



Evaluación de la calidad fisicoquímica y microbiológica del agua lluvia para los potenciales usos domésticos. Caso de estudio: Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia

Evaluation of the Physicochemical and Microbiological Quality of Rainwater for Potential Domestic Uses. Case Study: Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia

Joan Amir Arroyave-Rojas¹, María Elena González-Duque², Carlos Andrés Medina-Restrepo³

Tipo de Artículo: investigación.

Recibido: 14/11/2023. **Aprobado:** 20/11/2024. **Publicado:** 12/12/2024

Resumen: El uso del agua está determinado por su disponibilidad y calidad. En este contexto resulta crucial buscar fuentes alternativas, como la captación del agua lluvia. Por ello, se instaló un sistema piloto de cosecha de agua lluvia en la Institución

Universitaria Colegio Mayor de Antioquia y se evaluó la calidad físico-química y microbiológica del agua recolectada. Esta presentó un deterioro en su calidad, asociado al arrastre de partículas materia fecal presentes en los tejados, con una turbiedad

¹ Autor correspondiente: Joan Amir Arroyave-Rojas. Mayor título: Magíster en Desarrollo Sostenible. Filiación institucional: Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia. País: Colombia, Ciudad: Medellín. Correo electrónico: joan.arroyave@colmayor.edu.co

² Autor correspondiente: María Elena González-Duque. Mayor título: Especialista en Gestión Ambiental. Filiación institucional: Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia. País: Colombia, Ciudad: Medellín. Correo electrónico: maria1.gonzalez@colmayor.edu.co

³ Autor correspondiente: Carlos Andrés Medina-Restrepo. Mayor título: Doctor en Estudios Organizacionales. Filiación institucional: Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia. País: Colombia, Ciudad: Medellín. Correo electrónico: carlos.medina@colmayor.edu.co

promedio de 3.82 UNT y un pH promedio de 6.65. En cuanto a alcalinidad y conductividad, se obtuvieron valores similares a los de aguas claras. Los parámetros microbiológicos evidenciaron alteraciones por la presencia de microorganismos como coliformes totales y fecales (*E. coli*), *Enterococcus faecalis* y *Pseudomonas aeruginosa*. En conclusión, el agua lluvia recolectada presenta alteraciones físico-químicas y microbiológicas comparables a las de aguas naturales con presencia de partículas y microorganismos.

Palabras clave: Calidad del agua lluvia; cosecha de agua lluvia; fuente alternativa de agua; aprovechamiento de agua lluvia; gestión ambiental.

Abstract: The use of water is determined by availability and quality. It is important to look for alternative sources of water, such as rainwater harvesting. A pilot rainwater harvesting system was installed at the I.U. Colegio Mayor de Antioquia and the physicochemical and microbiological quality of the water was evaluated. The collected rainwater presents a deterioration in the physicochemical and microbiological quality associated with the process of dragging particles and feces that appear on the roofs; with average turbidity of 3.82 NTU and average pH of 6.65. For alkalinity and conductivity, values like clear waters were found; The microbiological parameters show deterioration due to the presence of microorganisms such as Total and Fecal Coliforms (*E. coli*), *Enterococcus faecalis* and *Pseudomonas aeruginosa*. In conclusion, the collected rainwater presents alterations in physicochemical and microbiological quality similar to natural water with the presence of particles and microorganisms.

Keywords: Rainwater quality, rainwater harvesting, alternative water source, rainwater use, environmental management.

I. Introducción

El agua es uno de los recursos naturales renovables más importantes para el desarrollo de la humanidad. Constituye un elemento esencial para las funciones metabólicas de los seres vivos, la regulación hidrometeorológica, la variabilidad climática, entre otros procesos fundamentales. Históricamente, la gestión del agua se ha centrado en su calidad, mediante acciones de prevención y tratamiento de los niveles de contaminación [1, 2, 3] que pueden afectar tanto a los cuerpos de agua como los vertimientos [1, 4, 5].

El crecimiento urbano y las formas de construcción asociadas conllevan una creciente demanda de bienes y servicios ambientales [6], debido a la necesidad de proveer alimentos, suelo, energía, agua, entre otros [7, 8]. La expansión de las ciudades implica el uso intensivo del suelo para edificaciones e infraestructuras, lo que incrementa la superficie construida y reduce la permeabilidad del suelo. Esta transformación favorece la rápida concentración del agua lluvia y dificulta su drenaje adecuado [9, 10]. A medida que las ciudades se desarrollan, estas problemáticas se agudizan, especialmente ante eventos de precipitación extrema asociados a la variabilidad climática derivada del cambio climático [11]. Como consecuencia, se presenta un incremento en la escorrentía, avenidas torrenciales, inundaciones [10] y, en algunos casos, la anegación de zonas bajas [12].

Sin embargo, la captación de agua lluvia y la evaluación de sus posibles usos, contribuyen a mitigar estas problemáticas [9], al tiempo que otorgan un valor agregado. Esta práctica ofrece múltiples beneficios sociales y económicos, como la prevención de pérdidas humanas y materiales asociadas a eventos de vulnerabilidad y riesgo, así como la reducción de costos mediante el aprovechamiento de una fuente alternativa de agua de bajo costo [3, 13, 14]. Además, disminuye la presión sobre los ecosistemas cercanos al reducir la demanda de agua proveniente de fuentes naturales.

El uso irracional del agua genera numerosos impactos ambientales, entre ellos desequilibrios ecológicos [15], pérdida de biodiversidad, problemáticas de deforestación y desertización, disminución de la oferta ambiental del recurso hídrico, contaminación de fuentes de agua, entre otras problemáticas [7]. En este contexto, contribuir al mejoramiento del desempeño ambiental de las edificaciones [3], así como a la disminución de los impactos ambientales y la demanda del recurso hídrico [14, 16], resulta fundamental. Para ello, se deben promover fuentes alternativas y programas de ahorro y uso eficiente del agua [5, 7, 17, 18], lo cual puede ayudar a reducir la presión sobre el suministro de agua potable [14, 19, 20], reducir los vertimientos de aguas residuales, disminuir los costos asociados a los servicios públicos, y fortalecer el uso de fuentes alternativas de abastecimiento [5, 12, 14, 21, 22].

