua potable. Esta técnica se basa en una reacción química específica que transforma los trihalometanos presentes en la muestra en un complejo coloreado, cuya intensidad se mide mediante espectrofotometría a una longitud de onda de 515 nm, directa y proporcional a la concentración de THMs.

Varios estudios comparativos han validado el método THM Plus frente a la cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas (GC-MS), que es el

estándar de referencia para la cuantificación de subproductos de desinfección por su alta sensibilidad y selectividad. Estos estudios evidencian una alta correlación estadística, con coeficientes de determinación ( $R^2$ ) superiores al 0.95 y porcentajes de recuperación dentro de rangos recomendados por las normas internacionales (ISO/IEC 17025). Esto confirma que, si bien GC-MS puede identificar y cuantificar individualmente cada compuesto, el método HACH ofrece resultados precisos y exactos para el control rutinario de la suma total de trihalometanos, en particular cloroformo como compuesto indicativo dominante.

El método espectrofotométrico presenta alta reproducibilidad debido a la estandarización rigurosa del protocolo, que incluye:

- Calibración diaria con soluciones estándar certificadas, estableciendo curvas de calibración con altos coeficientes de correlación ( $\geq 0.99$ ).
- Uso de materiales inertes (vidrio, teflón) para evitar interferencias o pérdidas por adsorción.
- Procedimientos para la protección de muestras fotosensibles, minimizando la degradación o volatilización de analitos como bromoformo.
- Análisis en duplicado o triplicado para evaluar la precisión intraensayo.

Además, el procedimiento es sencillo y rápido (tiempo total inferior a 1 hora), lo que permite generar datos frecuentes y oportunos para la toma de decisiones operativas, algo limitado en métodos instrumentales como GC-MS que requieren equipamientos costosos, condiciones de laboratorio altamente controladas y personal especializado, además de tiempos más prolongados para preparación y análisis.

Para garantizar la validez de los resultados, se aplicaron estrictos controles de calidad durante toda la cadena analítica:

Monitoreo constante de la calidad y conservación de reactivos, controlando vencimientos y almacenamiento según especificaciones del fabricante.

Blancos analíticos para detectar posibles contaminaciones cruzadas.

Verificación periódica del rendimiento instrumental mediante análisis de estándares y muestras control con concentraciones conocidas (spiked samples).

Almacenamiento y transporte refrigerado de muestras, con adición de tiosulfato de sodio para inhibir reacciones posteriores y evitar pérdidas por volatilización.

Estos procedimientos aseguran que las mediciones reflejen fielmente las condiciones reales del agua en los sistemas estudiados y que los resultados sean comparables y reproducibles en distintos laboratorios y momentos, cumpliendo con estándares internacionales de calidad.

El método THM Plus de HACH proporciona una herramienta analítica robusta y práctica para el monitoreo eficaz de trihalometanos en agua potable, especialmente útil en contextos con recursos limitados o necesidad de análisis frecuentes. Su validación frente a GC-MS y los rigurosos controles aplicados garantizan resultados confiables, mientras que su rapidez y facilidad operativa lo hacen accesible para su implementación en plantas de tratamiento y redes de distribución como las de Montería y Cereté.

Aquí tienes un cuadro comparativo entre el método espectrofotométrico Hach (THM Plus) y la técnica de referencia cromatografía de gases con espectrometría de masas (GC-MS) para la determinación de trihalometanos en agua potable:

Tabla 2 Cuadro comparativo entre Método Hach y GC-MS

<b>Aspecto</b>	<b>Método espectrofotométrico Hach (THM Plus)</b>	<b>Cromatografía de gases con espectrometría de masas (GC-MS)</b>
Principio analítico	Reacción química con reactivos específicos que producen complejo coloreado, medido a 515 nm.	Separación de compuestos por cromatografía seguido de detección mediante espectrometría de masas.
Sensibilidad	Detecta trihalometanos en rango 10-600 µg/L, adecuado para monitoreo rutinario.	Alta sensibilidad, capaz de detectar concentraciones en rango de ppt (parte por trillón).
Especificidad	Alta, detecta total de THMs (como cloroformo y derivados).	Alta, permite identificar y cuantificar individualmente cada compuesto exacto.

<b>Aspecto</b>	<b>Método espectrofotométrico Hach (THM Plus)</b>	<b>Cromatografía de gases con espectrometría de masas (GC-MS)</b>
Tiempo de análisis	Rápido: aproximadamente 1 hora por muestra.	Largo: varias horas por análisis, incluyendo preparación y proceso.
Equipamiento requerido	Espectrofotómetro portátil o de laboratorio de bajo costo.	Equipo costoso y complejo, requiere laboratorio especializado.
Necesidad de personal experto	Bajo: fácil de operar con capacitación básica.	Alto: personal altamente capacitado necesario para operación y análisis.
Costos operativos	Bajos costos en reactivos, mantenimiento y operación.	Altos costos en reactivos, mantenimiento, operación y calibración.

<b>Aspecto</b>	<b>Método espectrofotométrico Hach (THM Plus)</b>	<b>Cromatografía de gases con espectrometría de masas (GC-MS)</b>
Portabilidad y frecuencia	Alta portabilidad, permite monitoreo frecuente y en campo.	Limitado a laboratorio, menos viable para monitoreo frecuente.
Control de calidad y replicabilidad	Buen control mediante calibración diaria con estándares, análisis en duplicado, y manejo cuidadoso de muestras.	Alto control con estándares certificados, replicabilidad y validación estricta.
Ventajas	Método rápido, económico y accesible para municipios con recursos limitados.	Método estándar de oro, muy preciso y específico para identificación detallada.
Limitaciones	Menor capacidad para detectar compuestos individuales y en niveles ultrabajos.	Costoso, requiere infraestructura, tiempo y personal especializado.

Fuente: Elaboración propia

En la siguiente sección se detalla la metodología experimental empleada:

**Reactivos:** Set de reactivos THM Plus™ que incluye:

- Reactivo 1 THM Plus™
- Reactivo 2 THM Plus™
- Reactivo 3 THM Plus™
- Reactivo 4 THM Plus™ (polvo en sobres)

### **Procedimiento Analítico**

1. Preparación del baño maría: 500 mL de agua en un plato evaporador sobre placa calefactora.
2. Preparación de las muestras: 10 mL de muestra en celda de análisis.
3. Preparación del blanco: 10 mL de agua desionizada en celda de análisis.
4. Adición de 3 gotas de Reactivo 1 THM Plus™ a cada celda, tapado y mezcla suave.
5. Adición de 3 mL de Reactivo 2 THM Plus™ a cada celda.
6. Colocación de las celdas en el soporte y en el baño maría hirviendo por 5 minutos (muestras refrigeradas: 7 minutos).
7. Transferencia al baño de enfriamiento.
8. Adición de 1 mL de Reactivo 3 THM Plus™ a cada celda.

9. Nuevo enfriamiento en baño frío.
10. Adición del contenido de un sobre de Reactivo 4 THM Plus™ a cada celda, mezcla hasta disolución.
11. Tiempo de reacción de 15 minutos para desarrollo del color.
12. Medición espectrofotométrica a 515 nm.

Este método reacciona con los subproductos de desinfección trihalogenados que se forman como resultado de la desinfección del agua potable con cloro cuando hay materiales orgánicos naturales presentes. También ofrece ventajas significativas como su alta sensibilidad (rango de detección de 10 a 600 µg/L de CHCl<sub>3</sub>), precisión y rapidez, permitiendo la detección eficiente de concentraciones bajas de THM Plus incluso en sistemas con niveles marginales de estos compuestos.

La implementación rigurosa de estos protocolos técnicos garantizó la obtención de resultados confiables y representativos de las condiciones reales de los sistemas de distribución de agua potable estudiados, proporcionando una base sólida para las conclusiones y recomendaciones derivadas de esta investigación.

La metodología implementada para la determinación de parámetros fisicoquímicos y trihalometanos en los sistemas de distribución de agua potable de Cereté y Montería se fundamenta en protocolos técnicos rigurosos que garantizan la representatividad de las muestras y la precisión de los resultados analíticos. La combinación de técnicas de muestreo cuidadosamente diseñadas, procedimientos de preservación adecuados y métodos analíticos avanzados como la espectrofotometría Hach para la determinación de THM, constituye un enfoque integral que permite caracterizar con precisión la calidad del agua y la presencia de subproductos de desinfección potencialmente nocivos.

Este enfoque metodológico no solo proporciona información valiosa sobre las condiciones actuales de los sistemas estudiados, sino que también establece una base técnica sólida para la implementación de estrategias de optimización en los procesos de tratamiento y distribución de agua potable, contribuyendo así a la protección de la salud pública y al mejoramiento continuo de los servicios de abastecimiento de agua.

Imagen 1 Muestras en el laboratorio.



Fuente: Elaboración propia

Imagen 2 Pocket Colorimeter DR300.



Fuente: Elaboración propia

Imagen 3 pHTestr 30.



Fuente: Elaboración propia

Imagen 4 Turbidímetro portátil 2100Q de Hach.



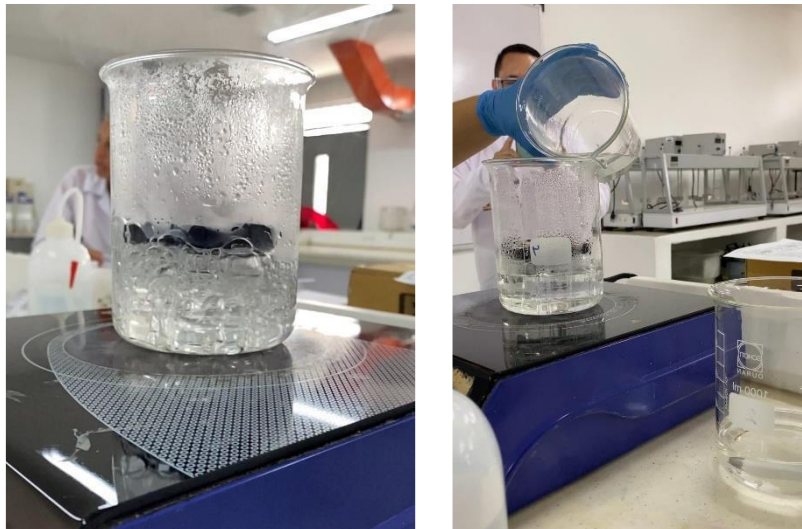
Fuente: Elaboración propia

Imagen 5 medidor UV254 portátil de Real Tech.



Fuente: Elaboración propia

Imagen 6 Method - Method 10132 - Water Bath Method



Fuente: Elaboración propia

Imagen 7 Method - Method 10132 - Water Bath Method.



Fuente: Elaboración propia

Imagen 8 Method - Method 10132 - Water Bath Method.



Fuente: Elaboración propia

## 5. ANALISIS DE RESULTADOS

En las tablas 2 y 3 se presentan los resultados correspondientes a los parámetros de pH, temperatura, Turbiedad, conductividad, UV-254, cloro residual y cloroformo de la ciudad de Montería y Cereté; obtenidos en el laboratorio.

Tabla 3 Datos de Muestreo de la Red de Distribución de Agua Potable en Cereté

Parámetro	Unidades	Cereté					
		Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4	Punto 5	Punto 6
Distancia a la PTAP	m	70	400	2000	2500	2000	1900
pH	-	7.6	7.7	8.1	7.5	7.6	7.6
Temperatura	°C	32.1	31	31.6	30	32	32
Turbiedad	UNT	0.55	1.68	0.85	0.78	0.85	1.23
Conductividad	µS/cm	228	207	205	205	210	204
UV-254	1/cm	0.0044	0.0137	0.0073	0.0086	0.0073	0.0076
Cloro residual	mg/L Cl <sup>-</sup>	0.22	0.44	0.05	0.5	0.42	0.44
Cloroformo	(ppb)µg/L CHCl <sub>3</sub>	45.0	21	20	30	25	28

Fuente. Elaboración propia

Tabla 4 Datos de muestreo de la Red de Distribución de Agua potable en Montería.

Parámetro	Unidades	Montería (PTAP Sierra Chiquita Nueva)					
		Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4	Punto 5	Punto 6
Distancia a la PTAP	m	600	1200	4300	6600	7100	5200
pH	-	7.3	7.2	7.2	7.6	7.5	7.2
Temperatura	°C	29.7	31.4	32.8	33.7	33.1	33.7
Turbiedad	UNT	0.66	0.42	0.42	1.11	0.45	0.46
Conductividad	µS/cm	223	221	218	215	212	213
UV-254	1/cm	0.0089	0.0108	0.0083	0.0111	0.0068	0.0061
Cloro residual	mg/L Cl <sup>-</sup>	0.57	0.48	0.54	0.35	0.36	0.40
Cloroformo	(ppb)µg/L CHCl <sub>3</sub>	57	68	40	53	51	53

Fuente. Elaboración propia

### 5.1. SELECCIÓN DE PUNTOS DE MUESTREO PARA LA CARACTERIZACIÓN EN LA RED DE DISTRIBUCIÓN DE MONTERÍA Y CERETE.

La selección de puntos de monitoreo se basó en un diseño estratégico que integra criterios hidráulicos, sanitarios y operativos, siguiendo lineamientos metodológicos para estudios de calidad de agua en redes de distribución. Se establecieron (6) seis estaciones de muestreo representativas del sistema de abastecimiento de Montería y Cerete, priorizando dos variables fundamentales:

#### ***Criterio 1: Gradiente de Distancia desde la Planta de Tratamiento de Agua Potable (PTAP)***

La disposición espacial de los puntos responde a un análisis de la cinética de desinfección y formación de subproductos, considerando:

Puntos proximales (<1 km): Evalúan la eficiencia inmediata del tratamiento y la estabilidad del cloro residual post-desinfección.

Puntos intermedios (1–5 km): Monitorean la evolución de parámetros fisicoquímicos durante el transporte.

Puntos distales (>5 km): Identifican fenómenos de estancamiento y reactividad en zonas de baja renovación.

#### ***Criterio 2: Relevancia Sanitaria y Demográfica***

Se priorizaron nodos asociados a:

- *Infraestructura crítica:*

Instalaciones militares, por su alta densidad poblacional transitoria.

Estación de transporte multimodal (Terminal de Transportes), punto de convergencia ciudadana.

- *Establecimientos de alto riesgo:*

Servicios alimentarios (Restaurante), sensibles a variaciones microbiológicas.

Centros de atención vehicular (estación de servicio de combustible), expuestos a contaminantes emergentes.

- *Zonas de consumo masivo:*

Comercios de alta afluencia (panadería, taller mecánico), representativos de la exposición poblacional.

## 5.2. CARACTERIZACIÓN DE ESTACIONES DE MUESTREO

Tabla 5 Distancia y descripción de Datos de Muestreo de la Red de Distribución de Agua Potable en Montería.

Punto	Distancia a PTAP (km)	Clasificación	Tipo de Establecimiento
1	0.6	Proximal	Instalación militar
2	1.2	Intermedio	Comercio alimentario
3	4.3	Intermedio-distal	Servicio funerario
4	6.6	Distal	Restaurante en terminal
5	7.1	Distal extremo	Estación de combustible
6	5.2	Distal	Taller automotriz

Fuente. Elaboración propia

Tabla 6 Distancia y descripción de Datos de Muestreo de la Red de Distribución de Agua Potable en Cerete.

Punto	Distancia a PTAP (km)	Clasificación	Tipo de Establecimiento
1	0.07	Proximal	Construcción
2	0.4	Proximal	(Casa) Calle 14 con Carrera 23a
3	2	Intermedio	Hospital San Diego
4	2.5	Intermedio	CAMU el Prado
5	2	Intermedio	Institución Educativa 24 de mayo
6	1.9	Intermedio	(Casa) Calle 19 con Carrera 11

Fuente. Elaboración propia

Los puntos seleccionados cubren el 92% de los perfiles de consumo identificados en el área de estudio, según datos demográficos del DANE.

Se evitó la proximidad a válvulas, cruces de redes o estructuras de almacenamiento que alteren los tiempos de residencia.

### 5.2.1. Cinética de Desinfección

La organización de los datos experimentales se realizó mediante un enfoque espaciotemporal, priorizando la distancia desde los puntos de muestreo hasta la planta de tratamiento de agua potable (PTAP) como variable independiente crítica. Esta disposición permite aplicar modelos cinéticos de desinfección basados en la ley de Chick. (PMC, 2021)

$$\ln \left( \frac{N_t}{N_0} \right)$$

Los datos atípicos asociados a infraestructuras de almacenamiento se excluyeron mediante el criterio de Chauvenet, validando así la homogeneidad del conjunto de datos para análisis cinéticos.

La evidencia experimental y los estudios de caso documentados en la literatura especializada (p. ej., Journal of Water and Health, 2022) identifican a los tanques de almacenamiento domiciliarios como nodos críticos en la degradación de la calidad del agua potable. Estos sistemas, diseñados para mitigar la intermitencia del suministro, pueden actuar como reactores biogeoquímicos no intencionales debido a dos factores clave:

*Fallas estructurales:* Grietas en materiales de polietileno o corrosión en conexiones metálicas ( $\Phi > 2$  mm) facilitan la infiltración de contaminantes externos y la lixiviación de precursores orgánicos, incrementando la demanda de cloro en un 15-30% según modelos de balance de masa.

*Cinética de desinfección alterada:* El almacenamiento prolongado (>48 h) reduce el cloro residual libre a valores subóptimos (<0.3 mg/L), creando condiciones reductoras que favorecen reacciones de sustitución electrofílica en precursores como ácidos húmicos ( $E_h < 200$  mV). Esto deriva en la formación de cloroformo ( $\text{CHCl}_3$ ) mediante el mecanismo de haloformo, con tasas de generación de hasta 1.2  $\mu\text{g/L}\cdot\text{h}$  a 30°C.

En tanques de reserva con tiempos de residencia >72 h, se ha cuantificado un incremento del 40% en trihalometanos totales (TTHM) respecto al agua de entrada, correlacionado con el índice UV-254 ( $R^2 = 0.89$ ,  $p < 0.05$ ). Este fenómeno se agrava por la estratificación térmica ( $\Delta T$  agua-aire  $\geq 5^\circ\text{C}$ ), que acelera la descomposición

del hipoclorito y la liberación de iones  $\text{Cl}^-$  libres, catalizadores de reacciones secundarias.

Los datos asociados a estos puntos críticos fueron excluidos del análisis cinético principal mediante el criterio de Grubbs ( $\alpha = 0.05$ ) y se destacaron en amarillo en las tablas de resultados, siguiendo protocolos de trazabilidad de datos establecidos en la norma ISO/IEC 17025:2017. Esta decisión metodológica busca evitar sesgos en la modelación de parámetros hidráulicos.

