

Artículo de investigación

Cómo citar: S. Escalante; J. Fajardo. “Evaluación de la descontaminación de la cuenca media del río Bogotá y alternativas de solución con humedales artificiales”. *Inventum*, vol. 17, n.º 33, pp. 27-43, julio - diciembre 2022
doi: 10.26620/uniminuto.inventum.17.33.2022.27-43

Editorial: Corporación Universitaria Minuto de Dios - UNIMINUTO.

ISSN: 1909-2520
eISSN: 2590-8219

Fecha de recibido: 01 de junio de 2022
Fecha de aprobado: 01 de julio de 2022
Fecha de publicación: 15 de julio de 2022

Conflicto de intereses: los autores han declarado que no existen intereses en competencia.

Evaluación de la descontaminación de la cuenca media del río Bogotá y alternativas de solución con humedales artificiales

Evaluation of the decontamination of the middle basin of the Bogotá River and solution alternatives with artificial wetlands

Avaliação da descontaminação da bacia média do rio Bogotá e alternativas de solução com pântanos artificiais

Resumen

La contaminación del río Bogotá es una de las principales problemáticas medioambientales ocasionadas por actividades antrópicas industriales o domésticas, que alteran las características fisicoquímicas y biológicas del medio. Por tal motivo, este artículo presenta una breve descripción y posterior evaluación de las acciones realizadas por el Sistema BochiCAR y, de los planes de identificación de conexiones del Observatorio Regional Ambiental y de Desarrollo Sostenible, a partir de las lecturas de los documentos de referencia, como la “Sentencia del río Bogotá” y el correspondiente fallo de una acción popular (expediente 25000-23-27-000-2001-90479-01 del Consejo de Estado); gestión eficaz de la información analizada y datos históricos hallados permiten proponer una alternativa de descontaminación de la cuenca mediante la implementación de humedales artificiales, que, a través del rizo de las plantas sembradas, transformen los contaminantes en nutrientes y mejoren la calidad ambiental de la ciudad.

Palabras clave: cuenca media, Índice de calidad del agua (ICA), contaminación, sentencia del río Bogotá, medidas de gestión, rizodegradación, fitorremediación, descontaminación.

Sergio Escalante Castro

Programa de Especialización en gerencia ambiental Universidad Libre
e-mail: sergio-escalantec@unilibre.edu.co
ORCID: 0000-0003-4633-7752

Jonathan Arley Fajardo Pineda

Programa de Especialización en gerencia ambiental Universidad Libre
e-mail: jonathana-fajardop@unilibre.edu.co
ORCID: 0000-0001-7679-6883



Abstract

The contamination of the Bogotá River is one of the main environmental problems caused by industrial or domestic anthropic activities, which alter the physical, chemical and biological characteristics of the environment. For this reason, this article presents a brief description and subsequent evaluation of the actions carried out by the BochiCAR System and of the connection identification plans of the Regional Environmental and Sustainable Development Observatory, based on the readings of the reference documents, such as the “Bogotá River Judgment” and the corresponding verdict of a popular action (file 25000-23-27-000-2001-90479-01 of the Council of State); Effective management of the analyzed information and historical data found allow us to propose an alternative for the decontamination of the basin through the implementation of artificial wetlands, which, through the curl of the planted plants, transform the pollutants into nutrients and improve the environmental quality of the city.

Keywords: middle basin, Water quality index (ICA), contamination, sentence of the Bogotá river, management measures, rhizodegradation, phytoremediation, decontamination.

Resumo

A contaminação do rio Bogotá é um dos principais problemas ambientais causados por atividades antrópicas industriais ou domésticas, que alteram as características físicas, químicas e biológicas do meio ambiente. Por isso, este artigo apresenta uma breve descrição e posterior avaliação das ações realizadas pelo Sistema BochiCAR e dos planos de identificação de conexão do Observatório Regional de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável, com base nas leituras dos documentos de referência, como o “Sentença do Rio Bogotá” e a correspondente sentença de ação popular (expediente 25000-23-27-000-2001-90479-01 do Conselho de Estado); A gestão eficaz das informações analisadas e os dados históricos encontrados permitem propor uma alternativa para a descontaminação da bacia por meio da implantação de áreas úmidas artificiais, que, por meio do enrolamento das plantas plantadas, transformam os poluentes em nutrientes e melhoram a qualidade ambiental da cidade.

Palavras-chave: bacia média, índice de qualidade da água (ICA), contaminação, sentença do rio Bogotá, medidas de manejo, rizodegradação, fitorremediação, descontaminação.

I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el recurso hídrico es catalogado como el recurso natural más importante para la vida humana, el equilibrio de los ecosistemas y la preservación de las vidas futuras. A pesar de ello, las comunidades no son conscientes de los impactos ambientales y sociales que generan, al no darle el uso adecuado y el tratamiento pertinente cuando se consume este recurso en las diferentes actividades productivas y domésticas.

En Colombia, se estima que solo el 44% de los municipios cuentan con plantas de tratamiento de agua residual. Según el Departamento Nacional de Planeación (DNP), se calcula, que el 66% de los municipios vierten sus desechos sin previo tratamiento a los cuerpos hídricos, aumentando así la carga contaminante de estos y generando problemas de saneamiento [1].

El río Bogotá es el claro ejemplo de los problemas de contaminación en Colombia, debido a las actividades antropogénicas que se llevan a cabo dentro de la cuenca hidrográfica. Las afectaciones inician luego de haber recorrido 10 km de distancia, en el municipio de Villapinzón, por la descarga de vertimientos del sector productivo de curtido de cueros y la carga contaminante continúa aumentando, hasta llegar al casco urbano de Bogotá, en donde se aporta el 84% de la misma. En [2] esta problemática también está asociada a la ineficiente gestión ambiental por parte de las autoridades competentes, como lo son la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR), la Secretaría Distrital de Ambiente (SDA) y el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS), que no han implementado acciones efectivas que contribuyan a descontaminar el río.

La contaminación de la cuenca media acarrea impactos y problemas ambientales, como la destrucción de ecosistemas, la pérdida de flora y fauna silvestre, ya que, de acuerdo con [2], el agua del río Bogotá es usada en las actividades agropecuarias, pero por su alta concentración de químicos, metales pesados y patógenos se convierte en un riesgo para la comunidad.

Con el fin de promover la descontaminación de este ecosistema acuático y terrestre, el Consejo de Estado, mediante la Sentencia AP-25000-23-27-000-2001-90479-01 del 28 de marzo de 2014, estableció que las medidas tomadas se convierten en el punto de partida para que desde la gestión pública se prevea, mitigue, conserve y descontamine el cuerpo hídrico que es afectado por actividades antropogénicas, permitiendo así mejorar la calidad ambiental de la ciudad y de sus habitantes [3].

Adicionalmente, se ha identificado que la problemática de contaminación ha persistido, pues la carga orgánica que se vierte en el río supera en un 44% los estándares que fueron identificados en el Decreto 1594 de junio de 1984 del Consejo de Estado [4], debido a que se continúa con los vertimientos industriales sin un control desde las fuentes originarias, y estos vertimientos, que son descargados desde la zona occidental de la ciudad de Bogotá, incrementan el problema existente debido a las conexiones erradas en el alcantarillado de la ciudad y a la falta de cultura de la ciudadanía para el desecho de residuos en su mayoría sólidos que son depositados en canales y sumideros. Ello se suma a los procesos provenientes de los cerros orientales, que generan sedimentos que ocasionan obstrucción hidráulica del sistema séptico.

Otro problema que se evidencia es el que refiere a las dificultades en el tratamiento de la carga contaminante, a cargo de las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR), en poblaciones aledañas como: Chía, Tocancipá, y otros municipios, en donde los sistemas de tratamiento están principalmente compuestos por lagunas aireadas, lodos activados y lagunas de oxidación [5].

La eficiencia de estos sistemas en la remoción de contaminantes es baja, y por tal motivo, requieren extensos terrenos para su implementación. Por lo anterior, se busca proponer nuevas alternativas que sean efectivas para limpiar las aguas residuales domésticas e industriales de los municipios de la cuenca media del río Bogotá, y para las cuales no se requieran grandes terrenos y elevados costos de operación. Entre estas alternativas, se encuentran los humedales artificiales.

El objetivo del trabajo que se presenta en este artículo fue evaluar la eficacia de las medidas de gestión ambiental y social para la descontaminación de la cuenca media del río Bogotá, en cuanto a los beneficios, debilidades y oportunidades de mejora de las acciones implementadas para la descontaminación del agua, para luego poder comparar los índices de calidad del agua (ICA) registrados por las autoridades ambientales CAR y la SDA antes y después de la declaración de la Sentencia AP-25000-23-27-000-2001-90479-01 del río Bogotá, y llevar a cabo un análisis de la contaminación de la cuenca, con el fin de comprobar la gestión ambiental del río.