A partir de la reunión de Marrakech, promovida por la Organización de las Naciones Unidas (ONU), se ha impulsado la mejora del desempeño ambiental en los sectores productivos mediante estrategias como la Producción Más Limpia – PML. Esta iniciativa aborda temas como la ecoeficiencia, la contaminación y la acelerada pérdida de recursos naturales, considerados indicadores de ineficiencias en los procesos de producción y en el uso de productos y servicios [14, 16]. En la medida en que estas ineficiencias se prevengan mediante la implementación de alternativas de carácter preventivo, los sectores no solo mejoran su desempeño ambiental, sino que también obtienen beneficios económicos [3, 12, 14].

La construcción sostenible, en concordancia con la normatividad nacional, se define como el conjunto de medidas pasivas y activas aplicadas al diseño y construcción de edificaciones, orientadas a alcanzar los porcentajes mínimos de ahorro de agua y energía establecidos en la resolución 0549 de 2015. Esta normativa está dirigida al mejoramiento de la calidad de vida de los habitantes y al de prácticas de responsabilidad ambiental y social [17].

Por otro lado, la construcción sostenible implica la adopción de alternativas de gestión ambiental, ingeniería, construcción y arquitectura orientada a hacer estos procesos más amigables con el ambiente [3]. Busca que las edificaciones sean más eficientes en el uso y demanda de los recursos empleados, y que se minimicen los impactos ambientales generados por las salidas del sistema, como los Residuos de Construcción y Demolición – RCD's, vertimientos y consumos energéticos, entre otros. Todo ello con el propósito de mejorar las condiciones de calidad de vida de las comunidades y de la sociedad en general.

La captación de agua de lluvia es un método accesible para obtener agua destinada al consumo humano y/ o uso agrícola [5, 14, 21, 22]. En diversas regiones del mundo con niveles altos o medios de precipitación, donde no se dispone de agua en cantidad y/ o calidad suficiente para el consumo humano, se recurre a esta fuente como alternativa de abastecimiento [5, 23]. El agua lluvia es interceptada, recolectada y almacenada en depósitos para su posterior distribución y uso, según los fines previstos. Diversas investigaciones proponen su aplicación en actividades agrícolas, pecuarias, domésticas [14, 24, 25, 26, 27] y no domésticas [19, 28, 29, 31], con énfasis en usos como el riego, la limpieza, la descarga de sanitarios y el aseo general [12, 28, 29, 31]. Asimismo, se observan tendencias crecientes hacia su incorporación como fuente de abastecimiento.

En la cosecha del agua lluvia con fines domésticos, es común utilizar las superficies de los techos para su captación, lo que contribuye a minimizar la contaminación del agua debido a su cercanía con los puntos de consumo [5, 18]. Adicionalmente, los excedentes de agua pueden destinarse al riego de pequeñas áreas verdes para la producción de alimentos que complementen la dieta. La captación de agua con fines agrícolas requiere superficies de mayor extensión, generalmente impermeables, con el fin de recolectar la mayor cantidad de agua, acorde con la demanda hídrica de los cultivos que se desean abastecer mediante esta fuente alternativa [22].

A nivel mundial, ha existido una constante preocupación por la calidad del agua destinada al consumo, ya que esta determina la viabilidad de sus distintos usos. En el caso del agua lluvia como fuente alternativa, diversos estudios han evidenciado la relevancia de evaluar su contaminación fisicoquímica [14, 31] y su inocuidad, a fin de establecer su idoneidad para diferentes aplicaciones [12, 32-36]. En zonas industriales y urbanas, se han identificado concentraciones de diversos contaminantes que, al ser arrastrados por la lluvia o la escorrentía sobre las cubiertas de las edificaciones, terminan disueltos o suspendidos en el agua.

La calidad del agua condiciona sus potenciales usos. A nivel mundial, diversas investigaciones se han enfocado en cuantificar la disponibilidad del agua lluvia captada [5,12]; sin embargo, actualmente se concentran principalmente en evaluar su calidad desde una perspectiva fisicoquímica, mediante parámetros como pH, turbidez, color, conductividad, sólidos disueltos, sólidos totales, sólidos suspendidos, alcalinidad, dureza, nitritos, nitratos, algunos metales de interés sanitario [5, 14, 25, 29] y contaminantes emergentes [28]. En distintos estudios se han reportado alteraciones en las concentraciones de algunos de estos parámetros, lo que limita su uso directo [25, 29], aunque permite caracterizar la calidad del agua lluvia en diferentes contextos. De igual forma, se ha investigado la calidad microbiológica del agua lluvia recolectada, a través de indicadores como coliformes totales, mesófilos, coliformes fecales, *enterococos fecales* y *pseudomonas aeruginosa* [14, 26, 28, 32, 35], evidenciándose deterioro por presencia de materia fecal en las cubiertas de las zonas evaluadas. Lo anterior dificulta el uso del agua lluvia para consumo humano, orientándola hacia otros fines como la descarga de baterías sanitarias, el riego o las labores de limpieza [5,14, 28, 29].

Valorar y utilizar el agua lluvia como fuente alternativa de recurso hídrico contribuye al cumplimiento de varios Objetivos de Desarrollo Sostenible – ODS 6: Agua limpia y saneamiento, y del ODS 11: Ciudades y comunidades sostenibles.

