

SECRETARIA DISTRITAL DE AMBIENTE

Informe Tecnico No. 02178, 30 de diciembre del 2020

ÍNDICE DE CALIDAD DEL AGUA, WQI, EN LOS PUNTOS DE MONITOREO DE LA RED DE CALIDAD DE HÍDRICA DE BOGOTÁ-TRADICIONAL PARA AÑO EL 2020



El Delirio, Río Fucha

2020

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

**INFORME TÉCNICO: ÍNDICE DE CALIDAD DEL AGUA, WQI, EN LOS PUNTOS DE
MONITOREO DE LA RED DE CALIDAD DE HÍDRICA DE BOGOTÁ-TRADICIONAL
PARA AÑO 2020**

ELABORÓ:

ANA LUCÍA ZORRO GÓMEZ
Profesional Técnico de Apoyo

JORGE GARZÓN CASTRO
Profesional Técnico de Apoyo

DAVID ZAMORA
Profesional Técnico de Apoyo

REVISÓ

DAVID FELIPE PÉREZ SERNA
Grupo Recurso Hídrico Superficial

APROBÓ

REINALDO GELVEZ GUTIÉRREZ
Subdirector del Recurso Hídrico y del Suelo

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	8
1 MATERIALES Y MÉTODOS	10
1.1 MONITOREOS DE LA CALIDAD Y CANTIDAD DEL AGUA EN LOS PUNTOS DE LA RCHB	10
1.2 METODOLOGÍA PARA VALIDACIÓN ESTADÍSTICA DE LOS DATOS	12
1.2.1 FORMA DE IMPLEMENTAR EL BOXPLOT EN LOS DATOS DE LA RCHB	14
1.3 PROCESO DE PARA DETERMINAR EL ÍNDICE DE CALIDAD HÍDRICA – WQI	16
2 RESULTADOS	23
2.1 RÍO TORCA	23
2.2 RÍO SALITRE	29
2.3 RÍO FUCHA	35
2.4 RÍO TUNJUELO	41
2.5 EVOLUCIÓN DEL WQI EN EL PERIODO 2014 A 2020	48
3 CONCLUSIONES	53
4 REFERENCIAS	56

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
EAAB-ESP	Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá - Empresa de Servicios Públicos
EUA	Estados Unidos de América
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura)
IDEAM	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia
L/s	Litros por segundo
NT - NTotal	Nitrógeno Total (NT Kjeldahl + NO ₃ + NO ₂)
OC	Objetivos de Calidad
OD	Oxígeno Disuelto
OECD	Organization for Economic Co-operation and Development (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
PT - PTotal	Fósforo Total
RCHB	Red de Calidad Hídrica de Bogotá
RCHB-T	Red de Calidad Hídrica de Bogotá Tradicional
RCHB-A	Red de Calidad Hídrica de Bogotá Ampliada

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Red de Calidad Hídrica de Bogotá – Tradicional, conformada por 30 puntos de monitoreo	11
Figura 2- Boxplot o diagrama de caja	14
Figura 3. Cantidad de datos validados y datos que no cumplieron (barras achuradas) con los objetivos de calidad en los tramos del río Torca	24
Figura 4. Porcentaje de cumplimiento de los objetivos de calidad por determinante de la calidad del agua y tramo del río Torca.....	27
Figura 5. Mapa del índice de calidad hídrica (WQI) en el río Torca.....	28
Figura 6. Cantidad de datos validados y datos que no cumplieron (barras achuradas) con los objetivos de calidad en los tramos del río Salitre.....	29
Figura 7. Porcentaje de cumplimiento de los objetivos de calidad por determinante de la calidad del agua y tramo del río Salitre	33
8. Mapa del índice de calidad hídrica (WQI) en el río Salitre	34
Figura 9. Cantidad de datos validados y datos que no cumplieron con los objetivos de calidad en los tramos del río Fucha	35
Figura 10. Porcentaje de cumplimiento de los objetivos de calidad por determinante de la calidad del agua y tramo del río Fucha	39
Figura 11. Mapa del índice de calidad hídrica (WQI) en el río Fucha	40
Figura 12. Cantidad de datos validados y datos que no cumplieron con los objetivos de calidad en los tramos del río Tunjuelo.....	42
Figura 13. Porcentaje de cumplimiento de los objetivos de calidad por determinante de la calidad del agua y tramo del río Tunjuelo	46
Figura 14. Mapa del índice de calidad hídrica (WQI) en el río Tunjuelo.....	47
Figura 15. Mapa del índice de calidad hídrica (WQI) de los principales ríos de la Ciudad	50
Figura 16. Evolución temporal de ríos urbanos por categoría de calidad de agua	51
Figura 17. Evolución temporal del Indicador: kilómetros e ríos urbanos con calidad de agua en categoría aceptable, buena o excelente $WQI \geq 65$	52



SECRETARÍA DE
AMBIENTE

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Clasificación de los determinantes de la calidad del agua medidos <i>in situ</i> y en laboratorio	9
Tabla 2. División de los tramos de los ríos de Bogotá, (Resolución 5731 de 2008)	16
Tabla 3. OC a cuatro años para los tramos del canal Torca y Salitre (Resolución 5731 de 2008)	17
Tabla 4. OC a cuatro años para los tramos del río Fucha y río Tunjuelo (Resolución 5731 de 2008)	18
Tabla 5. Categorización, clasificación y caracterización de los rangos del WQI	20
Tabla 6. Río Torca WQI – Tramo I	24
Tabla 7. Río Torca WQI – Tramo II	25
Tabla 8. Río Salitre WQI – Tramo I	29
Tabla 9. Río Salitre WQI – Tramo II	30
Tabla 10. Río Salitre WQI – Tramo III	30
Tabla 11. Río Salitre WQI – Tramo IV	31
Tabla 12. Río Fucha WQI – Tramo I	35
Tabla 13. Río Fucha WQI – Tramo II	36
Tabla 14. Río Fucha WQI – Tramo III	36
Tabla 15. Río Fucha WQI – Tramo IV	37
Tabla 16. Río Tunjuelo WQI – Tramo I	41
Tabla 17. Río Tunjuelo WQI – Tramo II	42
Tabla 18. Río Tunjuelo WQI – Tramo III	44
Tabla 19. Río Tunjuelo WQI – Tramo IV	44
Tabla 20. Longitud de los ríos de la RCHB clasificadas por WQI desde 2014 a 2020	48

INTRODUCCIÓN

Las corrientes hídricas de la ciudad, ríos urbanos como Tunjuelo, Fucha, Salitre y Torca - están afectados por la presión que sobre ellos se ejerce, pues durante décadas han recibido las descargas de las aguas residuales de quienes habitan el Distrito Capital., actualmente 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 opera la Red de Calidad Hídrica de Bogotá Tradicional (RCHB-T), esta es una herramienta que monitorea la calidad del agua en treinta (30) estaciones o puntos ubicadas en los ríos a lo largo de su recorrido (desde la parte alta a sus desembocaduras en el río Bogotá), caracterizando por medio de determinantes de la calidad físicos, químicos y microbiológicos.

El desarrollo de la RCHB-T ha permitido evidenciar una mejora en la calidad del recurso hídrico de la ciudad, la cual es producto, entre otras, de las actividades de control, evaluación y seguimiento que adelanta la Subdirección del Recurso Hídrico y del Suelo, se puede destacar que el río Torca es el que se ubica en una mejor categoría respecto a los demás y que los tramos 4 de los ríos Salitre, Fucha y Tunjuelo son los que presentan a lo largo de los últimos periodos los valores más bajos de WQI, pero que en el último año han mejorado su calidad cambiando de una clasificación pobre a marginal.

En este orden de ideas, el presente informe técnico tiene por objeto evaluar los datos de la calidad del agua de los puntos de monitoreo de la RCHB para determinar el cumplimiento o no frente a



SECRETARÍA DE
AMBIENTE

los objetivos de calidad establecidos mediante la Resolución 5731 de 2008, para la vigencia establecida del año 2020.

Página 9 de 57

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



1 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-T, las cuales se adelantaron en el año 2020, el proceso de validación de los datos (detección de datos atípicos) y la metodología para calcular el índice de calidad hídrica (WQI).

1.1 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 de estos ríos.

Por lo tanto, en la ejecución de las campañas de monitoreo se han tomado muestras compuestas (por periodos de dos horas y alícuotas cada media hora), toma de datos de campo *in situ* y aforos de caudal (Tabla 1) en cada uno de los treinta puntos de monitoreo, que se encuentran distribuidas de la siguiente manera: río Torca: 4, río Salitre: 6, río Fucha: 8, río Tunjuelo: 10, y río Bogotá: 2 (Figura 1).

Monitoreo	Determinantes de la calidad del agua
Mediciones <i>in situ</i>	Caudal, pH, Temperatura, Conductividad y Oxígeno Disuelto.
En laboratorio	DBO5, DQO, SST, Coliformes Fecales, Grasas y Aceites, Ptotal, Ntotal (Kjeldahl, Nitratos, Nitritos) y Surfactantes Activos al Azul de Metileno (SAAM).

Tabla 1. Clasificación de los determinantes de la calidad del agua medidos *in situ* y en laboratorio

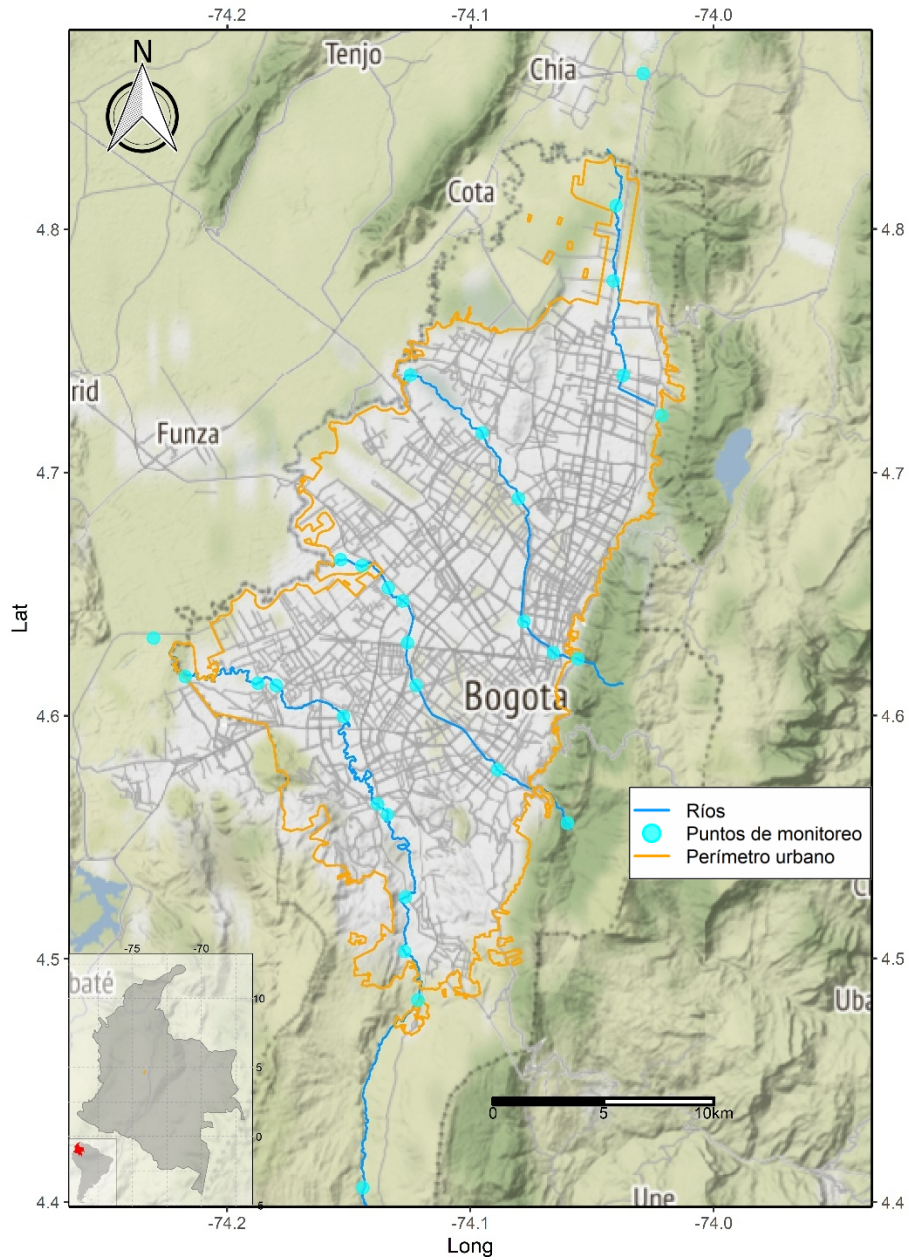


Figura 1. Red de Calidad Hídrica de Bogotá – Tradicional, conformada por 30 puntos de monitoreo

En el primer semestre de 2020, la Subdirección del Recurso Hídrico y del Suelo inició la Operación de la Red de Calidad Hídrica de Bogotá mediante la adición al Convenio Interadministrativo No. SDA-CD-20181468 con la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca, CAR y el Contrato de Prestación de Servicios No. SDA-SECOPII-712018 con el Instituto de Higiene Ambiental.

