

Dinámica espacio-temporal (2004-2017) en el parque ecológico Distrital de humedal Capellanía en Bogotá a partir de parámetros de calidad de agua.

Spatio-temporal dynamics (2004-2017) in the wetland district ecological park Capellania in Bogota from water quality parameters.

Gabriel Andrés Pérez Tovar¹, Andrea Luna Acosta¹

¹Departamento de Ecología y Territorio, Facultad de Estudios Ambientales y Rurales, Pontificia Universidad Javeriana, Transv 4 No. 42-00. Bogotá, Colombia.

Autor correspondiente: Gabriel Andrés Pérez Tovar
Departamento de Ecología y Territorio
Facultad de Estudios Ambientales y Rurales
Pontificia Universidad Javeriana
Transv 4 No. 42-00
Bogotá, Colombia
Tel: +57 3208320 ext. 4824

RESUMEN

Con base a datos de calidad de agua suministrados por la Empresa de Agua y Alcantarillado de Bogotá (EAAB) se evaluaron en el humedal Capellanía, el índice de contaminación para sólidos suspendidos (ICOSUS), el índice de eutrofización (ICOTRO), el índice de pH (ICOpH), el índice de demanda biológica de oxígeno (DBO) y el índice de Coliformes Totales, del 2004 al 2017. Se observó una disminución significativa de estos índices, entre los años iniciales de estudio (2004-2006) y los años finales (2014 y 2017), lo cual sugiere una mejora de la calidad del agua.

Por otra parte, se realizaron mapas de transformación de cobertura de la cuenca aferente, y se encontró un mayor crecimiento urbano-industrial del 2004 al 2011, que del 2011 al 2017. Junto con los resultados de calidad de agua, la transformación de cobertura de la cuenca aferente no parece afectar de manera directa la calidad del agua del humedal. También se investigaron las estrategias llevadas a cabo en la recuperación y mantenimiento del humedal por la EAAB y se evidenciaron avances del 2008 hasta la actualidad, y los cuales de acuerdo a los resultados del primer objetivo, parecen estar teniendo efectos positivos en la calidad del agua del humedal.

Por último, se ejecutó un análisis de componentes principales y una prueba de correlación de Spearman donde se observó una correlación positiva significativa entre coliformes totales, DBO, y fósforo, sugiriendo mismas fuentes de contaminación. Se podrían reducir las concentraciones de estos parámetros corrigiendo más conexiones erradas, y realizando una adecuación hidrogeomorfológica.

PALABRAS CLAVE: humedales urbanos; índices de contaminación; cuenca aferente; calidad del agua; sistemas de información geográfica

ABSTRACT

Based on the water quality data provided by the Bogota Water and Sewerage Agency (EAAB), Suspended Solids Contamination Index (ICOSUS), Eutrophication Index (ICOTRO), pH Index (ICOpH), Biological Oxygen Demand (DBO) and Total Coliforms Index were evaluated from 2004 to 2017 in Capellania Wetland. The values of these indexes diminished significantly, between the early years of study (2004-2006) and the late years (2014 and 2017).

In addition to this, coverage transformation maps were made, and it was observed a greater urban-industrial growth from 2004 to 2011, in comparison to 2011-2017. Together with the results of water quality, the transformation of afferent basin coverage does not seem to directly affect the water quality in the wetland. Also, EAAB strategies used for wetland maintenance and recovery were investigated, and a progress was observed between 2008 and 2017, which, according to the first objective, appears to have a positive effect on the water quality of the wetland.

Finally, a principal component analysis and a Spearman correlation test were executed, and it was found that the variables of total coliforms, DBO and phosphorus have a high-significant-positive correlation, suggesting the same sources of contamination. Concentrations of these parameters could be reduced with the elimination of wrong connections and with and hydrogeomorphological adjustment.

KEY WORDS: urban wetlands; contamination index; afferent basin; water quality; geographic information system.

1. Introducción

Los humedales son ecosistemas lénticos que funcionan como reguladores de inundaciones, filtran contaminantes y mejoran la calidad del agua (Finlayson et al., 2005; Estupiñan et al., 2015). El funcionamiento de los humedales depende de la vegetación que lo rodea (Smith & Smith, 2001), de condiciones geológicas e hidrológicas, y de cómo éstas cambian a través del tiempo (Sirombra, 2012). Tanto la cantidad como la calidad del recurso hídrico son entonces fundamentales para su funcionamiento (Van der Hammen et al., 2008; Mitsch et al., 2013). La cantidad del recurso hídrico está determinada, en términos generales, por el régimen hidrológico y la variación estacional (Neiff, 1999), mientras que la calidad del agua depende de un conjunto de indicadores físicos, químicos y biológicos, cuyos valores determinan la presencia de la biota, y el crecimiento y desarrollo de la vida acuática y terrestre (Möller, 2008). En efecto, los humedales son el refugio de una gran diversidad de seres vivos como anfibios, pequeños mamíferos, aves e insectos (Ramsar, 1997). Además, debido a sus condiciones anóxicas, los humedales son ambientes óptimos para almacenar carbono de la atmósfera, razón por la cual cumplen un papel fundamental en los ciclos biogeoquímicos y en el cambio climático (Mitsch et al., 2013).

En Colombia, se calcula que hay más de 20 millones de hectáreas de humedales (Minambiente 2001; Rosselli, 2011), diferenciados por su composición altitudinal, geológica y climática (Flórez et al., 1997; Estupiñan et al., 2015). Los suelos sedimentarios entre los 2.000 y 3.300 msnm son los denominados altiplanos, donde se encuentran los mayores complejos de humedales (Rangel, 2003; Flórez et al., 2016). En la planicie más extensa del Norte de los Andes, el altiplano Cundiboyacense, se encuentra ubicada en la Cordillera oriental, la capital del país, Bogotá. Bogotá cuenta con quince humedales con un área total de 966 hectáreas (Secretaría Distrital de Ambiente,

2017), que forman parte del centro de reproducción de aves del Norte de los Andes, albergando especies endémicas y migratorias que dependen directamente de la cobertura y del cuerpo de agua (ABO, 2003). Aunque en la década de los 80 comienzan las principales publicaciones de estos humedales urbanos (Van der Hammen et al., 2008), es a partir de los años 90 que se da un importante auge de publicaciones en diferentes campos (e.g. Van der Hammen, 1998, 2003, 2008; Andrade, 2003; Sitles, 2008; Roselli, 2003, 2011; Calvachi et al., 2014; Estupiñan, 2015). Van der Hammen (2008), realiza por ejemplo, una descripción detallada sobre todos los humedales en Bogotá, sus principales causas de contaminación, y describe posibles escenarios futuros. Andrade (2003) y Roselli (2011) resaltan la importancia de estos humedales urbanos para la aves residentes y migratorias. Estupiñan (2015) describe la situación actual de los humedales con base en sistemas de información geográfica, donde resalta los principales accidentes geográficos, la vegetación predominante, y las cotas de inundación.

Desafortunadamente, pese a la alta importancia ecológica, social y ambiental de los humedales urbanos que ha sido evidenciada en estas publicaciones científicas, diversos procesos migratorios durante el siglo XX y una disminución considerable de áreas terrestres y cuerpos de agua provocada por asentamientos urbanos (Cruz et al., 2017), han afectado a los humedales del altiplano Cundiboyacense, y en especial los humedales urbanos, los cuales presentan indicadores críticos sobre su estado de conservación (Villa et al., 2016; Van der Hammen et al., 2008). En efecto, estos ecosistemas han sufrido graves alteraciones principalmente antrópicas, como actividades agrícolas de alto impacto, grandes vías, factores industriales (Moreno et al., 2014), y urbanizaciones, provocando efectos variados sobre la cantidad del recurso hídrico y el funcionamiento ecológico de los humedales (Valencia, 2014).

Adicionalmente, la calidad de los cuerpos de agua en los humedales, se ha visto afectada por drenajes e infraestructuras subterráneas. El sistema de drenaje de Bogotá, es un sistema convencional, con redes pluviales y sanitarias en su infraestructura subterránea que desembocan en colectores y canales, los cuales desembocan a su vez en ecosistemas de la estructura hídrica distrital, en canales (en el caso de los colectores), o en plantas de tratamiento de agua (en el caso de los canales; Molina et al., 2011; Pérez et al., 2015; SDA, 2017). Desafortunadamente, Bogotá cuenta con muchos empalmes de aguas residuales sobre la red local de aguas lluvias y empalmes de aguas lluvias sobre la red local de aguas residuales. A estos empalmes, se les llama conexiones erradas, según el decreto 302 de 2000. Estas conexiones erradas son subterráneas e ilegales y su alta presencia de en la ciudad, hace inestable el sistema de drenaje. Además, muchas de éstas llegan a los humedales, afectando fuertemente la calidad de sus aguas (Guarnizo et al., 2008).

La pérdida y degradación de los humedales ha llevado a las entidades encargadas de la administración de los humedales a publicar a finales de los 90, folletos y otros documentos para la educación ambiental de las comunidades alrededor de estos ecosistemas, y a iniciar la formulación de documentos cruciales, como los planes de manejo ambiental (PMA), en humedales tales como el humedal Santa María del Lago, el humedal Jaboque, el humedal Juan Amarillo y el humedal Capellanía, entre otros. Adicionalmente, en el año 2006 en Bogotá D.C., el departamento administrativo del medio ambiente (DAMA), actualmente Secretaria Distrital de Medio Ambiente (SDA), declara a los humedales como Parques Ecológicos Distritales de Humedales (PEDH) (SDA, 2017). Esta categorización se hizo para aquellos ecosistemas que tienen una vegetación predominante de humedal y cuyos cuerpos de agua están asociados con las redes pluviales y los afluentes del río Bogotá (Calvachi et al., 2014). Los PEDH deben incluir una zona de manejo y preservación ambiental (ZMPA), una ronda hidráulica

(RH), y deben estar sujetos en el plan de ordenamiento territorial (decreto 190 de 2004), declarados como estructura ecológica principal del distrito. Esta categorización se diseñó con el propósito de involucrar a la comunidad aledaña para hacer salidas ecológicas, recorridos guiados, talleres de educación ambiental, sensibilización y encuentros con la naturaleza. Sin embargo, todavía quedan esfuerzos por hacer tanto en los procesos de restauración, como en educación ambiental, y, según Pinilla (2010), hacen falta investigaciones sobre la aplicación de índices de calidad de agua en humedales de Bogotá ya que no hay suficiente información publicada sobre el tema.

Pese a los vacíos y baja producción de información bibliográfica para este humedal en comparación con otros humedales de la ciudad de Bogotá (Instituto Humboldt, 2015), el humedal Capellanía tiene un gran potencial de restauración, ya que posee amplias áreas no urbanizadas, manteniendo núcleos poblacionales de especies silvestres (Calvachi et al., 2014). Además, este humedal, que hace parte de la cuenca Fucha, es un filtro descontaminante de los principales desechos industriales (Sabogal, 2011) y previene inundaciones a los sectores aledaños (Moreno et al., 2014). Es por estas razones que una evaluación del estado actual del humedal, tanto en la calidad del cuerpo de agua, como en las medidas de gestión y recuperación ambiental, podrían guiar en las estrategias de recuperación a implementar en este ecosistema acuático.

En base a este contexto general, este estudio busca evaluar el estado histórico y actual (2004-2017) de la calidad del cuerpo de agua del humedal Capellanía, a partir de parámetros fisicoquímicos, cambios en la cuenca aferente, acciones sobre recuperación y mantenimiento, siguiendo las estrategias del plan de manejo ambiental (PMA), y proponer recomendaciones para mejorar la calidad del cuerpo de agua.

2. Materiales y Métodos

2.1. Localización del área de estudio

El humedal Capellanía está ubicado al occidente de la ciudad, en la localidad de Fontibón. Este humedal hace parte de la red hídrica del distrito de Bogotá, pertenece a la cuenca del río Fucha (Pérez et al., 2015) y tiene un área total de 27 hectáreas (EAAB & CI, 2008; Figura 1). En la actualidad, este humedal se ve afectado por conexiones erradas, provenientes de urbanizaciones y algunas fábricas del sector que vierten residuos al cuerpo de agua (Moreno et al., 2014).

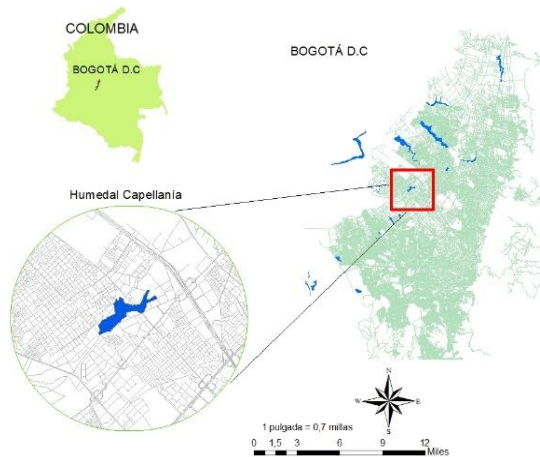


Figura 1. Ubicación del área de estudio.

El humedal se encuentra fraccionado en dos sectores por la Avenida La Esperanza: el primero ubicado al Norte de la Avenida La Esperanza, donde predominan industrias como Coca-Cola, Challenger, Avesco-Kokorico y Gilpa S.A. El segundo sector, se ubica al Sur entre la Avenida La Esperanza y el Ferrocarril de Occidente, se encuentra rodeado por los barrios la Cofradía, Rincón Santo, Rubí, Ferrocaja al costado Occidental y al costado Oriental los barrios, San Diego, Fuentes de Dorado II y Capellanía (EAAB & CI, 2008).

El humedal está alimentado por diferentes entradas, en total ocho entre colectores pluviales y canales (EAAB, 2009; Figura 2):

- En el sector Norte, el humedal está alimentado por un colector combinado, con un

diámetro de 22 pulgadas en concreto reforzado, y con una fecha de instalación del año 1985. A este colector sanitario lo alimentan redes de aguas lluvias y domésticas.

- En el costado Nororiental, por la Avenida La Esperanza, el humedal está alimentado por un colector de aguas pluviales, con un diámetro de 22 pulgadas de concreto reforzado, y con una fecha de instalación del año 2013, bajo el contrato IDU-138-2007.