II. Materiales y métodos

Para el desarrollo experimental se instaló un sistema piloto para la captación de aguas lluvias, con un área aferente de captación de 30 m², ubicada en una de las cubiertas de techo de la Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia. El sistema estuvo compuesto por dos tanques plásticos con capacidad de 1000 L cada uno, interconectados mediante una tubería de una pulgada de diámetro (Figura 1). La instalación se complementó conectando todos los bajantes de cuatro pulgadas de la red de agua lluvia a los reservorios [5]. La calidad de agua lluvia recolectada se evaluó de acuerdo con la metodología definida en los Análisis de Aguas y Aguas Residuales de los Standard Methods [37, 38], identificándose los parámetros de turbiedad, conductividad eléctrica, pH y alcalinidad, conforme a la normativa de calidad de agua para consumo humano [39, 40].

Figura 1. Sistema de captación de agua lluvia en la I.U Colegio Mayor de Antioquia





Nota: elaboración propia.

El periodo de recolección de datos de calidad del agua lluvia se desarrolló entre los meses de agosto de 2017 y marzo de 2019. En total, se analizaron fisicoquímicamente 90 muestras de agua lluvia, correspondientes a los eventos de precipitación ocurridos durante dicho periodo. Una vez tomada cada muestra, se procedía al vaciado y lavado del sistema, quedando este listo para el siguiente evento de lluvia. Por otro lado, se evaluaron parámetros fisicoquímicos en dos muestras de agua al comienzo de la temporada de lluvias, entre febrero y marzo de 2019, considerando que en el comienzo de dichas temporadas se presentan las condiciones más desfavorables para la calidad del agua, dado que durante la época de sequía se acumula material particulado en las cubiertas, lo cual deteriora la calidad del agua lluvia [25, 29]. En estas muestras se determinaron los parámetros de turbiedad, color aparente, pH, alcalinidad, dureza total, cloruros, sulfatos, hierro, nitratos y algunos metales pesados señalados en la literatura por su relevancia sanitaria y su impacto en la salud, como cadmio, aluminio, plomo y zinc [25, 26, 27, 36, 40]. Las muestras fueron analizadas en un laboratorio externo acreditado por el IDEAM, con el fin de validar los resultados obtenidos, empleando los procedimientos de los *Standard Methods* [37].

Por otro lado, se evaluaron periódicamente parámetros microbiológicos con el objetivo de determinar el deterioro de la calidad microbiológica del agua lluvia debido al contacto con la superficie de captación, así como cuantificar el grado de contaminación que permite establecer su aptitud para el consumo humano conforme a la normatividad nacional [39, 40] y otras referencias adicionales. Los parámetros microbiológicos analizados fueron coliformes totales, coliformes fecales (*E. coli*), *Enterococcus faecales*, aerobios mesófilos y *pseudomonas aeruginosa*, mediante la técnica de filtración por membrana, de acuerdo con el *Standard Methods* [36, 37, 38, 41]. Posteriormente, se construyó una línea de tiempo con los datos recolectados, en la cual se calcularon el promedio y la desviación estándar de cada parámetro de calidad del agua, y finalmente se compararon con los valores permisibles establecidos en la normatividad vigente [39, 40].

III. Resultados y discusiones

En la Tabla 1 se presentan los valores promedio de los parámetros fisicoquímicos medidos en campo para el agua lluvia captada en el sistema piloto instalado en la I.U. Colegio Mayor de Antioquia. Las muestras se recolectaron durante la mayoría de los eventos de precipitación que permitieron la captación de agua, alcanzando un total de 90 muestras analizadas. Este número supera el tamaño muestral requerido, calculado con un nivel de confianza del 92% y un margen de error del 8%.

Tabla 1. Determinación de parámetros fisicoquímicos al agua lluvia en la I.U. Colegio Mayor de Antioquia

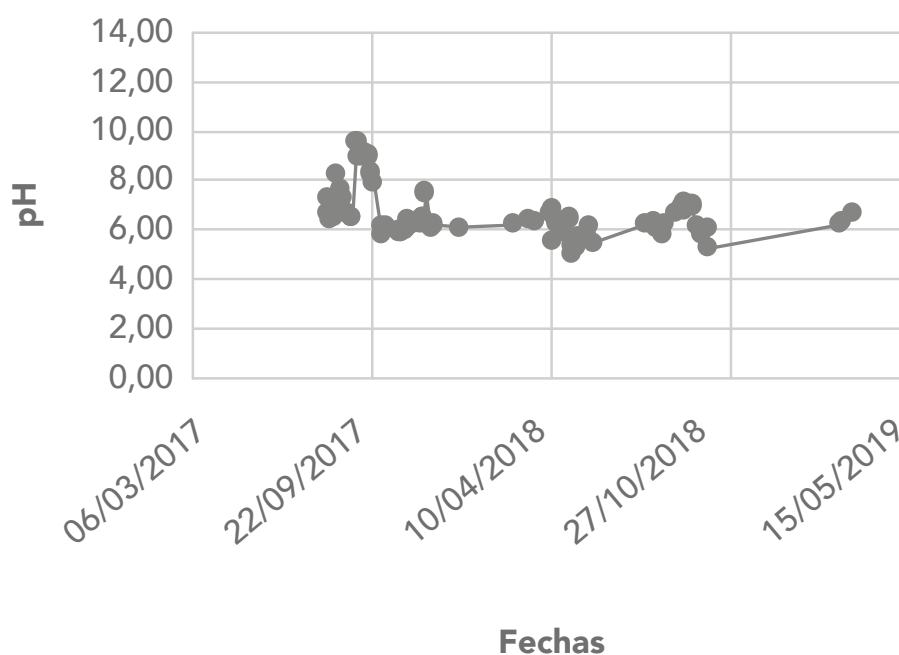
Parámetro	Concentración Promedio	Desviación Estándar
Turbiedad (UNT)	3,82	1,80
pH	6,65	1,01
Conductividad (μS)	33,3	22,4
Alcalinidad (mg/L CaCO ₃)	8,0	2,9

Nota: Elaboración propia.

