



ALCALDÍA MAYOR
DE BOGOTÁ D.C.

SECRETARÍA DE AMBIENTE

SECRETARÍA DISTRITAL DE AMBIENTE

Folios: 50 Anexos: 0

Proc. # 6454384 Radicado # 2024IE269034 Fecha: 2024-12-19

Tercero: 899999061-9 126 - SECRETARIA DISTRITAL DE AMBIENTE

Dep.: SUBDIRECCIÓN DE RECURSO HIDRICO Y DEL SUELO

Tipo Doc.: Informe tecnico

Clase Doc.: Interno

SECRETARÍA DISTRITAL DE AMBIENTE

Informe Técnico No. 05911, 19 de diciembre del 2024

INFORME TÉCNICO

ÍNDICE DE CALIDAD DEL AGUA, WQI, EN LOS PUNTOS DE MONITOREO DE LA RED DE CALIDAD HÍDRICA DE BOGOTÁ- TRADICIONAL PARA PERÍODO 2023-2024



La Regadera, río Tunjuelo

2024

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

Página 1 de 50



SECRETARÍA DE
AMBIENTE

INFORME TÉCNICO:

ÍNDICE DE CALIDAD DEL AGUA, WQI, EN LOS PUNTOS DE MONITOREO DE LA RED DE CALIDAD HÍDRICA DE BOGOTÁ-TRADICIONAL PARA PERÍODO 2023-2024

ELABORÓ:

HARRISON RINCÓN
Profesional Técnico de Apoyo

DAVID ZAMORA
Profesional Técnico de Apoyo

REVISÓ

DAVID FELIPE PÉREZ SERNA
Grupo Recurso Hídrico Superficial

APROBÓ

JUAN DAVID ARISTIZÁBAL
Subdirector del Recurso Hídrico y del Suelo

Página 2 de 50

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
<u>INTRODUCCIÓN</u>	8
<u>1 MATERIALES Y MÉTODOS</u>	10
1.1 MONITOREOS DE LA CALIDAD Y CANTIDAD DEL AGUA EN LOS PUNTOS DE LA RCHB	10
1.2 ÍNDICE DE CALIDAD DEL AGUA – WQI	13
<u>2 RESULTADOS</u>	14
2.1 MONITOREOS DE LA CALIDAD Y CANTIDAD DEL AGUA EN LOS PUNTOS DE LA RCHB	15
2.2 EVALUACIÓN DEL WQI PARA EL PERÍODO 2023-2024	20
2.3 EVALUACIÓN DEL INCUMPLIMIENTO DE LOS OBJETIVOS DE CALIDAD	20
2.4 RESULTADOS DEL WQI PARA TODOS LOS TRAMOS DE LA RCHB-T	26
2.5 DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE WQI EN LA RCHB-T	33
2.6 ANÁLISIS DE PRECIPITACIÓN Y CAUDAL DE LOS TRAMOS INICIALES	38
2.7 EVOLUCIÓN DEL WQI EN EL PERÍODO 2014 A 2023	42
<u>3 CONCLUSIONES</u>	44
<u>REFERENCIAS</u>	49

SIGLAS, ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS

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
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
SST	Sólidos Suspendidos Totales
PT – Ptotal	Fósforo Total
GyA	Grasas y Aceites
SAAM	Sustancias activas al azul de metileno
pH	Potencial de Hidrógeno
PSMV	Plan de Saneamiento y Manejo de Vertimientos
PT - PTotal	Fósforo Total
Col.Fec	Coliformes Fecales
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
SDA	Secretaría Distrital de Ambiente
PM	Punto de Monitoreo
TO-T1	Tramo 1 del río Torca
TO-T2	Tramo 2 del río Torca
SA-T1	Tramo 1 del río Salitre
SA-T2	Tramo 2 del río Salitre
SA-T3	Tramo 3 del río Salitre
SA-T4	Tramo 4 del río Salitre
FU-T1	Tramo 1 del río Fucha
FU-T2	Tramo 2 del río Fucha

Página 4 de 50



**SECRETARÍA DE
AMBIENTE**

FU-T3	Tramo 3 del río Fucha
FU-T4	Tramo 4 del río Fucha
TU-T1	Tramo 1 del río Tunjuelo
TU-T2	Tramo 2 del río Tunjuelo
TU-T3	Tramo 3 del río Tunjuelo
TU-T4	Tramo 4 del río Tunjuelo

Página 5 de 50

ÍNDICE DE FIGURAS

Pág.

Figura 1. Red de Calidad Hídrica de Bogotá – Tradicional, conformada por 30 puntos de monitoreo	11
Figura 2. Cantidad de monitoreos por tramo y el porcentaje monitoreos por río con respecto al total de la RCHB en el periodo 2023-2024	13
Figura 3. Porcentaje de datos clasificados como atípicos por cada determinante y tramo de los ríos de la RCHB	17
Figura 4. Cantidad de datos clasificados como válidos y frente al total de datos cada tramo de los ríos de la RCHB en el periodo 2023 II - 2024 I	20
Figura 5. Cantidad de datos que incumplieron los OC en el periodo 2023-2024 clasificados por tramo y porcentajes de incumplimiento de los OC para toda la RCHB.	21
Figura 6. Clasificación de la longitud en kilómetros de los tramos de los ríos de la RCHB según su WQI para el periodo 2023-2024.....	34
Figura 7. Distribución del WQI en los tramos de la RCHB-T para el periodo 2023-2024.....	37
Figura 8. Resultados de la precipitación acumulada mensual mm	40
Figura 9. Evolución temporal de ríos los urbanos por categoría de calidad de agua según el WQI	43

Página 6 de 50

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Clasificación de los determinantes de la calidad del agua medidos in situ y en laboratorio	10
Tabla 2. Categorización, clasificación y caracterización de los rangos del WQI	14
Tabla 3. Valores del WQI y sus factores	26
Tabla 4. Longitud de los ríos de la RCHB clasificados por WQI desde 2014 a 2024	43

Página 7 de 50

INTRODUCCIÓN

Las corrientes hídricas principales de la ciudad, como los ríos Tunjuelo, Fucha, Salitre y Torca, han sufrido durante décadas la presión de las descargas de aguas residuales de quienes habitan el Distrito Capital. En respuesta, 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. Este índice permite evaluar y clasificar la calidad del agua, simplificando datos complejos y facilitando su interpretación y comparación a lo largo del tiempo, lo que representa un paso fundamental hacia la restauración y protección de los sistemas hídricos de la ciudad.

Con el fin de contar con los datos para determinar la calidad de estos cuerpos de agua, la Secretaría Distrital de Ambiente – SDA, 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 acciones 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 últimos períodos ningún río presentó una categoría de calidad de agua Pobre ($WQI < 45$), situación que históricamente nunca había sucedido, lo cual representa un esfuerzo significativo en el continuo desarrollo de actividades de evaluación, control y seguimiento sobre los factores de impacto ambiental derivados de las actividades que inciden sobre el recurso hídrico de la ciudad.

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 comprendida entre el segundo semestre del año 2023 y el primer semestre del 2024.¹

¹ 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.

1 MATERIALES Y MÉTODOS

En el presente capítulo se realiza una breve descripción de las generalidades de las jornadas de monitoreo de calidad y cantidad del agua que se llevaron a cabo en el periodo 2023 - 2024 en los puntos que conforman la RCHB-T. En cuanto a los aspectos metodológicos de validación de los datos (detección de datos atípicos) y la metodología para calcular el índice de calidad hídrica (WQI) se siguieron cada uno de los pasos que se encuentran detallados en el numeral 1.1 a 1.3 del Informe Técnico con número "ÍNDICE DE CALIDAD DEL AGUA, WQI, EN LOS PUNTOS DE MONITOREO DE LA RED DE CALIDAD DE HÍDRICA DE BOGOTÁ-TRADICIONAL PARA AÑO 2020" con proceso SDA No. 4980484.

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 períodos de dos horas y alícuotas cada media hora), toma de datos de campo *in situ* y aforo 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) (ver Figura 1).

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

Monitoreo	Determinantes de la calidad del agua
Mediciones <i>in situ</i>	Caudal, pH, Temperatura, Conductividad y Oxígeno Disuelto.

Monitoreo	Determinantes de la calidad del agua
En laboratorio	DBO ₅ , DQO, SST, Grasas y Aceites, Surfactantes Activos al Azul de Metileno (SAAM), PTotal, NTotal (Kjeldahl, Nitratos, Nitritos) y Coliformes Fecales.

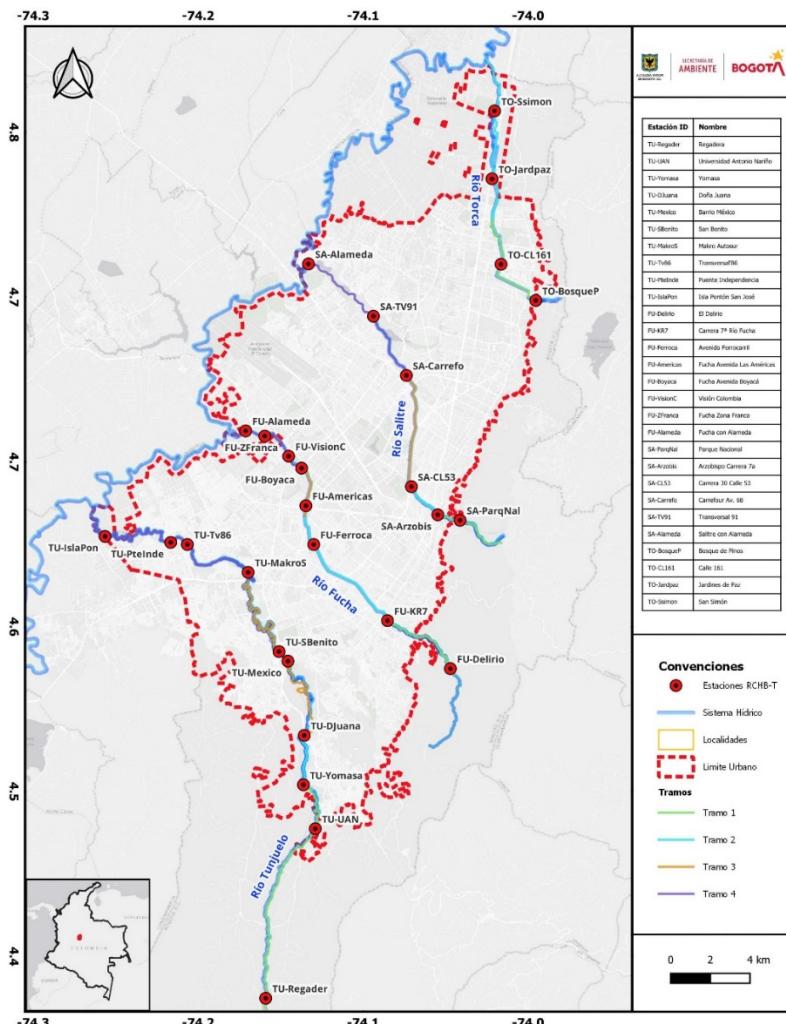


Figura 1. Red de Calidad Hídrica de Bogotá – Tradicional, conformada por 30 puntos de monitoreo

Página 11 de 50

Durante el segundo semestre del año 2023 y el primer semestre del 2024, la SDA continuó la ejecución del contrato de prestación de servicios No. SDA – 20211379 de 2021 con la Unión Temporal UT PSL-ANQ. Este contrato permitió la recolección sistemática de muestras y análisis fisicoquímico y microbiológicas en las estaciones de la RCHB, con el objetivo de realizar el seguimiento y evaluación periódica de los determinantes de calidad de los cuerpos de agua superficial de la ciudad.

