



Evaluación de la presencia de *Cryptosporidium spp.* y *Giardia spp.* en aguas crudas y tratadas en las zonas rurales del Área Metropolitana del Valle de Aburra.

Catalina Escobar Tovar

Trabajo de grado presentado para optar al título de Magíster en Gestión Ambiental

Director

Gustavo Antonio Peñuela Mesa, Doctor (PhD) en Química ambiental

Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería
Maestría en Gestión Ambiental
Medellín, Antioquia, Colombia
2023

Cita	(Escobar Tovar, 2023)
Referencia	Escobar Tovar, C. (2023). <i>Evaluación de la presencia de Cryptosporidium spp. y Giardia spp. en aguas crudas y tratadas en las zonas rurales del Área Metropolitana del Valle de Aburra</i> . [Tesis de maestría]. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.
Estilo APA 7 (2020)	



Maestría en Gestión Ambiental, Cohorte II.

Grupo de Investigación Diagnóstico y Control de la Contaminación.

Al Ministerio de Ciencia Tecnología e Innovación por la financiación de este trabajo de investigación a través del proyecto “Evaluación de la presencia de *Cryptosporidium spp.* y *Giardia spp.* en aguas crudas y tratadas en las zonas rurales del Área Metropolitana del Valle de Aburra” CTeI PROGRAMA NACIONAL DE CIENCIA, TECNOLOGÍA E INNOVACIÓN EN SALUD, contrato 590-2018



Centro de Documentación Ingeniería (CENDOI)

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Dedicatoria

A mis hijos, por entender que, durante el desarrollo de este trabajo, fue necesario sacrificar situaciones y momentos a su lado, para así poder completar exitosamente mi camino académico. A mi esposo, quien ha recorrido este camino conmigo, eres el mayor ejemplo de tenacidad, todos mis esfuerzos han sido recompensados a tu lado.

A mis padres, por formarme como una persona íntegra profesional y personalmente.
A Jhonnathan Guizao García por el apoyo laboral, académico, emocional y por el crecimiento personal.

Agradecimientos

Al Ministerio de Ciencia Tecnología e Innovación por la financiación de este trabajo de investigación a través del proyecto “Evaluación de la presencia de *Cryptosporidium spp.* y *Giardia spp.* en aguas crudas y tratadas en las zonas rurales del Área Metropolitana del Valle de Aburrá” CTeI PROGRAMA NACIONAL DE CIENCIA, TECNOLOGÍA E INNOVACIÓN EN SALUD, contrato 590-2018.

A las plantas de tratamiento de los acueductos veredales pertenecientes al Área Metropolitana del Valle de Aburrá, por su colaboración en la logística en la recolección de las muestras de agua, por el acompañamiento y disposición para recibirnos durante la vigencia del proyecto, y por la calidad humana que encontré en las personas que trabajaron hombro a hombro para la realización de esta investigación.

Al profesor Gustavo Peñuela y Gina Hincapié, quienes acompañaron este trabajo de tesis, por su asesoría, sus valiosos conocimientos, por el tiempo dedicado y paciencia que permitieron mi enriquecimiento personal, académico, profesional y por la confianza que siempre me brindaron.

A Maicol Torres, Evelyn Becerra y Gina Hincapié, por su asesoría técnica en temas ambientales, la consecución de los datos, las jornadas de recolección de las muestras, apoyo emocional, colaboración, amistad y valiosos aportes que hicieron a mi trabajo, por facilitarme las herramientas para llevar a cabo este proyecto, por su acompañamiento y por las experiencias compartidas

Al Grupo de Diagnóstico y Control de la contaminación – GDCON, por brindar los espacios logísticos y técnicos para el desarrollo de la experimentación, a los microbiólogos Diego Flórez y Maria José Arango , por el apoyo técnico, por su colaboración y por ser ejemplo de un buen equipo de trabajo con un gran compromiso por la ciencia.

A mi familia por ser mi motor, por su amor y por su confianza en mí.

A Juan Felipe Mejía, por ser el mejor compañero de viaje, por ser un maestro y guía, por compartir la realización de nuestras metas, por su apoyo y comprensión, pero sobre todo por el amor que me ha brindado.

A todos los que permitieron que este trabajo fuera posible.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	10
ABSTRACT	11
INTRODUCCIÓN	12
OBJETIVO.....	15
1.1 Objetivo general	15
1.2 Objetivos específicos.....	15
METODOLOGÍA	22
MATERIALES Y MÉTODOS	22
3.1 Área de estudio y muestreo.	22
3.2 Calendario de muestreo.	23
3.3 Métodos analíticos.....	24
3.4 Proceso de toma de muestras en campo	24
3.5 Aseguramiento de la calidad	25
3.6 Procesamiento de las muestras de <i>Giardia spp.</i> y <i>Cryptosporidium spp.</i>	25
3.7 Índice de riesgo de la calidad del agua para el consumo humano.....	28
3.8 Aplicación de tecnologías avanzadas de oxidación en la remoción de <i>Giardia lamblia</i> y <i>Cryptosporidium parvum</i>	28
3.9 Determinación de las condiciones sanitarias y ambientales que inciden sobre la presencia del <i>Cryptosporidium spp.</i> y <i>Giardia spp.</i> en las aguas crudas	29
3.9.1 Determinación de las condiciones sanitarias que inciden sobre la presencia del <i>Cryptosporidium spp.</i> y <i>Giardia spp.</i> en las aguas crudas	29
3.10 Uso de tecnologías basadas en radiación de luz solar en la remoción de <i>Giardia lamblia</i> y <i>Cryptosporidium parvum</i>	29
RESULTADOS.....	31
Análisis y discusión de resultados	31

4.2 Evaluación de la variación de la presencia de <i>Cryptosporidium spp.</i> y <i>Giardia spp.</i> durante 27 meses de monitoreos en aguas crudas y tratadas de las zonas rurales del Área Metropolitana del Valle de Aburrá	32
4.1.1 Análisis fisicoquímico y microbiológico de la calidad del agua potable paracada uno de los puntos de muestreo en la estación seca y húmeda	37
4.1.2 Presencia de <i>Cryptosporidium</i> y <i>Giardia</i> en el agua cruda y potable	40
4.1.3 Evaluación del riesgo para la salud humana	41
4.2 Determinación de las condiciones sanitarias y ambientales que inciden sobre la presencia del <i>Cryptosporidium spp.</i> y <i>Giardia spp.</i> en las aguas crudas	43
4.2.1 Determinación de las condiciones sanitarias que inciden sobre la presencia del <i>Cryptosporidium spp.</i> y <i>Giardia spp.</i> en las aguas crudas.....	43
4.2.2 Determinación de las condiciones ambientales que inciden sobre la presencia del <i>Cryptosporidium spp.</i> y <i>Giardia spp.</i> en las aguas crudas.....	45
4.3 Determinación del porqué los tratamientos de los acueductos veredales son ineficientes en la eliminación del <i>Cryptosporidium spp.</i> y <i>Giardia spp.</i> en agua.....	47
4.3.1 Procesos de tratamiento alternativos propuestos para implementación en las plantas de tratamiento de los acueductos veredales de los municipios del Área Metropolitana del Valle Aburrá	47
4.3.1.1 Eliminación de <i>Giardia lamblia</i> y <i>Cryptosporidium parvum</i> empleando procedimientos basados en ultrasonido y radiación de luz UV.....	47
4.3.1.2 Remoción de <i>Giardia lamblia</i> y <i>Cryptosporidium parvum</i> empleando tecnologías basadas en radiación de luz solar	49
CONCLUSIONES	51
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	53

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Descripción de los puntos de muestreo y su sistema de tratamiento de agua potable	23
Tabla 2. Variación de la presencia de Giardia y Cryptosporidium en aguas tratadas y crudas	32
Tabla 3. Variación de la presencia de Giardia y Cryptosporidium en aguas tratadas y crudas	33
Tabla 4. Variación de Giardia y Cryptosporidium en aguas crudas	34
Tabla 5. Variación de Giardia y Cryptosporidium en aguas tratadas	36
Tabla 6. Resumen de la evaluación de la calidad fisicoquímica y microbiológica del agua tratada para cada uno de los puntos de muestreo en la estación seca y húmeda	39
Tabla 7. Evaluación del índice de riesgo de la calidad del agua para consumo humano	42
Tabla 8. Condiciones sanitarias permanentes encontradas en el área de estudio asociadas a los puntos de muestreo	43
Tabla 9. Análisis de Varianza para la presencia de Giardia spp. con relación al uso de suelos	44
Tabla 10. Análisis de Varianza para la presencia de Cryptosporidium spp. con relación al uso de suelos	44
Tabla 11. Tratamientos evaluados en la eliminación de Giardia lamblia y Cryptosporidium parvum en agua superficial.	49
Tabla 12. Datos primarios ensayo SODIS_SUNTEST	50
Tabla 13. Promedio del porcentaje de remoción de los tratamientos de SODIS_SUNTEST	50

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de los puntos de muestreo.....	22
Figura 2. Pasos de procesamiento de Giardia y Cryptosporidium	27
Figura 3. Variación de la presencia de Giardia y Cryptosporidium en aguas tratadas y crudas del Valle de Aburrá.	33
Figura 4. Variación de la presencia de Giardia y Cryptosporidium en aguas crudas del Valle de Aburrá.....	35
Figura 5. Variación de la presencia de Giardia y Cryptosporidium en aguas tratadas del Valle de Aburrá.....	36
Figura 6. Consolidado % de muestras positivas de Giardia y Cryptosporidium en agua tratada y superficiales en el Área metropolitana del Valle de Aburrá	37
Figura 7. Presencia de <i>Cryptosporidium</i> y <i>Giardia</i> en la estación seca: a) agua cruda b) agua potable y c) Eficiencia de cada sistema de tratamiento de agua potable en la eliminación de <i>Cryptosporidium</i> y <i>Giardia</i>	40
Figura 8. Presencia de <i>Cryptosporidium</i> y <i>Giardia</i> en la estación húmeda: a) agua cruda b) agua potable y c) eficiencia de cada sistema de tratamiento de agua potable en la eliminación de <i>Cryptosporidium</i> y <i>Giardia</i>	41
Figura 9. Condiciones ambientales- temporada de lluvia relacionadas con la presencia de protozoos en el área de estudio asociadas a los puntos de muestreo.....	46
Figura 10. Condiciones ambientales- temporada seca relacionadas con la presencia de protozoos en el área de estudio asociadas a los puntos de muestreo	46
Figura 11. Test de jarras empleado en ensayos de coagulación.....	47
Figura 12. Equipo de ultrasonido empleado en la realización de los experimentos.	48

SIGLAS, ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS

DAPI	4',6-diamidino-2-phenylindole
DIC	Contraste Diferencial interferencial
EPA	Environmental Protection Agency
FITC	Fluorescein IsoTioCyanate
GDCON	Grupo de Diagnóstico y Control de la Contaminación
IDEAM	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales
IRCA	Índice de riesgo de la calidad del agua para consumo humano
ISO	International Organization for Standardization
MPC-S	Magnetic Particle Concentrator-Small
ONAC	Organismo Nacional de Acreditación de Colombia
PS	Puntos de muestreo
PTAP	Planta de tratamiento de agua potable
SODIS	Solar Water Disinfection
UV	Ultra Violeta
VIH	Virus de la inmunodeficiencia humana

RESUMEN

El objetivo de la investigación fue evaluar la presencia de *Cryptosporidium spp.* y *Giardia spp.* en aguas crudas y tratadas en las zonas rurales del Área Metropolitana del Valle de Aburrá. Para esto se tomaron 240 muestras de aguas tratadas y 120 de agua cruda en 20 acueductos rurales ubicados en los diez municipios del Área Metropolitana del Valle de Aburrá (dos acueductos por municipio), durante los meses de junio de 2019 y septiembre de 2021. Estas muestras fueron procesadas por medio de la técnica filtración-elusión-inmunoconcentración-tinción, de acuerdo con lo establecido en la EPA 1623.1.

En los acueductos seleccionados en las zonas rurales de los 10 municipios del Área Metropolitana del Valle de Aburrá se encontró que se tienen implementados solo algunos procesos de tratamiento de aguas. Se comprobó que, en el agua tratada, nueve de los 20 acueductos muestreados tenían presencia de *Cryptosporidium spp.* y en las bocatomas se encontró que 12 de los 20 puntos analizados tenían presencia de *Cryptosporidium spp.*

También se encontró que en nueve de los 20 acueductos muestreados había presencia de *Giardia spp.*, y en las bocatomas se encontró que 15 de los 20 puntos analizados tenían presencia de *Giardia spp.*

Palabras clave: Acueducto veredal, Aguas tratadas, Aguas crudas, *Giardia*, *Cryptosporidium*.

ABSTRACT

The aim of the investigation was to evaluate the presence of *Cryptosporidium spp.* and *Giardia spp.* in raw and treated water in rural areas of the Valle de Aburrá Metropolitan Area. 240 samples of treated water and 120 of raw water were taken in 20 rural aqueducts located in the ten municipalities of the Metropolitan Area of the Valle de Aburrá (two aqueducts per municipality), during the months of June 2019 and September 2021. These Samples were processed using the filtration-elution-immunoconcentration-staining technique, in accordance with the provisions of EPA 1623.1.

In the selected aqueducts in the rural areas of the 10 municipalities of the Valle de Aburrá Metropolitan Area, it was found that only a few water treatment processes have been implemented. It was verified that, in the treated water, nine of the 20 aqueducts sampled had the presence of *Cryptosporidium spp.* and in the intakes it was found that 12 of the 20 points analyzed had the presence of *Cryptosporidium spp.*

It was also found that in nine of the 20 aqueducts sampled there was the presence of *Giardia spp.*, and in the intakes it was found that 15 of the 20 points analyzed had the presence of *Giardia spp.*

Keywords: Village aqueduct, Treated water, Raw water, Giardia, Cryptosporidium.

INTRODUCCIÓN

A pesar de los esfuerzos de los organismos gubernamentales por aumentar la cobertura del saneamiento básico y el acceso al agua potable, en Colombia aún existen grandes brechas en estos dos aspectos entre las comunidades urbanas y rurales. Ya que, si bien en las zonas urbanas es posible encontrar un suministro adecuado de agua para consumo humano, en las zonas rurales la tarea aún está por hacer. Muchas comunidades rurales no cuentan con sistemas de tratamiento de agua potable adecuados y muchas otras no los tienen en absoluto.

Las fallas de estos sistemas de tratamiento de agua potable conllevan una gran problemática que pone en riesgo la salud y el bienestar de la población, más aún en el contexto de un alto deterioro de la calidad en las aguas superficiales. Por lo tanto, hay una necesidad imperiosa de mejorar la calidad del agua, para ello es importante identificar, evaluar y gestionar el riesgo del agua para el consumo humano, a través de acciones intersectoriales y el seguimiento continuo de las características microbiológicas y fisicoquímicas, para asegurar de esta manera que la calidad del agua es conforme con los límites máximos permitidos para las características microbiológicas establecidos en la normativa para la calidad del agua para consumo humano.

Debido a la susceptibilidad de las fuentes de agua a la contaminación con *Giardia spp.* y *Cryptosporidium spp.* como consecuencia del uso de suelo en actividades agropecuarias y al paso por zonas con ganado vacuno, porcino, equino, la avicultura y a la falta de eficiencia de las plantas de tratamiento de agua potable en la remoción de patógenos de origen animal o humano, los cuales son transportados por el agua, podría ser posible encontrar *Giardia spp.* y *Cryptosporidium spp.* en los sistemas de abastecimiento de agua potable de los municipios del área metropolitana del Valle de Aburrá, en algunos períodos del año. Sin embargo, no se han realizado estudios que determinen el nivel de contaminación del agua por estos dos protozoos en las zonas rurales del área metropolitana del Valle de Aburrá. Por lo tanto, el objetivo de este estudio fue evaluar la ocurrencia de *Giardia spp.* y *Cryptosporidium spp.* en las aguas provenientes de los principales sistemas de abastecimiento de agua potable rural del área metropolitana del Valle de Aburrá y su relación con los usos del suelo y el deterioro de la calidad del agua.

La contaminación de las aguas de consumo humano con microorganismos patógenos sigue siendo un tema vigente en la agenda pública internacional. Debido a esto, las autoridades sanitarias colombianas están siendo más rigurosas en el monitoreo de parámetros microbiológicos que se ajusten a las necesidades vigentes y que sean congruentes con las guías internacionales para el monitoreo del recurso hídrico. Uno de los cambios significativos que se ha tenido es la inclusión del monitoreo de protozoos como *Giardia spp.* y *Cryptosporidium spp.* en los análisis para determinar la calidad microbiológica del agua para consumo humano.

En la zona urbana del Valle de Aburrá se tiene establecido realizar inspección y vigilancia de calidad en las aguas de consumo humano, incluido los análisis de *Cryptosporidium spp.* y *Giardia spp.*, encontrando que hasta la fecha de realizado el presente estudio no se han reportado hallazgos positivos para estos protozoos, la razón de ello se puede justificar debido a que las plantas de potabilización de Empresas Públicas de Medellín cuentan con tecnologías adecuadas para la remoción de quistes y ooquistes, por lo cual han demostrado ser efectivas a la hora de realizar el tratamiento de las aguas crudas.