Como se observa en la Tabla 1 y en la Figura 2, el pH promedio de las muestras analizadas fue de 6,65, con una desviación estándar de 1,01, lo cual indica una variabilidad de aproximadamente una unidad de pH entre las mediciones. Este valor promedio sugiere que no se presenta un fenómeno signifi-

cado de lluvia ácida o acidificación de la precipitación, dado que se encuentra por encima del umbral de pH 5,6, establecido como criterio para definir la presencia de lluvia ácida. Estos resultados coinciden con lo reportado en otros estudios [5,12,14, 25].

Figura 2. pH del agua lluvia captada en la I.U. Colegio Mayor de Antioquia



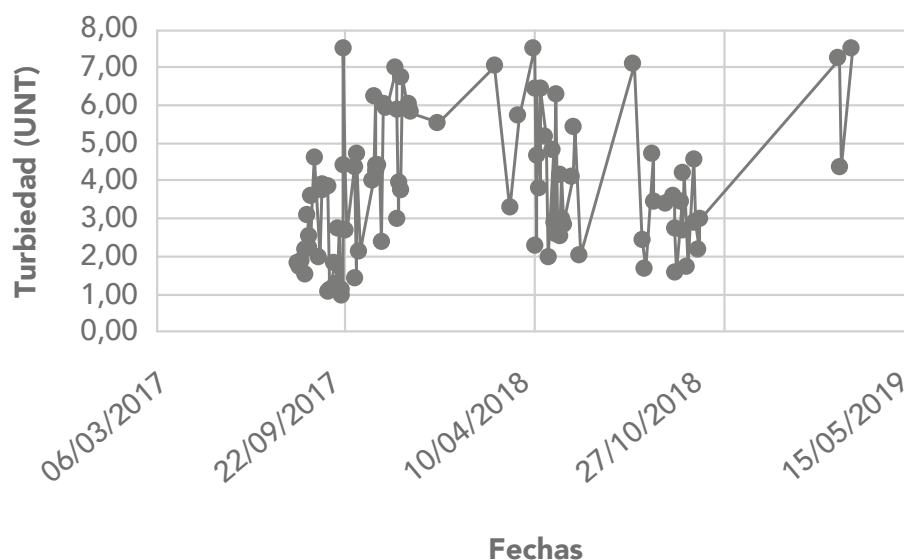
Nota: elaboración propia.

Adicionalmente, como se muestra en la Tabla 1 y en la Figura 3, la turbiedad del agua lluvia recolectada presentó un valor promedio de 3,82 UNT, con una desviación estándar de 1,80 UNT. Esta se atribuye al efecto de limpieza y arrastre de las primeras lluvias al inicio de cada temporada, que movilizan depósitos de suciedad, hojas, heces de aves, material particulado y otras impurezas acumuladas en las superficies de las cubiertas de las edificaciones.

Tal como se aprecia en la Figura 1, el área aferente de captación de agua lluvia del sistema piloto en la I.U. El Colegio Mayor de Antioquia se encuentra aledaña a árboles de gran altura, así como a vías arteriales de alto tráfico vehicular como las carre-

ras 78 y 80. Esta ubicación favorece el depósito de impurezas en las cubiertas, lo que se traduce en un aumento de la turbiedad del agua durante las primeras precipitaciones. Por otro lado, el valor promedio registrado (3,82 UNT) supera el límite máximo permisible establecido por la normatividad colombiana [32, 33], lo cual indica la necesidad de implementar procesos de acondicionamiento previo para algunos usos potenciales del agua lluvia en la institución. Esto resulta especialmente relevante considerando que parámetros como en la I.U. Colegio Mayor de Antioquia, toda vez que el color y la turbiedad inciden directamente en la percepción organoléptica del agua y pueden limitar su aceptación para determinar fines.

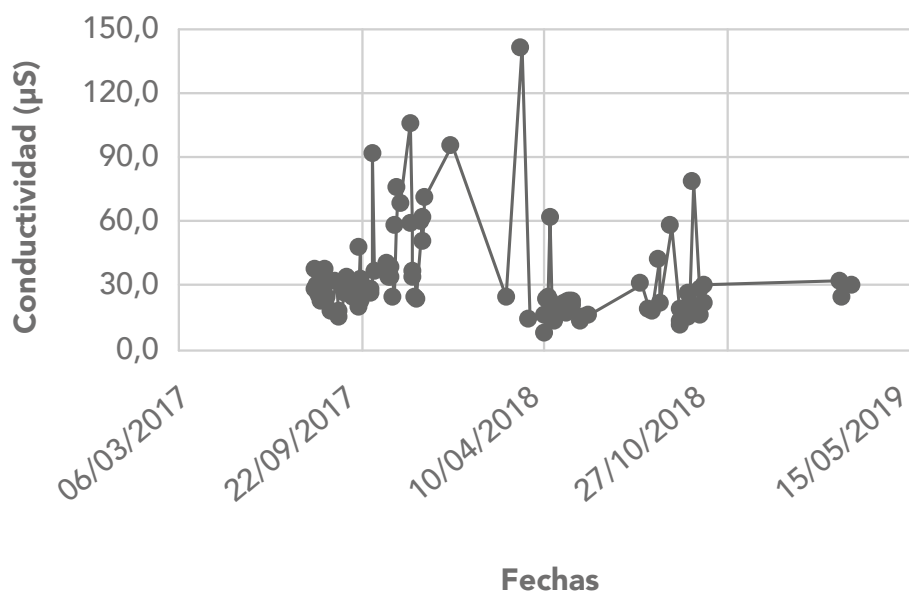
Figura 3. Turbiedad del agua lluvia captada en la I.U. Colegio Mayor de Antioquia