En el marco de la ejecución de este contrato, específicamente para la RCHB-T, se efectuaron 374 eventos de monitoreo que fueron utilizados para la determinación del índice WQI. La campaña de monitoreo inició el 4 de julio de 2023 y finalizó el 28 de junio de 2024. Los muestreos fueron distribuidos estratégicamente en los puntos de monitoreo ubicados a lo largo de los cuatro sistemas hídricos principales que conforman la RCHB-T, implementando una programación mensual sistemática que permitió caracterizar las condiciones hidrológicas y las variaciones climáticas estacionales durante el período 2023 II – 2024 I.

En cuanto a la distribución de los monitoreos, el río Tunjuelo representa la mayor proporción de muestras analizadas para el cálculo del WQI, con 132 muestras que constituyen el 35 % del total. Esta predominancia se fundamenta en su mayor extensión geográfica y compleja dinámica hidrológica. En orden descendente, los ríos Fucha y Salitre contribuyeron con el 29 % (108 muestras) y 22 % (82 muestras) respectivamente del total de monitoreos efectuados. Finalmente, el río Torca, debido a su menor extensión longitudinal y consecuente número reducido de puntos de monitoreo de control (cuatro en total), aportó 52 muestras, equivalentes al 14 % del programa de monitoreo integral.

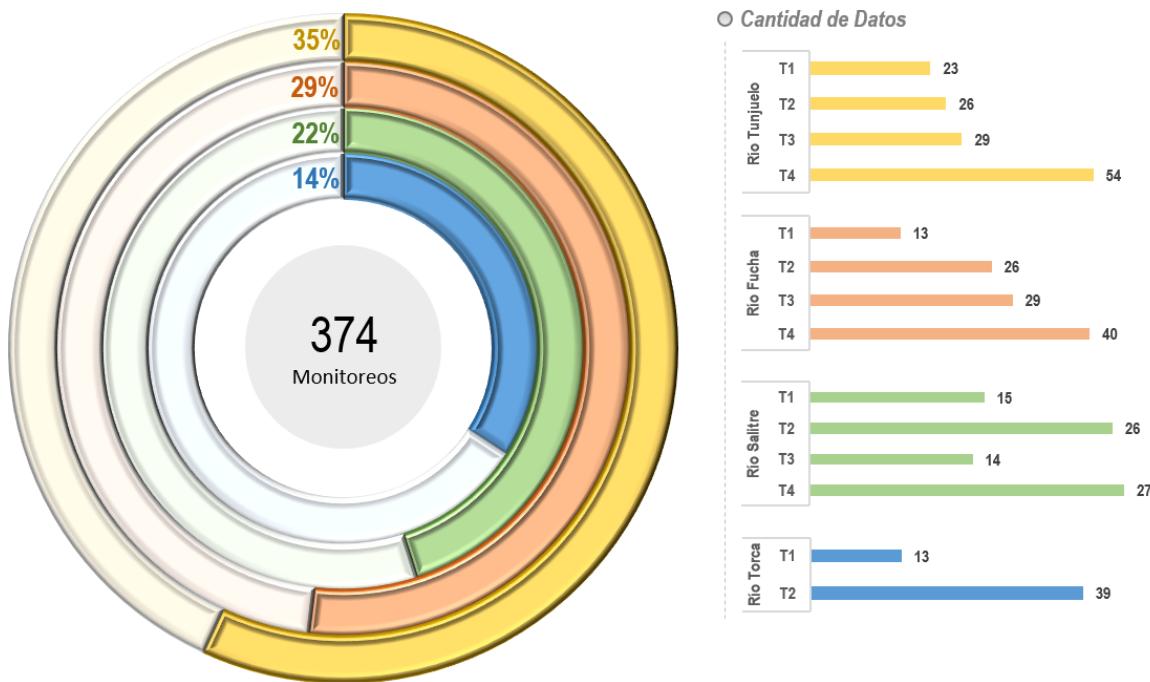


Figura 2. Cantidad de monitoreos por tramo y el porcentaje monitoreos por río con respecto al total de la RCHB en el periodo 2023-2024

1.2 ÍNDICE DE CALIDAD DEL AGUA – WQI

Los índices de calidad del agua integran múltiples datos que se recopilan de determinadas variables de calidad de agua dentro de una ecuación matemática la cual estima el estado del cuerpo de agua con un número que está dentro de una escala determinada de 0 a 100, que a su vez está dentro de una escala relativa que clasifica la calidad del agua desde pobre hasta excelente.

La administración de Bogotá adoptó como índice de calidad de agua el WQI (por sus siglas en inglés Water Quality Index), la cual tiene unos rangos numéricos y unas categorías según el

número obtenido, la información base para el cálculo del índice son los monitoreos ejecutados durante el periodo.

De esta manera, el WQI determina de una forma aproximada el estado anual (junio a julio) de la calidad del recurso hídrico y con esto establecer las variaciones por tramos (espacial y temporal). Esta información es útil para planificar y ejecutar acciones priorizadas que mitiguen los factores que impactan de forma negativa la calidad del recurso hídrico. El resultado del WQI se clasifica en las siguientes categorías:

Tabla 2. Categorización, clasificación y caracterización de los rangos del WQI

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

2 RESULTADOS

A continuación, se presentan los análisis obtenidos, iniciando con la validación de los datos recopilados durante el período evaluado con el fin de verificar la integridad de la información recolectada. Posteriormente, se evalúan los resultados del índice de calidad de los tramos que conforman los principales ríos, por medio de los datos obtenidos del periodo 2023 - 2024, los

Página 14 de 50

cuales se sintetizan mediante diversas representaciones gráficas, lo que facilita la comprensión y la visualización de los datos obtenidos.

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

Para la determinación del índice de calidad es necesario la depuración de valores atípicos con el fin de garantizar la precisión, integridad y utilidad de los resultados, dado que pueden influir significativamente en la clasificación general de la calidad del agua, lo que podría llevar a evaluaciones inexactas o sesgadas. En el mapa de calor () se muestran los porcentajes de datos atípicos por tramo por cada uno de los diez (10) determinantes evaluados. Los siguientes son los principales hallazgos:

- El determinante Col.Fec cuenta con la mayor incidencia de datos atípicos, donde 12 tramos de los catorce que conforman los cuerpos hídricos principales de la ciudad presentan un porcentaje de valores atípicos superior al 10%, exceptuando los tramos del río Torca que no registraron este tipo de datos atípicos. El segundo con mayor frecuencia de datos atípicos corresponde a los SST, con 11 tramos, presentando valores que oscilan en el rango de 5% al 23%, excluyendo los tramos SA-T2, SA-T3 y SA-T4. En contraste, el pH fue el único determinante que mostró estabilidad, con ausencia de valores atípicos en 11 tramos, exceptuando TU-T1, TO-T2 y TU-T4 con porcentajes inferiores al 3% para los dos primeros tramos, mientras que el último registró un 13%. Es necesario señalar que la sensibilidad de este determinante a los valores atípicos puede estar relacionada con condiciones específicas durante la toma y preservación de las muestras, así como con la variabilidad intrínseca en sus concentraciones, que dependen de la dinámica de las descargas de aguas residuales.
- Los tramos iniciales de cada sistema hídrico evidencian una mayor incidencia de valores atípicos, manifestada tanto en porcentajes significativamente más elevados como en una mayor cantidad de determinantes con valores anómalos, en comparación con los tramos subsecuentes de cada cuerpo de agua. Para el río Torca se puede observar que en su tramo

Página 15 de 50

inicial obtuvo la mayor cantidad de determinantes (SST, SAAM, y NTotal) con un porcentaje igual al 23.1% para las tres variables de calidad. En lo que respecta a la zona alta del río Fucha, se observa que los principales determinantes con porcentaje significativos son: Col.Fec, GyA, OD, DQO y SST, pero este último registro el valor más alto con un 23.1%, mientras que el resto obtuvo un 15.4%. En relación con la zona alta del río Salitre, los determinantes de SST, DBO₅, DQO y Col.Fec presentaron los porcentajes más elevados de atípicos, alcanzando un 14.3 % cada uno, pero el de mayor relevancia es SAAM con un valor de 21.4%. Mientras que para el río Tunjuelo el valor máximo en su tramo inicial se registró en cinco (5) determinantes (pH, SST, GyA, SAAM y Col.Fec) con un valor de 13%.

- El determinante SST presentó valores atípicos en la totalidad de los tramos evaluados, mientras que para GyA, Col.Fec, DQO, SAAM, NTotal y PTotal se obtuvieron concentraciones atípicas entre 11 a 12 de los tramos objeto de análisis.

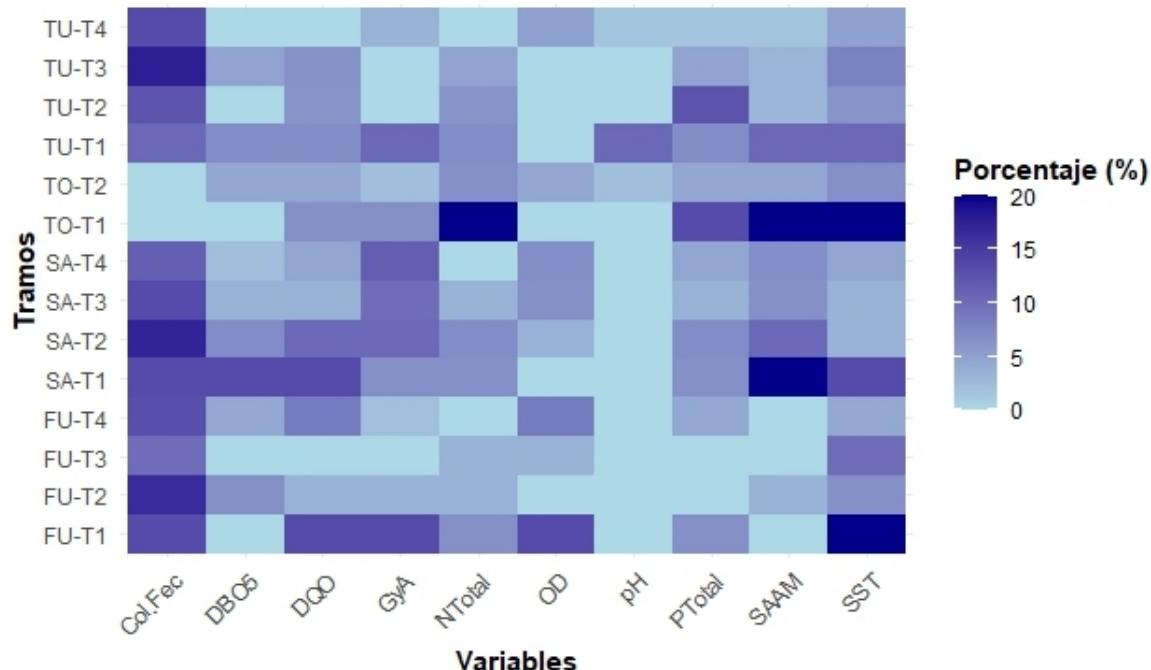


Figura 3. Porcentaje de datos clasificados como atípicos por cada determinante y tramo de los ríos de la RCHB

En la Figura 4, se presenta una comparación entre la cantidad de datos iniciales, que incluye los valores atípicos, representados por las barras horizontales de color gris, y el conjunto de datos finales o válidos obtenidos después de la depuración (sin atípicos), representados por las barras de color azul claro.