Estas mismas plantas de potabilización abastecen de aguas a la zona urbana de los municipios del Área Metropolitana del Valle de Aburrá (Bello, Barbosa, Caldas, Copacabana, Envigado, Girardota, Itagüí, La Estrella, Medellín, Sabaneta), pero no lo hacen en la mayoría de zonas rurales. En este sentido, se planteó realizar muestreos de agua crudas (que pueden estar siendo usadas para consumo humano) y tratadas (Acueductos veredales) en dos plantas de tratamiento de las zonas rurales de los 10 municipios.

Con base en lo anteriormente descrito, se estableció realizar toma de muestras en los 10 municipios del Área Metropolitana del Valle de Aburrá durante 27 meses, ajustando estas campañas en aproximadamente seis tomas anuales, en un periodo comprendido entre junio del 2019 a septiembre del 2021. Estos muestreos incluían la toma de muestras de aguas en la entrada y salida de la planta, se planteó evaluar tres sistemas de tratamiento (Coagulación-filtración, radiación solar y ultrasonido), para, de esta manera, valorar la viabilidad de implementar estos tratamientos en las zonas rurales para la eliminación de ooquistes de *Cryptosporidium spp.* y

quistes de *Giardia spp.* de las aguas crudas que serán tratadas para suministrar a los usuarios de las plantas de tratamiento de los acueductos veredales de manera efectiva y en lapso de tiempo corto.

El sistema ultrasonido es el tratamiento más recomendado para la desinfección ya que cuenta con tecnología de punta en la potabilización de aguas, pero este aún no ha sido implementado en la potabilización de aguas para remover patógenos.

OBJETIVO

1.1 Objetivo general

Evaluar la presencia de *Cryptosporidium spp.* y *Giardia spp.* en aguas crudas y tratadas en las zonas rurales del Área Metropolitana del Valle de Aburrá.

1.2 Objetivos específicos

- Evaluar la variación de la presencia de *Cryptosporidium spp.* y *Giardia spp.* durante 2 años de monitoreos en aguas crudas y tratadas de las zonas rurales del Área Metropolitana del Valle de Aburrá.

- Determinar las condiciones sanitarias y ambientales que inciden sobre la presencia del *Cryptosporidium spp.* y *Giardia spp.* en las aguas crudas.

- Determinar por qué los tratamientos de los acueductos veredales son ineficientes en la eliminación del *Cryptosporidium spp.* y *Giardia spp.* en agua.

MARCO TEÓRICO

El acceso al agua apta para consumo es un factor determinante en la salud pública, ya que esta contribuye directamente en la salud de la comunidad. Características como el deterioro de la calidad del agua y la falta de acceso para consumo humano se han asociado con enfermedades de origen infeccioso (Castillo y Rovira, 2020).

Los niños menores de cinco años son el grupo de edad más afectado por las enfermedades diarreicas en el mundo (Salamandane et al., 2021), y en Colombia se ha encontrado una mayor correlación entre la mortalidad infantil y la calidad del agua (Manrique-Abril et al., 2006). Por lo tanto, la disponibilidad de agua potable es esencial para la salud pública, debido a que este factor reduciría ostensiblemente los casos de diarrea por presencia de microorganismos patógenos como *Escherichia coli*, *Salmonella spp.*, *Shigella spp.*, *Vibrio cholerae*, *Yersinia enterocolitica*, *Campylobacter jejuni*, Enterovirus, rotavirus, adenovirus, *Ascaris lumbricoides*, *Entamoeba histolytica*, *Giardia lamblia* y *Cryptosporidium parvum* hasta en un 45%, así como la mortalidad infantil.

Las parasitosis causadas por *Giardia spp.* responsable de la *Giardiasis* y *Cryptosporidium spp.* de la criptosporidiosis son patógenos reconocidos que ocasionan enfermedades gastrointestinales, los cuales comparten algunas características, como es la de causar dolor abdominal, náuseas y diarrea (LeChevallier y Norton, 1995), ser transmitidos vía orofecal o por consumo de aguas contaminadas, por tener como reservorios algunos animales, además del hombre (Shepherd y Wyn-Jones, 1996) y el desarrollo de formas quísticas fuera de los hospederos, como mecanismos de resistencia a las condiciones agrestes del medio ambiente (Gajadhar y Allen, 2004), además de presentar mayor resistencia a los procesos de tratamiento y desinfección del agua para consumo humano.

Investigadores han documentado que las principales formas de transmisión directa de quistes u ooquistes son la vía fecal-oral y el consumo de agua no tratada, e, indirectamente, el consumo de alimentos lavados con agua contaminada (Alarcón et al., 2005). La fuente de

contaminación por ooquistes y quistes incluye las aguas residuales domésticas y las heces de muchas especies de mamíferos y reptiles (Cermeño et al., 2008).

A su vez, la presencia de ooquistes y quistes en el agua potable es un problema crítico que pone en riesgo la consecución del objetivo 6 de la agenda global de los objetivos de desarrollo sostenible a través de "Garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible y el saneamiento para todos". La principal preocupación está relacionada con que los quistes de *Giardia spp.* pueden sobrevivir hasta 24 días en el medio ambiente y los ooquistes de *Cryptosporidium spp.* permanecen viables hasta seis meses (Alum et al., 2014). Esto significa que ambas formas quísticas pueden sobrevivir en el medio ambiente en condiciones adversas. Otro punto importante es que estos son resistentes a la desinfección convencional con cloro (Omarova et al., 2018). Los estudios mostraron que el tiempo requerido para la inactivación del 90 % de los quistes de *Giardia spp.* en el agua es de 25 a 30 minutos con una concentración de cloro residual libre de 1 mg/L, mientras que, para los ooquistes de *Cryptosporidium spp.*, se han documentado efectos muy bajos o nulos de la cloración por lo que es necesario el uso de luz U.V, ozono, dióxido de cloro o procesos de filtración avanzados para poder combatirlo (World Health Organization, 2017).

Cryptosporidium parvum es un protista parasito, causante de la criptosporidiosis, esta infección produce un cuadro de enteritis con diarrea de tipo agudo o crónico, la diarrea generalmente es acuosa, sin moco ni sangre, la mayoría de las veces sin leucocitos, en niños se presenta un cuadro clínico con diarrea intensa o crónica que puede llevar a la deshidratación. En infecciones VIH positivas, los síntomas se presentan de manera más intensa, la diarrea es crónica y se da con malestar general, anorexia y fiebre. En los pacientes con SIDA, adicional a la localización intestinal, se presenta diseminación con complicación pulmonar. (Zhanay Medina, 2014). El parásito se contrae por la ruta ano-boca-ano, denominada como vía fecal oral, el oocito (que es la forma infectante del organismo) entra al tracto gastrointestinal y se transforma a esporozoito (una forma tardía de *C. Parvum*). Más adelante, estos esporozoitos se diferencian en trofozoítos y atacan el epitelio intestinal, esto conduce a malabsorción de los alimentos y a diarrea acuosa, no sanguinolenta que se limita a pacientes inmunocompetentes. Luego el organismo agrega fases adicionales de transformación: trofozoíto (meronte tipo I), merozoito (meronte tipo II) merozoito (gamonte indiferenciado) micro/ macrogamonte (zigoto) oocito.

El ciclo se completa cuando los oocitos son excretados en aguas contaminadas, alimentos regados con aguas residuales, inadecuado o nulo lavado de manos e ingeridos tanto por humanos como otros animales. El periodo de incubación se comprende en un lapso de cinco a 28 días (Zhanay, 2014). La prevalencia del *Cryptosporidium parvum* en los países industrializados varía de <1% al 4,5% y en los que están en vías de desarrollo varía entre el 3% y el 20%, por otra parte reportes de prevalencia para la presencia de este protozoo arrojan cifras de entre el 1,8 % y el 49 % en varios países como Japón, China, Arabia Saudita, Líbano y Turquía (Nakashima, 2021), y su presencia se ha reportado en áreas rurales, campo y áreas con sanidad deficiente (Tzipori y Griffiths, 1998). El reservorio son los mamíferos y el vehículo de transmisión son las aguas, heces, ostras y moscas. Se transmite con la ingestión de cualquier cosa en contacto con heces de persona o animal infectado. La fase infecciosa del parásito, llamado criptoocisto, puede transmitirse al consumir agua procedente de las piscinas, baños calientes, jacuzzis, lagos, ríos, manantiales, estanques o arroyos contaminados con aguas residuales o heces (de humanos o animales). También al comer alimentos no cocinados contaminados (que fueron lavados con aguas contaminadas) y al ingerir el parásito adquirido de superficies contaminadas con la deposición de una persona infectada, como las instalaciones del baño, las mesas para cambiar a los bebés y los cubos para los pañales.

Giardia lamblia, *intestinalis* o *duodenalis* es un protozoo flagelado patógeno perteneciente al orden Diplomonadida que parasita el tracto digestivo de humanos y mamíferos, produciendo una patología denominada *Giardiasis* o lambliasis (Adam, 2001). Únicamente tiene un hospedador (monoxeno), es cosmopolita y tiene dos formas de vida en su ciclo vital, el trofozoíto, que es la forma vegetativa que se alimenta y se reproduce, y el quiste, que es la forma vegetativa infectante y de resistencia. La principal medida de profilaxis es hervir o filtrar el agua cuando no se esté seguro de su procedencia. El tratamiento de agua para impedir infecciones por *Giardia lamblia* suele implicar procesos de filtración de alta eficiencia; los quistes de *Giardia lamblia* son resistentes a la desinfección química por cloración, por lo cual debe prestarse especial cuidado a los procesos de floculación y filtración de tratamiento de aguas, los cuales se deshacen efectivamente de muchos parásitos y quistes, así como la desinfección por radiación ultravioleta, la cual es muy efectiva en la inactivación de este parásito (Adam, 2001).

La prevalencia de la *Giardiasis* varía entre el 1% y el 60% según la región y está directamente relacionada con las condiciones sanitarias y socioeconómicas de los territorios. Por esto, su distribución a nivel mundial solo es endémica de los países en vías de desarrollo, su incidencia es mayor en niños debido a su predisposición a ingerir alimentos o líquidos infectados y se estima que unos 200 millones de seres humanos son infectados anualmente por este parásito.

De esta forma, la alta prevalencia de parasitosis en la población hace que las fuentes hídricas sean más susceptibles a la contaminación, lo que, sumado a la falta de una infraestructura adecuada en las plantas potabilizadoras, la renovación tecnológica y la ausencia de personal cualificado, acarrea que las medidas para combatir los microorganismos productores de enfermedades “emergentes” y reemergentes (Barriga y Hernandez, 2015), como *Giardia spp.* y *Cryptosporidium spp.*, sean en muchos casos insuficientes.

En Latinoamérica se han adelantado estudios en los que se reportan las concentraciones de estos protozoos en aguas superficiales. Es el caso de Argentina con promedios entre 1 y 16 quistes de *Giardia lamblia* por litro y de 1 a 24 ooquistes de *Cryptosporidium parvum* por litro (Abramovich et al., 2001) y de Brasil con 33 a 95 quistes de *Giardia spp.* por litro y 44 a 100 ooquistes de *Cryptosporidium parvum* por litro (Franco et al., 2001). En el caso de aguas residuales, se han encontrado cerca de 2.200 quistes de *Giardia lamblia* por litro y 62 ooquistes de *Cryptosporidium parvum* por litro en Argentina (Calderón, 2002), y de 0 a 680 ooquistes de *Cryptosporidium parvum* por litro en Brasil (Farias et al., 2002). En un estudio realizado en 2005 por Venegas, Mercado y Campos los autores encontraron la presencia de 266 ooquistes/L de *Cryptosporidium* viables en el agua residual proveniente de la cuenca alta del río Bogotá; la cual era empleada para el riego y abastecimiento de animales de producción. Por otro lado, en otro estudio realizado en el 2014 en las aguas residuales del barrio Los Robles del municipio de Soacha, se reportó la presencia de 125 ooquistes/L viables (Guzman & Nava, 2015).

En Colombia, la *Giardiasis* junto con la amibiasis constituye las dos protozoosis patógenas con más relevancia en salud pública (MINSALUD, 2015). En un estudio de parasitismo intestinal y situación nutricional en escolares y adolescentes de Tunja, la prevalencia de parásitos intestinales fue 89,7%, donde *Giardia intestinalis* representaba el 7,82% (Manrique-Abril et al., 2006). En un

estudio realizado en Colombia, la prevalencia global de infección por *G. intestinalis* fue del 11% en comunidades indígenas y del 9% en comunidades negras, y el 100% de los individuos evaluados presentó algún tipo de parasitismo intestinal (Merchán et al., 2016).

De igual forma, un estudio epidemiológico llevado a cabo en el departamento del Quindío después del terremoto, mostró altos porcentajes de morbilidad a causa de las malas condiciones de higiene y el consumo de agua de suministro del acueducto (Lora-Suarez et al., 2002). El estudio se llevó a cabo en una muestra de 217 niños entre 3 y 13 años de 18 asentamientos temporales, en donde se encontró presencia de quistes de *Giardia lamblia* en el 60,4% de la población. La principal causa de la enfermedad fue el agua de suministro del acueducto que abastecía 15 asentamientos (65% de casos) debido a los daños ocasionados por el terremoto al sistema, y, en menor proporción (46% de casos), el agua de suministro de tanques que abastecía solamente tres asentamientos. Una explicación de la menor prevalencia de *Giardia* en niños que consumían agua de tanques individuales es que hubo una sedimentación adicional que pudo haber reducido la contaminación del agua con *Giardia* (Lora-Suarez et al., 2002).

A su vez, un estudio llevado a cabo en un comedor infantil de las zonas marginadas de Medellín reveló que, de los 58 niños evaluados, el 93% tenía parasitosis, y que de estos el 25.9% de los casos se encontraron muestras de materia fecal positivas para *Giardia intestinalis* (Lozano et al., 2009). Por su parte, en un estudio más reciente (Arias y Urrego, 2013), también en comunidades de bajos recursos de Medellín, se encontró que el nivel de parasitismo global es del 74.4%.

Con respecto a la Criptosporidiosis, los estudios han sido aún más escasos, al tratarse de una enfermedad emergente, sin embargo, se reportó una prevalencia en la ciudad de Cali del 29% de infección en niños con VIH con una edad promedio de 52 meses, mientras que en el departamento del Caquetá se hallaron prevalencias de infección por *Cryptosporidium spp.* en un 7% y de *Giardia duodenalis* en un 36% de las 192 muestras de materia fecal analizadas de niños entre los 0-5 años (Velasco et al., 2011).

En Colombia es común que los ríos sean los receptores de aguas residuales sin tratar, las cuales se utilizan posteriormente para diferentes actividades de tipo doméstico o agrícola. Tal es el

caso del río Bogotá, el cual atraviesa algunas de las zonas más densamente pobladas del país, por lo que el uso de sus aguas es de gran importancia para actividades ganaderas y agrícolas, y como fuente de agua para potabilizar. Buena parte de los municipios localizados en la cuenca del río vierten sus aguas domésticas e industriales sin tratamiento previo, por lo que se pueden considerar como una importante fuente de aguas contaminadas (Alarcón et al., 2005; Ospina Zúñiga et al., 2018). Esta situación es común en la mayoría de los ríos del país, sin que se conozca la concentración de microorganismos patógenos presentes, ni el efecto que sobre ellos pueden causar las barreras naturales y artificiales. De aquí la importancia de poseer herramientas de análisis que permitan evaluar la calidad del agua, la eficiencia de los sistemas de tratamiento y el posible riesgo sanitario para la población.

METODOLOGÍA

Para realizar el análisis de los resultados se construyó una base de datos en el programa Microsoft Excel®, en este se registraron los resultados obtenidos a lo largo de los 12 muestreos, para los 20 acueductos veredales y sus respectivas bocatomas en los 10 municipios del Área Metropolitana del Valle de Aburrá. De esta manera, se evaluó si había una correlación estadísticamente significativa entre los resultados de la detección de los parásitos en estudio y las variables como: punto de muestreo, tipo de matriz, época de muestreo, parámetros microbiológicos de calidad hídrica tales como: Coliformes totales, *Escherichia coli* y *Enterococcus spp.* y algunas características fisicoquímicas como: pH, temperatura, cloro residual, turbiedad y conductividad, Las diferencias fueron consideradas como significativas cuando el p-valor estuvo por debajo de 0,05.

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Área de estudio y muestreo.

El estudio fue realizado en acueductos de las zonas rurales de los 10 municipios del área metropolitana del Valle de Aburrá: Medellín, Envigado, Caldas, Sabaneta, La Estrella, Itagüí, Bello, Barbosa, Copacabana y Girardota; ubicados en el departamento de Antioquia, Colombia. Se seleccionaron 20 puntos de muestreo (PS) en plantas de tratamiento de agua potable rural (PTAP) (Figura 1).