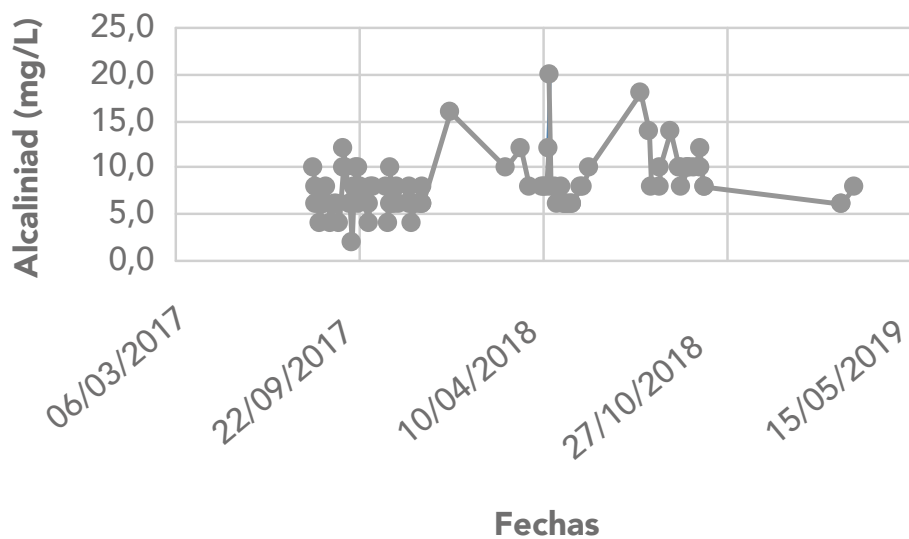
Nota: elaboración propia.

Como se observa en la Tabla 1 y la Figura 4, la conductividad eléctrica del agua lluvia presentó un valor promedio de 33,3 μS , con una desviación estándar de 22,4 μS , lo cual evidencia una variabilidad significativa en los datos. Esta variabilidad se relaciona con el efecto de lavado o arrastre de las primeras lluvias. No obstante, los valores de conductividad eléctrica registrados son relativamente bajos en comparación con los observados en cuerpos de aguas naturales, lo que es consistente con los hallazgos reportados en otros estudios [25, 29, 42].

Adicionalmente, como se muestra en la Tabla 1 y en la Figura 5, se obtuvo un valor promedio de alcalinidad de 8,0 mg/L de CaCO_3 , con una desviación estándar de 2,9 mg/L de CaCO_3 . Este valor es bajo en comparación con el de aguas naturales, lo que indica que no se presenta un arrastre significativo de iones, ni desde la atmósfera ni desde la superficie aferente de captación del agua lluvia. Estos resultados coinciden con los reportados en otros estudios [27, 29].

Figura 4. Conductividad eléctrica del agua lluvia captada en la I.U. Colegio Mayor de Antioquia

Nota: elaboración propia.

Figura 5. Alcalinidad del agua lluvia captada en la I.U. Colegio Mayor de Antioquia

Nota: elaboración propia.

Para fortalecer el diagnóstico de la calidad fisicoquímica del agua lluvia, se realizó el análisis de dos muestras recolectadas durante las primeras lluvias de los meses de febrero y marzo de 2019, correspondientes a la transición entre la temporada seca y la temporada de lluvias. En este periodo se espera una mayor carga de partículas y contaminantes debido al efecto de barrido y limpieza de los materiales depositados sobre las cubiertas y techos de la I.U. Colegio Mayor de Antioquia. Por lo anterior, en la Tabla 2 se consignan los resultados del análisis fisicoquímico realizado por un laboratorio externo acreditado por el IDEAM, con el fin de validar los resultados obtenidos.

Como se observa en los resultados de la Tabla 2, se evidencia un deterioro en la calidad del agua lluvia en los parámetros organolépticos, particularmente en el color aparente (15,5 y 23,0 UPC) y la turbiedad (11,0 y 5,0 NTU). Asimismo, se registraron valores de pH de 5,12 y 5,31, que indican una acidez significativa, en concordancia con lo establecido en la normatividad vigente [32, 33].

Por otro lado, al analizar la presencia de sulfatos ($<5,00$ mg $(\text{SO}_4)/\text{L}$) y nitratos ($<6,20$ mg NO_3/L), se observa que ambos parámetros están por debajo del límite de detección de la técnica empleada. Esto permite afirmar que, a pesar de que el estudio se llevó a cabo en una zona urbana con niveles en algunos casos significativos de contaminantes atmosféricos, no se evidencia un deterioro en la calidad del agua lluvia atribuible a la presencia de los gases de azufre y nitrógeno disueltos en el agua [28, 29, 42].

Al observar los resultados de dureza, se evidencia que esta es muy baja, por lo que el agua lluvia recolectada puede clasificarse como un agua blanda, con una baja concentración de cationes como calcio, magnesio y manganeso, típicos de la disolución de estos iones a partir de formaciones geológicas. Por lo tanto, se puede afirmar que no hay un arrastre significativo de cationes (calcio, magnesio y manganeso) desde la atmósfera ni desde los depósitos que pudieran encontrarse en las cubiertas.

Para los demás iones analizados: cadmio total ($<0,050$ mg Cd/L), aluminio ($<0,1$ mg Al/L), cloru-

ros ($<5,00$ mg Cl/L), hierro total ($<0,200$ mg Fe/L), plomo total ($<0,005$ mg Pb/L) y zinc total (0,239 y 0,136 mg Zn/L), se registraron niveles inferiores a los establecidos por la normatividad colombiana [33]. Estos resultados se correlacionan con los bajos niveles de conductividad eléctrica reportados en la Tabla 1 y 2, así como en la Figura 4.

