

SECRETARIA DISTRITAL DE AMBIENTE

Informe Técnico No. 03006, 29 de diciembre del 2017

ÍNDICE DE CALIDAD HÍDRICA - WQI 2016-2017 RED DE CALIDAD HÍDRICA DE BOGOTÁ



Confluencia del Río Negro con el Río Salitre (GRHS, 2017)

2017

**SECRETARÍA DISTRITAL DE AMBIENTE
DIRECCIÓN DE CONTROL AMBIENTAL
SUBDIRECCIÓN DEL RECURSO HÍDRICO Y DEL SUELO
Grupo: Recurso Hídrico Superficial**

Página 1 de 60



ALCALDÍA MAYOR
DE BOGOTÁ D.C.
SECRETARÍA DE AMBIENTE

INFORME TÉCNICO – ÍNDICE DE CALIDAD HÍDRICA - WQI - PARA EL PERIODO 2016-2017 DE LA RED DE CALIDAD HÍDRICA DE BOGOTÁ

ELABORÓ:

RICARDO DÍAZ PEÑA
Profesional Técnico de Apoyo
Grupo Recurso Hídrico Superficial

REVISÓ:

DAVID FELIPE PÉREZ SERNA
Profesional Técnico de Apoyo
Grupo Recurso Hídrico Superficial

APROBÓ:

JULIO CÉSAR PINZÓN REYES
Subdirector del Recurso Hídrico y del Suelo
Secretaría Distrital de Ambiente

Página 2 de 60

Secretaría Distrital de Ambiente
Av. Caracas N° 54-38
PBX: 3778899 / Fax: 3778930
www.ambientebogota.gov.co
Bogotá, D.C. Colombia

**BOGOTÁ
MEJOR
PARA TODOS**



TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	5
2. MATERIALES Y MÉTODOS	6
2.1. MONITOREOS DE LA CALIDAD Y CANTIDAD DEL AGUA EN LOS PUNTOS DE LA RCHB	6
2.2. OBJETIVOS DE CALIDAD– RESOLUCIÓN 5731 DE 2008	10
2.2.1. OBJETIVOS DE CALIDAD – 4 AÑOS	11
2.2.2. METODOLOGÍA PARA VALIDACIÓN ESTADÍSTICA DE LOS DATOS	14
2.2.3. FORMA DE IMPLEMENTAR EL BOX-PLOT EN LOS DATOS DE LA RCHB	16
2.3. PROCESO DE PARA DETERMINAR EL ÍNDICE DE CALIDAD HÍDRICA – WQI	17
3. RESULTADOS	20
3.1. RÍO TORCA	20
3.2. RÍO SALITRE	25
3.3. RÍO FUCHA	33
3.4. RÍO TUNJUELO	41
3.5. EVOLUCIÓN DEL WQI EN EL PERIODO 2014 A 2017	49
3.6. EVOLUCIÓN TEMPORAL DE LA LONGITUD DE LOS RÍOS CLASIFICADA SEGÚN EL WQI	52
4. CONCLUSIONES	56
5. REFERENCIAS	59

SIGLAS, ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS

CAR	Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca
DBO ₅	Demanda Bioquímica de Oxígeno medida a los cinco días
DQO	Demanda Química de Oxígeno
EAB-ESP	Empresa de Acueducto, Alcantarillado y Aseo de Bogotá - Empresa de Servicios Públicos
EUA	Estados Unidos de América
FAO	<i>Food and Agriculture Organization of the United Nations</i> (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura)
GyA	Grasas y Aceites
IDEAM	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia
L/s	Litros por segundo
N _T - N _{Total}	Nitrógeno Total (NT Kjeldahl + NO ₃ + NO ₂)
OC	Objetivos de Calidad
OD	Oxígeno Disuelto
OECD	<i>Organization for Economic Co-operation and Development</i> (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico)
OMS	Organización Mundial de la Salud
PEDH	Parque Ecológico Distrital de Humedal
pH	Potencial de hidrógeno
PSMV	Plan de Saneamiento y Manejo de Vertimientos
P _T - P _{Total}	Fósforo Total
RCHB	Red de Calidad Hidrica de Bogotá
RCHB-T	Red de Calidad Hidrica de Bogotá Tradicional
RCHB-A	Red de Calidad Hidrica de Bogotá Ampliada
SAAM	Sustancias Activas al Azul de Metileno (Tensoactivos)
SDA	Secretaría Distrital de Ambiente
SRHS	Subdirección del Recurso Hídrico y del Suelo
SST	Sólidos Suspendidos Totales
WQI	<i>Water Quality Index</i> (índice de calidad de agua)

1. INTRODUCCIÓN

La contaminación de las fuentes de agua de la ciudad de Bogotá, que durante décadas han recibido las descargas de las aguas residuales provenientes de la industrialización y la urbanización desordenada, entre otros factores, afecta gravemente la calidad del recurso hídrico, compuesto — entre otros— por humedales (PEDH), quebradas, canales y, principalmente, los ríos Torca, Salitre, Fucha y Tunjuelo. La administración de Bogotá ha dado un paso fundamental para la recuperación de la calidad de los ríos, al construir una visión de ciudad entorno al recurso hídrico, por lo que la Secretaría Distrital de Ambiente como autoridad ambiental urbana ha adoptado el Índice de Calidad del Agua – WQI (por sus Iniciales en inglés Water Quality Index) como indicador de seguimiento para las corrientes urbanas.

Con el fin de contar con los datos para determinar la calidad de estos cuerpos de agua, la Secretaría Distrital de Ambiente, adelanta el control a los usuarios y a actividades que generan descargas de vertimientos sobre el sistema hídrico superficial y el sistema de alcantarillado de Bogotá y para tal efecto opera la RCHB, en su componente tradicional, como una herramienta que monitorea la calidad del agua en treinta (30) estaciones o puntos ubicadas en los diferentes tramos de los ríos principales, incluyendo dos (2) en el Río Bogotá (desde la parte alta a sus desembocaduras en el río Bogotá), realizando caracterizaciones de parámetros físicos, químicos y microbiológicos.

El conocimiento adquirido mediante la RCHB-T ha hecho posible que la ciudad avance en el ordenamiento del recurso y cuente con elementos de planificación enfocados en el mejoramiento, como son los OC y metas de reducción de cargas contaminantes. Además de la identificación de los sectores productivos y áreas de la ciudad que impactan de manera considerable los cuerpos hídricos.

En este marco, el presente informe técnico tiene por objeto evaluar los datos de la calidad del agua de los puntos de monitoreo de la RCHB-T para determinar el cumplimiento frente a los objetivos de calidad establecidos mediante en la Resolución 5731 de 2008, para el periodo de la ventana temporal comprendida entre el segundo semestre de 2016 (2016-II) y el primer semestre 2017 (2017-I).¹

¹Todos los gráficos, tablas y análisis realizados en el presente informe técnico son autoría del Grupo de Recurso Hídrico Superficial de la Subdirección de Recurso Hídrico y del Suelo, Secretaría Distrital de Ambiente, de lo contrario se realiza la respectiva cita y referencia.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

En este capítulo se realiza una breve descripción de las generalidades de las jornadas de monitoreo de la calidad y cantidad del agua en puntos que conforman la RCHB realizadas para el periodo 2016-II a 2017-I, el proceso de validación de los datos (detección de datos atípicos) y la metodología para calcular el índice de calidad hídrica (WQI).

2.1. MONITOREOS DE LA CALIDAD Y CANTIDAD DEL AGUA EN LOS PUNTOS DE LA RCHB

Cualificar y cuantificar la calidad de los principales ríos de la ciudad: Torca, Salitre, Fucha y Tunjuelo, ha permitido consolidar información de la calidad de estas fuentes superficiales, y con esto conformar una base de datos de determinantes de la calidad del agua que representan el estado físico, químico y biológico estos ríos.

La RCHB se encuentra distribuida en un total de treinta (30) estaciones de monitoreo ubicadas en los principales ríos de la ciudad de Bogotá (Torca, Salitre, Fucha, Tunjuelo) y en el río Bogotá (Ver Figura 1). Para cada uno de estos ríos actualmente los puntos de monitoreo se distribuyen así:

RÍO	NUMERO DE PUNTOS	RÍO	NUMERO DE PUNTOS
Torca	4	Fucha	8
Salitre	6	Tunjuelo	10
Río Bogotá (cuena media)	2		

Tabla 1. Distribución de los puntos de monitoreo

Durante la operación de la RCHB-T, se tomaron muestras compuestas de agua superficial durante ventanas temporales de dos horas con alícuotas cada treinta minutos, que inician a las 06:00 y finalizan a las 18:00 horas. Se realiza la toma de datos de campo *in situ* en las muestras individuales y en la muestra compuesta se realizan análisis de laboratorio de parámetros químicos y microbiológicos del agua (Tabla 2).

TIPO DE MONITOREO	DETERMINANTES DE LA CALIDAD DEL AGUA
Mediciones <i>in situ</i>	Caudal, pH, Temperatura, Conductividad y Oxígeno Disuelto.
Análisis de laboratorio	DBO ₅ , DQO, SST, Coliformes Fecales, Grasas y Aceites, P _{total} , N _{total} Kjeldahl, Nitratos, Nitritos y Tensoactivos (SAAM).

Tabla 2. Clasificación de los determinantes de la calidad del agua medidos *in situ* y en laboratorio



Figura 1. Ubicación geográfica de puntos de monitoreo de la RCHB-T de Bogotá

La Operación de la Red de Calidad Hídrica de Bogotá permite la cuantificación y calificación de la calidad del agua de los principales ríos de la ciudad: Torca, Salitre, Fucha y Tunjuelo, para lo cual se han consolidado los resultados de las variables de las determinantes de la calidad del agua que representan el estado fisicoquímico y biológico de los ríos.

Para el segundo semestre de 2016, la Subdirección del Recurso Hídrico y del Suelo dio inicio al Programa de Operación de la RCHB mediante Convenio Interadministrativo CAR-SDA 1582-20171251 de 2016 y el contrato de prestación de servicios con el laboratorio ANALQUIM LTDA SDA-20161257 de fecha 29/12/2016, que cuentan con acreditación ante el IDEAM, de conformidad con la normatividad ambiental vigente.

El monitoreo para el periodo evaluado inicio el 3 de abril de 2017 hasta el 30 de junio de 2017. En dicho periodo se monitoreo cada uno de los puntos de la RCHB-T en diferentes ventanas bihorarias (monitoreo en ventanas temporales de dos horas) a lo largo del periodo de tiempo mencionado, donde se caracterizaron los determinantes de la calidad presentados en la Tabla 2. Es importante aclarar que durante el segundo semestre de 2016 no se llevó a cabo monitoreo sobre los puntos de la RCHB-T, debido a que, en el marco del convenio con la CAR y el contrato con el laboratorio ANALQUIM LTDA, se dio inicio a las actividades de monitoreo en el periodo mencionado. Con base en esta información se desarrollaron los cálculos que se explican más adelante.

RIO	PUNTO DE MONITOREO	IDENTIFICACIÓN PUNTO DE MONITOREO	TOTAL MONITOREOS
TORCA (TO)	Bosque de Pinos	TO-BosqueP	6
	Calle 161	TO-CL161	6
	Jardines de Paz	TO-Jardpaz	6
	San Simón	TO-Ssimon	6
SALITRE (SA)	Parque Nacional	SA-ParqNal	6
	Arzobispo Carrera 7a	SA-Arzobis	6
	Carrera 30 Calle 53	SA-CL53	6
	Carrefour Av. 68	SA-Carrefo	6
	Transversal 91	SA-Tv91	6
	Salitre con Alameda	SA-Alameda	6
FUCHA (FU)	El Delirio	FU-Delirio	5
	Carrera 7a Río Fucha	FU-KR7	6
	Avenida Ferrocarril	FU-Ferroca	5

RIO	PUNTO DE MONITOREO	IDENTIFICACIÓN PUNTO DE MONITOREO	TOTAL MONITOREOS
	Fucha Avenida Las Américas	FU-America	6
	Fucha Avenida Boyacá	FU-Boyaca	6
	Visión Colombia	FU-VisionC	6
	Fucha Zona Franca	FU-ZFranca	5
	Fucha con Alameda	FU-Alameda	5
TUNJUELO (TU)	Regadera	TU-Regader	6
	Universidad Antonio Nariño	TU-UAN	6
	Yomasa	TU-Yomasa	5
	Doña Juana	TU-DJuana	6
	Barrio México	TU-México	6
	San Benito	TU-SBenito	6
	Makro Autosur	TU-MakroS	6
	Transversal 86	TU-Tv86	6
	Puente Independencia	TU-PteInde	6
Isla Pontón San José	TU-IslaPon	6	
BOGOTÁ	Puente Común	BO-PComun	1
	Cierre	BO-Cierre	1

Tabla 3. Cantidad de monitoreos realizada en cada punto de la RCHB-T durante el periodo 2017-I

Por su parte, la división de los tramos, realizada según el artículo 2 de la Resolución 5731 de 2008, se describe en la Tabla 4 y de conformidad con esta normatividad, no se involucran las corrientes de los afluentes que converjan a la corriente principal en el tramo descrito relacionado.

CUENCA	TRAMO	LIMITES	
		DESDE	HASTA
RÍO TUNJUELO (TU)	1	Entrada perímetro urbano	Desembocadura Quebrada Yomasa
	2	Desembocadura Q. Yomasa	Avenida Boyacá
	3	Avenida Boyacá	Autopista Sur
	4	Autopista Sur	Desembocadura Río Tunjuelo
RÍO FUCHA (FU)	1	Entrada perímetro urbano	Carrera 7ª
	2	Carrera 7ª	Desembocadura Canal Comuneros
	3	Desembocadura Canal Comuneros	Avenida Boyacá
	4	Avenida Boyacá	Desembocadura Río Fucha
RÍO SALITRE	1	Entrada perímetro urbano	Carrera 7ª

(SA)	2	Carrera 7ª	Carrera 30
	3	Carrera 30	Avenida 68
	4	Avenida 68	Desembocadura Río Juan Amarillo
CANAL TORCA (TO)	1	Entrada perímetro urbano	Calle 183
	2	Calle 183	Desembocadura Canal Torca

Tabla 4. División de los Tramos de los ríos de Bogotá, (Resolución 5731 de 2008)

2.2. OBJETIVOS DE CALIDAD– RESOLUCIÓN 5731 DE 2008

La Secretaría Distrital de Ambiente mediante el convenio 045 de 2007 con la Universidad de los Andes, emitió la Resolución 5731 de 2008 *“Por la cual se deroga la Resolución 1813 de 2006 y se adoptan nuevos objetivos de calidad para los Ríos Salitre, Fucha, Tunjuelo y el Canal Torca en el Distrito Capital”*. En el referido convenio se realizó la revisión bibliográfica y el estado de los principales ríos en Bogotá en el año 2007, con la cual se propuso establecer objetivos graduales de calidad para los ríos Salitre, Fucha, Tunjuelo y Torca, que se encuentran en la jurisdicción de la SDA. Con el fin de recuperar los ríos para posteriormente asociar un uso a cada tramo, se propusieron como objetivos de calidad para 4 y 10 años (UniAndes, 2007):

Para la determinación de los OC de los ríos en Bogotá se utilizó la siguiente información:

- Modelo de calidad del agua QUAL2K para cada río [excepto la cuenca Torca]
- Datos de la Red de Calidad Hídrica de Bogotá
- OC de las siguientes entidades y países: Australia, FAO, Francia, OECD, OMS y EUA.

La información sobre el modelo de calidad QUAL2K se obtuvo a partir del informe, Fase III – Modelos de Calidad del Agua Ríos Salitre, Fucha y Tunjuelo de 2007, del convenio entre la Universidad de los Andes y la EAB-ESP. En esta herramienta se modelaron los siguientes determinantes fisicoquímicos de calidad del agua (UniAndes, 2007):

- Oxígeno Disuelto [OD]
- Materia Orgánica: Carbono de degradación rápida [DBO₅], Carbono de degradación lenta, Detritus, Sólidos suspendidos inorgánicos
- Nutrientes: NTK, Nitrógeno orgánico, Amonio, Nitritos, Nitratos, Fósforo Total, Fósforo Orgánico, Fósforo Inorgánico
- pH, Temperatura, Conductividad

Igualmente, la modelación se realizó bajo diferentes escenarios:

- Escenario 1: estado actual de los ríos
- Escenario 2: eliminación de los puntos de vertimientos según el PSMV de 2006
- Escenario 3: eliminación de todos los diferentes vertimientos

2.2.1. OBJETIVOS DE CALIDAD – 4 AÑOS

El propósito de establecer OC a 4 años es el de evitar la contaminación en los tramos de los ríos donde existe una buena calidad del agua y el de mejorar moderadamente la calidad del agua en este periodo de tiempo. En general para los tramos el objetivo es establecer criterios de calidad de acuerdo con las obras de saneamiento previstas por la EAB-ESP, en la ciudad y algunas otras que sean requeridas para subir el estándar de calidad en cada uno de los tramos.

La metodología utilizada para establecer los objetivos a 4 años fue realizar una comparación y análisis de los registros históricos y los resultados de la modelación de los escenarios 2 y 3, donde se modeló la calidad del agua una vez realizadas las obras del PSMV e incorporando otras actividades de saneamiento (UniAndes, 2007).