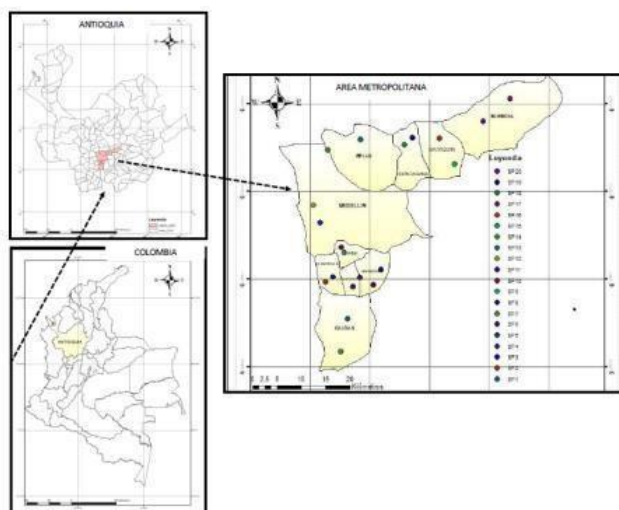


Figura 1. Mapa de los puntos de muestreo

Fuente: Elaboración propia

Para la selección de estos puntos de muestreo se consideró que el agua fuera utilizada para consumo humano y que tuviera algún tipo de tratamiento. La tabla 1 presenta el resumen de cada punto de muestreo y la descripción del sistema de tratamiento de agua potable correspondiente.

Tabla 1. Descripción de los puntos de muestreo y su sistema de tratamiento de agua potable

Puntos de muestreo y plantas de tratamiento de agua potable veredales	Descripción del sistema de tratamiento
SP 1: Acueducto veredal (Caldas)	Desarenador - Filtración rápida - Cloración
SP 2: Acueducto veredal (La Estrella)	Desarenador - Filtración rápida - Cloración
SP 3: Acueducto veredal (La Estrella)	Desarenador - Filtración rápida - Cloración
SP 4: Acueducto veredal (Sabaneta)	Desarenador - Filtración rápida - Cloración
SP 5: Acueducto veredal (Medellín)	Desarenador - Coagulación y floculación - Sedimentación - Filtración rápida - Cloración
SP 6: Acueducto veredal (Sabaneta)	Desarenador - Filtración - Cloración
SP 7: Acueducto veredal (Caldas)	Filtración - Cloración
SP 8: Acueducto veredal (Envigado)	Desarenador- Coagulación y floculación- Cloración
SP 9: Acueducto veredal (Itagüí)	Desarenador - Filtración - Cloración
SP 10: Acueducto veredal (Itagüí)	Desarenador - Filtración - Cloración
SP 11: Acueducto veredal (Envigado)	Desarenador - Coagulación y floculación - Sedimentación - Filtración rápida - Cloración
SP 12: Acueducto veredal (Medellín)	Desarenador - Coagulación y floculación - Cloración
SP 13: Acueducto veredal (Bello)	Desarenador - Filtración - Cloración
SP 14: Acueducto veredal (Bello)	Desarenador - Filtración - Cloración
SP 15: Acueducto veredal (Girardota)	Desarenador - Filtración - Cloración
SP 16: Acueducto veredal (Girardota)	Desarenador - Filtración - Cloración
SP 17: Acueducto veredal (Barbosa)	Desarenador- Coagulación y floculación-Sedimentación-filtración- Cloración
SP 18: Acueducto veredal (Copacabana)	Desarenador - Filtración - Cloración
SP 19: Acueducto veredal (Copacabana)	Filtración - Cloración
SP 20: Acueducto veredal (Barbosa)	Cloración

Fuente: elaboración propia

3.2 Calendario de muestreo.

Se realizaron muestreos de aguas crudas (que puedan estar siendo usadas para consumo humano) y aguas tratadas, la toma de muestra dependió de un cronograma concertado con los administradores de los acueductos y fontaneros, y que coincidía con las dos estaciones que se pueden definir claramente en el año, ellas son el invierno (estación húmeda) y el verano (estación seca), con base en los informes de las estaciones meteorológicas del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales-IDEAM establecidas en la zona de estudio. Se recogieron muestras en dos fuentes de aguas tratadas (acueductos veredales) y en una fuente de aguas crudas (bocatomas) en zonas rurales de los municipios del Área Metropolitana del Valle de Aburrá (Bello, Barbosa, Caldas, Copacabana, Envigado, Girardota, Itagüí, La Estrella, Medellín, Sabaneta), esto dio como resultado 20 zonas de muestreo en áreas rurales de los 10 municipios del Área Metropolitana del Valle de Aburrá. De esta manera, la evaluación de la variación de la presencia de *Giardia spp.* y *Cryptosporidium spp.* en los sistemas de abastecimiento de agua potable rural se

realizó a través de 12 campañas de muestreo en los 20 acueductos, en un periodo comprendido entre julio de 2019 y septiembre del 2021.

Durante los muestreos se observaron las condiciones sanitarias, ambientales, usos del suelo y se recopiló información acerca de los tratamientos que se están usando para la potabilización de las aguas en las zonas de estudio.

3.3 Métodos analíticos.

Los análisis de pH, Temperatura, Cloro libre, Turbiedad, Conductividad y *Enterococos* se realizaron en el laboratorio del Grupo de Diagnóstico y Control de la Contaminación (GDCON), de la Universidad de Antioquia, siguiendo los protocolos establecidos en los Métodos Estándar (APHA, 2017). Los análisis para la detección de Coliformes totales y *Escherichia coli* se hicieron con la metodología establecida en la ISO 9308-1 (ISO, 2016). *Cryptosporidium* y *Giardia* se hicieron con el método EPA 1623.1 (USEPA, 2012).

El laboratorio GDCON está acreditado por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) para realizar análisis fisicoquímicos y microbiológicos en aguas superficiales y por el Organismo Nacional de Acreditación de Colombia (ONAC) para el análisis fisicoquímicos y microbiológicos en aguas tratadas y análisis de *Giardia* y *Cryptosporidium* en aguas tratadas y crudas.

3.4 Proceso de toma de muestras en campo

El muestreo del agua potable se llevó a cabo basándose en las directrices de la norma ISO 5667-5 Calidad del agua. Muestreo. Parte 5: directrices para el muestreo de agua potable de instalaciones de tratamiento y sistemas de distribución por tubería (ISO, 2008), la norma ISO 19458 Calidad del agua: muestreo para el análisis microbiológico (The British Standards Institution, 2006). El muestreo del agua cruda se llevó a siguiendo las directrices ISO 5667-6 Calidad del agua. Muestreo. Parte 6: guía para el muestreo de ríos y cursos de agua (ISO, 2014) y la ISO 19458, Calidad del agua: muestreo para el análisis microbiológico (The British Standards Institution, 2006).

3.5 Aseguramiento de la calidad

Para la toma de muestras en campo se siguieron los métodos estándar y protocolos internos, se procedió a realizar la desinfección del grifo donde se toma la muestra, se dejó correr el agua por aproximadamente dos minutos para eliminar contaminantes interferentes, se procedió a realizar la purga de los recipientes tres veces con la muestra y se tomaron muestras para el análisis de los parámetros fisicoquímicos. De igual forma, todos aquellos parámetros que son procesados en campo fueron consignados en la captura de datos de medidas de campo tales como: pH, Temperatura, Cloro libre, Turbiedad; las muestras para Conductividad fueron llevadas al laboratorio para su posterior procesamiento.

Luego de recolectar las muestras para los ensayos fisicoquímicos, se procedió a tomar las muestras para los análisis microbiológicos. Estos recipientes no se purgan, ellas son tomadas según la normativa mencionada anteriormente para la matriz correspondiente y siguiendo el procedimiento interno para la toma de muestras de agua, son llenados con el volumen requerido (para el análisis de Coliformes totales, *Escherichia coli* y *Enterococcus* se requiere una muestra de mínimo 250 ml, para el análisis de *Giardia spp.* y *Cryptosporidium spp.* se requiere mínimo una muestra de 10 L). Estas muestras fueron transportadas bajo refrigeración hasta el laboratorio para ser posteriormente procesadas.

En este sentido, se aseguró que el personal encargado mantuviera las precauciones necesarias para las tomas de muestras microbiológicas, con el fin de minimizar el riesgo de contaminación cruzada, ya que un resultado encontrado por un error humano podría generar alarma y pánico en los acueductos. A su vez, en la toma de muestras como medida de mitigación para la contaminación EPP, se utilizaron tapabocas, guantes, batas, recipientes estériles; posteriormente en condiciones de refrigeración se transportaron las muestras al laboratorio del grupo GDCON.

3.6 Procesamiento de las muestras de *Giardia spp.* y *Cryptosporidium spp.*

Para el procesamiento de las muestras para la detección de *Giardia* y *Cryptosporidium* se trabajó bajo la metodología del método EPA 1623.1 versión 2012. Los análisis de las muestras se llevaron a cabo en el área de análisis microbiológico para *Giardia* y *Cryptosporidium* en las

instalaciones del laboratorio GDCON. De esta manera, el procesamiento fue realizado de la siguiente forma (Figura 2):

1. Se tomó la muestra en un recipiente de polietileno de baja densidad (LDPE).
2. Cada muestra fue filtrada por medio de la estación de captura de parásitos (PCS) en condiciones de agitación constante, con un caudal de 2 L/min, los parásitos son retenidos a través de un módulo de filtración para el equipo Filta-Max de la marca IDEXX.
3. Para realizar la elución de los quistes y ooquistes que están contenidos en la membrana del módulo de filtración, este fue llevado al equipo Filtamax y por medio de una solución de buffer PBS los quistes y ooquistes son desprendidos del módulo de filtración por medio de un ciclo de ocho lavados.
4. El eluido final llega a un tubo cónico que luego es centrifugado por 15 minutos a 1800 g.
5. Luego de la centrifugación, se descarta el sobrenadante generado, dejando solo 5 ml de sobrenadante por cada 0.5 mL de pellet.
6. El concentrado de la muestra es transferido a un tubo leighton, para proceder con la inmunocentración utilizando el kit Dynabeads GC combo (Life technologies, USA), la concentración de la muestra se realiza con anticuerpos *Anti-Giardia* y *Anti-Cryptosporidium* contenidos en el kit comercial, los cuales vienen acomplejados con perlas magnéticas que ayudan a su posterior recuperación. Se adiciona 1 mL de buffer A y buffer B y luego 100 µL de cada solución de perlas con anticuerpos.
7. La incubación de la reacción Antígeno-Anticuerpo se realiza a temperatura ambiente por una hora en condiciones de agitación a 18 rpm utilizando el Dynabeads Sample Mixer (Invitrogen, USA).
8. Seguida de la incubación, se realiza la captura del complejo Antígeno-Anticuerpo con la ayuda del magneto MPC-6, y se realizan los procedimientos de lavado del concentrado descritos en la EPA 1623.1, con la ayuda del magneto MPC-S.
9. Para disociar la unión Antígeno-Anticuerpo-Perla se adicionan 50 µl de HCl 0.1N (Merck, USA) a la muestra, dicho ácido es posteriormente neutralizado con la adición de 10 µl de NaOH 1N (Merck, USA) a la placa que contenía la muestra, para la tinción de la muestra contenida en el portaobjetos, se utiliza el kit comercial A100FLK Aqua-Glo™ G/C Direct Comprehensive Kit (Waterborne, INC), el cual contiene los fluorocromos DAPI (4'6-diamidino-2-phenylindole) y FITC (Isotiocianato de fluoresceína). Se realiza el

procedimiento de tinción descrito por el fabricante, teniendo como tiempo de incubación 30 minutos a temperatura ambiente.

10. La lectura de las muestras se realizó en un microscopio Carl Zeiss Axio Imager A2 equipado con un sistema de epifluorescencia con filtros específicos para los fluorocromos DAPI y FITC, y con la técnica de contraste diferencial de interferencia DIC para visualizar las estructuras internas de los quistes y ooquistes. La lectura de las muestras está acompañada de controles positivos y negativos de tinción para garantizar la marcación de las estructuras, todas las muestras son leídas el mismo día que se lleva a cabo la tinción, y son mantenidas en cámara húmeda y condiciones de oscuridad.
11. Todos los hallazgos que presentan fluorescencia verde manzana con borde definido y con características de tamaño similar a *Giardia* (8-18 μm longitud y 5-15 μm de ancho) y *Cryptosporidium* (4-6 μm) son observados a través del filtro FITC utilizando una magnificación de 400X. Una vez ubicados se debe cambiar a la posición del filtro DAPI, para observar los núcleos y posteriormente observar las estructuras internas con la técnica DIC utilizando una magnificación de 1000X, con la ayuda del objetivo de 100X y el aceite de inmersión Immersol 518F (Carl Zeiss, Alemania). Para caracterizar los resultados positivos y negativos para *Giardia* y *Cryptosporidium* se utilizaron los criterios descritos por la EPA 1623.1 versión 2012.

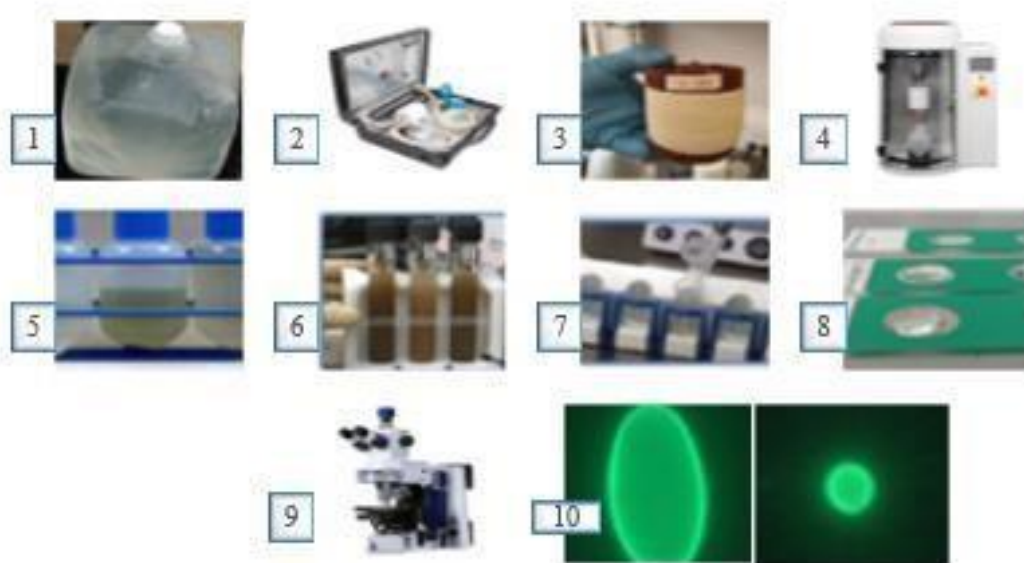


Figura 2. Pasos de procesamiento de *Giardia* y *Cryptosporidium*

Fuente: Elaboración propia

3.7 Índice de riesgo de la calidad del agua para el consumo humano

El índice de riesgo de la calidad del agua para consumo humano (IRCA) es un instrumento básico para asegurar la calidad del agua para consumo humano establecido por la normatividad sanitaria colombiana (Ministerio de la Protección Social, 2007). A través de este instrumento básico es posible evaluar las principales características físico-químicas y microbiológicas del agua potable. Cada una de estas características pondera el cálculo del valor del índice de acuerdo al riesgo que tienen para la salud humana. En este estudio se evaluaron cinco parámetros, que son con sus respectivos pesos en el valor del índice: pH (1,5), Cloro libre (15), Turbidez (15), Coliformes totales (15) y *Escherichia coli* (25).

El índice IRCA, para cada muestra, puede calcularse mediante la siguiente expresión:

$$(\%)IRCA = \frac{\Sigma \text{ puntuación de riesgo asignada a las características inaceptables}}{\Sigma \text{ puntuación de riesgo a todas las características analizadas}} \times 100 \quad \text{Ecuación 1}$$

La clasificación del nivel de riesgo del agua suministrada para consumo humano a través del índice IRCA se define como:

- 80,1-100% (Riesgo: Inviabile sanitariamente- agua no apta para el consumo humano)
- 35,1-80% (Riesgo: alto- agua no apta para el consumo humano)
- 14,1-35% (Riesgo: medio- agua no apta para el consumo humano)
- 5,1-14 (Riesgo: bajo- agua no apta para el consumo humano)
- 0-5 (Sin riesgo- agua apta para el consumo humano).

3.8 Aplicación de tecnologías avanzadas de oxidación en la remoción de *Giardia lamblia* y *Cryptosporidium parvum*

La metodología desarrollada buscó evaluar el potencial empleo de ultrasonido, luz ultravioleta y coagulación (tratamiento primario) en la eliminación de *Giardia lamblia* y *Cryptosporidium parvum*. En la ejecución de la investigación se realizó un muestreo de agua superficial no tratada, a la cual se le determinó el contenido de *Giardia spp.* y *Cryptosporidium spp.* Posteriormente, se llevaron a cabo los experimentos contemplados para la remoción de los

microorganismos, incluyendo dos controles, uno correspondiente al agua sin tratar, y el otro luego de ser sometida a tratamiento primario con agente coagulante.

Las muestras evaluadas fueron obtenidas de una fuente de agua superficial no tratada localizada en la zona rural del municipio de Barbosa (Antioquia). Se optó por este tipo de matriz puesto que ha sido reportado que la presencia de *Giardia lamblia* y *Cryptosporidium parvum* es más frecuente en esa clase de cuerpos de agua (Betancourt y Rose, 2004). Además, al no tener ningún tipo de tratamiento, se podría establecer el efecto de factores como la presencia de sólidos, turbiedad y contenido de materia orgánica. En cada muestreo se obtuvieron aproximadamente 20.0 L de agua. En total se realizaron tres muestreos durante semanas diferentes.