Con base en el análisis realizado, es preciso proponer alternativas que permitan aumentar la eficacia en las medidas de gestión ambiental y, de esta manera, disminuir en mayor proporción los diferentes contaminantes que no se lograron tratar en las plantas de tratamiento de

agua residual (PTAR). Los humedales artificiales, como sistemas biológicos, permiten completar este trabajo de descontaminación, mediante el uso de plantas que, logran convertir dichos contaminantes en nutrientes, que luego son devueltos al medio ambiente. Además, es necesario cumplir con lo requerido en la Resolución 0631 de 2015 [6], que establece los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público.

II. METODOLOGÍA

Para determinar la eficiencia de las medidas de gestión ambiental en pro de la descontaminación del río Bogotá, en este trabajo se inició con la identificación, descripción y caracterización de las acciones implementadas, a partir de una revisión bibliográfica sistemática. Para ello, se tuvieron en cuenta tres (3) documentos con referencias sobre la calidad del agua en el río Bogotá y los mecanismos para el monitoreo de este.

Además, para complementar el análisis, se consultaron 20 documentos de diferentes bases de datos, entre ellos, mapas y datos del sitio web oficial del Acueducto de Bogotá, referentes al Plan de Identificación y Corrección de Conexiones Erradas y el Programa de Saneamiento del Río Bogotá, entre otros temas, que se revisaron en conjunto con los reportes técnicos encontrados en los sitios Web de la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca - (CAR), la Secretaría Distrital de Ambiente - SAD y del Observatorio Regional Ambiental y de Desarrollo Sostenible del río Bogotá - ORARBO. Con la información encontrada, se elaboró una matriz que permitió identificar las medidas de gestión y los logros obtenidos, para luego determinar sobre las oportunidades de mejora que se perciben.

Por otra parte, se consultaron los reportes de los índices de calidad del agua (ICA) que se han realizado antes y después de la declaración de la Sentencia AP-25000-23-27-000-2001-90479-01 del río Bogotá, con el fin de comparar los reportes ICA y las acciones que han implementado para la descontaminación de la cuenca, y así determinar la eficacia de las medidas de gestión ambiental ejecutadas. A partir de este análisis, se establecieron recomendaciones para el caso de estudio y se propusieron alternativas de mejora al sistema de gestión ambiental [7].

Por último, se consultó información pertinente a humedales artificiales de flujo superficial y subsuperficial, lo cual permitió conocer los diferentes procesos de fitorremediación que se desarrollan en estos sistemas, a través de ciertas especies de plantas pertenecientes a la sabana de Bogotá. Así mismo, se investigó sobre la eficacia del tipo de humedal respecto al contaminante que se requiere eliminar, considerando las ventajas y desventajas que ofrecen estos sistemas en comparación con los tratamientos convencionales. Esto, con el fin de establecer si los humedales constituyen una alternativa para mejorar la eficacia en los sistemas de gestión convencionales, debido a los bajos costos de implementación, operación, y mantenimiento, esta alternativa permitiría reducir los gastos económicos que el Distrito Capital invierte cada año en mejorar la calidad de vida de los Bogotanos y las condiciones del río, un ecosistema rico en diversidad de flora y fauna que es importante preservar.

III. GENERALIDADES Y PROBLEMÁTICAS DE LA CUENCA MEDIA DEL RÍO BOGOTÁ

La sabana de Bogotá fue en tiempos prehistóricos del Plioceno superior y el Pleistoceno, una gran laguna que contaba con una gran riqueza hídrica tanto superficial como subterránea [8]. Con el paso del tiempo la geomorfología del suelo formó depósitos fluvio-lacustres y lacustres a una altura actual de 2600 m.s.n.m, los cuales evolucionaron dentro de la cordillera de los Andes formando así el sistema hidrográfico del río Bogotá, el cuerpo hídrico más importante de la ciudad.

La complejidad y problemática actual de la contaminación del agua de Bogotá, han sido dos factores que han limitado la calidad de vida de los habitantes de la ciudad, a causa de los conflictos socioambientales ocasionados por el acceso y el uso del agua [9]. A partir de lo expuesto, para el siglo XX y XXI se marcó el inicio de una cloaca para el río de Bogotá y se originó una preocupación por el desarrollo económico y sostenible en la ciudad y por ser este río uno de los más contaminados del mundo, [10].

El río Bogotá se divide en tres microcuencas, alta, media y baja. La cuenca media va desde el sector Puente la Virgen (Cota) hasta el embalse del Muña en Alicachín, lo que comprende un tramo de 90 km según se expone en [11], como puede apreciarse en el mapa que representa la figura 1, donde la zona rosa corresponde a la cuenca media del río.

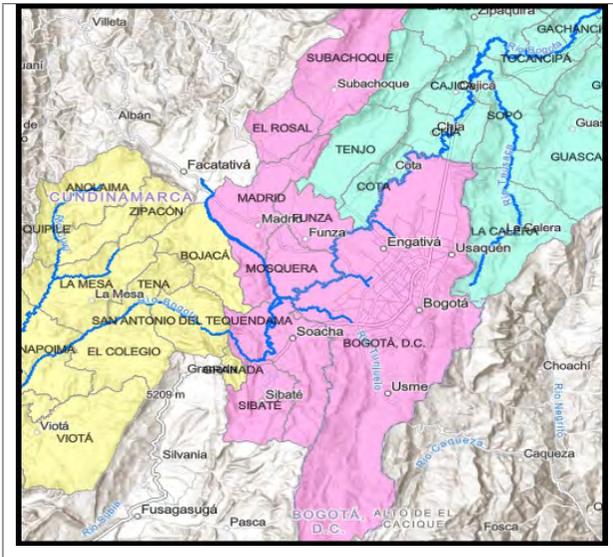


Figura 1. Mapa de la cuenca del Río Bogotá [12]. La zona amarilla corresponde a la cuenca baja; la zona rosa, a la cuenca media, y la zona aguamarina, a la cuenca alta

Fuente: Elaboración propia.

En [13], la cuenca media es la zona en donde se aumenta la carga contaminante del río, ya que pasa por la ciudad, en donde la mayoría de sus industrias no cuentan con plantas de tratamiento eficientes e impiden la gestión adecuada de aguas residuales. Las actividades económicas

que influyen sobre el recurso hídrico son: curtiembres, producción de alimentos, lácteos, cárnicos, elaboración de productos de belleza, fabricación de gases y aceites, textiles, entre otros.

Además, las descargas de las aguas domésticas aumentan los niveles de materia orgánica y de patógenos (coliformes totales), que ocasionan una baja oxigenación del río, como un aumento de residuos sólidos y sedimentos. La población en general desconoce que ello sucede, lo que genera falta de compromiso ciudadano en temas ambientales y sanitarios, lo que a su vez ha llevado a un alto grado de deterioro del río e impide la auto-recuperación de este a corto, mediano y largo plazo [14].

El alto grado de contaminación del cuerpo hídrico causa afectaciones sociales, ambientales y económicas, por lo cual se convierte en un foco para la gestión pública. Así, surgió, la necesidad de formular un mecanismo legal que obligó a las entidades a realizar acciones para la recuperación, restauración y descontaminación del río Bogotá, mediante la declaratoria de la Sentencia AP-25000-23-27-000-2001-90479-01. En la Tabla 1 se mencionan algunas de las medidas de gestión que han implementado los tres actores principales presentes en la cuenca media [15].

Entidad	Acción	Descripción	Logros
Acueducto de Bogotá (EAAB-ESP)	Plan de Identificación y Corrección de Conexiones Erradas (PICCE)	Se basa en la identificación y corrección de conexiones erradas, es decir, zonas en donde las tuberías de aguas residuales están conectadas con el sistema de alcantarillado de agua lluvia, lo que aumenta la carga contaminante en los diferentes cuerpos hídricos que llegan al Río Bogotá. Lo anterior, mediante medidas preventivas, correctiva y de seguimiento y control. El concepto verificado hace referencia a las conexiones cuya ubicación se ha identificado y se realiza el proceso de anilinas para hallar su procedencia.	La EAAB-ESP ha realizado actividades de sensibilización a la comunidad sobre el buen uso y manejo del alcantarillado, a través del sitio web “www.acueducto.com.co”, en donde se puede encontrar documentos educativos, mapas interactivos, con la georreferenciación de las conexiones erradas existentes. Además, cuentan con un tablero de control en donde se hace el seguimiento al estado actual del PICCE mediante gráficas estadísticas. A corte de 31 de diciembre de 2021 se habían identificado 6.370 conexiones erradas, de las cuales 240 estaban verificadas, 252 diseñadas y 5.878 corregidas [16].
Acueducto de Bogotá (EAAB)	Plan de Saneamiento y Manejo de Vertimientos del Río Bogotá	Es un conjunto de programas, proyectos y actividades para garantizar el saneamiento básico y el tratamiento de los vertimientos que son incorporados en el sistema de alcantarillado de Bogotá.	PTAR Salitre: Desde el año 2004, el Acueducto de Bogotá asumió la operación, administración y mantenimiento de la primera fase de la planta de tratamiento residual, que cuenta con el tratamiento primario y cumple con los requerimientos impuestos por la normatividad, como la remoción del 60% de SST y del 40% DBO5, entre otros parámetros. Durante la primera etapa se prestaba el servicio a una población de 2.200.000 habitantes y se realizaba un tratamiento a un promedio mensual de 10.760.020 m ³ de agua residual [17].