Las jornadas de monitoreo empezaron el 7 de enero de 2020. Sin embargo, se presentó un receso aproximado de cinco meses, desde el 14 de febrero hasta el 16 de junio, por factores externos asociados a la emergencia sanitaria declarada por el gobierno nacional a causa de la pandemia generada por el COVID-19, y sumado a esto la cuarentena obligatoria decretada por la Alcaldía de Bogotá. Una vez implementadas las medidas de seguridad sanitaria se reactivaron los monitoreos, finalizando el 24 de septiembre de 2020; así las cosas, en cada una de las estaciones de la RCHB-T se realizaron seis (6) caracterizaciones en ventanas bihorarias hasta completar 12 horas, con base en los resultados de estos monitoreos se desarrollan los cálculos y análisis del índice que se presentan en este informe.

1.2 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 *Boxplot*. 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).

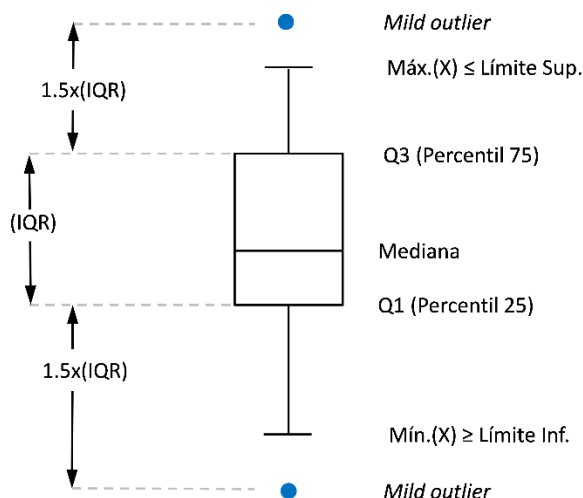


Figura 2- Boxplot o diagrama de caja

Un dato x se declara outlier si se encuentra fuera del intervalo $(Q_1 - 1.5 \times IQR, Q_3 + 1.5 \times IQR)$, donde Q_1 es el primer cuartil, Q_3 es el tercer cuartil e IQR recibe el nombre de rango intercuartil (en inglés *interquartil range*) calculado como $Q_3 - Q_1$ (Acuña y Rodríguez, 2004).

1.2.1 FORMA DE IMPLEMENTAR EL BOXPLOT EN LOS DATOS DE LA RCHB

La detección de posibles outliers en los conjuntos de datos de la calidad del agua de los puntos que conforman la RCHB, se realiza mediante el estadístico boxplot. El proceso de implementación varía levemente dependiendo si los datos son obtenidos en campo (*in situ*) o en el laboratorio (ver Tabla 1). A continuación, se explica procedimiento por cada conjunto de datos:

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 boxplot para determinar la presencia de outliers.
- Luego, los datos detectados como outliers en el 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 boxplot para determinar y eliminar los monitoreos catalogados como outliers. Los datos restantes (validados finales) serán empleados en el cálculo del WQI.

En 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.

1.3 PROCESO DE PARA DETERMINAR EL ÍNDICE DE CALIDAD HÍDRICA – WQI

La información consolidada de las jornadas de monitoreo de la RCHB es empleada para la construcción de indicadores de calidad del agua, en marcados dentro de los objetivos de calidad 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 objetivos de calidad de los próximos años están enfocados hacia la recuperación de estos (Resolución 5731 de 2008).

Por otro lado, para llevar a cabo la consolidación y análisis de datos se cuenta con una división de tramos determinados para cada río, realizada según el artículo 2 de la Resolución 5731 de 2008, como se describe en la Tabla 2. De conformidad con esta normatividad, no se involucran las corrientes de los afluentes que convergen a la corriente principal en el tramo descrito relacionado.

RÍO	TRAMO	LÍMITES	
		DESDE	HASTA
TORCA (TO)	1	Entrada perímetro urbano	Calle 183
	2	Calle 183	Desembocadura Canal Torca
SALITRE (SA)	1	Entrada perímetro urbano	Carrera 7ª
	2	Carrera 7ª	Carrera 30
	3	Carrera 30	Avenida 68
	4	Avenida 68	Desembocadura Río Juan Amarillo
FUCHA (FU)	1	Entrada perímetro urbano	Carrera 7ª
	2	Carrera 7ª	Desembocadura Canal Comuneros

RÍO	TRAMO	LÍMITES	
		DESDE	HASTA
	3	Desembocadura canal comuneros	Avenida Boyacá
	4	Avenida Boyacá	Desembocadura Río Fucha
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

Tabla 2. División de los tramos de los ríos de Bogotá, (Resolución 5731 de 2008)

Por otro lado, para llevar a cabo la consolidación y análisis de datos se cuenta con una división de tramos determinados para cada río conforme a lo establecido en el artículo 2 de la Resolución 5731 de 2008, como se describe en la Tabla 4. De conformidad con esta normatividad, no se involucran las corrientes de los afluentes que convergen a la corriente principal en el tramo descrito relacionado.

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 (OD), pH, Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅), Demanda Química de Oxígeno (DQO), Coliformes Fecales (CF), Grasas y Aceites (GyA), Sólidos Suspendido Totales (SST), Tensoactivos (SAAM), Nitritos (NO₂-), Nitratos (NO₃-), Kjeldahl, Nitrógeno Total (N_{total}) y Fósforo Total (P_{total}), los cuales fueron establecidos mediante la Resolución 5731 de 2008 a cuatro y diez años. En la Tabla 3 y Tabla 4 se presentan

los Objetivos de Calidad, OC, a cuatro años para los tramos que conforman los principales ríos de la Ciudad.

DETERMINANTE DE LA CALIDAD	UNIDAD	CANAL TORCA (TO)		RÍO SALITRE (SA)			
		TO-T1	TO-T2	SA-T1	SA-T2	SA-T3	SA-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	0.5	0.5
DBO ₅	mg/L	15	150	5	80	150	150
DQO	mg/L	50	300	35	200	350	350
SST	mg/L	20	150	10	80	150	150
GyA	mg/L	20	30	10	20	30	30
SAAM	mg/L	1	4	1	3	3	3
Ptotal	mg/L	1	6	1	6	6	6
CF	NMP/100 ml	1.0E+05	1.0E+06	1.0E+05	1.0E+06	1.0E+06	1.0E+06
Ntotal	mg/L	5	40	5	20	40	40

T1= Tramo I, T2= Tramo II, T3= Tramo III, T4= Tramo IV

Tabla 3. OC a cuatro años para los tramos del canal Torca y Salitre (Resolución 5731 de 2008)

DETERMINANTE DE LA CALIDAD	UNIDAD	RÍO FUCHA (FU)				RÍO TUNJUELO (TU)			
		FU-T1	FU-T2	FU-T3	FU-T4	TU-T1	TU-T2	TU-T3	TU-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

DETERMINANTE DE LA CALIDAD	UNIDAD	RÍO FUCHA (FU)				RÍO TUNJUELO (TU)			
		FU-T1	FU-T2	FU-T3	FU-T4	TU-T1	TU-T2	TU-T3	TU-T4
OD	mg/L	7	4	0.2	0.2	7	2	1	0.5
DBO ₅	mg/L	5	50	250	250	5	100	100	250
DQO	mg/L	35	150	400	400	35	200	200	500
SST	mg/L	10	30	150	200	10	120	150	300
GyA	mg/L	10	25	40	60	20	20	20	50
SAAM	mg/L	0.5	3	4	4	0.5	3	3	3
PTOTAL	mg/L	0.1	3	8	8	0.2	3	5	6
CF	NMP/100 ml	1.0E+05	1.0E+06	1.0E+06	1.0E+06	1.0E+05	1.0E+06	1.0E+06	1.0E+06
NTOTAL	mg/L	3	20	40	40	3	20	20	50

T1= Tramo I, T2= Tramo II, T3= Tramo III, T4= Tramo IV

Tabla 4. OC a cuatro años para los tramos del río Fucha y río Tunjuelo (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 (E) a partir de los valores de las concentraciones y su cumplimiento con los objetivos de calidad de siguientes determinantes de la calidad del agua (Resolución 5731 de 2008): OD, pH, DBO₅, DQO, Col_{fe}, GyA, SST, SAAM, Ntotal y Ptotal.

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

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 objetivos de calidad; 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 objetivos de calidad, 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 objetivo de calidad, como en el caso del Oxígeno disuelto o pH, la excursión se calcula como:

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

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

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

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 siguientes categorías (Tabla 5):

Categoría	Valor WQI	Descripción
Excelente	[95 <WQI<100]	Calidad del agua cumple los objetivos de calidad, 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 las veces la calidad está amenazada o afectada; por lo general apartada de las condiciones deseables

Tabla 5. 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.

2 RESULTADOS

Después de la implementación de los métodos y metodologías explicados en el numeral 1.2 y 1.3 se obtienen los resultados para cada uno de los tramos de los ríos que conforman la RCHB.

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

- Las Figura 3, 6, 9 y 12 se presenta en el eje vertical la cantidad de datos validados que no fueron catalogados como *outliers* (barras de colores), y la cantidad de datos (barras grises con relleno de trama a 45°) que incumplieron los objetivos de calidad del agua por cada determinante, esto últimos presentados en el eje horizontal.
- Las tablas similares a la Tabla 6 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 1.3) empleadas en el cálculo del indicador WQI, y finalmente el valor de este indicador.
- Las figuras tipo radar como la Figura 4 representan el porcentaje de cumplimiento de los objetivos de calidad 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.

2.1 RÍO TORCA

En el tramo I de río Torca se tiene en cuenta un punto de monitoreo, correspondiente a la estación de Bosque de Pinos. En total se desarrollaron seis monitoreos ejecutados durante la vigencia del 2020, obteniéndose así 60 datos, de los cuales sólo 5 no alcanzaron los objetivos de calidad (Figura 3). A partir del análisis estadístico de la información, se determinaron 4 valores atípicos, los cuales no fueron considerados para el cálculo del WQI en el tramo I. Para el tramo II del río Torca se validó el 94 % de los datos, para un total de 169 datos validados y 11 datos atípicos. Para cada

una de las estaciones consideradas en el cálculo del WQI en el tramo II (Calle 161, Jardines de Paz y San Simón) se realizaron 6 monitoreos durante los meses de enero, febrero, junio, julio y septiembre del 2020.