La caracterización fisicoquímica del agua (pH, turbiedad y color) se llevó a cabo siguiendo los protocolos establecidos por el Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, 2017).

3.9 Determinación de las condiciones sanitarias y ambientales que inciden sobre la presencia del *Cryptosporidium spp.* y *Giardia spp.* en las aguas crudas

3.9.1 Determinación de las condiciones sanitarias que inciden sobre la presencia del *Cryptosporidium spp.* y *Giardia spp.* en las aguas crudas

La evaluación de los factores de riesgo y las condiciones de vulnerabilidad de las fuentes naturales de abastecimiento de agua se realizó mediante visitas de inspección visual, el trabajo de campo se centró en los tres aspectos principales, como son el tipo de fuente principal, el uso del suelo y la percepción organoléptica del agua. El propósito fue identificar los principales factores de contaminación que pudieran favorecer la presencia de *Cryptosporidium spp.* y *Giardia spp.* en el agua.

3.10 Uso de tecnologías basadas en radiación de luz solar en la remoción de *Giardia lamblia* y *Cryptosporidium parvum*

El proceso de desinfección está basado en el tratamiento de agua con baja turbidez por medio de la radiación solar buscó evaluar la capacidad del método para destruir los protozoos

objeto de estudio e implementarla en aquellos acueductos donde los métodos tradicionales de tratamiento están siendo inefectivos.

La Desinfección Solar del Agua (SODIS) es una alternativa sencilla y económica de implementar en los acueductos veredales para el tratamiento de agua para consumo humano a nivel doméstico. El método SODIS usa la energía solar para la destrucción de la pared celular de los microorganismos causantes de enfermedad, debido a la sinergia entre el efecto de la radiación de la luz solar en el espectro de luz UV-A (longitud de onda 320-400nm) y el incremento de la temperatura del agua (Meierhofer y Wegelin, 2005).

Para evaluar el efecto del uso de tecnologías basadas en radiación de luz solar en la remoción de *Giardia lamblia* y *Cryptosporidium parvum*, se realizó un muestreo de agua superficial no tratada, la cual fue procesada según la metodología estandarizada EPA 1623.1 (USEPA, 2012), se le determinó la presencia de *Giardia spp.* y *Cryptosporidium spp.* Posteriormente, se llevaron a cabo los experimentos contemplados para la remoción de los microorganismos, incluyendo dos controles, uno correspondiente al agua sin tratar, y el otro luego de ser sometida a tratamiento de desinfección solar.

Las muestras evaluadas fueron obtenidas de una fuente de agua superficial no tratada localizada en la zona rural del municipio de Medellín (Antioquia). En el muestreo se obtuvo aproximadamente 30.0 L de agua.

RESULTADOS

Análisis y discusión de resultados

Comparando los resultados del presente estudio, en donde se reportaron hallazgos positivos para *Cryptosporidium spp.* en 10 bocatomas de los 20 acueductos rurales para un total de 21 resultados positivos, frente a lo encontrado en un estudio realizado en una estación de tratamiento de agua en la ciudad de Sao Paulo, Brasil (Aguirre et al., 2003), en donde no fue encontrada la presencia de *Cryptosporidium spp.* en la fuente de agua con similares características, se puede inferir que condiciones como la temporalidad climática, la frecuencia de muestreo y los usos de suelo son factores importantes para la determinación de la calidad del agua que será posteriormente tratada, además de la importancia de realizar sensibilización a la comunidad para minimizar riesgos a la hora de su consumo sin tratamiento por posibles afectaciones a la salud.

Por otro lado, Cermeño et al. (2008) y Medina et al. (2012), respectivamente, encontraron una prevalencia en la detección de *Cryptosporidium spp.* en aguas crudas al igual que las aguas que ingresan a la planta de tratamiento de aguas residuales, robusteciendo de esta manera la importancia de realizar monitoreos periódico en la vigilancia e inspección de los organismos de control a los acueductos rurales, para, de esta manera, disminuir impactos negativos en la salud de las comunidades beneficiarias de estos establecimientos.

Finalmente, Palacios Ordóñez (2016) encontró la presencia de 5 ooquistes/100 ml de agua, indicando una alta prevalencia de ooquistes y enfatizando el riesgo de salud pública que puede generar los diferentes factores asociados a la presencia de este protozoo en el agua de consumo humano, como se evidencio en el presente trabajo donde el comportamiento general para la variación de la presencia de los protozoos estudiados fue que, de las 120 muestras analizadas en agua superficial, se encontraron resultados positivos para *Giardia spp.* el 27 campañas de muestreo y 7 para *Cryptosporidium spp.*, demostrando que este tipo fuentes están fuertemente impactadas por el desarrollo de actividades antropogénicas. Por otra parte, la estacionalidad también tuvo un efecto importante en la calidad del agua superficial analizada en cada uno de los puntos de muestreo, afectando significativamente la calidad del agua y consecuentemente el proceso de potabilización.

4.2 Evaluación de la variación de la presencia de *Cryptosporidium spp.* y *Giardia spp.* durante 27 meses de monitoreos en aguas crudas y tratadas de las zonas rurales del Área Metropolitana del Valle de Aburrá

Los resultados obtenidos a lo largo de los 12 muestreos realizados entre junio del 2019 y septiembre del 2021 se encuentran relacionados en las tablas 2, 3, 4 y en la figura 3, y revelan que la mayor variación de la presencia de los protozoos de interés en agua cruda se encontró en el punto 20 con dos picos altos, tanto para la detección de *Giardia spp.* como para *Cryptosporidium spp.* Por otro lado, el mayor pico para los resultados de *Cryptosporidium spp.* en agua cruda se encuentra en el punto 9, con hallazgos de 35 ooquistes de *Cryptosporidium*/L en los muestreos 7 y 9. El Punto 17 también presenta picos muy altos para la presencia de *Cryptosporidium spp.*, con hallazgos de 23 ooquistes de *Cryptosporidium*/L en los muestreos 7 y 9.

Tabla 2. Variación de la presencia de *Giardia* y *Cryptosporidium* en aguas tratadas y crudas

Punto de muestreo	2019-06-14				2019-07-26				2019-08-30				2019-09-26				2019-11-28				2020-01-10					
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4		
SP1	0	0	0	0	-	-	0	0	0	0	0	0	-	-	0	0	1	0	0	0	-	-	0	0		
SP2	-	-	0	0	0	2	0	0	-	-	0	0	2	0	1	2	-	-	0	0	0	0	0	1	0	
SP3	0	0	0	0	-	-	0	0	1	0	0	0	-	-	0	0	0	0	0	0	-	-	0	0		
SP4	-	-	0	0	2	0	0	0	-	-	0	0	0	0	0	0	-	-	0	0	0	0	0	0	0	
SP5	0	0	0	0	-	-	0	0	0	0	0	0	-	-	0	0	0	0	0	0	-	-	0	0		
SP6	-	-	0	0	0	0	0	0	-	-	0	0	0	0	0	0	-	-	0	0	0	0	0	0	0	
SP7	0	0	0	0	-	-	0	0	0	0	0	0	-	-	0	0	0	0	0	0	-	-	0	0		
SP8	-	-	0	0	0	1	0	0	-	-	0	0	0	0	0	0	-	-	0	0	0	0	0	0	0	
SP9	2	0	0	0	-	-	0	0	5	0	3	1	-	-	0	0	0	0	0	0	-	-	0	0		
SP10	-	-	0	0	2	0	0	0	-	-	1	1	2	9	0	0	-	-	0	0	0	0	3	1	0	0
SP11	0	0	0	0	-	-	0	0	0	0	0	0	-	-	0	0	0	0	0	0	-	-	0	0	0	
SP12	-	-	0	1	1	0	0	0	-	-	0	2	1	1	0	1	-	-	6	4	0	1	9	1	1	
SP13	0	0	0	0	-	-	0	0	0	0	0	0	-	-	0	0	2	0	0	0	-	-	0	0	0	
SP14	-	-	0	0	0	0	0	0	-	-	0	0	0	0	0	-	-	0	0	0	2	0	0	0	0	
SP15	0	1	0	0	-	-	0	0	1	1	0	0	-	-	0	0	11	0	0	0	-	-	0	0	0	
SP16	-	-	0	0	2	0	0	0	-	-	0	0	4	0	0	0	-	-	0	0	0	0	0	0	0	
SP17	0	0	0	0	-	-	0	0	3	0	0	0	-	-	0	0	0	0	0	-	-	0	0	0	0	
SP18	-	-	0	0	0	0	0	0	-	-	0	0	0	0	0	0	-	-	0	0	0	0	0	0	0	0
SP19	0	0	0	0	-	-	0	0	0	0	0	0	-	-	0	0	0	0	0	0	-	-	4	2	2	
SP20	-	-	0	0	27	21	0	0	-	-	5	0	32	9	0	0	-	-	0	0	0	0	6	0	0	

Giardia AC (1), *Cryptosporidium* AC (2), *Giardia* AT (3), *Cryptosporidium* AT (4). El signo (-) Corresponde a datos de muestras no recolectadas ese mes

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3. Variación de la presencia de Giardia y Cryptosporidium en aguas tratadas y crudas

Punto de muestreo	202-06-24				202-07-16				2020-08-12				2020-11-17				2021-02-10				2021-07-22			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
SP1	0	0	0	0	-	-	0	0	0	0	11	2	-	-	5	1	0	0	0	0	-	-	1	0
SP2	-	-	0	0	0	0	0	0	-	-	1	0	0	0	1	0	-	-	0	0	0	0	1	1
SP3	1	1	0	0	-	-	0	0	1	1	0	0	-	-	0	0	4	0	4	0	-	-	0	0
SP4	-	-	0	0	0	0	0	0	-	-	0	0	2	0	0	0	-	-	0	0	0	0	0	0
SP5	0	0	0	0	-	-	0	0	0	0	0	0	-	-	0	0	0	0	0	0	-	-	0	0
SP6	-	-	0	0	2	0	0	0	-	-	0	0	0	0	0	0	-	-	0	0	0	0	0	0
SP7	1	1	0	0	-	-	0	0	1	1	0	0	-	-	0	0	0	0	0	0	-	-	0	0
SP8	-	-	0	0	0	0	0	0	-	-	0	0	0	0	0	0	-	-	0	0	5	0	0	0
SP9	35	0	0	0	-	-	0	0	35	0	0	0	-	-	0	0	0	0	0	-	-	2	0	
SP10	-	-	0	0	0	0	0	0	-	-	0	0	0	0	0	0	-	-	0	0	0	0	5	0
SP11	0	0	0	0	-	-	0	0	0	0	0	0	-	-	0	0	0	0	0	-	-	0	0	0
SP12	-	-	0	1	0	0	0	0	-	-	0	0	0	0	0	1	-	-	0	0	0	0	0	2
SP13	0	2	0	0	-	-	0	0	0	2	0	0	-	-	1	0	0	0	0	-	-	0	0	0
SP14	-	-	0	7	0	0	0	0	-	-	0	0	1	1	0	0	-	-	0	0	0	0	0	0
SP15	4	0	0	0	-	-	0	0	4	0	5	0	-	-	0	0	0	0	0	-	-	0	0	0
SP16	-	-	0	0	0	1	0	0	-	-	0	0	0	0	0	0	-	-	0	0	0	0	0	0
SP17	25	0	0	0	-	-	0	0	23	0	0	0	-	-	0	1	0	0	0	-	-	0	0	0
SP18	-	-	0	0	0	0	0	0	-	-	0	0	6	0	0	0	-	-	0	0	0	4	0	0
SP19	0	1	0	0	-	-	0	0	0	1	0	0	-	-	0	0	0	0	0	-	-	0	0	0
SP20	-	-	0	0	5	0	0	0	-	-	1	0	0	0	1	0	-	-	0	0	0	0	0	4

Giardia AC (1), Cryptosporidium AC (2), Giardia AT (3), Cryptosporidium AT (4). El signo (-) Corresponde a datos de muestras no recolectadas ese mes

Fuente: Elaboración propia.

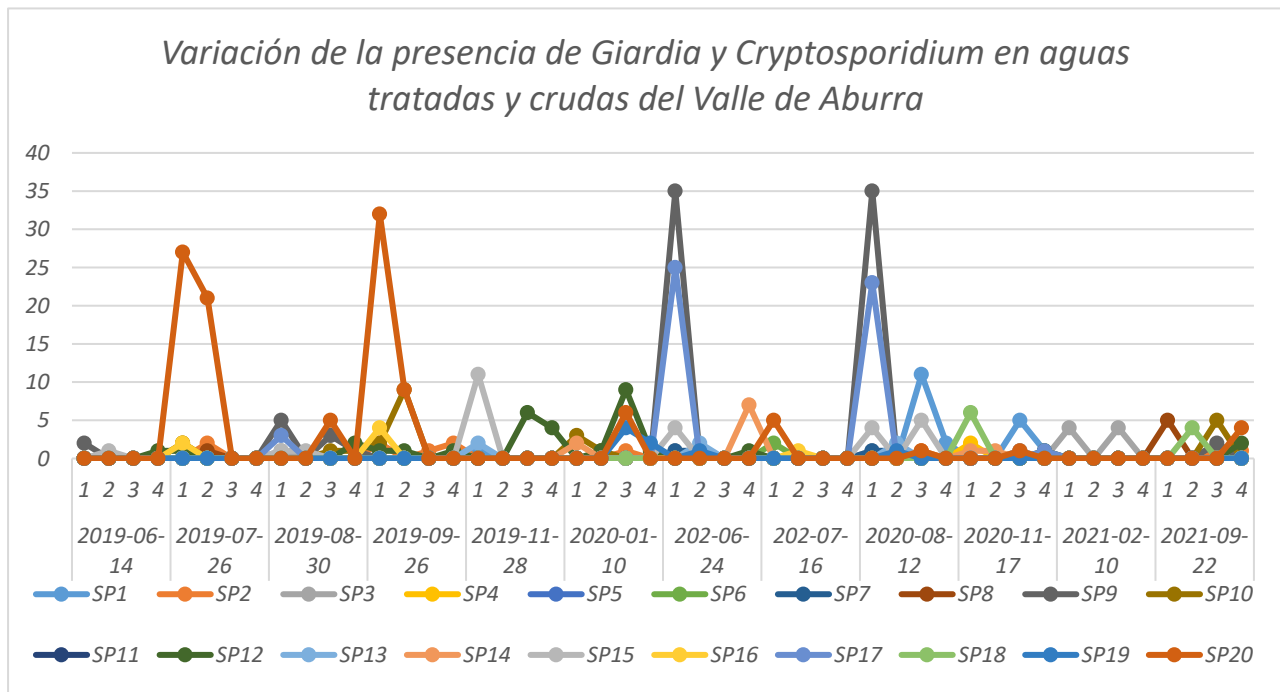


Figura 3. Variación de la presencia de Giardia y Cryptosporidium en aguas tratadas y crudas del Valle de Aburrá. Fuente: Elaboración propia

En la tabla 4 se encuentran los resultados recolectados en el transcurso de los 12 muestreos y en la figura 4 se grafican estas variaciones y su comportamiento con los siguientes hallazgos: se puede observar que el punto 20 presenta 2 conteos significativamente altos para los protozoos de interés, tanto para *Giardia spp.* (27 quistes/L) y *Cryptosporidium spp.* (21 ooquistes/L) en el muestreo 2 correspondiente a la fecha 2019-07-26, al igual que en el muestreo 4 con un recuento para *Giardia spp.* (32 quistes/L) y *Cryptosporidium spp.* (9 ooquistes/L), correspondiente al 2019-09-26.

En épocas climatológicas diferentes en el punto 3, se encuentra el recuento más alto para el muestreo 5, con un recuento de 11 quistes/L de *Giardia spp.*, y en el muestreo 7 se encuentra el recuento más alto para *Giardia* con un valor de 35 quistes/L correspondiente al 2020-06-24.