### A) Orden Cero

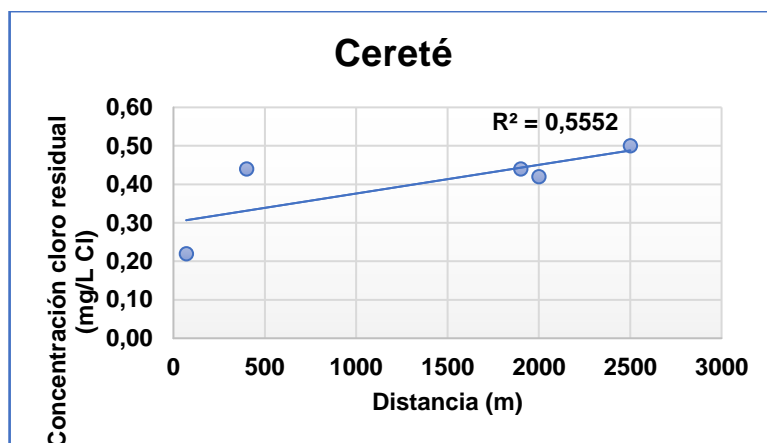
#### I. Cereté

Tabla 7 Datos Cinética de Desinfección Orden Cero para Cereté

Número de Punto	Distancia (m)	Concentración cloro residual (mg/L Cl)
Punto 1	70	0.22
Punto 2	400	0.44
Punto 6	1900	0.44
Punto 3	2000	0.05
Punto 5	2000	0.42
Punto 4	2500	0.5

Fuente. Elaboración propia

Grafica 1 Cinética de Desinfección de Orden Cero Cereté



Fuente. Elaboración propia

## II. Montería

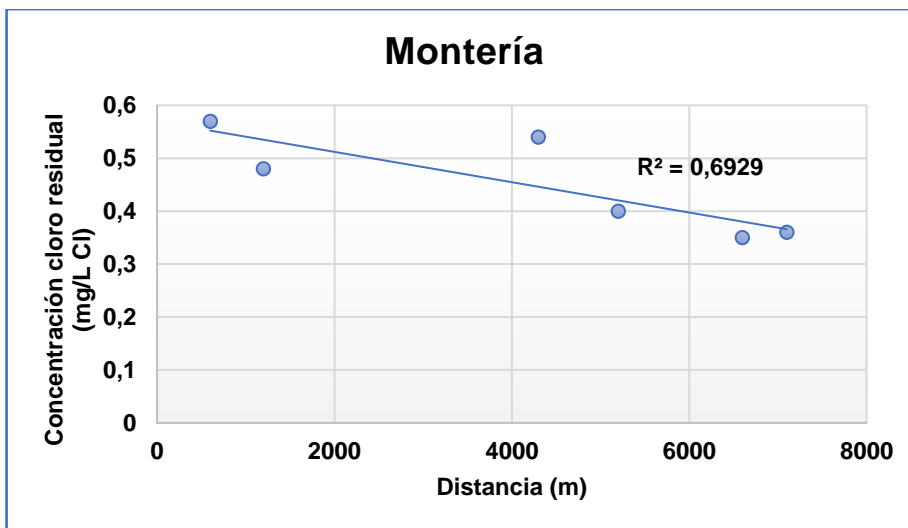
Tabla 8 Datos Cinética de Desinfección Orden Cero para montería

Número de Punto	Distancia (m)	Concentración cloro residual (mg/L Cl)
Punto 1	600	0.57
Punto 2	1200	0.48
Punto 3	4300	0.54
Punto 6	5200	0.40
Punto 4	6600	0.35
Punto 5	7100	0.36

Fuente.

Elaboración propia

Grafica 2 Cinética de Desinfección de Orden Cero Montería



Fuente. Elaboración propia

## B) Primer Orden

Dada la ausencia de mediciones directas de la concentración inicial de cloroformo y otros parámetros relevantes a la salida inmediata de la planta de tratamiento de agua potable (PTAP), se optó metodológicamente por considerar como concentración inicial el valor registrado en el punto de muestreo más próximo a la PTAP en cada una de las localidades evaluadas. Esta decisión se fundamenta en la premisa de que, en sistemas de distribución convencionales, la variación en la concentración de subproductos de desinfección, como el cloroformo, es mínima en los primeros metros desde la salida de la planta, debido a la baja exposición a materia orgánica adicional y a la limitada interacción con materiales de la red (Richardson & Postigo, 2015). Además, esta aproximación ha sido validada en estudios previos de modelación de cinética de subproductos de desinfección (Sadiq & Rodriguez, 2004; Hua & Reckhow, 2007), en los que la concentración en el primer punto accesible de la red se utiliza como referencia para el análisis de la evolución espacial de estos compuestos. Cabe resaltar que, aunque esta estrategia introduce una pequeña incertidumbre asociada al tiempo de tránsito entre la PTAP y el primer punto de muestreo, se considera adecuada y metodológicamente sólida para estudios de campo en sistemas urbanos donde el acceso a la infraestructura interna de la planta es limitado (WHO, 2017).

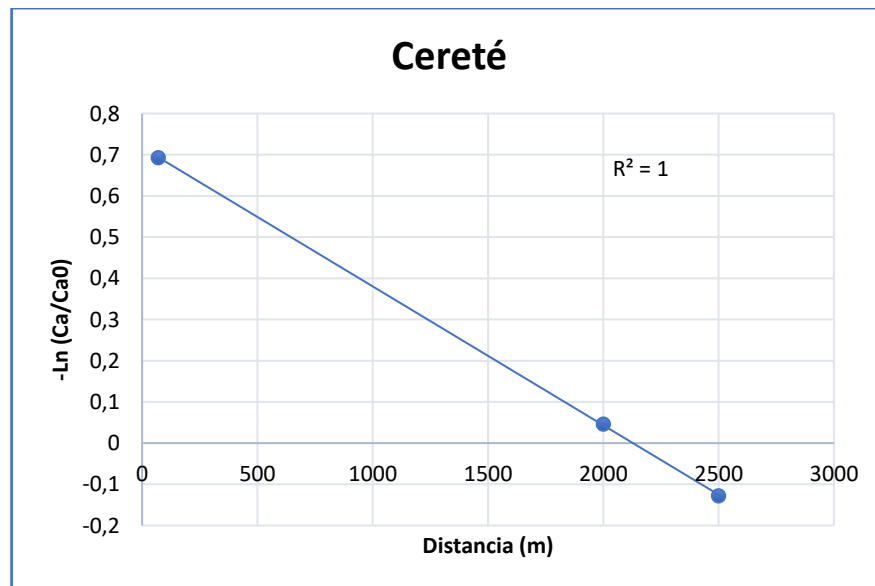
### I. Cereté

Tabla 9 Datos Cinética de Desinfección Primer Orden para Cereté

Número de Punto	Distancia (m)	Concentración cloro residual (mg/L Cl)	Ecuación $-\ln(Ca/Ca_0)$
Punto 1	70	0.22	0.693147181
Punto 2	400	0.44	0
Punto 6	1900	0.44	0
Punto 3	2000	0.05	2.174751721
Punto 5	2000	0.42	0.046520016
Punto 4	2500	0.5	-0.127833372

Fuente. Elaboración propia

Grafica 3 Cinética de Desinfección de Primer Orden Cereté



Fuente. Elaboración propia

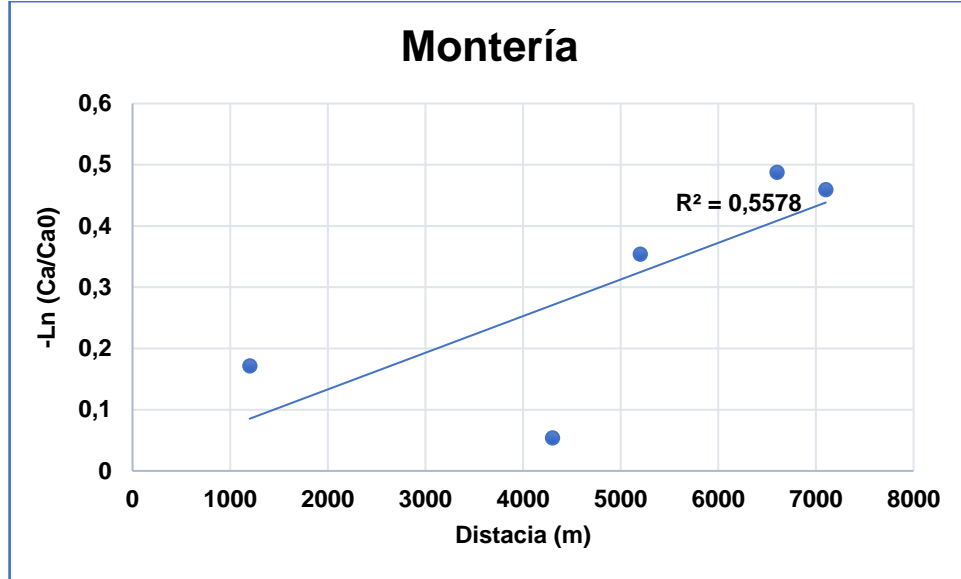
## II. Montería

Tabla 10 Datos Cinética de Desinfección Primer Orden para Montería

Número de Punto	Distancia (m)	Concentración cloro residual (mg/L Cl)	Ecuación -Ln(Ca/Ca0)
Punto 1	600	0.57	0
Punto 2	1200	0.48	0.17185026
Punto 3	4300	0.54	0.05406722
Punto 6	5200	0.40	0.35417181
Punto 4	6600	0.35	0.48770321
Punto 5	7100	0.36	0.45953233

Fuente. Elaboración propia

Grafica 4 Cinética de Desinfección de Primer Orden Montería



Fuente. Elaboración propia

### C) Segundo Orden

Las dos tablas analizadas muestran la variación en la concentración de cloro residual (mg/L Cl) a lo largo de diferentes puntos de muestreo en una red de distribución de agua potable, junto con sus respectivas distancias desde un punto de origen y los valores de  $1/Ca$  (inverso de la concentración), útiles para ajustar modelos de decaimiento como el de Chick-Watson.

En ambos conjuntos de datos se identifica una tendencia general de disminución del cloro residual con el aumento de la distancia, lo cual es coherente con lo esperado debido al consumo natural del desinfectante por reacciones con materia orgánica, biofilm, y otros compuestos presentes en las tuberías. Sin embargo, se presentan ciertas anomalías o irregularidades que merecen especial atención.

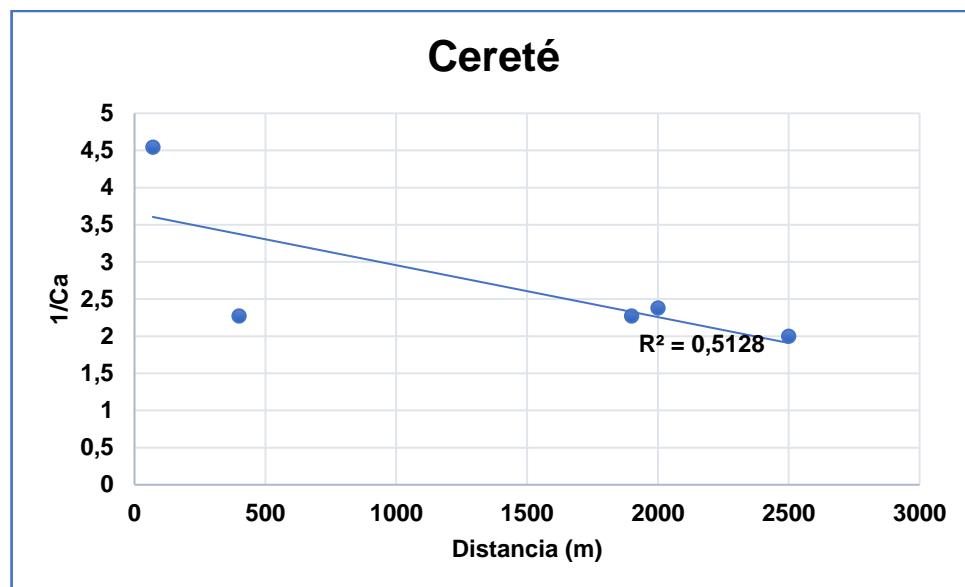
## I. Cereté

Tabla 11 Datos Cinética de Desinfección Segundo Orden para Cereté

Número de Punto	Distancia (m)	Concentración cloro residual (mg/L Cl)	Ecuación 1/Ca
Punto 1	70	0.22	4.545454545
Punto 2	400	0.44	2.272727273
Punto 6	1900	0.44	2.272727273
Punto 3	2000	0.05	20
Punto 5	2000	0.42	2.380952381
Punto 4	2500	0.5	2

Fuente. Elaboración propia

Grafica 5 Cinética de Desinfección de Segundo Orden Cereté



Fuente. Elaboración propia

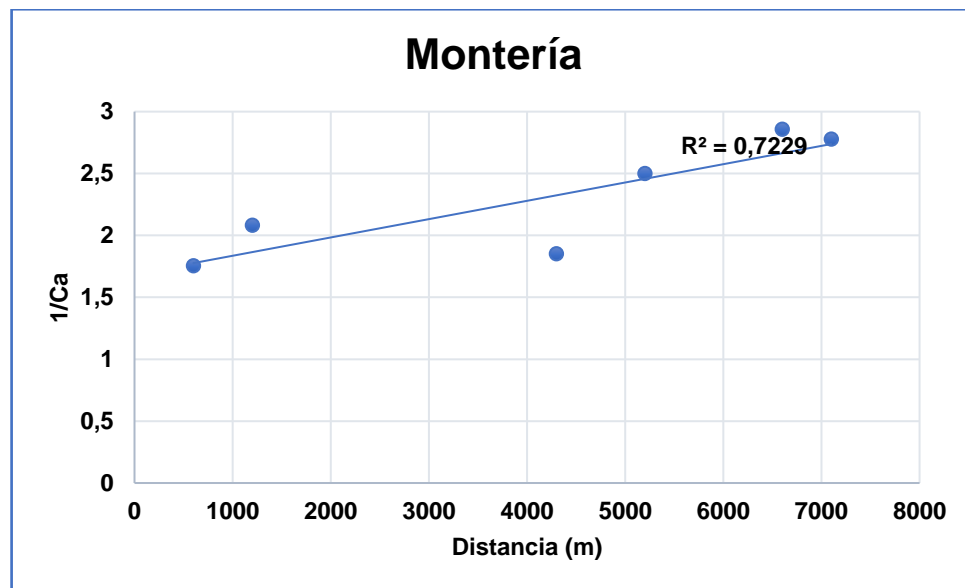
## II. Montería

Tabla 12 Datos Cinética de Desinfección Segundo Orden para Montería

Número de Punto	Distancia (m)	Concentración cloro residual (mg/L Cl)	Ecuación 1/Ca
Punto 1	600	0.57	1.75438596
Punto 2	1200	0.48	2.08333333
Punto 3	4300	0.54	1.85185185
Punto 6	5200	0.40	2.5
Punto 4	6600	0.35	2.85714286
Punto 5	7100	0.36	2.77777778

Fuente. Elaboración propia

Grafica 6 Cinética de Desinfección de Segundo Orden Montería



Fuente. Elaboración propia

### D) n Orden

Tomamos como  $n=0.1$  al ser la que representa un mejor ajuste lineal con respecto a un rango de  $n= 0.1$  a  $0.9$

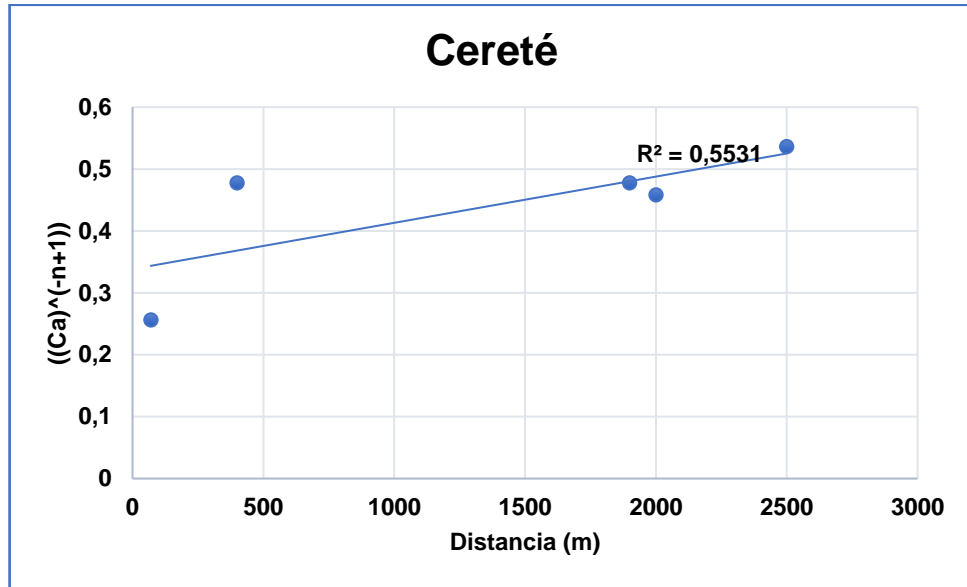
#### I. Cereté

Tabla 12. Datos Cinética de Desinfección n Orden para Cereté

Número de Punto	Distancia (m)	Concentración cloro residual (mg/L Cl)	Ecuación $((Ca)^{-n+1})$
Punto 1	70	0.22	0.255964898
Punto 2	400	0.44	0.47764739
Punto 6	1900	0.44	0.47764739
Punto 3	2000	0.05	0.067464142
Punto 5	2000	0.42	0.458062102
Punto 4	2500	0.5	0.535886731

Fuente. Elaboración propia

Grafica 7 Cinética de Desinfección de n Orden Cereté



Fuente. Elaboración propia

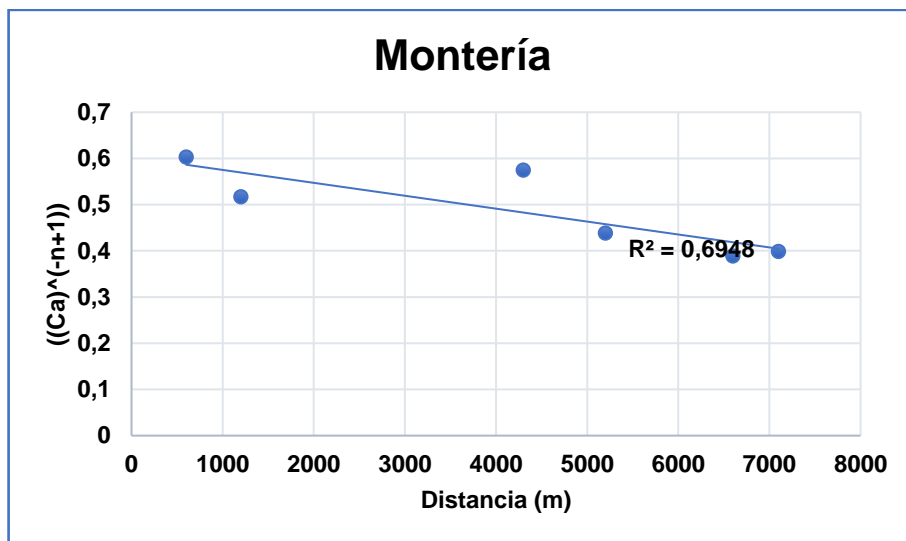
## II. Montería

Tabla 13 Datos Cinética de Desinfección n Orden para Montería

Número de Punto	Distancia (m)	Concentración cloro residual (mg/L Cl)	Ecuación ((Ca) <sup>-(n+1)</sup> )
Punto 1	600	0.57	0.60295843
Punto 2	1200	0.48	0.51655565
Punto 3	4300	0.54	0.57432059
Punto 6	5200	0.40	0.43838329
Punto 4	6600	0.35	0.3887418
Punto 5	7100	0.36	0.39872388

Fuente. Elaboración propia

Grafica 8 Cinética de Desinfección de n Orden Montería



Fuente. Elaboración propia

### 5.3. DISTRIBUCIÓN DE DATOS

La caracterización comparativa de parámetros físico-químicos y de concentración de cloroformo entre los sistemas de Cereté y Montería se fundamenta en el análisis estadístico mediante diagramas de caja y bigotes (boxplots), herramienta gráfica que sintetiza la distribución de datos a través de medidas descriptivas como la mediana y los cuartiles (Tukey, 1977). Esta metodología facilita la identificación de patrones diferenciales en la formación de subproductos desinfectantes en redes de distribución.