En el análisis del río Salitre, se evidencia una distribución heterogénea de valores atípicos entre sus tramos constituyentes. Los tramos SA-T2 y SA-T4 presentaron la mayor frecuencia absoluta de valores atípicos, registrando 22 y 23 observaciones anómalas respectivamente. Al realizar un análisis comparativo de la proporción de datos atípicos respecto al total de observaciones en estos dos tramos, se identifica que el tramo final (SA-T4) presenta un porcentaje de valores

anómalos ligeramente inferior al tramo SA-T2, a pesar de la diferencia significativa en el volumen total de datos entre ambos tramos. Esta particularidad se explica dado que el tramo final concentra el mayor volumen de datos (410 resultados) al estar constituido por tres (3) estaciones de monitoreo (SA-Makro, SA-TV91 y SA-Alameda) para este cuerpo de agua, mientras que el tramo II cuenta con dos estaciones (SA-Arzobis y SA-CL53), registrando 270 datos, equivalente al 66 % del volumen de datos obtenido en el último tramo. En el extremo opuesto, el tramo inicial, conformado por una única estación de monitoreo (SA-ParqNal), registró la menor cantidad absoluta de valores atípicos con 14 registros, resultando en 126 datos validados para el análisis. No obstante, es relevante destacar que estos 14 datos atípicos constituyen el 10% del total (140 resultados) para este tramo, representando paradójicamente la mayor proporción relativa de valores atípicos al relacionar estos con el número total de observaciones por tramo en el río Salitre.

En el caso del río Fucha, el tramo FU-T4 evidencia una frecuencia de valores atípicos que representa el 5 % del conjunto inicial de datos, correspondiente a 21 registros atípicos de un total de 400 observaciones, resultando en 379 datos válidos para el análisis. Este tramo se destaca por presentar la mayor cantidad absoluta de valores anómalos en comparación con los otros tres tramos, lo cual es consistente con su mayor volumen de datos (400 resultados) dentro de este cuerpo de agua. En términos de proporción relativa de datos atípicos, el tramo inicial (FU-T1) registró el valor más significativo con un 10 %, equivalente a 13 registros atípicos de un total de 117 datos. Es notable mencionar que, aunque el tramo FU-T2 presentó la misma cantidad absoluta de valores anómalos (13 registros), estos representan solo el 5 % de su conjunto de datos, dado que su volumen muestral es considerablemente mayor (270 observaciones), resultando en 257 registros validados.

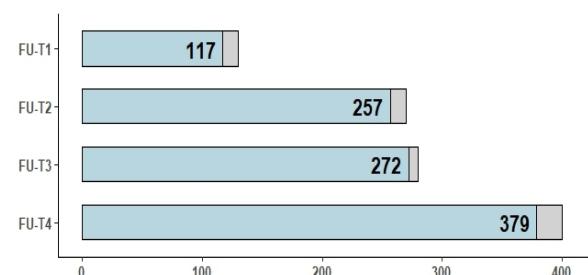
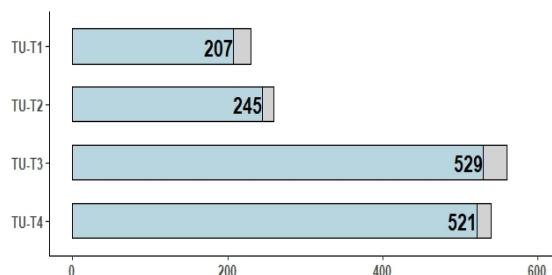
En relación con el río Tunjuelo, se identificó que los tramos TU-T1 y TU-T3 presentaron la mayor incidencia de valores atípicos en sus registros. El tramo TU-T1 arrojó 207 datos validados para el análisis, tras excluir 23 registros identificados como atípicos, lo que representa el 10% del total de observaciones (230 datos). Por su parte, el tramo TU-T3 reportó un 6 % de valores atípicos (31 registros) sobre un total de 560 datos considerados, es decir que 529 fueron validados. Si bien

este porcentaje no es el más significativo en términos a su volumen de datos, la cantidad absoluta de datos atípicos (31 registros) representa el valor más elevado entre todos los tramos evaluados en los cuatro sistemas hídricos principales.

El tramo final (TU-T4) alcanzó la misma cantidad de datos validados (521) que el tramo tres del río Tunjuelo, aunque con una menor cantidad de atípicos, registrando 19 observaciones anómalas (4%) del conjunto inicial de 540 datos. Respecto al tramo TU-T2, este presentó la menor frecuencia de datos atípicos en el río Tunjuelo con 15 registros, que representan el 6 % del total de observaciones, resultando en 245 datos válidos para el análisis.

Finalmente, en el río Torca se identificaron y eliminaron los valores atípicos en los dos tramos que no superan el 10 % del conjunto de datos inicial de cada tramo. Es decir, que se registraron 13 valores atípicos para el TO-T1 y 18 para el TO-T2, de un total de 130 y 390 registros, respectivamente.

Luego de establecer el conjunto de datos válidos conforme la detección y la eliminación de atípicos en cada punto de monitoreo, se determina el índice de calidad del agua.



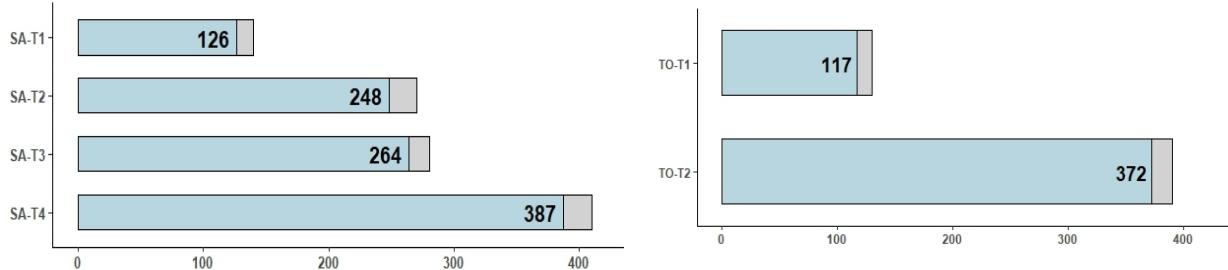


Figura 4. Cantidad de datos clasificados como válidos y frente al total de datos cada tramo de los ríos de la RCHB en el periodo 2023 II - 2024 I

2.2 EVALUACIÓN DEL WQI PARA EL PERÍODO 2023-2024

A partir de los datos validados se realiza el cálculo de los tres factores que permiten estimar el Índice de Calidad del Agua (WQI). A continuación, se presentan los resultados del cumplimiento de los objetivos de calidad hídrica y sus respectivos análisis para los ríos Torca, Salitre, Fucha y Tunjuelo. Luego, se evalúan los valores consolidados del WQI para el periodo 2023 - 2024 de los tramos que conforman los ríos, así como su clasificación de acuerdo con las categorías del índice.

2.3 EVALUACIÓN DEL INCUMPLIMIENTO DE LOS OBJETIVOS DE CALIDAD

En primer lugar, se contempla el análisis de porcentaje de incumplimiento de los objetivos de calidad de los determinantes, contemplados en el artículo 3 de la resolución 5731 de 2008, para cada tramo de las fuentes hídricas principales de la ciudad por medio de una gráfica de barras apiladas (Figura 5).

En el eje horizontal de la Figura 5, se representa la cantidad de datos por determinante que no cumplieron con los objetivos establecidos, mientras que en el eje vertical se muestran los distintos tramos de cada río. Las barras horizontales están divididas en segmentos coloreados que

representan los diferentes determinantes evaluados y el grado de incumplimiento. En la leyenda se muestra el porcentaje de los datos que incumple el objetivo de calidad con respecto a la totalidad de datos validados por determinante, para toda la RCHB-T durante el periodo evaluado.

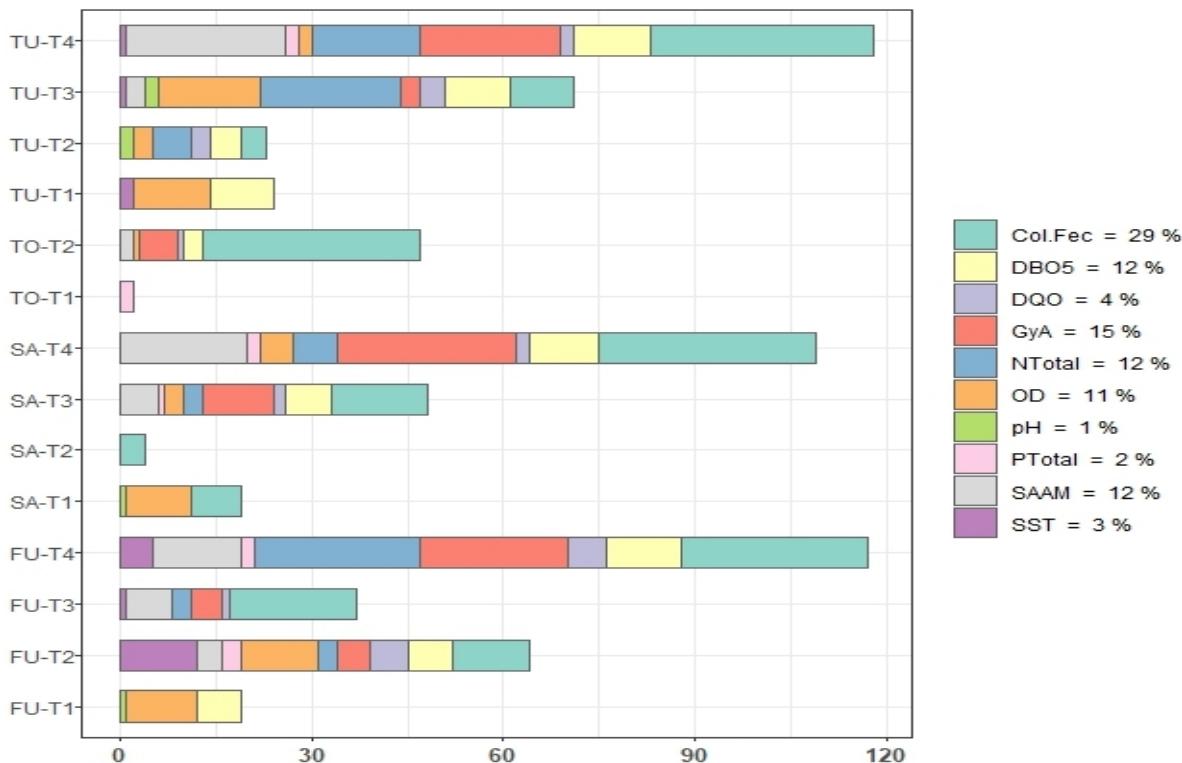


Figura 5. Cantidad de datos que incumplieron los OC en el periodo 2023-2024 clasificados por tramo y porcentajes de incumplimiento de los OC para toda la RCHB.

Al analizar los resultados relacionados con el incumplimiento de los determinantes en los tramos iniciales (TU-T1, FU-T1 y SA-T1) de los ríos evaluados, se evidencia que el determinante OD presenta la mayor cantidad de datos que no cumplen con los valores de referencia establecidos

Página 21 de 50

como OC en estos tramos. El porcentaje de incumplimiento más crítico se registró en TU-T1 y FU-T1, donde el 100% de los datos validados excedieron los límites establecidos. Para el SA-T1, 10 de los 14 registros validados no cumplieron con el valor de referencia (71%). Respecto a la cantidad de determinantes con datos que superaron los valores de referencia, se identificó que TO-T1 presenta el menor incumplimiento, registrando únicamente incumplimiento en el PTTotal con 2 datos que representan el 18 % de las observaciones para este determinante. En contraste, los demás tramos iniciales (TU-T1, FU-T1 y SA-T1) evidencian incumplimientos en tres determinantes, siendo el OD el de mayor frecuencia de registros que exceden los OC en estos tramos.

Los tramos FU-T1 y SA-T1 coinciden con el incumplimiento del pH, aparte del OD, siendo este el de menor incidencia de datos que incumplen, con un único registro en ambos tramos. En cuanto al tercer determinante que excede los OC, se obtiene que para el tramo SA-T1 son los Col.Fec con un 67% de incumplimiento, mientras que FU-T1 registró un 54% para la DBO₅. Por su parte, en el tramo inicial del río Tunjuelo, además del OD, los otros dos determinantes que incumplieron los valores objetivos fueron SST con un 20 % y DBO₅ con un 83 %, siendo este último el segundo valor con la mayor cantidad de datos que excedieron los OC (12 registros) en este tramo.