- En el costado Noroccidental, el humedal está alimentado por el canal Avenida La Esperanza, alimentado a su vez por colectores pluviales y combinados de los barrios Puerta de Teja, San José de Fontibón y Ferrocaja.

- En el costado Occidental, se encuentran tres colectores pluviales con fecha de instalación del año 2003, bajo el contrato 1-01-7100-589-2002.

- En el costado Suroccidental, se encuentra un colector pluvial con fecha de instalación del año 2009, bajo el contrato URB-9-99-30100-0299-2009.

En el costado Suroccidental, se encuentra el canal Oriental de Fontibón, alimentado por aguas de los diferentes cauces del humedal y también por los colectores pluviales y combinados de los barrios Modelia, Santa Cecilia, y Ferrocaja Fontibón. Este canal desemboca en la salida del humedal llegando al canal San Antonio.

El humedal sólo posee una salida de agua, que está localizada al Sur del humedal, desembocando en el canal Oriental de Fontibón (Figura 2).

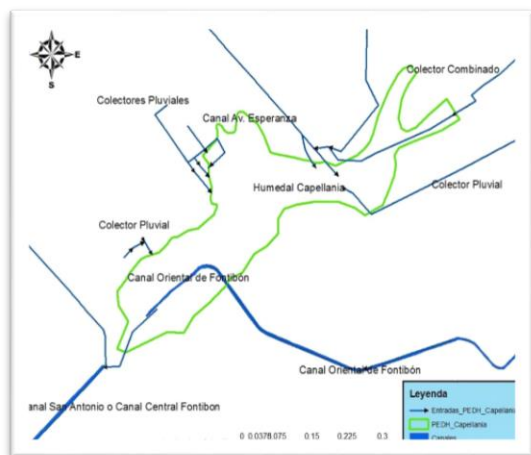


Figura 2. Entrada de los canales y colectores que alimentan el humedal Capellanía

2.2. Delimitación del área de estudio

Del área total del humedal, sólo se evaluó la cuenca media (Figura 3) denominada así por la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB) en el Plan de Manejo Ambiental (PMA) ya que es donde la EAAB realizó los análisis de los parámetros fisicoquímicos. Esta área posee una superficie aproximada de 13 hectáreas lo cual equivale al 48% del área total del humedal.

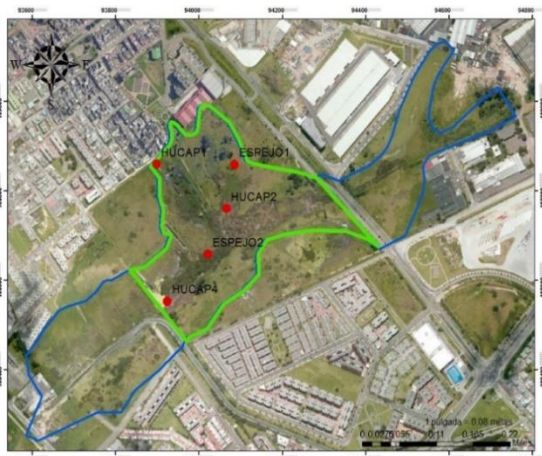


Figura 3. Ubicación de la cuenca media del humedal indicando los lugares de muestreo seleccionados.

2.3. Recolección de datos de parámetros fisicoquímicos

Se realizaron muestreos de calidad del agua por parte de los laboratorios de la EAAB, en

los años 2004, 2005, 2006, 2008, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014 y 2017, donde se analizaron los siguientes parámetros fisicoquímicos en las muestras de agua: aceites y grasas, Aluminio, Amonio, Cadmio, Cianuro, Cobre, Plomo, Zinc, clorofila, pH, oxígeno disuelto, demanda biológica de oxígeno, carbono orgánico, nitrógeno, fósforo, coliformes totales, conductividad, sólidos suspendidos totales, demanda química de oxígeno, fenoles.

Los siguientes parámetros no pudieron ser tenidos en cuenta ya que no había datos suficientes para hacer los análisis estadísticos: aceites y grasas, Aluminio, Amonio, Cadmio, Cianuro, Cobre, Plomo, Zinc, clorofila, oxígeno disuelto. Estos parámetros se descartaron. Del mismo modo, sólo cinco (5) de los 9 sitios muestrados por la EAAB fueron tenidos, en cuenta, ya que los otros cuatro (4) sitios no tenían suficientes datos para hacer todos los análisis estadísticos. Los 5 sitios seleccionados fueron: Espejo 1, Espejo 2, HUCAP 1 Colector 1 entrada, HUCAP 2 Colector 2 entrada, HUCAP 4 entrada al Canal Fontibón).

Para el año 2004, sólo se tuvieron en cuenta tres lugares de muestreo (Espejo 1, Espejo 2, HUCAP 1), ya que para los otros lugares faltantes (HUCAP 2, HUCAP 4), no había datos disponibles. Para la demanda química de oxígeno sólo se consideraron los tres lugares mencionados anteriormente (Espejo 1, Espejo 2, HUCAP 01) porque para los otros lugares este parámetro estaba registrado únicamente para algunos años y para el parámetro de fenoles no se tuvo en cuenta el año 2004 ya que no había datos registrados (Anexo 9).

2.4. Base cartográfica

La base cartográfica se obtuvo por medio de ortofotos (2004-2008-2009-2010-2011-2014-2017) suministradas por la Infraestructura de Datos Espaciales del Distrito Capital (IDECA), con una alta resolución espacial de 7.5 cm, escala de 1:1.000 y gran extensión geográfica de 49.000 hectáreas, cubriendo la ciudad de Bogotá en su totalidad y algunas

partes de los cerros orientales (IDECA, 2014). Estas imágenes se captaron por medio de sensores remotos instalados sobre una plataforma aerotransportada en helicóptero (INGEOVISTA, 2014).

Para los años faltantes, se utilizaron imágenes de la constelación de satélites de DigitalGlobe. Estas imágenes poseen una alta resolución de 41 cm a 82 cm, son imágenes pancromáticas, de color natural, de 4 bandas - de 1,7 m a 3,2 m, y multiespectrales (DigitalGlobe, 2012).

2.5. Cálculo de índices de contaminación del agua

Para analizar la variación de la calidad del agua se calcularon índices de contaminación del agua (ICOS) (Ramírez, 1997). Estos índices califican la calidad del agua de una corriente superficial, con base a muestras registradas en un tiempo determinado (Orjuela et al., 2011).

Los ICOS pueden ser usados para comparar el estado del recurso en diferentes áreas geográficas, indicando si la calidad del recurso hídrico está empeorando o mejorando con el tiempo (Rojas et al., 2009). Estos índices se han utilizado en humedales urbanos alrededor del mundo para vigilar la situación, los cambios y las tendencias de estos ecosistemas (Chow, 2006).

Los índices utilizados en este estudio fueron: índice de contaminación trófica (ICOTRO), índice de demanda biológica de oxígeno (I DBO), índice de contaminación por sólidos suspendidos (ICOSUS), índice de contaminación por pH (ICOpH) (Ramírez, 1997).

2.5.1. Índice de contaminación trófica (ICOTRO)

El ICOTRO se determina teniendo en cuenta la concentración del fósforo total en el agua (en mg/l; Tabla 1), donde entre más alta sea la concentración de fósforo, mayor es la carga de nutrientes que tiene el cuerpo de agua (Pérez et al., 2008). Bajas concentraciones de fósforo

total sugieren baja biomasa fitoplanctónica, alta transparencia en el agua, y limitada concentración de nutrientes y sustancias húmicas (Ramírez et al, 1997). Una presencia alta de fósforo total, puede provocar hipereutrofia o eutrofización lo cual tiene como consecuencia un crecimiento excesivo de plantas acuáticas que cubren la superficie del agua y evitan que la luz solar llegue a las capas inferiores, impidiendo los procesos de fotosíntesis, lo cual reduce la disponibilidad de oxígeno, del cual dependen los seres vivos en el cuerpo de agua (Margalef, 1983, Vásquez et al., 2006). El ICOTRO explica entonces el grado de eutrofia de un cuerpo de agua.

Tabla 1. Categoría de clasificación por nivel de contaminación trófica.

Categoría de contaminación			Escala de color
< 0,01	Oligotrofia	Ninguna	
0,01-0,02	Mesotrofia	Baja	
0,02-0,05	Eutrofia baja	Media	
0,05-1,00	Eutrofia media	Alta	
>1,00	Hipereutrofia	Muy Alta	

(Ramírez et al., 1999)

2.5.2. Índice de Demanda Biológica de Oxígeno (DBO)

El índice de DBO se calcula con la ecuación:

$$I_{DBO} = -0.05 + 0.70 \log_{10} DBO(\text{mg} / \text{L})$$

La DBO mide la cantidad de oxígeno utilizado por los microorganismos en la estabilización de la materia orgánica biodegradable, en condiciones aeróbicas (Tabla 2; IDEAM, 2007). Entre más alta sea la DBO, más altas son las concentraciones de microorganismos, generalmente patógenos, provocando déficit de oxígeno para las comunidades acuáticas y problemas de salud pública (Raffo et al., 2014).

2.5.3. Índice de Coliformes Totales

Se determina con la ecuación:

$$I_{\text{Coliformes Totales}} = -1.44 + 0.56 \log_{10} \text{Col.Tot.} (\text{NMP} / 100 \text{ml})$$

Los coliformes totales son bacterias gram negativas, no esporoformadoras, con capacidad de crecimiento aeróbico y facultativamente anaeróbico (IDEAM, 2007).

La presencia de coliformes totales se encuentra en el medio ambiente de forma natural, aunque está fuertemente asociada a la presencia de bacterias por contaminación fecal tanto de humanos como de animales (Ramírez et al., 1997). La presencia de altos contenidos de coliformes totales es el principal riesgo sanitario en el agua, ya que algunos de estos microorganismos son patógenos y pueden provocar enfermedades en la salud humana y animal (Ramos et al., 2008; Tabla 2).

2.5.4. Índice de contaminación por sólidos suspendidos (ICOSUS)

El ICOSUS se determina con la ecuación:

$$ICOSUS = -0.02 + 0.0003SólidosSuspendidos(mg/L)$$

La concentración de sólidos suspendidos totales determina la cantidad de partículas gruesas flotantes y los aglomerados sumergidos de materiales no homogéneos en la muestra (IDEAM, 2007). Altas concentraciones de sólidos suspendidos totales pueden depositarse en el fondo del cuerpo de agua, cubriendo organismos acuáticos, huevos, o larvas de macroinvertebrados, impidiendo la transferencia de oxígeno al cuerpo de agua y a los organismos presentes (Pérez et al., 2008).

2.5.5. Índice De Contaminación por pH (ICOpH)

El índice de pH se determina con la ecuación:

$$ICOpH = \frac{e^{-31.08+3.45pH}}{1 + e^{-31.08+3.45pH}}$$

El pH es un indicador que mide el número de iones de hidrógeno, determinando el grado de acidez o de alcalinidad del agua (Tabla 2).

El pH del agua puede variar entre 0 y 14. Cuando el pH de una sustancia es mayor a 7, es una sustancia alcalina, cuando el pH de una sustancia está por debajo de 7, es una sustancia ácida. La vida acuática es incapaz de ajustarse a cambios bruscos de pH y mantener la osmoregulación. Por lo tanto, cambios en el pH del agua pueden afectar la osmoregulación de los organismos acuáticos, provocándoles un estrés fisiológico que, en ciertos casos, puede llegar a ser letal (Pérez et al., 2008).

Tabla 2. Categoría de clasificación por nivel de contaminación.

Categoría de contaminación		Escala de color
0-0,2	Ninguna	
0,2-0,4	Baja	
0,4-0,6	Media	
0,6-0,8	Alta	
x>0,8	Muy alta	

(Ramírez et al., 1999)

2.5.6. Porcentaje de reducción de parámetros de calidad de agua de 2005 y 2017

Se realizó una tabla comparativa del cambio en los valores de los parámetros fisicoquímicos, donde el porcentaje de disminución entre el año 2005 y 2017, se calcula a partir del valor en el 2005 que corresponde al 100%, se escogieron los años 2005 y el 2017 para analizar el cambio entre el primer año de toma de muestras de agua en el cual se contaba con todos los lugares para todos los parámetros, y el último año.

2.6. Interpolación de índices de contaminación del agua

La interpolación permite la localización espacial de los diferentes indicadores de contaminación del agua y su cambio a través del tiempo (Martínez et al., 2016), permitiendo así la distribución espacial de los diferentes índices (Mora et al., 2004).

Se utilizó el método determinístico de distancia inversa ponderada (IDW) en el software ArcGIS Desktop 10.5 para representar espacialmente los cambios en los parámetros de calidad de agua (Lobato et al., 2015) en los sitios de muestreo del humedal, por cada año muestreado.

Para la interpolación (IDW) de contaminación del agua, el algoritmo determina los valores linealmente del sitio de muestreo y pondera los puntos más cercanos con un mayor peso (Esri, 2017). Entre más aumenta la distancia al sitio

de muestreo, el valor de error es mayor (Ketata et al., 2011, Wang Ke et al., 2011).

2.7. Clasificación del cambio de coberturas

Los métodos de clasificación por medio de sistemas de información geográfica son cruciales para definir áreas y categorizarlos según su similitud de pixel (Araya, 2009). La clasificación no supervisada define las categorías mediante un procedimiento estadístico de distancia. Esta clasificación es muy poco utilizada para definir áreas (Cofrep, 2017).

En cambio, la clasificación supervisada se utiliza generalmente cuando se conoce el territorio de estudio y se tiene una imagen de buena calidad, realizando cortes de clases para definir polígonos de interés, teniendo un error casi nulo, siempre y cuando se trabaje con imágenes de alta resolución (Araya, 2009).

La metodología se desarrolló con el software ArcGIS Desktop 10.5. Inicialmente se georreferenciaron las imágenes seleccionadas del satélite al sistema de coordenadas proyectadas MAGNA-SIRGAS Ciudad de Bogotá en los años de estudio, y se empleó una clasificación supervisada manual denominada, según clasificaciones previamente realizadas (Araya, 2009; Ramírez, 2013; Cofrep, 2017).