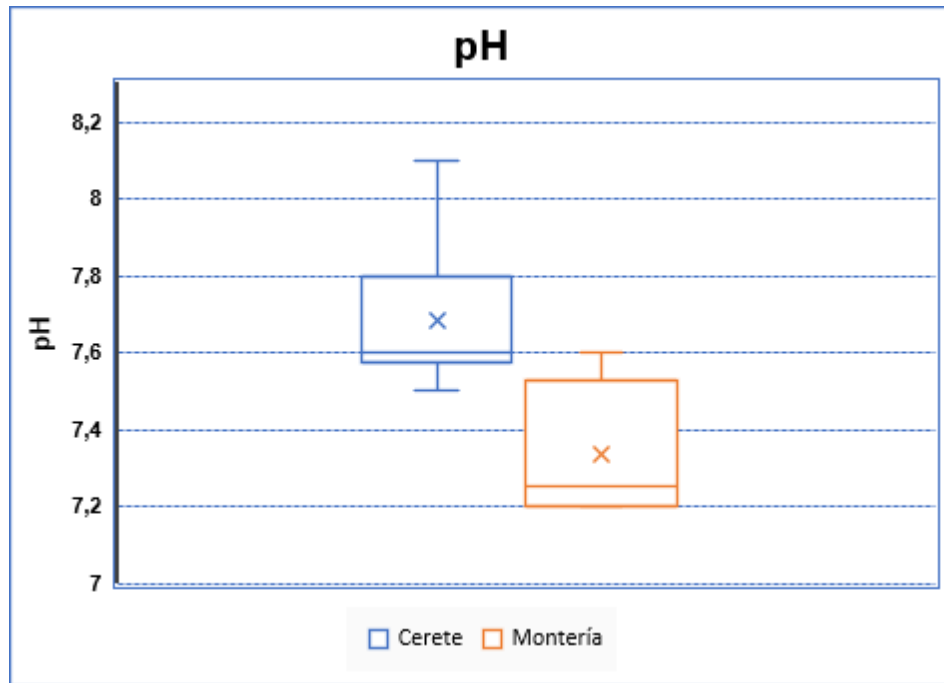
#### *I. pH*

Analizando los valores de pH obtenidos a lo largo de las redes de distribución en Cereté y Montería revela valores similares, lo cual se explica por la fuente común de abastecimiento: el río Sinú. Esta característica compartida implica que las aguas de ambas ciudades presentan condiciones de pH semejantes al inicio del proceso de tratamiento, aunque se aplican procesos convencionales que incluyen coagulación, floculación y desinfección, no se reportan ajustes significativos del pH que modifiquen sustancialmente su valor original.

Es importante destacar que, si bien el pH es un parámetro fundamental para la estabilidad química del agua y puede influir en la eficiencia de ciertos procesos de tratamiento, su impacto en la formación de subproductos de desinfección como el cloroformo en estas ciudades es limitado. Estudios previos indican que la formación de trihalometanos está más influenciada por la concentración y naturaleza de la materia orgánica natural presente y por las condiciones específicas de desinfección, que por variaciones moderadas en el pH dentro del rango típico de agua potable (Crittenden et al., 2022; Rodríguez et al., 2007). Sin embargo, los valores de pH registrados en ambas ciudades están en el rango establecido en la legislación colombiana para agua potable (6.5 – 9.0)

Por tanto, aunque el pH en Cereté y Montería se mantiene relativamente constante y adecuado para la potabilización, otros factores como la calidad del agua cruda y las condiciones operativas del tratamiento serán determinantes en la generación y distribución de cloroformo, aspectos que serán analizados en las siguientes secciones mediante comparaciones gráficas y estadísticas.

Grafica 9 Comparación de Valores de pH en Redes de Distribución de Agua Potable en Cerete y Montería.



Fuente. Elaboración propia

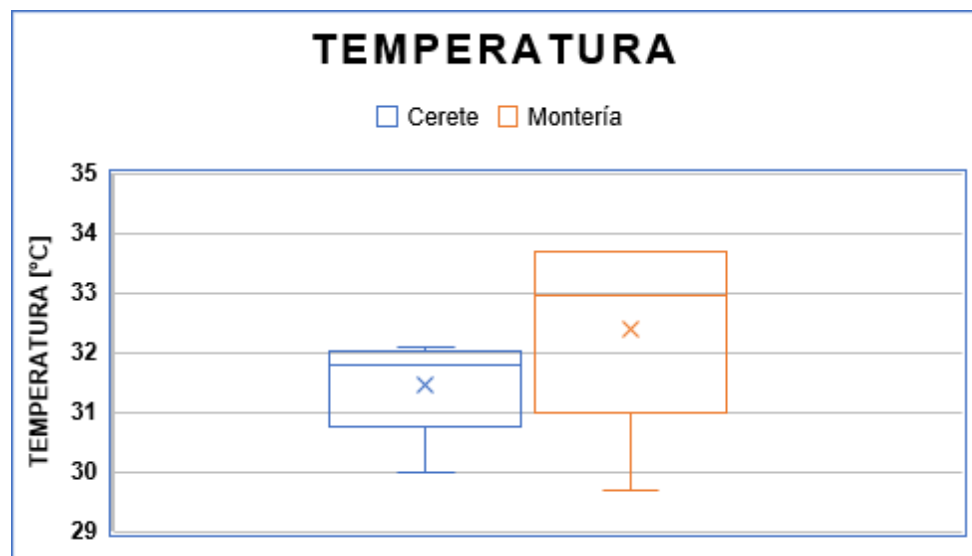
## II. Temperatura

Montería presenta una temperatura promedio más alta (32,40 °C) y una mediana superior (32,95 °C) en comparación con Cereté (media 31,45 °C; mediana 31,80 °C). Esto indica que, durante el periodo de muestreo, el agua en Montería estuvo ligeramente más cálida que en Cerete.

Las temperaturas elevadas pueden influir en la estabilidad del cloro residual, favorecer el crecimiento microbiano y acelerar la formación de subproductos de desinfección, aspectos críticos en la gestión de la calidad del agua potable. Además, la mayor variabilidad térmica en Montería puede estar relacionada con diferencias en la exposición solar, el tiempo de residencia en la red y las características de la infraestructura de distribución.

El cumplimiento de los estándares de temperatura es relevante para la aceptabilidad organoléptica y la seguridad sanitaria del agua distribuida. Si bien no existe un límite máximo estricto para la temperatura en la normativa colombiana, la Organización Mundial de la Salud recomienda que el agua potable se mantenga preferiblemente por debajo de 25 °C para evitar afectaciones en sabor y proliferación microbiana. Los valores observados en ambas ciudades superan este umbral, lo que es común en regiones tropicales y requiere estrategias de monitoreo y control para mitigar los riesgos asociados.

Grafica 10 Comparación de Valores de Temperatura en Redes de Distribución de Agua Potable en Cerete y Montería.



Fuente. Elaboración propia

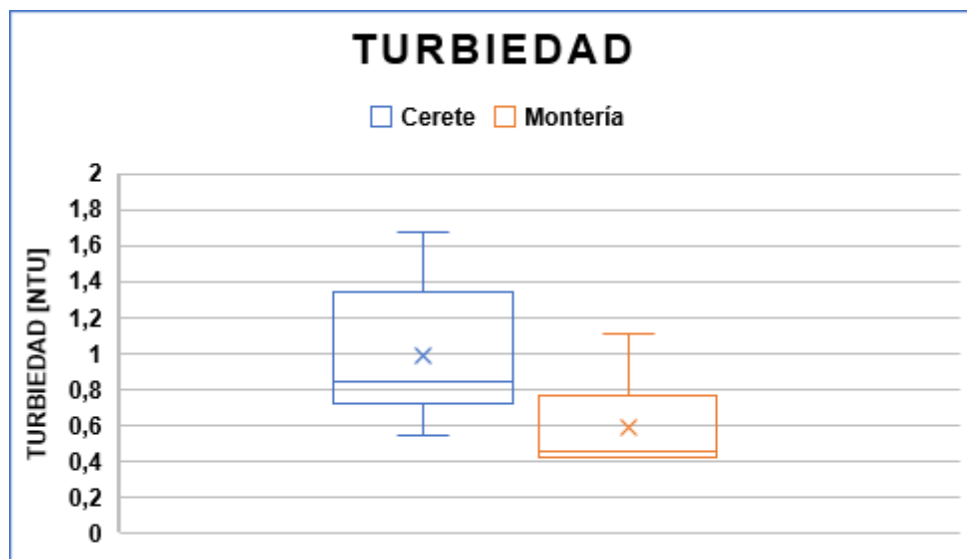
### **III. Turbiedad**

Los valores promedio de Cereté (0,99) son notablemente superiores a los de Montería (0,59), lo que indica una mayor concentración del parámetro analizado en Cereté. El valor máximo en Cereté (1,68) es considerablemente más alto que en Montería (1,11), mientras que los valores mínimos son similares en ambos municipios.

La diferencia observada entre los municipios puede estar relacionada con factores como la eficiencia de los procesos de tratamiento, las características de la red de distribución, el tiempo de residencia del agua y la posible presencia de fuentes puntuales de contaminación o variabilidad en la calidad del agua cruda. Estudios previos han destacado la importancia de estos factores en la variación espacial de parámetros físico-químicos en sistemas urbanos de agua potable.

La mayor variabilidad y concentración en Cereté podría indicar la necesidad de optimizar los procesos de tratamiento o fortalecer el monitoreo en la red de distribución para garantizar el cumplimiento de los estándares de calidad establecidos por la normativa nacional (Ministerio de Salud y Protección Social, 2007). Sin embargo, ambas ciudades cumplen con los valores de turbiedad establecidos en la legislación colombiana al estar por debajo de 2.0 UNT.

Grafica 11 Comparación de Valores de Turbiedad en Redes de Distribución de Agua Potable en Cerete y Montería.



Fuente. Elaboración propia

#### **IV. Conductividad**

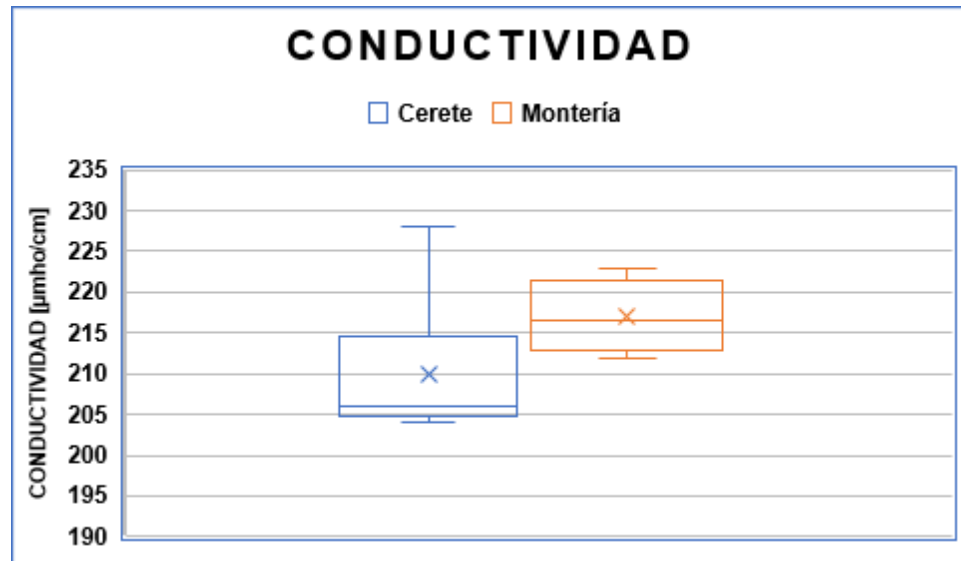
La conductividad eléctrica en las redes de distribución de agua potable de Cereté y Montería presenta variaciones que reflejan las características hidroquímicas de la fuente de abastecimiento y las condiciones ambientales de la cuenca del río Sinú, de donde ambas ciudades extraen su agua. El río Sinú es reconocido por su elevada concentración de sales disueltas, atribuida en gran medida a prácticas agropecuarias intensivas y poco sostenibles en las zonas ribereñas, así como a la influencia de sedimentos fluvio-lacustres finos a medios que se acumulan en la cuenca baja próxima al mar, lo que incrementa la salinidad natural del recurso hídrico. (Combatt, E., Narváez, H., & Bustamante, I. D. 2015)

Además, la descomposición y fragmentación de materia orgánica natural en el agua puede generar ácidos orgánicos que contribuyen a aumentar la conductividad, al liberar iones que incrementan la capacidad del agua para conducir corriente eléctrica. A pesar de estas condiciones, los valores de conductividad registrados en Cereté y Montería se mantienen dentro de los límites establecidos por la normatividad colombiana para agua potable, que establece un máximo permisible de 1000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (Ministerio de Salud y Protección Social, 2021).

Este comportamiento indica que, aunque la fuente presenta una carga iónica moderada, el proceso de tratamiento y la gestión de la red de distribución son efectivos para mantener la calidad del agua dentro de los parámetros aceptables, minimizando riesgos asociados a la salinidad elevada, como la corrosión de tuberías o alteraciones en el sabor del agua.

La evaluación comparativa de la conductividad en estas dos ciudades es fundamental para comprender cómo las condiciones hidrogeológicas y las actividades antropogénicas en la cuenca impactan la calidad del agua y la formación potencial de subproductos de desinfección, aspectos que serán abordados en análisis posteriores.

Grafica 12 Comparación de Valores de Conductividad en Redes de Distribución de Agua Potable en Colombia.



Fuente. Elaboración propia

## V. UV-254

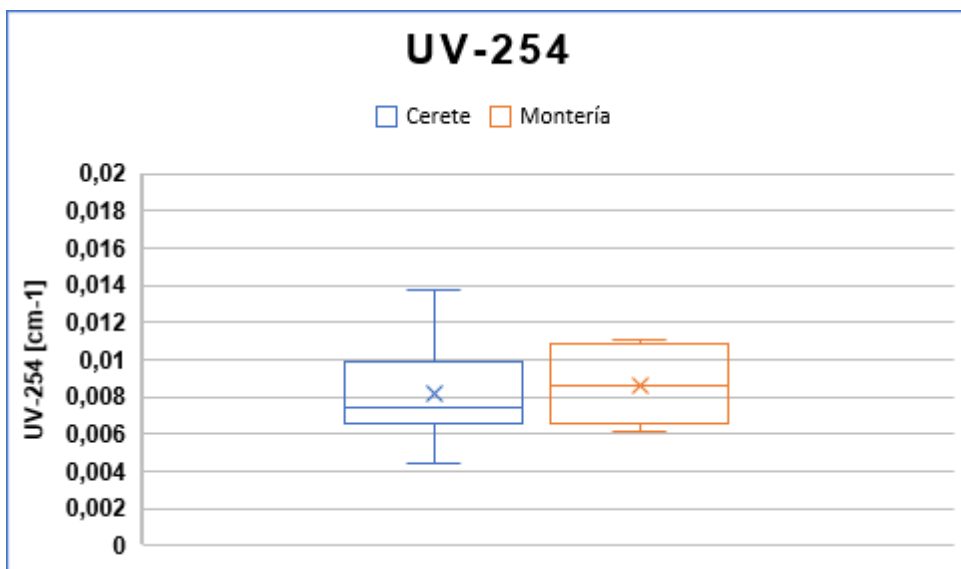
La medición de la absorbancia a 254 nm (UV-254) en las redes de distribución de agua potable de Cereté y Montería refleja la concentración de materia orgánica natural (MON) presente en el agua, dado que ambas ciudades obtienen su suministro del río Sinú. Los valores de UV-254 en estas localidades son muy similares, lo cual se explica por la proximidad geográfica y la corta distancia que separa a Montería de Cereté, aproximadamente 15 minutos en automóvil, lo que implica un recorrido fluvial relativamente breve y con escasa transformación o aporte adicional de la materia orgánica disuelta.

Este comportamiento indica que la calidad del agua cruda en términos de materia orgánica se mantiene estable entre ambas ciudades, sugiriendo que los procesos naturales y antropogénicos en el tramo del río no generan variaciones significativas en la carga orgánica durante el transporte. Sin embargo, es importante destacar que la dosis de coagulante, específicamente sulfato de aluminio, utilizada en las etapas de coagulación y floculación en las plantas de tratamiento, influye directamente en

la reducción de la materia orgánica medida por UV-254. En general, mayores dosis de coagulante promueven una mayor remoción de compuestos orgánicos, lo que se traduce en valores menores de absorbancia en el agua tratada. Sin embargo, se recomienda hacer pruebas de jarras para garantizar una dosis óptima de coagulante no solo para la remoción turbiedad, si no para garantizar una adecuada remoción de materia orgánica natural, lo cual ayude a minimizar la formación de SPD especialmente cloroformo en las redes de distribución.

La estabilidad de los valores de UV-254 en Cereté y Montería sugiere que ambos sistemas de tratamiento mantienen una eficiencia similar en la remoción de materia orgánica, lo cual es crucial para minimizar la formación de subproductos de desinfección, como los trihalometanos. Además, dado que el UV-254 es un parámetro independiente de la temperatura y está más relacionado con la naturaleza y concentración de la materia orgánica presente en la fuente hídrica, su análisis resulta fundamental para evaluar la calidad del agua y la efectividad del tratamiento en estas ciudades (Rodríguez et al., 2007).

Grafica 13 Comparación de Valores de UV-254 en Redes de Distribución de Agua Potable en Cerete y montería.



Fuente. Elaboración propia

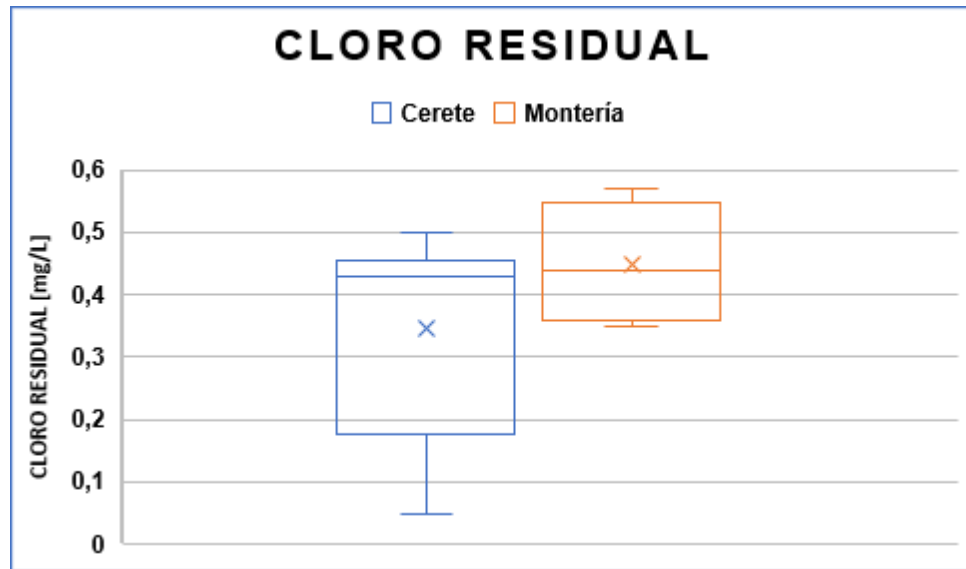
## **VI. Cloro Residual**

El análisis de los niveles de cloro residual en las redes de distribución de agua potable de Cereté y Montería revela promedios muy similares, lo cual es coherente dado que ambas ciudades se abastecen del río Sinú y aplican procesos de desinfección comparables. La presencia de un cloro residual adecuado en la red es fundamental para garantizar la continuidad de la protección microbiológica durante el transporte del agua hasta el punto de consumo, evitando la proliferación de patógenos en la red de distribución (Crittenden et al., 2022).

Los valores consistentes de cloro residual en Cereté y Montería indican una gestión eficiente del proceso de cloración y un adecuado mantenimiento de la red, lo que contribuye a la estabilidad del cloro residual a lo largo del sistema. Esto sugiere que las condiciones operativas, tales como la dosificación de cloro, el tiempo de contacto y la integridad de la red, están siendo controladas efectivamente para mantener la calidad microbiológica del agua.

Este comportamiento contrasta con otras ciudades donde se han reportado deficiencias en la cloración y distribución del cloro residual, evidenciando la importancia de un control riguroso en los sistemas de potabilización y distribución para asegurar la salud pública. En el caso particular de Cereté y Montería, la similitud en los niveles de cloro residual refuerza la influencia directa de la fuente común y las prácticas operativas similares en la calidad final del agua distribuida. Los niveles medios de cloro residual encontrados en la red de distribución de Montería y Cerete, están en el rango de valores establecidos en la resolución 2115 de 2007 (0.3 – 2.0 mg/L).