Al analizar la proporción de datos que incumplieron los OC respecto al total de cada tramo inicial, se puede establecer que el tramo con menor incidencia de datos que incumplen es TO-T1, con solo un 2 %. Por el contrario, el tramo con mayor cantidad de incumplimiento es TU-T1, con el 22% de sus datos que exceden los OC. Le siguen en orden descendente FU-T1 con el 16 % y SA-T1 con el 15 %.

En el segundo tramo de los ríos Torca, Fucha y Tunjuelo, se observa un incremento superior al 50 % de la cantidad de determinantes que no cumplen con los OC en comparación con el primer tramo, con excepción al tramo II del río Salitre. El patrón que predomina en estos cuerpos de agua se relaciona con la influencia de los vertimientos asociados con aguas residuales procedentes de del sistema de alcantarillado que afectan la calidad del agua.

En este contexto, se observa que el tramo FU-T2 presenta la mayor incidencia de determinantes que no cumplen con los OC, ya que un total de nueve (OD, DBO₅, DQO, SST, GyA, SAAM, PTTotal,

NTotal y Col.Fec) de las diez variables analizadas mostraron registros fuera de los límites establecidos como OC. Esto se traduce en 64 datos que incumplieron, lo que representa un 25% del total de datos en este tramo. Los determinantes más críticos en términos de incumplimiento son el OD y los Col.Fec, cada uno con 12 registros que constituyen el 44 % y el 55 %, de los datos para cada determinante respectivamente. A estos determinantes los siguen la DBO₅ y la DQO con 7 y 6 datos de que excedieron los valores objetivo, equivalentes al 28% y 23%, respecto al total de los datos válidos de cada determinante.

En cuanto a los tramos TU-T2 y TO-T2, ambos presentan 6 determinantes que no cumplen con los valores objetivos. En TO-T2 se registraron 47 datos que exceden los OC, posicionando como el segundo tramo con mayor cantidad de incumplimientos, seguido por TU-T2 con 23 datos. Al analizar los determinantes, se observó que el OD, pH, DBO₅, DQO, Col.Fec y NTotal en el TU-T2 registraron cantidades entre 2 y 6 datos con incumplimiento, que equivalen entre el 8% al 25% del total de los datos válidos por determinante. En suma, estos incumplimientos constituyen el 9% (23 datos) del total de datos en este tramo (245 datos), siendo el NTotal el determinante más crítico con 6 registros. Por su parte, en TO-T2 en los seis determinantes que incumplieron (OD, DBO₅, DQO, GyA, Col.Fec y SAAM) se obtuvo un total de 47 registros que excedieron los OC. En este caso, los Col.Fec son responsables del mayor porcentaje de incumplimiento, representando el 70% de los datos totales (34 de 47 registros). Este último determinante alcanzó un 87% de incumplimiento, lo cual hace evidente la afectación debido a las descargas de agua residual doméstica asociadas con la problemática de conexiones erradas procedentes del sistema de alcantarillado público y la inexistencia de un sistema de alcantarillado para la parte baja de la cuenca (desde Jardines de Paz hasta la desembocadura al río Bogotá).

Es necesario destacar que el tramo SA-T2 registró la menor incidencia de incumplimiento, presentando únicamente excedencias en Col.Fec con 4 registros, lo que representa tan solo el 2 % del total de datos validados (248) en este tramo.

En el tercer tramo de los ríos Tunjuelo, Fucha y Salitre, se destaca que TU-T3 presenta la mayor cantidad de datos y determinantes que no cumplen con los OC. En este tramo, se identificaron nueve variables de calidad que incumplen (OD, pH, DBO₅, DQO, SST, GyA, SAAM, Col.Fec y NTotal)

Página 23 de 50

con un total de 71 datos, representando el 13 % de los registros del tramo TU-T3 (529 datos). Los determinantes más relevantes por su incumplimiento son: DBO₅ (19%), Col.Fec (22 %), OD (29%) y NTotal (42 %). Estos cuatro determinantes concentran el 82 % del total de datos que incumplen en este tramo (58 de 71 registros).

En contraste, el FU-T3 presenta la menor cantidad de datos y determinantes que superan los valores establecidos como objetivo, con un total de 37 registros distribuidos en 6 determinantes (DQO, SST, GyA, SAAM, NTotal, GyA y Col.Fec), siendo los Col.Fec el más crítico con una tasa de incumplimiento del 80 %, concentrando el 54% del total de datos que incumplen en este tramo (20 de 37 registros). En cuanto al SA-T3, se identificaron ocho determinantes (OD, DBO₅, DQO, GyA, SAAM, PTotal, Col.Fec y NTotal) con datos que excedieron los OC, siendo la GyA y los Col.Fec las variables más críticas en términos de incumplimiento, con un 44 % y 63 %, respectivamente. En cuanto al número de datos que incumplieron, el 18 % de los registros validados (48 resultados) no cumplen los OC en el tramo.

Respecto al último tramo de los ríos Salitre, Fucha y Tunjuelo, se observó que no existe una diferencia en la cantidad de determinantes y datos que superan los valores objetivos entre estos tramos (TU-T4, FU-T4 y SA-T4). Al respecto, el FU-T4 como SA-T4 presentan ocho variables con datos que incumplen los OC, acumulando 117 y 109 registros, lo que equivale al 31% y 28% del total de datos en estos tramos, respectivamente. En el tramo TU-T4, se identificaron 9 determinantes con 118 registros que exceden los OC, representando el 23% del total de datos en este tramo. En relación con el análisis por determinante, se identificó que las GyA, SAAM, NTotal, DBO₅ y Col.Fec presentaron la mayor frecuencia de incumplimiento en los tramos finales de los tres ríos. En particular, Col.Fec se destacó como el parámetro más crítico con porcentajes de incumplimiento superiores al 76% en estos tramos. Los demás determinantes registraron porcentajes de incumplimiento que oscilan entre el 17% y el 78% respecto al total de datos de cada variable en su respectivo tramo. En cuanto a los determinantes que mantuvieron el cumplimiento de los OC, se evidencia que en TU-T4 únicamente el pH no registró excedencias, en FU-T4 fueron el OD y pH, mientras que en SA-T4 el cumplimiento se mantuvo en pH y SST.

Estas condiciones de calidad del agua en los últimos tramos de los ríos están principalmente asociadas con el aporte de aguas residuales del sistema de alcantarillado público de la ciudad; entre los puntos que representan un mayor impacto en la calidad del agua se encuentra: el Interceptor Tunjuelo Medio, las estaciones de bombeo Cartagenita, Grancolombiano y La Isla para el caso específico del río Tunjuelo. Para el río Fucha, se encuentran los interceptores Kennedy, Boyacá, Sur, Fucha Izquierdo y la estación elevadora de Fontibón. Mientras que para el río Salitre el vertimiento de las estructuras de alivio pertenecientes al sistema de alcantarillado combinado que descargan en el tramo III y que dominan la calidad del agua del río hasta su parte final.

En términos generales, aproximadamente el 18% de los datos evaluados para el periodo 2023-2024 no cumplen con los OC. El determinante con mayor cantidad de registros incumplidos es el de Coliformes Fecales (Col.Fec), que presenta 205 registros, lo que equivale al 29% del total de datos que excedieron los OC. Estos incumplimientos están distribuidos en los tramos II, III y IV de los ríos, incluyendo el tramo inicial del río Salitre, que es el único tramo inicial con datos que no cumplen para este determinante. En segundo lugar, se encuentran las GyA, que representan un 15% del total de datos que superan el valor objetivo, predominando en los tramos III y IV, así como en el segundo tramo de los ríos Fucha y Torca. Es importante destacar que estos dos determinantes (Col.Fec y GyA) presentan sus mayores concentraciones de incumplimiento en los tramos finales de los cuatro ríos, donde se concentra el 77 % de los datos que excedieron los OC para ambos. Por otra parte, en una menor proporción de incumplimiento, pero igualmente relevantes, se encuentran la DBO₅ con 84 datos, el NTotal con 87 registros y las SAAM con 81 observaciones, representando cada uno aproximadamente el 12% de los valores que no cumplen el OC respecto a la totalidad de datos validados por determinante. Cabe mencionar que el determinante pH presenta la menor incidencia de incumplimientos, con solo seis registros; cuatro de ellos provienen de los tramos II y III del río Tunjuelo, mientras que los otros corresponden a los tramos iniciales de los ríos Fucha y Salitre.

2.4 RESULTADOS DEL WQI PARA TODOS LOS TRAMOS DE LA RCHB-T

En la Tabla 3, se muestran los resultados del WQI para cada tramo con respecto a los resultados del periodo 2022 -2023, con los factores F1, F2, F3 y nse (excursión) empleadas en el cálculo del índice. Es necesario aclarar que los tres factores (F1, F2, F3) representan alcance, frecuencia y amplitud, el primero define la cantidad en porcentaje de variables que tienen valores fuera del rango de los objetivos de calidad para el uso que se esté evaluando respecto al total de los determinantes considerados. El segundo es la relación entre la cantidad de valores fuera de los niveles deseables respecto al total de datos de las variables estudiadas. Mientras la amplitud (F3) es una medida de la desviación que existe en los datos, determinada por la magnitud de los excesos de cada dato fuera de rango al compararlo con su umbral.

Tabla 3. Valores del WQI y sus factores

Río	Tramos	2023-2024					2022-2023
		F1	F2	nse	F3	WQI	WQI
Torca	TO-T1	10	1.709	0.0014	0.137	94	94
	TO-T2	60	12.634	0.038	3.66	65	82
Salitre	SA-T1	30	15.079	0.0328	3.173	81	93
	SA-T2	10	1.613	0.0006	0.06	94	88
	SA-T3	80	18.182	0.103	9.341	52	52
	SA-T4	80	28.165	0.107	9.668	51	52
Fucha	FU-T1	30	16.239	0.0772	7.167	80	81
	FU-T2	90	24.903	0.2029	16.869	45	52
	FU-T3	60	13.603	0.02430	2.373	65	76
	FU-T4	80	30.871	0.1137	10.213	50	57
Tunjuelo	TU-T1	30	22.43	0.1512	13.13	77	80
	TU-T2	60	9.388	0.0559	5.297	65	71
	TU-T3	90	13.422	0.0928	8.494	47	65
	TU-T4	90	22.649	0.0871	8.015	46	59

Con base en los datos validados, se determinó el WQI de los diferentes tramos de los ríos principales para el periodo evaluado (2023 -2024), obteniendo un comportamiento diverso de los resultados para cada fuente hídrica. En los ríos Torca y Tunjuelo exhiben una tendencia consistente de disminución del índice en el sentido del flujo, lo cual es concordante con el deterioro progresivo que puede tener un sistema hídrico urbano. El río Torca presenta una reducción del WQI de 94 a 65, mientras que el río Tunjuelo muestra un descenso gradual de 77 a 46 desde su tramo inicial hasta su tramo final. En contraste, los ríos Salitre y Fucha presentan un comportamiento más complejo, caracterizado por variaciones significativas en sus tramos intermedios. En el río Salitre, si bien se observa una tendencia general de disminución del WQI desde su tramo inicial (81) hasta su tramo final (51), el tramo SA-T2 registra un valor alto (94), representando el mejor índice de calidad de este río. Por su parte, el río Fucha exhibe una situación particular en su tramo FU-T2, donde se registra el valor más bajo del índice (45) para este cuerpo de agua, alterando el descenso gradual desde su parte alta (80) hasta su tramo final (50).