Tabla 2. Análisis fisicoquímico del agua lluvia recolectada en la I.U. Colegio Mayor de Antioquia

Parámetro	Resultado Muestra (20 febrero 2019)	Resultado Muestra (1 marzo 2019)
Cadmio total (mg Cd/L) N	$<0,050$	$<0,050$
Dureza total (mg CaCO_3/L)	8,7	13,4
Aluminio (mg Al/L)	$<0,1$	$<0,1$
Alcalinidad, pH final titulación (U de pH)	4,32	4,38
Cloruros (mg Cl/L)	$<5,00$	$<5,00$
Alcalinidad total (mg CaCO_3/L)	$3,10 \pm 0,20$	$3,38 \pm 0,21$
Color aparente (UPC)	15,5	22,3
Hierro total (mg Fe/L)	$<0,200$	$<0,200$
Nitratos (mg NO_3/L)	$<6,20$	$<6,20$
pH 25°C (unidades de pH)	5,12	5,31
Plomo total (mg Pb/L)	$<0,005$	$<0,005$
Sulfatos (mg $(\text{SO}_4)/\text{L}$)	$<5,00$	$<5,00$
Turbiedad (NTU)	11	5
Zinc Total (mg Zn/L)	0,239	0,136

Nota: elaboración propia.

Para determinar la calidad microbiológica del agua lluvia captada en el sistema piloto en la I.U. Colegio Mayor de Antioquia, se recolectaron muestras de agua en la mayoría de los eventos de precipitación. En total, se obtuvieron y analizaron 38 muestras de agua, en las cuales se evaluaron los parámetros

microbiológicos de coliformes totales, coliformes fecales, coliformes fecales (*E. coli*) mesófilos, *Enterococcus faecales* y *Pseudomonas aeruginosa*. En la Tabla 3 se consignan los valores promedio obtenidos para cada uno de estos parámetros.

En la Tabla 3 se observa que, durante el periodo de recolección de muestras de agua lluvia en el sistema piloto de la I.U. Colegio Mayor de Antioquia, se presentó contaminación por microorganismos, evidenciada por la presencia de mesófilos y coliformes totales. Este resultado se explica por el contacto del agua lluvia con la superficie de captación y recolección.

Por otra parte, se evidencia la presencia de indicadores microbiológicos de origen fecal, como los coliformes fecales y *Enterococcus faecales*, asociados a la deposición de heces de diferentes animales, como aves, roedores, entre otros, sobre las cubiertas [25, 27, 29, 42]. Esta situación limita considerablemente los posibles usos del agua lluvia, ya que la presencia de microorganismos patógenos favorece la transmisión de enfermedades de origen hídrico. Por lo tanto, esta agua no es apta para el consumo humano.

Tabla 3. Determinación de parámetros microbiológicos al agua lluvia en la I.U. Colegio Mayor de Antioquia

Coliformes Totales (UFC/100mL)	Coliformes Fecales (UFC/100mL)	Mesófilos (UFC/100mL)	Enterococcus fecales (UFC/100mL)	<i>Pseudomonas aeruginosa</i> (UFC/100mL)
>200	>200	>200	>200	>200

Nota: elaboración propia.

De acuerdo con la calidad del agua lluvia registrada durante el periodo de estudio, se trata de un recurso que presenta algunas alteraciones en su composición, lo que limita sus usos potenciales. A pesar de ello, es claro que puede emplearse en actividades que no requieran su ingesta, como la limpieza, el aseo, el vaciado de sanitarios, el lavado de superficies y otros usos similares. De igual forma, pueden evaluarse procesos de tratamiento que favorezcan

la remoción de sustancias responsables del color y la turbiedad, así como la eliminación de microorganismos indicadores de contaminación fecal y otros patógenos. Si se logra acondicionar o potabilizar esta agua, podrían ampliarse sus posibles usos en la Institución, incluso para consumo humano.

IV. Conclusiones

La construcción sostenible y todas las diversas estrategias de gestión ambiental, se pueden implementar para disminuir los impactos ambientales y la demanda de bienes y servicios ambientales. Contribuyen a mejorar el desempeño ambiental de las instituciones, las empresas y la sociedad en general, en la búsqueda permanente de lograr las metas propuestas en los Objetivos de Desarrollo Sostenible – ODS.

La captación o cosecha y el empleo del agua lluvia, como fuente alternativa de recurso hídrico, puede contribuir al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible 6 y 11, agua limpia y saneamiento, y ciudades y comunidades sostenibles. De igual forma, la construcción sostenible y muchas de sus estrategias se han consolidado como mecanismos de resiliencia frente a fenómenos asociados a la gestión del riesgo.

En el caso de la captación de agua lluvia, apoya a disminuir el riesgo de avenidas torrenciales, equidad al acceso de servicios básicos, inundaciones y otros fenómenos. Su implementación, según el contexto promueve el desarrollo sostenible y facilita el acceso de las comunidades a servicios públicos de bajo costo, al tiempo que disminuye la demanda sobre las fuentes hídricas que abastecen los sistemas de acueducto de municipios y ciudades.

El agua lluvia captada en la I.U. Colegio Mayor de Antioquia presenta alteraciones en la calidad físico-química y microbiológica similares a las de un agua natural, con presencia de partículas y microorganismos. Esto se debe a que el proceso de barrido que genera el agua lluvia sobre las cubiertas y techos arrastra material particulado depositado, hojas y materia orgánica de la cobertura de árboles aledaños, heces de aves, entre otras fuente de

contaminación, las cuales deterioran la calidad del agua captada o cosechada en las cubiertas de la Institución. Sin embargo, no se evidencia un deterioro que sobrepase los niveles establecidos en la normatividad nacional [32] respecto a los iones y metales presentes en atmósferas urbanas con actividad industrial.