Se realizaron tres fases de análisis (Araya, 2009). La primera fase consistió en realizar con la herramienta «buffer» (Environmental System Research Institute, Redlands CA, 2009), un diámetro de 2,14 km² a la redonda del humedal para determinar el área aferente para el humedal, según la definición del área aferente en el PMA (EAAB & CI, 2008). La segunda fase consistió en identificar y delimitar las áreas de estudio por medio de una clasificación supervisada manual (Araya, 2009), donde se agregaron manualmente cortes de clase. Se realizó una clasificación en dos (2) categorías (zona libre, y zona urbana e industrial) y se delimitaron las principales vías y caminos. La zona libre se denomina así en el PMA por tener superficies cuyas áreas son de suelo libre. La zona urbana e industrial

corresponde a superficies que incluyen áreas consideradas como construcciones urbanas e industriales. Se agruparon estas dos zonas en una sola categoría de clasificación. Para la tercera fase, en las áreas obtenidas a partir de la clasificación, se calcularon las áreas (de zona libre, y de zona urbana e industrial) en hectáreas en cada uno de los años, para analizar diferencias en transformación de coberturas. Por último, y de acuerdo a la base de datos del sistema de información geográfica (SIG) de la EAAB, se analizaron los cambios en la red pluvial y en la red sanitaria entre los años de 2004 a 2017.

2.8. Interpolación de índices de contaminación del agua

La interpolación permite la localización espacial de los diferentes indicadores de contaminación del agua y su cambio a través del tiempo (Martínez et al., 2016), permitiendo así la distribución espacial de los diferentes índices (Mora et al., 2004).

Se utilizó el método determinístico de distancia inversa ponderada (IDW) en el software ArcGIS Desktop 10.5 para representar espacialmente los cambios en los parámetros de calidad de agua (Lobato et al., 2015) en los sitios de muestreo del humedal, por cada año muestreado.

Para la interpolación (IDW) de contaminación del agua, el algoritmo determina los valores linealmente del sitio de muestreo y pondera los puntos más cercanos con un mayor peso (Esri, 2017). Entre más aumenta la distancia al sitio de muestreo, el valor de error es mayor (Ketata et al., 2011, Wang Ke et al., 2011).

2.9. Clasificación del cambio de coberturas

Los métodos de clasificación por medio de sistemas de información geográfica son cruciales para definir áreas y categorizarlos según su similitud de pixel (Araya, 2009). La clasificación no supervisada define las categorías mediante un procedimiento estadístico de distancia. Esta clasificación es

muy poco utilizada para definir áreas (Cofrep, 2017).

En cambio, la clasificación supervisada se utiliza generalmente cuando se conoce el territorio de estudio y se tiene una imagen de buena calidad, realizando cortes de clases para definir polígonos de interés, teniendo un error casi nulo, siempre y cuando se trabaje con imágenes de alta resolución (Araya, 2009).

La metodología se desarrolló con el software ArcGIS Desktop 10.5. Inicialmente se georreferenciaron las imágenes seleccionadas del satélite al sistema de coordenadas proyectadas MAGNA-SIRGAS Ciudad de Bogotá en los años de estudio, y se empleó una clasificación supervisada manual denominada, según clasificaciones previamente realizadas (Araya, 2009; Ramírez, 2013; Cofrep, 2017). Se realizaron tres fases de análisis (Araya, 2009). La primera fase consistió en realizar con la herramienta «buffer» (Environmental System Research Institute, Redlands CA, 2009), un diámetro de 2,14 km² a la redonda del humedal para determinar el área aferente para el humedal, según la definición del área aferente en el PMA (EAAB & CI, 2008). La segunda fase consistió en identificar y delimitar las áreas de estudio por medio de una clasificación supervisada manual (Araya, 2009), donde se agregaron manualmente cortes de clase. Se realizó una clasificación en dos (2) categorías (zona libre, y zona urbana e industrial) y se delimitaron las principales vías y caminos. La zona libre se denomina así en el PMA por tener superficies cuyas áreas son de suelo libre. La zona urbana e industrial corresponde a superficies que incluyen áreas consideradas como construcciones urbanas e industriales. Se agruparon estas dos zonas en una sola categoría de clasificación. Para la tercera fase, en las áreas obtenidas a partir de la clasificación, se calcularon las áreas (de zona libre, y de zona urbana e industrial) en hectáreas en cada uno de los años, para analizar diferencias en transformación de coberturas.

Por último, y de acuerdo a la base de datos del sistema de información geográfica (SIG) de la EAAB, se analizaron los cambios en la red

pluvial y en la red sanitaria entre los años de 2004 a 2017.

2.10. Evaluación del cumplimiento de ejecución de obras y actividades por parte de la EAAB

Una revisión documental es un procedimiento esencial cuyo objetivo es la recuperación y visualización de información relevante para reconocer antecedentes históricos y poder analizarlos con el contexto (Gálvez, 2002).

En base a esto, se realizó una investigación sobre el proceso de recuperación y mantenimiento del humedal Capellanía donde se consultaron diferentes fuentes documentales como el plan de manejo ambiental (PMA), la sentencia del río Bogotá, contratos de la entidad encargada y respuesta de requerimientos del cumplimiento de las estrategias del PMA del humedal Capellanía (Anexo 10). En base a estos documentos, se analizó el grado de cumplimiento de ejecución de diferentes obras y actividades en el humedal.

Con respecto a los procesos de recuperación y mantenimiento, se hizo una calificación objetiva descrita por Mundel (1996), por medio de un criterio personal teniendo en cuenta las sentencias de cumplimiento de contratos de obra de entidad encargada.

Para demostrar la eficiencia en el cumplimiento de las estrategias, se realizó una escala de calificación de acuerdo al porcentaje de avance donde 100% significa un avance alto y 10% un avance bajo o nulo. A continuación se describe para cada estrategia, los criterios que se tuvieron en cuenta para la escala de calificación.

2.10.1 Estrategias de Recuperación descritas en el PMA del humedal Capellanía.

2.10.1.1. Recuperación de la configuración paisajística

Esta estrategia tiene como objetivo la reconformación, enriquecimiento y

embellecimiento paisajístico por medio de la siembra de especies nativas de humedal, esta estrategia se analizó con base en el número de especies sembradas en todo el humedal con respecto al área total del humedal lo cual equivale a 27 hectáreas, donde la siembra de 2,000 especies equivale al 100% ya que es el número de especies arbóreas y nativas que la EAAB tenía planeado en el contrato.

2.10.1.2. Adecuación hidrogeomorfológica

Esta estrategia tiene como objetivo la reconformación hidrogeomorfológica del humedal, esta obra se realiza para aumentar el espejo de agua en superficies acuáticas y semiacuáticas, se evaluó con base en el porcentaje de obra que contiene: planeación, diseño, ejecución y terminación, donde el 10% equivale a la planeación de la obra y el 100% a la terminación de la obra.

2.10.1.3. Conexiones erradas

Esta estrategia tiene como objetivo la eliminación de todas las conexiones erradas en la cuenca aferente del humedal Capellanía, se evaluó con respecto a un contrato de eliminación de conexiones alrededor del humedal y a la sentencia del río Bogotá del 2014 que estima que en la cuenca Fucha hay alrededor 2791 conexiones erradas. Para evaluar este objetivo se realizó una regla de 3 donde el 100% equivale a la eliminación de 2,791 conexiones erradas asociadas a la cuenca Fucha donde pertenece el humedal Capellanía según la sentencia del Río Bogotá 2014 realizada por el Consejo de Estado.

2.10.2. Estrategias de Mantenimiento descritas en el PMA del humedal Capellanía

2.10.2.1. Cerramiento

Esta estrategia tiene como objetivo el cerramiento del humedal, tanto en la cuenca alta, media y baja, se evaluó con base en los metros lineales de cerramiento en malla eslabonada alrededor del humedal, donde el 100% equivale al cerramiento completo del humedal.

2.10.2.2. Recolección de Residuos Sólidos

Esta estrategia tiene como objetivo la recolección de residuos sólidos tanto en la franja acuática y terrestre del humedal, se evaluó con base en el número de toneladas de desechos recogidos, donde el 100% equivale a dos toneladas al año de residuos y material vegetal tanto en la franja acuática y terrestre, según el número de toneladas acordado en el contrato 9-99-24300-0979-2013.

2.11. Análisis estadísticos

Para realizar comparaciones entre dos o más muestras, y analizar e inferir si existen diferencias significativas (Marín et al., 2012), se pueden realizar pruebas estadísticas paramétricas y pruebas estadísticas no paramétricas (Gómez et al., 2003).

Las pruebas paramétricas están sometidas a determinadas condiciones o supuestos: normalidad, homocedasticidad de varianza e independencia de los datos muestreados (Tejedor, 1999). Las pruebas no paramétricas son aquellas en las que no existen supuestos sobre la distribución de los parámetros, se aplican con mayor frecuencia a los datos nominales y ordinales (Badii et al., 2012). Sin embargo, las pruebas no paramétricas son menos robustas, es decir que tienen mayor probabilidad de error al rechazar o aceptar una hipótesis. Por el contrario, los resultados de las pruebas paramétricas son más confiables, al tener que cumplir condiciones de validez (Sabiote et al., 2007).

El análisis estadístico se ejecutó en el programa estadístico *Statistica-8*. El cumplimiento de las condiciones de normalidad y de homocedasticidad de varianza fue evaluado con las pruebas de Shapiro-Wilk y Levene, respectivamente. Cuando no se cumplió uno de los supuestos para realizar pruebas paramétricas, se realizaron transformaciones de los datos utilizando logaritmo (log) o raíz cuadrada ($\sqrt{\quad}$). Sin embargo, una vez se confirmaron los supuestos, no fue posible realizar una ANOVA de dos vías debido a que el tamaño de las réplicas era muy pequeño. Se realizó

entonces para cada parámetro un análisis de varianza de una vía (ANOVA) para comparar los resultados entre años y un ANOVA de una vía para comparar los resultados entre sitios muestreados.

Al compararse las medias aritméticas de cada parámetro por año y por lugar muestreado y determinando que existen diferencias significativas, se desarrolló una prueba post hoc de Tukey realizando todas las comparaciones posibles entre los datos (Vicéns et al., 2005).

Adicionalmente, los resultados fueron comparados con los criterios de calidad de aguas establecidos en la reglamentación colombiana, con el propósito de identificar si se está cumpliendo o no con estos criterios en el humedal Capellanía (Decreto 1594 de 1984 artículo 45 y Acuerdo Número 43 del 17 de octubre de 2006) (Anexo 11-12).

Con el propósito de identificar posibles fuentes de contaminación, se analizó la relación entre los parámetros fisicoquímicos estudiados (DBO, pH, Carbono Orgánico, Nitrógeno, Fosforo, Coliformes Totales, Conductividad, Sólidos Suspendidos Totales), los cambios de coberturas en la cuenca aferente (red pluvial, red sanitaria y desarrollo urbano) y los datos de precipitación obtenidos de la estación hidroclimatológica del Aeropuerto el Dorado (212057900), a través de un análisis multivariado de datos, utilizando la técnica de reducción de dimensiones conocida como ACP (análisis de componentes principales; Ávila et al., 2013). Por último, se realizó una prueba de correlación no paramétrica de Spearman. Esta correlación mide la relación entre las variables estudiadas (Martínez et al., 2009), estos análisis se ejecutaron en el programa estadístico *Statistica-8*. Se realizó un ajuste de Bonferroni debido a que eran más de 10 variables (Herrera, 2000).

Ajuste de Bonferroni (Zar, 2010).

$$\alpha' = 1 - (1 - \alpha)^{(1/N)}$$

$$\alpha' = 0.008$$

Donde N es igual al número total de variables correlacionadas, α el nivel de significancia de 0.05, y α' el nivel de significancia calculado en base al número total de variables correlacionadas. Según el ajuste de Bonferroni, el nivel de significancia es de 0.008. Con ese nivel de significancia se desarrolló la prueba de correlación de Spearman.

3. Resultados

3.1. Índices de contaminación del agua

Los resultados de los mapas con base a la interpolación para cada índice se encuentran en la Figura 4 (Anexo 13-17).

3.1.1. ICOTRO: Índice de contaminación trófico (concentración de fósforo)

En la interpolación se evidencia un nivel de Hipereutrofia y Eutrofia lo que indica una elevada biomasa de algas y alta carga de nutrientes donde se ve reducida la transparencia del agua (Ramírez, 1997). Vale la pena recalcar que se observó una tendencia al mejoramiento de las condiciones de calidad del agua a medida que pasan los años.

3.1.2. I DBO: Índice de contaminación por DBO (demanda biológica de oxígeno)

La demanda biológica de oxígeno demuestra un alto contenido de contaminación en categoría alta y muy alta en todos los lugares y años muestreados a diferencia del Espejo 1 y HUCAP 4 en el 2011, y Espejo 2 en el año 2017, con categoría media.

3.1.3. Índice de Contaminación por Coliformes Totales

Se evidencia un alto contenido en categoría muy alta de los coliformes totales del 2004 al 2008, con una disminución drástica en el año 2010 y 2011. En el año 2013 y 2014 hubo un aumento considerable con excepción del sitio HUCAP 4 (2014). En el año 2017 se considera que hay un grado de contaminación nula.

3.1.4. ICOpH: Índice de contaminación por pH

El pH para todos los años en los lugares de muestreo y según los escenarios indica una buena calidad del agua registrando una tendencia constante en los años de estudio. Únicamente, se observó en el año 2006, en el Espejo 1 un valor considerado como categoría muy alta de contaminación.

En el HUCAP 1, se observó un valor considerado como categoría de contaminación media en el 2008 y baja en el 2013.

3.1.5. ICOSUS: Índice de Contaminación por Sólidos Suspendedos Totales

Los sólidos suspendidos totales para todos los años en los lugares de muestreo indican una buena calidad de agua registrando una tendencia constante en los años de estudio. En el 2013, en el HUCAP 4 se observó un valor considerado como categoría de contaminación muy alta. En el 2014, se observó un valor considerado como categoría de contaminación muy alta en el HUCAP 1 y en el HUCAP 4 con una categoría alta.