Para el río Fucha, los resultados del WQI permiten clasificar sus tramos en tres categorías: [Buena] para el tramo inicial con un valor de 80, [Marginal] para los tramos FU-T2 y FU-T4 con valores de 45 y 50 respectivamente, y [Aceptable] para el tramo FU-T3 con 65. Al analizar los factores que determinan el WQI, se observa que los tramos FU-T1 y FU-T3 presentan la menor frecuencia de incumplimiento de los OC, reflejado en sus valores de F2 (16.24% y 13.6% respectivamente). Sin embargo, la diferencia en su categorización se explica principalmente por el factor de alcance (F1), que representa el porcentaje de determinantes que incumplen el OC: el tramo inicial registra tres parámetros (F1=30%) mientras que FU-T3 evidencia seis parámetros (F1=60%), lo que resulta en una clasificación de calidad inferior para este último.

Por otro lado, los tramos FU-T2 y FU-T4 evidencian un deterioro significativo en la calidad del agua, reflejado en sus elevados factores F2 (24.9% y 30.87% respectivamente), que indican una alta frecuencia de datos que exceden los valores objetivo. El tramo FU-T4 registra el F2 más alto de todo el río, mientras que FU-T2 presenta el mayor factor de amplitud (F3=16.87%), indicando que en este tramo las concentraciones de los determinantes muestran las desviaciones más

significativas respecto a los valores establecidos como OC. El tramo FU-T4, aunque con un F3 menor (10.21%), mantiene desviaciones importantes. La combinación de estos factores, junto con valores elevados de F1 (90% para FU-T2 y 80% para FU-T4), explica la clasificación [Marginal] de ambos tramos, siendo FU-T2 el más crítico con un WQI de 45.2 frente a 50.1 de FU-T4.

Es relevante destacar que la magnitud y categoría del índice registrado en el tramo II se atribuye principalmente al comportamiento de la estación FU-Ferroca, donde se identificaron 57 observaciones que incumplen los OC, lo que representa el 89% del total de datos evaluados. En este tramo, únicamente el pH mantuvo el cumplimiento de los OC, mientras que el OD, DBO₅, Col.Fec y SST fueron los determinantes más críticos, concentrando el 56 % de los datos que excedieron los OC. Esta disminución en la calidad del agua se atribuye principalmente a las descargas de aguas residuales asociadas con el deficiente funcionamiento de las estructuras de alivio del sistema de alcantarillado combinado de la ciudad que vierten en las subcuencas de los canales Albina y río Seco.

El tramo final (FU-T4) registra una clasificación [Marginal] con un WQI de 50.1, resultado del comportamiento crítico y relativamente homogéneo en sus tres estaciones de monitoreo (FU-VisionC, FU-ZFranca y FU-Alameda). Este tramo presenta el factor F2 más alto del río (30.87%), indicando que aproximadamente un tercio del total de datos exceden los valores objetivo. El deterioro de la calidad se intensifica en el sentido del flujo, evidenciado por el incremento progresivo en el número de determinantes que incumplen los OC: desde 6 parámetros en FU-VisionC hasta 8 en FU-Alameda, resultando en un F1 del 80%. Esta degradación sistemática de la calidad hídrica se atribuye principalmente a las descargas de los interceptores del sistema de alcantarillado sanitario que aportan elevadas cargas contaminantes a lo largo del tramo.

En el análisis comparativo interanual, aunque se mantiene la categorización del índice respecto al período 2022-2023, se evidencia una tendencia general de disminución en los valores absolutos del WQI en todos los tramos. La reducción más significativa se registró en el tramo FU-T3 con 12 unidades, seguido por FU-T2 y FU-T4 con 7 unidades, mientras que el tramo inicial presentó una variación mínima de una unidad.

Respecto al río Torca, se identificó que en su tramo inicial (TO-T1) exhibe el valor más alto del índice de calidad durante el período evaluado (2023-2024), alcanzando un WQI de 94, que lo categoriza con calidad [Buena]. La frecuencia de incumplimientos es mínima, con aproximadamente solo el 2% del total de los datos excediendo los OC ($F2=1.71\%$), mientras que en términos de alcance, únicamente el Fósforo Total superó los valores objetivo ($F1=10\%$). Particularmente destacable es el factor F3 (0.14%), que registra uno de los valores más bajos entre todos los tramos evaluados en las fuentes hídricas de la ciudad, posicionándose como el segundo más bajo, lo que indica desviaciones mínimas respecto a los valores de referencia. Esta excelente condición de calidad muestra una notable estabilidad respecto al período anterior (2022-2023), manteniendo tanto su categorización como la magnitud del índice.

En el tramo II (TO-T2), se evidencia un deterioro significativo de la calidad hídrica con relación al período 2022-2023, registrando una disminución de 17 unidades en el valor del WQI. Esta reducción generó un cambio de categoría del tramo, pasando de [Buena] a [Aceptable] con un valor de 65. Este deterioro se atribuye principalmente al incremento en el número de determinantes que incumplen los OC, alcanzando 6 variables ($F1=60\%$) de los 10 evaluados en los monitoreos desarrollados en las tres estaciones que componen este tramo (TO-CL161, TO-Jardpaz y TO-Ssimon). El factor refleja que se registraron 47 datos que incumplieron los OC, equivalentes al 13% ($F2$) del total de datos analizados (372). La estación TO-CL161 es el punto crítico en este tramo, aportando 5 determinantes (DBO_5 , OD, DQO, GyA, SAAM y Col.Fec) y 24 datos que excedieron los OC, representando el 51% del total de incumplimientos. En contraste, las estaciones TO-Ssimon y TO-Jardpaz registraron entre uno y dos determinantes respectivamente, con un total combinado de 23 datos que incumplieron. Respecto al aporte de datos que incumplieron por determinante, los Col.Fec se identifican como la variable de calidad más crítica, acumulando 34 registros de incumplimiento en este tramo.

En relación con el río Tunjuelo, los resultados del WQI para el período 2023-2024 han clasificado su calidad en dos categorías: [Aceptable] para los tramos iniciales TU-T1 y TU-T2 con valores de 77 y 65 respectivamente, y [Marginal] para los tramos finales TU-T3 y TU-T4 con 47 y 46 unidades. En comparación con el período anterior (2022-2023), se evidencia un deterioro generalizado de

la calidad, manifestado en dos cambios significativos de categorización: el tramo inicial descendió de [Buenal] a [Aceptable], a pesar de mantener un valor relativamente alto del índice en este cuerpo de agua, y el tramo TU-T3 pasó de [Aceptable] a [Marginal], presentando la disminución más pronunciada con una reducción de 18 unidades en su índice.

El tramo inicial, constituido por el punto de monitoreo La Regadera, exhibe que aproximadamente el 22% del total de los datos no cumple con los valores de referencia ($F2=22.43\%$), equivalente a 24 registros distribuidos en tres determinantes: OD, DBO_5 y STT ($F1=30\%$). Aunque mantiene la misma cantidad de variables de calidad que incumplen respecto al periodo anterior, registra el segundo valor más alto de $F2$ y la mayor amplitud de excesos respecto a los valores de referencia ($F3=13.13\%$) en este cuerpo de agua.

La condición del tramo TU-T2 está influenciada principalmente por los resultados de la estación TU-DJuana, una de las dos que lo conforman (TU-DJuana y TU-Yomasa). Esta estación registró 5 de los 6 determinantes que incumplieron (OD, pH, DBO_5 , DQO, Col.Fec y NTotal), con 19 valores que excedieron los OC, representando el 83% de estos datos. Esta afectación se asocia principalmente al vertimiento proveniente de la Planta de Tratamiento de Lixiviados del Relleno Sanitario Doña Juana, que aporta una significativa carga contaminante en esta sección del río.

El tramo TU-T3 del río Tunjuelo, conformado por cuatro estaciones de monitoreo (TU-DJuana, TU-México, TU-MakroS y TU-SBenito), evidencia un deterioro significativo de la calidad, manifestado en el descenso de su categorización de [Aceptable] a [Marginal]. Este cambio se fundamenta en el incremento sustancial de los factores que determinan el WQI respecto al periodo 2022-2023. El factor $F1$ aumentó de 60% a 90%, reflejando un incremento de seis a nueve determinantes que incumplen los OC, donde únicamente el PTotal se mantuvo dentro de los valores de referencia establecidos. Paralelamente, se registró un aumento significativo tanto en la frecuencia de incumplimientos ($F2$) que se elevó de 5.47% a 13.42%, como en la magnitud de las desviaciones ($F3$) que ascendió de 1.66% a 8.49%, evidenciando no solo una mayor cantidad de datos que exceden los valores objetivo sino también desviaciones más pronunciadas respecto a los límites establecidos. El análisis por estaciones revela una distribución heterogénea de los incumplimientos, donde TU-MakroS y TU-SBenito corresponden a los puntos más críticos,

concentrando 6 y 7 determinantes que exceden los OC respectivamente, y acumulando 45 de los 75 registros de incumplimiento registrados en este tramo ($F2=13.42\%$). En contraste, la estación TU-México, ubicada antes de del punto TU-SBenito, presenta una afectación considerablemente menor con solo 10 datos que exceden los valores objetivo, distribuidos en tres determinantes (OD, Col.Fec y NTotal). Sin embargo, la condición de la calidad hídrica se deteriora significativamente en la estación TU-SBenito, ubicada después de la confluencia de la quebrada Chiguaza, evidenciando la influencia determinante de este tributario en la calidad del agua.

Las descargas provenientes de redes sanitarias y pluviales (con conexiones erradas) constituyen una fuente significativa de contaminación, tanto por sus aportes directos al cauce principal como por las descargas a través de tributarios importantes como las quebradas Limas y Chiguaza. Esta última se destaca como el afluente con mayor registro de vertimientos en la ciudad, ejerciendo una influencia determinante en el deterioro de la calidad del agua, como se evidencia la comparación de los resultados de las estaciones ubicadas antes y después de su confluencia (TU-México y TU-SBenito).

En el tramo final TU-T4, que abarca cuatro estaciones de monitoreo (TU-MakroS, TU-Tv86, TU-Ptelnde y TU-IslaPon), se registró el índice más bajo del río Tunjuelo con 46.2 unidades. Aunque mantuvo su categoría [Marginal], experimentó un descenso significativo de 12 unidades en su magnitud respecto al periodo 2022-2023. La distribución espacial de los incumplimientos revela un patrón crítico en tres de sus cuatro estaciones: TU-Tv86, TU-Ptelnde y TU-IslaPon registraron 33, 39 y 34 datos que excedieron los OC respectivamente, mientras que TU-MakroS mostró una menor afectación con solo 12 incumplimientos. Esta concentración de excedencias se refleja en el factor F2 (22.65%), el más alto registrado en este cuerpo de agua. El deterioro generalizado de la calidad se evidencia también en el factor F1, que alcanzó el 90%, indicando que de los diez determinantes evaluados, únicamente el pH se mantuvo dentro de los valores objetivo establecidos. La estación TU-Tv86 emerge como el punto más crítico, registrando incumplimientos en ocho determinantes (OD, NTotal, DBO_5 , DQO, SST, GyA, SAAM, PTotal y Col.Fec), seguida por TU-Ptelnde con siete parámetros que exceden los OC (DBO_5 , DQO, SST, GyA, SAAM, NTotal y Col.Fec).

Página 31 de 50

La calidad del agua en el río Salitre durante el periodo 2023-2024 se clasifica en dos categorías: [Buena] para los tramos SA-T1 y SA-T2, y [Marginal] para los tramos SA-T3 y SA-T4, manteniendo las categorías obtenidas en el periodo 2022-2023. El tramo inicial, aunque preserva su clasificación [Buena], evidencia un deterioro significativo en su magnitud, disminuyendo 13 unidades (de 93 a 81). Este deterioro se atribuye principalmente al incremento sustancial en los factores que determinan el WQI: el número de determinantes que incumplen aumentó de uno (OD) a tres (OD, pH y Col.Fec), con 19 registros que excedieron los valores objetivo ($F_2=15.1\%$). Particularmente notable es el incremento en el factor F_3 , que pasó de 0.46% a 3.17%, representando un aumento del 85% en la magnitud de las desviaciones respecto a los valores de referencia.