El aprovechamiento del agua lluvia en la I.U. Colegio Mayor de Antioquia para usos potenciales que no requieran agua potable o apta para consumo humano disminuye la demanda de bienes y servicios ambientales asociados al recurso hídrico. Se recomienda la adecuación o construcción de una red ecológica destinada al riego, actividades de aseo y lavado, que no exigen altos estándares de calidad del agua para su ejecución.

V. Referencias

- [1] J. A. Arroyave-Rojas, L. F. Garcés-Giraldo, A. Arango-Ruiz y C. M. Agudelo-López, "Degradación del colorante tartrazina mediante fotocatalisis homogénea empleando lámpara de luz ultravioleta", *Revista Lasallista de Investigación*, vol. 5, n° 2, pp. 6-12, 2008.
- [2] J. A. Arroyave-Rojas, L. F. Garcés-Giraldo, A. Arango y C. Agudelo, "La Tartrazina, un colorante de la industria agroalimentaria, degradado mediante procesos de oxidación avanzada", *Revista Lasallista de Investigación*, vol. 5, n° 1, pp. 20 – 27, 2008.
- [3] J. A. Arroyave-Rojas, L. F. Garcés-Giraldo y A. F. Cruz-Castellanos, "Comparación de tecnologías avanzadas de oxidación (TAO's) para la degradación del pesticida Mertect", *Nova: Publicación científica en ciencias biomédicas*. Vol. 9 n° 15, pp. 1-112, 2011.
- [4] J. A. Arroyave-Rojas, L. F. Garcés-Giraldo, A. Arango-Ruiz, C. M. Agudelo-López, C.M., "Photo degradation of the tartrazine dye by means of photofenton, using an ultraviolet light lamp", *Revista Lasallista de Investigación*. vol. 5, N° 2, pp. 6-12, 2008.
- [5] J. A. Arroyave-Rojas, J. C. Díaz-Vélez, D. Vergara y N. David-Macías, "Evaluación económica de la captación de agua lluvia como fuente alternativa de recurso hídrico en la Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia", *Revista Producción + Limpia*, vol. 6, N° 1, pp. 76-84, 2011, disponible en http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S190904552011000100007&lng=e&nrm=iso&tIng=es
- [6] C. J. Granero, S. M. Ferrando, A. M. Sánchez y B. C. Pérez, *Evaluación de impactos ambientales. Guía metodológica para la redacción de estudios de impactos ambientales*, 2 ed., España: Fundación Confemetal, 2015.
- [7] C. Bedoya, *Construcción sostenible para volver al camino*, Colombia: Biblioteca Jurídica Diké, 2011.
- [8] C. M. Bedoya, *Del residuo al material. Minería a la inversa*, Colombia: Biblioteca Jurídica Diké, 2015.
- [9] J. Stedinger, "Statistical Methods for Assessing Flood Risk and the Climate Change Challenge", *Revista de Ingeniería*, [serial online], vol. 36, pp. 48-53.
- [10] I. Douglas, K. Alam, M. Maghenda, Y. McDonnell, L. McLean, J. Campbell, "Unjust waters: climate change, flooding and the urban poor in Africa", *Environment & Urbanization*, [serial online], vol. 20 N° 1, pp. 187-205, 2008.
- [11] M. Alam, C. Siwar, A. Jaafar, B. Talib, "Climatic changes and household food availability in Malaysian east coast economic region", *Journal of Developing Areas*, [serial online], vol. 50 N° 5, pp. 143-155, 2016.
- [12] T. Grabowski, K. Jozwiakowski, A. Bochniak, A. Micek, "Changes in the Amount of Rainwater in the Roztocze National Park (Poland) in 2001–2020 and the Possibility of Using Rainwater in the Context of Ongoing Climate