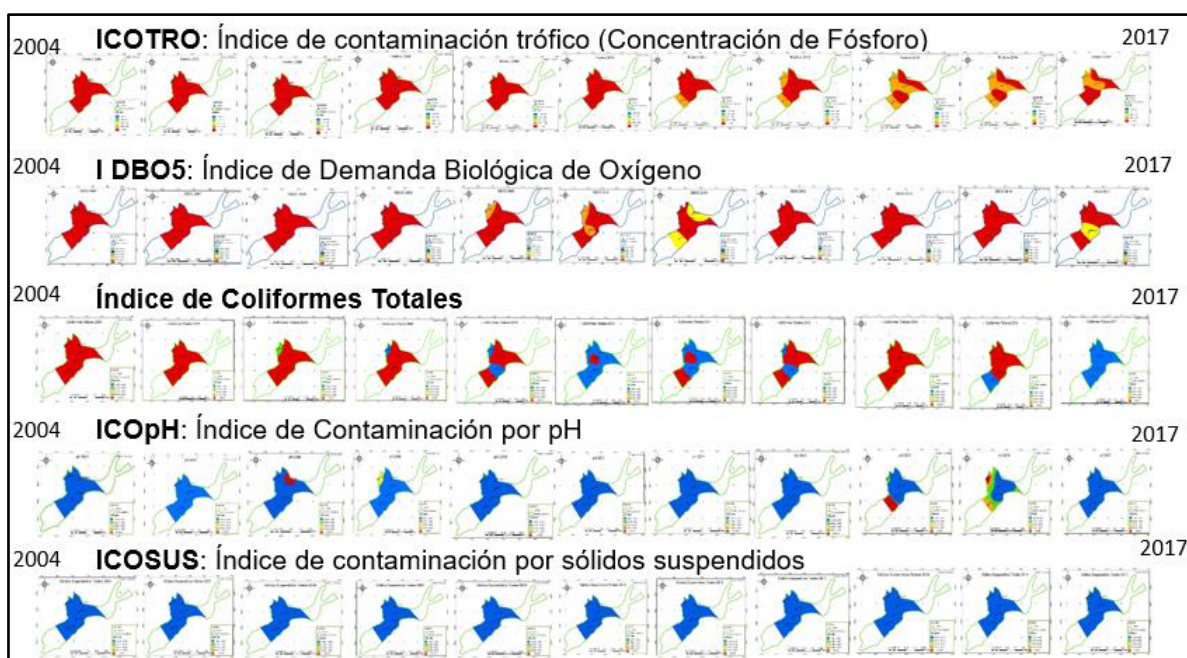


Figura 4. Interpolación espacial de los índices de contaminación. Los colores indican los siguientes grados de contaminación: rojo: contaminación muy alta; amarillo: contaminación media; verde: contaminación baja; azul: contaminación nula.

3.2. Parámetros físico-químicos y reglamentación

Los resultados de la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk, la prueba de Levene, el ANOVA de lugares y años, y la prueba post-hoc de Tukey, para cada parámetro, se encuentran en los anexos 18-26.

3.2.1. pH

No se observaron diferencias significativas de pH ni entre lugares ($p=0.82$), ni entre años ($p=0.11$).

Según la reglamentación colombiana para los parques ecológicos distritales de humedales, el pH debe tener un mínimo de 5.5 y un máximo de 9. Para el año 2006 el pH en el Espejo 1 alcanzó un máximo de 9.1, lo que indica que para este lugar el pH no cumplió con la reglamentación establecida para los cuerpos de agua que albergan flora y fauna (Figura 5).

3.2.2. Fenoles

No se observaron diferencias significativas de las concentraciones de fenoles ni espaciales ($p=0.72$) ni temporales ($p=0.35$).

Según la reglamentación colombiana, para los parques ecológicos distritales de humedales, el nivel de fenoles no debe superar 1.0 mg Fenol/l, lo que indica que para los años muestreados se cumplió con la reglamentación establecida (Figura 5).

3.2.3. Sólidos Suspendidos Totales

No se observaron diferencias significativas de las concentraciones de sólidos suspendidos totales ni espaciales ($p=0.43$) ni temporales ($p=0.07$).

Según la reglamentación colombiana para los humedales y demás cuerpos lénticos de aguas ubicados dentro de la cuenca del río Bogotá, el nivel de Sólidos Suspendidos Totales debe ser máximo de 20 mg/l, lo que indica que para todos los años de muestreo no se cumplió con la reglamentación establecida (Figura 5).

3.2.4. Carbono Orgánico

No se observaron diferencias significativas en carbono orgánico, ni espaciales ($p=0.15$), ni temporales ($p=0.09$).

No se ha establecido una reglamentación para el carbono orgánico por lo cual no se puede determinar si los valores de este parámetro cumplen o no con la reglamentación colombiana.

3.2.5. Demanda química de oxígeno (DQO)

No se observaron diferencias significativas de DQO espaciales ($p=0.33$) pero si temporales ($p=0.02$).

En la prueba post-hoc de Tukey se determinó que los años que presentaron diferencias significativas ($p<0.05$) fueron: 2004-2010 ($p=0.02$), 2004-2011 ($p=0.03$), 2005-2009 ($p=0.03$), 2005-2010 ($p=0.002$), 2005-2011 ($p=0.003$), 2005-2014 ($p=0.04$), 2005-2012 ($p=0.02$).

No se ha establecido una reglamentación para la DQO por lo cual no se puede determinar si los valores de este parámetro cumplen o no con la reglamentación colombiana.

3.2.6. Demanda biológica de oxígeno (DBO)

No se observaron diferencias significativas de DBO espaciales ($p=0.98$), pero si temporales ($p=0.0002$).

En la prueba post hoc de Tukey se determinó que los años que presentaron diferencias significativas ($p<0,05$) fueron: 2004-2010 ($p=0,02$), 2004-2011 ($p=0,03$), 2005-2009 ($p=0,03$) 2005-2010 ($p=0,02$), 2005-2011 ($p=0,003$), 2005-2014 ($p=0,04$), 2005-2017 ($p=0,02$).

Según la reglamentación colombiana para los humedales y demás cuerpos lénticos de aguas ubicados dentro de la cuenca del río Bogotá, el nivel de DBO debe ser un máximo de 20 mg/l lo que indica que los lugares Espejo1- HUCAP 4 (en el 2011), Espejo 1 (en el 2012), Espejo 1 (en el 2014) y Espejo 2 (en el 2017), están por

debajo del límite de demanda biológica de oxígeno, los otros años y lugares de muestreo están por encima de este límite (Figura 6).

3.2.7. Nitrógeno

No se observaron diferencias significativas de las concentraciones de nitrógeno entre lugares ($p=0.25$), pero sí entre años ($p=0.02$).

En la prueba de Tukey se determinó que los años que presentaron diferencias significativas ($p<0.05$) fueron: 2005-2010 ($p=0.02$) y 2005-2011 (p -valor 0.04).

No se ha establecido una reglamentación para el nitrógeno por lo cual no se puede determinar si los valores de este parámetro cumplen o no con la reglamentación colombiana.

3.2.8. Fósforo

Se observaron diferencias significativas de las concentraciones de fósforo espaciales ($p=0.0007$) y temporales ($p=0.0005$).

En la prueba post hoc de Tukey se determinó que los que presentaron diferencias significativas ($p<0.05$) fueron: E1-HUCAP2 ($p=0.02$), E1-HUCAP4 ($p=0.05$), E2-HUCAP1 ($p=0.02$), E2-HUCAP2 ($p=0.008$), E2-HUCAP4 ($p=0.02$).

En la prueba post hoc de Tukey se determinó que los años que presentaron diferencias significativas ($p<0.05$) fueron: 2005-2009 ($p=0.004$), 2005-2010 ($p=0.03$), 2005-2011 ($p=0.02$), 2006-2009 ($p=0.03$).

Según la reglamentación colombiana para los humedales y demás cuerpos lénticos de aguas ubicados dentro de la cuenca del río Bogotá el nivel de fósforo debe ser máximo de 0,1 mg/l, lo que indica que para todos años de muestreo no se cumplió con la reglamentación establecida (Figura 6).

3.2.9. Coliformes Totales

No se observaron diferencias significativas de concentraciones de coliformes totales espaciales ($p=0.65$) pero si temporales ($p=0.00001$).

En la prueba post hoc de Tukey se determinó que los años que presentaron diferencias significativas ($p<0.05$) fueron: 2004-2009 ($p=0.007$), 2004-2010 ($p=0.002$), 2004-2011 ($p=0.009$), 2004-2012 ($p=0.03$), 2004-2013 ($p=0.008$), 2004-2014 ($p=0.02$), 2004-2017 ($p=0,0009$), 2005-2010 ($p=0.02$), 2005-2017 ($p=0.008$), 2008-2009 ($p=0.04$), 2008-2010 ($p=0.01$), 2008-2013 ($p=0.05$), 2008-2017 ($p=0.005$).

Según la reglamentación colombiana para los humedales y demás cuerpos lénticos de aguas ubicados dentro de la cuenca del río Bogotá el nivel de Coliformes Totales debe tener un máximo de 5000 NMP, lo que indica que para la mayoría de los lugares y años de muestreo no se cumplió con la reglamentación establecida (Figura 6).

3.2.10. Conductividad

No se observaron diferencias significativas de conductividad temporales ($p=0.28$) pero si espaciales ($p=0.002$).

En la prueba post hoc de Tukey se determinó que los lugares que presentan diferencias significativas ($p<0.05$) fueron: E2-HUCAP2 ($p=0,03$), HUCAP1-HUCAP2 ($p=0.007$), HUCAP1-HUCAP4 ($p=0.02$).

3.2.11. Porcentaje de reducción de parámetros de calidad de agua de 2005 y 2017

Se analizó el cambio de los parámetros fisicoquímicos, por medio de una tabla comparativa donde se estudió el porcentaje de reducción en los valores de los parámetros en los años 2005 y 2017.

Los parámetros que disminuyeron con mayor porcentaje fue coliformes totales, demanda biológica de oxígeno, nitrógeno y fósforo (Anexo 33).

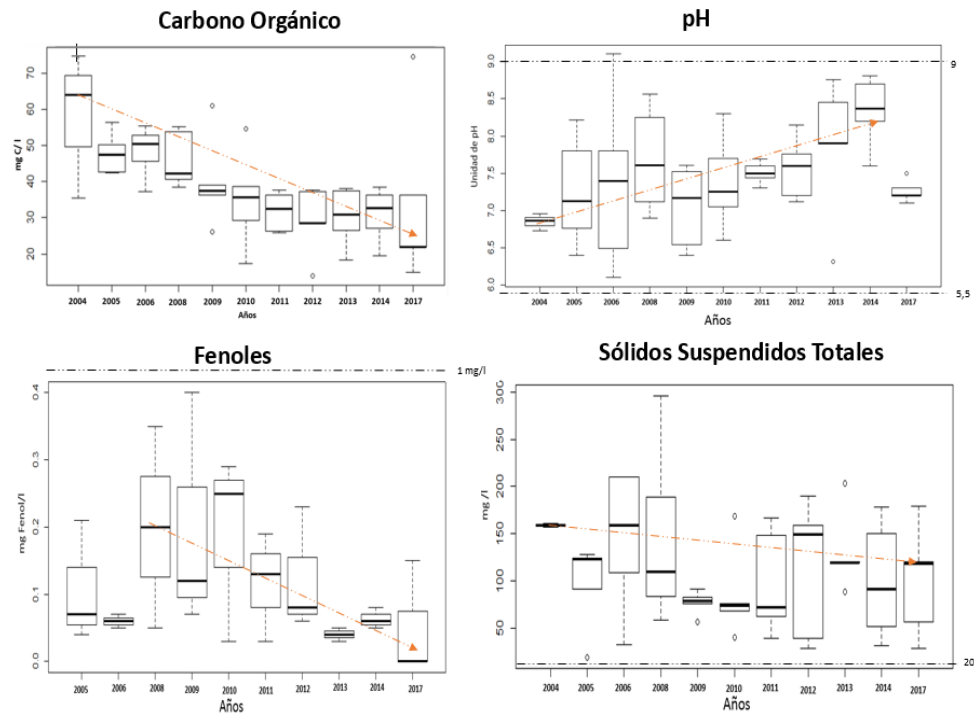


Figura 5. Valores de pH, Carbono Orgánico, Fenoles, Sólidos Suspendedos Totales (promedio \pm desviación estándar) del 2004 al 2017 en el Humedal de Capellanía ($n = 5$; $p > 0.05$).

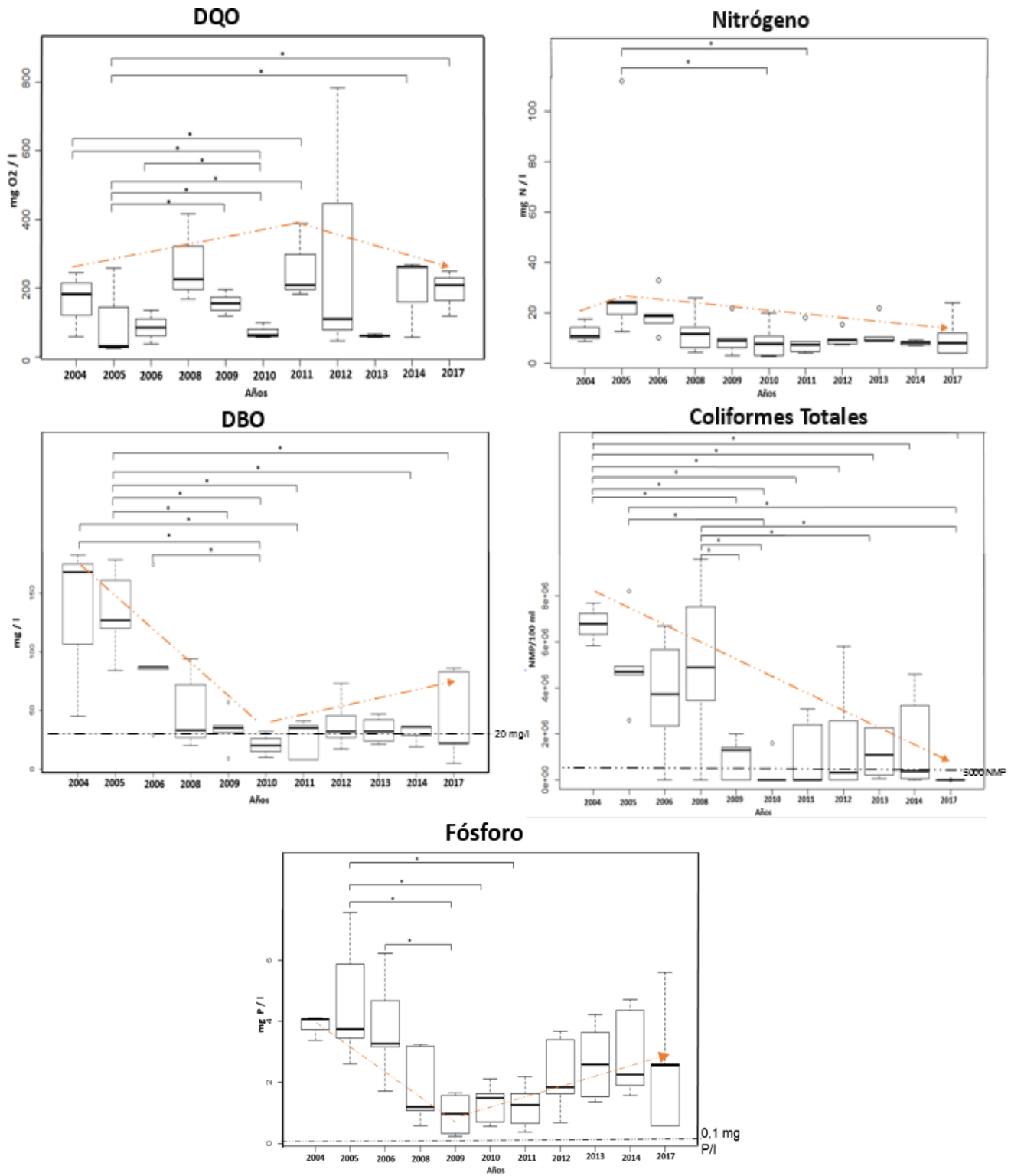


Figura 6. Valores de Demanda Química de Oxígeno (DQO), Nitrógeno (N), Demanda Biológica de Oxígeno (DBO) Coliformes Totales, Fósforo (P) (promedio \pm desviación estándar) del 2004 al 2017 en el Humedal de Capellanía (n = 5); * p<0.05.