La información utilizada para llevar a cabo la metodología planteada se obtuvo a partir de:

- Registros históricos de todas las estaciones de la RCHB-T en los ríos Torca, Salitre, Fucha y Tunjuelo
- Modelación en QUAL2K de los ríos Salitre, Fucha y recomendaciones de la FAO para uso agrícola.
- Decreto 1594 de 1984 – uso Agrícola
- Concentraciones de la OECD – Clase IV

Inicialmente se realizó un análisis del estado de los ríos con los resultados de la modelación (Escenario 1) y los valores históricos de la RCHB. Se encontró que la calidad del agua varía en función de los ríos y los tramos: en los tramos altos la calidad es mucho mejor que en los tramos finales. Por esta razón se establecieron OC por río y por tramo.



Con base en lo anteriormente descrito y un análisis de los escenarios de saneamiento evaluados en el ejercicio de modelación, se determinaron los valores de las concentraciones para los siguientes determinantes de calidad del agua: Oxígeno disuelto, pH, Demanda Bioquímica de Oxígeno, Demanda Química de Oxígeno, Coliformes Fecales (Col_{fe}), Grasas y Aceites (GyA), SST, Tensoactivos (SAAM), N_{TOTAL} y P_{TOTAL}, los cuales fueron establecidos mediante la Resolución 5731 de 2008 a cuatro y diez años. En la Tabla 5 y Tabla 6 se presentan los OC a cuatro años para los tramos que conforman los principales ríos de la Ciudad.

DETERMINANTE DE LA CALIDAD	UNIDAD	Río Fucha (FU)				Río Salitre (SA)			
		FU-T1	FU-T2	FU-T3	FU-T4	SA-T1	SA-T2	SA-T3	SA-T4
pH-mínimo	Unidad	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0
pH-máximo	Unidad	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0
OD	mg/L	7	4	0.2	0.2	7	2	0.5	0.5
DBO ₅	mg/L	5	50	250	250	5	80	150	150
DQO	mg/L	35	150	400	400	35	200	350	350
SST	mg/L	10	30	150	200	10	80	150	150
GyA	mg/L	10	25	40	60	10	20	30	30
SAAM	mg/L	0.5	3	4	4	1	3	3	3
P _{TOTAL}	mg/L	0.1	3	8	8	1	6	6	6
Col _{fe}	mg/L	1.0E+03	1.0E+06	1.0E+06	1.E+06	1.0E+05	1.0E+06	1.0E+06	1.0E+06
N _{TOTAL}	mg/L	3	20	40	40	5	20	40	40

T1= Tramo I
T2= Tramo II

T3= Tramo III
T4= Tramo IV

Tabla 5. OC a cuatro años para los tramos del río Fucha y Salitre (Resolución 5731 de 2008)



ALCALDÍA MAYOR
DE BOGOTÁ D.C.
SECRETARÍA DE AMBIENTE

DETERMINANTE DE LA CALIDAD	UNIDAD	CANAL TORCA (TO)		RÍO TUNJUELO (TU)			
		TO-T1	TO-T2	TU-T1	TU-T2	TU-T3	TU-T4
pH-mínimo	Unidad	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0
pH-máximo	Unidad	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0
OD	mg/L	3	0.5	7	2	1	0.5
DBO ₅	mg/L	15	150	5	100	100	250
DQO	mg/L	50	300	35	200	200	500
SST	mg/L	20	150	10	120	150	300
GyA	mg/L	20	30	20	20	20	50
SAAM	mg/L	1	4	0.5	3	3	3
P _{TOTAL}	mg/L	1	6	0.2	3	5	8
Col _{fe}	mg/L	1.0E+05	1.0E+06	1.0E+03	1.0E+06	1.0E+06	1.0E+06
N _{TOTAL}	mg/L	5	40	3	20	20	50

T1= Tramo I
T2= Tramo II

T3= Tramo III
T4= Tramo IV

Tabla 6. OC a cuatro años para los tramos del canal Torca y río Tunjuelo (Resolución 5731 de 2008)

2.2.2. METODOLOGÍA PARA VALIDACIÓN ESTADÍSTICA DE LOS DATOS

La mayor parte de los conjuntos de datos del mundo real contienen valores atípicos (*outliers*) y los datos sobre la calidad del agua no son la excepción. Tales datos están caracterizados por presentar magnitudes inusualmente grandes o pequeñas, en comparación con los demás en el conjunto de datos (Seo, 2006). Los *outliers* pueden generar valores errados en análisis de datos tales como análisis de varianza y regresión, o pueden proporcionar información útil acerca de los datos cuando se fija una respuesta inusual de un estudio determinado, constituyéndose su detección en una parte fundamental del análisis de datos. La detección de valores denominados *outliers* es una tarea de minería de datos que permite detectar objetos desviados, eventos extraños y/o excepcionales. Las causas de los *outliers* se pueden clasificar en dos: los derivados de errores en los datos y los derivados de la variabilidad inherente de los datos (Preetha y Radha, 2011). Luego, la detección de *outliers* es una parte importante del análisis de datos en los dos casos anteriores, aumentando la necesidad de métodos de análisis, para hacer uso de la información contenida de manera implícita en una base de datos (Fayyad *et al.*, 1996).

El procedimiento para la detección de outliers consiste: (i) definir cuáles serían los posibles criterios para que un dato dentro de un conjunto de datos dado reciba el calificativo de outlier, y (ii) luego aplicar un método para identificar dichos valores. Los métodos para la detección de outliers se basan en estadísticas tales como la distancia entre valores, la desviación estándar y/o análisis basado en las distribuciones de densidad de los datos.

Por lo tanto, cuando se tiene un conjunto de datos con n observaciones de una variable x , donde \bar{x} es la media y S es la desviación estándar de la distribución de los datos, una observación se declara como *outlier* si se encuentra fuera del intervalo (Acuña y Rodríguez, 2004), $(\bar{x} - kS, \bar{x} + kS)$ donde el valor del coeficiente k es usualmente 2 ó 3. Estos valores se justifican en el hecho que al suponer una distribución normal se espera contar con un porcentaje del 95 % ó 99 %, respectivamente de los datos en el intervalo centrado en la media, con una longitud aproximadamente igual a dos o tres veces la desviación estándar respectivamente. Por consiguiente, la variable x es considerada outlier si: $(x - \bar{x})/S > k$ (Acuña y Rodríguez, 2004).

El problema del método anterior es que asume la distribución normal de la información, esperando formas de campana y simetría razonable en los datos, que con frecuencia es algo que no ocurre. Además, la media y desviación estándar son muy sensibles a los valores atípicos de magnitudes significativas (Iglewicz y Hoaglin, 1993; Chen *et al.*, 1996). En respuesta a esto, John Tukey en 1977 introdujo varios métodos para el análisis de datos, uno de ellos fue el *Box-Plot*.

Ésta es una conocida herramienta gráfica sencilla, que se utiliza con el propósito de mostrar información continua acerca de los datos univariados como la media y los *mild outliers* (*outliers*) (ver Figura 2). Este método es menos sensible a valores extremos de los datos que aquellos métodos que se basan en la media y la desviación estándar, ya que utiliza los cuartiles, los cuales son consistentes ante los valores extremos (Acuña y Rodríguez, 2004; Seo, 2006).

De esta forma, un *Box-Plot*, también conocido como diagrama de caja y bigotes, es un gráfico que está basado en cuartiles y mediante el cual se visualiza la distribución de un conjunto de datos. Está compuesto por un rectángulo (la «caja») y dos brazos (los «bigotes»).

Es un gráfico que suministra información sobre los valores mínimo y máximo, los cuartiles Q1, Q2 o mediana y Q3, y sobre la existencia de valores atípicos y la simetría de la distribución. Primero es necesario encontrar la mediana para luego encontrar los 2 cuartiles restantes.

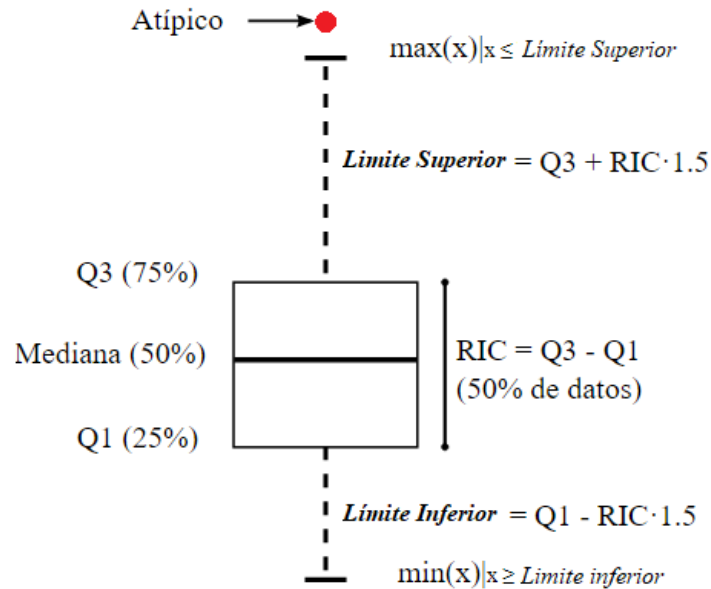


Figura 2. Box-Plot o diagrama de caja

Un dato x se declara outlier si se encuentra fuera del intervalo $(Q_1 - 1.5\tilde{A}-RIC, Q_3 + 1.5\tilde{A}-RIC)$, donde Q_1 es el primer cuartil, Q_3 es el tercer cuartil y RIC recibe el nombre de Rango Intercuartílico (en inglés *Interquartil Range* ó *IQR*) calculado como $Q_3 - Q_1$ (Acuña y Rodríguez, 2004).

2.2.3. FORMA DE IMPLEMENTAR EL BOX-PLOT EN LOS DATOS DE LA RCHB

La detección de posibles *outliers* en los conjuntos de datos de calidad del agua de los puntos que conforman la RCHB, se realizó mediante el estadístico Box-Plot. El proceso de implementación varía levemente dependiendo si los datos son obtenidos en campo (*in situ*) o en laboratorio (ver Tabla). A continuación, se explica procedimiento por cada conjunto de datos:

Para los datos tomados en Campo (In situ)

- Se agrupan las mediciones in situ de oxígeno disuelto y pH obtenidas en cada monitoreo bihorario, realizado esto para cada determinante por separado. Por ejemplo, Si se Realizaron seis (6) monitoreos en el periodo evaluado se tendrá un conjunto de 30 datos por cada determinante in situ.
- Para los conjuntos de datos conformados en el paso anterior se aplica el Box-Plot para determinar la presencia de outliers
- Luego, los datos detectados como outliers en paso anterior son eliminados del conjunto de datos de monitoreo.
- Los datos restantes son desagregados en los monitoreos iniciales, y con base en estos se calcula la media de cada monitoreo y después se consolidan los promedios en un vector (L). Lo anterior aplica para oxígeno disuelto y pH.
- Se determina el promedio de los datos que no fueron eliminados, los cuales son denominados validados.
- Sobre el vector L se aplica nuevamente el estadístico Box-Plot para determinar y eliminar los monitoreos catalogados como outliers. Los datos restantes (validados finales) serán empleados en el cálculo del WQI.

Para los datos reportados por el laboratorio

- Para todas las muestras recolectadas en las campañas de monitoreo se realizan los ensayos estándar de laboratorio para cuantificar los determinantes de la calidad del agua antes

descritos. Por lo tanto, la detección de *outliers* mediante Box-Plot, se realizará en el conjunto de datos de cada determinante de la calidad agua.

- Luego, los datos detectados como *outliers* en el paso anterior son eliminados del conjunto de datos del monitoreo y los datos restantes (datos Validados) son empleados para calcular el WQI.

2.3. PROCESO DE PARA DETERMINAR EL ÍNDICE DE CALIDAD HÍDRICA – WQI

La información consolidada de las jornadas de monitoreo de la RCHB-T (datos *in situ* y de laboratorio) es empleada para la construcción de indicadores de calidad del agua, en marcados dentro de los OC que son establecidos con el propósito de proteger el recurso hídrico. Teniendo en cuenta que la calidad del agua de los principales ríos de Bogotá está muy deteriorada, los OC de los próximos años están enfocados hacia la recuperación de los mismos (Resolución 5731 de 2008).

Por consiguiente, con el fin de evaluar la calidad del agua con respecto a estos objetivos, la Secretaría Distrital de Ambiente ha implementado un Índice de Calidad del Agua – WQI (por sus Iniciales en inglés *Water Quality Index*), el cual permite apreciar la calidad del agua por categorías [Excelente, Buena, Aceptable, Marginal, Pobre].

La metodología de origen canadiense consiste en determinar tres variables (F) a partir de los valores de las concentraciones y su cumplimiento con los OC de los siguientes determinantes de la calidad del agua, tal como lo establece el Artículo 3 de la Resolución 5731 de 2008: Oxígeno disuelto (OD), pH, Demanda Bioquímica de Oxígeno-5 días (DBO₅), Demanda Química Oxígeno (DQO), Coliformes fecales (Col_{fe}), Grasas y aceites (GyA), Sólidos Suspendedos Totales (SST), SAAM (Surfactantes), Nitrógeno total (N_T o N_{TOTAL}) y Fósforo total (P_T o P_{TOTAL}). Es importante aclarar que los OC están definidos para cada uno de los tramos que conforman los ríos, y que son aplicados a cada uno de los puntos de monitoreo que se encuentren localizados a lo largo de los tramos, los cuales están definidos el Artículo 2 de la Resolución 5731 de 2008.

$$WQI = 100 - \left(\frac{\sqrt{F1^2 + F2^2 + F3^2}}{1.732} \right) \quad \text{Ec. 1.}$$

Las variables F1, F2 y F3, representan diferentes aproximaciones para determinar la calidad del agua; su explicación y cálculos se explican a continuación:

F1 [Alcance]: representa la cantidad de los determinantes de la calidad del agua que no cumplen los objetivos al menos una vez, se calcula utilizando la siguiente ecuación:

$$F1 = \left(\frac{\text{número de parámetros que no cumplen}}{\text{número total de parámetros}} \right) * 100 \quad \text{Ec. 2.}$$

F2 [Frecuencia]: representa la cantidad de datos que no cumplen los OC; se calcula utilizando la siguiente ecuación:

$$F2 = \left(\frac{\text{número de datos que no cumplen}}{\text{número total de datos}} \right) * 100 \quad \text{Ec. 3.}$$

Cuando se está calculando el WQI de un tramo puede haber varios datos para un mismo determinante de la calidad del agua, bien sea porque se están teniendo en cuenta varias campañas o porque un tramo tiene varios puntos de monitoreo.

F3 [Amplitud]: representa la cantidad por la cual los datos no cumplen los objetivos; este se calcula a partir de la excursión y la suma estandarizada de las excursiones [nse]. Cuando hay uno o varios datos que no cumplen los OC, se debe calcular la excursión de la siguiente manera:

$$\text{excursión}_i = \left(\frac{\text{valor del dato que no cumple}_i}{\text{valor del objetivo}_i} \right) - 1 \quad \text{Ec. 4.}$$

Cuando los valores deben estar por encima del OC, como en el caso del oxígeno disuelto o pH, la excursión se calcula como:

$$\text{excursión}_i = \left(\frac{\text{valor del objetivo}_i}{\text{valor del dato que no cumple}_i} \right) - 1 \quad \text{Ec. 5.}$$

Y en el caso de los coliformes fecales, la excursión se calcula como:

$$\text{excursión}_i = \left(\frac{\log_{10} \text{valor del dato que no cumple}_i}{\log_{10} \text{valor del objetivo}_i} \right) - 1 \quad \text{Ec. 6.}$$

Después de calcular la excursión de todos los datos que no cumplen, se calcula el nse utilizando la siguiente ecuación:

$$nse = \frac{\sum_{i=1}^n excursión_i}{\text{número total de datos}} \quad \text{Ec. 7.}$$

Finalmente, F3 se estima de la siguiente manera:

$$F3 = \left(\frac{nse}{0.01 * nse + 0.01} \right) \quad \text{Ec. 8.}$$

Los resultados del WQI se clasifican según las categorías descritas en la Tabla 7.

CATEGORÍA	VALOR WQI	DESCRIPCIÓN
Excelente	[95 <WQI<100]	Calidad del agua cumple los OC, la calidad está protegida sin que las condiciones deseables estén amenazadas
Buena	[80 <WQI< 94]	Calidad del agua cumple los objetivos, la calidad está protegida en un menor nivel, sin embargo, las condiciones deseables pueden estar amenazadas
Aceptable	[65<WQI<79]	Calidad del agua no cumple los objetivos y ocasionalmente las condiciones deseables están amenazadas
Marginal	[45 <WQI <64]	Calidad del agua no cumple los objetivos y frecuentemente las condiciones deseables están amenazadas
Pobre	[0 <WQI <44]	Calidad del agua no cumple los objetivos, la mayoría de veces la calidad está amenazada o afectada; por lo general apartada de las condiciones deseables

Tabla 7. Categorización, clasificación y caracterización de los rangos del WQI

Por lo tanto, el WQI permite determinar de una forma aproximada el avance anual en la calidad del recurso hídrico y con esto establecer las variaciones de calidad por tramos (espacial y temporal) y planificar y ejecutar acciones prioritizadas que mitiguen fenómenos que impactan de forma negativa la calidad del recurso hídrico.

3. RESULTADOS

Después de la implementación de los métodos y metodologías explicados en el capítulo anterior se obtienen los resultados para cada uno de los tramos de los ríos que conforman la RCHB-T.