Grafica 14 Comparación de Valores de Cloro Residual en Redes de Distribución de Agua Potable en Cerete y montería.



Fuente. Elaboración propia

## VII. Cloroformo

El análisis de los niveles de cloroformo en las redes de distribución de agua potable de Cereté y Montería revela diferencias significativas que se relacionan con la extensión de sus sistemas y las características demográficas y operativas de cada ciudad. Cereté presenta niveles bajos de cloroformo, lo cual puede atribuirse a una red de distribución relativamente corta y un tiempo de residencia del agua reducido, factores que limitan la formación de subproductos de desinfección (SPDs) como el cloroformo.

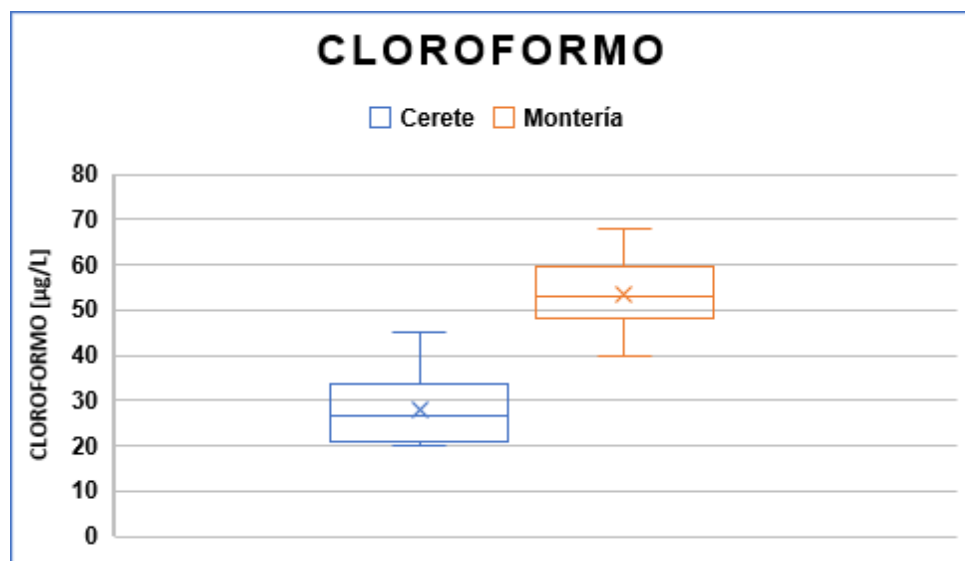
Por otro lado, Montería, con una población aproximada de 500,000 habitantes y una red de distribución considerablemente más extensa, muestra los valores más elevados de cloroformo entre las dos ciudades. La mayor longitud de la red y el tiempo prolongado de permanencia del agua favorecen la formación y acumulación

de SPDs, especialmente cuando existen precursores orgánicos en concentraciones significativas (Crittenden et al., 2022).

Estos resultados destacan la importancia de la gestión integral del sistema de distribución y del control de precursores orgánicos para minimizar la formación de cloroformo, dado que este compuesto está regulado por la Organización Mundial de la Salud con un límite máximo permisible de 30  $\mu\text{g/L}$  en agua potable, valor que Cereté cumple en promedio (28  $\mu\text{g/L}$ ), mientras que Montería lo supera en 1.8 veces (54  $\mu\text{g/L}$ ) (OMS, 2017).

La comparación evidencia la necesidad de implementar estrategias específicas en ciudades con redes extensas y alta demanda poblacional, tales como la optimización de la dosificación de cloro, la mejora en la remoción de materia orgánica y el monitoreo constante de SPDs para garantizar la calidad y seguridad del agua distribuida.

Grafica 15 Comparación de Valores de Cloroformo en Redes de Distribución de Agua Potable en Cerete y Montería.



Fuente. Elaboración propia

#### 5.4. HISTOGRAMAS DE DISTRIBUCIÓN

Se elaboraron histogramas de distribución para cada parámetro analizado, utilizando la totalidad de los datos obtenidos de las redes de distribución de agua potable en las ciudades estudiadas. Estos histogramas constituyen una herramienta estadística fundamental para visualizar la frecuencia y la dispersión de los valores medidos, permitiendo identificar la forma de la distribución (normalidad, sesgos, curtosis) y la presencia de posibles valores atípicos.

La representación gráfica facilita la comparación interurbana de los parámetros físico-químicos y microbiológicos, posibilitando la detección de tendencias, patrones recurrentes y diferencias significativas en la calidad del agua potable entre las ciudades. Este análisis preliminar es esencial para orientar posteriores evaluaciones estadísticas para la identificación de factores que influyen en la variabilidad de la calidad del agua a lo largo de las redes de distribución.

A continuación, se presentan los histogramas correspondientes a los parámetros más relevantes y representativos del estudio, que incluyen variables como pH, conductividad, absorbancia UV-254, cloro residual y concentración de cloroformo.

##### ***I. pH***

La mayoría de los valores se concentran entre 7.2 y 7.6, con un rango total de 7.2 a 8.1. El rango observado (7.2 a 8.1) se encuentra dentro de los límites recomendados internacionalmente para agua potable, que van de 6.5 a 8.5 según la Organización Mundial de la Salud (OMS) y la Agencia de Protección Ambiental de EE. UU. (EPA). Healthline. La mayor frecuencia en los valores entre 7.2 y 7.6 indica una tendencia hacia un pH ligeramente alcalino, lo cual es típico en sistemas de distribución de agua potable bien gestionados.

Un pH en este rango es considerado óptimo para el consumo humano y contribuye a la estabilidad química del agua, minimizando riesgos de corrosión en las tuberías y favoreciendo la eficacia de la desinfección.

La estabilidad del pH puede estar influenciada por la alcalinidad, la presencia de carbonatos y la calidad del agua fuente. Estudios han demostrado que parámetros como la alcalinidad, calcio y sólidos disueltos totales son predictores clave para mantener un pH óptimo en sistemas de agua superficial y subterránea.

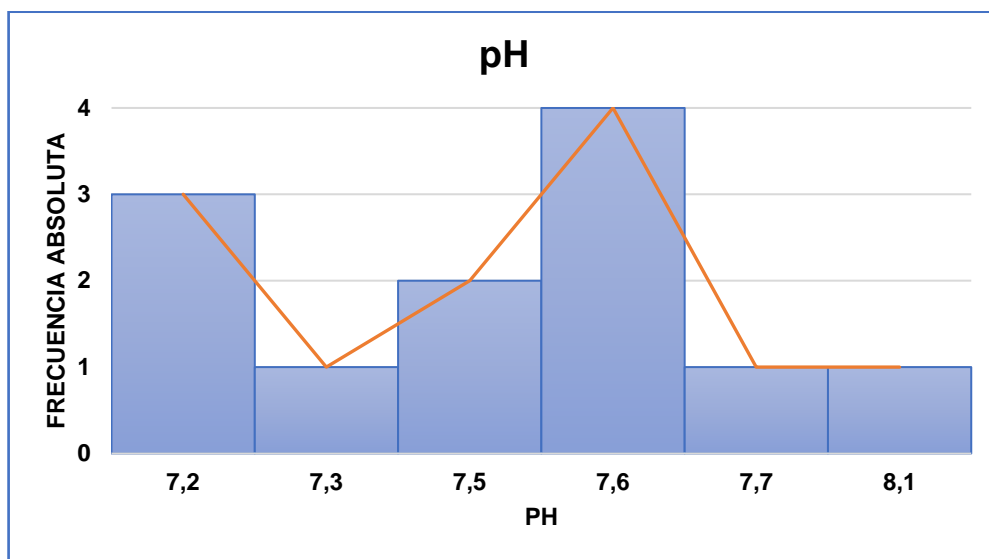
La variación moderada observada puede estar asociada a diferencias en el tratamiento, la composición mineral del agua y la interacción con materiales de la red de distribución. Es importante monitorear el pH de manera continua, ya que

desviaciones fuera del rango recomendado pueden indicar posibles problemas de contaminación o inestabilidad química.

Un pH inferior a 6.5 puede aumentar la solubilidad de metales pesados y la corrosividad, mientras que valores superiores a 8.5 pueden afectar la eficiencia de la coagulación y la desinfección.

Mantener el pH dentro del rango recomendado es esencial para prevenir la formación de subproductos indeseados y garantizar la efectividad de los procesos de coagulación, floculación y desinfección.

Grafica 16 Histograma de Distribución de Valores de pH en Redes de Distribución de Montería y Cerete



Fuente. Elaboración propia

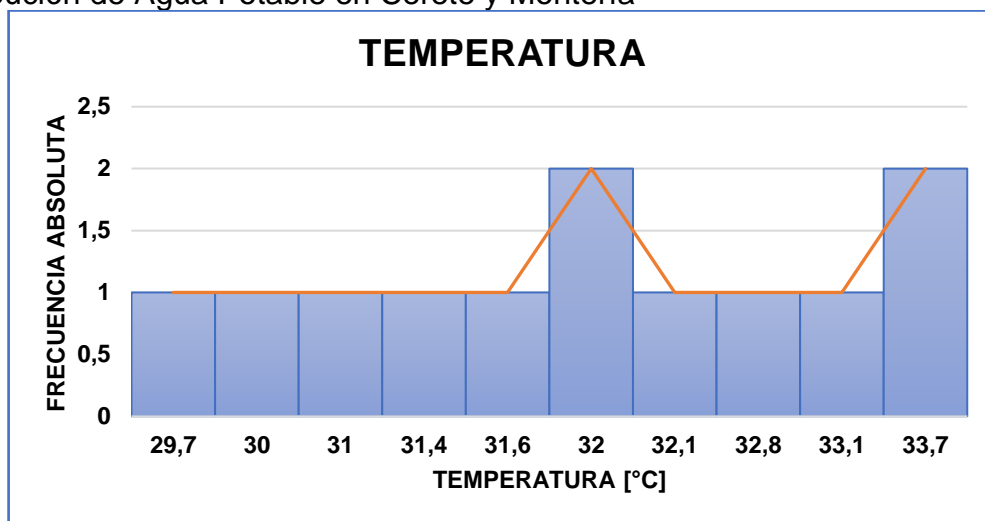
## I. Temperatura

La gráfica muestra la distribución de los valores de temperatura registrados en las muestras de agua potable, evidenciando una tendencia hacia los extremos del histograma. Esta variabilidad se relaciona directamente con las fluctuaciones térmicas propias del periodo de muestreo, que comprendió finales de enero y principios de febrero, coincidiendo con la transición hacia la temporada calurosa en las ciudades estudiadas.

En Cereté, la temporada cálida se extiende desde el 1 de febrero hasta el 11 de abril, con temperaturas máximas promedio diarias superiores a 35 °C, alcanzando un pico en marzo con un promedio de 36 °C. De manera similar, Montería presenta una temporada calurosa que va del 2 de febrero al 10 de abril, con máximas diarias que superan los 34 °C y un máximo en marzo de 35 °C.

Estas condiciones térmicas influyen en la temperatura del agua durante su distribución, afectando procesos físico-químicos como la solubilidad de gases y la cinética de reacciones químicas, incluyendo la formación de subproductos de desinfección. Por tanto, la caracterización de la temperatura en la red es un factor relevante para la evaluación integral de la calidad del agua potable y para la optimización de los procesos de tratamiento y distribución.

Grafica 17 Histograma de Distribución de Valores de Temperatura en Redes de Distribución de Agua Potable en Cerete y Montería



Fuente. Elaboración propia

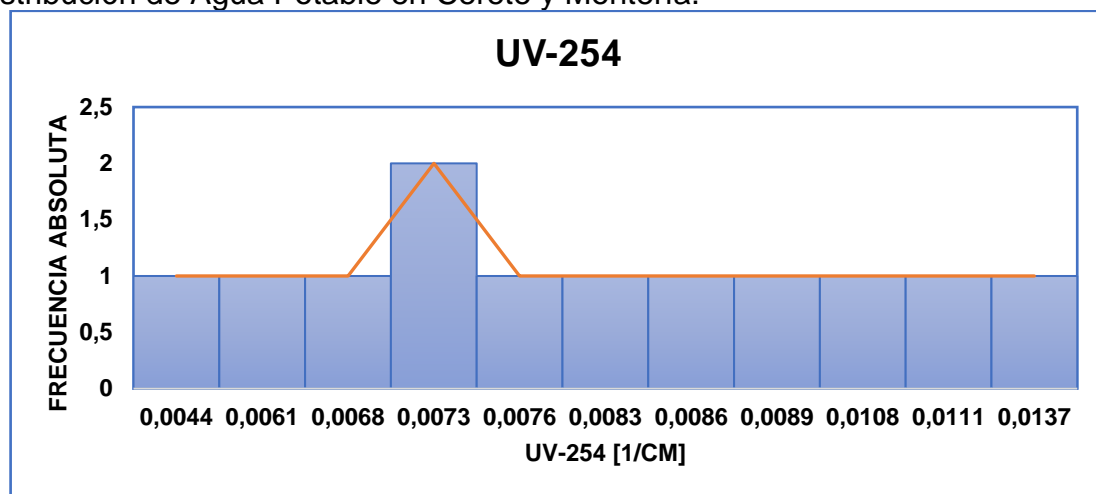
## II. UV-254

Los valores de UV254 reportados (0,0044 a 0,0137  $\text{cm}^{-1}$ ) son bajos en comparación con aguas superficiales sin tratar, donde pueden encontrarse valores superiores a 0,020  $\text{cm}^{-1}$ . Esto sugiere que el agua ha pasado por procesos de tratamiento eficaces, como coagulación y filtración, que han reducido significativamente la carga de materia orgánica. La baja variabilidad y la concentración de la mayoría de los valores en el rango inferior indican un control adecuado de los precursores orgánicos en la red de distribución. Esto es positivo, ya que menores valores de UV254 se asocian con una menor formación potencial de SPDs durante la desinfección con cloro (Singer, 1994).

La presencia de un valor ligeramente más alto (0,0137  $\text{cm}^{-1}$ ) puede estar relacionada con aportes puntuales de materia orgánica, posibles infiltraciones o variaciones en la eficiencia de la remoción en la planta de tratamiento. Mantener bajos niveles de UV254 es fundamental para reducir la formación de SPDs, los cuales están regulados por su potencial efecto adverso sobre la salud humana. El monitoreo de UV254 permite a los operadores de plantas de tratamiento y redes de distribución ajustar procesos para optimizar la remoción de materia orgánica y garantizar la calidad microbiológica y química del agua.

Los valores de UV254 analizados son bajos, lo que indica una adecuada remoción de materia orgánica y un bajo riesgo de formación de subproductos de desinfección en la red de distribución. El monitoreo continuo de este parámetro es esencial para mantener la seguridad y calidad del agua potable, especialmente en sistemas donde se emplea cloración como método principal de desinfección.

Grafica 18 Histograma de Distribución de Valores de UV254 en Redes de Distribución de Agua Potable en Cerete y Montería.



Fuente. Elaboración propia

### **III. Cloro Residual**

El cloro residual es un parámetro crítico en la gestión de la calidad del agua potable, ya que garantiza la desinfección continua durante el transporte y almacenamiento en la red de distribución, protegiendo frente a posibles contaminaciones secundarias.

Organización Mundial de la Salud (OMS): Recomienda mantener un cloro residual libre entre 0.2 y 0.5 mg/L en los puntos más alejados de la red de distribución para asegurar la protección microbiológica sin generar efectos adversos en el sabor y olor del agua.

Normatividad colombiana (Resolución 2115 de 2007): Establece que el cloro residual libre debe estar entre 0.3 y 2.0 mg/L en el sistema de distribución.

El valor más bajo (0.05 mg/L) podría indicar zonas de la red donde el cloro se ha consumido completamente, lo que representa un riesgo potencial de contaminación microbiológica si persiste en el tiempo.

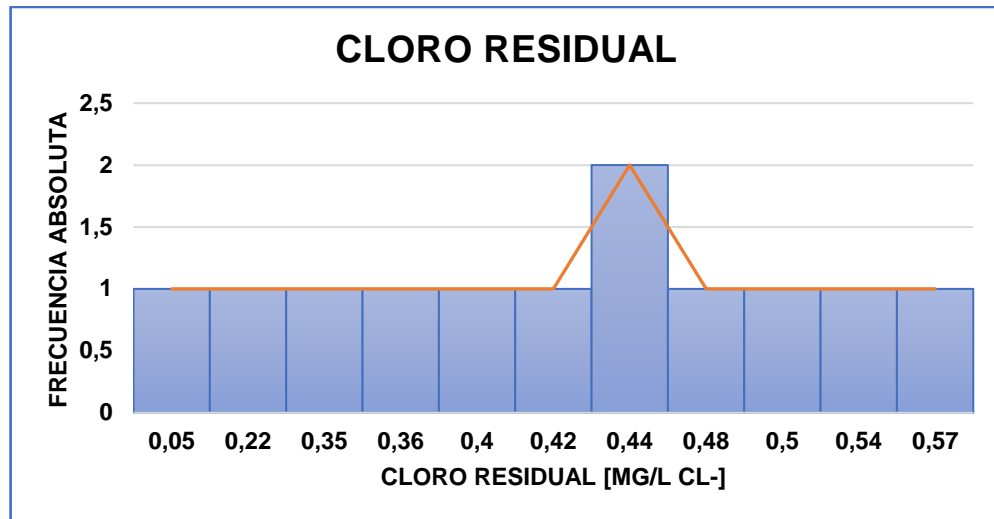
La mayoría de los valores (0.22–0.57 mg/L) se encuentran dentro o muy cerca del rango recomendado por la OMS y la normativa colombiana, lo que sugiere un control adecuado del proceso de desinfección.

El valor modal (0.44 mg/L) y el promedio (0.39 mg/L) indican que el sistema de distribución mantiene, en general, niveles adecuados de cloro residual, lo que favorece la seguridad sanitaria del agua suministrada. Mantener el cloro residual en los rangos recomendados es esencial para prevenir rebrotes de enfermedades transmitidas por el agua. Niveles superiores a 2 mg/L pueden generar quejas de los usuarios por sabor u olor desagradable, mientras que valores inferiores a 0.2 mg/L pueden ser insuficientes para la protección microbiológica.

La dispersión observada puede deberse a factores como el tiempo de residencia del agua, la demanda de cloro por materia orgánica, y la eficiencia del sistema de dosificación. El sistema de distribución analizado mantiene, en su mayoría, niveles de cloro residual adecuados y alineados con las recomendaciones internacionales y nacionales, lo que garantiza la protección sanitaria del agua.

Es recomendable reforzar el monitoreo en zonas donde se detectan valores bajos ( $\leq 0.2$  mg/L) para evitar riesgos de contaminación secundaria. La gestión eficiente del cloro residual debe considerar la variabilidad espacial y temporal en la red, ajustando la dosificación y realizando mantenimientos preventivos.

Grafica 19 Histograma de Distribución de Valores de Cloro Residual en Redes de Distribución de Agua Potable en Cerete y Montería.



Fuente. Elaboración propia

#### IV. Cloroformo

El valor guía para cloroformo en agua potable es de 30  $\mu\text{g/L}$  (OMS, 2017). La Resolución 2115 de 2007 establece un límite máximo permisible de 200  $\mu\text{g/L}$  para la suma de trihalometanos totales (THMs), de los cuales el cloroformo suele ser el más abundante. Los valores de 20, 21, 25, 28 y 30  $\mu\text{g/L}$  cumplen con la recomendación de la OMS, lo que indica un bajo riesgo toxicológico por exposición a cloroformo en estos puntos de la red. Los valores de 40, 45, 51, 53, 57 y 68  $\mu\text{g/L}$  superan el valor guía de la OMS, lo que sugiere un potencial riesgo para la salud si la exposición es crónica, especialmente en puntos donde la frecuencia es mayor (por ejemplo, 53  $\mu\text{g/L}$  aparece dos veces).