Entidad	Acción	Descripción	Logros
		El plan contiene un diagnóstico del alcantarillado, la identificación de todos los vertimientos urbanos y rurales, y la caracterización de cada uno de ellos, las proyecciones de carga contaminante, el monitoreo de los cuerpos hídricos que reciben las descargas, la formulación de indicadores, entre otros.	El 16 de diciembre de 2021 se inició la operación de la segunda fase de la PTAR Salitre. PTAR Canoas: Es considerada la planta de tratamiento residual más gran de Colombia porque tiene una capacidad de 16 m ³ /s, removiendo 600 ton/día de materia orgánica y residuos al río, con lo cual se benefician aproximadamente 7'322.142 habitantes de la zona centro y sur de Bogotá.
CAR	Adecuación hidráulica y recuperación ambiental del río Bogotá	Transformación del río Bogotá mejorando la calidad del agua, reduciendo los riesgos de inundación y recuperando las zonas multifuncionales del río. Las adecuaciones hidráulicas se realizan en una distancia de 68 km en la cuenca media del Río Bogotá, desde Puente la Virgen hasta Alicachín. La adecuación consiste en dragado del cauce, perfilado de taludes, remoción de maleza acuática y reconstrucción de jarillones.	En el año 2017 se terminó la adecuación de los 68 Km cumpliendo así la meta del proyecto, según los indicadores presentados en Observatorio Regional Ambiental y de Desarrollo Sostenible del Río Bogotá [17]. Reducción de inundaciones.
CAR	Contrato 1351 de 2018	Tiene como objetivo implementar un sistema de monitoreo de los niveles piezométricos y de calidad del agua subterránea del río Bogotá. Consultar Principalmente para las cuencas media y alta.	Se cuenta con una red activa de monitoreo de aguas subterráneas, conformada por sondas multiparamétricas y de trasmisión satelital, para el reporte de parámetros como conductividad, temperatura, pH y turbidez, entre otros [18]. También se realizó el modelamiento tridimensional de estructuras sinclinal y de depósitos de terraza presentes en la cuenca.
CAR	Sistema BochiCAR	El sistema BochiCAR es una red de monitoreo de la cuenca media del río Bogotá, conformada por 14 nodos de vigilancia, cada uno cuenta con tres cámaras: una óptica, térmica y una auxiliar. Además, los nodos cuentan con sensores de radar, sensores geo sísmicos de medición de humedad relativa, temperatura y pluviómetro. La vigilancia se realiza desde el Centro de Control y Monitoreo Ambiental CCMA que se encuentra en las instalaciones de la PTAR salitre [19].	En el año 2021 mediante la operación de BOCHICAR se identificaron 1.043 eventos ambientales (vertimientos, quemas a cielo abierto, disposición de residuos, entre otros) y 598 sociales, para un total de 1.641 incidencias en la cuenca media del río Bogotá, de las cuales solo fueron atendidos 28 casos por parte de la Policía Nacional.
CAR	Ampliación de la PTAR salitre	Tiene como objetivo principal el aumento de la capacidad del caudal de agua residual tratado, pasando de 4 m ³ /s a 8 m ³ /s. Además, la optimización de la PTAR con tratamiento secundario y desinfección, ya que en la primera fase solo se contaba con tratamiento primario [20].	Se lleva un avance del 90% del avance de las obras civiles del proyecto. Por otra parte, se estima que se beneficiaran 3'300.000 habitantes con la implementación de este proyecto [21].
SDA	ORARBO	El Observatorio Regional Ambiental y de Desarrollo Sostenible del río Bogotá, es una herramienta que permite conocer la información de la gestión ambiental realizada en el cuerpo hídrico, el fortalecimiento interinstitucional y la cohesión social. También es un sistema que permite conocer el cumplimiento a la sentencia del Río Bogotá [22].	En el periodo del 2017 a 2021, se obtuvieron: <ul style="list-style-type: none"> • 284.326 visitas únicas. • 606 indicadores publicados. • 204 publicaciones de noticias y eventos. • 629 usuarios aperturados. • 429 documentos de interés ambiental.

Entidad	Acción	Descripción	Logros
SDA	SIRío	Es el Sistema de Información de la Cuenca del Río Bogotá, en donde se encuentran los avances de las entidades en cuanto a la gestión ambiental en el río y también las acciones que se desarrollan por medio del Consejo Estratégico de la Cuenca del Río Bogotá (CECH), su propósito es convertirse en una herramienta de toma de decisiones, la participación y la gobernanza. [23].	Se encuentra en proceso de desarrollo para ser el nuevo observatorio del río Bogotá y reemplazar el ORARBO, actualmente la plataforma cuenta con [24]: <ul style="list-style-type: none"> • 17 módulos. • 129 micrositios. • 165 usuarios. • 460 documentos de interés ambiental.

Tabla 1. Acciones implementadas para la descontaminación de la Cuenca Media del Río Bogotá

Fuente: Elaboración propia.

Nota: tabla construida a partir de datos proporcionados por la Corporación Autónoma Regional (CAR), la Secretaría Distrital de Ambiente - (SDA) y la Empresa de Acueducto, Alcantarillado y Aseo de Bogotá - (EAAB), en la cuenca media.

Para estimar el impacto positivo que han tenido las medidas mencionadas, en pro de la descontaminación del cuerpo hídrico, es necesario conocer el comportamiento de la calidad del río en los diferentes años, por lo que, para el desarrollo de esta investigación, se acudió a la consulta de los informes de los boletines del índice de calidad del agua que se detallan a continuación:

Informes de reporte del índice de calidad del agua en la cuenca media del río Bogotá

Con el fin de realizar el monitoreo de la contaminación en el río Bogotá, la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca - (CAR), hizo uso de los índices de calidad del agua (ICA) de los cuerpos hídricos más importantes de su jurisdicción, los cuales contienen la normatividad legal vigente, las generalidades de los parámetros de interés, los métodos de medición y los resultados por cada subzona hidrográfica: Río Bogotá, Río Guayuriba, Río Guavio, Río Garagoa, Río Seco, Río Carare, Río Negro, Río Sumapaz y Río Suarez [25].

En el transcurso de 2007 a 2019, la Corporación hizo el seguimiento a los siguientes parámetros en el Río Bogotá: demanda biológica de oxígeno (DBO₅), oxígeno disuelto (OD), coliformes totales (CT) y sólidos suspendidos totales (SST), según los cuales se evidencia la cuenca media como la zona con mayor carga contaminante y en donde se presentan las concentraciones máximas de las variables, y en el caso del OD la mínima.

Para conocer el comportamiento de la carga contaminante del río Bogotá en función de los parámetros ya mencionados, se elaboraron gráficas con los valores máximos de

DBO₅, CT y SST, y de los mínimos para el OD, reportados en los boletines del índice de calidad del agua publicados [16]. En la figura 2 se evidencia que desde el año 2014 se ha elevado la demanda biológica de oxígeno (DBO₅), a excepción del año 2016, presentando el valor máximo el año 2019 [26].

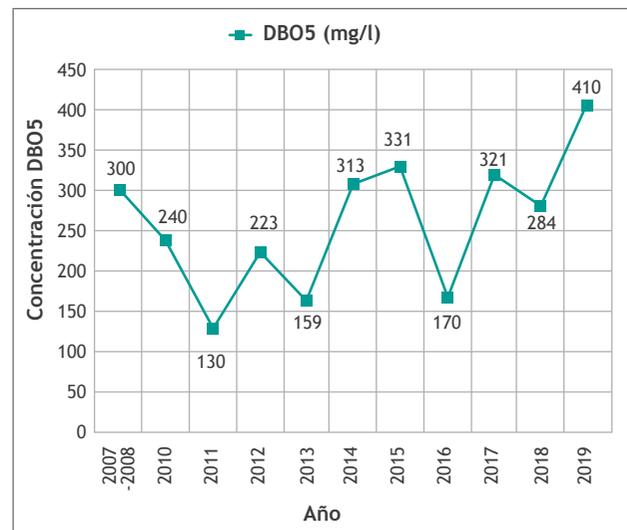


Figura 2. Comportamiento de la DBO₅ entre el periodo de 2007 a 2019

Fuente: figura creada por autores a partir de registros históricos comprendidos entre 2007 a 2019 [27], [28], [29], [30].