En general los resultados que se presenta para cada tramo son los siguientes:

En las figuras 3, 7, 11 y 15 se presenta en el eje vertical la cantidad de datos que fueron catalogados como *outliers*, y la cantidad que fue monitoreados por cada punto de la RCHB-T durante el periodo 2016-2017 por cada determinante, esto últimos presentados en el eje horizontal.

Las tablas similares a la Tabla 8 presentan la cantidad y porcentaje de datos que no cumplieron con los objetivos calidad por cada uno de los determinantes evaluados (izquierda), mientras que a la derecha de la tabla se presentan las variables F1, F2, nse y F3 (ver numeral 2.3) empleadas en el cálculo del indicador WQI, y finalmente el valor de este indicador.

La figura tipo radar, como la que se presenta en la Figura 4, representan el porcentaje de cumplimiento de los OC por determinante de la calidad del agua y para cada tramo del río analizado. Por último, se presenta espacialmente por medio de mapas, el valor del indicador WQI por cada uno tramos que conforman los ríos de la RCHB, tal como se puede observar en la Figura 5.

3.1. RÍO TORCA

En el río Torca se realizaron seis monitoreos por cada uno de los puntos sobre los cuales se realiza seguimiento a la calidad del agua: Bosque de Pinos, Calle 161, Jardines de Paz y San Simón. En la Figura 3 se muestra la cantidad de monitoreos ejecutados por punto y la cantidad de *outliers* (atípicos) que se obtuvieron después de aplicar la metodología de box-plot.

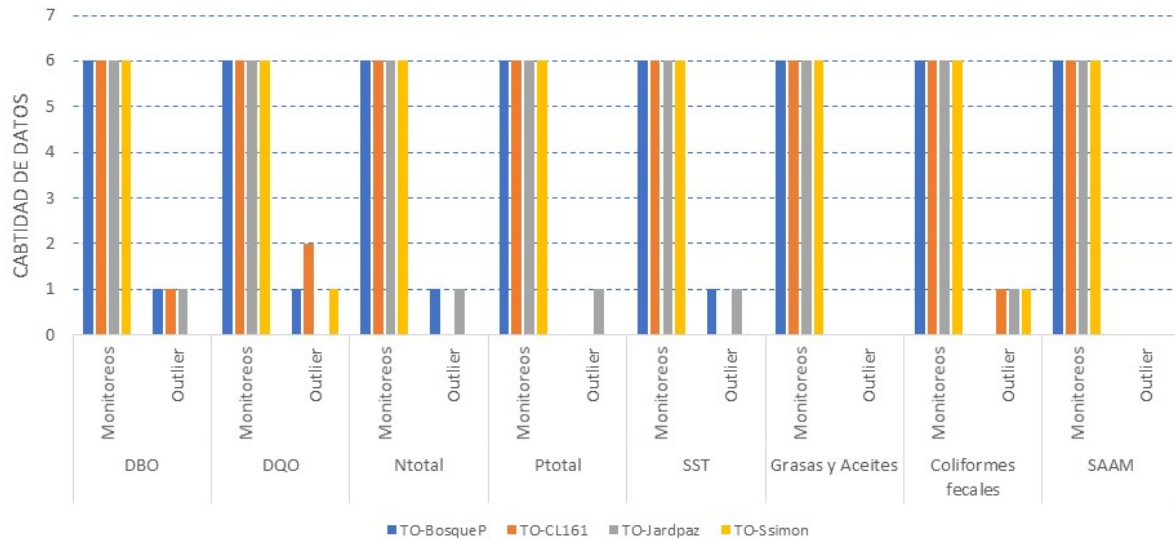


Figura 3. Cantidad de datos validados y datos outliers en los tramos de monitoreo del río Torca

A partir del análisis estadístico de la información, se determinaron 5 valores atípicos asociados con los parámetros in situ para un total de 55 datos validados, los cuales fueron considerados para el cálculo del WQI en el tramo I. Para el tramo II del río Torca el total de datos validados fue 167 que representan el 92.2 % de la totalidad de los datos obtenidos en los monitoreos (180) y 13 datos atípicos.

Con base en los datos validados, se determinó que la calidad del agua en el tramo I, para el periodo evaluado, fue **Excelente** en comparación al periodo inmediatamente anterior (2015-2016) que se determinó como **Buena**. Para el periodo analizado no se encontraron determinantes que no alcanzaran el valor del OC, en el tramo I, en comparación al periodo inmediatamente anterior en donde los únicos determinantes que no alcanzaron los OC establecidos para el tramo I fueron DBO₅ y Fósforo Total. En la Tabla 8 se presentan los porcentajes de datos que no cumplen los OC con respecto al total de los datos de cada determinante.

Es preciso indicar que el coeficiente excursión y la variable F3 evalúan la magnitud con la cual los datos analizados superan los OC mientras que tiene más relevancia para el cálculo del WQI la cantidad de determinantes que incumple los OC, dado por la variable F1 así como la frecuencia que un objetivo es incumplido. Estas son las dos variables que más pesan en el valor del WQI.



DETERMINANTE DE LA CALIDAD	No. DATOS QUE NO CUMPLEN EL OC	% DE DATOS QUE NO CUMPLEN EL OC	VARIABLES	VALOR
DBO ₅	0	0.00	F1	0.00
DQO	0	0.00	F2	0.00
SST	0	0.00	nse	0.00
GyA	0	0.00	F3	0.00
SAAM	0	0.00	WQI	100
Fosforo Total	0	0.00		
Coliformes fecales	0	0.00		
Nitrógeno Total	0	0.00		
pH	0	0.00		
OD	0	0.00		

Tabla 8. Río Torca WQI – Tramo I

Para el caso del tramo II, el 1.2 % del total de los datos superaron el valor de referencia para el tramo II del río Torca. OD y GyA fueron los determinantes que incumplieron los OC con un porcentaje de 6.25% y 5.56% respectivamente. Sin embargo, el incumplimiento del OC de GyA [30 mg/L] sólo se dio en la estación Calle 161, en la cual el valor obtenido en el monitoreo fue de 35 mg/L. Los ocho determinantes restantes cumplieron con los OC, lo cual incidió directamente en el valor de F1 y por tanto en el valor final del WQI [88.43], que clasifica la calidad del agua del tramo en Buena.

En comparación con el periodo 2015-2016, donde el cálculo del WQI fue de 82 para este tramo, se observa que, si bien se mantiene la categoría de calidad del agua en Buena, el WQI incrementó en cerca de 6 unidades.

DETERMINANTE DE LA CALIDAD	NO. DATOS QUE NO CUMPLEN EL OC	% DE DATOS QUE NO CUMPLEN EL OC	VARIABLES	VALOR
DBO ₅	0	0.00	F1	20
DQO	0	0.00	F2	1.20
SST	0	0.00	nse	0.00
GyA	1	5.56	F3	0.13
SAAM	0	0.00	WQI	88.43
Fosforo Total	0	0.00		
Coliformes fecales	0	0.00		



ALCALDÍA MAYOR
DE BOGOTÁ D.C.
SECRETARÍA DE AMBIENTE

DETERMINANTE DE LA CALIDAD	NO. DATOS QUE NO CUMPLEN EL OC	% DE DATOS QUE NO CUMPLEN EL OC
Nitrógeno Total	0	0.00
pH	0	0.00
OD	1	6.25

VARIABLES	VALOR
-----------	-------

Tabla 9. Río Torca WQI – Tramo II

La Figura 4 permite evidenciar que los determinantes de la calidad del agua con mayor impacto en la calidad hídrica del tramo II del río Torca, fueron OD y GyA. Si bien el WQI para el tramo II para los periodos 2015-2016 y 2016-2017 se mantiene en **Bueno** con respecto al periodo 2014-2015 que era **Aceptable**, el deterioro de la calidad del agua continúa siendo afectada principalmente por las descargas de aguas residuales domésticas generadas por la problemática de conexiones erradas presentes en el área aferente al canal y en menor proporción a la inexistencia de un sistema de alcantarillado para la parte baja de la cuenca (desde Jardines de Paz hasta La desembocadura al río Bogotá). Ver Figura 5.

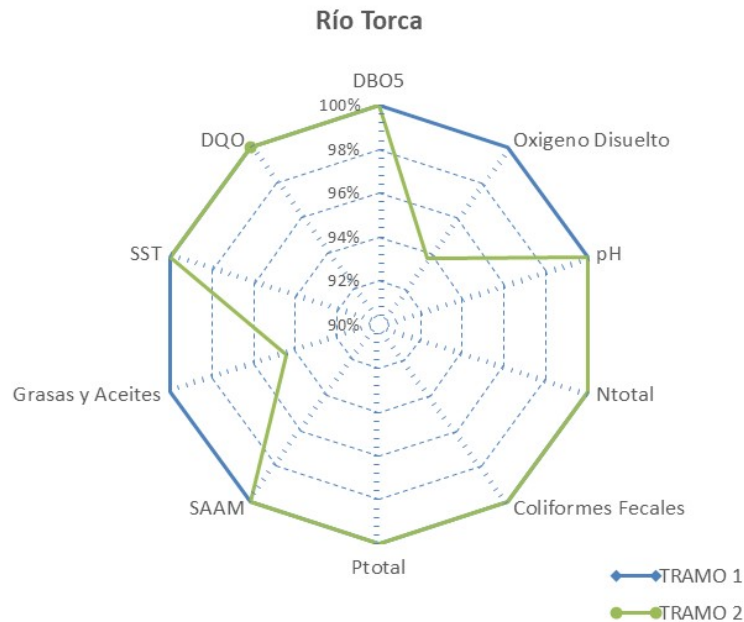


Figura 4. Porcentaje de cumplimiento de los OC por determinante de la calidad del agua y tramo del río Torca

En general, se puede establecer que para el primer tramo del río Torca, no hubo un determinante crítico y la calidad del agua se mantuvo dentro de los valores históricos e incluso mejoró. Sin embargo, para el tramo II el valor de WQI mejoró en un 7.3 % con respecto al periodo 2015-2016 sin cambiar de clasificación, tal como lo muestra la Figura 5 y la Figura 6.

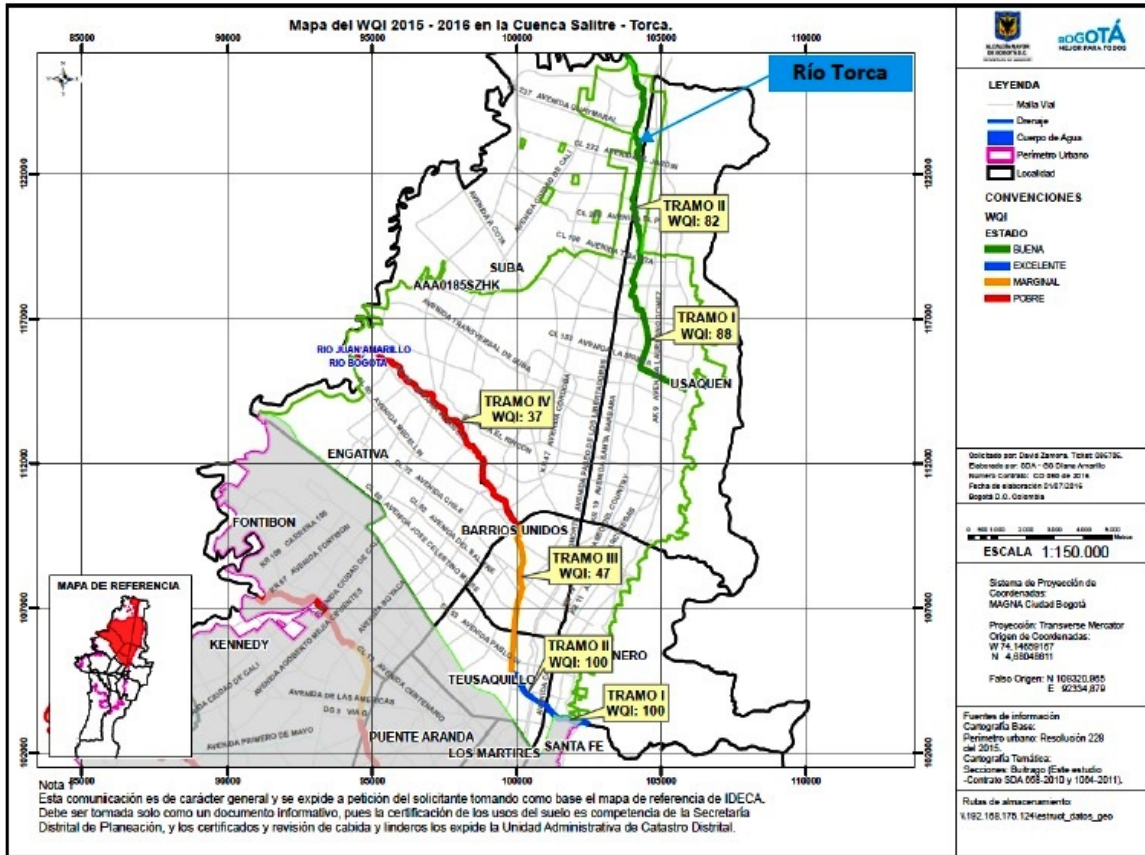


Figura 5. Mapa del índice de calidad hídrica (WQI) en el río Torca 2015-2016

A continuación, se presenta el mapa del indicador WQI durante el periodo 2016-2017 para los tramos del río Torca. Se puede evidenciar que para el periodo evaluado la clasificación del indicador predominante es Buena, que se presenta en el tramo II el cual es el más largo de este río y mejorando la clasificación de calidad del agua obtenida en el tramo I.

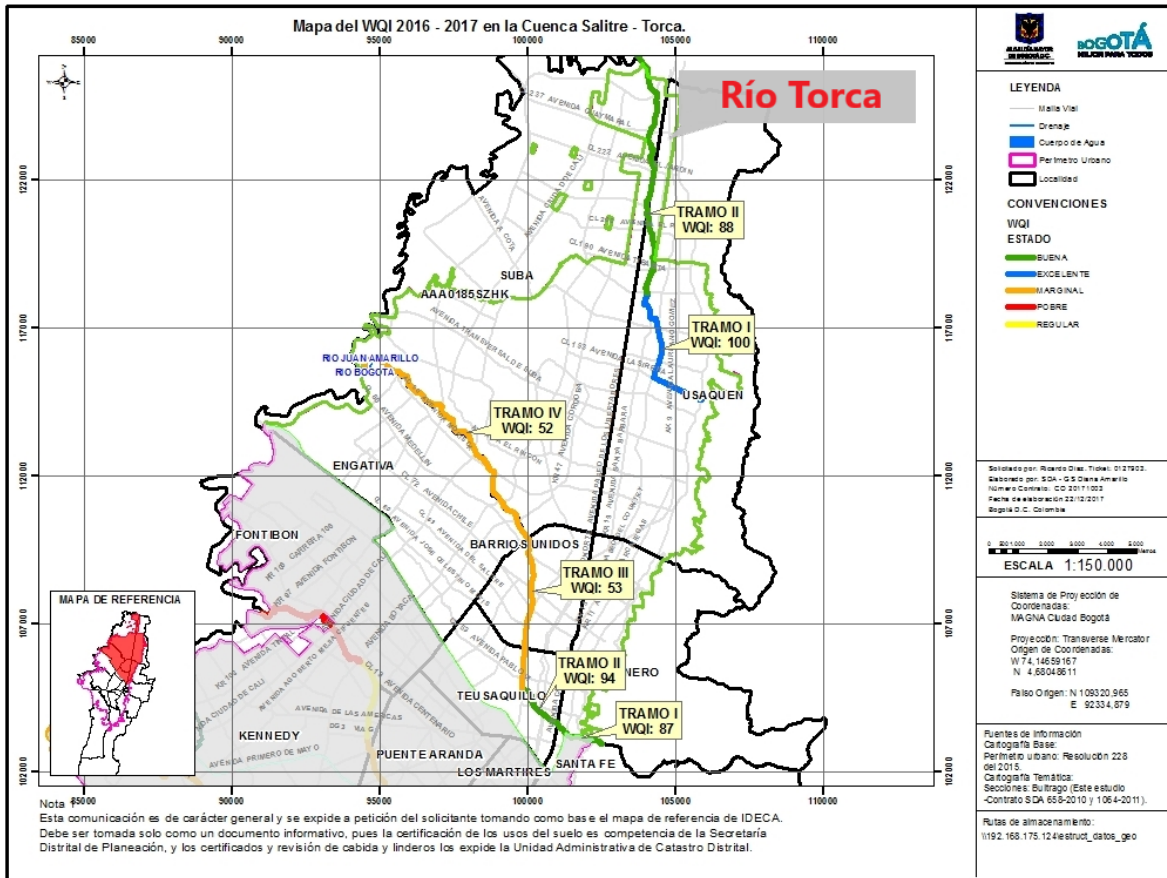


Figura 6. Mapa del índice de calidad hídrica (WQI) en el río Torca 2016-2017

3.2. RÍO SALITRE

Para los puntos de control de la calidad del agua se ejecutaron 6 monitoreos durante los meses de abril a junio de 2017, obteniéndose así 360 datos realizando la sumatoria de la totalidad de los resultados obtenidos de los determinantes de calidad del agua evaluados en cada una de las estaciones monitoreadas. A partir del análisis estadístico de la información, se determinaron 22 valores atípicos que corresponden al 6.11% de los datos, estos valores atípicos no fueron considerados para el cálculo del WQI. Para el tramo I del río Salitre, cuyo único punto de monitoreo es el Parque Nacional, se validó el 92% de los datos, de un total de 60 datos validados y 5 datos atípicos. En el tramo II del río Salitre (puntos arzobispo y Calle 53) se validó el 92.5% de los datos,

para un total de 111 datos validados y 9 datos atípicos mientras que para los tramos III y IV, se validó el 95.7 % de los datos de los cuales 13 datos (4.3 %) corresponde a valores atípicos (ver Figura 7).