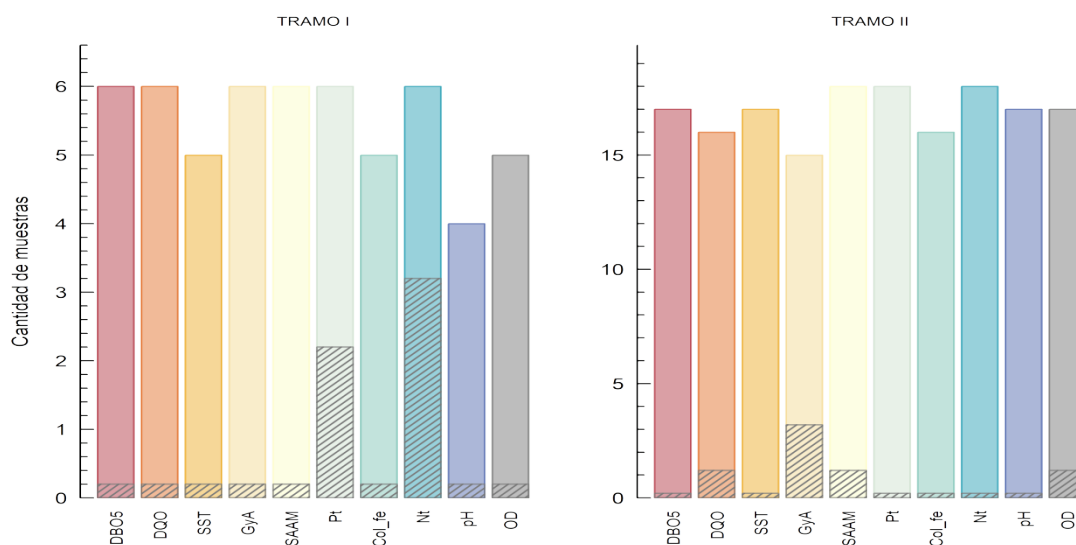


Figura 3. Cantidad de datos validados y datos que no cumplieron (barras achuradas) con los objetivos de calidad en los tramos del río Torca

Con base en los datos validados, se determinó que la calidad del agua en el tramo I, para el periodo evaluado, fue **[Buena]**. Dos determinantes no alcanzaron los objetivos de calidad establecidos para el tramo I, estos fueron Ptotal con dos datos y Ntotal con tres datos que equivalen al 33.33% y 50.00% respectivamente, lo que corresponde al 9.09 % del total de los datos considerados en el punto de monitoreo (ver Tabla 6). Es preciso indicar que los datos superan los objetivos de calidad, ya que exceden las concentraciones de referencia para el tramo I del río Torca, puesto que el valor objetivo es 5 mg/l para el Ntotal y de 1 mg/l para el Ptotal.

Determinante de la calidad	No. datos que <u>no</u> cumplen el OC	% de datos que <u>no</u> Cumplen el OC	Variables	Valor
DBO ₅	0	0.00	F1	20
DQO	0	0.00	F2	9.09
SST	0	0.00	nse	0.12
GyA	0	0.00	F3	10.39
SAAM	0	0.00	WQI	85.97
Fosforo Total	2	33.33		
Coliformes fecales	0	0.00		
Nitrógeno Total	3	50.00		
pH	0	0.00		
OD	0	0.00		

Tabla 6. Río Torca WQI – Tramo I

Para el tramo II cuatro de los determinantes (OD, DQO, Ptotal y SAAM) incumplieron el objetivo de calidad una vez, mientras que Grasas y Aceites incumplió en tres datos asociados con la estación Calle 161, mientras que en la estación San Simón no se presentó excedencia en ningún determinante (ver Tabla 7).

Si bien para el tramo II del río Torca el determinante de grasas y aceites presentó valores por encima de los establecidos como objetivo de calidad, la frecuencia del número de datos que incumplió fue mayor al establecido para los determinantes OD, DQO, Ptotal y SAAM. Es así como 3 datos superaron la concentración de referencia para GyA (30 mg/L), obteniéndose un porcentaje de incumplimiento del 20 %.

El 5.9 % de los datos para el determinante OD, incumplió el OC en la estación Jardines de Paz cuya concentración de referencia es 0.5 mg/l, mientras que para la DQO y los SAAM el 6.3 % y el 5.6 % de los datos superaron las concentraciones de 300 mg/l y 4 mg/l, respectivamente. Para ambos parámetros (DQO y SAAM) el incumplimiento se presentó en la estación calle 161.

Determinante de la calidad	No. datos que no cumplen el OC	% de datos que no Cumplen el OC	Variables	Valor
DBO ₅	0	0	F1	40.00
DQO	1	6.25	F2	3.55
SST	0	0	nse	0.01
GyA	3	20	F3	0.53
SAAM	1	5.56	WQI	76.81
Fosforo Total	0	0		
Coliformes fecales	0	0		
Nitrógeno Total	0	0		
pH	0	0		
OD	1	5.88		

Tabla 7. Río Torca WQI – Tramo II

La Figura 4 permite establecer que los determinantes de la calidad del agua que tienen un mayor impacto en el tramo II del río Torca, fueron las GyA, la DQO y los Tensoactivos. Si bien el WQI para este tramo fue [Aceptable], el deterioro de la calidad del agua en el río se debe principalmente a descargas de aguas residuales domésticas generadas por la problemática de conexiones erradas presentes en el área aferente al desarrollo del canal para la parte media baja de la cuenca (ver Figura 5).

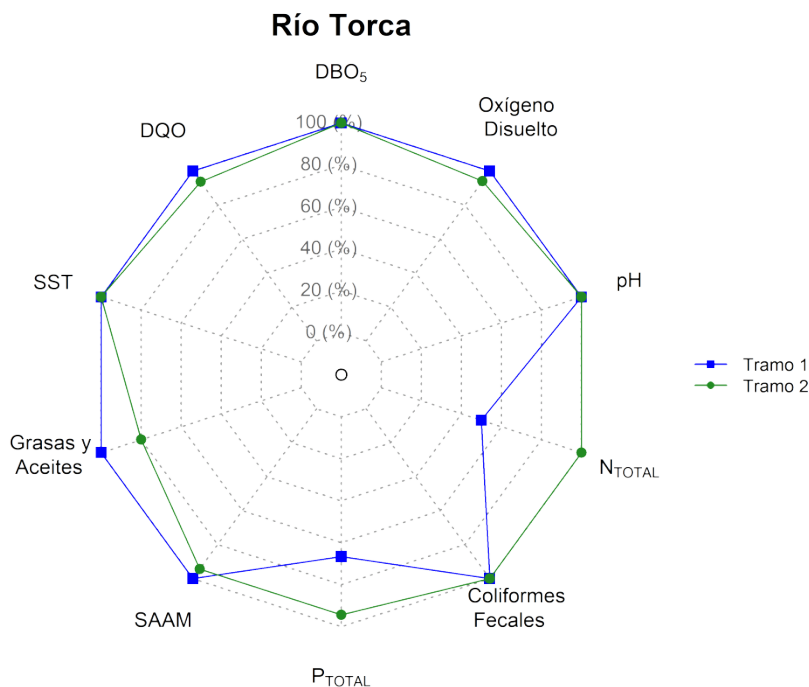


Figura 4. Porcentaje de cumplimiento de los objetivos de calidad por determinante de la calidad del agua y tramo del río Torca

En general, se puede establecer que para el primer tramo del río Torca, hubo una variable crítica y la calidad del agua no se mantuvo dentro de los valores históricos, ya que descendió en un 14.03 %, respecto a los valores obtenidos en el periodo 2018-2019. Situación similar sucedió en el tramo II en donde el valor del indicador disminuyó en 6 unidades con respecto al valor del WQI para el período 2019-2020 cuyo valor fue de 82. En este último tramo las GyA, siguen siendo el determinante que presenta una mayor frecuencia e incide directamente en la calidad del agua.

A continuación, se presenta el mapa del indicador WQI para los tramos del río Torca.

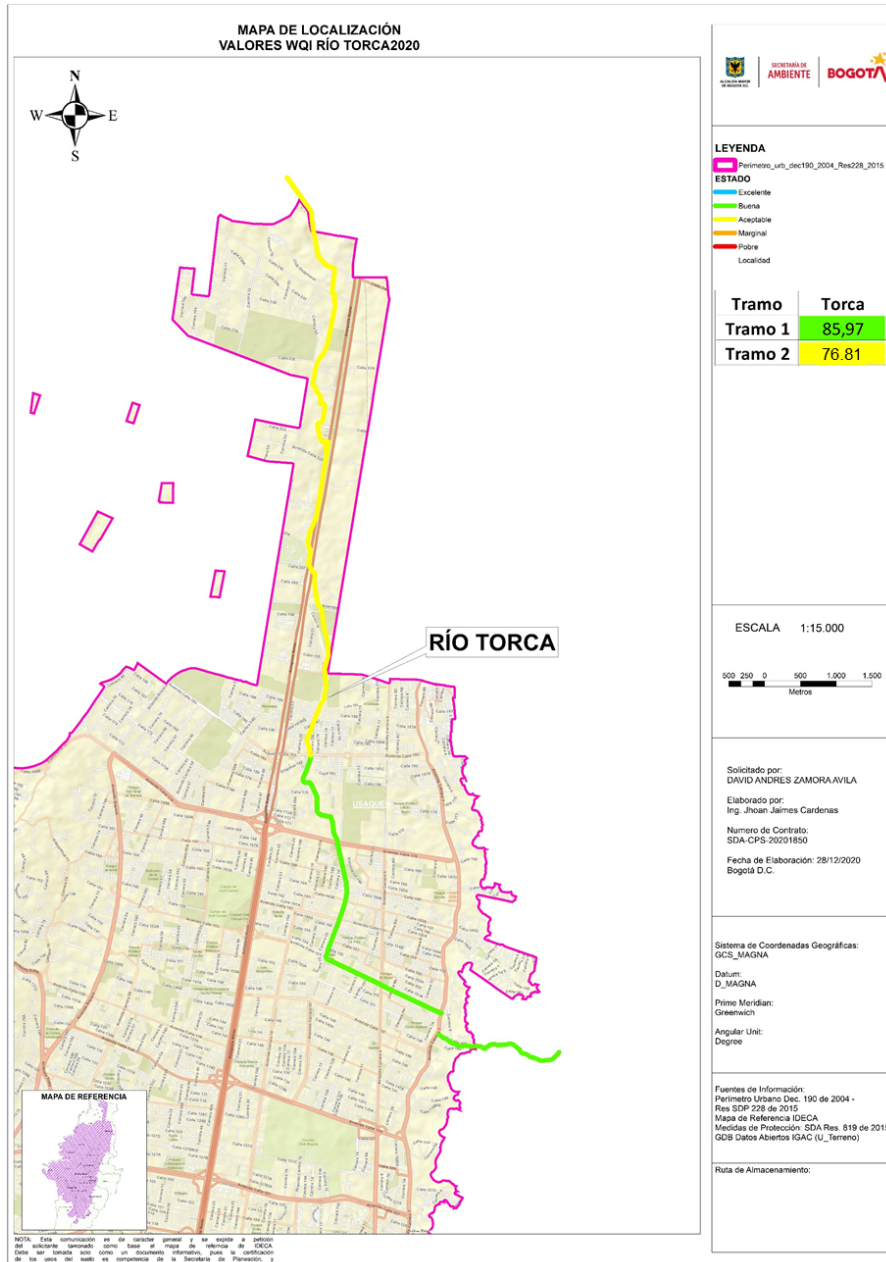


Figura 5. Mapa del índice de calidad hídrica (WQI) en el río Torca

2.2 RÍO SALITRE

Para los seis puntos de monitoreos distribuidos en el río Salitre se realizaron seis monitoreos en cada uno de ellos. A partir del análisis estadístico de la información, para el tramo I del río Salitre (cuya única estación es la del Parque Nacional) se validó el 91.67 % de los datos, para un total de 55 datos validados y 5 datos atípicos. En el tramo II del río Salitre (Estaciones de Arzobispo y Calle 53) se validó el 91.67 % de los datos, para un total de 110 datos validados y 10 datos atípicos mientras que para los tramos III y IV, se validó el 90.83 % (109 datos) y el 92.78 % (167 datos) respectivamente. La cantidad de datos validados se muestra en la Figura 6.