Por otro lado, se observa que para el año 2014 el oxígeno disuelto (OD) alcanzó una concentración de 0 mg/l, condiciones que no son aptas para la vida acuática, sin embargo, tras la declaratoria de la sentencia del Río Bogotá, los niveles de OD en el cuerpo hídrico aumentaron considerablemente, hasta llegar a 0,8 mg/l para el año 2019, como se presenta en la figura 3.

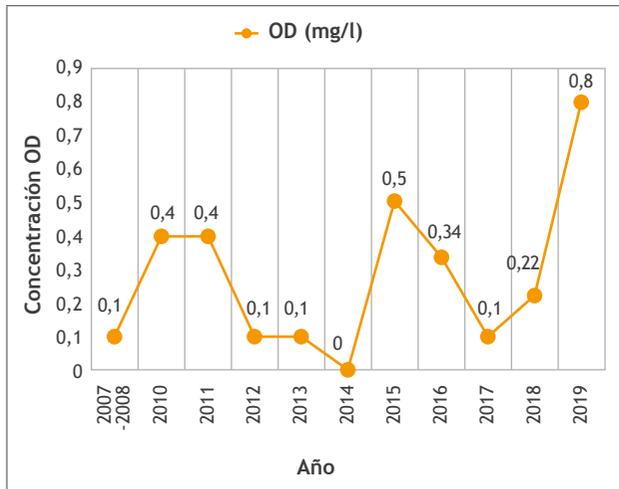


Figura 3. Comportamiento de la OD entre el periodo de 2007 a 2019

Fuente: figura creada por autores a partir de registros históricos comprendidos entre 2007 a 2019 [27], [28], [29], [30].

Además, en la figura 4 se evidencia que los sólidos totales (SST) del 2007 al 2017 tuvieron un comportamiento constante, sin mayores fluctuaciones. Las concentraciones estuvieron en un rango de 500 - 1000 mg/l, a excepción del año 2012, el cual fue de 1300 mg/l. La mayor contaminación por SST se dio en 2018 y 2019.

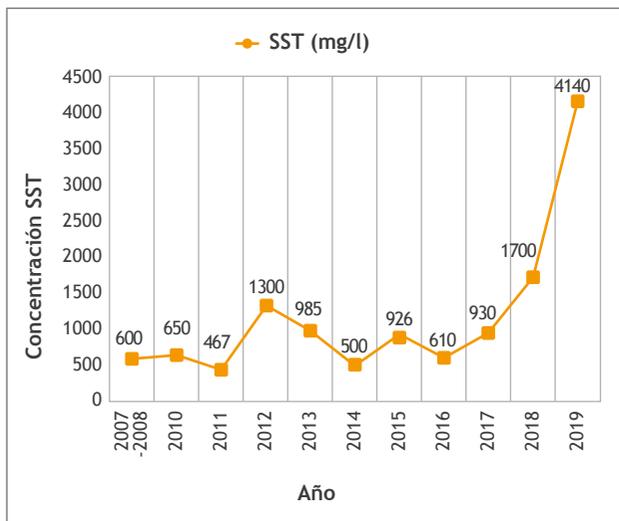


Figura 4. Comportamiento de la SST entre el periodo de 2007 a 2019

Fuente: figura creada por autores a partir de registros históricos comprendidos entre 2007 a 2019 [27], [28], [29], [30].

Así mismo, las máximas concentraciones de coliformes totales (CF) se dieron entre 2007 y 2011, luego disminuyeron considerablemente hasta el año 2015, y después se elevó la carga contaminante.

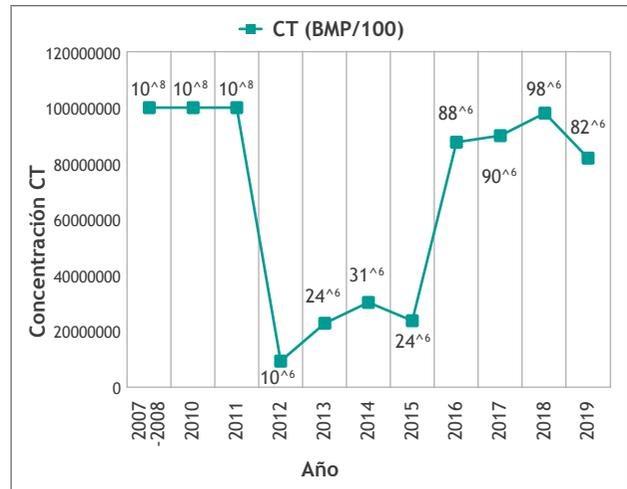


Figura 5. Comportamiento de la CT entre el periodo de 2007 a 2019

Fuente: Adaptada por autores a partir de registros históricos comprendidos entre 2007 a 2019 [27], [28], [29], [30].

Por otra parte, el último boletín de indicadores ICA, realizado por la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca CAR para el año 2020, permite conocer detalladamente el grado de contaminación del río como se presenta en la figura 6.

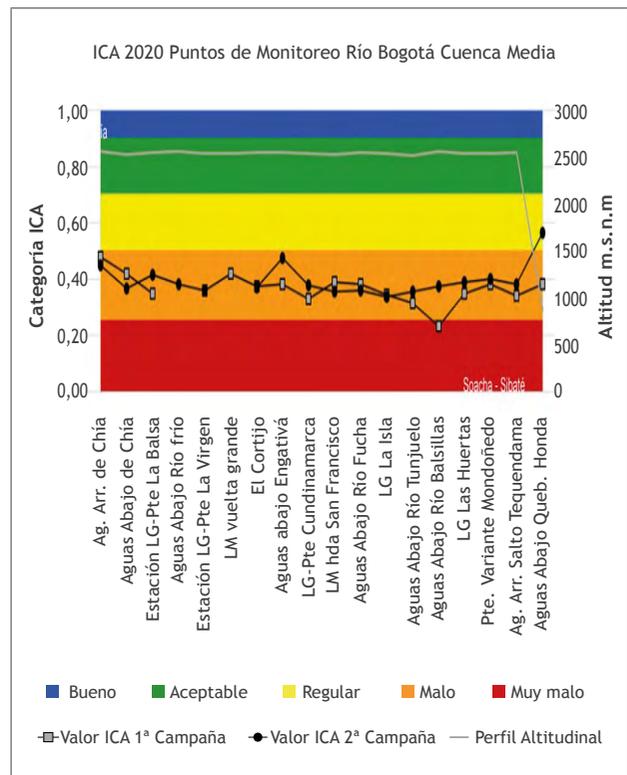


Figura 6. Comportamiento del ICA en la cuenca media del Río Bogotá

Fuente: Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca [31].

El monitoreo se llevó a cabo en dos campañas, con un total de 32 puntos de medición. Se encontró que, en los dos momentos, la mayoría de los muestreos reportan un índice de calidad del agua (ICA) regular y malo. Los puntos malos identificados fueron nueve en la primera campaña y siete puntos malos identificados en la segunda campaña, por tal motivo se recomienda mantener un monitoreo contante y controlado en la cuenca media para obtener mejoras contantes en la medición de datos futuras del río [32].

Gracias a la medición de los ICA se evidencia la importancia de aumentar los esfuerzos para el tratamiento de vertimientos del río Bogotá, ya que a pesar de que han sido enormes, todavía no son suficientes para mejorar la calidad del agua, ya que en la cuenca predominan los vertimientos de origen doméstico e industrial, provenientes de curtiembres, en los sectores que generan una mayor cantidad de vertimientos que impactan negativamente la calidad del agua del río Bogotá.

Lo anterior ocasiona que la ciudadanía haga mal uso del recurso y de los servicios ecosistémicos generados por zonas de protección ambiental, como los humedales, que han sido territorios muchas veces considerados inútiles debido al desconocimiento de las utilidades que generan para el medio ambiente.

IV. HUMEDALES ARTIFICIALES COMO TRATAMIENTO ALTERNATIVO PARA LA DEPURACIÓN DE CONTAMINANTES DE LA CUENCA MEDIA RÍO BOGOTÁ D.C.

La implementación de humedales artificiales es una medida de solución al tratamiento del agua en poblaciones vulnerables y aledañas al río Bogotá. Estos sistemas contruidos por el ser humano tienen poca profundidad, y además, un sembrado de plantas acuáticas que pueden ser del mismo sector en el cual se desea aplicar este tipo de sistemas que ayudan a eliminar los contaminantes mediante procesos naturales de descontaminación [33]. En la figura 7, se puede apreciar un ejemplo de humedal artificial y el funcionamiento de este.

En [35] se señala que los sistemas de humedales artificiales permiten el paso de un flujo y el uso de la fitorremediación, y “pueden aplicarse eficientemente para tratar suelos contaminados con compuestos orgánicos como benceno, tolueno, etilbenceno y xilenos (BTEX); solventes clorados; HAPs; desechos de nitrotolueno; agroquímicos clorados y organofosforados” (p. 59).