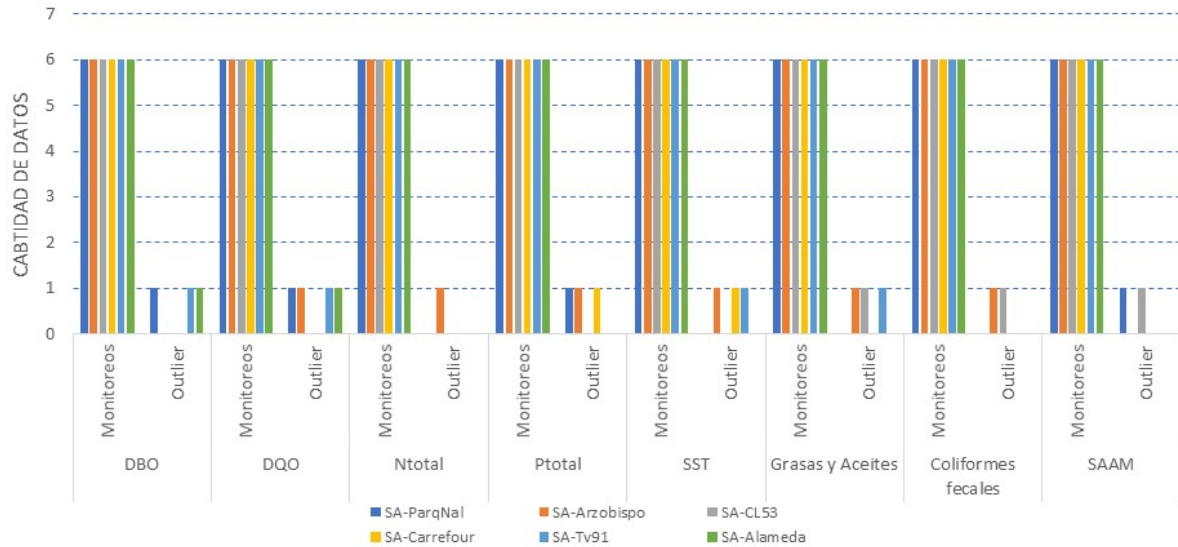


Figura 7. Cantidad de datos validados y datos *outliers* en los tramos de monitoreo del río Salitre

Del total de los 55 datos validados para el punto Parque Nacional (Tramo I del río Salitre), 4 datos incumplieron con el OC dando como resultado, 2 variables que no cumplen con los OC (OD y pH) y como valor y clasificación del WQI: 87.35 y **Bueno** (ver Tabla 10).

El porcentaje de cumplimiento con los OC es del 60% para el OD y del 67% para el pH.

Comparando el WQI de este período (2016-2017) con el valor obtenido para el lapso 2015-2016, la calidad de este tramo tuvo una disminución del 13%.

DETERMINANTE DE LA CALIDAD	No. DATOS QUE NO CUMPLEN EL OC	% DE DATOS QUE NO CUMPLEN EL OC
DBO ₅	0	0.00
DQO	0	0.00
SST	0	0.00

VARIABLES	VALOR
F1	20
F2	8.93
nse	0.004



DETERMINANTE DE LA CALIDAD	No. DATOS QUE NO CUMPLEN EL OC	% DE DATOS QUE NO CUMPLEN EL OC
GyA	0	0.00
SAAM	0	0.00
Fosforo Total	0	0.00
Coliformes fecales	0	0.00
Nitrógeno Total	0	0.00
pH	2	33.33
OD	2	40.00

VARIABLES	VALOR
F3	0.40
WQI	87.71

Tabla 10. Río Salitre WQI – Tramo I

Para los dos puntos de monitoreo (Arzobispo y Calle 53) del tramo II del río Salitre, del total de los 111 datos validados, 2 datos incumplieron con el OC dando como resultado, 1 variable que no cumple con los OC (Grasas y Aceites) y como valor y clasificación del WQI: 94.13 y **Buena** respectivamente (ver Tabla 11). Comparativamente, el valor del WQI disminuyó en un 6% con respecto a la evaluación realizada en el período 2015-2016 cuya clasificación fue **Excelente**.

Este tramo, a lo largo de los años ha mejorado su calidad del agua, debido a las obras de rehabilitación de las estructuras de alivio culminadas en el año 2012, generando así una mejoría en el índice de calidad WQI (2012-2013 = 46 vs 2016-2017 = 94.13) pasando de **Marginal** en el periodo 2012-2013 a **Buena** para el periodo analizado (ver Tabla 11).

DETERMINANTE DE LA CALIDAD	No. DATOS QUE NO CUMPLEN EL OC	% DE DATOS QUE NO CUMPLEN EL OC	VARIABLES	VALOR
DBO ₅	0	0.00	F1	10.00
DQO	0	0.00	F2	1.80
SST	0	0.00	nse	0.00
GyA	2	20.00	F3	0.13
SAAM	0	0.00	WQI	94.13
Fosforo Total	0	0.00		
Coliformes	0	0.00		
Nitrógeno Total	0	0.00		
pH	0	0.00		
OD	0	0.00		

Tabla 11. Río Salitre WQI – Tramo II

Para el tramo III del río Salitre 8 de las 10 variables no cumplen con los OC, para un total de 18 datos que incumplen (16 %) contra 115 datos validados. Los determinantes que en este tramo presentaron una mayor frecuencia fueron Nitrógeno Total, Grasas y Aceites y Coliformes Fecales (Tabla 12).

De acuerdo con el cálculo del WQI la calidad del agua en este tramo fue **Marginal**, manteniendo la clasificación reportada para los periodos 2014-2015 y 2015-2016. (Figura 8 y Figura 9).

A diferencia de los tramos I y II, en el tramo III el porcentaje de datos que incumplen los OC, evidencia la afectación de las descargas de aguas residuales provenientes de las estructuras de alivio del sistema de alcantarillado combinado localizadas en este tramo del río. La cantidad de determinantes que incumplen los OC (F1) y la frecuencia de incumplimiento de un OC, son las dos variables que más pesan en el valor del WQI obtenido para el tramo III. Las dos variables que más incidieron en la excursión fueron GyA y Oxígeno Disuelto (Tabla 12).

DETERMINANTE DE LA CALIDAD	NO. DATOS QUE NO CUMPLEN EL OC	% DE DATOS QUE NO CUMPLEN EL OC	VARIABLES	VALOR
OD	3	25.0%	F1	80.00
DBO ₅	2	16.7%	F2	15.70
DQO	2	16.7%	nse	0.1075
Nitrógeno Total	3	25.0%	F3	9.71
Ptotal	1	9.1%	WQI	52.60



DETERMINANTE DE LA CALIDAD	NO. DATOS QUE NO CUMPLEN EL OC	% DE DATOS QUE NO CUMPLEN EL OC
SST	0	0.0%
Grasas y Aceites	3	27.3%
Coliformes fecales	3	27.3%
pH	0	0.0%
SAAM	1	9.1%

VARIABLES	VALOR
-----------	-------

Tabla 12. Río Salitre WQI – Tramo III

Finalmente, para el tramo IV del río Salitre se tiene que de los 172 datos validados el 22% (38 datos) superan los valores establecidos como OC. En este tramo se tiene que los determinantes de calidad que presentaron una mayor frecuencia fueron Coliformes Fecales, Grasas y Aceites. Los porcentajes asociados al número de datos que no cumplieron con los OC por cada determinante se presentan en la Tabla 13, a excepción de los SST y el pH cuyos registros no sobrepasaron los OC.

Al igual que el tramo III la variable F1 del WQI tiene el mismo valor en el tramo IV, pero la frecuencia (F2) y la amplitud con la cual se incumplieron los OC fueron superiores para el Tramo IV. El WQI en el tramo IV mostró una calidad del agua **Marginal** con un valor de 51.61.

Comparando con el periodo 2015-2016 este tramo mostro mejoría cuyo valor de WQI fue **Pobre** con un valor de 37, que fue igual al valor de WQI reportado para el periodo 2014-2015.

DETERMINANTE DE LA CALIDAD	NO. DATOS QUE NO CUMPLEN EL OC	% DE DATOS QUE NO CUMPLEN EL OC
DBO ₅	2	12.50
DQO	2	12.50
SST	0	0.00
GyA	7	41.18
SAAM	3	16.67
Fosforo Total	2	11.76
Coliformes fecales	10	55.56
Nitrógeno Total	6	33.33
pH	0	0.00
OD	6	33.33

VARIABLES	VALOR
F1	80.00
F2	22.10
nse	0.1328
F3	11.73
WQI	51.61

Tabla 13. Río Salitre WQI – Tramo IV

Para el caso específico de Coliformes Fecales el 56% del total de los datos (estaciones Carrefour, Transversal 91 y Salitre Alameda) superaron el valor de referencia para el tramo IV, el cual es de 1×10^6 NMP/100mL. En términos de frecuencia se establece que en el punto de monitoreo en el que se presentó una mayor afectación por Tensoactivos y Coliformes totales fue la de la Salitre Alameda, con un porcentaje de incumplimiento de los datos obtenidos en la referida estación del 33 % y del 83 % respectivamente.

A medida que el río Salitre avanza en el tramo IV se evidenció que los determinantes de calidad de agua evaluados presentan una disminución en términos de concentración comparando los valores obtenidos en las estaciones de Carrefour y Transversal 91, sin embargo, las concentraciones se incrementan en el punto Salitre Alameda, debido a las descargas de aguas residuales principalmente domésticas localizadas en la parte baja de la cuenca. Lo anterior permite inferir que el mayor contenido de las sustancias que afectan el tramo IV son de origen orgánico.

La Figura 8 permite visualizar los resultados antes descritos y evidencia la notoria influencia que tiene la DBO_5 , en la calidad del agua en los tramos II, III y IV del río Salitre. Además, es claro el comportamiento relativamente uniforme que presentaron los determinantes de la calidad del agua en el tramo II, excepto para GyA, durante el periodo aquí evaluado. Finalmente, se observa la incidencia negativa de las descargas con alto contenido de Coliformes fecales y Grasas y Aceites en el tramo IV.

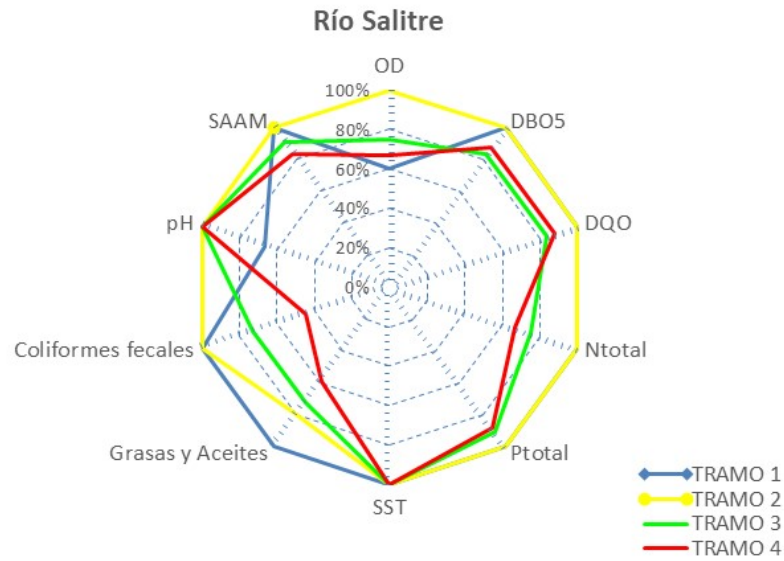


Figura 8. Porcentaje de cumplimiento de los OC por determinante de la calidad del agua y tramo del Río Salitre

A continuación, se presenta el mapa del indicador WQI para los tramos del río Salitre durante los periodos 2015-2016 (Figura 9) y 2016-2017 (Figura 10). Allí se evidencia una desmejora de calidad del agua para los tramos I y II respecto del periodo 2015-2016, que pasan de **Excelente** a **Buena**, la constante calidad **Marginal** del recurso hídrico en el tramo III, así como una mejoría de la calidad del agua en el tramo IV que pasa de **Pobre** a **Marginal**.



ALCALDÍA MAYOR
DE BOGOTÁ D.C.
SECRETARÍA DE AMBIENTE

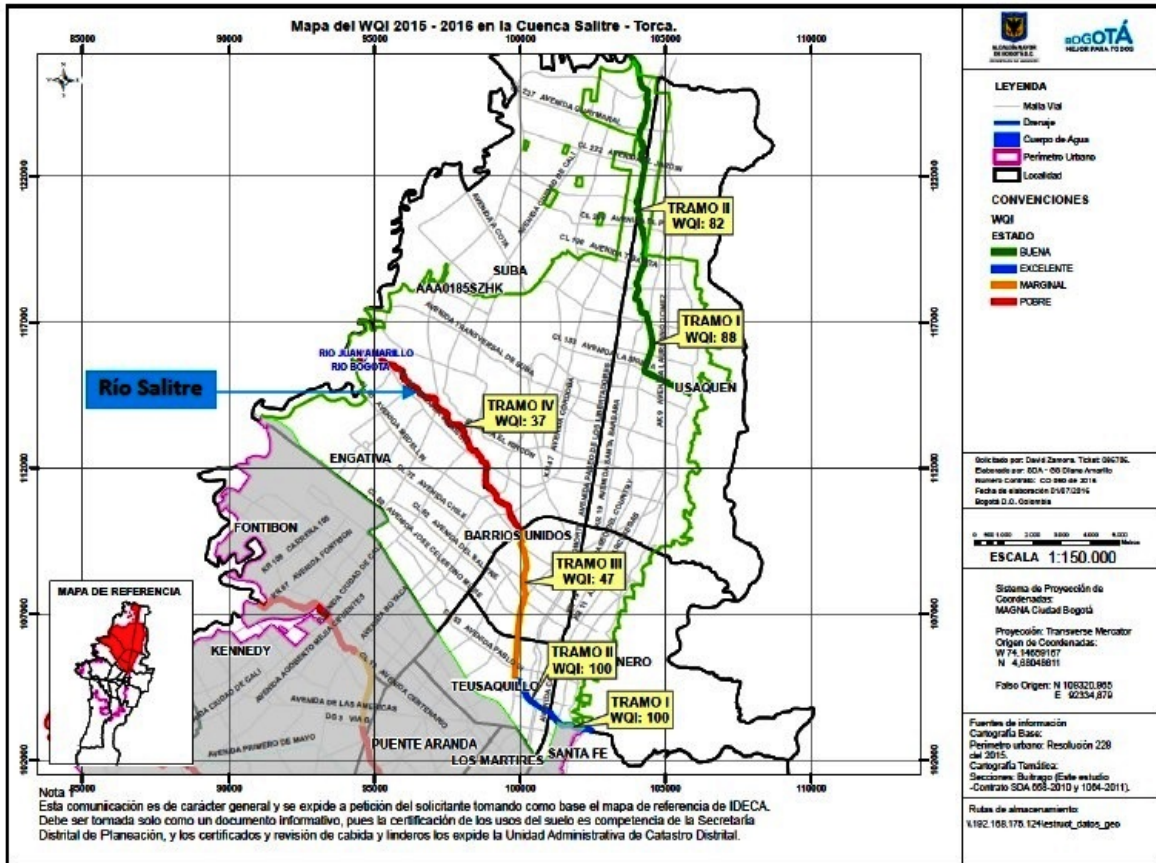


Figura 9. Mapa del índice de calidad hídrica (WQI) en el río Salitre periodo 2015-2016

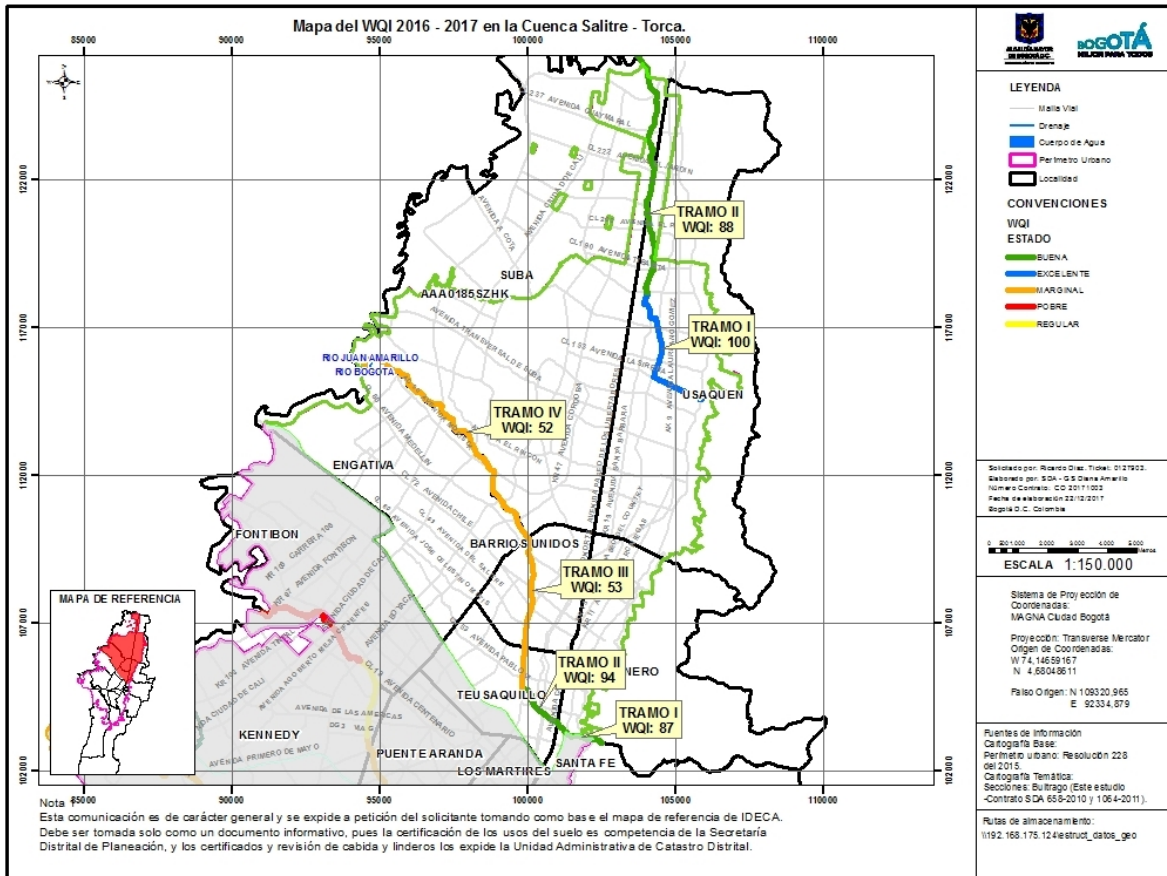


Figura 10. Mapa del índice de calidad hídrica (WQI) en el río Salitre 2016-2017

3.3. RÍO FUCHA

El río Fucha está conformado por ocho puntos de monitoreo y cada uno fue caracterizado de conformidad con el número de monitoreos que se muestran en la Tabla 3 en el periodo del 18 de abril al 30 de junio de 2017, como se presenta en la Figura 11, obteniéndose así 440 datos realizando la sumatoria de la totalidad de los resultados obtenidos de los determinantes de calidad del agua evaluados. A partir del análisis estadístico de la información, se determinaron 34 valores atípicos que corresponden al 7.73 % de los datos, estos valores atípicos no fueron considerados para el cálculo del WQI.