En el tramo SA-T2, la calidad del agua experimentó una mejora notable, evidenciada en el comportamiento de la estación SA-CL53, que registró una reducción tanto en el número de determinantes como en la cantidad de datos que superaron los valores objetivo respecto al periodo 2022-2023. Esta mejora se refleja en la disminución del factor F_1 de 20% a 10% y del F_2 de 1.82% a 1.61%, registrando incumplimientos únicamente en Col.Fec con 4 registros. Esta mejora permitió que este tramo obtuviera el mayor incremento del índice entre todos los tramos de los cuatro ríos evaluados, destacándose además por presentar los factores F_2 y F_3 más bajos no solo del río Salitre sino de todos los sistemas hídricos analizados.

Los tramos SA-T3 y SA-T4 mantienen una categorización [Marginal] con valores de WQI muy próximos (52 y 51 respectivamente). Esta similitud se fundamenta en valores idénticos de F_1 (80%) y una variación mínima en F_3 , aunque el factor F_2 presenta una diferencia significativa, siendo mayor en el tramo final (28.2%). El análisis del tramo SA-T3, constituido por las estaciones SA-CL53 y SA-Carrefour, revela un contraste notable: mientras SA-Carrefour registra incumplimientos en 8 determinantes (exceptuando SST y pH) que representan el 92% de las excedencias del tramo, SA-CL-53 registra solo 4 datos que incumplieron para los Col.Fec. Esta disparidad sugiere que la evaluación por tramo puede no representar adecuadamente la variabilidad espacial de la calidad del agua, generalizando condiciones críticas localizadas.

En el tramo final (SA-T4), se observa una distribución heterogénea de incumplimientos con un patrón particular de mejora en el sentido del flujo. La estación SA-Carrefour, ubicada al inicio del tramo y compartida con SA-T3, presenta la condición más crítica, concentrando el 40% de los datos que exceden los OC con 44 registros distribuidos en ocho determinantes (OD DBO₅, DQO, GyA, SAAM, PTotal, Col.Fec y NTotal). En las estaciones subsiguientes se evidencia una reducción gradual de incumplimientos: SA-TV91 registra 35 datos que exceden los OC en 6 determinantes (OD, DBO₅, GyA, SAAM, Col.Fec y NTotal), mientras que la estación final SA-Alameda presenta el menor número de excedencias con 30 registros en 5 determinantes (GyA, SAAM, PTotal, Col.Fec y NTotal).

2.5 DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE WQI EN LA RCHB-T

El análisis de la distribución del WQI parte de una evaluación espacial que contempla de forma seccionada la dinámica de la calidad hídrica entre los tramos que conforman los ríos principales. Teniendo en cuenta los resultados presentados en la Figura 6 y 7, se muestra el análisis del WQI con base en la distancia recorrida para cada cuerpo de agua evaluado. En la Figura 6, se muestra un gráfico de cuerdas que representa la interrelación entre los resultados de las categorías del WQI el periodo evaluado (2023-2024) con la distancia recorrida en cada río, por medio de la longitud y la categoría obtenida de cada uno de sus tramos, que se puede visualizar con las conexiones o flujos.

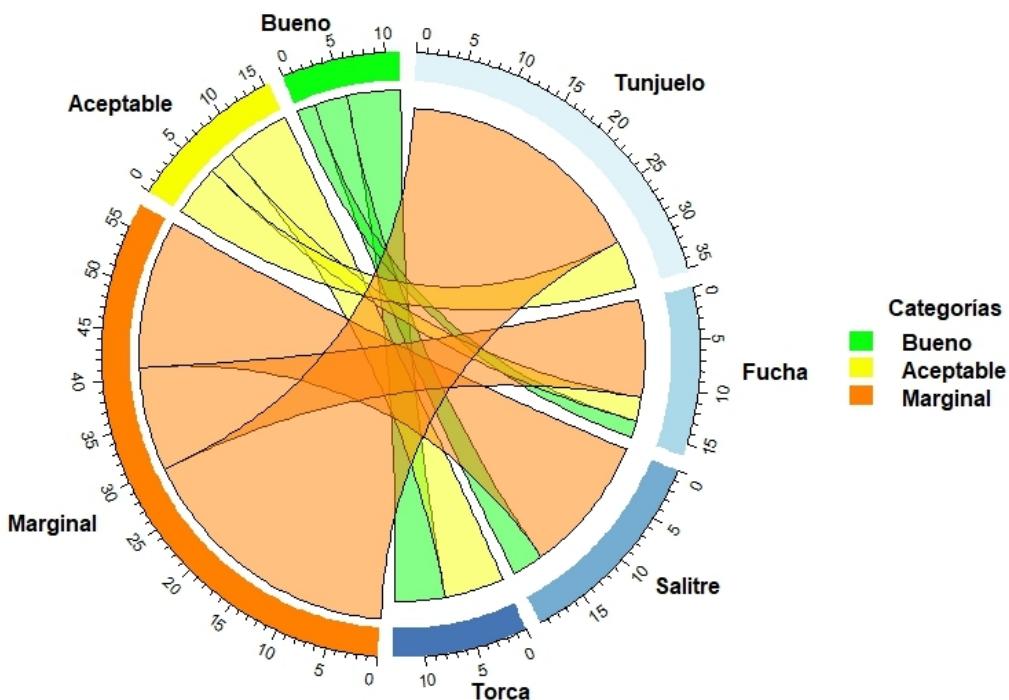


Figura 6. Clasificación de la longitud en kilómetros de los tramos de los ríos de la RCHB según su WQI para el periodo 2023-2024

El análisis espacial de la calidad del agua en los cuatro ríos principales de Bogotá durante el periodo 2023-2024 evidencia una condición favorable en sus tramos iniciales, aunque con una disminución en la extensión de los tramos de mejor calidad respecto al periodo anterior. Los primeros kilómetros de recorrido muestran un alto cumplimiento de los OC: el río Torca (TO-T1) exhibe el mejor desempeño con un 98% de cumplimiento, seguido por los tramos iniciales del Salitre y Fucha con 85% y 84% respectivamente, permitiendo su clasificación en categoría [Bueno]. El tramo inicial del río Tunjuelo, a pesar de registrar el valor más alto del WQI para su sistema hídrico, presenta un menor cumplimiento de los OC (78%), resultando en su clasificación [Aceptable].

Esta distribución de la calidad se refleja en la extensión total de la categoría [Buena], que abarca 11.6 km, representando la menor proporción del sistema hídrico evaluado. Esta distancia se distribuye en los tramos iniciales de tres ríos: Torca (6 km), Salitre (3.6 km, incluyendo SA-T1 y SA-T2), y Fucha (2 km). Notablemente, esta extensión representa una reducción significativa respecto al periodo 2022-2023, cuando la categoría [Buena] se extendía por 20.1 km. La disminución de 8.56 km se atribuye principalmente al descenso de categoría de los tramos TO-T2 y TU-T1, evidenciando un deterioro progresivo de la calidad del agua a medida que los ríos atraviesan el área urbana.

La distribución espacial de la calidad del agua durante el periodo 2023-2024 evidencia un predominio de la categoría [Marginal], que se extiende por 57.3 km, representando el 68 % de la longitud total de los ríos principales. Esta categoría se concentra principalmente en los tramos más extensos de los ríos Tunjuelo, Salitre y Fucha. En el río Tunjuelo abarca 29.7 km (tramos TU-T3 y TU-T4), en el Salitre 16.15 km (SA-T3 y SA-T4), mientras que en el Fucha comprende 12.6 km (FU-T2 y FU-T4). El aumento de 14.2 km en la categoría [Marginal] respecto al periodo 2022-2023 (43.1 km), se debe al cambio de clasificación del tramo TU-T3 de [Aceptable] a [Marginal].

Por otra parte, es preocupante las condiciones críticas en varios tramos dentro de la categoría [Marginal], debido a la magnitud del WQI. Los tramos TU-T3 y TU-T4 del río Tunjuelo en vista a que presentan valores del WQI que se aproximan al límite inferior de la clase [Marginal] (45 unidades), con una diferencia no mayor a 2 unidades de este umbral crítico. La situación es aún más severa en el río Fucha, donde el tramo FU-T2 alcanzó exactamente el valor límite de 45 unidades.

La categoría [Aceptable] abarca 15.4 km, distribuidos en cuatro tramos: TO-T2 (7.1 km), FU-T3 (2.7 km), TU-T1 (1.46 km) y TU-T2 (4.1 km). Esta extensión representa una reducción de 5.6 km respecto al periodo 2022-2023 (21 km), con una reconfiguración significativa en su distribución espacial. El cambio más notable se relaciona con el tramo TU-T3 (14.3 km), uno de los más extensos de los ríos evaluados, que en el periodo 2022-2023 se clasificaba en esta categoría junto con los tramos TU-T2 y FU-T3. La reconfiguración se debe principalmente al descenso de categoría de los tramos TO-T2 y TU-T1 de [Buena] a [Aceptable] y TU-T3 de [Aceptable] a [Marginal].

Página 35 de 50

Respecto al análisis general de la distancia recorrida por categoría, se observa que la calidad de los ríos durante el período 2023– 2024 se ha distribuido principalmente en tres categorías del WQI (**Buena**, **Aceptable**, **Marginal**). En primer lugar, las categorías **[Buena]** y **[Aceptable]**, representan el 32 % de la extensión total de los ríos principales de la ciudad (26.95 km), mientras que la categoría **[Marginal]** predomina en el 68 % restante (57.29 km), particularmente en los tramos bajos de las cuencas. No obstante, es relevante mencionar que ningún tramo alcanzó la categoría **[Pobre]** durante el periodo evaluado y que no se presenta desde el periodo 2019-2020 (ver Tabla 4)

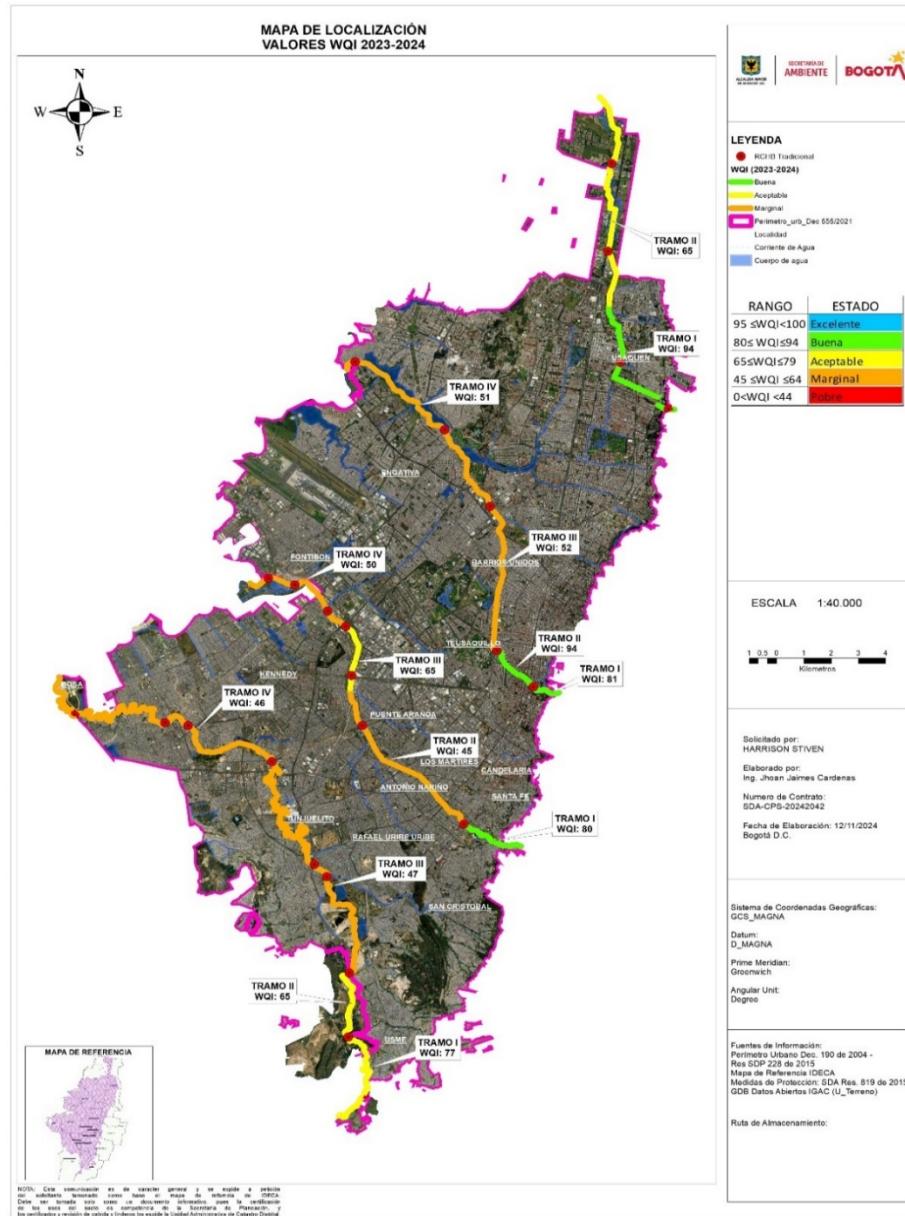


Figura 7. Distribución del WQI en los tramos de la RCHB-T para el periodo 2023-2024