Tabla 4. Variación de *Giardia* y *Cryptosporidium* en aguas crudas

Punto de muestreo	2019-06-14		2019-07-26		2019-08-30		2019-09-26		2019-11-28		2020-01-10		2020-06-24		2020-07-16		2020-08-12		2020-11-17		2021-02-10		2021-07-22			
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
SP1	0	0	-	-	0	0	-	-	1	0	-	-	0	0	-	-	0	0	-	-	0	0	-	-	-	-
SP2	-	-	0	2	-	-	2	0	-	-	0	0	-	-	0	0	-	-	0	0	-	-	0	0	-	-
SP3	0	0	-	-	1	0	-	-	0	0	-	-	1	1	-	-	1	1	-	-	4	0	-	-	-	-
SP4	-	-	2	0	-	-	0	0	-	-	0	0	-	-	0	0	-	-	2	0	-	-	0	0	-	-
SP5	0	0	-	-	0	0	-	-	0	0	-	-	0	0	-	-	0	0	-	-	0	0	-	-	-	-
SP6	-	-	0	0	-	-	0	0	-	-	0	0	-	-	2	0	-	-	0	0	-	-	0	0	-	-
SP7	0	0	-	-	0	0	-	-	0	0	-	-	1	1	-	-	1	1	-	-	0	0	-	-	-	-
SP8	-	-	0	1	-	-	0	0	-	-	0	0	-	-	0	0	-	-	0	0	-	-	5	0	-	-
SP9	2	0	-	-	5	0	-	-	0	0	-	-	35	0	-	-	35	0	-	-	0	0	-	-	-	-
SP10	-	-	2	0	-	-	2	9	-	-	3	1	-	-	0	0	-	-	0	0	-	-	0	0	-	-
SP11	0	0	-	-	0	0	-	-	0	0	-	-	0	0	-	-	0	0	-	-	0	0	-	-	-	-
SP12	-	-	1	0	-	-	1	1	-	-	0	1	-	-	0	0	-	-	0	0	-	-	0	0	-	-
SP13	0	0	-	-	0	0	-	-	2	0	-	-	0	2	-	-	0	2	-	-	0	0	-	-	-	-
SP14	-	-	0	0	-	-	0	0	-	-	2	0	-	-	0	0	-	-	1	1	-	-	0	0	-	-
SP15	0	1	-	-	1	1	-	-	11	0	-	-	4	0	-	-	4	0	-	-	0	0	-	-	-	-
SP16	-	-	2	0	-	-	4	0	-	-	0	0	-	-	0	1	-	-	0	0	-	-	0	0	-	-
SP17	0	0	-	-	3	0	-	-	0	0	-	-	25	0	-	-	23	0	-	-	0	0	-	-	-	-
SP18	-	-	0	0	-	-	0	0	-	-	0	0	-	-	0	0	-	-	6	0	-	-	0	0	-	-
SP19	0	0	-	-	0	0	-	-	0	0	-	-	0	1	-	-	0	1	-	-	0	0	-	-	-	-
SP20	-	-	27	21	-	-	32	9	-	-	0	0	-	-	5	0	-	-	0	0	-	-	0	0	-	-

Fuente: Elaboración propia.

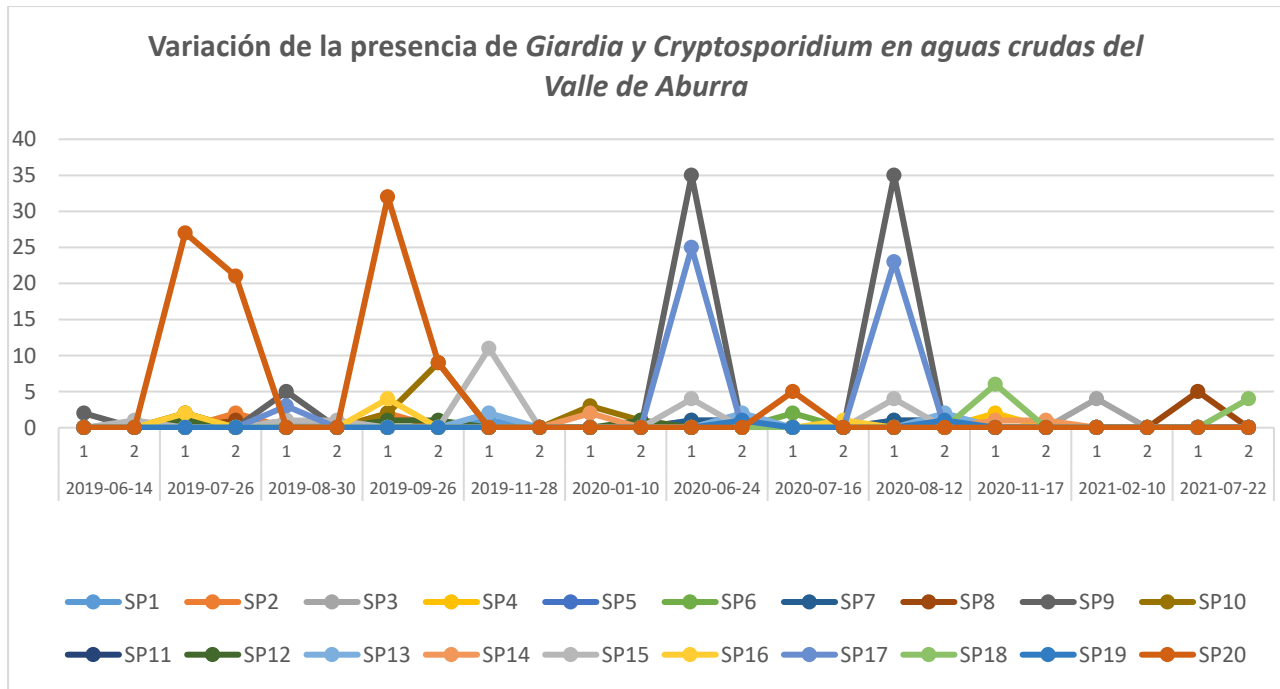


Figura 4. Variación de la presencia de *Giardia* y *Cryptosporidium* en aguas crudas del Valle de Aburrá.
Fuente: Elaboración propia

En la tabla 5 se recopilan los datos en aguas tratadas y en la figura 5 se muestra la variación de la presencia de *Giardia* y *Cryptosporidium* en aguas tratadas en el Valle de Aburrá. El punto 1 presenta 2 conteos consecutivos para *Giardia spp.* de 11 quistes/L y 5 quistes/L, igualmente presenta hallazgos para *Cryptosporidium spp.* de 2 ooquistes/L en el muestreo 9, correspondiente a la fecha 2020-08-12, tendencia que se repite en el siguiente muestreo con un recuento para *Giardia* de 5 quistes/L en el muestreo 10, correspondiente a la fecha 2020-11-17. Al igual que en el punto 12, que muestra varios picos por presencia de protozoos.

Tabla 5. Variación de Giardia y Cryptosporidium en aguas tratadas

Punto de muestreo	2019-06-14		2019-07-26		2019-08-30		2019-09-26		2019-11-28		2020-01-10		2020-06-24		2020-07-16		2020-08-12		2020-11-17		2021-02-10		2021-07-22		
	3	4	3	4	3	4	3	4	3	4	3	4	3	4	3	4	3	4	3	4	3	4	3	4	
SP1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	11	2	5	1	0	0	1	0	
SP2	0	0	0	0	0	0	1	2	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	1	
SP3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0
SP4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SP5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SP6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SP7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SP8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SP9	0	0	0	0	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0
SP10	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0
SP11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SP12	0	1	0	0	0	2	0	1	6	4	9	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	2
SP13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
SP14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SP15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0
SP16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SP17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
SP18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SP19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SP20	0	0	0	0	5	0	0	0	0	0	6	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	4

Fuente: Elaboración propia.

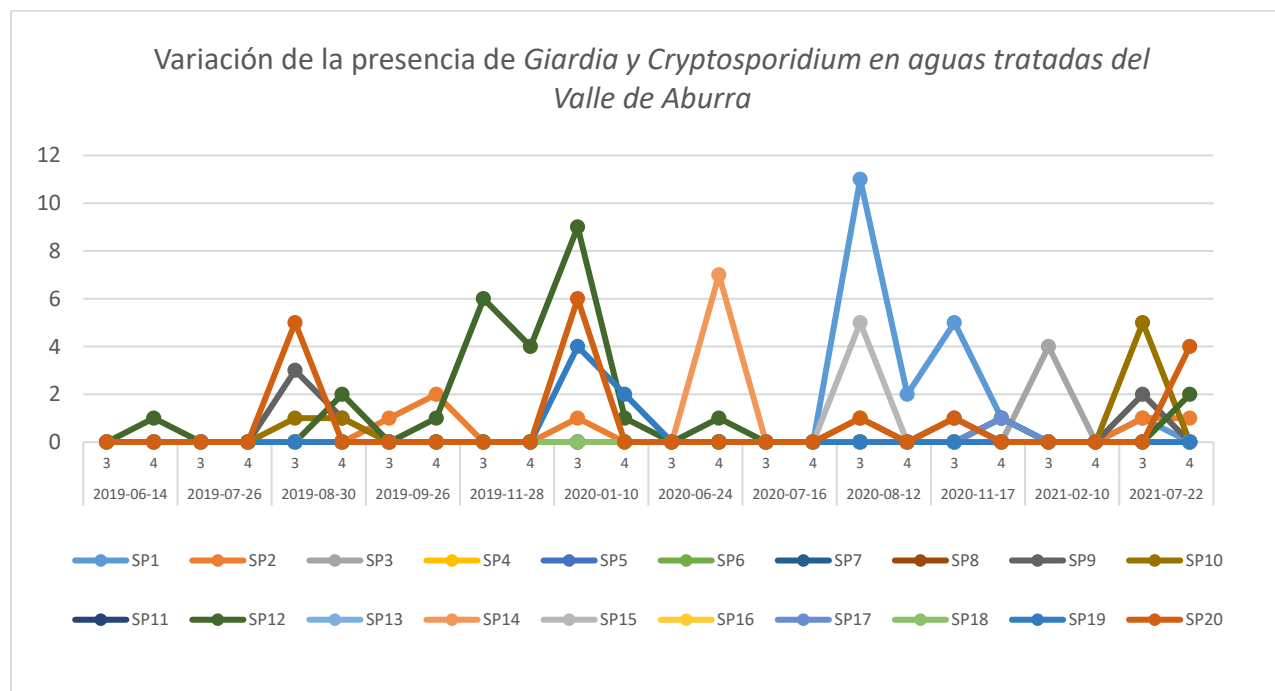


Figura 5. Variación de la presencia de Giardia y Cryptosporidium en aguas tratadas del Valle de Aburrá

Fuente: Elaboración propia

En la figura 6 se muestra el comportamiento de las 240 muestras analizadas en agua tratada, en las cuales el 5% (12/240) fueron positivas para la presencia de *Giardia spp.* y 3,30% (8/240) fueron positivas para la presencia de *Cryptosporidium spp.*

Para los hallazgos encontrados en 120 muestras analizadas en agua superficial, se encontraron resultados positivos para *Giardia spp.* con el 22,5% (27/120) y 5,83% (7/120) para *Cryptosporidium spp.*

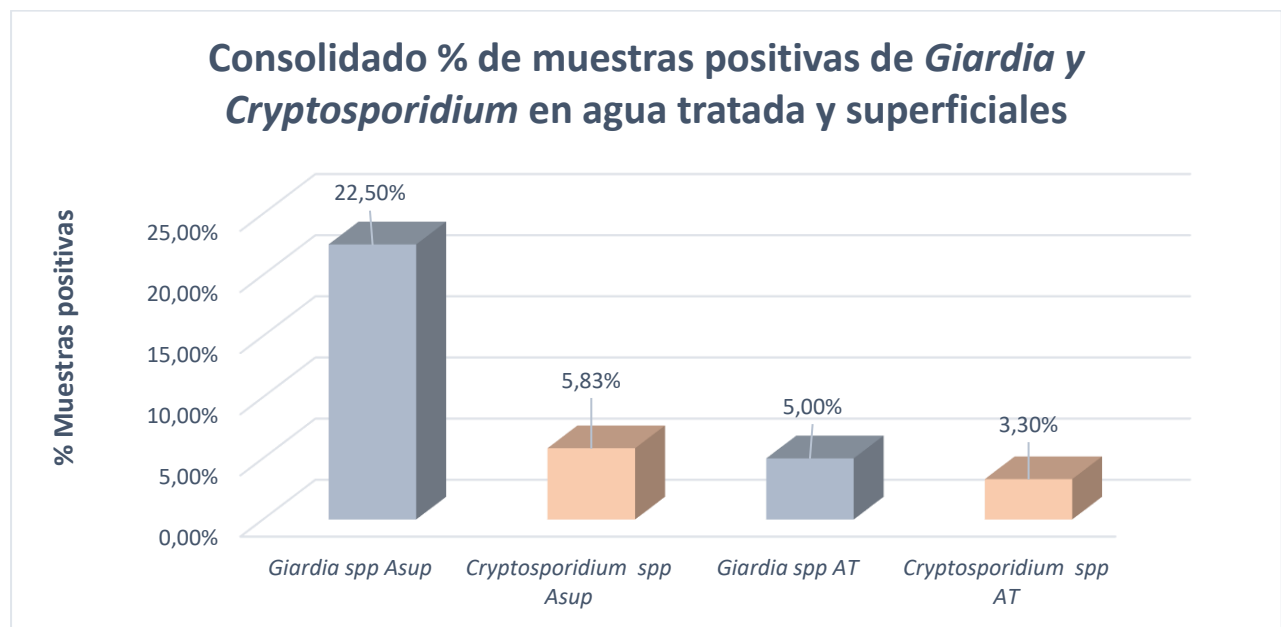


Figura 6. Consolidado % de muestras positivas de *Giardia* y *Cryptosporidium* en agua tratada y superficiales en el Área metropolitana del Valle de Aburrá
Fuente: Elaboración propia

4.1.1 Análisis fisicoquímico y microbiológico de la calidad del agua potable paracada uno de los puntos de muestreo en la estación seca y húmeda

Se evaluaron nueve parámetros de la calidad del agua (pH, Temperatura, Cloro libre, Turbidez, Coliformes totales, *Escherichia coli*, *Enterococos*, *Giardia spp.* y *Cryptosporidium spp.*) en el suministro de agua potable en cada punto de muestreo durante las doce campañas de muestreo. El resumen de los resultados de estas características se presenta en la tabla 6. La turbidez es un parámetro regulado por la legislación colombiana en la resolución 2115 del 2007 emitida por el Ministerio de la Protección Social, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, ya que también puede estar relacionada con la alteración de los parámetros microbiológicos. Los

valores altos de turbidez pueden afectar el proceso de cloración, en la medida en que, dentro del material particulado, los microorganismos pueden estar protegidos de la cloración, reduciendo el poder del agente desinfectante utilizado.

La Tabla 6 muestra los puntos de muestreo con incumplimiento de los valores de Turbidez superiores a 2 NTU, paralelamente, los valores de los parámetros microbiológicos para estos mismos puntos también se encuentran alterados. Los SP 2,9,10,13,16,17 y 20 presentan los valores más altos de los parámetros microbiológicos como *Escherichia coli* y *Enterococos*, lo que significa que probablemente el tratamiento no esté siendo eficiente en la remoción de los patógenos de origen fecal que contaminan el sistema de abastecimiento de agua potable.

En el mismo contexto, los valores de cloro residual libre, que deben variar entre 0,3 - 2,0 mg/L en cualquier punto de la red de distribución del sistema de agua potable, son bajos para los mismos SP que presentan valores elevados de los parámetros microbiológicos. Incluso para el SP 20 no se dispone de ninguna concentración de cloro residual libre en el agua, lo que puede ocasionar un consumo accidental de esta y generar un riesgo a la salud de los consumidores.

La estacionalidad tuvo un efecto importante en la calidad del agua potable analizada en cada uno de los puntos de muestreo correspondientes a los 7 sistemas de tratamiento de los acueductos rurales evaluados. A partir de los resultados analizados es posible inferir que existen dificultades en el ajuste y control de los procesos de tratamiento del agua cuando no hay lluvias. Al contrario de lo esperado, ya que es posible pensar que durante los eventos de precipitación se favorece la escorrentía, y con ello aumenta el número de contaminantes que pueden llegar a las fuentes de agua. Sin embargo, en la época seca es posible encontrar un efecto de mayor concentración de los contaminantes que llegan a las aguas superficiales a través de las descargas de aguas residuales, afectando significativamente la calidad del agua y consecuentemente el proceso de potabilización. Otros parámetros como el pH y la Conductividad presentaron valores adecuados para el agua potable a pesar de las alteraciones analizadas en las otras variables evaluadas.