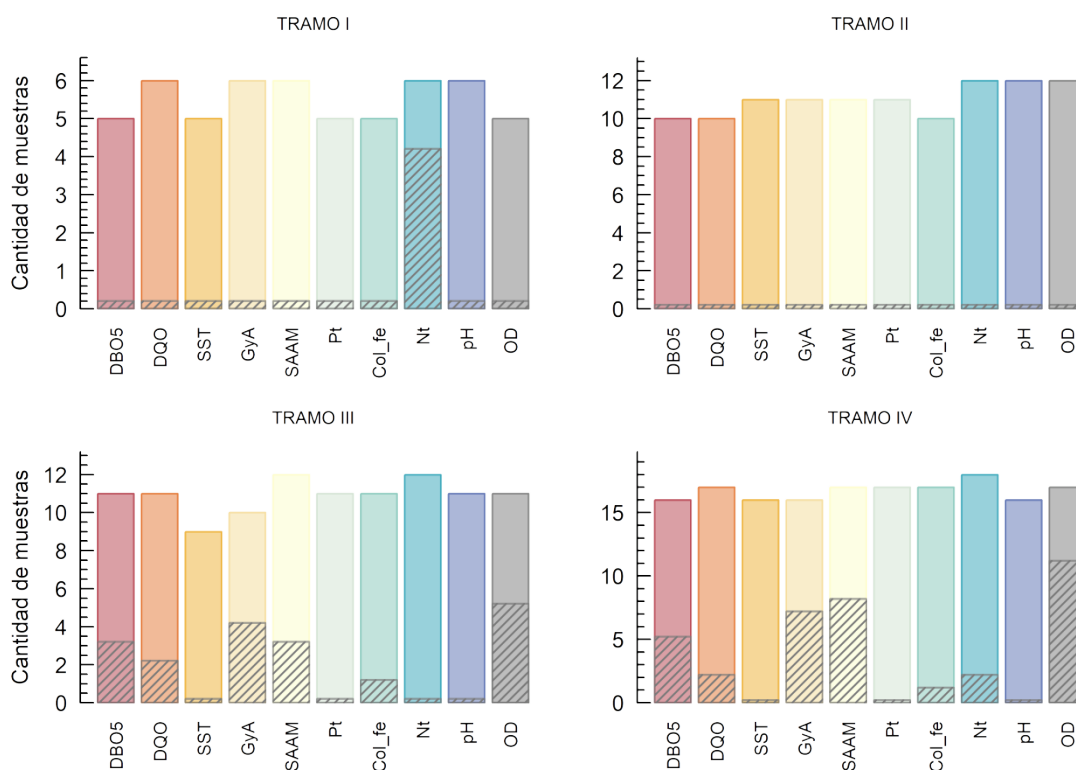


Figura 6. Cantidad de datos validados y datos que no cumplieron (barras achuradas) con los objetivos de calidad en los tramos del río Salitre

Del total de los 55 datos validados para la estación del Parque Nacional (Tramo I del río Salitre) únicamente cuatro datos no alcanzaron los objetivos de calidad, lo que corresponde al 7.27 % de los datos analizados. A partir de la estimación del WQI la calidad del agua en este primer tramo fue [Buena]. El único determinante que incumplió el objetivo de calidad fue Ntotal. Como se puede ver en la Tabla 8, el WQI para este tramo fue de 92.38, reflejando que la calidad está cercana al límite superior de esta categoría [calidad buena: 80 a 94].

Determinante de la calidad	No. datos que no cumplen el OC	% de datos que no Cumplen el OC	Variables	Valor
DBO5	0	0	F1	10
DQO	0	0	F2	7.27
SST	0	0	nse	0.05
GyA	0	0	F3	4.64
SAAM	0	0	WQI	92.38
Fosforo Total	0	0		
Coliformes fecales	0	0		
Nitrógeno Total	4	66.67		
pH	0	0		
OD	0	0		

Tabla 8. Río Salitre WQI – Tramo I

Para las dos estaciones de monitoreo (Arzobispo y Carrera 30 con Calle 53) del tramo II del río Salitre, se obtuvo un total de datos de 110, los cuales cumplieron los objetivos de calidad. La calidad de agua de este tramo fue [Excelente], y el valor del WQI correspondió a 100 (ver Tabla 9).

Determinante de la calidad	No. datos que no cumplen el OC	% de datos que no Cumplen el OC	Variables	Valor
DBO ₅	0	0	F1	0
DQO	0	0	F2	0.00
SST	0	0	nse	0.00

Determinante de la calidad	No. datos que no cumplen el OC	% de datos que no Cumplen el OC	Variables	Valor
GyA	0	0	F3	0.00
SAAM	0	0	WQI	100.00
Fosforo Total	0	0		
Coliformes fecales	0	0		
Nitrógeno Total	0	0		
pH	0	0		
OD	0	0		

Tabla 9. Río Salitre WQI – Tramo II

Para el tramo III del río Salitre el 16.51 % de los datos no alcanzaron el valor objetivo, este porcentaje corresponde a 18 datos de los 109 válidos. Los determinantes que presentaron una mayor frecuencia fueron Oxígeno Disuelto, GyA, DBO₅ y DQO, con porcentajes de incumplimiento del 45.45 %, el 40 %, 27.27 % y 18.18 %, respectivamente.

De acuerdo con el cálculo del WQI la calidad del agua en este tramo fue **[Marginal]** (ver Tabla 10). El alto porcentaje de incumplimiento de los objetivos de calidad infiere afectación en la calidad del río por descargas de agua residual asociadas principalmente por el vertimiento procedente del sistema de alcantarillado combinado por medio de estructuras de alivio.

Determinante de la calidad	No. datos que no cumplen el OC	% de datos que no Cumplen el OC	Variables	Valor
DBO ₅	3	27.27	F1	60
DQO	2	18.18	F2	16.51
SST	0	0	nse	0.08
GyA	4	40	F3	7.51
SAAM	3	25	WQI	63.81
Fosforo Total	0	0		
Coliformes fecales	1	9.09		
Nitrógeno Total	0	0		

pH	0	0
OD	5	45.45

Tabla 10. Río Salitre WQI – Tramo III

Finalmente, para el tramo IV del río Salitre se tiene que, de los 167 datos validados, 36 no cumplieron el objetivo de calidad, es decir el 21.56 %. En este tramo se tiene que los determinantes de calidad que presentaron una mayor frecuencia fueron: Oxígeno Disuelto, Tensoactivos, GyA, y DBO₅. Los porcentajes asociados al número de datos que no cumplieron con los objetivos de calidad se presentan en la Tabla 8, en la que también se observa que la totalidad de datos de los parámetros SST y pH cumplieron el valor objetivo. El tramo IV mostró una calidad del agua [Marginal] con un valor de **57.16**.

Determinante de la calidad	No. datos que no cumplen el OC	% de datos que no Cumplen el OC	Variables	Valor
DBO ₅	5	31.25	F1	70.00
DQO	2	11.76	F2	21.56
SST	0	0	nse	0.13
GyA	7	43.75	F3	11.87
SAAM	8	47.06	WQI	57.16
Fosforo Total	0	0		
Coliformes fecales	1	5.88		
Nitrógeno Total	2	11.11		
pH	0	0		
OD	11	64.71		

Tabla 11. Río Salitre WQI – Tramo IV

La Figura 7 permite visualizar los resultados antes descritos y evidencia la notoria influencia que tienen los determinantes de DBO₅, GyA, Tensoactivos y Oxígeno Disuelto, en la calidad del agua en los tramos III y IV del río Salitre.

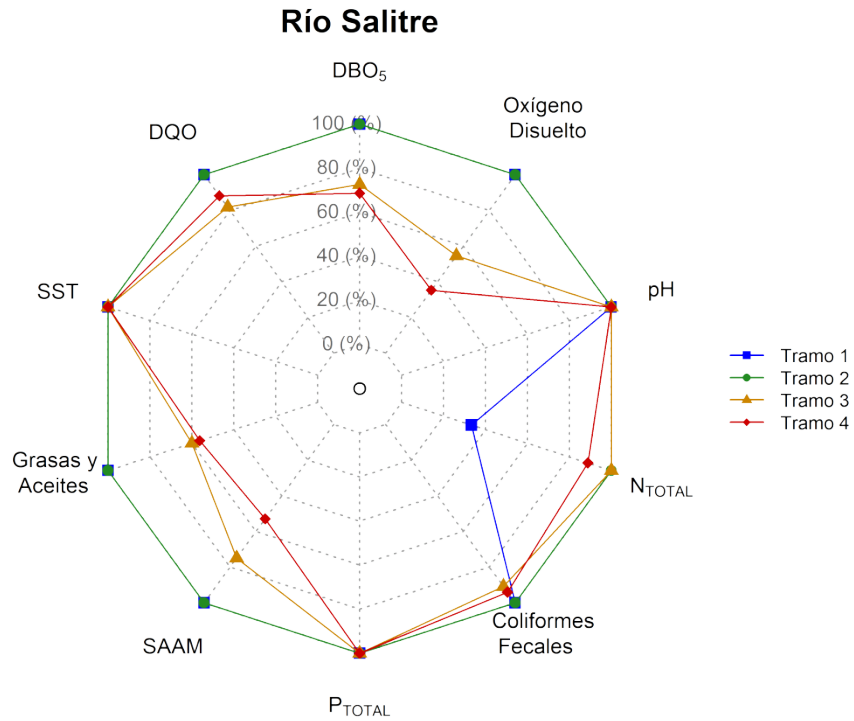
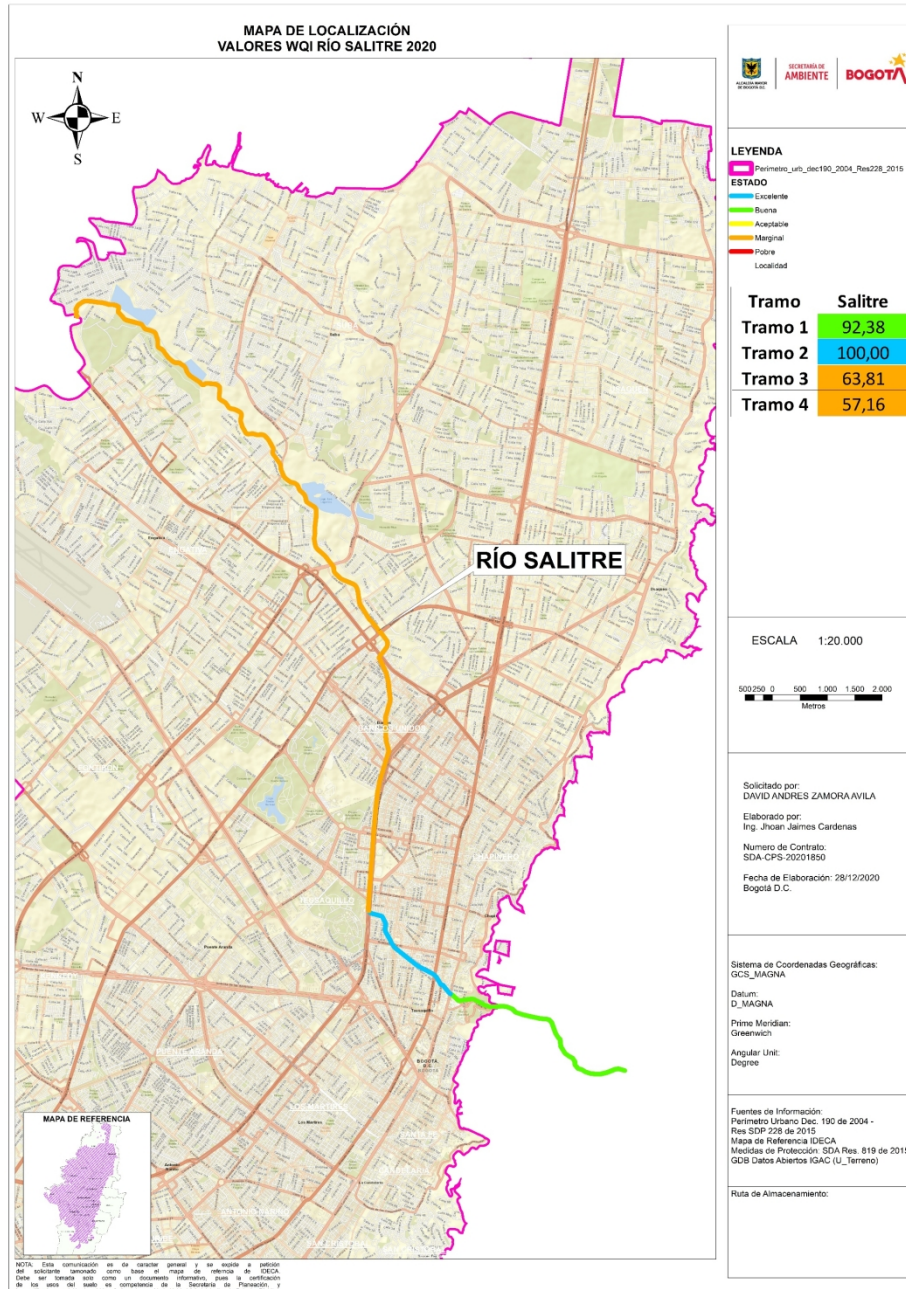


Figura 7. Porcentaje de cumplimiento de los objetivos de calidad por determinante de la calidad del agua y tramo del río Salitre

A continuación se presenta el mapa del indicador WQI para los tramos del río Salitre.