3.3. Transformación de la cuenca aferente

Producto de la metodología aplicada con las ortofotos y las imágenes satelitales, se categorizaron el área urbana e industrial y las zonas de suelo libre.

Se obtuvieron cinco mapas con las coberturas de suelo para los años 2004, 2008, 2011, 2014 y 2017 (Anexo 30) los cuales representan los cambios ocurridos por efecto del crecimiento urbano e industrial y un mapa comparativo que representa el cambio de cobertura entre los años mencionados (Figura 7).

De esta manera se pudo determinar que la cuenca aferente en el año 2004 ocupaba una extensión de 928 (Ha) de área construida, y un área libre de 480 (Ha), y para el año 2017 tenía

un área construida de 1.128 (Ha) con un área libre de 208 (Ha) (Tabla 3).

La dirección de red matriz de la EAAB ESP realiza las actividades que están enfocadas a la planeación, diseño, construcción, operación, control y mantenimiento del sistema matriz de la ciudad, el cual está conformado por redes pluviales y domésticas, también es la encargada de la conducción y distribución de agua potable en redes matrices (EAAB, 2010). La inspección de las redes de alcantarillado se debe realizar periódicamente la cual consiste en la revisión del estado constructivo, operativo y estructural de las mismas, y evaluar daños, obstrucciones, conexiones erradas y otras alteraciones en las redes o estructuras (EAAB, 2007).

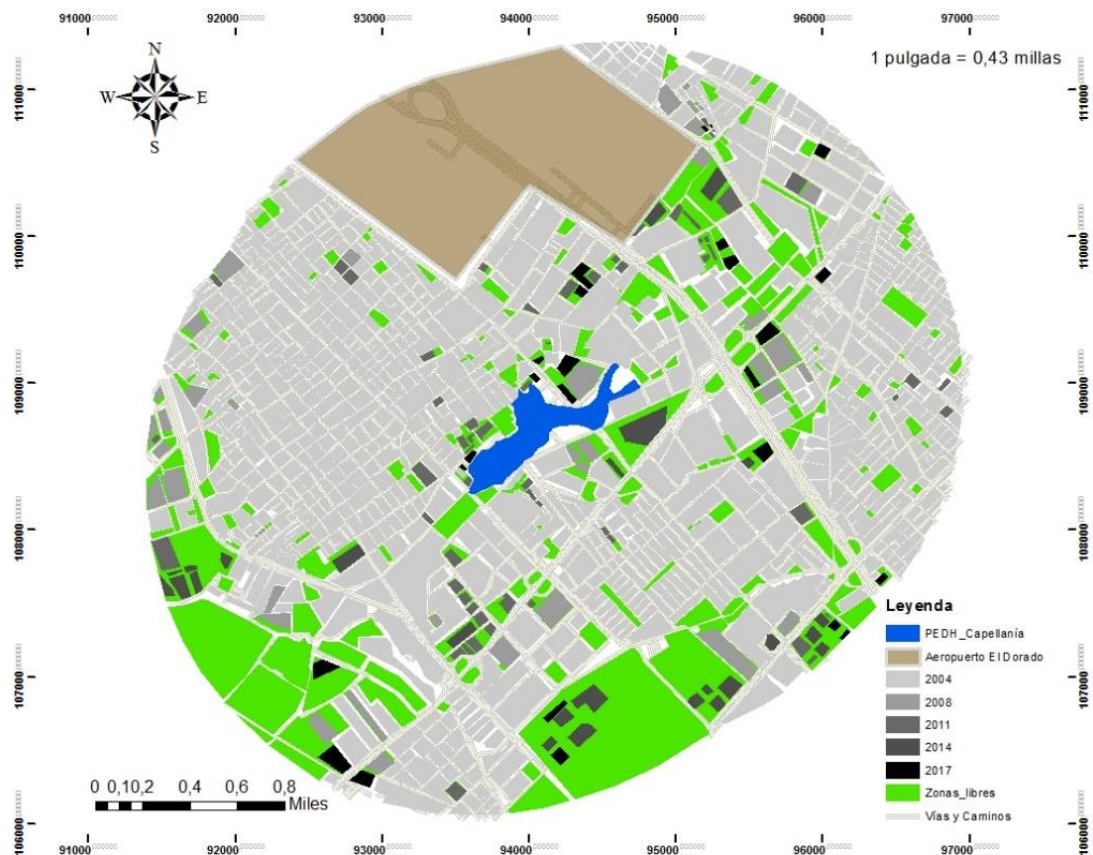


Figura 7. Mapa comparativo del cambio de uso de suelo en la cuenca aferente 2004-2017.

Tabla 3 Transformación de las coberturas de suelo de la cuenca aferente a través del tiempo.

AÑO	ÁREAS LIBRES (HA)	ZONA URBANO E INDSUTRIAL (HA)	INCREMENTO		INCREMENTO (S)	RED PLUVIAL	INCREMENTO (P)
			AREA URBANA INDUSTRIAL (HA)	RED SANITARIA			
2004	489	928	-	4836	-	1866	-
2008	408	985	57	5265	429	2144	278
2011	370	1015	30	5388	123	2343	199
2014	297	1044	29	5485	97	2464	121
2017	280	1061	17	5495	10	2542	78

A medida que crece el desarrollo urbano-industrial, también se deben habilitar redes para el manejo y transporte del agua a las nuevas construcciones. Por lo tanto, estas redes crecen proporcionalmente con el desarrollo urbano-industrial (Tabla 3).

3.4. Relaciones entre parámetros de calidad del agua y transformación de coberturas de la cuenca aferente

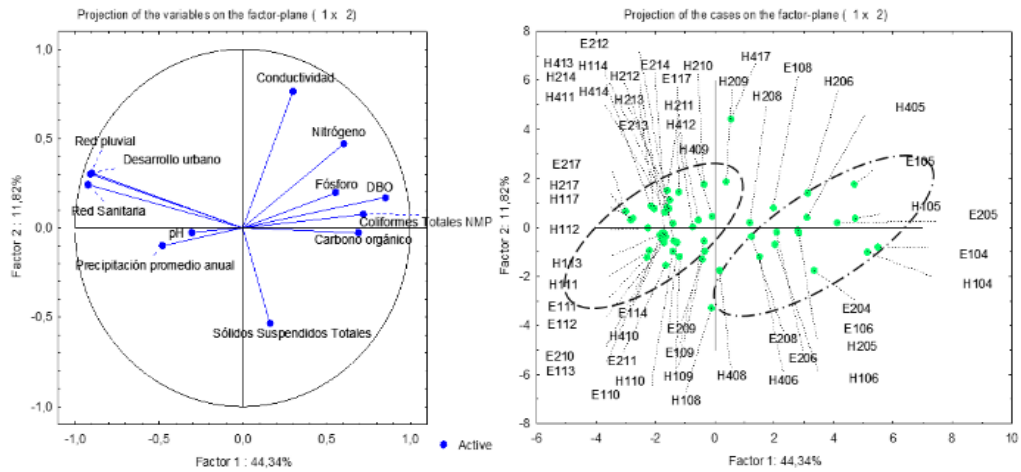
Con base en el resultado del análisis de componentes principales (ACP) se escogieron los tres primeros componentes ya que explican el 65,73% de la variabilidad de los datos (44,34% el componente 1, 11,82% el componente 2 y 9,57% el componente 3) y tienen un valor propio mayor a 1 (Anexo 31). En la Figura 8 del componente 1 relacionado con el 2, se observa una correlación positiva entre el desarrollo urbano, la red pluvial y la red sanitaria. Este resultado tiene sentido, ya que, junto con el desarrollo urbano, se desarrollan las redes pluviales y sanitarias. También se observa que los Coliformes Totales tienen una correlación positiva alta con el Carbono Orgánico y la DBO. Los coliformes limitan a otros microorganismos para consumir oxígeno, produciendo mayores cantidades de carbono y CO₂ en el agua (Carillo et al., 2008), lo cual explica las correlaciones observadas. Al analizar el resultado de la ACP por lugares, se observan agrupamientos por años, pero no por lugares (Figura 8). Este resultado sugiere que los

cambios son homogéneos en los puntos muestreados del humedal, pero entre años sí hay grandes diferencias, esto se puede deber principalmente a que solo se evaluó la cuenca media del humedal por lo cual al estar relativamente cerca los puntos de muestreo no difieren considerablemente, pero muy posiblemente si se evalúa la entrada de agua de la cuenca alta del humedal se presentaran diferencias significativas.

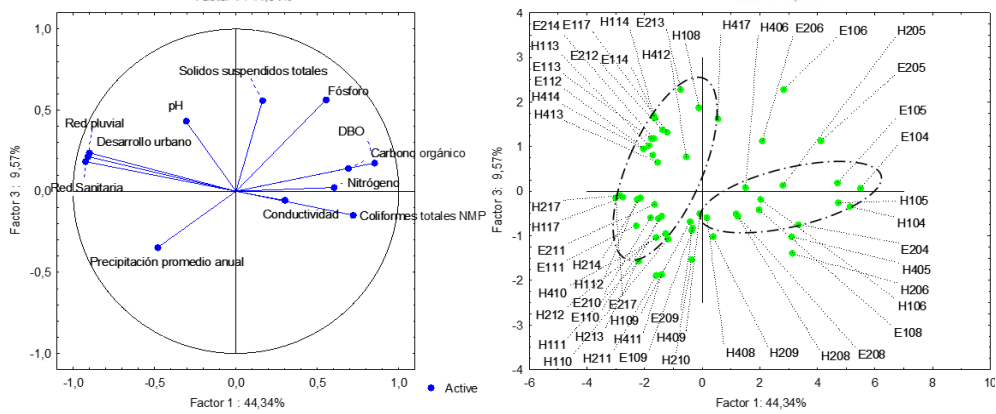
Se realizó un segundo ACP, entre el componente 1 y el componente 3 (Anexo 32). Se observa una correlación positiva alta entre la red pluvial, el desarrollo urbano y la red sanitaria (Figura 8). Se observa también una correlación negativa entre los Coliformes Totales por un lado, y el desarrollo urbano, la red pluvial, y la red sanitaria por otro lado. Se observa que el nitrógeno y el carbono orgánico tienen correlación positiva. Al analizar el resultado de la ACP por lugares, se observan agrupamientos por años, pero no por lugares (Figura 8), reforzando los resultados obtenidos en el ACP con los componentes 1 y 2.

Se realizó un tercer ACP, entre el componente 2 y el componente 3. Se observó una correlación positiva alta entre la DBO, el desarrollo urbano, la red pluvial y la red sanitaria. Se observó también una correlación positiva entre el Nitrógeno y la Conductividad, lo cual sugiere que el Nitrógeno es uno de los componentes que más participan a los altos valores de conductividad obtenidos.

a.



b.



c.

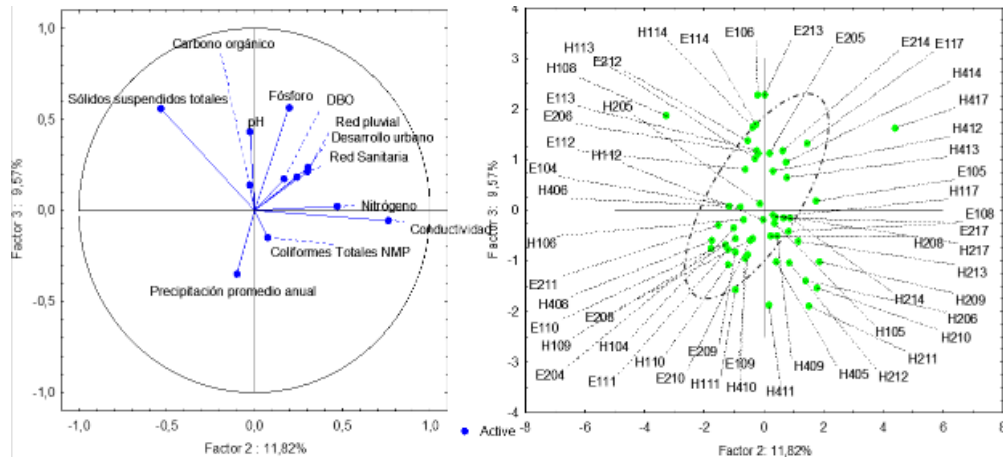


Figura 8. Graficas de Correlaciones de Componentes Principales. a. Análisis de componentes principales Componente 1 x Componente 2; b. Análisis de componentes principales Componente 1 x Componente 3; c. Análisis de componentes principales Componente 2 x Componente 3.