Todos los determinantes evaluados tuvieron *outliers*. No obstante, en la figura 11 se observa que la estación Carrera 7 fue el punto de monitoreo con mayor número de *outliers* (6), seguido de la estación Visión Colombia (5 atípicos) y las Estaciones El Delirio, Zona Franca y Fucha Alameda (cada una con 4 *outliers*). Lo anterior considerando únicamente los determinantes de calidad de agua analizados en laboratorio.

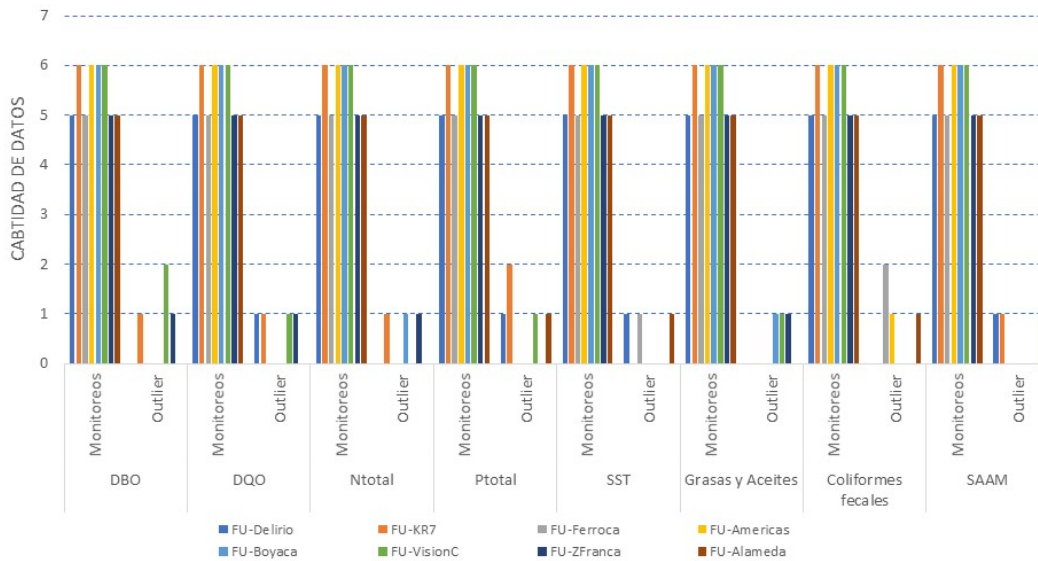


Figura 11. Cantidad de datos monitoreados y datos *outliers* en los puntos de monitoreo del río Fucha

En el tramo I de este río se encuentra ubicado el punto de monitoreo (El Delirio) para el cual se calculó el WQI con un total de 46 datos validados, de los cuales tres (3) no cumplieron con los OC (Tabla 14) en dos determinantes de la calidad del agua (Grasas y aceites y OD). La magnitud por la cual las concentraciones de OD incumplieron no están muy alejadas del objetivo, y por tanto su aporte a la excursión es mínimo, sin embargo, en el caso de Grasas y Aceites la amplitud es mucho mayor al objetivo siendo este determinante el que más aporta en la excursión. De esta manera el valor del WQI en este tramo es de 87.75 Buena que es mejor en 7 % que la reportada para el periodo 2015-2016 que fue de 82 también categorizada como Buena.



DETERMINANTE DE LA CALIDAD	NO. DATOS QUE NO CUMPLEN EL OC	% DE DATOS QUE NO CUMPLEN EL OC
DBO ₅	0	0.00
DQO	0	0.00
SST	0	0.00
GyA	2	40.00
SAAM	0	0.00
Fosforo Total	0	0.00
Coliformes fecales	0	0.00
Nitrógeno Total	0	0.00
pH	0	0.00
OD	1	20.00

VARIABLES	VALOR
F1	20
F2	6.5
nse	0.03
F3	2.79
WQI	87.75

Tabla 14. Río Fucha WQI – Tramo I

Los puntos de monitoreo que conforman el tramo II del río Fucha son Carrera 7 y Avenida Ferrocarril. La cantidad de datos validados y empleados para el cálculo del WQI de estos puntos fueron un total de 100, de los cuales 27 no cumplieron con el valor establecido como objetivo; lo anterior incidió en que la calidad de agua de este tramo sea clasificada como **Marginal** en comparación al periodo 2015-2016 que fue clasificada como **Pobre** y tuvo 58 datos que no cumplieron con los OC considerando 111 datos validados en ese periodo (Figura 12).

Es importante resaltar que ocho parámetros incumplieron con los OC de este tramo, donde los más críticos en términos de porcentaje de incumplimiento con respecto al OC son los SST con un 50 % y OD con el 40 % seguidos de la GyA y Coliformes Fecales cada uno con un 36 % y 33 % respectivamente (ver Tabla 15). Los únicos parámetros que cumplieron fueron el pH y SAAM. La afectación de la calidad de agua en este tramo se da principalmente por descargas de aguas residuales provenientes de las estructuras de alivio localizadas a lo largo del tramo.

La magnitud, en general, de las concentraciones de los determinantes de la calidad que incumplieron los objetivos fueron significativos, tal como lo evidencia el factor de excursión y la variable F3. Por último, el WQI mejoró su clasificación de **Pobre** a **Marginal** con respecto al periodo inmediatamente anterior (2015-2016) (ver Figura 13).



DETERMINANTE DE LA CALIDAD	NO. DATOS QUE NO CUMPLEN EL OC	% DE DATOS QUE NO CUMPLEN EL OC
Oxígeno Disuelto	4	40%
DBO₅	3	30%
DQO	3	30%
Nitrógeno Total	3	30%
Fósforo Total	2	22%
SST	5	50%
Grasas y Aceites	4	36%
Coliformes fecales	3	33%
pH	0	0%
SAAM	0	0%

VARIABLES	VALOR
F1	80.0
F2	27.0
nse	0.45
F3	31.23
WQI	48.02

Tabla 15. Río Fucha WQI – Tramo II

En el tramo III se presenta, para todos los determinantes de la calidad un menor porcentaje de incumplimiento (ver Tabla 16) en comparación con los resultados obtenidos en el tramo II. Para este tramo se determinó que el 7.7 % [9 datos] del conjunto de datos validados (117) no cumplieron con los OC. Es importante resaltar que los determinantes que más influenciaron en el resultado del WQI fueron Coliformes Fecales y Grasas y Aceites [27%], seguido del N_{Total} [18%] en el tramo III. No obstante, la magnitud del incumplimiento (diferencia entre el OC y el valor medido) de estos determinantes es en general significativamente menor en el tramo III, si se comparan con los factores de excursión del tramo II.

Los OC para el tramo III son más flexibles teniendo en cuenta que los datos reportados para Av. Ferrocarril y Av. Las Américas [de tramo II a tramo III] no presentan diferencias significativas y por lo tanto el cambio en calidad de agua no es notable. La clasificación del tramo pasó de **Marginal** a **Aceptable** respecto al periodo 2015-2016 cuyo valor del WQI mejoró en un 22%.

DETERMINANTE DE LA CALIDAD	NO. DATOS QUE NO CUMPLEN EL OC	% DE DATOS QUE NO CUMPLEN EL OC
DBO₅	0	0.00
DQO	0	0.00
SST	1	8.33

VARIABLES	VALOR
F1	40.0
F2	7.7
nse	0.01



DETERMINANTE DE LA CALIDAD	NO. DATOS QUE NO CUMPLEN EL OC	% DE DATOS QUE NO CUMPLEN EL OC
GyA	3	27.27
SAAM	0	0.00
Fosforo Total	0	0.00
Coliformes fecales	3	27.27
Nitrógeno Total	2	18.18
pH	0	0.00
OD	0	0.00

VARIABLES	VALOR
F3	1.26
WQI	76.47

Tabla 16. Río Fucha WQI – Tramo III

En el tramo IV de este río hay tres puntos de monitoreo [Visión Colombia, Fucha Zona Franca y Fucha con Alameda], el cálculo del WQI se realizó con 143 datos, de los cuales 57 [40% de los datos] no alcanzaron los OC respecto al periodo 2015-2016 donde el 51% de los datos no alcanzaron el OC, por lo tanto, el valor de WQI obtenido fue de 43 y la calidad de agua de este tramo se sigue manteniendo en **Pobre** respecto al lapso inmediatamente anterior con una disminución de 1 punto, donde el WQI dio como resultado 44. (Tabla 17).

Si bien el factor de excursión y la variable F3 del tramo IV son mayores a los reportados para el tramo III, es importante resaltar que los OC para el tramo IV son superiores, lo cual influye en que la magnitud de excedencia con respecto al objetivo sea menor. Sin embargo, las concentraciones de los determinantes de la calidad son similares en los tramos III y IV.

DETERMINANTE DE LA CALIDAD	NO. DATOS QUE NO CUMPLEN EL OC	% DE DATOS QUE NO CUMPLEN EL OC
Oxígeno Disuelto	2	15.38%
DBO ₅	5	38.46%
DQO	8	57.14%
Nitrógeno Total	13	86.67%
Fósforo Total	2	14.29%
SST	4	26.67%
Grasas y Aceites	9	64.29%
Coliformes fecales	11	73.33%
pH	0	0.00%

VARIABLES	VALOR
F1	90.0
F2	39.9
nse	0.1313
F3	11.61
WQI	43



ALCALDÍA MAYOR
DE BOGOTÁ D.C.
SECRETARÍA DE AMBIENTE

DETERMINANTE DE LA CALIDAD	NO. DATOS QUE NO CUMPLEN EL OC	% DE DATOS QUE NO CUMPLEN EL OC	VARIABLES	VALOR
SAAM	3	20.00%		

Tabla 17. Río Fucha WQI – Tramo IV

Analizando gráficamente los datos para el río Fucha, en la Figura 12 se puede observar que el determinante Grasas y Aceites es el único que en todos los tramos reportó incumplimiento con los OC. Por su parte, el pH cumple en todos los tramos.

Para el Tramo I, la mayoría de los determinantes cumplen con los OC, excepto para Grasas y Aceites y OD, que reportaron porcentajes de cumplimiento con respecto a los objetivos de calidad superiores al 60%. Para el caso del tramo III se observa que sólo para los determinantes GyA, y coliformes fecales los porcentajes de cumplimiento son inferiores al 80 %; mientras que en el Tramo IV se reportaron porcentajes de cumplimiento de los objetivos inferiores al 20% para N_{Total} y Coliformes Fecales.

Por otra parte, el OD presentó porcentajes de cumplimiento inferiores a medida que el río avanza desde el punto de monitoreo El Delirio a Fucha con Alameda, (Figura 13), asociado al incremento de las descargas de puntos de vertimiento de agua residual.

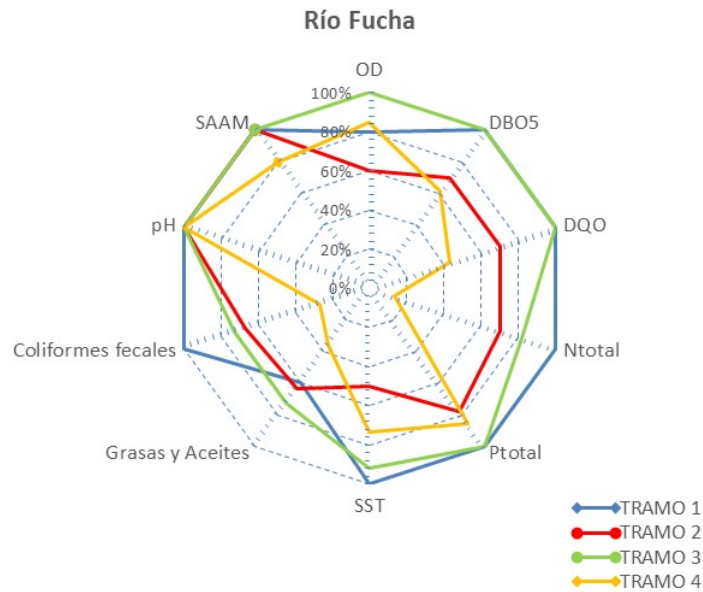


Figura 12. Porcentaje de cumplimiento de los OC por determinante de la calidad del agua y tramo del río Fucha

En las figuras 13 y 14 se presentan los valores de WQI sobre el río Fucha obtenidos para los periodos 2015-2016 y 2016-2017 respectivamente. Allí se puede observar el cambio positivo en la categoría de la calidad del agua en el tramo II y III que tuvo el indicador en el periodo 2016-2017 con respecto al periodo inmediatamente anterior. Por su parte se evidencia la misma calidad (**Bueno**) en el indicador para el Tramo I con una ligera mejoría en el resultado general del WQI del río Fucha. El Tramo IV por su parte, sigue presentando calidad **Pobre** para el periodo 2016-2017 con respecto al periodo 2015-2016.