Tabla 6. Resumen de la evaluación de la calidad fisicoquímica y microbiológica del agua tratada para cada uno de los puntos de muestreo en la estación seca y húmeda

Puntos de muestreo	pH		Temperatura °C		Cloro libre Mg Cl ₂ /L		Turbiedad NTU		Conductividad µs/cm		Coliformes totales CFU/mL		<i>Escherichia coli</i> CFU/mL		<i>Enterococcus</i> CFU/mL	
	Seca	Húmeda	Seca	Húmeda	Seca	Húmeda	Seca	Húmeda	Seca	Húmeda	Seca	Húmeda	Seca	Húmeda	Seca	Húmeda
SP1	7,8 ±0,3	7,4±0,3	21 ± 2	24 ± 3	1,0 ± 0,4	1,6 ± 0,7	1,6 ± 1,0	1,6 ± 0,6	155 ± 32	121 ± 14	6 ± 5	8 ± 8	1 ± 0,8	1 ± 1	0 ± 0	0 ± 0
SP2	7,9 ±0,2	7,7±0,3	21 ± 2	19 ± 1	0,5 ± 0,4	2,3 ± 1,5	2,3 ± 0,7	2,1 ± 0,3	227 ± 206	166 ± 68	30 ± 19	8 ± 5	6 ± 10	1 ± 1	0 ± 1	1 ± 1
SP3	7,7 ±0,5	7,5±0,2	22 ± 1	24 ± 1	1,1 ± 0,4	1,4 ± 0,5	1,2 ± 0,7	1,6 ± 1,0	122 ± 29	87 ± 21	9 ± 6	13 ± 12	3 ± 3	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0
SP4	7,9 ±1,0	8,7±0,8	22 ± 1	24 ± 2	0,6 ± 0,7	0,3 ± 0,6	1,7 ± 0,2	1,2 ± 0,3	229 ± 177	141 ± 113	17 ± 13	19 ± 12	2 ± 2	4 ± 5	0 ± 0	0 ± 0
SP5	7,3 ±0,5	7,4±0,5	22 ± 2	22 ± 3	1,0 ± 0,4	1,6 ± 0,8	0,9 ± 0,4	1,4 ± 0,7	118 ± 103	104 ± 80	48 ± 8	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0
SP6	7,5 ±0,4	7,9±0,6	23 ± 3	21 ± 1	1,5 ± 0,9	2,3 ± 1,8	0,9 ± 0,4	1,3 ± 0,9	24 ± 12	69 ± 22	27 ± 22	40 ± 38	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0
SP7	7,4 ±0,4	7,6±0,5	22 ± 0	24 ± 3	1,3 ± 0,6	1,8 ± 1,3	0,7 ± 0,3	1,2 ± 0,6	135 ± 79	106 ± 81	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0
SP8	7,7 ±0,5	7,6±0,8	23 ± 3	24 ± 4	1,5 ± 0,9	1,9 ± 1,2	1,0 ± 0,9	2,7 ± 1,9	36 ± 15	138 ± 74	0 ± 0	0 ± 3	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0
SP9	7,7 ±0,3	7,6±0,1	22 ± 2	24 ± 2	0,3 ± 0,4	1,7 ± 1,2	4,8 ± 2,7	5,1 ± 0,6	110 ± 16	134 ± 20	759 ± 66	543 ± 458	100 ± 109	62 ± 76	24 ± 17	28 ± 26
SP10	7,7 ±0,3	7,6±0,4	22 ± 2	20 ± 1	1,9 ± 0,8	1,8 ± 0,6	13,9 ± 10,1	1,6 ± 6,8	274 ± 209	136 ± 115	117 ± 11	146 ± 174	10 ± 18	5 ± 10	9 ± 19	21 ± 36
SP11	7,7 ±0,5	7,6±0,2	25 ± 3	24 ± 2	1,5 ± 0,8	2,5 ± 0,8	0,7 ± 0,9	1,3 ± 0,5	39 ± 17	38 ± 12	9 ± 2	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0
SP12	7,7 ±0,7	7,6±0,2	22 ± 4	24 ± 3	1,5 ± 0,4	0,8 ± 0,7	0,9 ± 0,7	1,2 ± 0,5	37 ± 6	51 ± 11	0 ± 0	0 ± 0	2 ± 0	0 ± 0	2 ± 3	0 ± 0
SP13	7,7 ±0,5	7,6±0,2	23 ± 3	22 ± 2	0,8 ± 0,4	1,0 ± 0,3	2,7 ± 2,4	1,2 ± 0,4	97 ± 60	56 ± 36	85 ± 7	207 ± 265	13 ± 0	39 ± 57	0 ± 0	0 ± 0
SP14	7,7 ±0,8	7,6±0,4	22 ± 2	24 ± 4	1,4 ± 0,6	1,4 ± 0,3	1,2 ± 0,9	1,5 ± 0,6	128 ± 107	160 ± 84	4 ± 2	5 ± 7	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0
SP15	7,7 ±0,4	7,6±0,1	23 ± 2	25 ± 3	0,6 ± 0,6	1,1 ± 0,9	1,6 ± 0,7	1,2 ± 1,0	209 ± 109	191 ± 48	2 ± 2	613 ± 102	0 ± 0	8 ± 14	0 ± 4	24 ± 41
SP16	7,7 ±0,4	7,6±0,1	24 ± 3	25 ± 3	1,2 ± 1,0	1,9 ± 1,0	2,8 ± 1,9	2,4 ± 0,5	143 ± 69	134 ± 41	23 ± 4	2 ± 4	5 ± 11	0 ± 1	2 ± 5	0 ± 0
SP17	7,7 ±0,4	7,6±0,5	24 ± 2	23 ± 1	0,7 ± 0,7	2,9 ± 2,4	3,9 ± 0,9	4,7 ± 0,9	157 ± 109	153 ± 58	158 ± 78	927 ± 748	8 ± 13	12 ± 16	3 ± 8	14 ± 23
SP18	7,7 ±0,3	7,6±0,1	24 ± 1	25 ± 4	1,1 ± 0,9	0,4 ± 2,3	0,9 ± 0,7	1,6 ± 0,6	153 ± 92	125 ± 36	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0
SP19	7,7 ±0,4	7,6±0,6	23 ± 3	25 ± 3	0,7 ± 0,2	0,9 ± 0,7	1,6 ± 0,6	2,3 ± 1,0	137 ± 135	116 ± 47	0 ± 0	8 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0
SP20	7,7 ±0,4	7,6±0,4	25 ± 2	24 ± 1	0,0 ± 0,0	0,0 ± 0,0	12,7 ± 10,2	6,1 ± 3,3	77 ± 32	56 ± 20	1498 ± 617	1750 ± 678	220 ± 174	131 ± 92	111 ± 63	123 ± 76

Fuente: Elaboración propia.

4.1.2 Presencia de *Cryptosporidium* y *Giardia* en el agua cruda y potable

Uno de los principales retos del tratamiento de las aguas potables rurales es la eliminación de *Cryptosporidium* y *Giardia*. La sencillez de los sistemas de tratamiento sumada a la poca inversión económica pone de manifiesto un gran riesgo para la salud pública de estas poblaciones vulnerables. A través de este estudio, la evaluación de la presencia de *Cryptosporidium* y *Giardia* en el agua cruda y potable indicó que la PTAP es una barrera importante para prevenir la propagación e ingestión inadvertida de parásitos a través del agua potable.

La estacionalidad no tuvo un fuerte efecto sobre la ocurrencia de *Cryptosporidium* y *Giardia*, fue posible encontrar un pequeño incremento de su presencia en el agua cruda durante la estación húmeda (Figura 7 y 8), pero la eficiencia de los sistemas de tratamiento fue efectiva para removerlos significativamente.

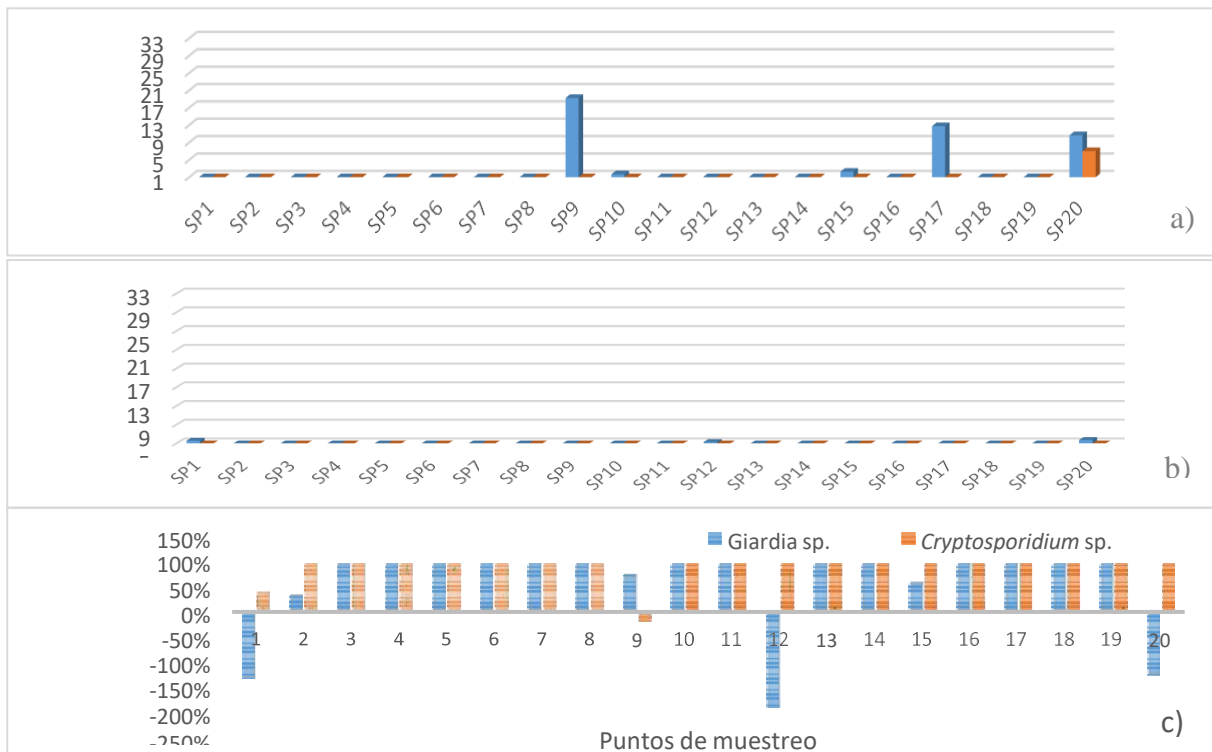


Figura 7. Presencia de *Cryptosporidium* y *Giardia* en la estación seca: a) agua cruda b) agua potable y c) Eficiencia de cada sistema de tratamiento de agua potable en la eliminación de *Cryptosporidium* y *Giardia*.

Fuente: Elaboración propia.

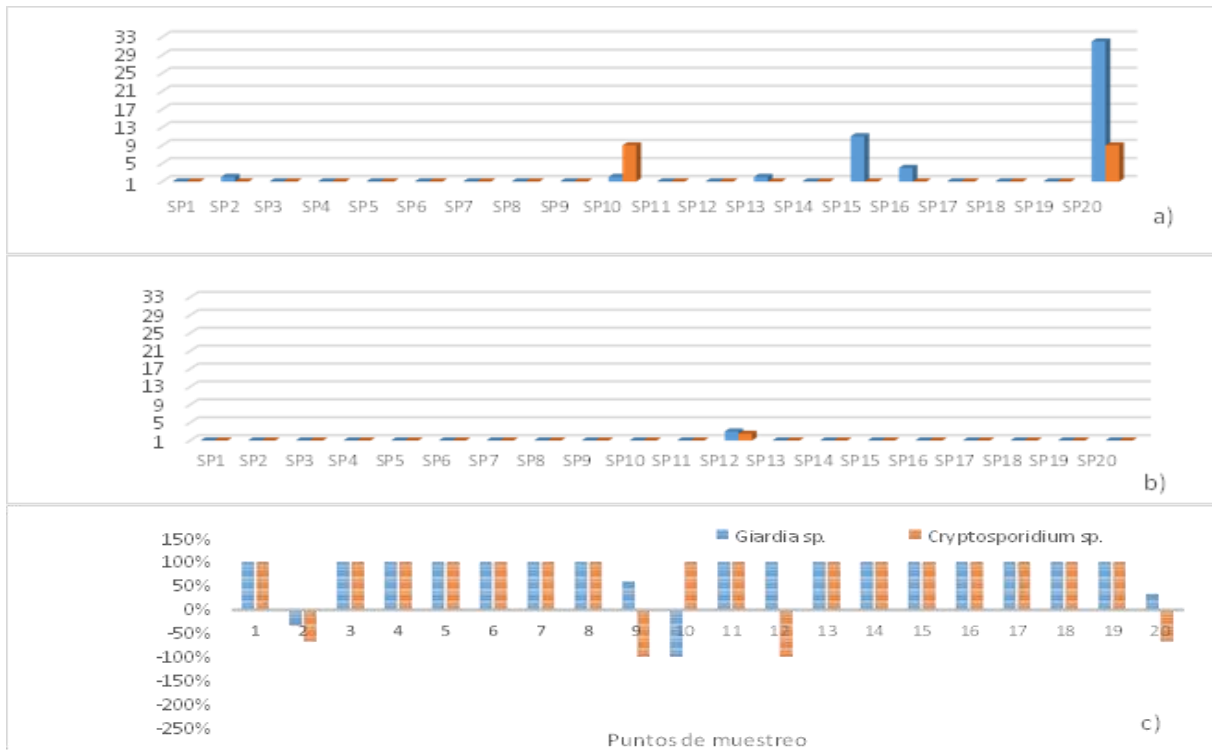


Figura 8. Presencia de *Cryptosporidium* y *Giardia* en la estación húmeda: a) agua cruda b) agua potable y c) eficiencia de cada sistema de tratamiento de agua potable en la eliminación de *Cryptosporidium* y *Giardia*.

Fuente: Elaboración propia

Las eficiencias negativas de parásitos que se muestran en las figuras 7 y 8 podrían ser una alerta sobre el control y mantenimiento de las unidades de tratamiento. Para asegurar la calidad del agua potable a través de los sistemas de tratamiento, los filtros deben ser lavados con cierta periodicidad. Por lo tanto, el agua puede contaminarse a través del filtro cuando está obstruido o con un mantenimiento limitado. Esta situación podría explicar las eficiencias negativas en estos parámetros microbiológicos.

4.1.3 Evaluación del riesgo para la salud humana

Se evaluó el índice de riesgo de la calidad del agua para el consumo humano - IRCA para cada PTAP. Según la clasificación de riesgo IRCA, los resultados indicaron un estado crítico de las condiciones del agua en el punto de muestreo evaluado. Tanto para la estación seca como para la estación húmeda, el riesgo que prevalece es medio, alto o sanitario no viable en el agua potable.

Tabla 7. Evaluación del índice de riesgo de la calidad del agua para consumo humano

Puntos de muestreo	Temporada seca		Temporada húmeda	
	Promedio IRCA	Clasificación del riesgo	Promedio IRCA	Clasificación del riesgo
SP1	51,2%	Riesgo alto	38,5%	Riesgo alto
SP2	78,5%	Riesgo alto	88,5%	Inviabile sanitariamente
SP3	49,0%	Riesgo alto	49,0%	Riesgo alto
SP4	44,3%	Riesgo alto	67,5%	Riesgo alto
SP5	14,0%	Riesgo bajo	10,5%	Riesgo bajo
SP6	18,0%	Riesgo medio	49,0%	Riesgo alto
SP7	6,0%	Riesgo bajo	10,5%	Riesgo bajo
SP8	12,0%	Riesgo bajo	21,0%	Riesgo medio
SP9	92,2%	Inviabile sanitariamente	87,4%	Inviabile sanitariamente
SP10	93,2%	Inviabile sanitariamente	76,9%	Riesgo alto
SP11	18,0%	Riesgo medio	21,0%	Riesgo medio
SP12	60,1%	Riesgo alto	100,0%	Inviabile sanitariamente
SP13	66,9%	Riesgo alto	55,9%	Riesgo alto
SP14	26,3%	Riesgo medio	10,5%	Riesgo bajo
SP15	32,3%	Riesgo medio	0,0%	Sin riesgo
SP16	29,0%	Riesgo medio	10,5%	Riesgo bajo
SP17	53,9%	Riesgo alto	59,4%	Riesgo alto
SP18	9,0%	Riesgo bajo	10,5%	Riesgo bajo
SP19	22,3%	Riesgo medio	11,5%	Riesgo bajo
SP20	95,8%	Inviabile sanitariamente	97,9%	Inviabile sanitariamente

Fuente: elaboración propia.

La evaluación con este instrumento básico mostró una alerta de las condiciones de calidad del agua en el suministro de los sistemas de agua potable rural. La población se abastece de agua que no cumple con los criterios mínimos de calidad establecidos por resolución 2115 del 2007.

Por otra parte, se identificó una relación entre los puntos de muestreo que tienen fuentes críticas de contaminación como son las viviendas, los pozos sépticos y la producción pecuaria con los mayores valores de riesgo del índice. Este escenario muestra que existe un limitado control por parte de las autoridades ambientales en cuanto al manejo y disposición de las aguas residuales a los cuerpos de agua naturales. El alto deterioro de la calidad del agua y la baja eficiencia de los limitados sistemas de tratamiento ponen en riesgo la salud de la población.

4.2 Determinación de las condiciones sanitarias y ambientales que inciden sobre la presencia del *Cryptosporidium spp.* y *Giardia spp.* en las aguas crudas

4.2.1 Determinación de las condiciones sanitarias que inciden sobre la presencia del *Cryptosporidium spp.* y *Giardia spp.* en las aguas crudas

Tabla 8. Condiciones sanitarias permanentes encontradas en el área de estudio asociadas a los puntos de muestreo

Puntos de muestreo		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Tipo de fuente	Agua superficial	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
	Agua subterránea																				
	Sin uso antrópico cercano	x				x	x					x	x								
	Viviendas		x		x			x			x					x	x	x		x	x
	Vertimientos		x								x										
	Pozos sépticos cerca de la ronda hídrica										x			x	x	x	x		x	x	x
Usos del suelo	Producción avícola																		x		x
	Producción porcícola		x					x													
	Producción ganadera				x					x	x			x	x	x	x	x	x	x	x
	Deforestación			x							x										
	Cultivos (café, cebolla, entre otros)													x		x		x			
	Captaciones diferentes al acueducto										x					x			x		
	Vía para vehículos cerca de la ronda hídrica									x					x						x
	Límites de la ronda hídrica usada regularmente por caminantes						x			x					x						x
	Recreación			x		x				x											
Percepción organoléptica del agua	Mal olor	x																			
	Sensación grasosa				x		x		x		x										

Fuente: Elaboración propia.