La prueba de correlación de Spearman (Anexo 34) dio como resultado que la demanda biológica de oxígeno (DBO) tiene correlación positiva significativa con: Nitrógeno, Fósforo, Coliformes Totales, Conductividad y Carbono Orgánico. Adicionalmente, el Carbono Orgánico tiene correlación positiva significativa con Nitrógeno. El Nitrógeno también tiene correlación positiva significativa con: Fósforo, Coliformes Totales y Conductividad. La Precipitación tiene correlación positiva con: Desarrollo urbano, red pluvial y red sanitaria. Las variables red pluvial, desarrollo urbano y red sanitaria tienen una correlación positiva significativa alta.

Por otro lado, la demanda biológica de oxígeno (DBO), el Carbono Orgánico, el Nitrógeno y los Coliformes Totales tienen una correlación significativa negativa con: Desarrollo urbano, red pluvial, red sanitaria y precipitación. El Carbono Orgánico tiene correlación negativa significativa con: Desarrollo urbano, red pluvial, red sanitaria y precipitación.

3.5. Estrategias de recuperación y mantenimiento en el humedal Capellanía

Con base en el cumplimiento del PMA realizado en el 2008 por la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá y Conservación Internacional se plantearon estrategias de recuperación y mantenimiento en el marco del plan de acción para el mejoramiento del Humedal Capellanía resumidas en la Tabla 4.

De acuerdo con la sentencia del Río Bogotá del 28 de marzo de 2014 la Empresa de Acueducto de Bogotá presentó el programa del ‘plan para la identificación y corrección de conexiones erradas del sistema sanitario al sistema pluvial de la ciudad’.

En esta Sentencia la EAAB nombra las actividades a futuro para la identificación y eliminación de usuarios que presentan conexiones erradas mediante una inspección detallada de la totalidad de las redes de alcantarillado de la ciudad con un periodo de

ejecución previsto de 15 años, a partir del año 2016 (Anexo 35).

Cabe aclarar que según el decreto 190 de 2004 el artículo 86 parágrafo 2, la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá deberá realizar los estudios y acciones necesarias para mantener, recuperar y conservar los humedales en sus componentes, hidráulico, sanitario, biótico y urbanístico realizando además el seguimiento técnico de las zonas de ronda y de manejo y preservación ambiental. De acuerdo a lo anterior, la EAAB ha realizado las siguientes acciones.

3.5.1. Acciones de recuperación

3.5.1.1. Configuración paisajística

La recuperación de la configuración paisajística del Humedal se realizó a partir del convenio interadministrativo entre Jardín Botánico de Bogotá (JBB) y EAAB 9-07-24300-0967-2013, donde enriquecieron y mejoraron el hábitat sembrando un total de 90 especies arbóreas y 600 especies herbáceas propias del ecosistema de humedal.

3.5.1.2. Adecuación hidrogeomorfológica

Bajo el contrato interadministrativo 2-02-24100-0773-2009 realizaron el diseño para la adecuación hidrogeomorfológica y restauración ecológica de hábitats acuáticos y semiacuáticos de la cuenca media del humedal Capellanía (Anexo 36).

El objetivo de la reconfiguración hidrogeomorfológica es la potenciación del humedal como ecosistema que sustenta hábitats para diversas especies de fauna y flora, mejorando la hidrodinámica del cuerpo de agua (Contrato 2-02-24100-773-2009).

3.5.1.3. Conexiones erradas

La EAAB es la responsable de operar y mantener los sistemas de drenaje y conducción de aguas residuales y lluvias, también es responsable de la separación de las mismas, de manera a minimizar el vertimiento de estas aguas a los cauces naturales de la Estructura Ecológica Principal de Bogotá (Res 0686 de 2014). Adicionalmente, las aguas residuales

requieren ser tratadas mientras que las aguas lluvias no. La conexión de aguas lluvias a la red de aguas residuales aumenta la cantidad de agua que debe ser tratada, lo cual disminuye la eficacia de las plantas de tratamientos de aguas.

Mediante el contrato No.1-02-24200-1459-2013 la EAAB realizó la identificación de conexiones erradas a los colectores aferentes del humedal Capellanía y el Burro.

Para la identificación de estas conexiones, se realizó una inspección visual del terreno donde se tuvo en cuenta el estado de las vías, el estado y material de las tapas de los pozos de inspección, se chequeo los sumideros con el fin de detectar si existían malos olores y se inspeccionaron los usos de las viviendas.

Posteriormente se usaron equipos especializados de chorro a presión para eliminar todos los depósitos presentes en la tubería y después se realizó una inspección interna con circuito cerrado de televisión. (CCTV).

En el humedal Capellanía se lavaron e inspeccionaron 1260 metros lineales de redes pluviales donde se identificaron doce (12) conexiones erradas (Anexo 37-38). Después de identificadas, la EAAB realizó las operaciones pertinentes de eliminación.

3.5.2. Acciones de mantenimiento

3.5.2.1. Recolecciones de residuos sólidos en la franja acuática y terrestre

Bajo el contrato interadministrativo 9-99-24300-0979-2013 Aguas de Bogotá y EAAB realizaron actividades de mantenimiento integral de la franja acuática y recolección de residuos sólidos en la franja terrestre en los humedales de Bogotá. Para el humedal Capellanía, se ejecutaron acciones entre 2013 y 2017 (Anexos 39-40).

3.5.2.2. Cerramiento del humedal

La EAAB bajo el contrato 2-01-24300-665-2007 realizó la construcción del cerramiento

provisional en alambre de púas, postes y dados de concreto. Más adelante, bajo el contrato interadministrativo 1-01-24300-1361-2013, realizó la construcción del cerramiento permanente en la malla eslabonada con zapatas independientes y vigas de amarre en concreto en el humedal (Anexo 41).

3.5.2.3. Calificación de las estrategias de mantenimiento y recuperación del humedal

Se observa que la EAAB ha ejecutado todas las obras correspondientes, pero no ha sido 100% efectivo (Tabla 4).

En la configuración paisajística, por medio de enriquecimiento de especies, se observa que no es muy alto el número de especies arbóreas sembradas (Tabla 4).

Para la adecuación hidrogeomorfológica, sólo se tiene el diseño para la ejecución de obra, pero no se ha ejecutado aún ninguna obra (Tabla 4).

La eliminación de 12 conexiones erradas en toda la cuenca aferente no es muy significativa ya que según la sentencia del río Bogotá de 2014 se presume que solo para la cuenca Fucha hay 2.791 conexiones erradas (Anexo 42). El mantenimiento ha sido efectivo ya que gran parte del humedal tiene cerramiento y se ha realizado limpieza constante en la franja acuática y terrestre (Tabla 4).

Con respecto a lo anterior las obras de recuperación y mantenimiento que se han realizado en el humedal, han ayudado a la disminución en la contaminación del agua en la cuenca media humedal, ya que en el año 2005 valores como Coliformes Totales, DQO, DBO, nitrógeno y fosforo eran elevados a comparación del año 2017 (Anexo 33).

Tabla 4. Calificación de estrategias de recuperación y mantenimiento del humedal Capellanía.

Estrategias basadas en el plan de acción del PMA y la Sentencia del Río Bogotá para el mejoramiento del PEDH Capellanía		Porcentaje de Avance
Recuperación	Recuperación de la configuración paisajística del Humedal a partir del enriquecimiento y mejoramiento de hábitats	35%
	Adecuación Hidrogeomorfológica para el mejoramiento de hábitats acuáticos	30%
	Detección y eliminación de conexiones erradas	25%
Mantenimiento	Actividades de recolección de residuos Sólidos en la Franja Acuática y Terrestre.	100%
	Cerramiento parcial o definitivo alrededor del humedal	75%

4. Discusión

Para analizar la variación espacio-temporal de la calidad de agua del humedal Capellanía se tuvieron en cuenta cuatro métodos de análisis. El primero consistió en determinar el cambio espacio-temporal por parámetros fisicoquímicos e índices de contaminación, el segundo se basó en los cambios espacio-temporales de la cuenca aferente, el tercer método relacionó los parámetros de calidad de agua y las variables del cambio de cobertura y por último se analizó la efectividad en las medidas de recuperación y mantenimiento del humedal por parte de la entidad encargada.

4.1. Parámetros e índices de Calidad de agua

Los parámetros e índices seleccionados en el presente estudio han sido descritos como indicadores para medir el grado de contaminación de una corriente superficial (Ramírez et al., 1997). En este estudio, se observó una disminución de estos índices, a través de los años analizados.

El índice ICOTRO demostró en todos los años de estudio que existe una elevada concentración de fósforo. Esto se puede explicar por el hecho de que el ecosistema acuático es de tipo humedal.

Según Sosnovsky y Quirós (2006), los humedales, lagos y lagunas siempre van a estar en un rango hipertrófico y eutrófico ya que estos ecosistemas se caracterizan por tener un

gran número de algas, macrófitas y comunidades planctónicas (Pulido et al., 2017), además no se cumplió con la norma ambiental ya que se obtuvieron valores mayores a 0,1 mg Fósforo/l, para todos los años de muestreo.

Adicionalmente, las concentraciones de fósforo en este estudio fueron más elevadas que las del humedal Salitre en Bogotá, considerado por Pulido et al. (2017) como eutrófico, por lo cual se le debe hacer un seguimiento a las concentraciones de fósforo y otros nutrientes en el humedal Capellanía.

El índice ICOSUS evidencia que tiene una contaminación nula en todos los años. Esto se puede deber principalmente a que no hay una llegada importante de sólidos al humedal y/o a las cualidades de filtro y captación de las plantas acuáticas alrededor de los puntos de muestreo, logrando la remoción de hasta el 90% del material suspendido (Pérez et al., 2008). Sin embargo, vale la pena resaltar que la concentración máxima de sólidos suspendidos según la norma ambiental es de 20 mg/l, lo que indica que para todos los años de muestreo no se cumplió con la norma, razón por la cual se debe seguir haciendo un monitoreo de este parámetro ambiental.

El humedal Capellanía presentó en un estudio que se realizó en los años 2004 y 2005, altos niveles de contaminación hídrica (Zamudio, 2007). Debido a que ese estudio se realizó en corrientes superficiales, la afectación de la calidad del agua pareciera deberse principalmente a factores externos (Flórez et al., 2016).

Nieto et al. (2008) describió que valores altos de contaminación por Coliformes Totales, DQO y DBO, estaban relacionados con la presencia de animales que pastaban alrededor del humedal y a la disposición de escombros (Guarnizo et al., 2008). Del mismo modo, la construcción de urbanizaciones ilegales, generaron grandes cantidades de escombros que fueron dispuestos en el cuerpo de agua, lo cual trajo consigo mala calidad del agua (Van der Hammen et al., 2008).

Estos resultados concuerdan con otros estudios de calidad de agua en humedales de Bogotá (Castro et al., 2005; Ávila, 2006), en donde se han evidenciado valores altos en diferentes parámetros tales como Coliformes Totales, DQO y DBO.

En base a nuestro estudio, en donde se hizo un análisis de la calidad del agua hasta el año 2017, se puede observar que, en términos generales, del año 2008 en adelante, se ve una mejoría en las condiciones de calidad de agua del humedal, del mismo modo se analiza que en casi todos los parámetros hubo una reducción de más del 50% desde el año 2005 al 2017.

Según la prueba post hoc de Tukey, el fósforo y la conductividad fueron los únicos parámetros que presentaron diferencias significativas entre lugares. Según la prueba post hoc de Tukey, el fósforo y la conductividad fueron los únicos parámetros que presentaron diferencias significativas entre lugares. El fósforo presentó valores más altos en los espejos de agua, a comparación de los HUCAP. Estos resultados concuerdan con el estudio de Nieto et al. (2008), en donde se explica, que hay mayor concentración de fósforo en los espejos de agua de los

humedales, debido a la presencia de plantas acuáticas que requieren este nutriente y otros para su reproducción y crecimiento.

La conductividad es una medida de la capacidad de una corriente para conducir electricidad (IDEAM, 2007). Esta propiedad depende de la concentración, presencia y movilidad de iones, y de la temperatura del ambiente (Ramos et al., 2003). Altos niveles de conductividad eléctrica indican la salinidad y/o mineralización en el cuerpo de agua. Este parámetro depende de sales nutritivas (nitritos, nitratos, fosfatos). Según la prueba post hoc de Tukey, se observaron diferencias significativas entre Espejo2 y HUCAP2, HUCAP2 y HUCAP1, y HUCAP4 y HUCAP1. Esta diferencia entre los lugares puede deberse principalmente a “outliers” en la muestra de los datos, ya que en la correlación de Spearman y en el análisis de componentes principales la conductividad no tuvo relación con ningún parámetro.

4.2. Normatividad

Con respecto a la normatividad que regula los niveles máximos y mínimos permisibles en los parámetros estudiados, falta incorporar reglamentación para los ecosistemas categoría 3 en los siguientes parámetros: carbono orgánico, demanda química de oxígeno (DQO) y nitrógeno (N). La incorporación de estos límites es primordial ya que se podría ayudar a regular con más rigor la variabilidad del cambio en la calidad de agua.

Los cuerpos de agua categoría 3 corresponden a ecosistemas de embalses, lagunas, humedales (Ramsar, 2011). Con base a lo anterior, los valores de la reglamentación para países Centro americanos y Sur americanos en los cuerpos de agua categoría 3, no difiere mucho de los valores de la reglamentación colombiana, pero si toman en cuenta en algunos países los parámetros adicionales, tales como DQO y Nitrógeno.

Para Colombia, según el decreto 1594 de 1984, y en el decreto 1076 de 2015, expedido por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo

Sostenible, los límites permisibles para las aguas superficiales en climas fríos para la preservación de fauna y flora de los parámetros analizados en este estudio, son los siguientes:

pH 5,5-9 unidad de pH
Sólidos Suspendidos Totales 20 mg/l
Coliformes Totales 5000 NMP/100 ml
Fósforo 0.1 mg/L
DBO 20 mg/l

En base a la norma colombiana, los resultados analizados para el humedal Capellanía, muestran que no se cumplió con los límites permisibles para Fósforo y sólidos suspendidos totales en todos los lugares en los años muestreados.

Para DBO, Coliformes Totales no se cumplió con los límites permisibles principalmente los primeros años de estudio (Figuras 5 y 6).