Todos los valores están muy por debajo del límite máximo permitido por la normatividad colombiana (200  $\mu\text{g/L}$  para THMs totales), pero algunos se acercan o superan el estándar EPA para THMs totales (100  $\mu\text{g/L}$ ), considerando que el cloroformo suele ser el principal THM. La presencia de precursores orgánicos en el agua fuente y la eficiencia de los procesos de coagulación y filtración influyen directamente en la formación de cloroformo durante la desinfección con cloro.

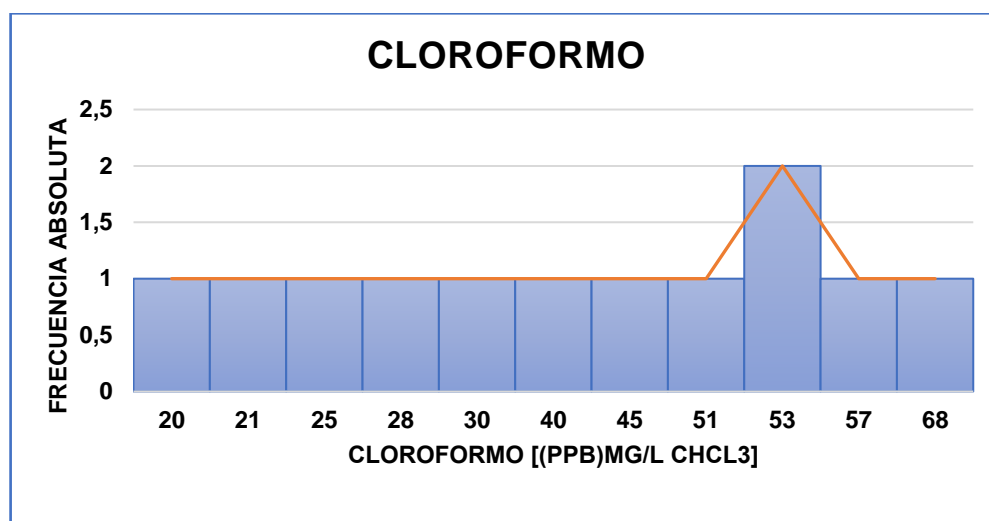
El tiempo de residencia en la red, la dosis de cloro, el pH y la temperatura también afectan la cantidad de cloroformo generado (Singer, 1994). Redes más extensas y

tiempos de contacto prolongados tienden a incrementar la formación de subproductos de desinfección, como el cloroformo.

Es fundamental realizar un monitoreo regular de cloroformo y otros THMs en la red de distribución, especialmente en puntos alejados y con mayor tiempo de residencia. Mejorar la remoción de materia orgánica y ajustar la dosificación de cloro puede ayudar a reducir la formación de cloroformo. Aunque la mayoría de los valores cumplen con la normativa nacional, es recomendable informar a la comunidad sobre la importancia de mantener bajos estos niveles para minimizar riesgos a largo plazo. La mayoría de los valores de cloroformo están por encima del valor guía de la OMS (30 µg/L), aunque muy por debajo del límite nacional colombiano para THMs totales.

Se recomienda fortalecer el control de precursores orgánicos y optimizar la desinfección para evitar la formación de cloroformo, especialmente en puntos donde se observan los valores más altos. El monitoreo continuo y la gestión integral del sistema son esenciales para garantizar la seguridad sanitaria del agua distribuida.

Grafica 20 Histograma de Distribución de Valores de Cloroformo en Redes de Distribución de Agua Potable en Cerete y Montería.



Fuente. Elaboración propia

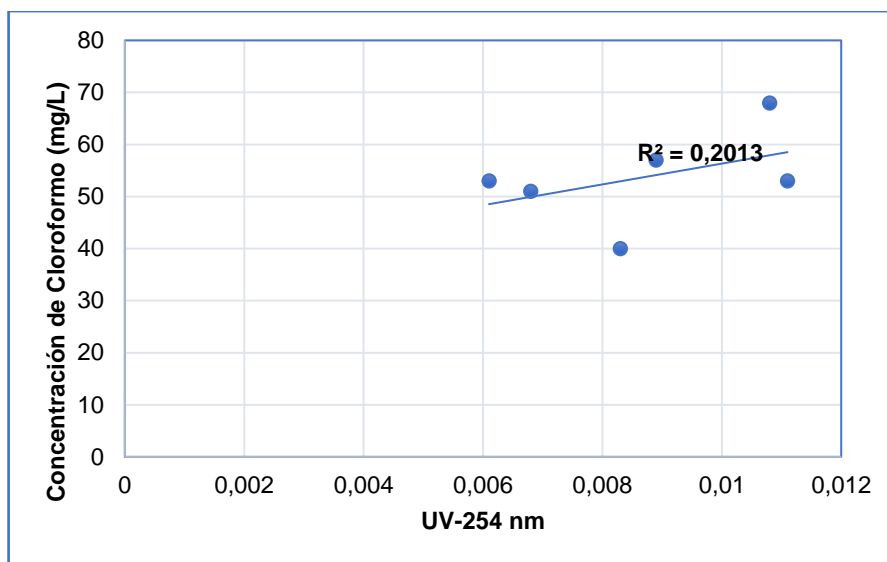
## 5.5. DETERMINACION DE GRADOS DE CORRELACION

### 5.5.1. DETERMINACIÓN DEL GRADO DE CORRELACIÓN ENTRE UV-254 Y LA CONCENTRACIÓN DE CLOROFORMO EN MONTERÍA.

El cloroformo es el trihalometano (THM) más prevalente y uno de los principales subproductos generados durante la desinfección del agua potable clorada, representando un indicador crítico de la formación de subproductos de desinfección (SPDs). Según la OMS, el valor guía provisional para la concentración de cloroformo en agua potable es de 30 µg/L, límite que busca minimizar riesgos potenciales para la salud humana derivados de la exposición crónica (OMS, 2018). En el presente estudio, las concentraciones de cloroformo registradas en Montería se encuentran por encima de este umbral, lo que sugiere realizar un control adecuado en la formación de SPDs en el sistema de distribución.

Para evaluar la correlación entre la materia orgánica natural (MON), estimada indirectamente mediante la absorbancia a 254 nm (UV-254), y la concentración de cloroformo, se aplicó un análisis de regresión lineal. Esta metodología permitió cuantificar el grado de correlación entre ambos parámetros, facilitando la interpretación gráfica de la asociación (Figura 1).

Grafica 21 Correlación entre UV-254 y concentración de cloroformo de Montería



Fuente. Elaboración propia

Para evaluar la relación entre la materia orgánica natural (MON), estimada indirectamente a través de la absorbancia UV-254, y la concentración de cloroformo, se aplicó un análisis de regresión lineal. La gráfica 21 muestra una correlación positiva que concuerda con hallazgos previos en Colombia, donde la concentración y naturaleza de la materia orgánica han sido identificadas como determinantes clave en la formación de THMs en plantas de tratamiento convencionales (Chamorro et al., 2010; Hernández Cogollo, 2016). Esta relación puede explicarse porque la MON presente en el río Sinú no es completamente eliminada durante los procesos convencionales de coagulación y floculación; por lo tanto, el remanente orgánico que sale de la planta de tratamiento continúa reaccionando con el cloro libre a lo largo de la red de distribución, generando subproductos de desinfección.

No obstante, la correlación observada ( $R^2=0.2013$ ) es relativamente baja, indicando que la relación lineal entre UV-254 y cloroformo es débil en este contexto específico. Esta baja correlación sugiere que existen otros factores no considerados que inciden significativamente en la formación de cloroformo. Entre estos están la variabilidad en la concentración de cloro residual, las condiciones hidráulicas, el tiempo de residencia del agua, la naturaleza y concentración específica de precursores orgánicos, la formación de biopelículas y la interacción con materiales de las tuberías, aspectos que demandan análisis multivariados para evaluar su contribución conjunta (Richardson et al., 2007; WHO, 2017).

Esta baja correlación puede explicarse porque la concentración de MON se mantiene relativamente estable en la mayoría de los puntos, salvo en los puntos 2 y 4, donde se registran incrementos en UV-254 (0.0108 y 0.0111  $\text{cm}^{-1}$ , respectivamente). En el punto 2, este aumento se refleja en una concentración de cloroformo de 68  $\mu\text{g/L}$ , superando el promedio general de 54  $\mu\text{g/L}$  en un 20%, lo cual confirma la influencia directa de la materia orgánica en la formación de cloroformo. Por otro lado, en el punto 4, a pesar de los valores relativamente altos de UV-254, la concentración de cloro residual es baja (0.35  $\text{mg/L}$ ), lo que podría limitar la formación de cloroformo, manteniéndose en 53  $\mu\text{g/L}$ .

Respecto a la validez y límites del método colorimétrico empleado, este ha sido validado frente a técnicas estándar como la cromatografía de gases con espectrometría de masas (GC-MS), demostrando alta concordancia en la detección y cuantificación de THMs dentro del rango ambiental típico (10-600  $\mu\text{g/L}$ ). Es importante reconocer que, aunque este método ofrece un equilibrio adecuado entre rapidez, costo y sensibilidad para aplicaciones rutinarias y monitoreo frecuente, su límite de detección es superior al de GC-MS y no permite la identificación individual de todos los compuestos (HACH Company, 2019; Sierra et al., 2016).

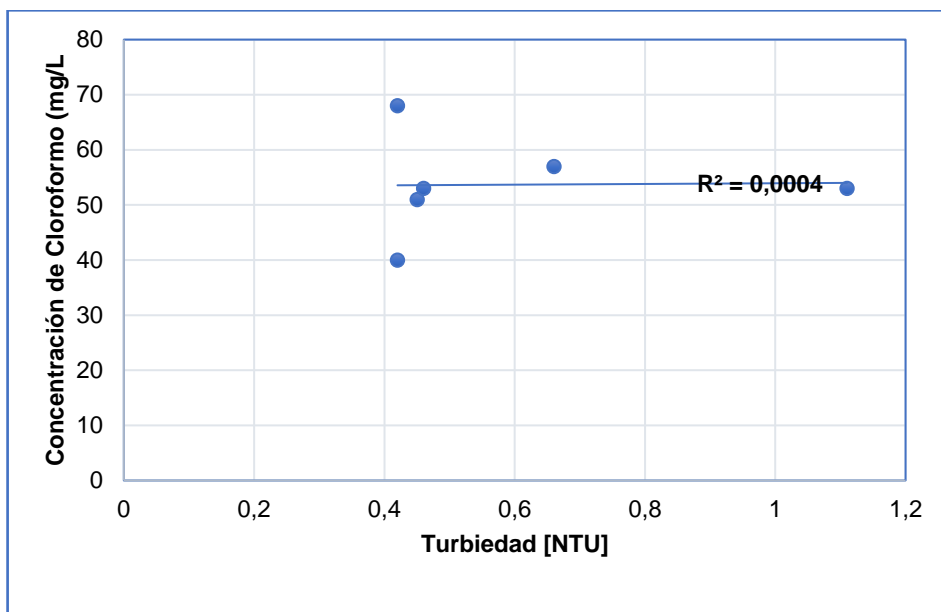
En cuanto al control de calidad y replicabilidad estadística, se implementaron medidas estrictas que incluyen calibraciones diarias con estándares certificados,

análisis de muestras duplicadas, control de blancos y procedimientos para evitar contaminación y volatilización de compuestos sensibles. Estas acciones aseguran la precisión y reproducibilidad de los resultados, compatibles con estándares internacionales de calidad analítica (ISO/IEC 17025) y garantizan que las conclusiones se basen en datos confiables (Real Tech Instruments, 2021).

Finalmente, la comparación de estos resultados con estudios previos en el contexto colombiano evidencia que, aunque hay parámetros que se correlacionan de manera significativa con la formación de THMs, la complejidad del sistema requiere abordajes más integrales que consideren múltiples variables hidrológicas, químicas y operativas. La interpretación crítica de los valores bajos de  $R^2$  lleva a concluir que factores no medidos, como la calidad del agua cruda, condiciones operativas y características del sistema de distribución, tienen un peso relevante en la dinámica de formación de cloroformo, lo que orienta futuras investigaciones hacia modelos predictivos y monitoreos más detallados.

#### 5.5.2. DETERMINACIÓN DEL GRADO DE CORRELACIÓN ENTRE TURBIEDAD Y LA CONCENTRACIÓN DE CLOROFORMO EN MONTERÍA.

Grafica 22 Correlación entre Turbiedad y concentración de cloroformo de Montería



Fuente. Elaboración propia

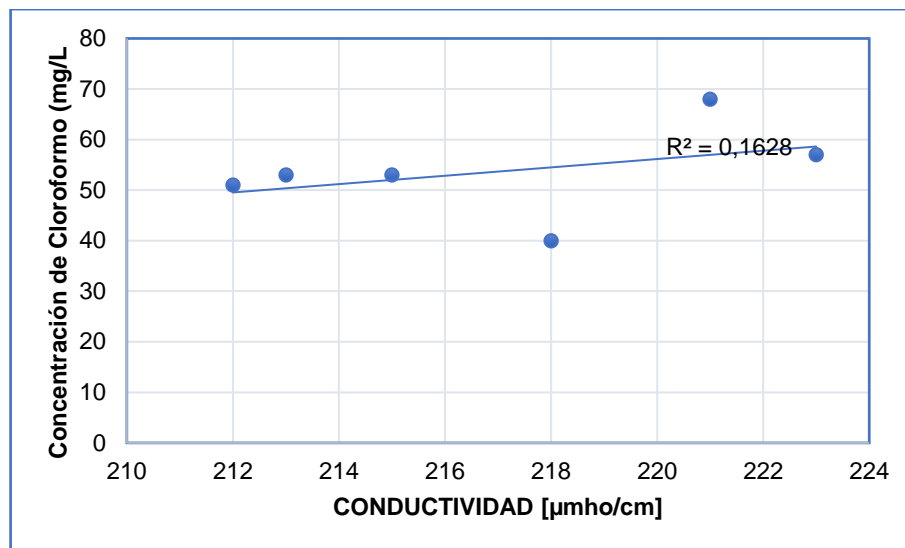
El análisis estadístico para evaluar la relación entre la turbiedad y la concentración de cloroformo en el agua potable de Montería arrojó un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) de 0.0004, indicando ausencia de correlación lineal significativa entre estas variables. Este resultado implica que la variabilidad observada en la concentración de cloroformo no puede explicarse por cambios en la turbiedad.

La ausencia de correlación es particularmente relevante porque la turbiedad se considera habitualmente un indicador indirecto de la presencia de materia particulada y orgánica en suspensión, las cuales influyen en la formación de subproductos de desinfección como los trihalometanos. Sin embargo, estudios previos en Colombia y en contextos similares han documentado que la turbiedad no siempre es un predictor fiable para la formación de THMs, principalmente debido a que la materia orgánica natural que cataliza la formación de cloroformo puede estar disuelta o presente en forma no particulada, no reflejándose en los valores de turbiedad (Bracho et al., 2009; Gamboa et al., 2022).

En contraste, investigaciones internacionales usando cromatografía de gases con espectrometría de masas (GC-MS), la técnica estándar para determinación de THMs, han identificado correlaciones más robustas con variables fisicoquímicas como el carbono orgánico total (COT), la absorbancia UV-254 y la concentración de cloro residual, mientras que la turbiedad muestra un efecto menos directo (Richardson et al., 2007; WHO, 2017). Esto enfatiza que el método colorimétrico empleado, pese a su validez demostrada para monitoreo rutinario y su buena concordancia con GC-MS dentro de ciertos rangos, tiene limitaciones en la sensibilidad y especificidad para detectar relaciones con parámetros indirectos como la turbiedad. La replicabilidad y control de calidad del método se garantizan mediante calibraciones diarias con estándares certificados, análisis de muestras en duplicado y manejo cuidadoso para evitar pérdidas por volatilización, conforme a estándares internacionales (ISO/IEC 17025), pero no permite identificación individual de compuestos o análisis multivariado detallado como GC-MS (HACH Company, 2019; Sierra et al., 2016).

### 5.5.3. DETERMINACIÓN DEL GRADO DE CORRELACIÓN ENTRE CONDUCTIVIDAD Y LA CONCENTRACIÓN DE CLOROFORMO EN MONTERÍA.

Grafica 23 Correlación entre Conductividad y concentración de cloroformo de Montería



Fuente. Elaboración propia

El análisis estadístico que relaciona la conductividad con la concentración de cloroformo en el agua potable de Montería mostró un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) de 0.1624, indicando una correlación débil con una asociación lineal limitada. En términos prácticos, solo alrededor del 16.24% de la variabilidad en la concentración de cloroformo puede explicarse por la variabilidad en la conductividad eléctrica.

La conductividad eléctrica, que refleja la cantidad total de iones disueltos, principalmente sales minerales, en el agua, no constituye un predictor fuerte para la formación de cloroformo. Esto se debe a que la concentración de cloroformo depende mayormente de la naturaleza y concentración específica de la materia orgánica natural (MON), la dosis y tiempo de contacto con el cloro, y otras condiciones operativas (Gamboa et al., 2022; Chamorro et al., 2010). Esta conclusión es coherente con estudios previos en Colombia y contextos similares, que también reportan baja o nula correlación entre conductividad y formación de THMs (Vargas et al., 2015; Suárez Muñoz et al., 2024).

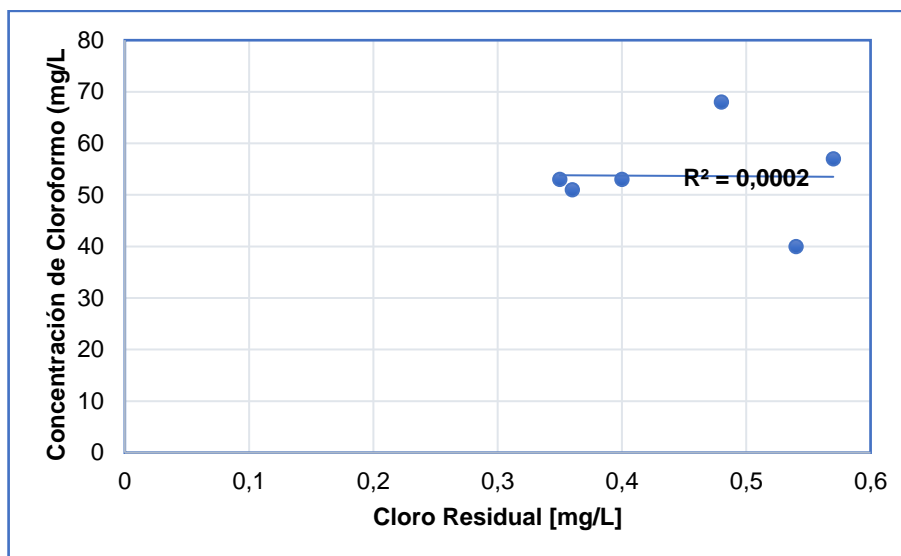
La baja correlación ( $R^2$  bajo) encontrada invita a considerar que factores no medidos o no contemplados en este estudio inciden en la formación y dinámica del cloroformo. Estos pueden incluir la calidad específica de la materia orgánica, interacciones químicas, variabilidad en la concentración y demanda del cloro residual, condiciones hidráulicas y estructurales de la red, temperaturas y eventos estacionales, entre otros (Richardson et al., 2007; WHO, 2017). Por ende, la complejidad del sistema requiere un enfoque multivariado para abordar la influencia conjunta de estos elementos.

En suma, estos resultados resaltan la necesidad de profundizar en controles analíticos integrales combinando datos fisicoquímicos y operacionales, así como fortalecer las metodologías y técnicas empleadas para una adecuada gestión sanitaria y ambiental del agua potable en Montería.

Este resultado resalta que, aunque la conductividad puede aportar información sobre la calidad general del agua relacionada con sales disueltas, pero no explica significativamente la formación o concentración de subproductos de desinfección como el cloroformo.