Durante las visitas de inspección se comprobó que las fuentes de agua naturales son de tipo superficial. Esto significa que, al ser fuentes de este tipo, puede haber una mayor probabilidad de presencia de los parásitos de estudio. Esta probabilidad se incrementa debido a que las aguas superficiales son impactadas directamente por el uso actual del suelo o el desarrollo de actividades antropogénicas en la superficie del terreno. De esta forma, se evaluaron 11 tipos de uso del suelo, teniendo en cuenta las actividades más comunes desarrolladas en el área de estudio. La tabla 8 muestra la relación de estos usos con cada punto de muestreo evaluado.

Los hogares, los pozos sépticos en el estudio y la producción ganadera fueron los usos del suelo que se relacionan con un mayor número de puntos de muestreo y que podrían impactar en su condición de calidad del agua y este tipo de usos puede ser una fuente del contaminante de *Cryptosporidium spp.* y *Giardia spp.* en el agua. En campo se evaluó la percepción organoléptica del agua. La percepción de

sensación aceitosa fue común en cinco puntos de muestreo, estos resultados pueden estar relacionados con las fuentes de vertido de aguas residuales en el agua natural.

Se realizó un cálculo de varianza de los datos para encontrar correlaciones estadísticamente significativas entre los usos del suelo y la presencia de *Giardia spp.* y *Cryptosporidium spp.* en las muestras de agua superficial de los 20 acueductos veredales de los 10 municipios del Área Metropolitana del Valle de Aburrá, en las tablas 9 y 10 se muestran los resultados encontrados entre las correlaciones.

Tabla 9. Análisis de Varianza para la presencia de *Giardia spp.* con relación al uso de suelos

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
EFFECTOS PRINCIPALES					
Producción porcícola	171,587	1	171,587	5,08	0,0263
Producción ganadera	271,596	1	271,596	8,03	0,0055
Cultivos (café, cebolla, entre o	176,192	1	176,192	5,21	0,0244
Vía para vehículos cerca de la ronda hídrica	237,031	1	237,031	7,01	0,0093

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

Los valores-P prueban la significancia estadística de cada uno de los factores. Puesto que 4 valores-P son menores que 0,05, estos factores tienen un efecto estadísticamente significativo sobre la presencia de *Giardia* con un 95,0% de nivel de confianza.

Fuente: elaboración propia.

Tabla 10. Análisis de Varianza para la presencia de *Cryptosporidium spp.* con relación al uso de suelos

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
EFFECTOS PRINCIPALES					
E: Producción avícola	27,3715	1	27,3715	6,39	0,0129
G: Producción ganadera	27,3594	1	27,3594	6,39	0,0129

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

Los valores-P prueban la significancia estadística de cada uno de los factores. Puesto que 2 valores-P son menores que 0,05, estos factores tienen un efecto estadísticamente significativo sobre la presencia de *Cryptosporidium* con un 95,0% de nivel de confianza.

Fuente: elaboración propia.

Los resultados de los Análisis de varianza para la presencia de *Giardia spp.* y *Cryptosporidium spp.* indicaron que los usos del suelo tienen un efecto estadísticamente significativo para la presencia de estos patógenos en el agua superficial, demostrando la hipótesis de que estas están fuertemente impactadas por el uso actual del suelo o el desarrollo de actividades antropogénicas en la superficie del terreno. Se

evaluaron 11 tipos de uso del suelo, teniendo en cuenta las actividades más comunes desarrolladas en el área de estudio. La tabla 9 muestra la relación entre la presencia de *Giardia spp.* y los usos del suelo para la producción porcícola y ganadera debido muy probablemente a las excretas que por escorrentía llegan a las fuentes de agua superficial.

Por otro lado, la tabla 10 muestra la relación entre la presencia de *Cryptosporidium spp.* y los usos del suelo para la producción avícola y ganadera, demostrando el impacto en la condición de calidad del agua y que este tipo de usos son una fuente del contaminante de *Cryptosporidium spp.* en el agua, probablemente por las excretas que pueden llegar por escorrentía a las fuentes de agua superficial.

4.2.2 Determinación de las condiciones ambientales que inciden sobre la presencia del *Cryptosporidium spp.* y *Giardia spp.* en las aguas crudas

La evaluación de las influencias que tienen las condiciones ambientales sobre la presencia de *Giardia* y *Cryptosporidium* en las fuentes naturales de abastecimiento de agua se analizó mediante los recuentos de hallazgos positivos para quistes y ooquistes de las 20 bocatomas en diferentes épocas climatológicas del año. El propósito fue identificar si las condiciones climatológicas inciden en la presencia de *Cryptosporidium spp.* y *Giardia spp.* en el agua.

En las figuras 9 y 10 se evidencia que la estacionalidad tuvo un efecto importante en la calidad del agua superficial analizada en cada uno de los puntos de muestreo correspondientes. A través de los resultados analizados es posible inferir que las condiciones climatológicas extremas (tiempo seco) tiene un impacto en la ocurrencia de hallazgos positivos en las bocatomas, debido al bajo caudal de la fuente hídrica que pueden facilitar una migración accidental de los quistes y ooquistes por paso de animales y seres humanos, excretas de animales de pastoreo que no logran diluirse en las fuentes de agua, uso de las aguas para riego, demostrando que, contrario a lo esperado, ya que es e pensar que durante los eventos de precipitación se favorece la escorrentía, y con ello aumenta el número de contaminantes que pueden llegar a las fuentes de agua. Sin embargo, en la época seca es posible encontrar un efecto de mayor concentración de los contaminantes que llegan a las aguas superficiales a través de las descargas de aguas residuales, afectando significativamente la calidad del agua y consecuentemente el proceso de potabilización.

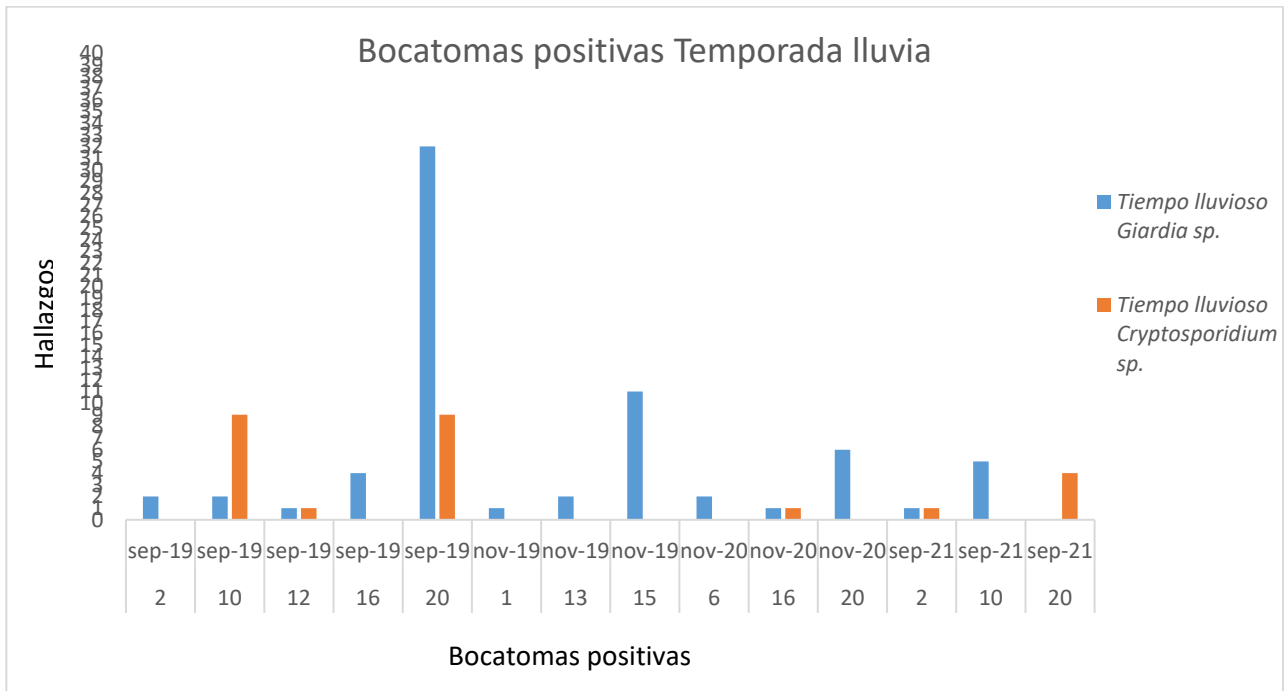


Figura 9. Condiciones ambientales- temporada de lluvia relacionadas con la presencia de protozoos en el área de estudio asociadas a los puntos de muestreo

Fuente: elaboración propia.

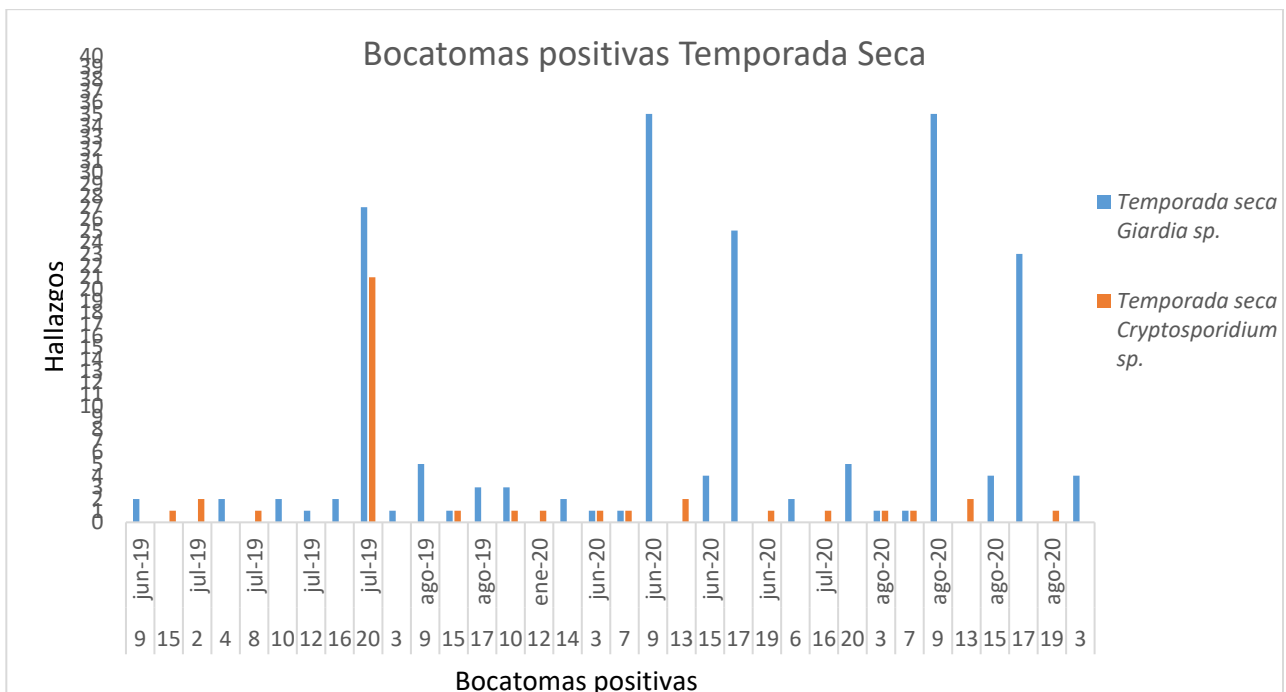


Figura 10. Condiciones ambientales- temporada seca relacionadas con la presencia de protozoos en el área de estudio asociadas a los puntos de muestreo

Fuente: elaboración propia.

4.3 Determinación del porqué los tratamientos de los acueductos veredales son ineficientes en la eliminación del *Cryptosporidium spp.* y *Giardia spp.* en agua

En relación con la ineffectividad de algunos acueductos veredales en el tratamiento de las aguas para consumo humano, se determinó que estas pueden estar influidas por los usos del suelo sumado a la falta de renovación tecnológica para la potabilización, en otros casos no existe ningún tipo de tratamiento al agua cruda que mejore sus características, por esto en algunos de los acueductos no presentaban un buen porcentaje de remoción, comparando los valores en las bocatomas con muestras tratadas. En el laboratorio se realizaron ensayos de Procesos Avanzados de Oxidación para evaluar su viabilidad y posterior implementación en los acueductos veredales.

4.3.1 Procesos de tratamiento alternativos propuestos para implementación en las plantas de tratamiento de los acueductos veredales de los municipios del Área Metropolitana del Valle Aburrá

4.3.1.1 Eliminación de *Giardia lamblia* y *Cryptosporidium parvum* empleando procedimientos basados en ultrasonido y radiación de luz UV

La experimentación para evaluar la eliminación de *Giardia* y *Cryptosporidium* presentes en las muestras de agua fue llevada a cabo empleando 4 tratamientos: coagulación, coagulación + radiación UV, ultrasonido, y la combinación de ultrasonido con peróxido de hidrógeno.

En los ensayos de la coagulación fue usado como agente coagulante $Al_2(SO_4)_3$ (sulfato de aluminio tipo B, Sulfoquímica S.A.). Se evaluaron dos concentraciones, 10.0 y 20.0 mg/L, con el fin de establecer cuál favorecía a una mayor reducción de la turbiedad del agua. Los tiempos de coagulación y sedimentación fueron 30 y 20 minutos respectivamente. Los experimentos se realizaron empleando un equipo de test de jarras (Figura 11). El volumen de agua tratado fue 2.0 L por jarra, la velocidad de mezcla rápida fue 150 rpm (1.0 min) y la de coagulación 40 rpm (29.0 min).



Figura 11. Test de jarras empleado en ensayos de coagulación
Fuente: Elaboración propia

Por otro lado, los experimentos empleando ultrasonido se realizaron utilizando un equipo Meinhardt Ultrasonics (Figura 12) capaz de emitir ondas ultrasónicas a una frecuencia de 40.0 kHz y potencia variable entre 0.0 y 50.0 W. Adicionalmente, se realizaron pruebas bajo la presencia de H₂O₂, el cual, además de ser un agente desinfectante, genera especies oxidantes, como los radicales libres hidroxilo, que contribuyen a la eliminación de contaminantes presentes en el agua.



Figura 12. Equipo de ultrasonido empleado en la realización de los experimentos.

Fuente: Elaboración propia

Por otro lado, los experimentos empleando ultrasonido se realizaron utilizando un equipo Meinhardt Ultrasonics (Figura 12) capaz de emitir ondas ultrasónicas a una frecuencia de 40.0 kHz y potencia variable entre 0.0 y 50.0 W. Adicionalmente, se realizaron pruebas bajo la presencia de H₂O₂, el cual, además de ser un agente desinfectante, genera especies oxidantes, como los radicales libres hidroxilo, que contribuyen a la eliminación de contaminantes presentes en el agua.

La Tabla 11 presenta las diferentes pruebas evaluadas en la eliminación de *Giardia* y *Cryptosporidium*, y las condiciones asociadas con cada una de ellas.

Tabla 11. Tratamientos evaluados en la eliminación de *Giardia lamblia* y *Cryptosporidium parvum* en agua superficial.

Test	Tipo de tratamiento	Condiciones operacionales
1	Coagulación	Dosis de $Al_2(SO_4)_3$ que permitió una mayor reducción de la turbiedad. Volumen tratado 2.0 L. Tiempo coagulación 30 min y tiempo sedimentación 20 min.
2	Ultravioleta	Volumen tratado 0.5 L. Longitud de onda 254 nm. Tiempo de tratamiento 60 min.
3	Coagulación + UV	Muestra sometida a coagulación (condiciones descritas para test 1). Luego, se toman 0.5 L del agua tratada y se someten a tratamiento con luz UV a las mismas condiciones descritas para el test 2.
4	Coagulación + Ultrasonido	Muestra sometida a coagulación (condiciones descritas para el test 1). Luego, se toman 0.5 L del agua tratada y se someten a tratamiento con ultrasonido por 60 min. Frecuencia 40.0 kHz y potencia nominal 25.0 W.
5	Coagulación + Ultrasonido + H_2O_2	Mismas condiciones descritas para el test 4, pero adicionando H_2O_2 (50.0 mg/L) antes de tratamiento con ultrasonido.

Fuente: elaboración propia.

Todos los experimentos se realizaron por triplicado con toma de muestra al inicio y final de cada tratamiento.

Con base en lo anteriormente expuesto se evidenció que la luz UV tiene un efecto ligeramente mayor en comparación con el ultrasonido, lo cual podría asociarse al hecho de que la luz UV cuenta con la energía suficiente para destruir diferentes tipos de contaminantes tanto de naturaleza química como biológica (Einarsson et al., 2015). Respecto a la coagulación, debe indicarse que realmente este tipo de tratamientos no destruye a los microorganismos sino que los “atrapa”, es decir, se estaría cambiando la fase donde se encuentran (Ogura y Sabogal-Paz, 2021).

4.3.1.2 Remoción de *Giardia lamblia* y *Cryptosporidium parvum* empleando tecnologías basadas en radiación de luz solar

Para la experimentación con tecnologías basadas en radiación solar, se tomó una muestra de agua superficial y se caracterizó a través de la análisis de la muestra con el método estándar de la EPA 1623.1 (USEPA, 2012), no mostrando hallazgos positivos de *Giardia* y de *Cryptosporidium*, y se procedió a inocular la muestra de agua superficial caracterizada con controles positivos para los quistes de *Giardia lamblia* y ooquistes de *Cryptosporidium parvum* en una concentración estandarizada precedentemente, se inocularon muestras por triplicado con recipientes de PET y borosilicato con un volumen de 500 mL, el ensayo consistió en exponer las muestras a diferentes periodos de tiempo (0, 4 y 8h).