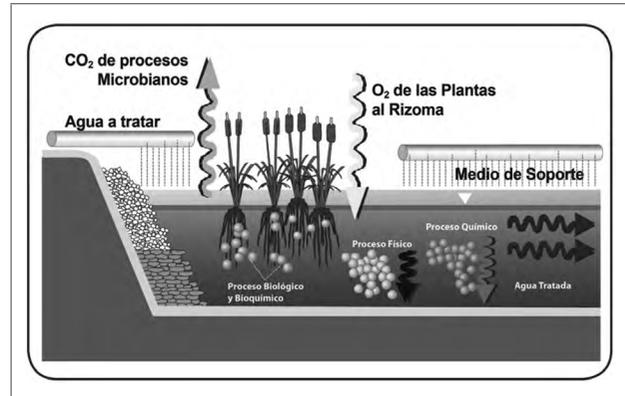


Figura 7. Principales componentes y procesos depurativos en humedales artificiales

Fuente: Sistema de humedales artificiales para el control de la eutroficación del lago del Bosque de San Juan de Aragón [34].

Lo anterior se logra gracias al paso de un flujo de agua superficial y sub superficial por las raíces de las plantas y demás elementos físicos que componen el sistema artificial, logrando la transformación de elementos orgánicos e inorgánicos en nutrientes al suelo además de entre otros procesos internos que están expuestos en la Tabla 2.

Proceso	Mecanismo	Contaminantes
Fito estabilización	Complejación	Orgánicos e inorgánicos
Fito extracción	Hiperacumulación	Inorgánicos
Fito volatilización	Volatilización a través de las hojas	Orgánicos e inorgánicos
Fito inmovilización	Acumulación en la rizosfera	Orgánicos e inorgánicos
Fito degradación	Uso de plantas y microorganismos asociados para degradar contaminantes	Orgánicos
Rizo filtración	Uso de raíces para absorber y adsorber contaminantes del agua	Orgánicos e inorgánicos

Tabla 2. Fitorremediación para la eliminación de contaminantes en humedales artificiales

Fuente: Elaboración propia.

La amplia aplicación que se logra de la fitorremediación, causa que plantas acuáticas macrófitas generen una utilidad tan amplia que, según se afirma en [36] “son un proceso que puede aplicarse tanto in situ como ex situ, permiten la rizodegradación que es un proceso que se da en las raíces de las plantas las cuales transforman los contaminantes en nutrientes a través de las raíces y excretados en el suelo” (p. 59). Una vez que estos contaminantes salen del sistema producen beneficios para el ambiente, como la fitoestabilización en el agua y suelo

mediante la inmovilización de ciertos contaminantes principales que, en su mayoría, son materia orgánica, materia en suspensión, nitrógeno, fosforo, metales pesados, trazas de contaminantes orgánicos, los cuales una vez removidos, son transformados en nutrientes. La remoción de estos contaminantes del río Bogotá es requerida y al respecto deben cumplirse los parámetros de vertimiento de aguas domésticas y que una vez removidos son transformados en nutrientes.

Para lograr la fito estabilización dentro de estos sistemas, se construyen en forma de estanques o embalses que logran que el flujo de agua pase a través de diferentes tipos de vegetación, que puede ser emergida o sumergida y puede variar en gran medida por la profundidad, el tipo de planta a usar y de contaminantes a remover, además de que muchas veces estos estanques se conectan simultáneamente y maximizan los procesos de biorremediación.

En [37] se señala que, “los humedales construidos se pueden clasificar de acuerdo con diferentes criterios, como hidrología (flujo superficial y flujo subterráneo), tipos de macrófitos (flotantes libres, emergentes, y sumergido), y trayectoria del flujo (horizontal o vertical)” (p. 3). Estos tipos de sistemas permiten lograr que se dé una retención y remoción de elementos no deseados en el agua y se tenga una mayor precisión por parte de las plantas y de las capas de sustrato contenidas en el sistema que filtran las partículas de agua a partir de un flujo de agua lento, el cual controla el tiempo de retención del agua a tratar que incide directamente en la remoción requerida de no deseados en el agua, según afirma [38]. Estos pueden ser removidos en una mayor proporción dependiendo del tipo de humedal a implementar (in situ o ex situ), además de las plantas macrófitas que se desee usar, posibilitando así mejorar las propiedades físicas y químicas del agua, el suelo y el aire. A continuación, se da a conocer los tipos de humedales artificiales construidos actualmente.

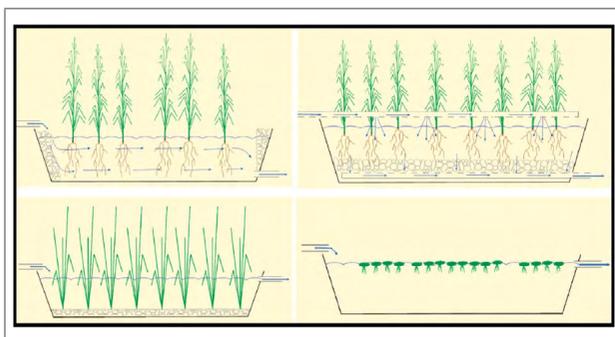


Figura 8. Tipos de humedales construidos: (a) flujo subterráneo horizontal; (b) flujo subsuperficial vertical; (c) flujo superficial con vegetación emergente; (d) flujo superficial con vegetación flotante [39].

Existen dos tipos de humedales que dependen del tipo de zona de circulación del flujo. Los de flujo superficial tienen una lámina de agua expuesta a la atmósfera; en los subsuperficiales no existe una lámina de agua libre en la superficie, sino que el agua atraviesa el sustrato, soporte de la vegetación, además de que degrada los contaminantes por sedimentación y que atraviesan el sustrato de construido a partir de piedras de diferentes tamaños que además de filtrar con las raíces limpian y renuevan el agua [40].

De otra parte, los humedales artificiales a menudo suelen usarse continuamente, lo cual permite combinar caudales que se maximizan en suspensión por sedimentación de sólidos a causa de la relación de volumen y espacio requerida para tratar aguas contaminadas que pueden llegar a usarse en pre-tratamientos y también en la etapa final de proceso en instalaciones como tanques de amortiguamiento y retención, construidos generalmente antes de la descarga a un receptor como un río. En [41] se señala que “las profundidades de estos sistemas se encuentran entre (30-50 cm) lo que varía con relación a las raíces de las plantas que empujan las aguas residuales frescas y reemplazan las aguas residuales tratadas” (p. 3), permitiendo así que prevalezcan las condiciones anaeróbicas, sin embargo, los macrófitos transportan el oxígeno a su zona radicular, lo que genera un efecto rizosférico en la flora interna y externa del sistema.

Este tipo de procesos crea zonas que logran lechos con diferentes niveles de oxigenación y oxidación, además del desarrollo de diferentes microorganismos que absorben las toxinas y nutrientes, con lo cual permiten la proliferación de micro y macro ecosistemas internos que tratan eficazmente el agua [41]. A partir de lo anterior, se puede comprender que las características físicas del humedal, inciden directamente en el agua y los contaminantes, según [42]. Los datos recolectados y adaptados muestran que estas características inciden en factores, como: la localización de la planta, las condiciones climáticas del sitio, las características de calidad del agua afluente y, la calidad del agua efluente deseada, además de las restricciones de calidad de vertido en las aguas tratadas exigidas por las autoridades locales.

Conforme a lo que exponen las Naciones Unidas en la Convención Marco sobre el Cambio Climático [43], es necesario implementar plantas acuáticas que permitan remover estos contaminantes en los humedales artificiales, además de promover nuevas dinámicas en la economía por los servicios ecosistémicos que se ofrecen al ambiente, lo que realmente beneficiaría la recuperación del río Bogotá.

En la Tabla 3 se muestran las plantas más representativas en la cuenca media para el tratamiento de aguas resi-

duales que logran adaptarse a las condiciones climáticas de Bogotá.

Especie	Nombre Latino	Nombre común más usual	Temperatura		Máxima salinidad tolerable ppt	Rango efectivo de pH
			Deseable	Germinación n de las semillas		
Ciperáceas	Carexsp	NA	14-32	NA	NA	5-7,5
	Eleocharissp	NA	NA	NA	NA	NA
	Scirpuslacustris L. (*)	Junci de laguna	18-27	NA	20	4-9
Gramineas	Glycerafluitans (L.) R. Br.	Hierba del maná	NA	NA	NA	NA
	Phragmitesaystralis (Caw) Trin. Ex Steudel (*)	Carrizo	12-23	10-30	45	2-8
Iridáceas	Iris pseudacorus L.	Lirio amarillo, espadaña fina	NA	NA	NA	NA
Jucáceas	Juncussp.	Juncos	16-26	NA	20	5-7,5
Tifáceas	Thyphasp (*)	Eneas aneas espadañas	10-30	12-24	30	4-10

Tabla 3. Plantas aplicadas a humedales, factibilidad del Diseño de un Humedal de Flujo Subsuperficial para el tratamiento de Aguas Residuales Municipales de 30.000 Habitantes [44].