Para la República Dominicana, según la ley 64-00 dictada por el Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales, se establecen los estándares límites permisibles para las aguas superficiales de preservación de flora y fauna, con los siguientes valores:

pH 6-8.5 unidad de pH
DBO 45 mg/l
DQO 150 mg O₂/l
Sólidos Suspendidos Totales 45 mg/l
Coliformes Totales 1,000 NMP/100 ml

Para Argentina, según la resolución N 1089, se regulan los siguientes límites para indicadores de agua de una corriente superficial:

Coliformes Totales 5.000 NMP/100 ml
DBO 50 mg/l
DQO 75 mg O₂/l
Fenoles 0.05 mg Fenol/l
Nitrógeno Total 10 mg N/l
pH 5.5-10 unidad de pH

Para Uruguay, según la resolución 253/978, se presentan los siguientes límites de indicadores de un curso de agua superficial:

Coliformes Totales 5,000 NMP/100 ml
DBO 60 mg/l
pH 6-9 unidad de pH

Para México, según el artículo 47 de la ley Federal sobre Meteorología y Normalización y la norma oficial NOM-001ECOL-1996, establece los siguientes límites máximos permisibles de contaminantes en aguas y bienes nacionales, para la categoría de humedales, embalses naturales y artificiales:

Sólidos Suspendidos Totales 40 - 45 mg/l
DBO 30 mg/l
Nitrógeno total 15 mg N/l
Fósforo Total 5 mg de Fósforo/l
pH 5-10 unidad de pH

En base a las normas ambientales de los demás países, y los resultados analizados para el humedal Capellanía, los resultados muestran que no se cumplieron con los límites permisibles para el nitrógeno, especialmente en los años iniciales, según la reglamentación de Argentina (10 mg N/l) y de México (15 mg N/l) (Anexo 9). Tampoco se cumplieron con los límites permisibles para la DQO, especialmente en algunos de los años iniciales, según la reglamentación de la República Dominicana (150 mg O₂/l) y de Argentina (75 mg O₂/l) (Anexo 9).

Sin embargo, vale la pena resaltar que los muestreos realizados en el humedal sólo cubren la cuenca media del humedal, y que la cuenca baja y alta (donde hay mayor número de industrias) no se tuvieron en cuenta en este estudio. Con base a lo anterior, la entidad encargada debería tomar muestras en todas las entradas de agua (cuenca alta, media) siguiendo los lineamientos de Ramsar que informa tomar como mínimo dos muestras en periodos de lluvias y en periodos secos en todas las entradas de agua al humedal.

4.3. Cambios en cobertura de la cuenca aferente

El humedal Capellanía es uno de los humedales en Bogotá que más se ha visto perjudicado con la pérdida de cobertura vegetal y el espejo de agua (Cardona et al., 2015). Peñaloza et al. (2014) afirma que se debe principalmente a la falta de planeación de las autoridades encargadas para la toma de decisiones.

En los resultados se evidenció un aumento en el desarrollo urbano e industrial, donde proporcionalmente también crecieron las redes de alcantarillado pluvial y sanitario, lo cual tiene sentido.

El mayor periodo donde creció la cuenca aferente fue en los años 2004 a 2008 con un porcentaje del 43%. Ayala (2009) argumenta que durante el periodo del 2000 al 2008, se desarrollaron un gran número de actividades industriales en la zona occidental de la capital. También se ve un incremento en la apropiación del suelo de pequeños lotes (Pulido, 2014). Para este mismo periodo se incrementó la compra de predios para la construcción de parques industriales, siendo estos los años más significativos para el crecimiento de áreas licenciadas en el uso industrial (Córdoba, 2016).

En la actualidad, se están realizando construcciones urbanas legales en la zona oriental del humedal, lo que indica que se está cumpliendo con los requerimientos necesarios de construcción, por lo cual el número de conexiones erradas no debería aumentar. Por lo tanto, se esperaría en el futuro que los valores de los parámetros de calidad de agua disminuyeran o quedaran estables.

Al humedal le suministran agua 6 colectores pluviales (HUCAP), estos colectores están alimentados por aguas lluvias y en algunos casos por aguas domésticas perjudicando la calidad del cuerpo de agua del humedal.

La cuenca aferente se definió con base a todas las redes de alcantarillado que intervienen en el humedal, la cuenca está delimitada por 3 localidades (Fontibón, Engativá, Kennedy). La localidad de Fontibón es la que compone más barrios dentro de la cuenca, siendo esta localidad la más influyente en el humedal Capellanía.

Inicialmente la delimitación de la cuenca aferente en 1998 por parte de Hidromecánicas LTDA se determinó que era de 1,64 Km². Con la ampliación de las redes de alcantarillado, la

construcción del Colector de aguas lluvias y de redes locales de la Avenida La Esperanza y de Fontibón Oriental, se integró una nueva área de cuenca aferente de 2,19 Km², con respecto a esta nueva área se realizó el buffer circular.

La transformación de las redes hídricas generó cambios importantes en sus estructuras y procesos hidráulicos (Johanson et al., 2002; Guarnizo et al., 2008). Por esta razón, los colectores de alcantarillado que intervienen en el humedal están asociados a redes que de una u otra manera les suministran agua a estos colectores, sea en la desembocadura del humedal o en el drenaje (salida) de agua del humedal (Guarnizo et al., 2008).

Vale la pena resaltar que las redes de alcantarillado que se encuentran en la cuenca aferente no necesariamente le suministran agua al humedal, por lo cual no sería necesario realizar un buffer tan grande sino seleccionar las redes que verdaderamente le suministran agua al humedal y poder analizar los cambios en la cobertura, y también teniendo en cuenta esto, revisar la definición de la cuenca del PMA del humedal.

4.4. Análisis de componentes principales y correlación de Spearman

El análisis de componentes principales se llevó a cabo con las variables fisicoquímicas del agua, las precipitaciones, las variables del cambio de cobertura y el cambio de las redes pluvial y sanitaria. Con base en los resultados, los tres primeros componentes explicaron el 65% de la variabilidad de los datos. Sin embargo, el tercer componente no aporta mayor información, es decir que el componente uno y dos explican la mayoría de la variabilidad de los datos.

En este análisis se observó una correlación positiva entre Coliformes Totales, Demanda Biológica de Oxígeno, carbono orgánico, nitrógeno y fósforo. Del mismo modo en la prueba de correlación de Spearman estos parámetros tienen una correlación positiva significativa.

Los contenidos altos de nitrógeno y fósforo están correlacionados por el nivel de eutrofización del humedal que a su vez están influenciados por contenidos altos de fertilizantes (Montalvo et al., 2010), contribuyendo al agotamiento del oxígeno del cuerpo de agua del humedal.

Los Coliformes Totales están relacionados con la presencia de bacterias fecales provenientes de procesos de ganadería o de origen doméstico (Rodríguez, 2012), que a su vez incide en la cantidad de oxígeno que consumen los microorganismos para descomponer la materia orgánica (DBO) (Pérez et al., 2008).

En los tres factores del análisis de componentes principales se observó que la precipitación no estuvo correlacionada con ninguno de los otros parámetros, a pesar de periodos de lluvia fuerte en los años 2010, 2011 y 2012. Aunque unas precipitaciones fuertes pueden cambiar la hidrología de un humedal, arrastrando sedimentos al cuerpo de agua (Barrera, 2011), estas precipitaciones fuertes del 2010 al 2012, al parecer no influyeron de manera directa en la calidad de agua del humedal.

En base a los resultados de la prueba de correlación de Spearman, hubo una correlación positiva significativa del desarrollo urbano-industrial, las redes pluviales y las redes sanitarias del acueducto, lo cual tiene sentido porque entre más se desarrolle la ciudad, más se deben desarrollar las redes pluviales y sanitarias. Estas variables tuvieron una correlación negativa significativa con las variables de nitrógeno, coliformes totales y carbono orgánico lo cual indica que, aunque se podría esperar que, con el desarrollo urbano-industrial, los valores de estos parámetros aumentaría, los resultados muestran que la variación de estos parámetros a través de los años no está directamente influenciada por el desarrollo urbano-industrial.

4.5. Estrategias de recuperación y mantenimiento en el humedal Capellanía

Según las estrategias descritas en el PMA para la recuperación y el mantenimiento, la EAAB ha realizado acciones para el mejoramiento, cuidado y conservación del humedal, por ejemplo el cerramiento realizado por la EAAB en los años 2007 y 2013 favoreció la recuperación de los componentes naturales, permitiendo aumentar la abundancia y riqueza de especies, también controló la capacidad de carga de efluentes externos evitando rellenos y desecho de escombros (Reyes, 2008; Jiménez, 2011; Contreras et al., 2013). Estos resultados concuerdan con una hipótesis en donde se sugiere que los humedales que no poseen un cerramiento, tendrían mayor probabilidad a ser ecosistemas más degradados (Contreras et al., 2013).

Por otro lado, desde el año 2013, la EAAB adelanta la operación de recolección de material vegetal en la franja acuática, donde recolecta la especie buchón de agua (*Eichornia crassipes*). Esta especie tiene una gran capacidad invasiva. El buchón de agua crece muy fácilmente, disminuyendo la entrada de luz a la columna de agua, lo cual genera ambientes anóxicos, con gases tóxicos y una mala calidad del agua (Bock, 1969; Franco et al., 2012). Por esta razón, su remoción en el humedal Capellanía desde el 2013, podría estar contribuyendo a la mejoría observada en la calidad del agua.

En el año 2017 se analiza una reducción y mejoría en los valores de los parámetros fisicoquímicos a comparación del año 2005.

Se observa una reducción en los valores de más del 97% entre el 2005 y el 2017 para coliformes totales en todos los lugares muestreados, para la DBO se observa una reducción del 48%, para el fósforo una reducción de más del 56 %, y para el nitrógeno una reducción de más del 36%.

La disminución de estos valores en los parámetros para el año 2017 se debe posiblemente a la limpieza y mantenimiento

manual y operativa de los canales y colectores pluviales del sistema hídrico de Bogotá, mediante el contrato 2-01-24300-1263-2016 (EAAB, 2017), también se realizó la remoción de la especie invasora buchón de agua, permitiendo la entrada de oxígeno y luz al cuerpo de agua del humedal, adicionalmente, las campañas de educación ambiental alrededor del humedal por parte de la Secretaría Distrital de Ambiente pueden estar ayudando también al mejoramiento y cuidado del humedal.

Estos resultados sugieren que las estrategias de recuperación y mantenimiento en el humedal Capellanía han tenido un efecto positivo en la calidad del agua del humedal y que se deberían continuar con estos esfuerzos con el propósito de que todos los parámetros se encuentren por debajo de los límites permisibles según la norma.

La conservación del humedal Capellanía se rige bajo el acuerdo distrital 19 de 1994 que declara a los humedales de Bogotá como reservas ambientales naturales del distrito capital, por lo cual los humedales de la ciudad son ecosistemas de interés público y hacen parte del patrimonio ecológico del Distrito Capital. Del mismo modo, el decreto distrital 190 de 2004, declaró al humedal Capellanía como área prioritaria de conservación ya que sostienen y conducen la biodiversidad y los procesos ecológicos esenciales a través del territorio. Concretamente, el humedal Capellanía hace parte del Sistema Distrital de Áreas Protegidas –SAP-, en la Categoría de Parque Ecológico Distrital de Humedal, siendo un área de alto valor paisajístico y biológico destinada a la preservación, restauración y aprovechamiento sostenible. Este humedal también hace parte de la estructura ecológica principal del distrito.

5. Conclusiones y Recomendaciones

Como principales conclusiones de este estudio, se puede decir que los parámetros fisicoquímicos e índices de contaminación obtenidos muestran una disminución considerable de la contaminación a través del

tiempo. De acuerdo a la prueba post hoc de Tukey, los años que más difieren en casi todos los parámetros fueron los años iniciales del estudio (2004-2005-2006) con los años intermedios (2009-2013) y finales (2014 y 2017). Se observó también que entre los años 2004 a 2011 hubo más crecimiento urbano e industrial que entre el 2011 y el 2017.

Sin embargo, debido a que en este estudio sólo se analizó la cuenca media del humedal por falta de datos colectados en otras partes de la cuenca, la entidad encargada debería tomar muestras en todas las entradas de agua, y en la totalidad de la cuenca (cuenca baja y alta, donde hay mayor número de industrias). Adicionalmente, siguiendo los lineamientos de Ramsar, se deberían tomar como mínimo dos muestras en periodos de lluvias y en periodos secos en todas las entradas de agua al humedal.

Por otro lado, se observó que, de acuerdo a las estrategias de recuperación y mantenimiento descritas en el PMA del humedal Capellanía, la EAAB ha ejecutado todas las obras correspondientes, pero no en un 100%.

También se observó que el desarrollo urbano industrial tiene una correlación negativa con los coliformes totales, el DBO, y el Carbono Orgánico lo cual indica que el crecimiento urbano no parece afectar directamente la calidad del agua.

Además, se observó una correlación positiva significativa entre coliformes totales, DBO, carbono orgánico, nitrógeno y fósforo, lo cual sugiere mismas fuentes de contaminación. Se podrían regular las concentraciones de estos parámetros si hay mayor efectividad en la identificación y corrección de conexiones erradas ya que son parámetros característicos de contaminación urbana. Se recomienda también que se implementen como lineamientos del PMA, un análisis de índices de contaminación y un análisis de componentes principales y de correlaciones de todos los parámetros que mide la EAAB, con el propósito de analizar la variación espacio-

temporal de la calidad del agua e identificar las posibles fuentes de contaminación.

Con respecto a la normatividad colombiana que regula los niveles máximos y mínimos permisibles en los parámetros estudiados, y según la normatividad de otros países y los resultados encontrados en este estudio, hacen falta incorporar en la reglamentación para los ecosistemas categoría 3, los siguientes parámetros: carbono orgánico, DQO y nitrógeno (N).

El Nitrógeno es esencial para medir el grado de contaminación de una corriente superficial ya que puede demostrar el grado de eutrofización que tiene el cuerpo de agua, en complemento con el fósforo, y la DQO determina la cantidad de oxígeno requerida para oxidar la materia orgánica por medios químicos, por lo cual reglamentar estos parámetros sería crucial para supervisar las principales fuentes contaminantes y regular por decreto los agentes contaminantes. Esto ayudaría a regular con más rigor la variabilidad del cambio en la calidad del agua.