ALCALDÍA MAYOR
DE BOGOTÁ D.C.
SECRETARÍA DE AMBIENTE

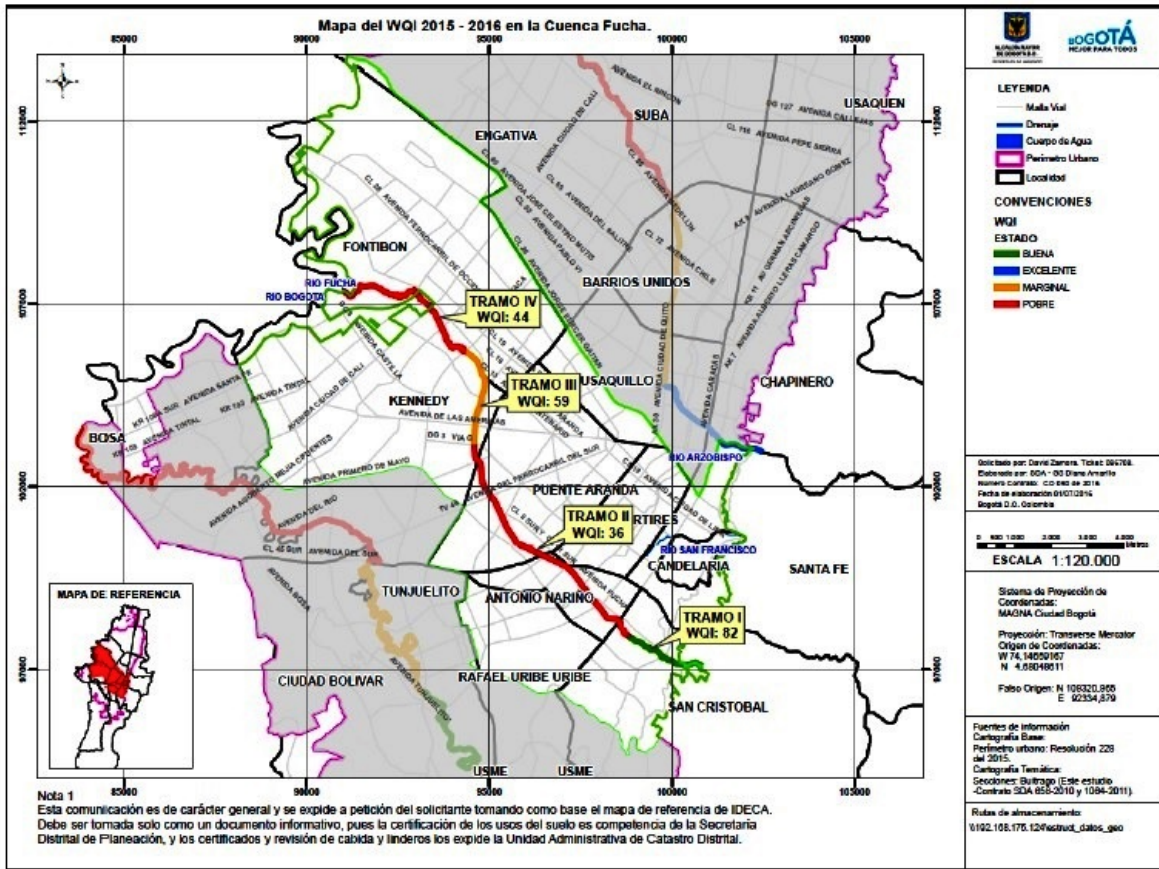


Figura 13. Mapa del índice de calidad hídrica (WQI) en el río Fucha 2015-2016

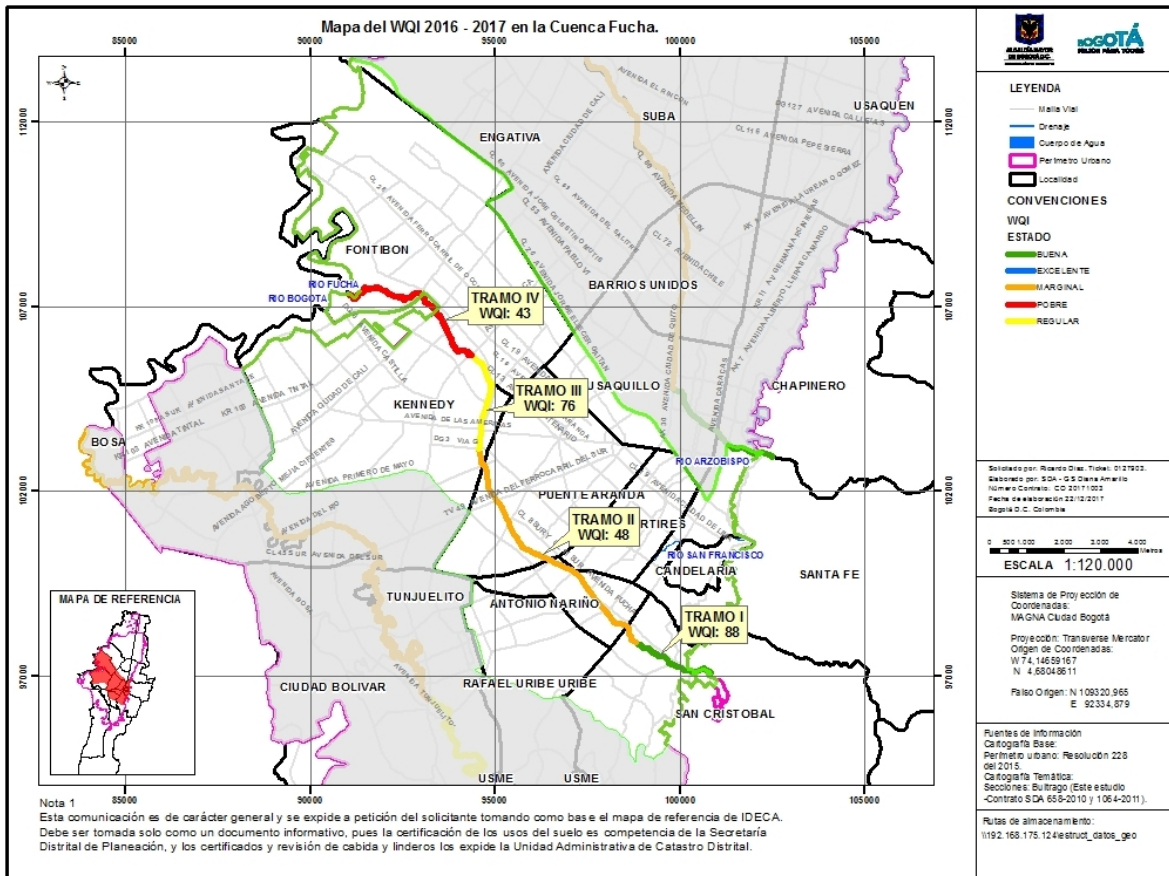


Figura 14. Mapa del índice de calidad hídrica (WQI) en el río Fucha 2016-2017

3.4. RÍO TUNJUELO

En el río Tunjuelo, el índice de calidad, WQI, tiene una variación singular asociado con la regulación del caudal que se presentan en el primer tramo por la operación del embalse La Regadera, ejecutada por la EAB-ESP.

En nueve de los diez puntos de monitoreo del río Tunjuelo para el periodo 2016-2017 se realizaron seis jornadas solo de caracterización de la calidad del agua en el periodo del 5 de abril al 30 de junio de 2017, tal como se muestra en la Figura 15, obteniéndose así 590 datos realizando la sumatoria de la

totalidad de los resultados obtenidos de los determinantes de calidad del agua evaluados en las diez estaciones de monitoreo. A partir del análisis estadístico de la información, se determinaron 36 valores atípicos que corresponden al 6.80 % de los datos, estos valores atípicos no fueron considerados para el cálculo del WQI.

En la figura 15 se observa que la estación Makro Autopista Sur fue el punto de monitoreo con mayor número de valores atípicos (8), seguido por las estaciones de transversal 86 y Yomasa con 5 valores atípicos teniendo como referencia únicamente los determinantes de calidad de agua analizados en laboratorio. Ahora bien, con respecto a los determinantes con mayor número de *outliers* se determina que la DQO fue el que presentó una mayor variabilidad con 6 valores atípicos y que la DBO₅ fue el que menos número de *outliers* presentó con 2 valores atípicos. Todos los determinantes, evaluados tuvieron *outliers*.

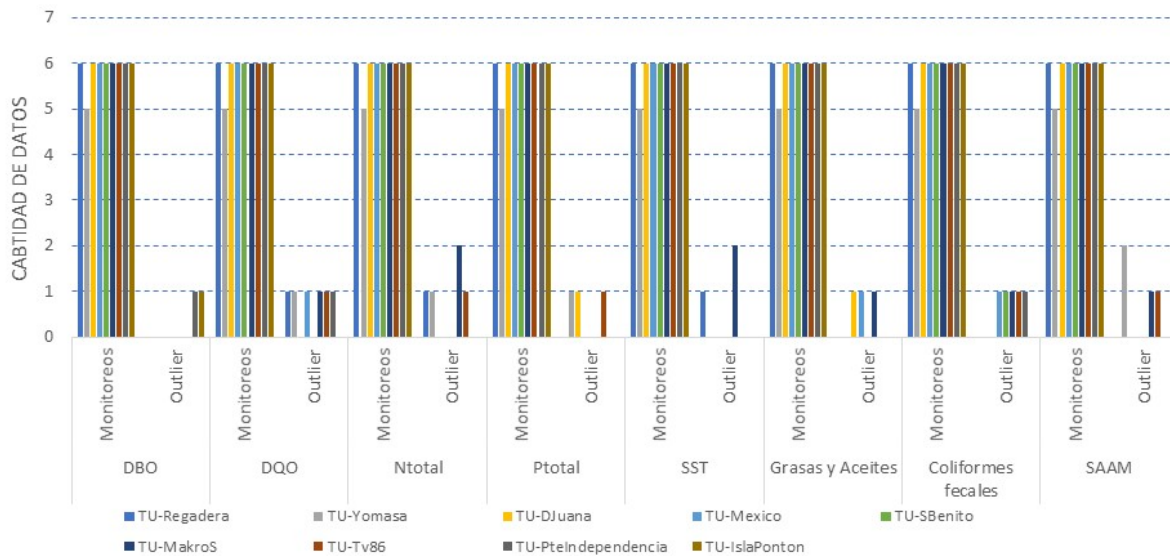


Figura 15. Cantidad de datos validados y datos *outliers* que no cumplieron con los OC en los tramos del río Tunjuelo

En el primer tramo del río Tunjuelo, se monitorearon dos puntos de monitoreo (La Regadera y Universidad Antonio Nariño). Si embargo, para el cálculo del WQI sólo se considera el punto La Regadera que contó con un total de 55 datos validados de los cuales el 15 % [8 datos] no alcanzaron los OC (ver Tabla 18) distribuidos en tres variables.

El índice de calidad hídrica WQI para este tramo fue **Bueno** como ocurrió con el lapso 2015-2016 cuyo valor de WQI se clasificó en la misma categoría, lo anterior se observa claramente al comparar el índice de calidad (Ver Tabla 22).

De acuerdo con los datos reportados para el periodo analizado, los determinantes de la calidad más críticos en el incumplimiento de los objetivos fueron el OD [60%], GyA [50%] y SST [40%]. Aunque los valores reportados no alcanzaron los OC, es importante resaltar que la magnitud de la diferencia, por la cual se dio el incumplimiento, no fue significativa en caso de OD, pero si en GyA y en los SST tal como lo evidencia el valor del factor de excursión y la variable F3. No obstante, las variables F1 y F2 tuvieron mayor incidencia en el cálculo del WQI (Figura 16).

DETERMINANTE DE LA CALIDAD	NO. DATOS QUE NO CUMPLEN EL OC	% DE DATOS QUE NO CUMPLEN EL OC	VARIABLES	VALOR
DBO ₅	0	0.00	F1	30.0
DQO	0	0.00	F2	14.5
SST	2	40.00	nse	0.056
GyA	3	50.00	F3	5.33
SAAM	0	0.00	WQI	80.51
Fosforo Total	0	0.00		
Coliformes fecales	0	0.00		
Nitrógeno Total	0	0.00		
pH	0	0.00		
OD	3	60.00		

Tabla 18. Río Tunjuelo WQI – Tramo I

En el Tramo II, los sitios de monitoreo correspondientes son [Yomasa y Doña Juana]. Para el periodo 2016-2017, el cálculo del WQI se realizó a partir de 103 datos validados, de los cuales 13 datos [13 %] no alcanzaron el valor establecido como objetivo de calidad. A diferencia del tramo I, los determinantes de la calidad del agua que más pesaron por su incumplimiento en el WQI fueron Nitrógeno Total [40%], SST [36.36%] y Grasas y Aceites [20%].

Por otra parte, es importante aclarar que el incumplimiento de los OC en los determinantes de Calidad SST y Nitrógeno Total, mencionados en el párrafo anterior, se dieron en el conjunto de datos

del punto de monitoreo Doña Juana únicamente. Comparativamente, en el punto Yomasa se dio cumplimiento a los OC, excepto para el determinante de GyA. Por consiguiente, se puede establecer que el punto Doña Juana es un punto crítico de este tramo. Aunque es baja la frecuencia con la cual los datos reportados incumplen los objetivos [variable F2], la magnitud con la cual superan tales valores es alto, principalmente los SST como se refleja en los valores del factor de excursión y el F3.

Con respecto al periodo anterior [2015–2016], el valor obtenido de WQI para el Tramo II desmejora su clasificación de Buena a Aceptable (Figura 16).

DETERMINANTE DE LA CALIDAD	NO. DATOS QUE NO CUMPLEN EL OC	% DE DATOS QUE NO CUMPLEN EL OC	VARIABLES	VALOR
DBO ₅	0	0.00	F1	50.00
DQO	1	10.00	F2	12.60
SST	4	36.36	nse	0.17
GyA	2	20.00	F3	14.79
SAAM	0	0.00	WQI	69.03
Fosforo Total	0	0.00		
Coliformes fecales	0	0.00		
Nitrógeno Total	4	40.00		
pH	2	18.18		
OD	0	0.00		

Tabla 19. Río Tunjuelo WQI – Tramo II

En el tramo III, se encuentran los puntos de monitoreo [Doña Juana, Barrio México, San Benito y Makro Autopista Sur]. Como resultado del proceso de detección de datos atípicos se determinaron como datos validados un total de 225, de los de los cuales el 12 % [26 datos] no alcanzaron los OC. De igual manera, 7 de los 10 determinantes no cumplieron con los OC. Ver tabla 20.

Es así como en el caso del punto Doña Juana, 4 de los 10 determinantes evaluados (SST, pH, N_{TOTAL} y DQO) incumplieron los objetivos siendo el más crítico los SST [66.67 % de incumplimiento].

Por otra parte, en el caso de los puntos San Benito y Makro Autopista Sur la relación del número de determinantes que incumplieron los objetivos es 3/10 y 1/10 respectivamente. La diferencia fue marcada por el determinante Coliformes Fecales que sólo presentó incumplimiento en el punto Makro Autopista Sur.

Por lo anterior, la clasificación del indicador WQI para el periodo analizado continúa siendo **Marginal** como ocurrió para el periodo 2015-2016 con una mejoría de 12 puntos. Comparativamente, la clasificación reportada para el periodo 2014-2015 fue **Pobre**.

DETERMINANTE DE LA CALIDAD	NO. DATOS QUE NO CUMPLEN EL OC	% DE DATOS QUE NO CUMPLEN EL OC	VARIABLES	VALOR
DBO ₅	0	0.00	F1	70.00
DQO	1	4.55	F2	11.60
SST	4	18.18	nse	0.08
GyA	3	14.29	F3	7.36
SAAM	0	0.00	WQI	58.82
Fosforo Total	0	0.00		
Coliformes fecales	1	4.76		
Nitrógeno Total	5	22.73		
pH	2	8.33		
OD	10	43.48		

Tabla 20. Río Tunjuelo WQI – Tramo III

En el tramo IV del río Tunjuelo, la calidad del río mejoró de **Pobre** a **Marginal** con respecto a la reportada en el periodo 2015-2016, con un incremento en el valor del indicador de nueve unidades.

Este tramo está conformado por cuatro puntos de monitoreo [Makro Autopista Sur, Transversal 86, Puente Independencia e Isla Ponto San José]. De los datos analizados en la detección de atípicos se determinó que 220 eran datos validados, y de estos 26 datos [12 %] excedieron los OC (ver Tabla 21 y Figura 16). En este tramo, los coliformes fecales aumentaron considerablemente respecto a los tramos anteriores con un 43% de los datos por encima del OC, esto debido a las descargas de tipo doméstico que se realizan en este último tramo como es el caso del Interceptor Tunjuelo Medio y de

las estaciones elevadoras. Otros determinantes que influyeron en la clasificación del WQI fueron OD [18% de incumplimiento], Grasas y Aceites [22% incumplimiento] y Nitrógeno Total [11% de incumplimiento]. Por otra parte, los determinantes de la calidad del agua que no presentaron incumplimiento fueron pH [0%] y Fósforo Total [0%], este último asociado al valor del OC 8 mg/L.

DETERMINANTE DE LA CALIDAD	NO. DATOS QUE NO CUMPLEN EL OC	% DE DATOS QUE NO CUMPLEN EL OC	VARIABLES	VALOR
DBO ₅	1	4.55	F1	80.00
DQO	2	9.52	F2	11.80
SST	2	9.09	nse	0.03
GyA	5	21.74	F3	3.31
SAAM	1	4.55	WQI	53.27
Fosforo Total	0	0.00		
Coliformes fecales	9	42.86		
Nitrógeno Total	2	9.52		
pH	0	0.00		
OD	4	18.18		

Tabla 21. Río Tunjuelo WQI – Tramo IV

El análisis gráfico de los datos obtenidos, Figura 16, revela que los determinantes SST y Grasas y Aceites incumplen los OC en todos los tramos. Por su parte, el pH, DBO₅, DQO y SAAM tiene un cumplimiento superior al 80%. El determinante PTotal es el único determinante que cumple el OC para todos los tramos.

Históricamente, la mayor parte río Tunjuelo en el periodo 2014-2015 reportó un WQI con una condición **Pobre**. Para el periodo 2015-2016 se presentó una mejora sustancial en los tramos I y II, cuya clasificación del WQI fue **Buena**. Además, el tramo III cambio de **Pobre** a **Marginal**.

Por el contrario, y para el lapso 2016-2017, la clasificación del WQI para el Tramo I se mantuvo en **Buena**, decae en el tramo II de **Buena** a **Aceptable**. Para el tramo III la clasificación se mantuvo en **Marginal** con un incremento en la magnitud de 12 puntos y para el tramo IV la clasificación mejoró en 9 unidades pasando de **Pobre** a **Marginal**, lo que no había ocurrido desde el periodo 2013-2014. Ver Figuras 17 y 18.