De acuerdo a lo que se presenta en ORARBO, antes de implementar este tipo de proyectos, deben considerarse diversos aspectos, pues muchas veces estos se realizan de forma simbiótica entre las especies de plantas, con el fin de mejorar la eficacia en remover contaminantes. Asimismo, como se afirma en [45] “los humedales artificiales con flujos subsuperficiales logran el proceso de quitar los contaminantes a través de los microorganismos que habitan las raíces de las plantas” (p. 21).

En la misma medida, en [46] se afirma que “los procesos biológicos en los humedales son quizás el proceso más importante que se logra dentro de estos sistemas artificiales” (p. 13), puesto que algunos son nutrientes para las plantas como son los iones de nitrato, amonio, fosfato, nitrógeno, nitrato y amonio, además, estos son absorbidos por la vegetación permitiendo así controlar la propagación y afectación del agua adicional de especies vegetales y animales presentes en el medio ambiente.

Entre los procesos más representativos para la remoción de contaminantes, están la amonificación, la nitrificación y desnitrificación, la fijación de nitrógeno y la asimilación por las plantas, que se pueden dar mediante procesos tanto aerobios como anaerobios, para degradar el nitrógeno a causa de la poca cantidad de oxígeno en el interior del sistema.

“El incremento en la generación de aguas residuales ha obligado a la ingeniería a encontrar y aplicar alternativas de tratamiento de depuración eficientes, autónomas y económicamente viables”. (p. 5). Los beneficios que se obtienen de estas construcciones, permiten lograr ganancias amplias para el cuidado del medio ambiente. En consecuencia, como se verá, a continuación, usar este tipo de tratamiento complementario conlleva a varias ventajas.

Entre las ventajas más representativas que tienen los humedales respecto al tratamiento convencional del campo, es decir, a las plantas de tratamiento de agua residual (PTAR) están las siguientes:

1. No generan grandes costos para su operación y mantenimiento.
2. Alcanzan las eficacias de depuración, de acuerdo con los límites de vertimiento en cuerpos de agua, cumpliendo con los estándares ambientales y legales.
3. Su programa de mantenimiento es más sencillo y fácil de seguir.
4. Son de fácil construcción y explotación, ya no se requieren equipos mecánicos para operación.
5. Promueven nuevos usos para la agricultura que maximizan la producción a bajos costos por reciclaje de aguas al brindar nutrición en los suelos a partir de la transformación de contaminantes proporcionando así servicios ecosistémicos al ser humano.

V. DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Acciones implementadas para la descontaminación de la cuenca media del río Bogotá

De acuerdo con lo consultado, se evidenció que la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca - CAR es el actor que desarrollado el mayor número de proyectos para la recuperación de la cuenca media del Río Bogotá. Sin embargo, se observa que en el sistema BochiCAR la gestión de los eventos no es eficiente, ya que de 1.641 incidencias ambientales y sociales, tan solo 28, es decir, el 1,7% fueron atendidos por la Policía Nacional. Esto da cuenta de la falta de cooperación interinstitucional y de la flexibilidad de la normatividad legal vigente en temas ambientales, que no permiten actuar eficientemente para el control de los impactos ambientales y sociales presentes en el río.

Por otra parte, la CAR, con el desarrollo del megaproyecto de la adecuación hidráulica del río Bogotá, permitió que se disminuyeran las inundaciones en la sabana de Bogotá, debido a que se amplió el cauce del río, con lo cual aumentó la capacidad de conducción hídrica, y a su vez, se redujeron los fuertes olores que se producían por la falta de oxigenación del río. Esto ha traído beneficios para la población aledaña.

Así mismo, se observa que la implementación de herramientas tecnológicas fortalece el control y la prevención de la contaminación del río, a la vez que, permite reforzar el conocimiento de línea base ambiental para mejorar la toma de decisiones en la gobernanza del territorio y la formulación de proyectos.

No obstante, se evidenció que la gran mayoría de medidas se aplican en la fuente receptora y no en los focos de contaminación. Esto debe considerarse, pues, a pesar de que las entidades públicas no son los principales contaminadores del río, sí deben hacer campañas de sensibilización en las diferentes empresas, comunidades y demás actores que influyen sobre el problema.

Actualmente no se cuenta con sistemas de tratamiento que permitan mejorar las condiciones químicas y biológicas del cuerpo hídrico, las medidas que se han adoptado están enfocadas a un tratamiento primario y de las características físicas del río.

Informes de reporte del índice de calidad del agua en la cuenca media del río Bogotá

Como resultado de la investigación se observó que la concentración de los sólidos suspendidos totales y de la demanda biológica de oxígeno se han aumentado a lo largo del periodo 2007 a 2019, mostrando las máximas concentraciones en el último año. Esto en función de que la población en la ciudad de Bogotá ha crecido considerablemente: su población, que en 2005 era de 6'740.859 habitantes, para el 2020 ya era de 8'380.801 habitantes, lo que implica una tasa de crecimiento del 1,5%, siguiendo el análisis demográfico y proyecciones poblacionales de Bogotá [47], sumado a la migración de personas venezolanas, que en el 2019 fueron 174.360, según datos informativos dados por el Departamento Administrativo Nacional de Estadística DANE. Ello significa una mayor carga contaminante de vertimientos domésticos y la generación de sólidos suspendidos totales, además de la escasa conciencia y cultura ambiental de las comunidades aledañas al río que permiten que la contaminación se potencie.

Por otra parte, se encontró que las concentraciones de oxígeno disuelto, aumentaron considerablemente desde el año 2007 (0,1 mg/l) hasta el 2019 (0,8 mg/l). Esto se debe al tratamiento primario que se le da al agua residual en la PTAR Salitre y a la adecuación hidráulica del río, con lo cual se ha logrado dar una mayor aireación del cuerpo hídrico, mejorando así condiciones para la vida de los organismos acuáticos y evitando la proliferación de vectores y enfermedades.

También, el comportamiento de los coliformes totales ha mejorado con el tiempo, ya que, a pesar del incremento de la población, las concentraciones disminuyeron entre el 2007 y el 2019, gracias al funcionamiento de la PTAR Salitre. Además, se espera que haya mayor eficacia en la remoción de este contaminante cuando se termine el proyecto de la ampliación de la PTAR, puesto que se contará entonces con un tratamiento secundario adicional.

Para terminar, en el último boletín de calidad del agua presentado por la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca - (CAR) para el año 2020, se observa que aproximadamente el 70% de los puntos de monitoreo del río Bogotá mostraron una mala calidad del agua, a pesar de haber sido un año atípico por la declaratoria de la emergencia sanitaria del COVID - 19, con lo cual se detuvo temporalmente el sector industrial, que es una de las principales fuentes de contaminación del cuerpo hídrico.

Con base en lo anterior, se consideran las ventajas descritas de, los humedales artificiales como tratamiento convencional [48], los cuales permitirán una completa remoción de contaminantes en el agua. Además, los humedales artificiales horizontales de flujo sub superficial y superficial son una gran alternativa para el tratamiento de agua contaminada presente en la cuenca media del río.

Por consiguiente, se recomienda la implementación de los humedales artificiales, ya que estos generan diferentes servicios ecosistémicos, que pueden clasificarse en servicios de abastecimiento, tales como alimento, agua, servicios benéficos, como regular inundaciones y mejorar la calidad del aire o el agua, servicios de apoyo, que proporcionan espacios vitales para especies vegetales y animales, de modo que permiten conservar la biodiversidad.

VI. CONCLUSIONES

- Las medidas de gestión ambiental que se han implementado para la descontaminación del río Bogotá no han sido eficaces, ya que, como se observó en el año 2020, la mayoría de los puntos de muestreos presentan bajos índices de calidad del agua. Esto se debe a que las acciones se enfocan en tratamientos primarios y físicos, así como en la gestión del conocimiento para la toma de decisiones, que son claramente importantes, pero no tienen gran impacto en la mejora del cuerpo hídrico. Por tal motivo, se requieren proyectos de tratamiento fisicoquímicos para un tratamiento efectivo, empezando por la fuente.
- La fitorremediación, como tratamiento complementario de aguas residuales, de zonas rurales o con dificultad de acceso al alcantarillado de la ciudad, es una gran alternativa que no sólo beneficia al medio ambiente, sino que también puede mejorar la capacidad operativa de las PTAR en la ciudad, propiciando así la preservación y control de los contaminantes presentes en ella. Esto implica un mayor control por parte de las autoridades territoriales como la CAR, el Acueducto, la Secretaría, de Medio Ambiente y, la Alcaldía, entre otras. De esta manera, sería posible, remediar la problemática relacionada con la cobertura del alcantarillado de la ciudad, además de prevenir enfermedades por la contaminación del medio ambiente.
- Los humedales artificiales permiten crear nuevas dinámicas económicas, culturales y ambientales que favorecen los campos de investigación en torno al

uso de la fitorremediación como tratamiento complementario para las PTAR, además de transformar la materia residual en energía que pueda usarse en otros ámbitos económicos con el fin de crear nuevos mercados en zonas de bajos recursos, como son las zonas rurales del Distrito Capital.