2.6 ANÁLISIS DE PRECIPITACIÓN Y CAUDAL DE LOS TRAMOS INICIALES

La capacidad de asimilación y dilución de contaminantes en un cuerpo de agua está directamente relacionada con su caudal, siendo los aportes por precipitación un factor fundamental en este proceso. Este mecanismo de dilución afecta las concentraciones de diversos parámetros fisicoquímicos y microbiológicos: en periodos de mayor precipitación, el incremento del caudal base del río permite una mayor dilución de contaminantes como la DBO₅, DQO, nutrientes (Nitrógeno y Fósforo) y Col.Fec, mientras que en temporadas secas, la reducción del volumen de agua resulta en una mayor concentración de estos parámetros. Adicionalmente, el aumento del caudal por precipitación mejora la capacidad de oxigenación del agua por turbulencia y favorece los procesos de autodepuración natural del río. Durante condiciones de bajo caudal, no solo se concentran los contaminantes, sino que también se reduce la velocidad del flujo, lo que puede disminuir la capacidad de natural y afectar los procesos de degradación biológica de la materia orgánica.

Durante el periodo evaluado 2023 II – 2024 I, esta dinámica natural se vio afectada por la presencia del fenómeno El Niño en el país. Esta condición climática se caracteriza por el calentamiento anormal de las aguas superficiales en el Pacífico Tropical central y oriental, frente a las costas del norte de Perú, Ecuador y sur de Colombia. Según el IDEAM, sus efectos en Colombia se manifiestan principalmente en un "déficit significativo de las precipitaciones y un aumento importante de la temperatura del aire, especialmente en sectores de las regiones Caribe, Andina y Pacífica."

La evolución de este fenómeno durante el periodo de análisis mostró un patrón dinámico: iniciando aproximadamente en junio de 2023 con una intensidad débil, según los reportes de Seguimiento al Ciclo ENOS del IDEAM, luego presentó una fase de transición hasta fortalecerse significativamente en noviembre y diciembre, cuando se categorizó como fuerte. Esta condición se mantuvo hasta marzo, seguida por una fase de debilitamiento entre abril y junio, cuando comenzó su transición hacia la neutralidad. Como consecuencia, durante finales de 2023 e inicios de 2024, Bogotá, al igual que gran parte del país, experimentó una reducción significativa en las

precipitaciones, acompañada de temperaturas elevadas que condujeron a la disminución de los niveles en las fuentes hídricas (IDEAM, n.d.).

Esta condición climática se verificó mediante el análisis comparativo de la precipitación acumulada mensual, utilizando datos de las estaciones meteorológicas pertenecientes a la Red Hidrometeorológica de Bogotá, operada por el Instituto Distrital de Gestión de Riesgos y Cambio Climático. El estudio se centró en las estaciones pluviométricas ubicadas en la proximidad de los tramos iniciales de los ríos Salitre, Torca, Tunjuelo y Fucha, comparando los registros de los períodos 2022-2023 y 2023-2024, los cuales se muestran en la Figura 8. La selección del período 2022-2023 como referencia se fundamenta en que durante este lapso se registró el mejor desempeño en la calidad hídrica de la última década, alcanzando una extensión significativa de tramos (en kilómetros) con valores del índice de calidad iguales o superiores a 65 unidades, correspondientes a las categorías **Aceptable**, **Buena** o **Excelente**.

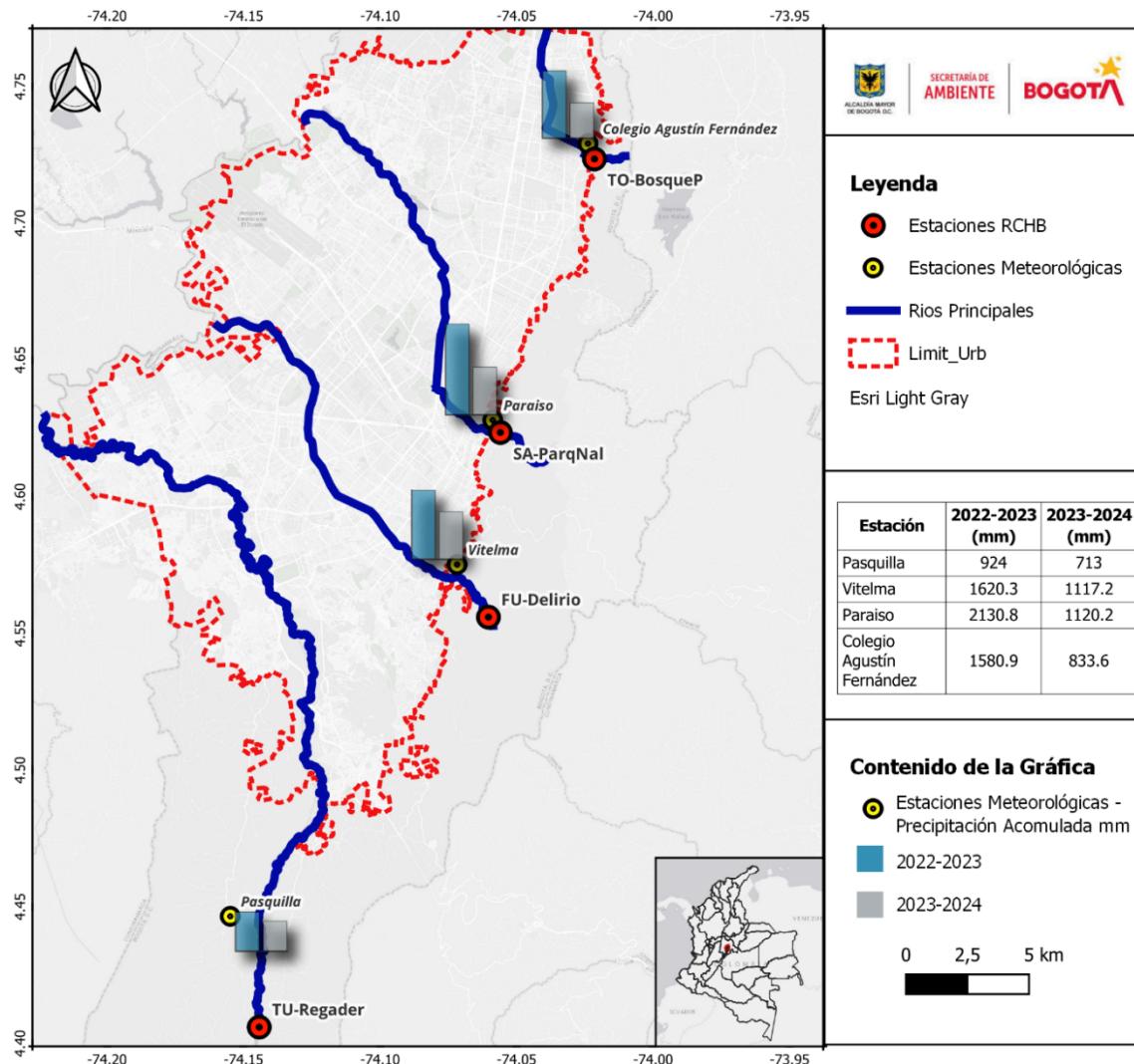


Figura 8. Resultados de la precipitación acumulada mensual mm

El análisis pluviométrico comparativo entre los períodos 2022-2023 y 2023-2024 revela una disminución significativa de la precipitación acumulada en todos los tramos iniciales de los

Página 40 de 50

sistemas hídricos evaluados. La estación Paraíso, asociada al tramo SA-T1, registró la reducción más pronunciada con un déficit de 1010.6 mm, pasando de 2130.8 mm en 2022-2023 a 1120.2 mm en 2023-2024, lo que representa una disminución del 47.4%. La estación del Colegio Agustín Fernández (TO-T1) experimentó la segunda mayor reducción con 747.3 mm que corresponde 31%, seguida por la estación Vitelma (FU-T1) con 503.1 mm.

Las estaciones SA-T1 y TO-T1 registraron los valores más altos de precipitación acumulada en ambos períodos, destacándose particularmente el tramo inicial del río Salitre con 2130.8 mm durante 2022-2023. En contraste, el tramo inicial del río Tunjuelo (TU-T1) presentó la menor variación interanual con una diferencia de 211 mm, y registró los valores más bajos de precipitación acumulada en ambos períodos (924 mm y 713 mm respectivamente).

Es necesario destacar que los patrones de precipitación en las zonas de nacimiento de estos sistemas hídricos están determinados por complejas interacciones entre factores geográficos y meteorológicos. Los ríos Salitre, Torca y Fucha, que nacen en los Cerros Orientales, presentan una mayor pluviosidad debido a la interacción de múltiples factores hidrometeorológicos: la topografía montañosa, el efecto orográfico del aire húmedo, la alta humedad relativa y un régimen de lluvias bimodal. En contraste, el tramo inicial del río Tunjuelo, ubicado en el páramo de Sumapaz, experimenta condiciones climáticas distintas debido a su localización geográfica y altura, lo que explica sus menores valores de precipitación acumulada y una menor variabilidad interanual en comparación con los otros sistemas hídricos.

La magnitud de estas reducciones en la precipitación acumulada, que oscilan entre el 22.8% y el 47.4%, sugiere una alteración significativa en el régimen pluviométrico durante el periodo 2023-2024, con potenciales implicaciones en los caudales base y, consecuentemente, en la capacidad de dilución de los sistemas hídricos evaluados.

Este impacto en el régimen hidrológico se confirma al analizar los valores de la mediana de caudal en las estaciones de monitoreo de los tramos iniciales. Todas las estaciones registraron reducciones significativas en el valor de la mediana del caudal durante el periodo 2023-2024 respecto al periodo anterior (2022-2023), aunque con variaciones de diferente magnitud. Las

Página 41 de 50

reducciones más pronunciadas se observaron en las estaciones TU-Regader (TU-T1), FU-Delirio (FU-T1) y TO-BosqueP (TO-T1), con disminuciones que oscilan entre 26.4% y 46.2%. La estación TU-Regader experimentó la mayor reducción porcentual (46.2%), pasando de 731.18 L/s a 393.12 L/s, mientras que FU-Delirio, que mantiene los caudales más elevados los tramos iniciales, registró una disminución del 26.4%, reduciendo su valor de la mediana del caudal de 866.91 L/s a 637.73 L/s. La estación SA-ParqNal (SA-T1) mostró la menor variación relativa con una reducción del 15.5% (de 30.00 L/s a 25.36 L/s), aunque es importante considerar que sus caudales base son significativamente menores.