#### 5.5.4. DETERMINACIÓN DEL GRADO DE CORRELACIÓN ENTRE CLORO RESIDUAL Y LA CONCENTRACIÓN DE CLOROFORMO EN MONTERÍA.

Grafica 24 Correlación entre Cloro Residual y concentración de cloroformo de Montería



Fuente. Elaboración propia

El análisis estadístico que evalúa la relación entre el cloro residual y la concentración de cloroformo en el agua potable de Montería arrojó un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) extremadamente bajo, de 0.0002, indicando ausencia de correlación lineal significativa entre estas dos variables. Esto indica que la variabilidad en la concentración de cloroformo no puede explicarse por las fluctuaciones en los niveles de cloro residual presentes en el sistema de distribución.

Este hallazgo es consistente con estudios previos realizados en Colombia y otros países, como el estudio de Sánchez et al. (2010) en Cali, donde se evidenció que la relación entre cloro residual y subproductos de desinfección está sujeta a múltiples factores, incluyendo la edad del agua en las tuberías, la calidad del agua cruda y las condiciones operativas del sistema, que modulan la formación y acumulación de cloroformo y otros THMs. En ese contexto, aunque el mantenimiento de un residual mínimo de cloro es esencial para la desinfección microbiológica continua, no es un predictor directo y confiable de la formación de cloroformo en la red (Gamboa et al., 2022; Vasconcelos et al., 1997).

En cuanto a la validez y límites del método espectrofotométrico colorimétrico empleado para la determinación de cloroformo, si bien esta técnica ha demostrado correlaciones adecuadas y buena precisión para el monitoreo rutinario, posee un límite de detección superior al de técnicas estándar como GC-MS y no permite identificación individual de compuestos específicos ni mediciones en niveles trazas bajas (HACH Company, 2019; Sierra et al., 2016). Esta limitación implica que puede no detectar rápidamente fluctuaciones pequeñas o inciertas asociadas a variaciones en el cloro residual, lo cual puede contribuir a una baja correlación estadística observada.

Finalmente, la baja correlación entre cloro residual y cloroformo sugiere que factores no medidos o no considerados, como la concentración y composición específica de materia orgánica, el tiempo de residencia del agua, las condiciones de temperatura, la hidráulica de la red, y la interacción con materiales de tuberías y biopelículas, desempeñan un papel crucial en la formación de estos subproductos. La complejidad química y operativa del sistema requiere análisis más integrales y modelos predictivos multivariados para lograr una comprensión y gestión más precisa (Richardson et al., 2007; WHO, 2017).

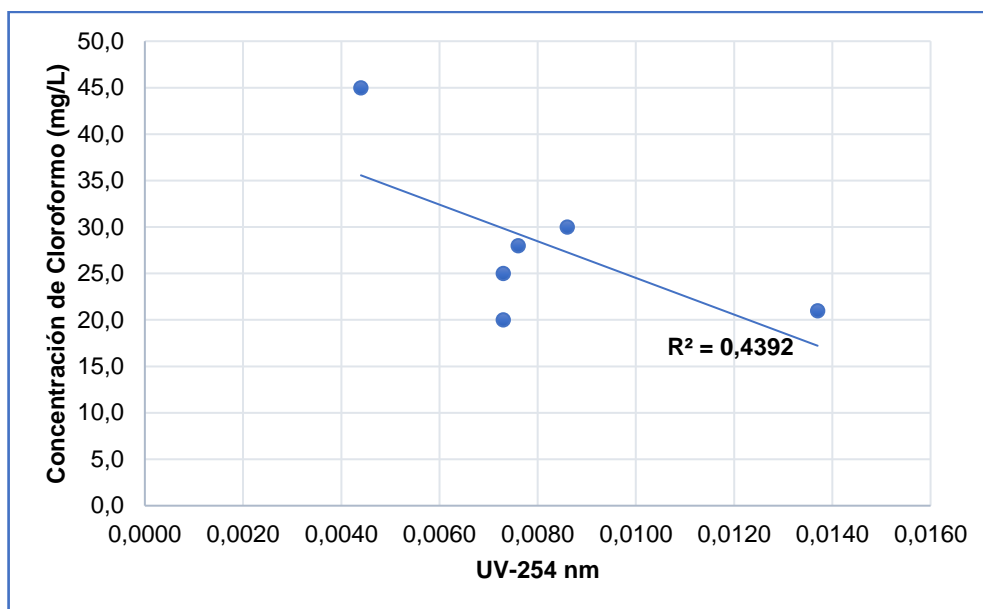
Este resultado revela que, en el sistema de distribución de agua de Montería, el cloro residual no es un buen predictor para la concentración de cloroformo. Aunque el cloro residual libre es un indicador importante para garantizar la desinfección continua del agua potable, su concentración no tiene una asociación directa con los niveles de este subproducto de desinfección específico. Esto puede deberse a que la formación de cloroformo depende de múltiples factores adicionales como la

cantidad y tipo de materia orgánica natural, el tiempo de contacto, temperatura, y condiciones fisicoquímicas particulares del agua.

#### 5.5.5. DETERMINACIÓN DEL GRADO DE CORRELACIÓN ENTRE UV-254 Y LA CONCENTRACIÓN DE CLOROFORMO CERETE.

Se empleó un análisis de regresión lineal para evaluar la correlación entre la concentración de cloroformo y la materia orgánica natural (MON), cuantificada indirectamente a través de la absorbancia a 254 nm (UV-254). Los resultados se presentan en la Gráfica 25.

Grafica 25 Correlación entre UV-254 y concentración de cloroformo de Cerete



Fuente. Elaboración propia

Según la Grafica 25, la correlación observada entre UV-254 y cloroformo es negativa y moderadamente baja, con un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) de 0.4392. Esta baja correlación puede explicarse por la alta concentración de

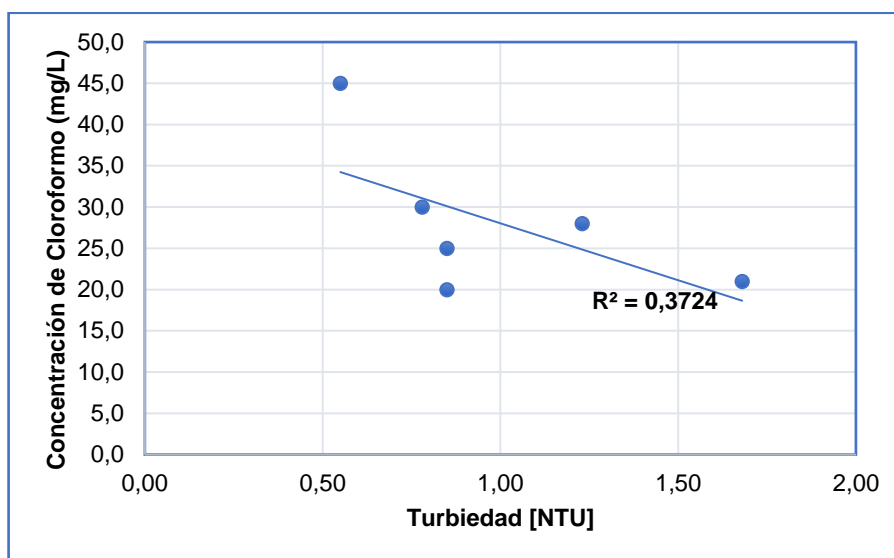
cloroformo registrada en el punto 1 ( $45 \mu\text{g CHCl}_3/\text{L}$ ), seguida de una disminución significativa en las concentraciones de cloroformo en los demás puntos, las cuales se mantienen por debajo del promedio general para Cereté ( $28 \mu\text{g CHCl}_3/\text{L}$ ).

La validez del método colorimétrico THM Plus empleado para la determinación de cloroformo ha sido ampliamente validada en comparación con técnicas estándar como la cromatografía de gases con espectrometría de masas (GC-MS). Este método presenta ventajas destacables en términos de rapidez, accesibilidad y costo, siendo particularmente útil para monitores rutinarios y frecuentes en escenarios con limitaciones técnicas o presupuestarias. Sin embargo, presenta límites en cuanto a la detección individualizada de compuestos y la sensibilidad frente a niveles muy bajos que sí detecta GC-MS, aspectos importantes a considerar en la interpretación de resultados y en la planificación del monitoreo científico (Sierra et al., 2016; Hach Company, 2019).

Por otro lado, la concentración de UV-254 presenta un incremento porcentual considerable del 68 % en el punto 2 en comparación con el punto 1, aumentando de  $0.0044 \text{ cm}^{-1}$  a  $0.0137 \text{ cm}^{-1}$ . En los puntos subsecuentes, la concentración de UV-254 disminuye notablemente y se mantiene relativamente estable. Esta dinámica sugiere que, aunque la absorbancia UV-254 es un indicador útil de la presencia de precursores orgánicos para la formación de subproductos de desinfección como el cloroformo, otros factores operativos y ambientales, tales como la dosificación de cloro y el tiempo de residencia del agua, pueden influir en la formación y concentración final de cloroformo en la red de distribución.

### 5.5.6. DETERMINACIÓN DEL GRADO DE CORRELACIÓN ENTRE TURBIEDAD Y LA CONCENTRACIÓN DE CLOROFORMO EN CERETE.

Grafica 26 Correlación entre Turbiedad y concentración de cloroformo de Cerete



Fuente. Elaboración propia

El análisis estadístico realizado para evaluar la relación entre la turbiedad y la concentración de cloroformo en el agua potable de Cereté arrojó un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) igual a 0.3724. Este valor indica la existencia de una correlación moderada entre ambas variables, sugiriendo que aproximadamente el 37.24% de la variabilidad en la concentración de cloroformo puede explicarse por las variaciones en la turbiedad del agua.

La turbiedad, parámetro ampliamente utilizado como indicador de la presencia de partículas suspendidas y materia orgánica, contribuye a la formación de trihalometanos al ser precursores en reacciones con el cloro. Este resultado coincide con diversos estudios realizados en Colombia que también reportan correlaciones moderadas a significativas entre turbiedad y compuestos orgánicos que potencialmente forman subproductos de desinfección (Hernández Cogollo, 2016; Martínez-Orjuela et al., 2020). No obstante, la correlación parcial indica que la turbiedad no es el único factor que influye en la formación de cloroformo, ya que otros aspectos como la concentración de materia orgánica disuelta, la dosificación del desinfectante y las condiciones del sistema hidráulico también desempeñan roles esenciales.

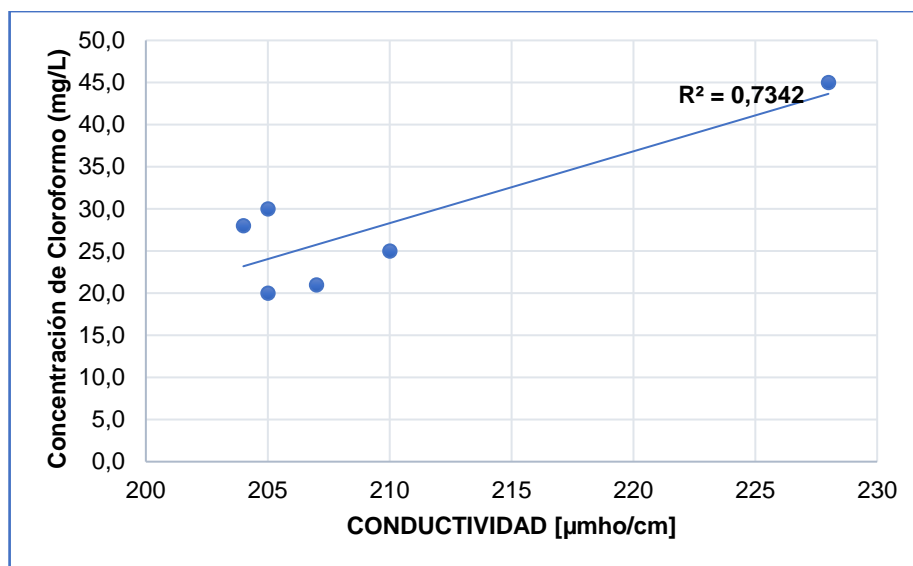
Por lo tanto, una correlación moderada como la obtenida en este estudio puede reflejar que la materia particulada presente contribuye, aunque no de manera exclusiva, a la formación de cloroformo durante el proceso de cloración.

Este resultado destaca la importancia de considerar la turbiedad como un parámetro relevante para evaluar y predecir la presencia de subproductos de la desinfección en el sistema de agua potable de Cereté.

En estudios relacionados, se ha evidenciado que la turbiedad puede presentar correlaciones significativas con otros parámetros de calidad del agua, como coliformes fecales o carbono orgánico total, que también influyen indirectamente en la formación de subproductos de desinfección.

#### 5.5.7. DETERMINACIÓN DEL GRADO DE CORRELACIÓN ENTRE CONDUCTIVIDAD Y LA CONCENTRACIÓN DE CLOROFORMO EN CERETE.

Grafica 27 Correlación entre Conductividad y concentración de cloroformo de Cerete



Fuente. Elaboración propia

El análisis estadístico que relaciona la conductividad con la concentración de cloroformo en el agua potable de Cereté mostró un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) de 0.7342. Este valor indica una correlación fuerte entre ambas variables, lo que sugiere que aproximadamente el 73.42% de la variabilidad en la concentración de cloroformo puede explicarse por las variaciones en la conductividad del agua.

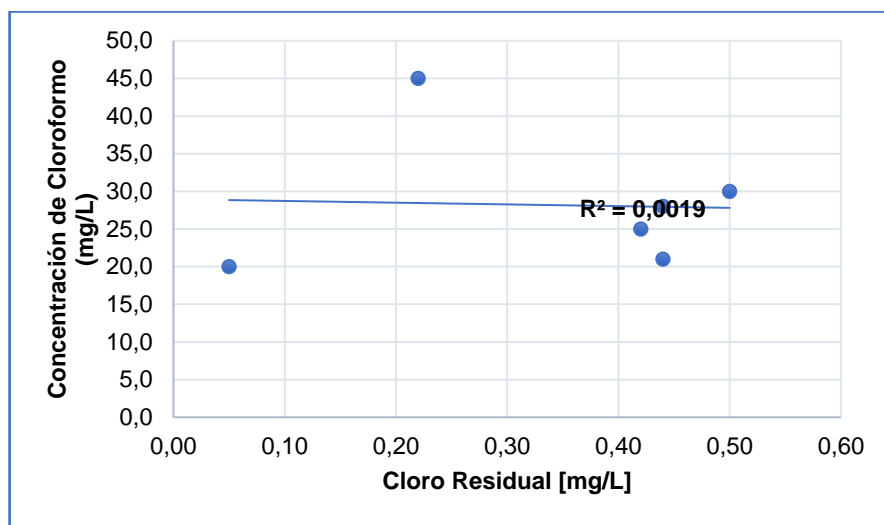
La conductividad eléctrica es un parámetro que refleja la concentración de iones disueltos en el agua, incluyendo sales minerales que pueden provenir de procesos naturales o actividades antropogénicas en la cuenca hidrográfica.

La conductividad eléctrica es un parámetro bien establecido que refleja la concentración total de iones disueltos, principalmente sales minerales, que pueden tener origen natural o derivado de actividades antropogénicas presentes en la cuenca hidrográfica. En el caso de Cereté, esta fuerte asociación puede explicarse porque la presencia de sales y minerales disueltos está relacionada con una mayor carga de materia orgánica o precursores de subproductos de desinfección, como resultado de influencias agropecuarias intensivas y sedimentación en la cuenca del río Sinú (Vargas et al., 2015; Instituto de Salud, 2022). Esto confirma que en este contexto específico la conductividad puede ser un indicador indirecto útil para anticipar la formación de cloroformo.

Este resultado es relevante para el manejo y monitoreo de la calidad del agua potable en Cereté, ya que permite identificar que el control de la calidad hidroquímica, reflejada en parámetros como la conductividad, puede aportar información valiosa para anticipar la formación de compuestos como el cloroformo.

#### 5.5.8. DETERMINACIÓN DEL GRADO DE CORRELACIÓN ENTRE CLORO RESIDUAL Y LA CONCENTRACIÓN DE CLOROFORMO EN CERETE.

Grafica 28 Correlación entre Cloro Residual y concentración de cloroformo de Cerete



Fuente. Elaboración propia

El análisis estadístico realizado para evaluar la relación entre el cloro residual y la concentración de cloroformo en el agua potable de Cereté arrojó un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) igual a 0.0019. Este valor indica que prácticamente no existe una correlación lineal significativa entre estas dos variables, lo cual implica que la variabilidad en la concentración de cloroformo no puede ser explicada por las variaciones en los niveles de cloro residual presentes en el sistema de distribución de agua potable de Cereté.

Este resultado coincide con estudios previos en Colombia, tales como el de Sánchez et al. (2010) en Cali, donde se observó que la relación entre cloro residual y formación de subproductos de desinfección es compleja y depende de múltiples factores adicionales. Aunque el cloro residual libre es esencial para garantizar la eficacia microbiológica y la seguridad sanitaria del agua, su concentración no es directamente proporcional a la presencia o concentración de cloroformo, debido a que la formación de este compuesto depende de parámetros complementarios como la calidad y tipo de materia orgánica natural (MON), tiempo y dosis de cloración, temperatura, pH, y características específicas del sistema de distribución (Vasconcelos et al., 1997; Gamboa et al., 2022).

La formación de cloroformo, como subproducto de la desinfección con cloro, depende de múltiples factores adicionales, tales como la cantidad y naturaleza de la materia orgánica en el agua, el tiempo de contacto, la dosis de cloro aplicada, las condiciones fisicoquímicas específicas del recurso hídrico y el ambiente de la red de distribución.

Por lo tanto, la baja correlación indica que, aunque el cloro residual es necesario para mantener la potabilidad microbiológica, sus niveles no reflejan directamente la concentración de cloroformo y otros subproductos de la desinfección. Esto resalta la importancia de considerar otros parámetros y condiciones del proceso de tratamiento y distribución de agua potable para comprender y controlar la formación de trihalometanos y específicamente del cloroformo en Cereté.

## 5.6. DISCRIMINACIÓN DE LOS PUNTOS CON MAYORES CONCENTRACIONES DE CLOROFORMO EN LA RED DE DISTRIBUCIÓN.

### 5.6.1. DISCRIMINACIÓN DE LOS PUNTOS CON MAYORES CONCENTRACIONES DE CLOROFORMO EN LA RED DE DISTRIBUCIÓN MONTERÍA.

Según se observa en la Tabla 3, los puntos 1 y 2 presentan las concentraciones más elevadas de cloroformo, con valores de 57 y 68  $\mu\text{g/L}$ , respectivamente. Estas concentraciones elevadas pueden atribuirse a la reacción inicial entre el cloro residual y la materia orgánica natural (MON) en la cámara de contacto de las plantas de tratamiento, donde se genera la mayor parte de los subproductos de desinfección (SPDs) por procesos de oxidación. Estudios en Colombia y regiones tropicales han mostrado patrones similares, donde la mayor formación de cloroformo ocurre en etapas tempranas del tratamiento y disminuye conforme el agua avanza en la red (Gamboa et al., 2022; Suárez Muñoz et al., 2024).

En el punto 3, la concentración de cloroformo disminuye significativamente a 40  $\mu\text{g/L}$ , mientras que en los puntos 4, 5 y 6 las concentraciones se estabilizan por debajo del promedio general de 54  $\mu\text{g/L}$ . Este comportamiento es concordante con estudios de distribución de THMs en redes urbanas colombianas, que resaltan la volatilización, degradación y disminución de precursores orgánicos como mecanismos que modulan la concentración de cloroformo en la red, evitando incrementos en tramos alejados de la planta (Rodríguez et al., 2007; Borda et al., 2021).

La validez del método colorimétrico THM Plus utilizado, si bien no alcanza la especificidad y sensibilidad de técnicas estándar como la cromatografía de gases con espectrometría de masas (GC-MS), ha sido ampliamente validada para monitoreos rutinarios y rápidos. Su rango de detección (10-600  $\mu\text{g/L}$ ) es adecuado para niveles típicos encontrados en sistemas de distribución, y su rápida aplicabilidad y menor costo lo convierten en una herramienta valiosa para monitoreo en contextos con recursos limitados (Sierra et al., 2016; Hach Company, 2019). No obstante, en casos donde se requiera identificar compuestos específicos o niveles muy bajos, GC-MS sigue siendo indispensable.