ALCALDÍA MAYOR
DE BOGOTÁ D.C.
SECRETARÍA DE AMBIENTE

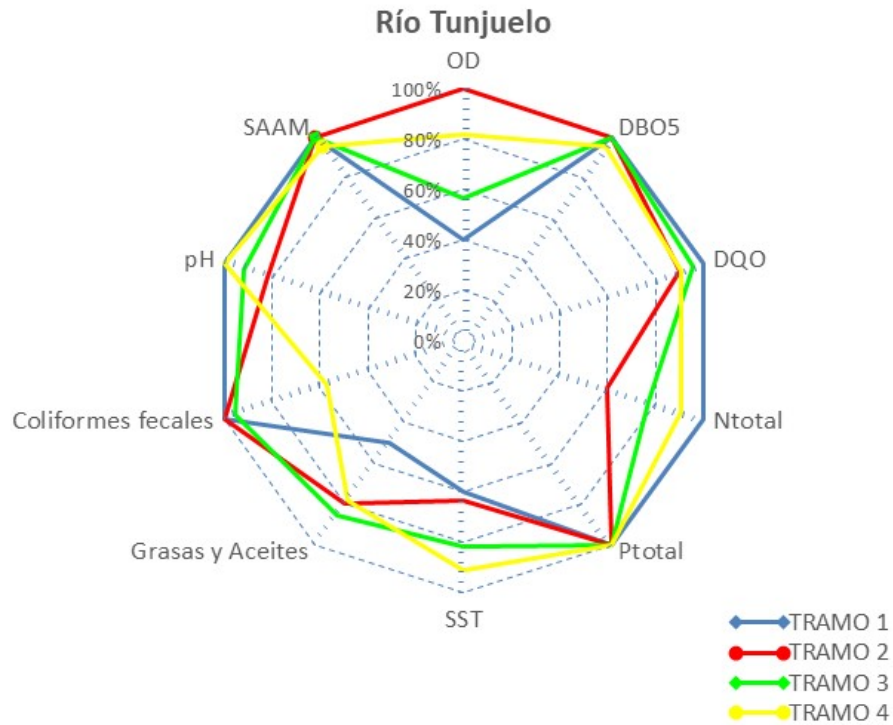


Figura 16. Porcentaje de cumplimiento de los OC por determinante de la calidad del agua y tramo del Río Tunjuelo



ALCALDÍA MAYOR
DE BOGOTÁ D.C.
SECRETARÍA DE AMBIENTE

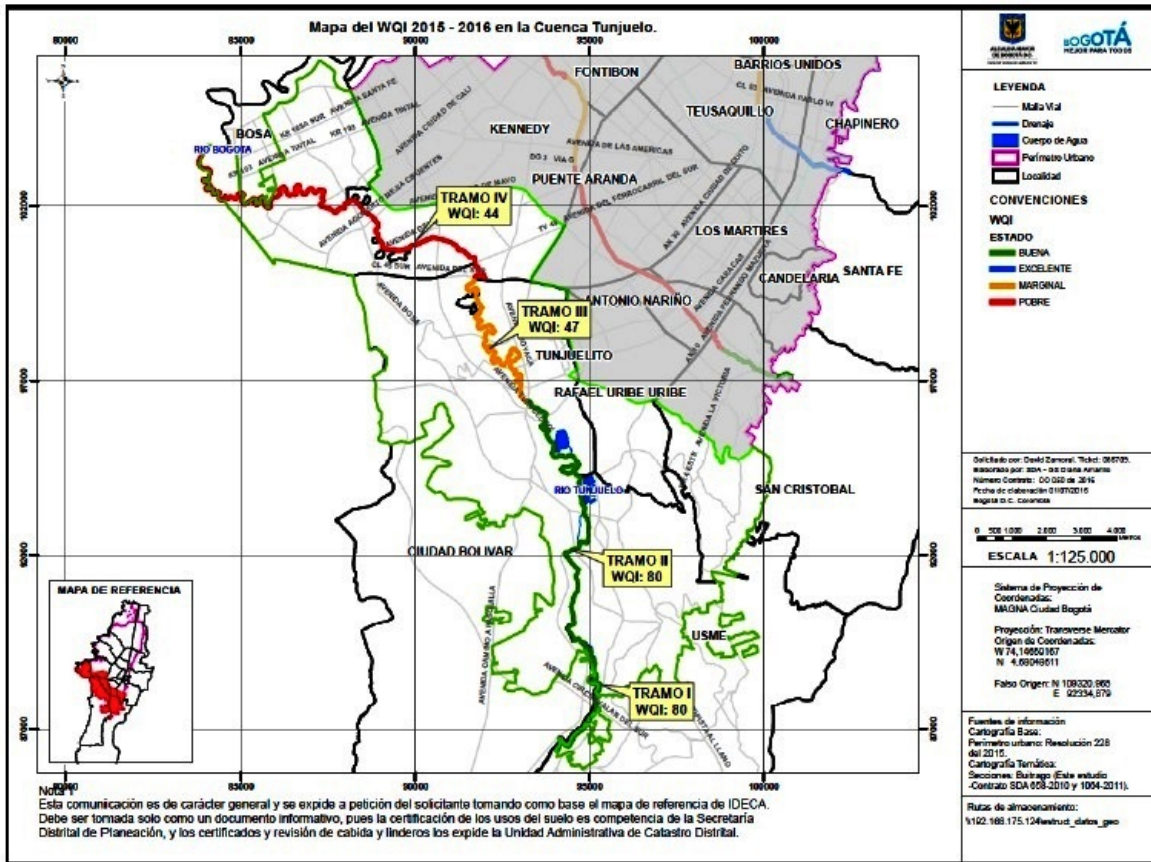


Figura 17. Mapa del índice de calidad hídrica (WQI) en el río Tunjuelo 2015-2016

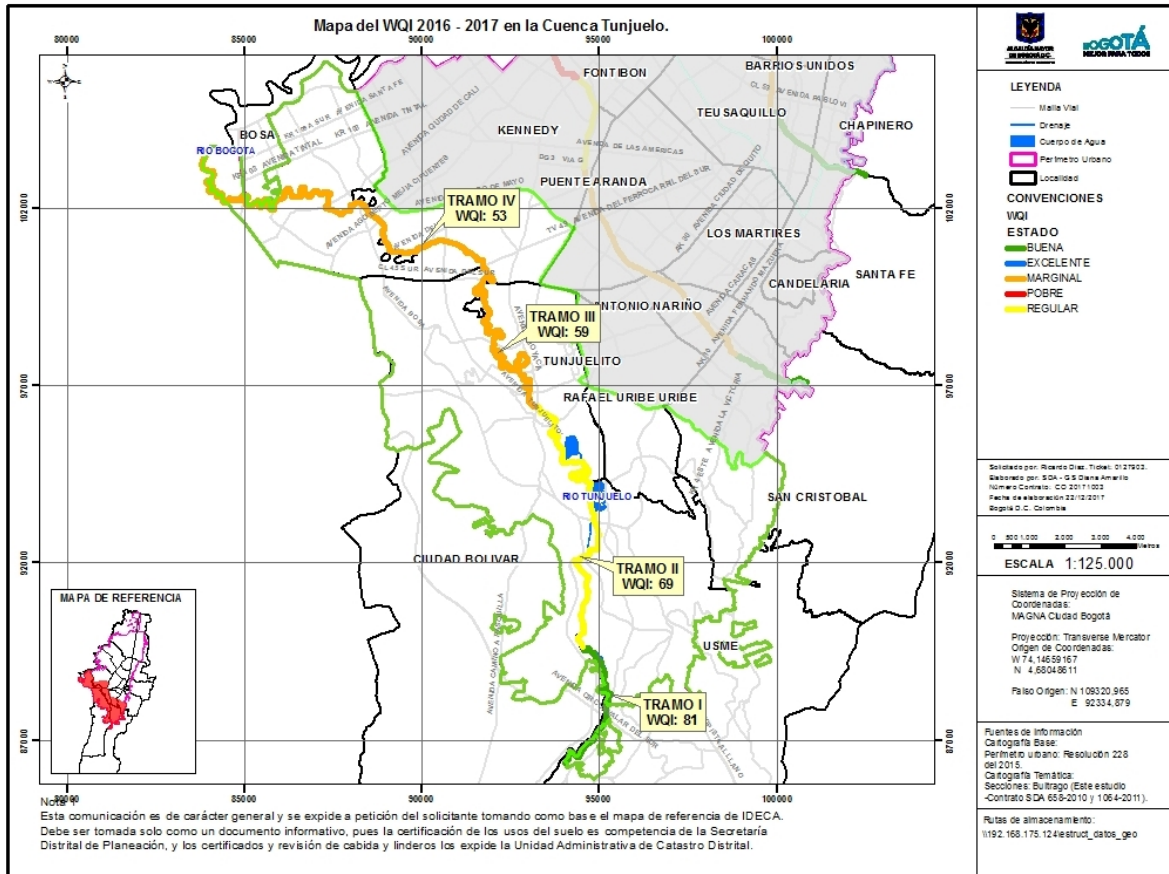


Figura 18. Mapa del índice de calidad hídrica (WQI) en el río Tunjuelo 2016-2017

3.5. EVOLUCIÓN DEL WQI EN EL PERIODO 2014 A 2017

A continuación, se realiza el análisis consolidado de resultados para los ríos Torca, Salitre, Fucha y Tunjuelo respectivamente. Véase la tabla 22 que muestra los valores consolidados del indicador WQI evaluado para los periodos 2014-2015, 2015-2016 y 2016-2017, así como su clasificación para cada uno los tramos que conforman los ríos de la RHCb.

Río Torca

El tramo I del río Torca presentó un aumento en su calidad pasando de 88 en el periodo 2015-2016 a 100 en el periodo evaluado 2016-2017 con un aumento en el indicador de 12 puntos. Desde el año 2014 al año 2016 la calidad de este tramo se mantuvo en Buena. Por otra parte, la calidad del agua en el tramo II se mantuvo igual al periodo 2015-2016 pero con un incremento en la magnitud del indicador en 6 puntos.

Río Salitre

Los tramos I y II presentaron los cambios más significativos tanto en el valor del indicador como en su clasificación, debido a una disminución en el cumplimiento de los OC. Lo anterior se vio reflejado en una disminución del 13% en el tramo I y del 6% para el tramo II del valor WQI en el periodo 2016-2017, lo que a su vez afectó la clasificación, ya que en el tramo I y II cambiaron de Excelente a Buena en el periodo 2016-2017. El tramo III por su parte, mantuvo constante el valor del WQI durante los periodos analizados clasificando el indicador en la categoría de Marginal con un incremento de 6 puntos. Finalmente, el tramo IV mejoró el valor del WQI pasando de 37 a 52 puntos en el periodo 2016-2017 y por ende cambiando su clasificación de Pobre a Marginal.

Río Fucha

Al igual que en el tramo II del río Torca, en el tramo I del río Fucha se mantuvo la clasificación Buena, pero con un aumento de 6 puntos del valor del WQI. El tramo II mejoró la clasificación en 12 puntos pasando de Pobre a Marginal. El tramo III por otra parte, también mejoró la magnitud del indicador en 17 puntos, pasando de Marginal a Aceptable. El Tramo IV aún mantiene la clasificación del WQI en Pobre desde el periodo 2014-2015 e incluso con una reducción de 1 punto en el valor del indicador 2016-2017 respecto al periodo 2015-2016. Cabe resaltar que los valores y clasificación del WQI se han venido presentado en periodos anteriores a los aquí evaluados, y que están asociados principalmente a la problemática de puntos de vertimiento de aguas residuales que tiene sobre el río la EAB-ESP.

Río Tunjuelo

Este río fue, al igual que el periodo 2015-2016, fue el que presentó los cambios más significativos en su calidad del agua para el periodo 2016-2017. Los cambios más importantes se dieron en el tramo II y IV ya que al comparar los resultados con el periodo 2015-2016, se evidencia una disminución en el cumplimiento de los OC en el Tramo II los cuales pasaron de Buena a Aceptable con una reducción de 11 puntos para el tramo II y una mejoría en la clasificación del WQI en el tramo IV que mejoró de Pobre a Marginal con un incremento de 9 puntos con respecto al periodo 2015-2016. La calidad del tramo I se mantuvo igual con una disminución de 6 puntos mientras que el Tramo III mejoró en 12 puntos en el periodo 2016-2017, aunque su clasificación se mantiene en la categoría de Marginal.

TRAMO	2014-2015		2015-2016		2016-2017	
	VALOR WQI	CLASIFICACIÓN WQI	VALOR WQI	CLASIFICACIÓN WQI	VALOR WQI	CLASIFICACIÓN WQI
RÍO TORCA						
I	94	BUENA	88	BUENA	100	EXCELENTE
II	75	ACEPTABLE	82	BUENA	88	BUENA
RÍO SALITRE						
I	83	BUENA	100	EXCELENTE	87	BUENA
II	88	BUENA	100	EXCELENTE	94	BUENA
III	45	MARGINAL	47	MARGINAL	53	MARGINAL
IV	37	POBRE	37	POBRE	52	MARGINAL
RÍO FUCHA						
I	94	BUENA	82	BUENA	88	BUENA
II	29	POBRE	36	POBRE	48	MARGINAL
III	44	POBRE	59	MARGINAL	76	ACEPTABLE
IV	32	POBRE	44	POBRE	43	POBRE
RÍO TUNJUELO						
I	69	ACEPTABLE	87	BUENA	81	BUENA
II	40	POBRE	80	BUENA	69	ACEPTABLE
III	33	POBRE	47	MARGINAL	59	MARGINAL
IV	40	POBRE	44	POBRE	53	MARGINAL

Tabla 22. Comparación WQI anual dinámico entre los periodos 2013-2014, 2014-2015, 2015-2016 Y 2016-2017

3.6. EVOLUCIÓN TEMPORAL DE LA LONGITUD DE LOS RÍOS CLASIFICADA SEGÚN EL WQI

Es importante determinar la longitud del territorio de los ríos que presentan condiciones iguales o superiores a un estado **Aceptable** (≥ 65) según la evolución del WQI en la RCHB para los ríos Torca, Salitre, Fucha y Tunjuelo. Además, dentro de las metas del *Plan de Desarrollo Económico, Social, Ambiental y de Obras Públicas para Bogotá D.C. 2016-2020 "Bogotá Mejor Para todos"* (Acuerdo No. 645 de fecha de publicación y vigencia 9 de junio de 2016), el concejo de la ciudad, en uso de sus atribuciones constitucionales y legales, establece que **30,12km de los ríos urbanos** de la RCHB deben presentar un índice de calidad hídrica (WQI) Aceptable o superior para el año 2020.

En la Figura 19 se presenta la evolución temporal de la cantidad de longitud de los ríos clasificada según la categoría de su índice de calidad hídrica desde el periodo 2014-2015 al periodo evaluado 2016-2017.

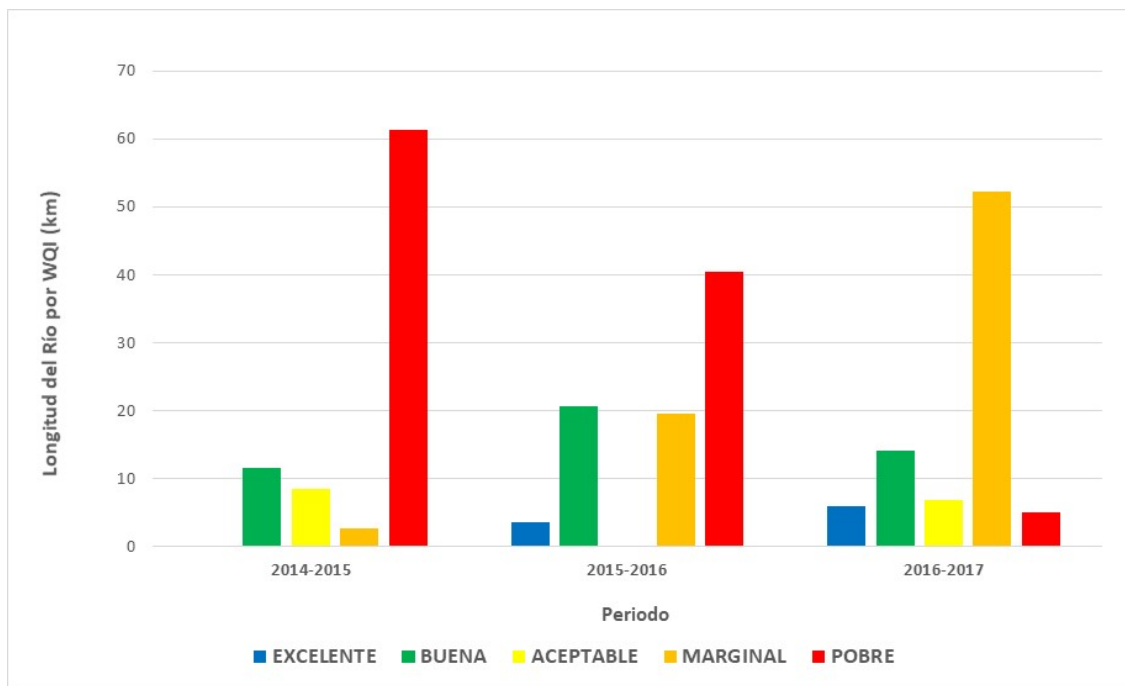


Figura 19. Evolución temporal desde el año 2014 al año 2017 del Indicador de Ciudad.

En la Figura 19, se evidencia que la cantidad de kilómetros río con valores de WQI superiores o iguales a 65 unidades han sido superiores con respecto a la línea base, y que en general la calidad del agua ha presentado una tendencia a la mejora.

En la Tabla 23 se presenta la evolución temporal de la cantidad de longitud de los ríos clasificada según la categoría de su índice de calidad hídrica. Al comparar los periodos evaluados es evidente que desde el año 2014 al año 2017 se ha venido consolidando y manteniendo la calidad del agua en la mayoría de los tramos de los ríos principales, uno de los cambios más significativos se observa en la disminución del número de kilómetros de río con calidad **Pobre** que pasó de 61.427 a 5.026 kilómetros con un WQI inferior a 45.