8. Mapa del índice de calidad hídrica (WQI) en el río Salitre

2.3 RÍO FUCHA

En el tramo I de este río se encuentra ubicada la estación de monitoreo [El Delirio] para la cual se calculó el WQI con un total de 54 datos validados, de los cuales seis (6) no cumplieron con los objetivos de calidad (Figura 9). La DBO₅ y el Ntotal fueron los determinantes donde el 33.33 % y el 80% de los datos respectivamente, no alcanzaron el valor objetivo. De esta manera el valor del WQI en este tramo es de 85.37 [Buena].

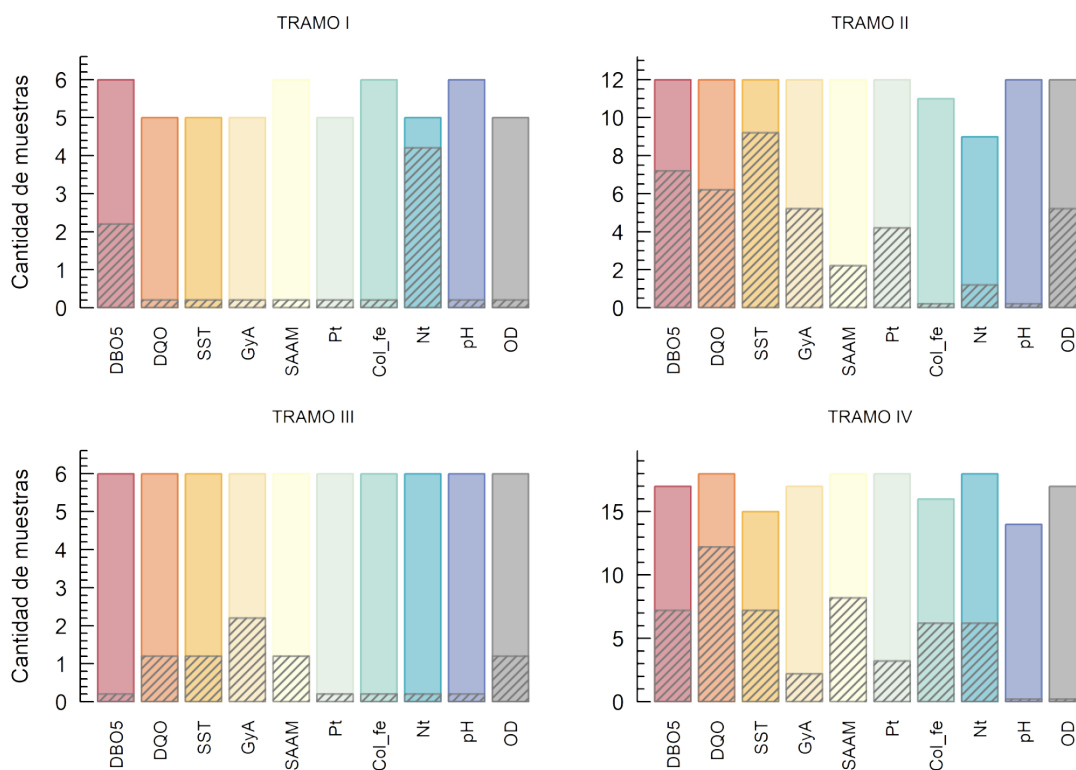


Figura 9. Cantidad de datos validados y datos que no cumplieron con los objetivos de calidad en los tramos del río Fucha

Determinante de la calidad	No. datos que no cumplen el OC	% de datos que no Cumplen el OC	Variables	Valor
DBO ₅	2	33.33	F1	20
DQO	0	0.00	F2	11.11
SST	0	0.00	nse	0.12
GyA	0	0.00	F3	10.90
SAAM	0	0.00	WQI	85.37
Fosforo Total	0	0.00		
Coliformes fecales	0	0.00		
Nitrógeno Total	4	80.00		
pH	0	0.00		
OD	0	0.00		

Tabla 12. 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 en total 116, de los cuales 39 no cumplieron con los objetivos. Esto incidió en que la calidad de agua de este tramo sea clasificada como [Pobre] (Tabla 13). Es importante resaltar que en los determinantes de calidad Coliformes Fecales y pH en todos los datos analizados alcanzaron el objetivo de calidad, por el contrario, en para el parámetro SST el porcentaje de incumplimiento de los datos se ubicó en un 75 %. La afectación de la calidad de agua en este tramo se da principalmente por descargas de aguas residuales en los afluentes como el Canal Albina y río Seco por falta de mantenimiento en las estructuras de alivio.

Determinante de la calidad	No. datos que no cumplen el OC	% de datos que no Cumplen el OC	Variables	Valor
DBO ₅	7	58.33	F1	80
DQO	6	50.00	F2	33.62
SST	9	75.00	nse	42.47
GyA	5	41.67	F3	0.74
SAAM	2	16.67	WQI	44.22
Fosforo Total	4	33.33		
Coliformes fecales	0	0.00		

Determinante de la calidad	No. datos que no cumplen el OC	% de datos que no Cumplen el OC	Variables	Valor
Nitrógeno Total	1	11.11		
pH	0	0.00		
OD	5	41.67		

Tabla 13. 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 14) en comparación con los resultados obtenidos en el tramo II. Para este tramo se determinó que el 10 % [6 datos] no cumplieron con los objetivos (Figura 10).

Es importante resaltar que el determinante que más influyó en el resultado del WQI fue GyA (33.33 %). No obstante, la magnitud del incumplimiento (diferencia entre el objetivo y el valor medido) de estos determinantes es menor, si se comparan los factores de excursión del tramo II versus el tramo III.

Los objetivos de calidad para el tramo III son más flexibles respecto al tramo I y II, el WQI del tramo III se clasificó en **Aceptable** con un valor de 70.55.

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
DQO	1	16.67	F2	10.00
SST	1	16.67	nse	1.36
GyA	2	33.33	F3	0.01
SAAM	1	16.67	WQI	70.55
Fosforo Total	0	0.00		
Coliformes fecales	0	0.00		
Nitrógeno Total	0	0.00		
pH	0	0.00		
OD	1	16.67		

Tabla 14. Río Fucha WQI – Tramo III

En el tramo IV de este río hay tres puntos de monitoreo [Visión Colombia, Fucha Zona Franca y Fucha Alameda], el cálculo del WQI se realizó con un total de datos de 168, de los cuales 51 (30.36 % de los datos) no alcanzaron los objetivos de calidad, por lo tanto la calidad del agua de este tramo es [Marginal] (ver Tabla 15 y Figura 10).

En los determinantes de calidad pH y OD se presentó cumplimiento del objetivo de calidad en todos los datos analizados. El determinante de calidad crítico fue DQO, debido a que el 66.67 % de las mediciones superó la concentración establecida como objetivo. Para DBO₅ y SST se determinó un incumplimiento del 41.18 % y 46.67 %, respectivamente.

Determinante de la calidad	No. datos que no cumplen el OC	% de datos que no Cumplen el OC	Variables	Valor
DBO ₅	7	41.18	F1	80
DQO	12	66.67	F2	30.36
SST	7	46.67	nse	11.05
GyA	2	11.76	F3	0.12
SAAM	8	44.44	WQI	50.19
Fosforo Total	3	16.67		
Coliformes fecales	6	37.50		
Nitrógeno Total	6	33.33		
pH	0	0.00		
OD	0	0.00		

Tabla 15. Río Fucha WQI – Tramo IV

En la Figura 10 se puede observar que el pH en todos los tramos cumplió el valor objetivo y los determinantes Coliformes Fecales y Fósforo total presentaron un porcentaje de cumplimiento de objetivos mayor al 60 % en todos los tramos. Por otra parte, el tramo III reportó mejor porcentaje de cumplimiento en la mayoría de los determinantes de calidad respecto a los otros tramos, por encima del 60 %.

El parámetro Ntotal en el tramo I presentó un bajo porcentaje de cumplimiento, sólo el 20%, lo que afecta el valor del indicador. Finalmente, los SST, la DBO₅ y la DQO fueron los determinantes de calidad con menor porcentaje de cumplimiento en los tramos II y IV.

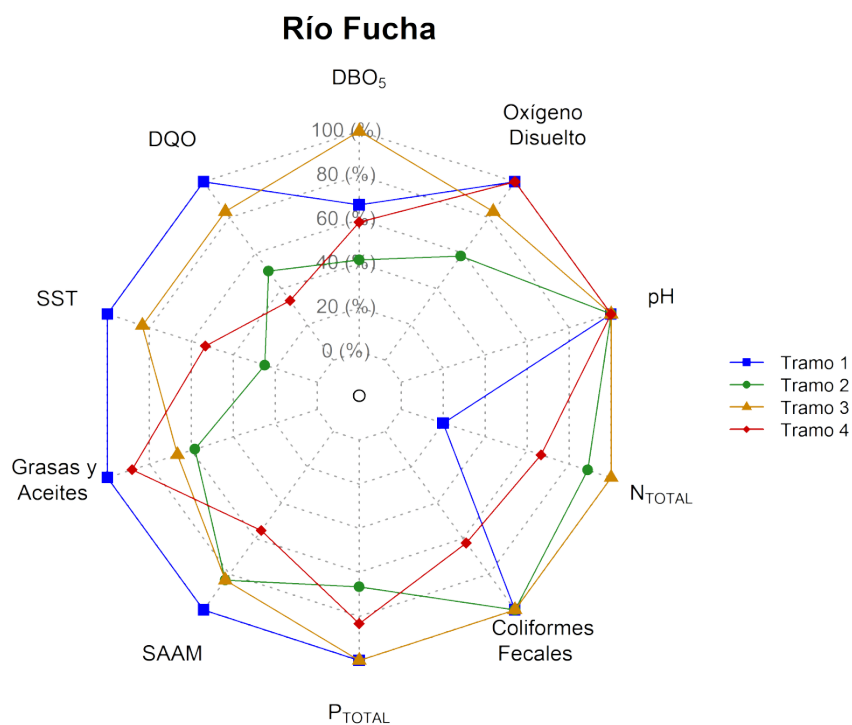


Figura 10. Porcentaje de cumplimiento de los objetivos de calidad por determinante de la calidad del agua y tramo del río Fucha

A continuación se presenta el mapa del indicador WQI para los tramos del río Fucha.