VII. RECOMENDACIONES

- Aumentar la cooperación interinstitucional, con el fin de generar proyectos conjuntos que permitan tener un mayor impacto en la descontaminación de la cuenca media del Río Bogotá. Así mismo fortalecer la participación ciudadana mediante campañas de educación ambiental para fomentar la protección, recuperación y conservación del cuerpo hídrico.
- El ser humano requiere implementar nuevas medidas de gestión ambiental, como los humedales artificiales, ya que permitan mitigar la contaminación ambiental presente en el agua, el suelo y el aire mediante procesos de fitorremediación, los cuales generan también servicios ecosistémicos que permiten aumentar la eficacia de remoción de contaminantes en el medio ambiente.
- Se recomienda el uso de tecnologías de monitoreo que permitan incorporar los humedales como sistemas convencionales y que estos se apliquen como herramientas depuradoras de agua residual en las PTAR, de tal manera que se logre, por un lado, reducir los costos de construcción, operación y mantenimiento, y, por otro lado, proteger el medio ambiente de todos los posibles impactos negativos causados por el uso del agua.

REFERENCIAS

- [1] Departamento Nacional de Planeación. (DNP), *Informe de Gestión. 24/5/2022*, de Superintendencia de Servicios Público Domiciliarios Sitio web: <https://www.superservicios.gov.co/sites/default/files/inline-files/rendicioncuentas0111.06.14.pdf>. (2014).
- [2] Mayorga, M. *El agua y el río Bogotá articuladores del territorio "panoramas discontinuos entre fragmentos de gestión e ilusiones de recuperación"*, Sitio web: http://artes.bogota.unal.edu.co/assets/arquitectura-territorio/docs/01_EL_AGUA_Y_EL_RIO_BOGOTA_COL.pdf, (2015).

- [3] Consejo de Estado. *Sentencia AP-25000-23-27-000-2001-90479-01 del Río Bogotá*. 22/01/2022, de Sala de lo contencioso administrativa sección primera Sitio web: <https://www.mincit.gov.co/normatividad/jurisprudencia/sentencia-ap-25000-23-27-000-2001-90479-01.aspx>, (2014).
- [4] Decreto 1594. “Por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 09 de 1979, así como el Capítulo II del Título VI - Parte III - Libro II y el Título III de la Parte III Libro I del Decreto 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos.”. 28/6/2022, de Presidente de la Republica de Colombia Sitio web: <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=18617>, (1984).
- [5] Consejo de Estado. *Información Ambiental para la Gestión Integral de la Cuenca Hídrica del Río Bogotá*. 23/04/2019, de Observatorio Regional Ambiental y de Desarrollo Ambiental del Río Bogotá Sitio web: http://siriobogota.car.gov.co/assets/sentencia_rio_bogota.pdf, (2014).
- [6] Resolución 0631. “Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones”. 28/6/2022, de El Ministro de Ambiente y Desarrollo Sostenible Sitio web: <https://laboratoriodeanalisis.lasalle.edu.co/wcm/connect/LIAC/7bf35b9e-b9ac-45b3-a280-c7dec8b1499d/Resolucion+631-2015.pdf?MOD=AJPERES&CVID=lMo5Mpt>, (2015).
- [7] Corporación Autonomía Regional de Cundinamarca - CAR, *Boletín de Calidad Hídrica 2017. Informe de sobre el cumplimiento de los objetivos de calidad en los ocho subzonas hidrográficas y dos subsiguientes de la jurisdicción CAR*. 8/02/2022, de Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca - CAR Sitio web: <https://www.car.gov.co/uploads/files/5b29580029c10.pdf>
- [8] IDEAM. (2002). *Estudio de la caracterización climática de Bogotá y cuenca alta del río Tunjuelo*. 1/3/2022, de IDEAM Sitio web: <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21135/CARACTERIZACION+CLIMATICA+BOGOTA.pdf/d7e42ed8-a6ef-4a62-b38f-f36f58db29aa>
- [9] Osorio Alejandro. (2008). *La historia del agua en Bogotá: una exploración bibliográfica sobre la cuenca del río Tunjuelo, en el siglo xx*. 14/2/2022, de Universidad Javeriana Sitio web: <https://revistas.javeriana.edu.co/index.php/memiosociedad/article/view/8187/6545>
- [10] Banco Mundial. (2010). *CO Río Bogotá Environmental Recuperation and Flood Control Project*. 13/3/2022, de <https://projects.bancomundial.org> Sitio web: <https://projects.bancomundial.org/es/projects-operations/project-detail/P111479>
- [11] Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca - CAR. (2021). *Boletín del Índice de Calidad del Agua - ICA 2020*. 25/03/2022, de Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca - CAR Sitio web: <https://www.car.gov.co/uploads/files/6091d145d1011.pdf>
- [12] Corporación Autónoma Regional. (2021). *Mapa de la cuenca baja, media y alta del Río Bogotá D.C. 2021*, de CAR Sitio web: <https://www.arcgis.com/apps/mapviewer/index.html?webmap=35e4a-60168c341a79d6a3946f4b20b63>
- [13] Ernesto Guhl Nannetti. (2016) *La región hídrica de Bogotá*. 1/3/2022, de scielo Sitio web: <http://www.scielo.org.co/pdf/racefn/v37n144/v37n144a05.pdf>
- [14] Corporación Autonomía Regional de Cundinamarca - CAR (2015). *Boletín de Calidad Hídrica 2015. Informe de seguimiento al cumplimiento de los objetivos de calidad para las nueve (9) cuencas de Segundo orden de la jurisdicción CAR*. 8/02/2022, de Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca - CAR Sitio web: <https://www.car.gov.co/uploads/files/5ada18c676707.pdf>
- [15] Corporación Autonomía Regional de Cundinamarca - CAR (2016). *Boletín de Calidad Hídrica 2016. Informe de seguimiento al cumplimiento de los objetivos de calidad en los ocho subzonas hidrográficas y dos subsiguientes de la jurisdicción CAR*. 8/02/2022, de Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca - CAR Sitio web: <https://www.car.gov.co/uploads/files/5f8f1b562faac.pdf>
- [16] Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá. (2022). *Informe de seguimiento sentencia Río Bogotá No. 15 Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá - EAAB-ESP*. 09/03/2022, de Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá Sitio web: <http://www.orarbo.gov.co/es/documentacion-y-enlaces/listado/informe-de-seguimiento-sentencia-rio-bogota-no-15-empresa-de-acueducto-y-alcantarillado-de-bogota-eaab-esp>