Las Tablas 12 y 13 presenta los resultados obtenidos para la evaluación de la remoción de *Giardia lamblia* y *Cryptosporidium parvum*.

Tabla 12. Datos primarios ensayo SODIS_SUNTEST

Tratamiento	Temperatura	Turbiedad	Concentración inicial <i>Giardia</i>	Concentración inicial <i>Cryptosporidium</i>	Concentración <i>Giardia</i> 4 horas	Concentración <i>Cryptosporidium</i> 4 horas	Concentración <i>Giardia</i> 8 horas	Concentración <i>Cryptosporidium</i> 8 horas
Sodis plástico Pet replica 1	40,87	2,34	480	390	410	325	310	307
Sodis plástico Pet replica 2	40,87	2,34	480	390	400	312	305	294
Sodis plástico Pet replica 3	40,87	2,34	480	390	428	301	287	301
Sodis vidrio borosilicato replica 1	40,87	2,34	480	390	398	354	204	305
Sodis vidrio borosilicato replica 2	40,87	2,34	480	390	374	320	200	300
Sodis vidrio borosilicato replica 3	40,87	2,34	480	390	391	320	227	317
Suntest plástico Pet replica 1	43,63	2,34	480	390	390	207	207	200
Suntest plástico Pet replica 2	43,63	2,34	480	390	384	215	215	208
Suntest plástico Pet replica 3	43,63	2,34	480	390	392	223	202	200
Suntest vidrio borosilicato replica 1	43,63	2,34	480	390	345	197	186	177
Suntest vidrio borosilicato replica 2	43,63	2,34	480	390	329	199	191	182
Suntest vidrio borosilicato replica 3	43,63	2,34	480	390	335	193	187	179

Fuente: Elaboración propia

Tabla 13. Promedio del porcentaje de remoción de los tratamientos de SODIS_SUNTEST

Tratamiento	% Remoción <i>Giardia</i> 4 horas	% Remoción <i>Cryptosporidium</i> 4 horas	% remoción <i>Giardia</i> 8 horas	% remoción <i>Cryptosporidium</i> 8 horas
Sodis plástico Pet	14,0 %	19,8 %	37,4%	22,9 %
Sodis vidrio borosilicato	19,2 %	15,0 %	56,2 %	21,2 %
Suntest plástico Pet	19,0 %	44,9 %	56,7 %	48,0 %
Suntest vidrio borosilicato	29,9 %	49,7 %	60,8 %	54,0 %

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 13 se muestran los porcentajes promedio de remoción de los tratamientos de SODIS y SUNTEST, en donde se puede ver que el uso de tratamientos con este tipo de tecnologías no resulta eficiente ni conveniente para el tratamiento de aguas para consumo humano, ya que no logró eliminar al 100% los quistes de *Giardia* y ooquistes de *Cryptosporidium*. Estos resultados pudieron ser ineficientes debido a la cantidad de quistes y ooquistes utilizados en la experimentación, ya que no fue posible utilizar estándares precuantificados y las cantidades analizadas superaban los límites de cuantificación validados.

CONCLUSIONES

Las campañas de muestreo en los 20 puntos de los 10 municipios del área metropolitana del Valle de Aburrá presentaron diferentes niveles de riesgo medidos a través del IRCA para el agua entregada para consumo humano, donde los niveles sanitarios Medio, Alto y No viable fueron los criterios más comunes encontrados. La estacionalidad no tuvo un efecto fuerte en la ocurrencia de *Cryptosporidium* y *Giardia* en el agua, su efecto fue más visible en los parámetros como Turbidez, Coliformes fecales y *Escherichia coli*, que presentaron valores más altos en la época seca que en la húmeda. Por otro lado, a pesar de la simplicidad de las PTAP, estas mostraron una buena eficiencia para eliminar *Cryptosporidium* y *Giardia* del agua. Este comportamiento de las PTAP ofrece una oportunidad para seguir trabajando en la mejora y optimización de su proceso físico y químico, para mejorar el resultado de los parámetros que aún no cumplen los criterios de la normativa.

Debido al mecanismo de defensa de los quistes de *Giardia spp.* y de los ooquistes de *Cryptosporidium spp.* que les permite soportar condiciones ambientales extremas, los procesos tradicionales de tratamiento de aguas no permiten su eliminación. Se verificó en los diferentes acueductos de los municipios del Área Metropolitana del Valle de Aburrá que los índices de salud en las zonas rurales se encuentran en condiciones de riesgo medio-alto, lo que aumenta la probabilidad de enfermedades graves en comunidades inmunodeficientes.

Finalmente, los principales resultados de este estudio mostraron que es importante incrementar los esfuerzos de las entidades gubernamentales para apoyar y fortalecer los sistemas de acueducto existentes, de tal manera que se garantice el derecho de la población al agua potable.

En relación con los tratamientos propuestos en esta investigación, los procesos coagulación-floculación, radiación de luz ultravioleta, ultrasonido y combinación de ultrasonido con H₂O₂ indican que el tratamiento del agua con coagulación y radiación ultravioleta promueve una mayor eliminación de los microorganismos. Sin embargo, debe destacarse que la coagulación podría ser más fácilmente implementada en los acueductos por costos y sencilla operación.

Por otro lado, en los tratamientos analizados empleando tecnologías basadas en radiación de luz solar, no hubo diferencias significativas en el tipo de contenedor utilizado. Tanto el plástico PET como el vidrio de borosilicato permiten el paso de radiación que promueve el proceso de eliminación de los microorganismos evaluados. Sin embargo, el proceso SODIS mostró una gran dependencia las condiciones climáticas, con base en lo observado en el promedio del porcentaje de remoción de los quistes de *Giardia* y ooquistes de *Cryptosporidium*.

El ensayo realizado con el Suntest resultó ser efectivo en la inactivación de los microorganismos, con una remoción del 60,8% de quistes de *Giardia* y 54,0% de ooquistes de *Cryptosporidium* en los recipientes de vidrio de borosilicato.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abramovich, B. L., Gilli, M. I., Haye, M. A., Carrera, E., Lurá, M. C., Nepote, A., Gómez, P. A., Vaira, S., & Contini, L. (2001). *Cryptosporidium* y *Giardia* en aguas superficiales. *Revista Argentina de microbiología*, 33(3), 167–176.
- Adam R. D. (2001). Biology of *Giardia lamblia*. *Clinical microbiology reviews*, 14(3), 447–475. <https://doi.org/10.1128/CMR.14.3.447-475.2001>
- Aguirre, G., Bueno, R., & De Lima, I. (2003). *Ocurrencia de Giardia sp y Cryptosporidium sp en una estación de tratamiento de agua (ETACAPIM FINO), Sao Paulo, Brasil*. *Revista Peruana de Parasitología*, 16(1), 47-50.
- Alarcón, M. A., Beltrán, M., Cárdenas, M. L., & Campos, M. C. (2005). Recuento y determinación de viabilidad de *Giardia spp.* y *Cryptosporidium spp.* en aguas potables y residuales en la cuenca alta del río Bogotá. *Biomédica*, 25(3), 353-365. <https://doi.org/10.7705/biomedica.v25i3.1360>
- Alum, A., Absar, I. M., Asaad, H., Rubino, J. R., & Ijaz, M. K. (2014). Impact of environmental conditions on the survival of *Cryptosporidium* and *Giardia* on environmental surfaces. *Interdisciplinary perspectives on infectious diseases*, 2014. <https://doi.org/10.1155/2014/210385>
- Angulo, G. B., & Sánchez, E. A. H. (2015). Aspectos actuales de las infecciones emergentes y reemergentes. *Revista Mexicana de Patología Clínica y Medicina de Laboratorio*, 62(3), 174-182.
- Baird, R., & Bridgewater, L. (2017). *Standard methods for the examination of water and wastewater*. 23rd edition. Washington, D.C.: American Public Health Association., Water Environment Federation.
- Betancourt, W. Q., & Rose, J. B. (2004). Drinking water treatment processes for removal of *Cryptosporidium* and *Giardia*. *Veterinary parasitology*, 126(1-2), 219-234. <https://doi.org/10.1016/j.vetpar.2004.09.002>
- Cardona Arias, J. A., & Bedoya Urrego, K. (2013). Frecuencia de parásitos intestinales y evaluación de métodos para su diagnóstico en una comunidad marginal de Medellín, Colombia. *Iatreia*, 26(3), 257-268.

- Castillo, A., & Rovira, D. (2020). El agua como factor de riesgo para la transmisión de protozoarios y helmintos. *Revista Plus Economía*, 8(1), 47-67.
- Cermeño, J., Arenas, J., Yori, N., & Hernández, I. (2008). *Cryptosporidium parvum* y *Giardia lamblia* en aguas crudas y tratadas del estado Bolívar, Venezuela. *Universidad, Ciencia y Tecnología*, 12(46), 39-42.
- Einarsson, E., Svärd, S. G., & Troell, K. (2015). UV irradiation responses in *Giardia intestinalis*. *Experimental parasitology*, 154, 25-32.
<https://doi.org/10.1016/J.EXPPARA.2015.03.024>
- Farias, E. W. C., Gamba, R. C., & Pellizari, V. H. (2002). Detection of *Cryptosporidium spp.* oocysts in raw sewage and creek water in the city of São Paulo, Brazil. *Brazilian Journal of Microbiology*, 33(1), 41–43.
<https://doi.org/10.1590/S1517-83822002000100008>
- Franco, R. M. B., Rocha-Eberhardt, R., & Cantusio Neto, R. (2001). Occurrence of *Cryptosporidium oocysts* and *Giardia* cysts in raw water from the Atibaia river, campinas, Brazil. *Revista Do Instituto de Medicina Tropical de Sao Paulo*, 43(2), 109–111.
<https://doi.org/10.1590/S0036-46652001000200011>
- Gajadhar, A. A., & Allen, J. R. (2004). Factors contributing to the public health and economic importance of waterborne zoonotic parasites. *Veterinary Parasitology*, 126(1-2), 3-14.
<https://doi.org/10.1016/j.vetpar.2004.09.009>
- Garzón, M. C. M., Vásquez, A. O., Villegas, J. B., & Obando, F. S. (2016). Estimación de la frecuencia de infección por *Giardia intestinalis* en comunidades indígenas y afros de Colombia: estudio de corte transversal. *Medicina*, 38(1), 10-24.
<https://revistamedicina.net/ojsanm/index.php/Medicina/article/view/112-2/1043>
- Guzman Barragan, B. L., & Nava Tobar, G. (2015). *Enfermedades Vehiculizadas por Agua-EVA e Índice de Riesgo de la Calidad-IRCA. Colombia 2014*.
[https://www.ins.gov.co/sivicap/Documentacin SIVICAP/2015 Enfermedades Vehiculizadas por Agua 2014.pdf](https://www.ins.gov.co/sivicap/Documentacin%20SIVICAP/2015%20Enfermedades%20Vehiculizadas%20por%20Agua%202014.pdf)
- ISO. (2008). Water quality — Sampling — Part 5: Guidance on sampling of drinking water from treatment works and piped distribution systems. *International Standard Organisation*, 2008(ISO 5667-5:2008).
- ISO. (2014). *Water quality - Sampling - Part 6 Guidance on sampling of rivers and streams (ISO 5667-6:2014)*.

- ISO. (2016). Water quality - Enumeration of *Escherichia coli* and coliform bacteria - Part 1: Membrane filtration method for waters with low bacterial background flora ISO 9308-1:2014/Amd 1:2016. In *International Organization for Standardization (ISO)*, Geneva, Switzerland.
- LeChevallier, M. W., & Norton, W. D. (1995). *Giardia and Cryptosporidium* in raw and finished water. *Journal - American Water Works Association*, 87(9), 54–68. <https://doi.org/10.1002/j.1551-8833.1995.tb06422.x>
- Lora-Suarez, F., Marin-Vasquez, C., Loango, N., Gallego, M., Torres, E., Gonzalez, M. M., ... & Gómez-Marín, J. E. (2002). *Giardiasis* in children living in post-earthquake camps from Armenia (Colombia). *BMC Public Health*, 2(1), 1-6. <https://doi.org/10.1186/1471-2458-2-5>
- Manrique-Abril, F. G., Tigne, B. Y., Bello, S. E., & Ospina, J. M. (2006). Agentes causantes de diarrea en niños menores de 5 años en Tunja, Colombia. *Revista de salud pública*, 8(1), 88-97. <https://doi.org/10.1590/s0124-00642006000100008>
- Medina Lozano, A., García Montoya, G., Galván Díaz, A. L., & Botero Garcés, J. (2009). Prevalencia de parásitos intestinales en niños que asisten al Templo Comedor Sagrado Corazón Teresa Benedicta de la Cruz, del barrio Vallejuelos, Medellín, 2007. *Iatreia*, 22(3), 227-234.
- Meierhofer, R., & Wegelin, M. (2005). *Desinfección Solar del Agua*. <https://www.sodis.ch/methode/anwendung/ausbildungsmaterial/index>
- Ministerio de la protección social. (2007). Resolución 2115 de 2007. *Gaceta Oficial*, 1, 23. https://www.minambiente.gov.co/images/GestionIntegraldelRecursoHidrico/pdf/Legislación_del_agua/Resolución_2115.pdf.
- MINSALUD. (2015). Encuesta Nacional De Parasitismo Intestinal En Población Escolar Colombia, 2012 – 2014. In *Revista Facultad Nacional de Salud Pública*. <https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/VS/PP/ET/encuesta-nacional-de-parasitismo-2012-2014.pdf>
- Nakashima, F. T. (2021). *Espécies de Cryptosporidium spp. em humanos e outros animais na américa latina: revisão sistemática e metanálise*, Universidade Federal Fluminense. <https://app.uff.br/riuff/handle/1/23162>

- Ogura, A. P., & Sabogal-Paz, L. P. (2021). Detection and alkaline inactivation of *Cryptosporidium* spp. oocysts and *Giardia* spp. cysts in drinking-water treatment sludge. *Journal of Water Process Engineering*, 40, 101939.
<https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2021.101939>
- Omarova, A., Tussupova, K., Berndtsson, R., Kalishev, M., & Sharapatova, K. (2018). Protozoan parasites in drinking water: A system approach for improved water, sanitation and hygiene in developing countries. *International journal of environmental research and public health*, 15(3), 495. <https://doi.org/10.3390/ijerph15030495>
- Salamandane, C., Lobo, M. L., Afonso, S., Miambo, R., & Matos, O. (2021). Occurrence of Intestinal Parasites of Public Health Significance in Fresh Horticultural Products Sold in Maputo Markets and Supermarkets, Mozambique. *Microorganisms*, 9(9), 1806.
<https://doi.org/10.3390/microorganisms9091806>
- Shepherd, K. M., & Wyn-Jones, A. P. (1996). An evaluation of methods for the simultaneous detection of *Cryptosporidium* oocysts and *Giardia* cysts from water. *Applied and Environmental Microbiology*, 62(4), 1317–1322. <https://doi.org/10.1128/aem.62.4.1317-1322.1996>
- The British Standards Institution. (2006). Water quality - Sampling for microbiological analysis. *BSI Standards Publication, 2006(EN ISO 19458:2006)*.
- Tzipori, S., & Griffiths, J. K. (1998). Natural history and biology of *Cryptosporidium parvum*. *Advances in Parasitology*, 40, 5-36.
[https://doi.org/10.1016/S0065-308X\(08\)60116-5](https://doi.org/10.1016/S0065-308X(08)60116-5)
- USEPA. (2012). Method 1623.1: *Cryptosporidium* and *Giardia* in Water by Filtration/IMS/FA EPA 816-R-12-001. *United States Protect Agency*, 83.
<http://water.epa.gov/scitech/drinkingwater/labcert/upload/epa816r12001.pdf>
- Velasco, C. A., Méndez, F., & López, P. (2011). Cryptosporidiosis in Colombian children with HIV/AIDS infection. *Colombia Medica*, 42(4), 418–429.
<https://doi.org/10.25100/cm.v42i4.942>
- World Health Organization. (2017). *Guidelines for drinking-water quality, 4th edition, incorporating the 1st addendum*.
<https://www.who.int/es/publications/i/item/9789241549950>

Zhanay Medina, M. D. R. (2014). *Presencia de Cryptosporidium spp. en pacientes con virus de inmunodeficiencia humana (vih/sida), con síndrome diarréico agudo, Hospital Regional Isidro Ayora de Loja, mayo-julio 2014* (Doctoral dissertation, Universidad de Guayaquil. Facultad de Ciencias Médicas. Escuela de Graduados). <http://repositorio.ug.edu.ec/handle/redug/46819>

Zúñiga, O. E. O., Vargas, F. J. M., & Toro, M. K. (2018). Incidencia del río Bogotá en la calidad microbiológica del agua del río Magdalena, municipio de Flandes (Tolima). *Revista Luna Azul (On Line)*, (47), 114-128.

<https://doi.org/10.17151/luaz.2019.47.7>