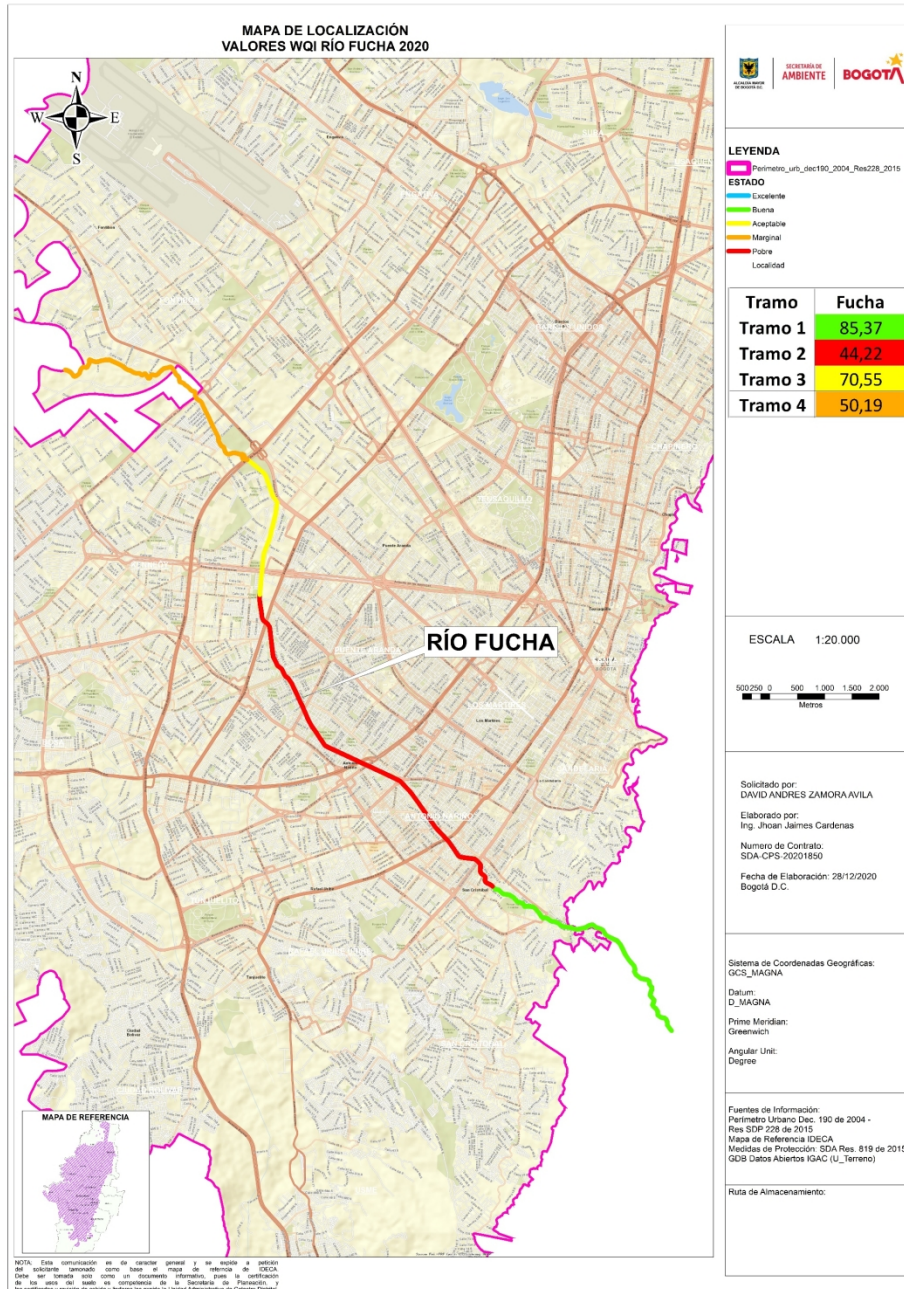


Figura 11. Mapa del índice de calidad hídrica (WQI) en el río Fucha

2.4 RÍO TUNJUELO

En el río Tunjuelo, el índice de calidad, WQI, tiene una variación particular asociado con la regulación del caudal que se presenta en el primer tramo por la operación del embalse La Regadera, ejecutada por la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá EAAB-ESP.

En el primer tramo del río Tunjuelo, se monitorearon dos estaciones (La Regadera y Universidad Antonio Nariño). Sin embargo, para el cálculo del WQI solo se considera el punto La Regadera que contó con un total de 60 datos validados de los cuales el 12,7 % [7 datos] no alcanzaron los objetivos de calidad [ver Figura 12 y Tabla 16]. El índice de calidad hídrica WQI para el tramo I fue **[Buena]**.

De acuerdo con los datos reportados para el periodo analizado los determinantes de la calidad más críticos en el incumplimiento de los objetivos fueron los SST [67 %] y el Ntotal [50 %], ya que los valores medidos fueron en el caso de los SST superiores 10 mg/L y en el Ntotal estuvieron sobre los 3 mg/l.

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 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 13).

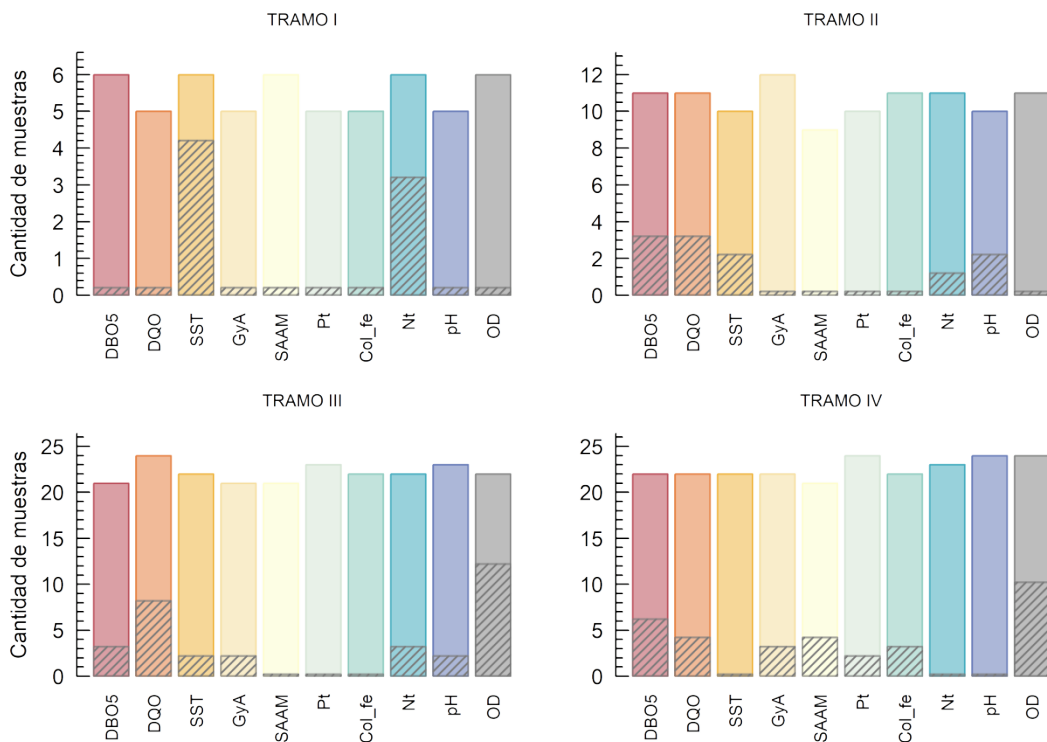


Figura 12. Cantidad de datos validados y datos que no cumplieron con los objetivos de calidad en los tramos del río Tunjuelo

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	12.73
SST	4	66.67	nse	0.10
GyA	0	0.00	F3	9.47
SAAM	0	0.00	WQI	85.26
Fosforo Total	0	0.00		
Coliformes fecales	0	0.00		
Nitrógeno Total	3	50.00		
pH	0	0.00		
OD	0	0.00		

Tabla 16. Río Tunjuelo WQI – Tramo I

En el Tramo II, los puntos de monitoreo corresponden a Yomasa y Doña Juana. Para el periodo analizado 2020 el cálculo del WQI se realizó a partir de 119 datos validados, de los cuales 12 datos 11.3% no alcanzaron los Objetivos. El índice de calidad hídrica WQI para este tramo obtuvo un valor de 70 y una categoría de **[Aceptable]** (Tabla 17).

Por otra parte, es importante aclarar que el incumplimiento de los OC se dio por los determinantes DBO₅, DQO, Ntotal, SST y pH, es de resaltar que la estación Doña Juana aportó los 11 valores el 10.38% de incumplimiento. Por consiguiente, se puede establecer que el punto Doña Juana es un punto crítico de este tramo, la magnitud con la cual los valores superan los OC es alto, lo que se evidencia en el factor de excursión y el F3.

Además, 5 de los 10 determinantes de calidad del agua incumplieron los objetivos. Por otra parte, es importante aclarar que uno de los determinantes (Ntotal) monitoreado en la estación Yomasa es el único determinante que incumple el objetivo de calidad en el tramo II, mientras que los demás determinantes evaluados para ese punto cumplen con los objetivos.

Determinante de la calidad	No. datos que no cumplen el OC	% de datos que no Cumplen el OC	Variables	Valor
DBO ₅	3	27.27	F1	50
DQO	3	27.27	F2	10.38
SST	2	20.00	nse	0.11
GyA	0	0.00	F3	9.63
SAAM	0	0.00	WQI	70.00
Fosforo Total	0	0.00		
Coliformes fecales	0	0.00		
Nitrógeno Total	1	9.09		
pH	2	20.00		
OD	0	0.00		

Tabla 17. 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 válidos un total de 223, de los cuales 32 datos no alcanzaron con los OC, lo que corresponde al 14.5 %. De igual manera, 7 de los 10 determinantes no cumplieron con los OC (Figura 13).

Es así como el aporte de incumplimiento de cada una de las estaciones de control se da de la siguiente manera, para Doña Juana se establece el 5 % con 11 datos, Barrio México el 2 % con 4 datos, San Benito el 3 % con 7 datos y Makro el 5 % con 10 datos.

Si bien 7 de los 10 los determinantes de la calidad evaluados en el tramo III incumplieron los objetivos no en todos puntos de monitoreo ocurrió lo mismo. Es así como en el caso del punto Doña Juana 5 de 10 determinantes (DQO, DBO₅, Ntotal, SST y pH) incumplieron los objetivos. De los datos obtenidos del monitoreo en el punto Barrio México menos determinantes incumplieron los objetivos sólo 1 de los 10 evaluados: OD.

Por otra parte, en el caso de los puntos San Benito y Makro Autopista Sur volvió incrementar el número de determinantes que incumplieron los objetivos: 3/10 y 4/10 respectivamente. El determinante crítico fue para las dos estaciones el OD, ya que en los puntos San Benito y Makro Autosur se reportaron con cuatro valores cada uno que no cumplieron el objetivo de calidad. Por anterior, la clasificación del indicador WQI para el periodo analizado es [Marginal], la cual se mantiene en comparación al periodo anterior que fue [Marginal] (2019-2020)

Determinante de la calidad	No. datos que no cumplen el OC	% de datos que no Cumplen el OC	Variables	Valor
DBO ₅	3	14.29	F1	70
DQO	8	33.33	F2	14.48
SST	2	9.09	nse	0.10
GyA	2	9.52	F3	8.77
SAAM	0	0.00	WQI	58.42

Determinante de la calidad	No. datos que no cumplen el OC	% de datos que no Cumplen el OC	Variables	Valor
Fosforo Total	0	0.00		
Coliformes fecales	0	0.00		
Nitrógeno Total	3	13.64		
pH	2	8.70		
OD	12	54.55		

Tabla 18. Río Tunjuelo WQI – Tramo III

En el último tramo la calidad del río se mantuvo respecto al periodo anterior (2019-2020), ya que el WQI es **[Marginal]**. Este tramo está conformado por cuatro puntos de monitoreo [Makro Autopista Sur, Transversal 86, CAI Antonia Santos e Isla Pontón San José]. De los datos analizados 13 se establecieron como atípicos, se determinó que 226 fueron datos validados, y de estos 32 datos [14.2 %] excedieron los objetivos (ver Figura 13 y Tabla 19). En este tramo los OD incumplen considerablemente respecto a los otros determinantes, aun así, se encuentra por debajo de los tramos anteriores con el 41.7 % de los datos por debajo del objetivo de calidad, esto debido a las descargas de tipo doméstico que se realizan en este último tramo como es el caso del interceptor Tunjuelo Medio. Otros determinantes que influyeron en la clasificación del WQI fueron DQO₅ [27 % de incumplimiento], SAAM [19 % de incumplimiento] y DQO [18 % de incumplimiento]. Por otra parte, los determinantes de la calidad del agua que cumplieron la concentración establecida como objetivo de calidad de incumplimiento fueron Ntotal, pH y SST.