Adicionalmente, para tener una mayor objetividad sobre el cumplimiento de las estrategias del PMA, se recomiendan realizar entrevistas a la comunidad aledaña al humedal, para analizar su percepción sobre el cuidado y manejo del humedal Capellanía y complementarlo con los análisis realizados en este estudio.

También hace falta realizar la ejecución de la obra de adecuación hidrogeomorfológica. En el humedal de Jaboque, por ejemplo, se realizó una adecuación hidrogeomorfológica, la cual permitió la recuperación del espejo de agua restaurando más de 15 hectáreas, por medio de una remoción de 28.000 metros cúbicos de sedimentos y especies vegetales que poblaban de forma incontrolada el territorio (Murillo, 2017). Esta intervención, mejoró los hábitats acuáticos, renovando la calidad del agua e incrementando la llegada de especies de aves nativas y migratorias al humedal. Del mismo modo, en el humedal Córdoba se realizó una adecuación hidrogeomorfológica, donde se

removieron tres hectáreas de lodo y escombros que se habían acumulado con el tiempo. Esta obra amplió el espejo de agua, facilitando la llegada de aves. La adecuación hidrogeomorfológica en el humedal Capellanía permitiría entonces remover todo el material vegetal superficial, devolviendo y mejorando sus condiciones paisajísticas, hidráulicas, y en general ecosistémicas.

Referencias

- Araya Morales, E. (2009). Manual de procesos en fotografías aéreas e imágenes de satélite. San José, Costa Rica: Proyecto Microcuenca Plantón-Pacayas. Boletín Técnico, 11-60.
- Ayala, R. (2009). Perfil económico y empresarial de la localidad de Kennedy, Cámara de comercio de Bogotá, 1-23.
- Ávila, S. L., Estupiñán-Torres, S. M. (2006). Bacteriological quality of the water of the humedal of Jaboque, Bogotá, Colombia. *Caldasia*, 28 (1):67-78.
- Badii, M. H., Guillen, A., Araiza, L. A., Cerna, E., Valenzuela, J., Landeros, J. (2012). Métodos No-Parámetros de Uso Común. *Revista Daena (International Journal of Good Conscience)*, 7(1):132-155.
- Barrera, S. L. (2011). Análisis del nivel hídrico y las condiciones del humedal de la Laguna de Batuco, Universidad de Chile *Escuela de Geografía* 8(2) 212.
- Calvachi, C., Alonso, B., Betancourt Beltrán, A., Cruz Vallejo, A. C. (2014). Análisis sobre el estado del conocimiento de los humedales en la cuenca del Río Bogotá. Subdirección de Servicios Científicos y Proyectos Especiales Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, 91.
- Castro, F. L., Cruz, I., Moreno, L. A. (2005). Evaluación de la calidad del agua y diagnóstico ambiental del humedal Jaboque. *Tecnogestión*, 2(1):22-35.
- Cardona, C. M., Pinilla, M. (2015). Análisis cartográfico multitemporal de cobertura de agua para humedales interiores en Bogotá D.C en el periodo de 1996-2008. Estudio de Caso: Humedales de Córdoba, Capellanía y Santa María del Lago. *Revista Ingenieros Militares*, (10):23-33.
- Carillo, E. and Lozano, A. (2017). Validación del método de detección de coliformes totales y fecales en agua potable utilizando Agar Chromocult. Pontificia Universidad Javeriana, Tesis Pregrado, 97.
- Chow-Fraser, P. (2006). Development of the Water Quality Index (WQI) to assess effects of basin-wide land-use alteration on coastal marshes of the Laurentian Great Lakes. *Coastal wetlands of the Laurentian Great Lakes: health, habitat and indicators*, 1(5):137-185.
- Córdoba Arcila, M. H. (2016) Los efectos de las Operaciones Estratégicas en el desarrollo urbanístico de Bogotá (1997-2012): el caso de la Operación estratégica Fontibón-Aeropuerto El Dorado (Doctoral dissertation, Universidad Nacional de Colombia-Sede Bogotá), 144.
- Contreras, A. M. D. C., Coirini, R. O., Zapata, R. M., Karlin, M. S. (2013). Recuperación vegetal en ambientes áridos: uso de cerramientos en ecosistemas degradados de la cuenca salinas grandes, argentina. *Revista Chapingo Serie Zonas Áridas*, 2(12) :2-15.
- Cruz Solano, D. P., Motta Morales, J. E. (2017). Estimación de la pérdida de área en los humedales de Bogotá en las últimas cinco décadas debido a la construcción y sus respectivos efectos. *Tecnogestión*, 4:1-25.
- Estupinan-Suarez, L., Florez-Ayala, C., Quinones, M., Pacheco, A. Santos, A. (2015). Detection and characterization of Colombian wetlands using Alos Palsar and MODIS imagery. he

- International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2015. 40(7):375-382.
- Franco Vidal, L., Delgado, J., Andrade, G. I. (2013). Factores de la vulnerabilidad de los humedales altoandinos de Colombia al cambio climático global. Cuadernos de Geografía-Revista Colombiana de Geografía, 22:70-85.
- Flórez, A., Ceballos, J.L., Montoya, J.W. Castro, L. (1997). Geosistemas de la alta montaña colombiana. Bogotá: Departamento de Geografía, Universidad Nacional de Colombia e Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). 4:221-230.
- Flórez, C., Estupiñán-Suárez, L. M., Rojas, S., Aponte, C., Quiñones, M., Acevedo, Ó., Jaramillo, Ú. (2016). Identificación espacial de los sistemas de humedales continentales de Colombia. Biota Colombiana, 17:44-60.
- Jiménez, P. G. (2011). Bogotá un humedal-inundaciones (Doctoral dissertation, Uniandes), 150.
- Gómez-Gómez, M., Danglot-Banck, C., Vega-Franco, L. (2003). Sinopsis de pruebas estadísticas no paramétricas. Cuándo usarlas. Revista Mexicana de Pediatría, 70(2):91-99.
- Guarnizo Ángel, Bejarano Patricia Andrea, Romero Claudia Patricia, Bettín Miguel Angel, Guzmán Ana, Cantor Ligia, & Díaz María Teresa. (2008). Plan de Manejo Ambiental Humedal Capellanía (PMA).
- Ketata-Rokhani, M., Gueddari, M., Bouhlila, R. (2011). Use of geographical information system and water quality index to assess groundwater quality in El Khairat deep aquifer (Enfidha, Tunisian Sahel). Iran J Energy Environ, 2(2):133-144.
- Lobato, T. C., Hauser-Davis, R. A., Oliveira, T. F., Silveira, A. M., Silva, H. A. N., Tavares, M. R. M., Saraiva, A. C. F. (2015). Construction of a novel water quality index and quality indicator for reservoir water quality evaluation: A case study in the Amazon region. Journal of hydrology. 522:674-683.
- Herrera, J. (2000). Guía de aplicación de pruebas estadísticas en el programa Systat 7.0 para ciencias biológicas y forestales. Santa Cruz. 1-40.
- Martínez Cruz, D. A., Chávez Morales, J., Bustamante González, A., Palacios Vélez, Ó. L., de la Isla de Bauer, M., Lourdes, D., Tijerina Chávez, L. (2016). Variación espacial de la calidad del agua para uso agrícola del acuífero costero del Valle del Mayo, Sonora, México. Revista Hidrobiológica, 26 (1):109-119.
- Martínez Ortega, R. M., Tuya Pendás, L. C., Martínez Ortega, M., Pérez Abreu, A., Cánovas, A. M. (2009). El coeficiente de correlación de los rangos de Spearman caracterización. Revista Habanera de Ciencias Médicas, 8(2):15-35.
- Mitsch, W. J., Bernal, B., Nahlik, A. M., Mander, Ü., Zhang, L., Anderson, C. J., Briz, H. (2013). Wetlands, carbon, and climate change. Landscape Ecology, 28 (4):583-597.
- Marín, D., Jiménez, E., Hernández, F. (2012). Comparación de pruebas paramétricas y no paramétricas vía simulación. Revista Escola de Estadística Universidad Nacional., 15:1-20.
- Molina León, M. P., Gutiérrez, L., & Salazar, J. (2011). Sistemas urbanos de drenaje sostenible SUDS para el plan de ordenamiento Zonal Norte POZN. Bogotá: Subdirección de Ecurbanismo y Gestión Ambiental Empresarial.
- Möller (2008). Caracterización y estado de conservación de un humedal urbano en la ciudad de Valdivia, sur de Chile. Centro de Estudios Agrarios y Ambientales de Chile. Gestión Ambiental 15:53-65.
- Moreno, V., García, J., Villalba, J. (2014). Descripción general de los humedales de Bogotá, DC Sociedad Geográfica de Colombia, Sogeocol, 2:24-38.
- Mundel, M. E. (2013). Motion and Time Study-Principles And Practice. Prentice-Hall, Inc.; New Jersey. 60-120
- Neiff, J.J. (1999) El régimen de pulsos en ríos y grandes humedales de Sudamérica. En: Malvárez AI (ed) Tópicos sobre Humedales Subtropicales y Templados de Sudamérica. UNESCO-ORCYT-MAB, Montevideo, 97-146.
- Nieto, J., Bello, A., Parra, E., Aldana, N. (2008). VIII Fase del Programa de Seguimiento y Monitoreo de efluentes industriales y corrientes superficiales. Acueducto de Bogotá, Alcaldía Mayor de Bogotá, 8(1):22-119.
- Orjuela, L., López, M. (2011). Índice de calidad del agua en corrientes superficiales (ICA), Subdirección de Hidrología y Subdirección de Ecosistemas e Información Ambiental – IDEAM. 11 p.
- Pucha-Cofrep, F., Fries, A., Cánovas-García, F., Oñate-Valdivieso, F., González-Jaramillo, V., Pucha-Cofrep, D. (2017). Fundamentos de SIG: Aplicaciones con ArcGIS. 8-35.
- Pulido-López, P. C., Pinilla-Agudelo, G. A. (2017). Evaluación del estado trófico de El Salitre, último humedal urbano de referencia en Bogotá. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, 41(158):41-50.
- Ramírez, A., Restrepo, R., Viña, G. (1997). Cuatro índices de contaminación para caracterización de aguas continentales. Formulación y aplicación. CTF-Ciencia, Tecnología y Futuro, 1(3) :135-153.
- Ramos, R., Sepúlveda, R., Villalobos, F. (2003). El agua en el medio ambiente: muestreo y análisis. Universidad Autónoma de Baja California. Ed. Plaza y Valdés, México. 1:80-97.
- Rojas, L. V., Macías, N. A., Fonseca, D. F. (2009) El Índice de Calidad de Agua como herramienta para la gestión de los recursos hídricos, Revista electrónica de la Agencia del medio ambiente (16):1-5.
- Pamplona, U. D. (2010). Capítulo III. ICAs e ICOs de Importancia Mundial. NJP, Investigación. 1-150.
- Pérez-Castillo, A. G., Rodríguez, A. (2008). Índice fisicoquímico de la calidad de agua para el manejo de lagunas tropicales de inundación. Revista de Biología Tropical, 56(4):1905-1918.
- Pérez, D., Zamora, D. (2015). Descripción y contexto de las cuencas hídricas del distrito capital (Torca, Salitre, Fucha y Tunjuelo), grupo: recurso hídrico superficial. Secretaría Distrital de Ambiente Dirección de Control Ambiental Subdirección del Recurso Hídrico y del Suelo. 8-55.
- Pinilla, G. (2010). An index of limnological conditions for urban wetlands of Bogota city, Colombia. Ecological Indicators, 10 (4):848-856.
- Pulido Sastoque, C. L. (2014) Caracterización del suelo urbano industrial de Bogotá 2000-2010. dos estudios de caso (Doctoral dissertation, Universidad Nacional de Colombia).
- Ramos, L. M., Vidal, L., Vilarly, S., Saavedra, L. (2008). Análisis de la contaminación microbiológica (coliformes totales y fecales) en la Bahía de Santa Marta, Caribe colombiano. Acta Biológica Colombiana, 13 (3):87-98.
- Raffo Lecca, E., Ruiz Lizama, E. (2014). Caracterización de las aguas residuales y la demanda bioquímica de oxígeno. Industrial Data, 17 (1):71-80.
- Reyes, L. M. C. (2008). Evaluación de la presencia de perros (Canis familiaris) en humedales de la sabana de Bogotá (Colombia) y su efecto potencial sobre la fauna silvestre (Tesis de pregrado). Bogotá: Universidad de los Andes. 1-45.
- Rodríguez, C. (2012). La intensificación ganadera como proceso de producción de residuos. Residuos Ganaderos. P. Costa Batllori (Coord.) Fundación La Caixa-Aedos SA, 5-15.
- Rosselli, L. (2011). Factores ambientales relacionados con la presencia y abundancia de las aves de los humedales de la Sabana de Bogotá (Doctoral dissertation, PhD thesis. Universidad Nacional de Colombia, Colombia), 203 p.
- Sabogal, C. (2011). Generar ciudad: recuperación del sistema hídrico dentro de la estructura urbana de Bogotá. Bogotá, Traza, (4).
- Sirombra, M. G (2012). Aspectos Ecológicos de Humedales un enfoque Funcional, sociedad americana de ecología. 2:23-50.
- Sosnovsky, A., Quirós, R. (2006). El estado trófico de pequeñas lagunas pampeanas, su relación con la hidrología y el uso de la tierra. Ecología austral, 16 (2):115-124.

- Valdez, N. (2012). Marco Nacional y Normativa sobre vertimiento de aguas residuales a zonas costeras y superficiales. Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 1(2):.3-38.
- Van der Hammen, T., Stiles, F. G., Rosselli, L., Chisacá, M. L., Camargo, G., Guillot, G. Rivera, D. (2008). Protocolo de recuperación y rehabilitación ecológica de humedales en centros urbanos. Secretaria Distrital de Ambiente, Bogotá.
- Vásquez, C., Ariza, A., Pinilla, G. (2006). Descripción del estado trófico de diez humedales del Altiplano. 3:115-130.
- Villa, H. M. S. (2016). Reflexiones sobre los procesos migratorios y su incidencia en los humedales de Bogotá DC durante la segunda mitad del siglo XX. Revista Ciudades, Estados y Política, 3(1):63-74.
- Zar, J. H. (2010). Biostatistical Analysis: Pearson New International Edition. Pearson Higher Ed 5. pp. 237-255.