Variability", Water, vol. 14, N° 9, 2022. <https://doi.org/10.3390/w14091334>

- [13] J. A. Arroyave-Rojas y L. F. Garcés-Giraldo, "Tecnologías Ambientalmente Sostenibles", Revista Producción + Limpia, vol. 1, N° 2. pp. 78 -86, 2007.
- [14] J. A. Arroyave-Rojas, Evaluación de la cantidad, calidad fisicoquímica y microbiológica del agua lluvia para los potenciales usos domésticos. Caso de estudio: Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia, [Tesis de Maestría], ITM Institución Universitaria, Medellín, Colombia, 2022.
- [15] F. Rahel, J. Olden, "Assessing the Effects of Climate Change on Aquatic Invasive Species" Conservation Biology, [serial online], vol. 22 N° 3, pp. 521-533, 2008.
- [16] C. M. Bedoya, Construcción sostenible. Para volver al camino, Medellín, Colombia: Biblioteca Jurídica Diké, 2007.
- [17] Resolución 0549 de 2015. Por la cual se reglamenta el Capítulo 1 del Título 7 de la parte 2, del Libro 2 del Decreto 1077 de 2015, en cuanto a los parámetros y lineamientos de construcción sostenible y se adopta la Guía para el ahorro de agua y energía en edificaciones, 2015. Consejo Colombiano de Construcción Sostenible.
- [18] Decreto 1285. Por el cual se modifica el Decreto 1077 de 2015, Decreto Único Reglamentario del Sector Vivienda, Ciudad y Territorio, en lo relacionado con los lineamientos de construcción sostenible para edificaciones, 2015, Ministerio de Vivienda, Ambiente y Desarrollo territorial.
- [19] E. A. Cano, Agua lluvia para uso no potable en edificios de vivienda en altura. Incidencias legales, ambientales, técnicas y económicas, [Tesis de Maestría], Universidad Nacional de Colombia, Naranjal, Medellín, Colombia, 2016.
- [20] Norma técnica colombiana NTC 1500: Código Colombiano de fontanería, Colombia: Icontec, 2004.
- [21] Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente, "Guía de diseño para captación del agua de lluvia", Lima, Perú, 2001.
- [22] N. Palacio, Propuesta de un sistema de aprovechamiento de agua lluvia, como alternativa para el ahorro de agua potable, en la Institución Educativa María Auxiliadora de Caldas, Antioquia. Colombia, 2010.
- [23] M. Silvero, J. E. Hoyos y J. A. Ocaña, "Water sustainable management for buildings", Actas Universitarias vol. 22 N° 8, pp. 12 – 18, 2012.
- [24] O. E. Ospina-Zúñiga y H. Ramírez-Arcila, "Evaluación de la calidad del agua de lluvia para su aprovechamiento y uso doméstico en Ibagué, Tolima, Colombia", Ingeniería Solidaria, vol. 10, N° 17, pp. 125 - 138, 2014.
- [25] H. Ramírez-Arcila y O. E. Ospina-Zúñiga, "Evaluation of Rainwater Quality for its Utilization and Domestic Use in the City of Ibagué, Tolima, Colombia", Ing. Solidar, vol 10, n° 17, pp. 125-137, 2014, doi: 10.16925/in.v9i17.812
- [26] J. A. Calvopiña-Beltrán, S. M. Guerra-Punina y N. P. Grefa-Alvarado, "Calidad de agua lluvia almacenada de los techos de las viviendas para el consumo humano", "Revista Multidisciplinaria Perspectivas Investigativas, vol. 4, pp. 175-183, 2024.
- [27] J. E. Abanto Cubas, E. Morales Rojas y E. A. Díaz Ortiz, "Calidad de agua de lluvia en prototipos de captación en las comunidades nativas de Tunants y Yahuahua, Amazonas – Perú", Revista de la Universidad del Zulia, Año 13 n° 36. Pp. 189-199, 2022. <http://dx.doi.org/10.46925/rdluz.36.13>

- [28] T. Grabowski, K. Jozwiakowski, A. Bochniak, P. Stachyra, B. Radlinski, "Assessment of Rainwater Quality Regarding Its Use in the Roztocze National Park (Poland)—Case Study", *Appl. Sci.*, vol. 13, 6110, 2023. <https://doi.org/10.3390/app13106110>
- [29] A. Lempart-Rapacewicz, J. Zakharova, E. Kudlek "Rainwater Quality Analysis for Its Potential Recovery: A Case Study on Its Usage for Swimming Pools in Poland" *Sustainability*, vol. 15, 15037, 2023. <https://doi.org/10.3390/su152015037>
- [30] E. A. Cano y C. M. Bedoya, "Agua lluvia para uso no potable en edificios de vivienda en altura en Medellín. Incidencias técnicas, económicas, legales y ambientales", *Encuentro Internacional de Educación en Ingeniería ACOFI*, Cartagena, 2016.
- [31] M. Pacheco, "Avances en la Gestión Integral del Agua Lluvia (GIAL): Contribuciones al consumo sostenible del agua, el caso de "Lluviatl" en México", *Revista internacional sostenibilidad, tecnología y humanismo*, n° 3, 2008. pp. 39-57, 2008.
- [32] A. Daoud, K. Swaileh, R. Hussein y M. Matani, "Quality assessment of roof-harvested rainwater in the West Bank, Palestinian Authority", *Journal of Water and Health* [serial online], vol. 9 N° 3 pp. 525-533, 2011.
- [33] W. Ahmed, T. Gardner, S. Toze, "Microbiological Quality of Roof-Harvested Rainwater and Health Risks: A Review", *Journal Of Environmental Quality*, [serial online], vol. 40 N° 1 pp. 13-21, 2011.
- [34] W. Ahmed, A. Goonetilleke, T. Gardner, "Implications of faecal indicator bacteria for the microbiological assessment of roof-harvested rainwater quality in southeast Queensland, Australia", *Canadian Journal of Microbiology*, [serial online], vol. 56 n° 6 pp. 471-479, 2010.
- [35] W. Ahmed, L. Hodggers, J. Sidhu, S. Toze, "Fecal indicators and zoonotic pathogens in household drinking water taps fed from rainwater tanks in Southeast Queensland, Australia", *Applied and Environmental Microbiology*, [serial online]. Vol. 78 N° 1 pp. 219-226, 2012.
- [36] S. L. Ávila de Navia, S. M. Estupiñán Torres, L. M. Caicedo Cardona, X. M. Calderón Cárdenas y W. L. Rubiano Aguirre, "Diagnóstico de la calidad bacteriológica del agua del Humedal Córdoba, Bogotá", *Nova*, vol. 17 n° 31 pp. 87-95, 2019.
- [37] APHA – AWWA – WPCF, *Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales*, Madrid, España: Ediciones Diaz de Santos, 1992.
- [38] G. R. Marín, *Fisicoquímica y microbiología de los medios acuáticos. Tratamiento y control de calidad de aguas*, Madrid, España: Ediciones Diaz de Santos, 2003.
- [39] Resolución 2115. Por medio de la cual se señalan características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano. 2007. Bogotá, Colombia. Ministerio de la Protección Social y Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.
- [40] Decreto 1575. Por el cual se establece el Sistema para la Protección y Control de la Calidad del Agua para Consumo Humano". Bogotá, Colombia. 2007. Ministerio de la Protección Social y Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.
- [41] J. Arboleda, *Teoría y práctica de la purificación del agua*, Bogotá, Colombia: McGraw – Hill, 2000.
- [42] A. D. Galván, J. A. López, L. A. Rangel y J. J. Barrientos, (2019). *Estudio de la Calidad del Agua de Lluvia Captada en la ENMSGTO, Jóvenes en la ciencia*, vol. 5, N° 1, 2019.