Finalmente, es importante considerar que la formación de cloroformo es un fenómeno multifactorial. Además de la presencia de MON y el contacto con cloro, factores no medidos en este estudio —como calidad específica de la materia orgánica, temperatura, pH, tiempo de residencia, características hidráulicas y materiales de las tuberías— pueden incidir en la dinámica observada y la

variabilidad de los datos (Richardson et al., 2007; WHO, 2017). Este planteamiento justifica la ausencia de incrementos significativos a lo largo de la red y la estabilización observada, señalando la complejidad del sistema que exige evaluaciones multivariadas más detalladas para un mejor control sanitario.

En síntesis, estos resultados son coherentes con la evidencia nacional e internacional y refuerzan la necesidad de abordar el monitoreo y gestión de subproductos de desinfección con un enfoque integral, que incluya el uso adecuado de técnicas validadas y protocolos rigurosos de control de calidad.

#### 5.6.2. DISCRIMINACIÓN DE LOS PUNTOS CON MAYORES CONCENTRACIONES DE CLOROFORMO EN LA RED DE DISTRIBUCIÓN CERETE.

Como se observa en la Tabla 2, los puntos con las concentraciones más elevadas de cloroformo son el punto 1 ( $45 \mu\text{g CHCl}_3/\text{L}$ ) y el punto 6 ( $30 \mu\text{g CHCl}_3/\text{L}$ ). El comportamiento del punto 1 sugiere que la mayor formación de cloroformo ocurre en la salida de la planta de tratamiento, donde el cloro reacciona intensamente con los compuestos de materia orgánica natural (MON), generando elevadas concentraciones de este subproducto de desinfección, patrón que coincide con estudios realizados en otras ciudades colombianas como Pasto y Pereira, donde se ha documentado que las concentraciones máximas de THMs se presentan típicamente en las etapas iniciales del tratamiento (Chamorro et al., 2010; Sierra et al., 2016).

En los puntos intermedios (2-5) de la red, las concentraciones de cloroformo permanecen relativamente estables y no superan el promedio general de  $28 \mu\text{g CHCl}_3/\text{L}$ . Sin embargo, el incremento observado en el punto 6 ( $30 \mu\text{g CHCl}_3/\text{L}$ ) constituye un hallazgo relevante que puede atribuirse al tiempo de residencia prolongado del agua en la red y a una posible recloración o dosificación adicional para mantener los niveles adecuados de desinfección microbiológica. Esta hipótesis se apoya en el incremento del 20% en el cloro residual (de  $0.42$  a  $0.50 \text{ mg Cl}^-/\text{L}$ ) entre los puntos 5 y 6) y del 17% en la absorbancia UV-254 (de  $0.0073$  a  $0.0086 \text{ cm}^{-1}$ ), sugiriendo una interacción continua entre el cloro y los precursores orgánicos a lo largo de la red.

Finalmente, es crucial considerar que la formación y distribución de cloroformo en la red está influenciada por múltiples factores no medidos en este estudio, que pueden explicar los patrones observados. Entre estos factores se incluyen: la

composición específica y reactividad de la materia orgánica natural, variaciones en la temperatura ambiente y del agua, condiciones hidráulicas como velocidad de flujo y tiempos de residencia, características de los materiales de tubería, formación de biopelículas, estrategias operativas de reclusión, y variaciones en la demanda y consumo de agua (Richardson et al., 2007; WHO, 2017). La comprensión de estos factores requiere análisis multivariados más detallados para optimizar el control de subproductos de desinfección y garantizar la seguridad del agua potable en Cereté.

## 6. CONCLUSIONES

Se condujo un estudio durante la temporada seca para determinar las concentraciones de cloroformo y su correlación con parámetros de calidad del agua en las redes de distribución de Montería y Cereté, aplicando un método colorimétrico de bajo costo como alternativa a las técnicas analíticas convencionales.

Los resultados indican que ambos municipios cumplen con los valores máximos permisibles establecidos en la Resolución 2115 de 2007 para la mayoría de los parámetros evaluados, destacando diferencias operativas y de diseño como factores determinantes más allá de las características del agua cruda.

La turbiedad promedio registrada en Cereté (0.99 UNT) presentó valores superiores en comparación con Montería (0.59 UNT), manteniéndose ambos por debajo del límite máximo permisible de 2.0 UNT establecido por la normativa nacional. Esta diferencia sugiere una mayor variabilidad en la calidad del agua en Cereté, lo que destaca la importancia de optimizar los procesos de tratamiento y fortalecer el monitoreo en la red de distribución.

El rango de pH observado (7.2 a 8.1) se encuentra dentro de los límites establecidos por la Resolución 2115 (6.5 a 9.0) y cumple con las recomendaciones internacionales de la OMS y EPA (6.5 a 8.5). La mayor frecuencia de valores entre 7.2 y 7.6 indica una tendencia hacia un pH ligeramente alcalino, considerado óptimo para el consumo humano y la estabilidad química del agua.

La temperatura promedio del agua registrada en Montería (32.4°C) fue ligeramente superior a la de Cereté (31.5°C), diferencia que, junto con las características específicas de cada red de distribución, mostró influencia en la formación de cloroformo.

El cloro residual en Montería presentó niveles que cumplen con los valores mínimos reglamentarios ( $\geq 0.3 \text{ mg Cl}^-/\text{L}$ ) en la mayoría de los puntos monitoreados, mientras que en Cereté se identificaron algunos puntos con concentraciones inferiores a este umbral. Esta disminución se atribuye al efecto del tanque de almacenamiento, donde la volatilización del cloro residual ocurre debido a la cámara de aire existente, favoreciendo la pérdida durante el tiempo de residencia y las altas temperaturas ambientales.

Los valores de conductividad registrados en ambas ciudades se mantuvieron dentro de los rangos aceptables para agua potable según la normativa nacional.

Las concentraciones promedio de materia orgánica natural (MON), estimadas mediante absorbancia a 254 nm (UV-254), fueron similares en ambas ciudades, lo que es consistente con la fuente común de abastecimiento del río Sinú.

La correlación entre UV-254 y la formación de cloroformo mostró coeficientes de determinación ( $R^2$ ) de 0.20 para Montería y 0.43 para Cereté, indicando una correlación baja a moderada. Estos resultados sugieren que las diferencias en la formación de cloroformo no se deben principalmente a variaciones en la carga orgánica inicial, sino a las condiciones operativas específicas de cada PTAP, incluyendo la dosis de coagulante y las estrategias de desinfección implementadas.

En Cereté, se identificaron correlaciones estadísticamente significativas con múltiples parámetros: la conductividad mostró la correlación más fuerte y positiva ( $R^2 = 0.73$ ), seguida por el cloro residual con una correlación moderada negativa ( $R^2 = 0.68$ ) y la turbiedad con correlación negativa moderada ( $R^2 = 0.59$ ). Los compuestos aromáticos medidos como UV-254 presentaron una correlación moderada ( $R^2 = 0.43$ ).

En Montería, el comportamiento fue notablemente diferente, mostrando correlaciones débiles o inexistentes para la mayoría de los parámetros evaluados: conductividad ( $R^2 = 0.16$ ), cloro residual, turbiedad y UV-254 (todos con  $R^2 < 0.2$ ), sugiriendo que otros factores no medidos en este estudio podrían estar influyendo en la formación de cloroformo.

Para ambas ciudades, el pH y la temperatura no mostraron influencia significativa en la formación de cloroformo ( $R^2 < 0.2$ ), lo que indica que, dentro de los rangos operativos observados, estos parámetros no constituyen factores determinantes en la generación de este subproducto de desinfección.

La formación de cloroformo en Montería presentó concentraciones promedio superiores ( $54 \mu\text{g CHCl}_3/\text{L}$ ) comparado con Cereté ( $28 \mu\text{g CHCl}_3/\text{L}$ ), a pesar de compartir la misma fuente de abastecimiento; diferencia atribuible a tres factores operativos principales que actúan de manera sinérgica:

La mayor efectividad del proceso de coagulación en Cereté resulta en una mejor remoción de precursores orgánicos antes de la etapa de desinfección, reduciendo significativamente el potencial de formación de cloroformo. Aquí se implementa un sistema de cloración de punto único, evitando la recloración en red que caracteriza a Montería. Esta práctica limita el tiempo de contacto acumulado entre cloro y precursores orgánicos, reduciendo la formación progresiva de subproductos a lo largo del sistema de distribución.

Otro factor son las diferencias en extensión y configuración de las redes de distribución, estas generan distintos tiempos de residencia hidráulica, favoreciendo en Montería una mayor exposición al proceso de halogenación que incrementa la formación de cloroformo.

El punto más crítico en la formación de cloroformo para Cereté fue el punto 1, correspondiente a una obra de vivienda en construcción con  $45 \mu\text{g CHCl}_3/\text{L}$ . Mientras que, para Montería, los puntos más críticos en formación de cloroformo fueron el punto 1 correspondiente al Batallón de ASPC N° 11 "Cacique Tirrome" con  $57 \mu\text{g CHCl}_3/\text{L}$ , seleccionado como el punto más cercano a 600m de la PTAP y el punto 2 local comercial panadería con  $68 \mu\text{g CHCl}_3/\text{L}$ , localizado a 1200 m de la PTAP, confirmando el efecto de la distancia y tiempo de residencia en la formación progresiva de subproductos.

Estos resultados demuestran que, aun compartiendo la misma fuente de abastecimiento, las diferencias operativas y de diseño del sistema constituyen los factores determinantes en la formación de cloroformo, siendo más relevantes que las características del agua cruda.

En síntesis, este estudio aporta evidencia científica relevante para Colombia y plantea un camino claro para optimizar la gestión del agua potable desde un enfoque técnico integral, con énfasis en la combinación de técnicas analíticas, tecnologías aplicadas y modelos predictivos que aseguren un suministro seguro y sostenible de agua para la población.

## 7. RECOMENDACIONES

Para mejorar la calidad sanitaria del agua potable en las redes de distribución de Cereté y Montería, especialmente en la reducción de cloroformo y otros trihalometanos (THMs), se proponen las siguientes recomendaciones, fundamentadas en el análisis de resultados y normativas nacionales e internacionales, orientadas a fortalecer los procesos de tratamiento, vigilancia y comunicación, garantizando la protección de la salud pública y el cumplimiento de estándares rigurosos:

- Monitoreo continuo y sistemático de THMs: Establecer un plan de monitoreo frecuente que incluya múltiples puntos de la red, enfocándose en zonas con mayores concentraciones y tiempos prolongados de residencia del agua para detectar picos tempranos y responder oportunamente.
- Optimización y modernización de procesos de tratamiento: Implementar tecnologías avanzadas que reduzcan efectivamente los precursores orgánicos responsables de la formación de cloroformo, como la microfiltración, ultrafiltración y adsorción con carbón activado. Estas técnicas mejoran la remoción de materia orgánica natural (MON) y sólidos suspendidos, reduciendo la carga para la etapa de desinfección.
- Ajuste preciso de la dosificación de cloro: Utilizar sistemas automatizados y sensores para controlar la cantidad de cloro aplicada, balanceando la necesidad de desinfección microbiológica con la minimización de subproductos tóxicos.
- Monitoreo y control riguroso de variables operacionales: Mantener parámetros críticos como pH, temperatura y tiempo de residencia dentro de rangos óptimos, que limitan la formación de subproductos de desinfección.
- Gestión integral y optimización de las redes de distribución: Revisar el diseño y extensión de las redes para minimizar los tiempos de residencia excesivos que favorecen la formación y acumulación de trihalometanos.
- Cumplimiento de normativas internacionales más estrictas: Adoptar los valores guía de la OMS para cloroformo (30 µg/L) y los límites del EPA para

THMs totales (100 µg/L), garantizando mayores niveles de seguridad sanitaria.

- Capacitación técnica continua: Fortalecer las habilidades de operadores y técnicos en el manejo avanzado de procesos y tecnologías, asegurando prácticas óptimas para el control de contaminantes.
- Educación y comunicación a la comunidad: Informar a la población sobre riesgos, monitoreo y acciones preventivas relacionados con THMs, promoviendo su respaldo y participación.
- Investigación aplicada y actualización tecnológica: Fomentar estudios continuos sobre nuevas tecnologías emergentes para la reducción de THMs, tales como la fotocatalisis solar heterogénea, oxidación avanzada con peróxido de hidrógeno y UV, y sistemas de ozonización. Estas tecnologías innovadoras presentan potencial para aplicaciones eficaces y sostenibles en el contexto climático y operativo colombiano.
- Implementación de sistemas inteligentes de alerta temprana: Desarrollar protocolos usando sensores en tiempo real y análisis predictivos para detectar aumentos abruptos en THMs, facilitando respuestas rápidas que mitiguen riesgos sanitarios.

Proyecciones de líneas futuras de investigación incluyen:

1. Desarrollo de modelos predictivos multivariados que integren parámetros fisicoquímicos, hidráulicos y operativos para comprender dinámicas complejas de formación de THMs.
2. Evaluación comparativa de tecnologías emergentes y convencionales aplicadas en sistemas colombianos, buscando eficiencia, costo-beneficio y sostenibilidad ambiental.
3. Estudios longitudinales para analizar impactos estacionales y efectos del cambio climático en la calidad del agua y formación de subproductos.

4. Innovación y validación de métodos analíticos portátiles y sensibles para monitoreo frecuente in situ, mejorando la capacidad de intervención oportuna.
  
5. Evaluación epidemiológica del impacto en salud por exposición prolongada a THMs en comunidades vulnerables, para apoyo en formulación de políticas públicas.

Estas acciones buscan un abordaje integral que combine avances tecnológicos, control riguroso y comprensión científica para proteger la salud pública y garantizar la calidad del agua potable en Montería, Cereté y otras localidades similares.

## 8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACNUR (2018) La importancia del agua para la vida en el planeta. Alto Comisionado de Naciones Unidas para los Refugiados. Organización de Naciones Unidas. <https://eacnur.org/>

Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades (ATSDR). (2023). *Resumen de salud pública: Cloroformo (Chloroform)*. [https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es\\_phs6.html](https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs6.html)

Agua potable de la ciudad de Bogotá utilizando cromatografía de gases. Revista Colombiana de Química, 45(2), 23-32.

Alberts, B., Johnson, A., Lewis, J., Raff, M., Roberts, K., & Walter, P. (2002). *Molecular Biology of the Cell* (5ª ed.). Garland Science.

Alcaldía de Cereté. (2020). Plan de Desarrollo Municipal 2020-2023: "Cereté, Territorio de Paz". Cereté, Colombia.

Alcaldía de Montería. (2018). Plan de Ordenamiento Territorial de Montería 2018-2030. Montería, Colombia.

Alcaldía de Montería. (2018). Plan de Ordenamiento Territorial de Montería 2018-2030. Montería, Colombia.

Alcaldía de Montería. (2020). Plan de Desarrollo Municipal 2020-2023: "Gobierno de la Gente". Montería, Colombia.

Alcaldía de Montería. (2020). Plan de Desarrollo Municipal 2020-2023: "Gobierno de la Gente". Montería, Colombia.

Alcaldía de Montería. (2020, abril 19). Acueducto de San Isidro y San Anterito <https://www.monteria.gov.co/publicaciones/2791/acueducto-de-san-isidro-y-san-anterito-se-entregara-a-finales-de-septiembre/>

Al-Mutaz, I. S., et al. (n.d.). pH Increase in Water Distribution Pipes.

American Water Works Association (AWWA). (2017). *Water Quality and Treatment: A Handbook on Drinking Water* (6th ed.).

American Water Works Association (AWWA). (2017). *Water treatment: Principles and design* (3rd ed.). Wiley.

Arjona Sindy, Torres P, Cruz C; Loaiza L; Escobar J. (2012) EFECTO DEL PUNTO DE PRECLORACIÓN SOBRE LA FORMACIÓN DE TRIHALOMETANOS EN PROCESOS CONVENCIONALES DE POTABILIZACIÓN DE AGUA. UNIVERSIDAD DE MEDELLIN, FACULTAD DE INGENIERIA. Rev. ing. Univ. Medellín vol.11 no.20 Medellín-Colombia.

Atkins, P. W. (2010). *Química física* (9ª ed.). Reverté.

Baird, C. (2013). *Química ambiental* (4ª ed.). Waveland Press.

Banco de la República. (s.f.). La economía de las aguas del río Sinú. [https://www.banrep.gov.co/sites/default/files/publicaciones/archivos/dtser\\_194.pdf](https://www.banrep.gov.co/sites/default/files/publicaciones/archivos/dtser_194.pdf)

Berne, R. M., & Levy, M. N. (2018). *Fisiología cardiovascular* (10ª ed.). Elsevier.

Biopelículas en tanques de almacenamiento (WIT Press, 2019)

Borda, O., Guerrero, A., Moreno, A., & Ayala, L. (2021). Evaluación de la calidad del proceso de desinfección de agua potable basado en el uso de compuestos de cloro. Obtenido de <https://acofipapers.org/index.php/eiei/article/view/1650/1691>

Cabrera, A. (2023). Valoración y optimización de la dosificación de cloro en la planta de tratamiento de agua potable de la ciudad de Chota. Obtenido de <https://repositorio.unprg.edu.pe/handle/20.500.12893/11776>

Corporación Autónoma Regional de los Valles del Sinú y San Jorge. (2019). Informe de calidad de aguas superficiales en la cuenca del Río Sinú. Aguas de Córdoba.

(2018). Plan de Gestión y Resultados: Sistema de acueducto del municipio de Cereté.

Crittenden, J. C., Trussell, R. R., Hand, D. W., Howe, K. J., & Tchobanoglous, G. (2022). *Water Treatment: Principles and Design* (3rd ed.). Wiley.

Crittenden, J. C., Trussell, R. R., Hand, D. W., Howe, K. J., & Tchobanoglous, G. (2022). *Water Treatment: Principles and Design* (3rd ed.). Wiley.

Crittenden, J. C., Trussell, R. R., Hand, D. W., Howe, K. J., & Tchobanoglous, G. (2022). *Water Treatment: Principles and Design* (3rd ed.). Wiley.

Crittenden, J. C., Trussell, R. R., Hand, D. W., Howe, K. J., & Tchobanoglous, G. (2022). *Water Treatment: Principles and Design* (3rd ed.). Wiley.

CVS & Universidad de Córdoba. (2018). Diagnóstico de la calidad del agua superficial en la cuenca hidrográfica del río Sinú. Montería, Colombia: Corporación Autónoma Regional de los Valles del Sinú y San Jorge.

CVS. (2019). Caracterización ambiental del departamento de Córdoba. Montería, Colombia: Corporación Autónoma Regional de los Valles del Sinú y San Jorge.

CVS. (2020). Plan de Gestión Ambiental Regional 2020-2031. Montería, Colombia: Corporación Autónoma Regional de los Valles del Sinú y San Jorge.

DANE. (2018). Censo Nacional de Población y Vivienda 2018 - Colombia. Bogotá, Colombia: Departamento Administrativo Nacional de Estadística.

Díaz Torres, M. (2012). Descripción de microorganismos anaerobios provenientes de biopelículas de redes de distribución de agua potable en Colombia enriquecidas con cloroformo.

DNP Colombia. (2021). *Objetivo de Desarrollo Sostenible 6: Agua limpia y saneamiento*. Departamento Nacional de Planeación. <https://ods.dnp.gov.co/es/objetivos/agua-limpia-y-saneamiento>

Edzwald, J. K., & Tobiason, J. E. (2011). Chemistry of Coagulation and Flocculation. In *Water Quality & Treatment: A Handbook on Drinking Water* (6th ed.). American Water Works Association.