INDICE DE CALIDAD	LONG. DE LOS RÍOS [M] CLASIFICADA POR WQI 2014 - 2017		
	2014-2015	2015-2016	2016-2017
EXCELENTE	0	3618.4	5956
BUENA	11550.9	20595.5	14159.2
ACEPTABLE	8564.3	0	6836.3
MARGINAL	2698.5	19594	52262.9
POBRE	61427.1	40432.9	5026.4

Tabla 23. Longitud de los ríos de la RCHB clasificadas por WQI desde 2014 a 2017

Con respecto a la meta de 30.12 km de ríos urbanos con índice de calidad hídrica WQI ≥ 65 , se evidencia que, para el periodo evaluado se presenta un valor de 26.952 km. Al comparar contra el valor del periodo 2014-2015 se puede determinar que en los últimos dos años la calidad del recurso hídrico de la ciudad de Bogotá evidencia una tendencia a la mejora, representada en el incremento en los kilómetros con clasificación igual o superior a **Aceptable** (Ver Tabla 23 y Figura 20).

META PLAN DE DESARROLLO 2016-2020	DESCRIPCION DEL INDICADOR	MAGNITUD 2016-2020	SEGUIMIENTO	
			2015-2016	2016-2017
30.12 Km de río urbano con índice de calidad hídrica WQI ≥ 65	Número de km. de ríos urbanos con índice de calidad hídrica aceptable o superior	30.12 km	24.21 km	26.96 km

Tabla 24. Seguimiento resultados del indicador de Ciudad (Plan de Desarrollo 2016-2020)

El avance en el Número de kilómetros de ríos adicionales en el área urbana del Distrito con índice de calidad hídrica igual o superior a aceptable es de 6.84 km, que representa cerca del 70 % del avance en el cumplimiento de la meta de del plan de desarrollo Bogotá Mejor Para todos.

Ahora bien, con respecto al indicador asociado con el incremento de los 20,12 km de río en el área urbana que contaban con calidad aceptable o superior (WQI >65) en el período 2014-2015, a buena o superior (WQI >80), se determina que para el período objeto de análisis (2016-2017) se presenta un cumplimiento del 100 % del indicador por cuanto el Número de kilómetros de ríos en el área urbana del Distrito con índice de calidad de agua buena o superior fue de 20.12 km.

META PLAN DE DESARROLLO 2016-2020	DESCRIPCION DEL INDICADOR	MAGNITUD 2016-2020	SEGUIMIENTO	
			2015-2016	2016-2017
20.12 Km de río urbano con índice de calidad hídrica WQI ≥ 80	Número de km. de ríos urbanos con índice de calidad hídrica buena o superior	20.12 km	24.21 km	20.12 km

Tabla 25. Seguimiento resultados del indicador de Ciudad (Plan de Desarrollo 2016-2020)

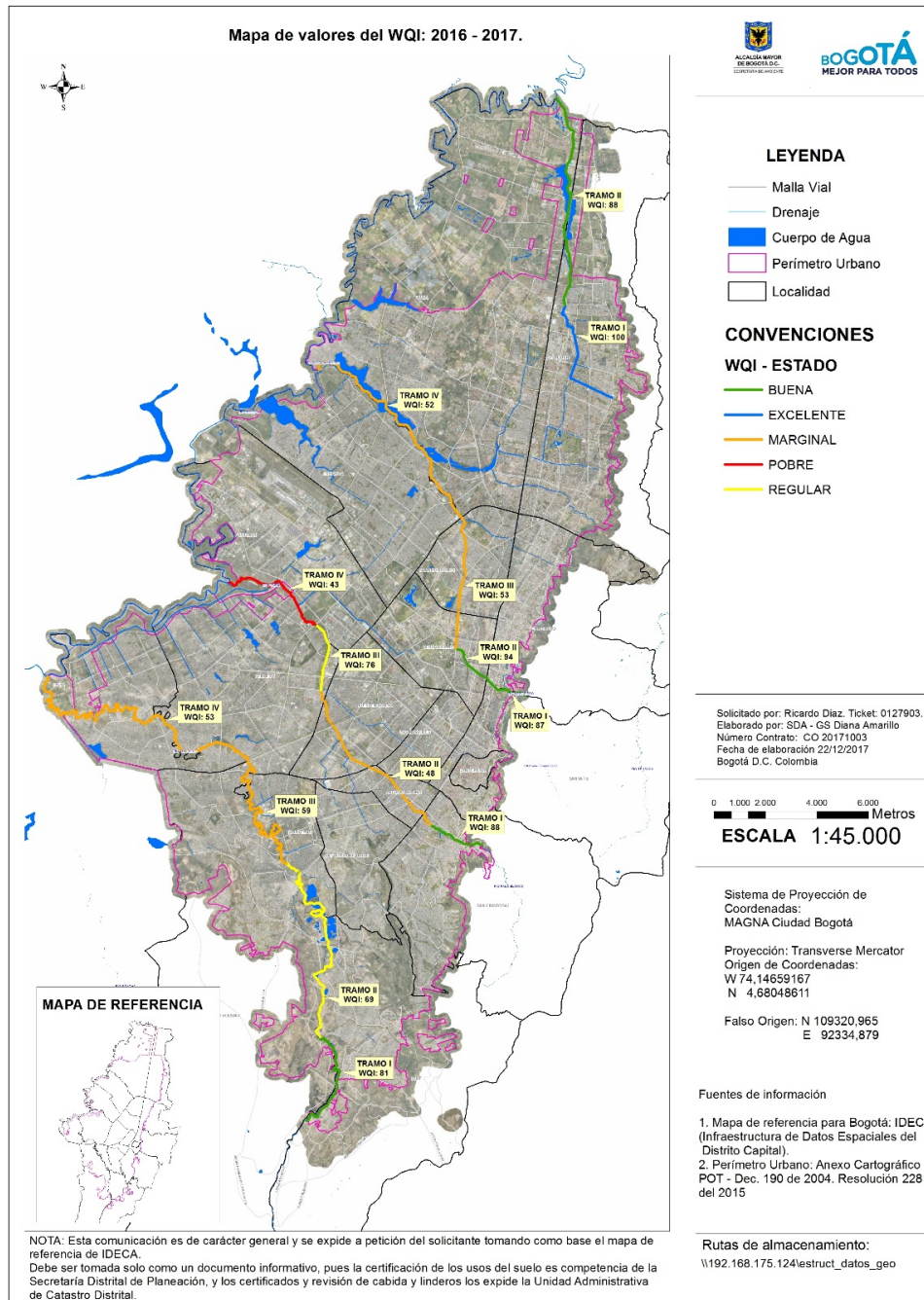


Figura 19. Mapa del índice de calidad hídrica (WQI) en los principales ríos de la ciudad para el periodo 2016-2017

4. CONCLUSIONES

La calidad del recurso hídrico superficial guarda relación con las actividades antrópicas que se adelantan en el territorio por donde transcurren y localizan los principales ríos de la ciudad. Esta relación se aprecia particularmente en los cuerpos hídricos de la ciudad de Bogotá (humedales, quebradas, canales y principalmente en los ríos Torca, Salitre, Fucha y Tunjuelo) dado que estos se encuentran inmersos y presionados por un entorno urbano y periurbano.

En general, la calidad del río Torca para el tramo I pasó de Buena a Excelente en el lapso 2016-2017 debido a que no se encontraron determinantes que no alcanzaran los OC en comparación al periodo inmediatamente anterior. Con respecto al tramo II se determinó que como determinantes críticos fueron Oxígeno disuelto y Grasas y Aceites. Si bien el WQI para el tramo II para los periodos 2015-2016 y 2016-2017 se mantiene en Bueno con respecto al periodo 2014-2015 que era Aceptable, el deterioro de la calidad del agua continúa siendo afectada principalmente por las descargas de aguas residuales domésticas generadas por la problemática de conexiones erradas presentes en el área aferente al canal y en menor proporción a la inexistencia de un sistema de alcantarillado para la parte baja de la cuenca (desde Jardines de Paz hasta La desembocadura al río Bogotá).

Con respecto al río Salitre, la variación en la calidad del río se dio a partir del primer tramo y se mantuvo durante el segundo tramo en donde la clasificación pasó de Excelente a Buena y el valor del WQI disminuyó en un 13 % para el tramo I y en el 6 % para el tramo II en el periodo 2016-2017. En el tramo III del río Salitre los determinantes que presentaron una mayor frecuencia fueron Nitrógeno Total, Grasas y Aceites y Coliformes Fecales. La calidad del agua en este tramo se mantuvo y se ha mantenido en Marginal desde el lapso 2014-2015; en el tramo III el alto porcentaje de datos Coliformes fecales que excedió el objetivo muestran la afectación de las descargas de aguas residuales domésticas provenientes de las estructuras de alivio del sistema de alcantarillado combinado localizadas en este tramo del río. Por su parte, las dos variables que más incidieron en la excursión fueron Grasas y Aceites y Oxígeno Disuelto, cuyos registros fueron muy distantes a los valores establecidos como objetivo.

Por último, el tramo IV del río Salitre los determinantes que con más frecuencia superaron los OC fueron Coliformes Fecales y Grasas y Aceites. Al igual que el tramo III la variable F1 del WQI presentó el mismo valor en el tramo IV, pero la frecuencia (F2) y la amplitud con la cual se incumplieron los OC

fueron superiores. El WQI en el tramo IV mostró una calidad del agua **Marginal** que se explica por la recurrencia de los coliformes fecales en exceder los objetivos asociadas a las descargas de aguas residuales domésticas. Comparando con el periodo 2015-2016 este tramo mostro mejoría cuyo valor de WQI fue **Pobre** con un valor de 37, que fue igual al valor de WQI reportado para el periodo 2014-2015.

Respecto al río Fucha, la calidad del agua del primer tramo se mantuvo en **Buena**, lo cual está asociado al incumplimiento de los objetivos de los determinantes calidad GyA y OD. La magnitud por la cual las concentraciones de OD incumplieron no están muy alejadas del objetivo, y por tanto su aporte a la excursión es mínimo, sin embargo, en el caso de las de Grasas y Aceites la amplitud es mucho mayor al objetivo siendo este determinante el que más aportó en la excusión. Dado lo anterior, se puede decir que el punto El Delirio mejoró en un 7% su calificación respecto a la reportada para el periodo 2015-2016 pero mantuvo su clasificación.

Pese a contar con tan buena calidad en la cabecera del río, las condiciones cambian dramáticamente desde el punto Carrera 7ª debido principalmente a la descarga de vertimientos, en su mayoría, de aguas residuales domésticas provenientes de las estructuras de alivio del sistema de alcantarillado combinado de la ciudad. La magnitud, en general, de las concentraciones de los determinantes de la calidad que incumplieron los objetivos fueron significativos, tal como lo evidencia el factor de excursión y la variable F3. No obstante, este tramo mejoró su clasificación a **Marginal** con respecto al periodo anterior (2015-2016) que fue clasificada como **Pobre**.

Por su parte para el tramo III se presenta, para todos los determinantes de la calidad un menor porcentaje de incumplimiento respecto al Tramo II. Se resalta además que los determinantes que más influenciaron en el resultado del WQI fueron Coliformes Fecales, Grasas y Aceites y Nitrógeno Total. La clasificación del tramo pasó de **Marginal** a **Aceptable** respecto al periodo 2015-2016 cuyo valor del WQI mejoró en un 22%.

Ahora bien, para el Tramo IV el 40% del conjunto de datos analizados no alcanzaron los OC respecto al periodo 2015-2016, siendo el determinante pH el único del tramo IV que cumplió los OC la calidad de este tramo se mantiene en **Pobre** con respecto al periodo 2015-2016.

En cuanto a la calidad del río Tunjuelo se determinó que la calidad del agua en el tramo I permaneció igual, ya que mantuvo la clasificación en **Buena** asociada con la regulación del caudal que se

presentan en el por la operación del embalse La Regadera, ejecutada por la EAB-ESP. Los determinantes de la calidad más críticos en el incumplimiento de los objetivos en este tramo fueron el OD, GyA, y SST.

Con respecto al Tramo II cambia su clasificación de Buena a Aceptable, los determinantes de la calidad del agua que más pesaron por su incumplimiento en el WQI fueron Nitrógeno Total, SST y Grasas y Aceites, asociados con el conjunto de datos del punto de monitoreo Doña Juana, por lo que se puede establecer que este punto continúa siendo crítico en la determinación de la calidad del agua del río Tunjuelo.

En el tramo III y como se evidenció en el punto Doña Juana, 3 de los 10 determinantes evaluados (SST, N_{TOTAL} y DQO) incumplieron los objetivos siendo el más crítico los SST. En el caso de los puntos San Benito y Makro Autopista Sur de este tramo, la relación del número de determinantes que incumplieron los objetivos fue 4/10 y 1/10 respectivamente. La diferencia fue marcada por el determinante Coliformes Fecales que sólo presentó incumplimiento en el punto Makro Autopista Sur, lo que influyó para que, en el periodo analizado, la clasificación, presentará una mejoría de 12 puntos, no obstante continúa siendo Marginal como ocurrió en el periodo 2015-2016.

En el último tramo del río Tunjuelo la calidad del río mejoró de Pobre a Marginal con respecto a la reportada en el periodo 2015-2016, con un incremento en el valor del indicador de nueve unidades. En este tramo, los coliformes fecales aumentaron considerablemente respecto a los tramos altos con un 43% de los datos por encima del OC, esto debido a las descargas de tipo doméstico que se realizan en este último tramo como es el caso del Interceptor Tunjuelo Medio y de las estaciones elevadoras. Otros determinantes que influyeron en la clasificación del WQI fueron OD [18% de incumplimiento], Grasas y Aceites [22% incumplimiento] y Nitrógeno Total [11% de incumplimiento].

Para el lapso 2016-2017, el río Tunjuelo fue, al igual que el periodo 2015-2016, fue el que presentó los cambios más significativos en su calidad del agua para el periodo 2016-2017, pues la clasificación del WQI para el Tramo I se mantuvo en Buena. Para el tramo III la clasificación se mantuvo en Marginal con un incremento en la magnitud de 12 puntos y para el tramo IV la clasificación mejoró en 9 unidades pasando de Pobre a Marginal, lo que no había ocurrido desde el periodo 2013-2014.

5. REFERENCIAS

- Acuerdo No. 645 del 9 de junio de 2016. *Plan de Desarrollo Económico, Social, Ambiental y de Obras Públicas para Bogotá D.C. 2016-2020 "Bogotá Mejor Para todos"*. Concejo de Bogotá.
- Calidad del sistema hídrico de Bogotá (CSHB), 2008. Primera Edición. Bogotá: Editorial Pontificia Universidad Javeriana: Alcaldía Mayor de Bogotá, Secretaría Distrital de Ambiente: Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá.
- Chen M. S., Han J., y Yu P.S. (1996). "Data mining: an overview from a database perspective", IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering.
- Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá-ESP (EAAB-ESP), 2006. PLAN MAESTRO DE ACUEDUCTO Y ALCANTARILLADO (Documento Técnico Soporte). Agosto, Bogotá D.C., Colombia.
- Fayyad, U., Piatetsky-Shapiro, G., y Smyth, P. (1996) "Knowledge discovery and data mining: Towards a unifying framework" in Discovery and Data Mining. Portland, OR, Proc. 2nd Int. Conf. on Knowledge Discovery and Data Mining, 82–88.
- Grupo de Recurso Hídrico Superficial (GRHS), 2017. Subdirección de Recurso Hídrico y del Suelo, Secretaría Distrital de Ambiente. Bogotá D.C., Colombia.
- Iglewicz B., and Hoaglin D. (1993). How to detect and handle outliers. ASQC Quality Press.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible-MADS, 2014. Guía Técnica para la Formulación de los Planes de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas-POMCAS. Bogotá, Colombia.
- Observatorio Ambiental de Bogotá (OAB), 2017. Portal Web de la Secretaría Distrital de Ambiente [en línea]. Consulta 30 de noviembre de 2017. Disponible en <http://www.oab.ambientebogota.gov.co/>.
- Seo, S. (2006) A review and comparison of methods for detecting *outliers* in univariate data sets.
- Acuña, E. y Rodríguez, C. (2004). On Detection Of *Outliers* And Their Effect In Supervised Classification.



ALCALDÍA MAYOR
DE BOGOTÁ D.C.
SECRETARÍA DE AMBIENTE

JULIO CESAR PINZON REYES
SUBDIRECCIÓN DE RECURSO HIDRICO Y DEL SUELO

Elaboró:

RICARDO DÍAZ PEÑA	C.C: 79527621	T.P: N/A	CPS: 20171029 DE 2017	CONTRATO	FECHA EJECUCION:	29/12/2017
-------------------	---------------	----------	-----------------------	----------	------------------	------------

Revisó:

DAVID FELIPE PEREZ SERNA	C.C: 80073805	T.P: N/A	CPS: 20170474 DE 2017	CONTRATO	FECHA EJECUCION:	29/12/2017
--------------------------	---------------	----------	-----------------------	----------	------------------	------------

Aprobó:

Firmó:

JULIO CESAR PINZON REYES	C.C: 79578511	T.P: N/A	CPS: FUNCIONARIO	FECHA EJECUCION:	29/12/2017
--------------------------	---------------	----------	------------------	------------------	------------