- [17] Sanabria, L. (2022). *Informe de Gestión 2021. 16/03/2022*, de Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca - CAR Sitio web: <https://www.car.gov.co/vercontenido/4089>
- [18] Franco, N. (2019). *Informe de gestión 2016-2019. Resumen ejecutivo. 18/02/2022*, de Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca - CAR Sitio web: <https://www.car.gov.co/uploads/files/5e1e1c4543b79.pdf>
- [19] Consorcio Magneto ETCM. (2018). *Informe final realizar geofísica de magnetotelúrica, perforación de piezómetros e instrumentación de transmisión satelital para monitoreo en tiempo real de niveles piezométricos y calidad de aguas subterráneas en la Cuenca del Río Bogotá. 05/02/2022*, de Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca - CAR Sitio web: <https://www.car.gov.co/uploads/files/5e53eda7e88a1.pdf>
- [20] Corporación Autonomía Regional de Cundinamarca - CAR (2014). *Boletín del Índice de Calidad del agua en Corrientes superficiales ICA 2014 - ll. 28/02/2022*, de Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca - CAR Sitio web: <https://www.car.gov.co/uploads/files/5ada3c0d8daa1.pdf>
- [21] CAR. (2018), *Datos de los objetivos de calidad en los ocho subzonas hidrográficas y dos subsiguientes de la jurisdicción Bogotá. 8/02/2022*, de Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca - CAR Sitio web: <https://drive.google.com/drive/folders/1DT6802oT84h1S35YGVNvjjY2Xln3Ps25>
- [22] ORARBO. (2021). *Observatorio Regional Ambiental y de Desarrollo Sostenible del Río Bogotá. 28/6/2022*, de Consejo Estratégico de la Cuenca Hidrográfica del Río Bogotá - (CECH), Sitio web: <https://www.orarbo.gov.co/>
- [23] Corporación Autonomía Regional de Cundinamarca - CAR (2019). *Boletín de Calidad Hídrica 2019. Informe de sobre el cumplimiento de los objetivos de calidad en los ocho subzonas hidrográficas y dos subsiguientes de la jurisdicción CAR. 8/02/2022*, de Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca - CAR Sitio web: <https://www.car.gov.co/uploads/files/5f6141ec022da.pdf>
- [24] Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca - CAR. (2006). *Boletín de calidad de las cuencas de la jurisdicción CAR. 23/01/2022*, de Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca - CAR Sitio web: <https://www.car.gov.co/uploads/files/5ada3c9d40568.pdf>
- [25] Secretaría Distrital de Ambiente. (2021). *Informe consolidado del avance en el cumplimiento de las ordenes reportadas al Consejo Estratégico de Cuenca - CECH . 15/03/2022*, de Secretaría Distrital de Ambiente - SDA Sitio web: http://www.orarbo.gov.co/es/documentacion-y-enlaces/listado/informe-consolidado-del-avance-en-el-cumplimiento-de-las-ordenes-reportadas-al-consejo-estrategico-de-cuenca_cech_i
- [26] Corporación Autonomía Regional de Cundinamarca - CAR (2017). *Boletín de Calidad Hídrica. Informe sobre el cumplimiento de los objetivos de calidad en las ocho subzonas hidrográficas y dos subsiguientes de la jurisdicción CAR. 8/02/2022*, de Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca - CAR Sitio web: <https://www.car.gov.co/uploads/files/5b29580029c10.pdf>
- [27] Corporación Autonomía Regional de Cundinamarca - CAR (2013). *Boletín de Calidad de las Cuencas de la Jurisdicción CAR. 28/02/2022*, de Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca - CAR Sitio web: <https://www.car.gov.co/uploads/files/5ada3c74672fd.pdf>
- [28] Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca - CAR. (2007). *Evaluación ambiental y plan de gestión ambiental adecuación hidráulica y recuperación ambiental. 16/03/2022*, de Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca - CAR Sitio web: <http://www.orarbo.gov.co/es/documentacion-y-enlaces/listado/evaluacion-ambiental-y-el-plan-de-gestion-ambiental-ea-del-proyecto-de-adecuacion-hidraulica-y-recuperacion-ambiental-del-rio>
- [29] Corporación Autonomía Regional de Cundinamarca - CAR. (2014). *Adecuación hidráulica y recuperación ambiental del río Bogotá. 06/02/2022*, de Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca - CAR Sitio web: <https://www.car.gov.co/uploads/files/5aecd3381e652.pdf>

- [30] Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca - CAR. (2021). *Comportamiento del ICA en la cuenca Baja del Río Bogotá*. Comportamiento del ICA en la cuenca Baja del Río Bogotá. <https://www.car.gov.co/uploads/files/6091d145d1011.pdf>
- [31] Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca - CAR. (2007). *Adecuación hidráulica y recuperación ambiental del Río Bogotá*. 08/03/2022, de Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca - CAR Sitio web: <http://www.orarbo.gov.co/es/documentacion-y-enlaces/listado/adeacuacion-hidraulica-y-recuperacion-ambiental-del-rio-bogota>.
- [32] Pulido, S. (2020). *Informe de cumplimiento de las órdenes proferidas por el H. Consejo de Estado en Sentencia del 28 de marzo de 2014. AP 2001-0479-01*. 28/02/2022, de Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca - CAR Sitio web: <http://www.orarbo.gov.co/es/documentacion-y-enlaces/listado/informe-de-cumplimiento-de-las-ordenes-proferidas-por-el-h-consejo-de-estado-en-sentencia-del-28-de-marzo-de-2014-ap-2001>
- [33] Prieto-García, Francisco, & Villagómez-Ibarra, José Roberto, & Delgadillo-López, Angélica Evelin, & González-Ramírez, César Abelardo, & Acevedo-Sandoval, Otilio (2011). *fitorremediación: una alternativa para eliminar la contaminación. Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 14(2),597-612. [fecha de Consulta 22 de Abril de 2022]. ISSN: Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=93918231023>
- [34] Víctor Manuel Luna-Pabello y Sergio Aburto-Castañeda. (2014). *Sistema de humedales artificiales para el control de la eutrofización del lago del Bosque de San Juan de Aragón*. TIP Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas, 17(1):32-55, 2014, 1, 24.
- [35] Suárez Mendoza, Alfredo José, & Macías Mazo, Karina Isabel, & Agudelo Betancur, (2022). *Fitorremediación: la alternativa para absorber metales pesados de los biosólidos*. Revista Lasallista de Investigación, 2(1),57-60. [fecha de Consulta 22 de Abril de 2022]. ISSN: 1794-4449. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=69520110>
- [36] Ramón, Jacipt Alexander (2005). *Tratamiento de aguas residuales urbanas utilizando la depuración simbiótica*. Bistua: Revista de la Facultad de Ciencias Básicas, 3(2),26-33. [fecha de Consulta 22 de abril de 2022]. ISSN: 0120-4211.
- [37] Hassan, I.; Chowdhury, S.R.; Prihartato, P.K.; Razzak, S.A. *Wastewater Treatment Using Constructed Wetland: Current Trends and Future Potential. Processes* 2021, 9, 1917. <https://doi.org/10.3390/pr9111917>
- [38] U. Stottmeister, A. Wießner, P. Kusch, U. Kappelmeyer, M. Kaßner, O. Bederski, R.A. Müller, H. Moormann. *Effects of Plants and Microorganisms in Constructed Wetlands for Wastewater Treatment*. UFZ Centre for Environmental Research, Leipzig-Halle, Germany, 22 (2003) 93-117
- [39] Giovanna Sánchez, Tomasz Bergier, Agnieszka Włodyka-Bergier, Jorge I. Cifuentes, Gabriela Pignataro, Tamara Avellan, Jutta Papenbrock, Ariel E. Turcios, Rosa Miglio, Rosemary Vela, (2022), *From natural habitats to successful application - Role of halophytes in the treatment of saline wastewater in constructed wetlands with a focus on Latin America, Environmental and Experimental Botany, Volume 190, 2021, 104583, ISSN0098-8472*, <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2021.104583>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0098847221002136>)
- [40] Veronica Furiò. (2016). *Evaluación de los servicios ecosistémicos proporcionados por los humedales artificiales. Aplicación a la creación de zonas húmedas para mejorar la biodiversidad en paterna*. 2016, de Universitat Politècnica de Valencia Sitio web: https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/72724/01_Memoria_Veronica%20Valera%20Furio.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [41] Jan Vymazal. (2006). *Removal of nutrients in various types of constructed wetlands*. 30 april 2022, de science direct Sitio web: file:///C:/Users/user/Downloads/Removal_of_Nutrients_in_Various_Types_of_Construct.pdf
- [42] Arias Isaza, Carlos A (2005). *Humedales Artificiales Para el Tratamiento de Aguas Residuales*. Revista Científica General José María Córdova, 3(3),40-44. [fecha de Consulta 3 de Junio de 2022]. ISSN: 1900-6586. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=476259066011>
- [43] Naciones Unidas. (2015). *Convencion Marco sobre el Cambio Climatico. En Acuerdo de Paris (9, 40) Paris 2015: Plataforma de Durban para una Acción Reforzada (decisión 1/CP.17): Aprobación de un protocolo, otro instrumento jurídico o una conclusión acordada con fuerza legal en el marco*

de la Convención que sea aplicable a todas las Partes Aprobación del Acuerdo de París Propuesta del Presidente Proyecto de decisión -/CP.21.

- [44] Espinosa Ortiz. (2014). *factibilidad del diseño de un humedal de flujo subsuperficial para el tratamiento de aguas residuales municipales de 30.000 habitantes*. escuela colombiana de ingeniería - julio garavito, 1, 81.
- [45] Paul Andreè Arce Cardona. (2018). *humedales artificiales: una alternativa para tratamiento de aguas de producción*. 2018, de Fundaciòn Universitaria de America Sitio web: <https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/7132/1/091369-2018-I-GA.pdf>
- [46] Viviana M. Arteaga-Cortez; Abel Quevedo-Nolasco; David H. del Valle-Paniagua; Martiniano Castro-Popoca; Ángel Bravo-Vinaja; Jorge A. Ramírez-Zierold. (2019). *Una revisión actual a los mecanismos que realizan los humedales artificiales para la remoción de nitrógeno y fósforo*. Tecnología y ciencias del agua, 24.
- [47] Alcaldía Mayor de Bogotá. (2018). *Análisis demográfico y proyecciones poblacionales de Bogotá*. 15/04/2022, de Alcaldía Mayor de Bogotá Sitio web: http://www.sdp.gov.co/sites/default/files/demografia_proyecciones_2017_0.pdf
- [48] Eduardo Díaz, Sergio; Zamora, Edwin; Osorio, Aracelly; y león, John. (2018). *Diseño de un humedal construido para el tratamiento del agua de producción de un capo de petróleo colombiano*. 15, enero, 2018, de Revista Fuentes: El Reventón Energético Vol. 11 N° 2 de 2013 - Jul/Dic - pp 53/63 Sitio web: <https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/7132/1/091369-2018-I-GA.pdf>