Determinante de la calidad	No. datos que no cumplen el OC	% de datos que no Cumplen el OC	Variables	Valor
DBO ₅	6	27.27	F1	70
DQO	4	18.18	F2	14.16
SST	0	0.00	nse	0.07
GyA	3	13.64	F3	6.84
SAAM	4	19.05	WQI	58.58
Fosforo Total	2	8.33		
Coliformes fecales	3	13.64		
Nitrógeno Total	0	0.00		

Determinante de la calidad	No. datos que no cumplen el OC	% de datos que no Cumplen el OC	Variables	Valor
pH	0	0.00		
OD	10	41.67		

Tabla 19. Río Tunjuelo WQI – Tramo IV

Como se puede observar en la Figura 13 que los tramos I y II presentaron un comportamiento regular en términos de cumplimiento de los objetivos de calidad. Sin embargo, los porcentajes de cumplimiento en los SST y Ntotal reportados son mayores en el tramo I que en los demás tramos. En los tramos III y IV los determinantes que menos cumplieron los objetivos de calidad fueron OD, con valores de 55 % y 42 %. Finalmente, el cumplimiento más constante de los objetivos de calidad en los tramos del río Tunjuelo lo presentó los coliformes fecales, pH, Ptotal y SAAM, cuyos valores oscilaron entre 80% y 100 % aproximadamente (ver Figura 13).

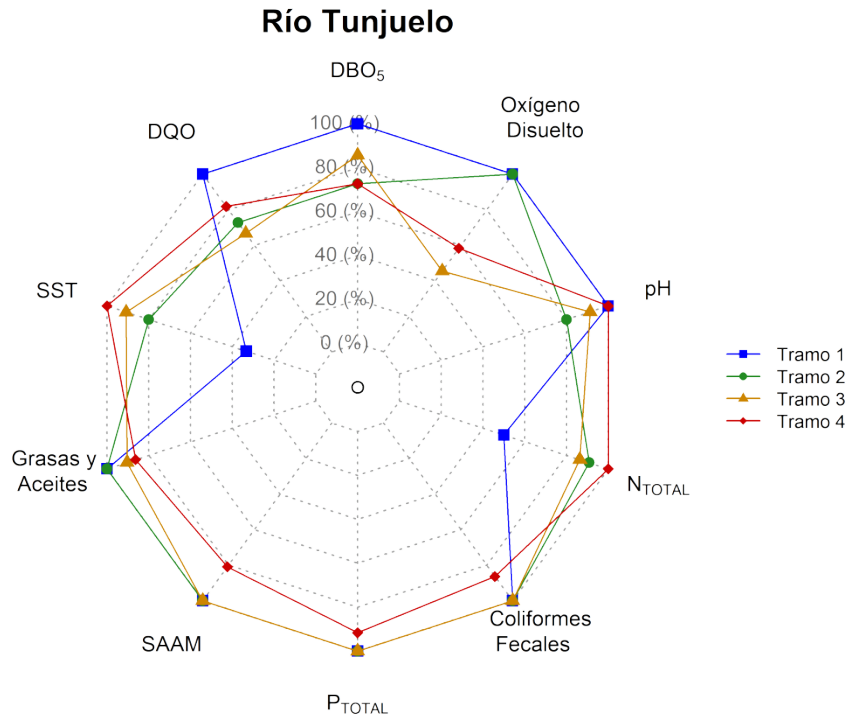


Figura 13. Porcentaje de cumplimiento de los objetivos de calidad por determinante de la calidad del agua y tramo del río Tunjuelo

A continuación, se presenta el mapa del indicador WQI para los tramos del río Tunjuelo.

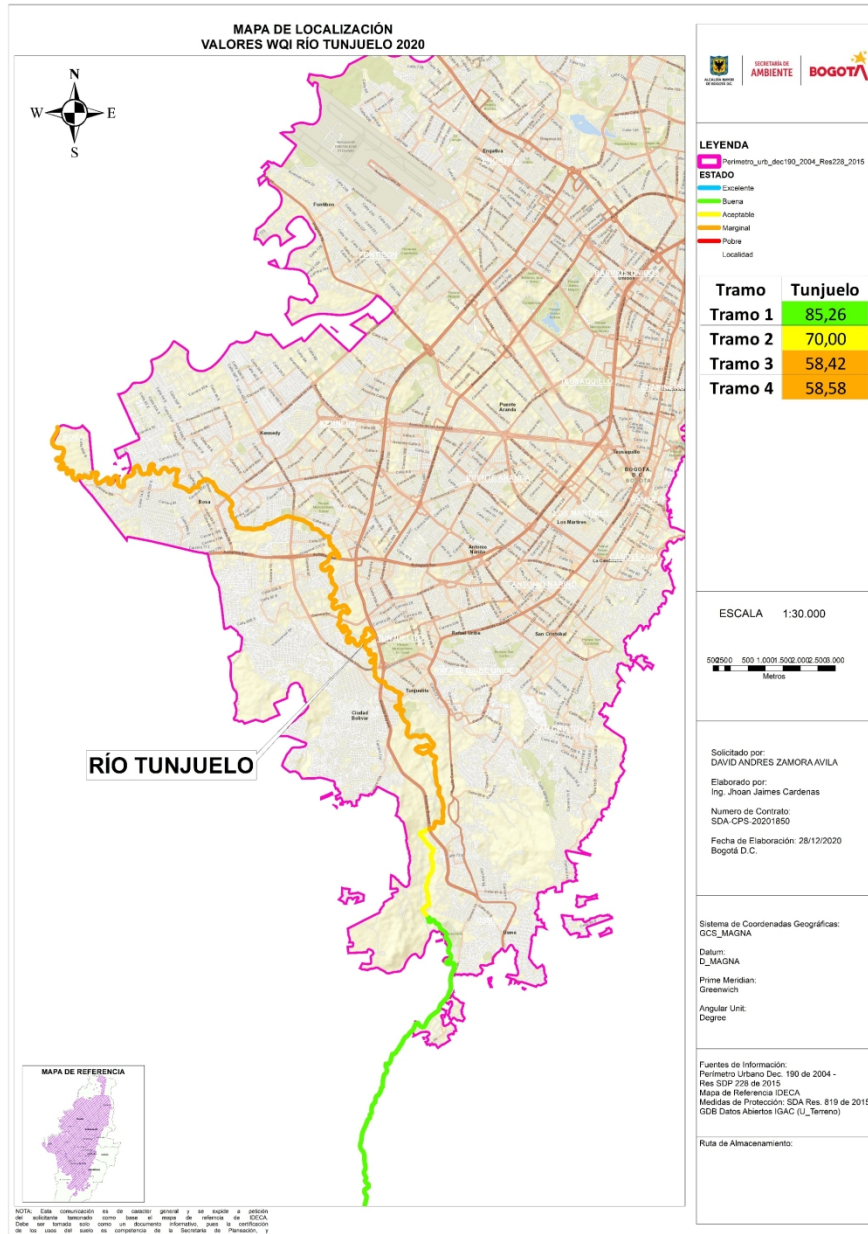


Figura 14. Mapa del índice de calidad hídrica (WQI) en el río Tunjuelo

2.5 EVOLUCIÓN DEL WQI EN EL PERIODO 2014 A 2020

Es importante determinar la longitud de las zonas de los ríos que presentan condiciones iguales o superiores a un estado Aceptable (≥ 65) según la evolución del WQI en los puntos de la RCHB. Es así que conforme con el Acuerdo 761 de 2020 por el cual se adopta el Plan de Desarrollo Económico, Social, Ambiental y de Obras Públicas del Distrito Capital 2020-2024 “*Un nuevo contrato social y ambiental para la Bogotá del siglo XXI*”, se planteó la meta sectorial “*Ejecutar un (1) programa de monitoreo, evaluación, control y seguimiento ambiental al recurso hídrico y sus factores de impacto en el Distrito Capital*”, cuyo cumplimiento está bajo la responsabilidad de la Secretaría Distrital de Ambiente -SDA- y de manera particular en la Subdirección del Recurso Hídrico y del Suelo –SRHS.

Para cumplir con dicho plan, se formuló el proyecto de inversión 7789 “*Diseño, formulación e implementación de un programa de monitoreo, evaluación, control y seguimiento sobre el Recurso Hídrico del Distrito Capital Bogotá*” con el cual se pretende, desarrollar una herramienta para identificar las variables que generan contaminación y afectación a las fuentes hídricas que permita planificar y orientar acciones en el marco de la gestión integral del recurso hídrico, fortaleciendo los procesos de evaluación, control y seguimiento como un ejercicio dinámico por medio de la intervención sistemática sobre los factores de impacto al recurso.

La ejecución de las actividades de monitoreo, evaluación, control y seguimiento ambiental como un sistema articulado, consolidado e integral, trae como consecuencia una planificación adecuada para la asignación de recursos humanos, técnicos y financieros con el fin de garantizar una mejor calidad del recurso hídrico subterráneo y superficial, que redunde en un beneficio ambiental para la ciudad de Bogotá y el aporte a la construcción de una ciudad más cuidadora, incluyente, consciente y sostenible.

De acuerdo con lo expuesto y con el fin de cuantificar la mejora de la calidad del agua se planteó como indicador de seguimiento lograr 41 kilómetros de ríos urbanos con calidad de agua en

categoría aceptable, buena o excelente, que permitirá realizar una evaluación periódica del programa de monitoreo, evaluación, control y seguimiento del recurso hídrico del Distrito capital y sus factores de impacto.

A continuación se muestra en la Tabla 20 y Figura 16, para el actual periodo (año 2020), el número de kilómetros de río en cada una de las categorías del WQI.

Clasificación WQI	Long. de los ríos [km] clasificada por WQI						
	2014-2015	2015-2016	2016-2017	2017-2018	2018-2019	2019-2020	2020
EXCELENTE	0.00	3.62	5.96	5.96	5.96	2.31	2.31
BUENA	11.55	20.60	14.16	7.05	16.90	20.55	10.70
ACEPTABLE	8.56	0.00	6.84	13.94	0.00	4.10	13.94
MARGINAL	2.70	19.59	52.26	2.70	42.20	43.84	49.73
POBRE	61.43	40.43	5.03	54.59	19.18	13.45	7.56

Tabla 20. Longitud de los ríos de la RCHB clasificadas por WQI desde 2014 a 2020

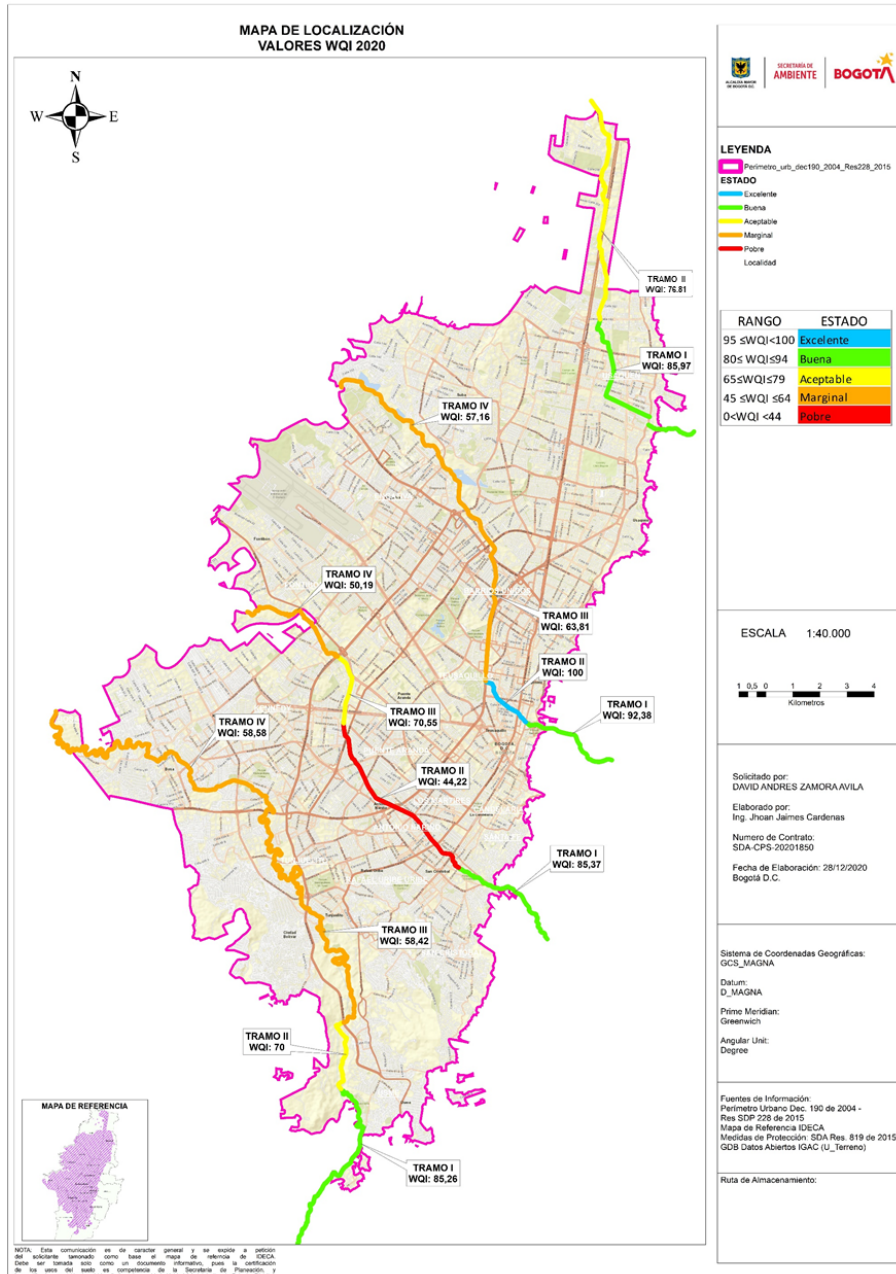


Figura 15. Mapa del índice de calidad hídrica (WQI) de los principales ríos de la Ciudad