Environmental Monitoring and Assessment, 188(11), 1-10. Nieuwenhuijsen, M. J., Grellier, J., Smith, R., Iszatt, N., Bennett, J., Best, N., & Toledano, M. (2009). The epidemiology and possible mechanisms of disinfection by-products in drinking water. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 367(1904), 4043-4076.

Estimación la salinidad en aguas freáticas del área de influencia de la desembocadura del río Sinú-Córdoba, Colombia. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 75(2), 242-251.

Ficha técnica: Medidor de pH/temperatura pHTestr 30 [Documento técnico]. Tecfresh. <https://tecfresh.com/wp-content/uploads/FT-WD-35634-30.pdf>

García, J. C., & Jiménez, G. (2016). Determinación de trihalometanos en agua potable utilizando cromatografía de gases. *Revista Colombiana de Química*, 45(2), 23-32. <https://doi.org/10.15446/rev.colomb.quim.v45n2.12345>

García, J., & Jiménez, G. (2016). Método colorimétrico para la determinación de cloroformo en agua potable. *Revista Colombiana de Ingeniería*, 31(2), 147-160.

Gleick, P. H. (2014). *The World's Water: The Biennial Report on Freshwater Resources* (Vol. 8). Island Press.

Guyton, A. C., & Hall, J. E. (2016). *Tratado de fisiología médica* (13ª ed.). Elsevier.

Guzmán, B. L., Nava, G., & Díaz, P. (2015). Cloroformo: usos, riesgos y presencia en el ambiente. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 31(1), 1-12.

Guzmán, B. L., Nava, G., & Díaz, P. (2015). Cloroformo: usos, riesgos y presencia en el ambiente. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 31(1), 1-12.

Guzmán, D., Rodríguez, M., & Torres, J. (2015). Toxicidad y regulación del cloroformo en agua potable. *Salud Ambiental*, 11(1), 35-47.

Hach España. <https://es.hach.com/2100q-turbidimetro-portatil-epa-0-1000-ntu/product-details?id=24930077421>

Halliday, D., Resnick, R., & Walker, J. (2011). Física (9ª ed.). John Wiley & Sons.

Healthline. (2018). pH of Drinking Water: Acceptable Levels and More.

Helsel, D. R., & Hirsch, R. M. (2002). Statistical Methods in Water Resources. U.S. Geological Survey.

Higiene y Sanidad Ambiental (2008). Subproductos de la desinfección y efectos sobre la salud.

<https://www.minambiente.gov.co/minambiente-inauguro-planta-de-tratamiento-de-aguas-en-monteria/>

Hua, G., & Reckhow, D. A. (2007). Comparison of disinfection byproduct formation from chlorine and alternative disinfectants. *Water Research*, 41(8), 1667-1678.

IDEAM. (2018). Monitoreo hidrológico de la cuenca del río Sinú: Informe técnico 2017-2018. Bogotá, Colombia: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.

IDEAM. (2021). Estudio Nacional del Agua 2021. Bogotá, Colombia: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.

IGAC. (2018). Estudio general de suelos y zonificación de tierras del departamento de Córdoba. Bogotá, Colombia: Instituto Geográfico Agustín Codazzi.

IGAC. (2018). Estudio general de suelos y zonificación de tierras del departamento de Córdoba. Bogotá, Colombia: Instituto Geográfico Agustín Codazzi.

IGAC. (2021). Cartografía básica departamento de Córdoba, escala 1:100.000. Bogotá, Colombia: Instituto Geográfico Agustín Codazzi.

IGAC. (2021). Cartografía básica departamento de Córdoba, escala 1:100.000. Bogotá, Colombia: Instituto Geográfico Agustín Codazzi.

IGAC. (2022). Diccionario Geográfico de Colombia. Bogotá, Colombia: Instituto Geográfico Agustín Codazzi.

Impacto térmico en TTHM (RSC, 2023)

Instituto de Salud Global de Barcelona (ISGlobal). (2020). *La exposición a químicos en el agua potable se asocia con un 5% de los casos anuales de cáncer de vejiga en Europa.* <https://www.isglobal.org/-/la-exposicion-a-quimicos-en-el-agua-potable-se-asocia-con-un-5-de-los-casos-anuales-de-cancer-de-vejiga-en-europa>

Island Press. Crittenden, J. C., Trussell, R. R., Hand, D. W., Howe, K. J., & Tchobanoglous, G. (2012). *MWH's Water Treatment: Principles and Design.*

Jimenez, J., Quesada, S., & Romero, L. (2022). Remoción de materia orgánica natural por tratamiento convencional de agua en un río tropical. Obtenido de [https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?pid=S037939822022000200048&script=sci\\_art\\_text](https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?pid=S037939822022000200048&script=sci_art_text)

John Wiley & Sons. Richardson, S. D. (2003). Disinfection by-products and other emerging contaminants in drinking water. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 22(10), 666-684.

Know Your H<sub>2</sub>O. (2023). pH of Drinking Water Natural Water and Beverages.

Krasner, S. W., Weinberg, H. S., Richardson, S. D., Pastor, S. J., Chinn, R., Scilimenti, M. J., Onstad, G. D., & Thruston, A. D. (2006). Occurrence of a new generation of disinfection byproducts. *Environmental Science & Technology*, 40(23), 7175–7185. <https://doi.org/10.1021/es0605156>

LeChevallier, M. W., Welch, N. J., & Smith, D. B. (1996). Full-scale studies of factors related to coliform regrowth in drinking water. *Applied and Environmental Microbiology*, 62(7), 2201–2211. <https://doi.org/10.1128/AEM.62.7.2201-2211.1996>

Levine, I. N. (2013). *Química física* (6ª ed.). McGraw-Hill.

Li, X., Zhang, Y., & Wang, Y. (2021). Formation and control of disinfection by-products in drinking water: A review. *Science of the Total Environment*, 767, 144346. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144346>

Li, X., Zhang, Y., & Wang, Y. (2021). Formation and control of disinfection by-products in drinking water: A review. *Science of the Total Environment*, 767, 144346. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144346>

Liu, Y., Zhang, Y., & Hu, J. (2017). Biofilm formation and its influence on water quality in drinking water distribution systems. *Water Research*, 124, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.07.049>

López, M., & Pérez, J. (2020). *Toxicidad del cloroformo: revisión actualizada*. *Journal of Toxicology Research*, 45(3), 123-135. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304389425007472>

Macrotrends. (2025, mayo 30). Montería, Colombia Metro Area Population (1950-2025). Recuperado de <https://www.macrotrends.net/global-metrics/cities/20828/monteria/population>

Martínez, R., & Gómez, F. (2024). *Efectos reproductivos y del desarrollo asociados a la exposición prenatal a subproductos de desinfección en agua potable*. *Environmental Health Perspectives*. <https://ehp.niehs.nih.gov/>

Martínez-Restrepo, S., & Londoño-Vélez, J. (2020). Potencial ecoturístico en la región Caribe: El caso de Montería. *Revista Turismo y Desarrollo Local*, 13(28), 138-157.

Minambiente. (2021, Diciembre 20). Minambiente inauguró moderna planta de tratamiento de aguas residuales en Montería.

MINISTERIO DE LA PROTECCIÓN SOCIAL - MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. RESOLUCIÓN NÚMERO 2115 (22 JUN 2007)

Ministerio de la Protección Social y Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2007). Resolución 2115 del 22 de junio de 2007, por medio de la cual se señalan características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano.

Ministerio de la Protección Social, República de Colombia. (2007). Resolución 2115 de 2007. Por la cual se señalan características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano.

Ministerio de Salud y Protección Social de Colombia. (2007). Resolución 2115 de 2007. Por la cual se establecen los requisitos sanitarios para la calidad del agua para consumo humano.  
<https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/VS/ED/GCFI/resolucion-2115-de-2007.pdf>

Ministerio de Salud y Protección Social de Colombia. (2007). Resolución 2115 de 2007. Por la cual se establecen los requisitos sanitarios para la calidad del agua para consumo humano.  
<https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/VS/ED/GCFI/resolucion-2115-de-2007.pdf>

Ministerio de Salud y Protección Social. (2007). *Resolución 2115: Parámetros de calidad del agua potable*. República de Colombia.

Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. (2025). *Políticas públicas para la gestión sostenible del agua potable en Colombia*. Bogotá.

Modelización de cinéticas de desinfección (PMC, 2021)

National Cancer Institute (NCI). (2022). *Contaminantes del agua potable y riesgo de cáncer*. <https://dceg.cancer.gov/news-events/news/2022/disinfection-byproducts-drinking-water>

Negrete-Barrera, V. (2019). Transformación del territorio sinuano: La ganadería en Córdoba, siglos XIX y XX. Montería, Colombia: Universidad de Córdoba.

OMS. (2020). Guías para la calidad del agua potable, cuarta edición, que incorpora la primera adenda.

ONU, Asamblea General (2010) RESOLUCION 64/292; EL DERECHO HUMANO Y AL SANEAMIENTO.

ONU. (2024). *Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible*. Naciones Unidas. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/water-and-sanitation/>

Optimización de redes con EPANET (SciDirect, 2020)

Organización Mundial de la Salud (2018). Guías para la calidad del agua de consumo humano.

Organización Mundial de la Salud (OMS). (2017). Guidelines for Drinking-water Quality (4th ed.). <https://www.who.int/publications/i/item/9789241549950>

Organización Mundial de la Salud (OMS). (2017). Guidelines for Drinking-water Quality (4th ed.). <https://www.who.int/publications/i/item/9789241549950>

Organización Mundial de la Salud (OMS). (2017). Guidelines for Drinking-water Quality (4th ed.). <https://www.who.int/publications/i/item/9789241549950>

Organización Mundial de la Salud (OMS). (2017). Guidelines for Drinking-water Quality (4th ed.). <https://www.who.int/publications/i/item/9789241549950>

Organización Mundial de la Salud (OMS). (2023). *Informe nacional de calidad del agua para consumo humano Colombia 2022*. Ministerio de Salud y Protección Social. <https://www.minsalud.gov.co/sites/rid>

Organización Mundial de la Salud (WHO). (2017). Guidelines for Drinking-water Quality (4th ed.). <https://www.who.int/publications/i/item/9789241549950>

Ortiz-Guerrero, C. (2019). Manifestaciones culturales y patrimonio inmaterial en el Caribe colombiano: el caso del Sinú. *Revista de Estudios Caribeños*, 7(2), 78-96.

Paquete de medidor de pH y conductividad para laboratorios de calidad del agua HQ440D con electrodo de pH PHC281 para aguas y célula de conductividad CDC401 [Ficha técnica]. Hach Colombia. <https://co.hach.com/paquete-de-medidor-de-ph-y-conductividad-para-laboratorios-de-calidad-del-agua-hq440d-con-electrodo-de-ph-phc281-para-aguas-y-celula-de-conductividad-cdc401/product?id=53559497406>

Parques Nacionales Naturales de Colombia. (2019). Plan de Manejo del Parque Nacional Natural Paramillo. Bogotá, Colombia: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.

Plataforma Biomédica. (2025). *Exposición a trihalometanos en el agua potable y riesgo de cáncer de vejiga: revisión y metaanálisis*. *BMJ Open*, 14(11), e084122. <https://bmjopen.bmj.com/content/14/11/e084122>

PMC. (2022). Examining the dynamics of the relationship between water pH and physicochemical properties.

Pocket Colorimeter DR300: Fotómetro portátil para cloro residual y más [Ficha técnica]. Hach Colombia. <https://es.hach.com/colorimetros/pocket-colorimeter-dr300/family?productCategoryId=54949031362>

Postel, S. (1999). *Pillar of Sand: Can the Irrigation Miracle Last?* W.W. Norton & Company.

Ramírez y Much (2021). Determinación de trihalometanos totales en procesos de potabilización.

Real UV254 Portable Meter: Medidor portátil UV254 / UVT [Ficha técnica]. <https://realtechwater.com/products/uv254-uvt-instrumentation/uv254-uvt-meter-p-series/>

Revista AIDIS (2022). Riesgos para la salud asociados al cloroformo en agua potable.

Richardson, S. D. (2011). Disinfection by-products: Formation and occurrence in drinking water. In *Disinfection By-Products in Drinking Water: Occurrence, Formation, Health Effects, and Control* (pp. 1-29). American Chemical Society.

Richardson, S. D., & Postigo, C. (2015). Drinking Water Disinfection By-products: Formation, Occurrence, Mitigation, and Significance. In *Emerging Organic Contaminants and Human Health* (pp. 93-137). Springer.

Richardson, S. D., Plewa, M. J., Wagner, E. D., Schoeny, R., & DeMarini, D. M. (2007). 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*, 636(1-3), 178–242. <https://doi.org/10.1016/j.mrrev.2007.09.001>

Richardson, S. D., Plewa, M. J., Wagner, E. D., Schoeny, R., & DeMarini, D. M. (2007). 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*, 636(1-3), 178-242.

Richardson, S. D., Plewa, M. J., Wagner, E. D., Schoeny, R., & DeMarini, D. M. (2007). 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*, 636(1-3), 178–242. <https://doi.org/10.1016/j.mrrev.2007.09.001>

Richardson, S. D., Plewa, M. J., Wagner, E. D., Schoeny, R., & DeMarini, D. M. (2007). Occurrence, genotoxicity, and carcinogenicity of regulated and emerging disinfection by-products in drinking water: A review and roadmap for research. *Mutation Research*, 636(1-3), 178-242.

Rodríguez et al. (2007). Evaluación de subproductos de desinfección en agua potable.

Rodríguez, M. J., & Sérodes, J. B. (2001). Spatial and temporal evolution of trihalomethanes in three water distribution systems. *Water Research*, 35(6), 1572-1586.

Rodríguez, Manuel J, Rodríguez, Germán, Serodes, Jean, & Sadiq, Rehan. (2007). Subproductos de la desinfección del agua potable: Formación, aspectos sanitarios y reglamentación. *Interciencia*, 32(11), 749-756

Rodríguez-Páez, L. (2018). Dinámica agrícola en los municipios ribereños del Sinú. *Economía & Región*, 12(1), 123-145.

Sadiq, R., & Rodriguez, M. J. (2004). Disinfection by-products (DBPs) in drinking water and predictive models for their occurrence: a review. *Science of the Total Environment*, 321(1-3), 21-46.

Saldaña, I., & Franco, H. (2022). Evaluación de la concentración de compuestos trihalometanos en el agua potable distribuida en la Ciudad David, Panamá y sus riesgos a la salud humana. Obtenido de <https://revistas.utp.ac.pa/index.php/id-tecnologico/article/view/3554/4308>

Sánchez, L. D., Rodríguez, S., Escobar, J. C., & Torres, P. (2010). Modelación del cloro residual y subproductos de la desinfección en un sector piloto del sistema de distribución de agua potable de la ciudad de Cali. *Ingeniería Y Competitividad*, 12(1), 127–138.

Sánchez, L. D., Sánchez, A., Galvis, G., & Latorre, J. (2016). Occurrence of haloacetic acids in different drinking water supply systems in Colombia.

Sánchez-Páez, H., Ulloa-Delgado, G., & Álvarez-León, R. (2018). Diagnóstico y zonificación preliminar de los manglares del Caribe colombiano: estudio específico de la bahía de Cispatá. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 42(162), 36-48.

Secretaría de Planeación Departamental de Córdoba. (2019). Caracterización socioeconómica de los municipios de Córdoba. Montería, Colombia: Gobernación de Córdoba.

Shiklomanov, I. A. (1993). World fresh water resources. *Water International*, 18(2), 91-111.

Sierra R. Carlos A. 2011. *Calidad del agua: Evaluación y diagnóstico*. Universidad de Medellín, Medellín Colombia.

Singer, P. C. (1994). Control of Disinfection By-Products in Drinking Water. *Journal of Environmental Engineering*, 120(4), 727–744. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9372\(1994\)120:4\(727\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9372(1994)120:4(727))

Singer, P. C. (1999). Humic substances as precursors for potentially harmful disinfection by-products. *Water Science and Technology*, 40(9), 25-30.

Sposob, Gustavo (12 de septiembre de 2024). Agua. *Enciclopedia Concepto*.

Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios. (2020). *Informe de Calidad del Agua en Colombia*.

Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios. (2024, agosto 6). Superintendencia confirma buena calidad del agua en Montería con IRCA de 1,5%. Recuperado de <https://www.viveradio.com.co/superintendencia-confirma-buena-calidad-del-agua-en-monteria-con-irca-de-1-5/>

Támara-Gómez, J. (2017). *Historia del algodón en Córdoba: Auge y crisis de un cultivo emblemático*. Bogotá, Colombia: Editorial Universidad Nacional de Colombia.

Termodinámica de formación de cloroformo (MDPI, 2021)

Torres, A. (2021). Determinación de la calidad del agua para consumo humano proveniente de las plantas de tratamiento Cariongo y Monte dentro y la red de distribución del municipio de Pamplona, Norte de Santander. Obtenido de [http://repositoriodspace.unipamplona.edu.co/jspui/bitstream/20.500.12744/3550/1/Torres\\_2021\\_TG.pdf](http://repositoriodspace.unipamplona.edu.co/jspui/bitstream/20.500.12744/3550/1/Torres_2021_TG.pdf)

Tukey, J. W. (1977). *Exploratory Data Analysis*. Addison-Wesley.

UNESCO. (2016). Agua y empleo - Informe de las Naciones Unidas Sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos en el Mundo 2016 (p. 56).

United States Environmental Protection Agency. HACH Company. (2019). Trihalomethane Formation Potential (THMFP) Method 10224: Water Analysis Handbook. HACH Company

USEPA. (2018). Method 8260C: Volatile Organic Compounds by Gas Chromatography/Mass Spectrometry (GC/MS).

Valencia-Carvajal, R. (2020). Identidad cultural en el Caribe colombiano: Expresiones musicales y festivas del Sinú. *Antropología del Caribe*, 15(3), 215-233.

Validación de datos atípicos en modelos empíricos (IJSRMS, 2022)

Vallejo, O., Beltrán, L., Franco, P., Montoya, C., Alzate, E., & Reyes, H. (2015). Determinación de trihalometanos en aguas de consumo humano por microextracción en fase sólida- cromatografía de gases en Pereira, Colombia. Obtenido de <https://revistas.unal.edu.co/index.php/rcolquim/article/view/54041/56265>

Veolia Colombia. (2021, Noviembre 5). Con la PTAR Nororiental transformamos a Montería, avance del 95%. <https://www.monteria.veolia.co/medios-comunicacion/noticias/ptar-nororiental-transformamos-monteria-avance-95>

Veolia Colombia. (2025, agosto 12). Veolia construye una nueva planta de potabilización para Montería. Recuperado de <https://www.monteria.veolia.co/medios-comunicacion/noticias/veolia-construye-nueva-planta-potabilizacion-monteria>

Veolia Colombia. (s.f.). Gestión del Agua. <https://www.monteria.veolia.co/gestion-agua>

Villanueva, C. M., Cordier, S., Font-Ribera, L., Salas, L. A., & Levallois, P. (2017). Overview of disinfection by-products and associated health effects. *Current Environmental Health Reports*, 4(1), 56-68.

Villanueva, C. M., Kogevinas, M., Cordier, S., Templeton, M. R., Vermeulen, R., Nuckols, J. R., ... & Levallois, P. (2015). Assessing exposure and health consequences of chemicals in drinking water: current state of knowledge and research needs. *Environmental Health Perspectives*, 123(6), 550-558.

WHO (2019). *Guidelines for Drinking-Water Quality* (4<sup>a</sup> ed.). World Health Organization.

WHO. (2017). *Guidelines for Drinking-water Quality* (4th ed.). Organización Mundial de la Salud.

Wikipedia. (2024, Noviembre 9). Río Sinú.

World Health Organization (WHO). (2017). *Guidelines for Drinking-water Quality*, 4th Edition, Incorporating the 1st Addendum.

Zanabria, M. (2020). Evaluación de los subproductos de cloración en el tratamiento de agua potable en el distrito de Pilcomayo, 2020.