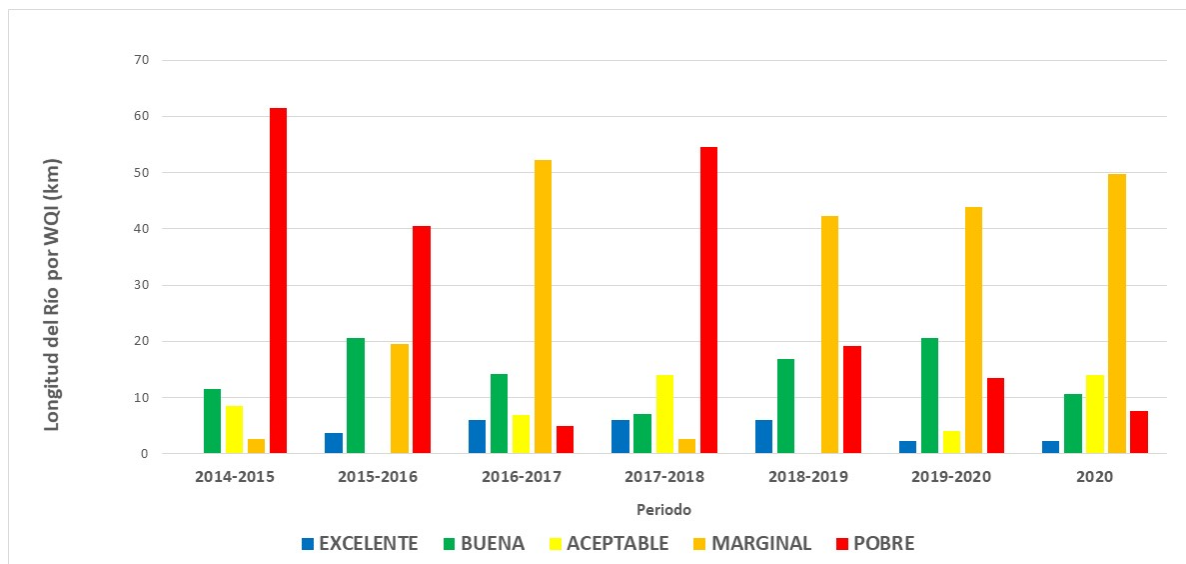


Figura 16. Evolución temporal de ríos urbanos por categoría de calidad de agua

En cuanto al indicador “Número de Kilómetros de ríos con calidad de agua en categoría aceptable, buena o excelente”, se tiene que para el año 2020 la longitud de kilómetros río con valores de WQI superiores o iguales a 65 unidades aumentó 7.41 km con respecto al periodo establecido como línea base.

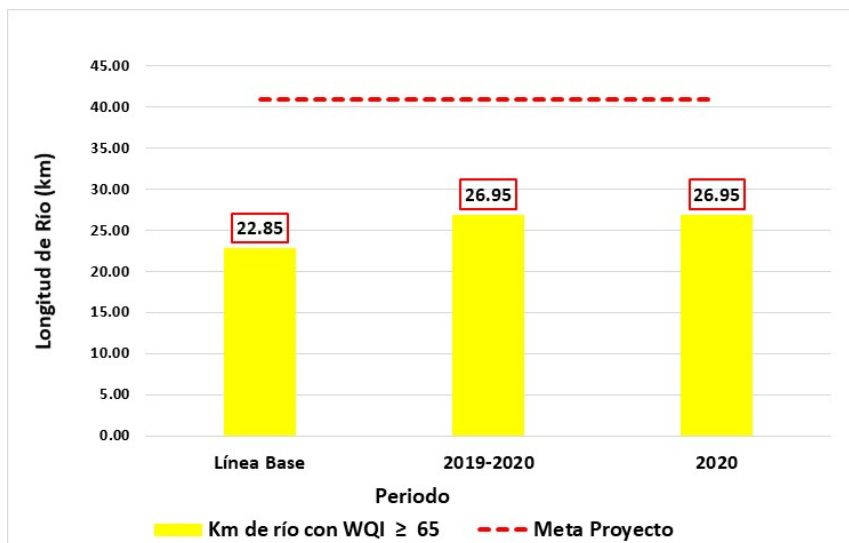


Figura 17. Evolución temporal del Indicador: kilómetros e ríos urbanos con calidad de agua en categoría aceptable, buena o excelente WQI \geq 65

3 CONCLUSIONES

La calidad del río Torca estuvo entre [Buena] y [Aceptable] a lo largo de su recorrido por la ciudad. El primer tramo se evidenció que Ntotal y Ptotal fueron los determinantes críticos que estuvieron por encima de los OC y afectaron la calidad del agua durante el año 2020. Los determinantes críticos en el tramo dos fueron: GyA y DQO, mostrando que el impacto de la calidad del agua está dado 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, las cuales se caracterizan por su alto contenido de materia orgánica y detergentes. Comparando los resultados actuales con los periodos previos se pudo establecer que la calidad del agua del primer tramo presenta una leve disminución, mientras que en el tramo II con respecto al valor establecido como línea base (2018-2019), se mantiene su clasificación en [Aceptable].

Con relación al río Salitre, la variación en la calidad del río se dio a partir del tercer tramo en donde el WQI incrementó en unidades, pero mantuvo su clasificación en [Marginal]. Respecto a los tramos I y II la clasificación del índice continuó en [Buena] y [Excelente], respectivamente, con relación al periodo 2019-2020., pero incrementó su categoría en el tramo II con respecto al periodo establecido como línea base. Mientras que en el cuarto tramo los determinantes que con más frecuencia superaron los objetivos de calidad fueron Oxígeno disuelto, GyA, SAAM y DBO₅. A pesar del incumplimiento de los OC por parte de estos determinantes el índice presentó una mejora, ya que paso de [Pobre] en el periodo establecido como línea base (2018-2019) a [Marginal] en el año 2020.

La calidad del agua del primer tramo del río Fucha se mantuvo en [Buena], como consecuencia del incumplimiento de los OC de los determinantes Ntotal y DBO₅. Lo que más afecto en la reducción del WQI para el tramo uno fue la cantidad de datos que cumplieron más no su valor.

Pese a tener una calidad del agua buena en la cabecera del río, las condiciones cambian dramáticamente desde el punto Carrera 7ª debido a la descarga de vertimientos, en su mayoría, de aguas residuales domésticas procedentes de las estructuras de alivio del sistema de alcantarillado combinado de la ciudad. Es así como los tramos II y III del río Fucha redujeron la magnitud del WQI en porcentajes próximos al 25 % y 19 %, cambiando su clasificación, ya que pasó de [Marginal] a [Pobre] y [Buena] a [Aceptable], respectivamente. Con relación al tramo IV se mantuvo su clasificación en [Marginal] en comparación con el valor reportado en el periodo 2019-2020.

Se evidenció que los determinantes de la calidad que tuvieron un mayor cumplimiento de los objetivos de calidad en el tramo II fueron pH, Coliformes fecales y Ntotal, mientras que los demás determinantes presentaron condiciones críticas, incluso un mayor incumplimiento en comparación con los porcentajes obtenidos en el tramo III donde se evidenció una leve recuperación del río. Es así como los determinantes de la calidad del agua Coliformes fecales, Ntotal, DBO₅, Ptotal y pH tienen un mayor porcentaje de cumplimiento en tramo III donde los objetivos son menos restrictivos. Incluso, la dinámica y magnitud de las concentraciones de los determinantes evaluados son muy similares en los tramos II y III, principalmente entre los puntos de monitoreo Avenida Ferrocarril y Avenida Américas respectivamente.

En cuanto a la calidad del río Tunjuelo se determinó que la calidad del agua en el tramo I se mantuvo, ya que continua en la clasificación [Buena]. La reducción en la calidad de este tramo, comparando el periodo 2020 con el periodo 2019-2020, estuvo asociada al incumplimiento de los objetivos de calidad de dos determinantes: SST y Ntotal, que a su vez dependieron del cierre y apertura de las compuertas del embalse La Regadera.

El tramo II también presentó un comportamiento estable en la clasificación del índice WQI, ya se mantuvo en [Aceptable], en comparación con el periodo 2019-2020, debido al incumplimiento de los objetivos de calidad de los SST, DQO, pH, y DBO₅, que son el resultado de las descargas realizadas por la actividad de aprovechamiento de material pétreo y la Planta de Tratamiento de

Página 55 de 57

Lixiviados Doña Juana, localizadas aguas arriba del punto de monitoreo Doña Juana. Sin embargo, con relación al periodo establecido como línea base se estableció una leve mejora incrementando la categoría de [Marginal] a [Aceptable].

En general, en todos los tramos del río Tunjuelo se mejoró la calidad del agua, tal como refleja el WQI con respecto a la línea base (2018-2019), evidenciando un cambio en la clasificación del índice, en los tramos II y IV, en este último la categoría pasó de [Pobre] a [Marginal]. Los determinantes de la calidad del agua que se alejaron en mayor proporción del objetivo de calidad de los tramos III y IV fueron: OD, DQO, Ntotal y DBO₅. A diferencia del tramo III el determinante SAAM es uno de los más críticos tanto en la cantidad de datos que incumplen como en el valor por el cual se supera el objetivo de calidad en el tramo IV, asociado a la descarga de aguas residuales generada por la descarga de vertimientos asociados con el sistema de alcantarillado sanitario de la ciudad entre ellos el interceptor Tunjuelo Medio.

En términos generales los principales ríos de Bogotá presentan una evolución en la calidad del agua, sin embargo, resulta fundamental para la ciudad y la región avanzar en la planificación, la generación de conocimiento, la gestión de la información, la gobernabilidad y la apropiación del recurso hídrico como eje estructural de la sociedad, para que exista una mejora significativa en las condiciones de calidad de los ríos urbanos.

4 REFERENCIAS

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.

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.

Iglewicz B., and Hoaglin D. (1993). How to detect and handle outliers. ASQC Quality Press.

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.



REINALDO GELVEZ GUTIERREZ
SUBDIRECCION DE RECURSO HIDRICO Y DEL SUELO

Elaboró:

ANA LUCIA ZORRO GOMEZ	C.C: 63486967	T.P: N/A	CPS: CONTRATO SDA-CPS-20201920 DE 2020	FECHA EJECUCION:	29/12/2020
-----------------------	---------------	----------	--	------------------	------------

Revisó:

DAVID FELIPE PEREZ SERNA	C.C: 80073805	T.P: N/A	CPS: CONTRATO 20201448 DE 2020	FECHA EJECUCION:	30/12/2020
--------------------------	---------------	----------	--------------------------------	------------------	------------

Aprobó:

Firmó:

REINALDO GELVEZ GUTIERREZ	C.C: 79794687	T.P: N/A	CPS: FUNCIONARIO	FECHA EJECUCION:	30/12/2020
---------------------------	---------------	----------	------------------	------------------	------------