2.7 EVOLUCIÓN DEL WQI EN EL PERÍODO 2014 A 2023

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 redunda 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, en la siguiente tabla presenta la distribución espacial de la calidad hídrica en términos de kilómetros recorridos para cada categoría del WQI, obtenidos en los períodos interanual de la última década (2014-2024). Esta síntesis temporal permite visualizar la evolución de la calidad del agua en el sistema hídrico de la ciudad, evidenciando las variaciones en la extensión de tramos que mantienen condiciones favorables de calidad (**Aceptable**, **Buena** o **Excelente**) durante los diferentes períodos de evaluación.

Tabla 4. Longitud de los ríos de la RCHB clasificados por WQI desde 2014 a 2024

Periodo	Clasificación WQI				
	EXCELENTE	BUENA	ACEPABLE	MARGINAL	POBRE
2014-2015	0	11.55	8.56	2.7	61.43
2015-2016	3.62	20.6	0	19.59	40.43
2016-2017	5.96	14.16	6.84	52.26	5.03
2017-2018	5.96	7.05	13.94	2.7	54.59
2018-2019	5.96	16.9	0	42.2	19.18
2019-2020	2.31	20.55	4.1	43.84	13.45
2020-2021	0	15.75	11.2	57.29	0
2021-2022	0	14.29	22.72	47.23	0
2022-2023	0	20.11	20.99	43.14	0
2023-2024	0	11.55	15.40	57.29	0

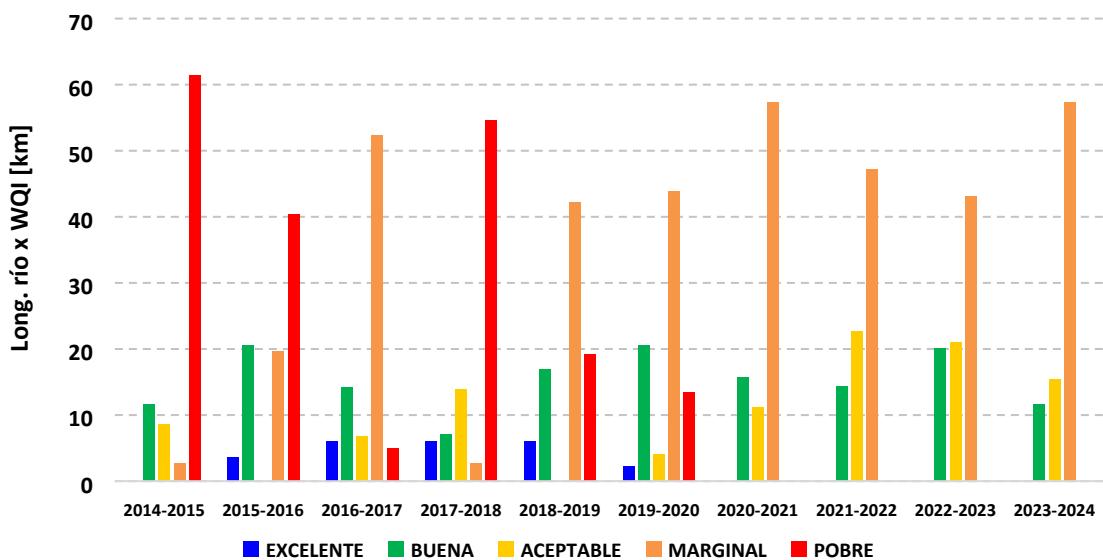


Figura 9. Evolución temporal de ríos urbanos por categoría de calidad de agua según el WQI

Al comparar la evolución de ríos los urbanos por categoría de calidad de agua según el WQI, para los períodos 2022-2023 y 2023-2024 se observa una disminución en los kilómetros de río en las categorías **Aceptable**, **Buena** que representa un deterioro en la calidad hídrica, el cual, se correlaciona con el déficit hidrológico experimentado durante el periodo de evaluación, caracterizado por una reducción significativa en la frecuencia e intensidad de eventos de precipitación. Esta condición ha resultado en un incremento en la extensión de tramos con valores del WQI inferiores a 65 unidades, aunque es importante destacar que ningún segmento alcanzó la categorización **[Pobre]**.

3 CONCLUSIONES

- La calidad del río Torca durante el periodo 2023-2024 se distribuye en dos categorías: **[Buena]** y **[Aceptable]**, evidenciando un contraste significativo entre sus dos tramos. En el primer tramo, se obtuvo el índice más alto, alcanzando un valor de 94, que se sitúa en el límite superior de la categoría **[Buena]**. Esta clasificación se ha mantenido constante desde el período 2019-2020. Es importante destacar que la calidad estuvo muy cerca de alcanzar la categoría máxima del WQI, sin embargo, un determinante (PTotal) presentó datos que excedían el OC, registrando un incumplimiento del 18 %. Esta misma situación sucedió en el período anterior, donde sólo el determinante PTotal superó el valor de referencia definido como objetivo.
- El tramo dos del río Torca presenta un deterioro notable de la calidad hídrica, evidenciado en una disminución de 17 unidades en el WQI respecto al periodo 2022-2023, descendiendo de la categoría **[Buena]** a **[Aceptable]**. Este deterioro se manifiesta en el incremento significativo de determinantes que incumplen los OC ($F1=60\%$, seis variables) y en la frecuencia de excedencia ($F2=12.63\%$, 47 registros). La distribución espacial de estos incumplimientos revela un comportamiento heterogéneo, donde la estación TO-CL161, ubicada al inicio del tramo, concentra la mayor afectación con 5 determinantes y 24 datos que exceden los OC, representando el 51% del total de incumplimientos. En

Página 44 de 50

contraste, las estaciones TO-Ssimon y TO-Jardpaz, localizadas en la parte baja del tramo, muestran una mejora relativa con solo 1 y 2 determinantes que incumplen y 23 datos combinados que superan el valor objetivo, siendo los Col.Fec el determinante más crítico. Esta variación espacial de la calidad se explica por la interacción entre los procesos de autodepuración natural y las presiones antropogénicas sobre el sistema hídrico. El tránsito del río por la Reserva Distrital de Humedal Torca-Guaymaral favorece los procesos de degradación y reducción en las concentraciones de los determinantes de calidad. Sin embargo, la efectividad de estos procesos naturales se ve afectada por las conexiones erradas en el sistema de alcantarillado que aportan aguas residuales domésticas en forma directa al río o indirecta por medio de tributarios como los canales San Cristóbal, Serrezuela y El Redil, sumado a los vertimientos de usuarios en la zona baja de este tramo.

- Para el río Tunjuelo, la calidad del agua en el tramo inicial ha experimentado una disminución, cambiando de categoría [Buena] a [Aceptable] en comparación con el período anterior. Aunque este descenso no es significativo en términos absolutos, disminuyendo solo tres unidades respecto al período anterior, fue suficiente para cambiar de categoría. Esta situación se atribuye principalmente a la cantidad de datos que incumplieron, equivalente al 22% de los datos totales del tramo, y a la amplitud de excesos respecto a los valores de referencia ($F3=13.13\%$), más que a la cantidad de determinantes que incumplieron, manteniendo las mismas variables del período 2022-2023 (OD, DBO_5 y SST), donde el OD emerge como el más crítico con el 50% de los datos que incumplieron.
- El segundo tramo del río Tunjuelo, aunque mantuvo su categoría [Aceptable], registró un descenso de 6 unidades en su índice, alcanzando el límite inferior de esta categoría (65 unidades). La estación TU-DJuana emerge como punto crítico, concentrando 5 de los 6 determinantes que incumplieron (OD, pH, DBO_5 , DQO, Col.Fec y NTotal) y el 83% de los datos que no cumplieron el valor objetivo, situación asociada principalmente al vertimiento de la Planta de Tratamiento de Lixiviados del Relleno Sanitario Doña Juana.
- El tramo tres del río Tunjuelo experimentó la disminución más significativa, pasando de una categoría [Aceptable] a [Marginal], con una reducción de 18 unidades en su índice (de 65 a 47). Este deterioro se refleja en el incremento de todos los factores del WQI con

respecto al periodo anterior: los determinantes que incumplen aumentaron de 6 a 9 (F1:90 %), la frecuencia de excedencias se elevó de 5.47% a 13.42%, y las desviaciones respecto a los valores objetivo se incrementaron de 1.66% a 8.49%. Las estaciones TU-MakroS y TU-SBenito concentran el 60% de los incumplimientos, situación atribuible principalmente a las descargas de redes sanitarias y pluviales con conexiones erradas que vierten a través de las quebradas Limas y Chiguaza, y al efecto de la disminución de la precipitación en el periodo objeto de análisis, que tuvo un impacto en el caudal base y por tanto en la capacidad de asimilación natural de del sistema hídrico de la cuenca del Tunjuelo.

- El tramo final del río Tunjuelo mantiene su clasificación [Marginal], pero experimenta un descenso significativo de 13 unidades en su índice (de 59 a 46 unidades). Esta situación refleja un incumplimiento generalizado en las estaciones TU-Tv86, TU-Ptelnde y TU-IslaPon. De los diez determinantes evaluados, solo el pH mantuvo el cumplimiento de los valores objetivo, siendo GyA, SAAM y Col.Fec los más críticos aportando el 69 % de los datos que incumplieron. La estación TU-Tv86 emerge como el punto más crítico, registrando incumplimiento en 8 determinantes (OD, DBO₅, DQO, GyA, SAAM, PTotal, Col.Fec y NTotal). Paradójicamente, aunque este tramo presenta el mayor número de variables que incumplen, las desviaciones respecto a los valores objetivo son menos pronunciadas que en los otros tramos del río. Este deterioro de la calidad se relaciona con la presencia de múltiples vertimientos de redes sanitarias y pluviales (con conexiones erradas), concentrados principalmente entre las estaciones TU-Makros y TU-Ptelnde. Si bien el sector final, comprendido entre TU-Ptelnde y TU-IslaPon, recibe una menor cantidad de vertimientos, las descargas de las estaciones elevadoras Grancolombiano, Cartagenita y la Isla mantienen una presión significativa sobre la calidad del agua.
- En lo que respecta al río Salitre, la calidad de sus dos tramos iniciales (SA-T1 y SA-T2) mantiene su clasificación [Buena], categoría que ha permanecido estable desde el periodo 2020-2021. Sin embargo, el tramo inicial experimentó un descenso significativo de 13 unidades respecto al periodo anterior (93 unidades), atribuible al incremento en los determinantes que incumplen, pasando de 1 (OD) a 3 (OD, Col.Fec y pH), siendo OD y

Col.Fec los más críticos; en contraste, el segundo tramo mostró una mejora, incrementando aproximadamente 6 unidades en el valor del indicador (de 88 a 94) respecto al periodo 2022-2023. Esta optimización se refleja en la reducción del factor F1 de 20% a 10%, al disminuir los determinantes que incumplen de dos (GyA y Col.Fec) a uno (Col.Fec).

- Los tramos finales (SA-T3 y SA-T4) del río Salitre mantienen su categorización [Marginal], tendencia que se observa desde el periodo 2021-2022. Aunque no se registraron variaciones significativas en los valores del índice respecto al periodo anterior, la persistencia de esta baja calidad hídrica se vincula directamente con los vertimientos provenientes del sistema de alcantarillado combinado que descargan en el tramo tres y en tributarios importantes como el Canal Virrey-río Negro, cuya influencia domina las condiciones de calidad hasta la desembocadura del río.
- El río Fucha presentó variaciones diferenciadas en sus tramos. El tramo inicial mantuvo su categoría [Buena] con una disminución mínima de una unidad en el índice, aunque mostró incrementos en los factores F2 (de 12.04% a 16.24%) y F3 (de 3.38% a 7.17%), siendo el OD el parámetro más crítico con el 58% de los incumplimientos.
- El segundo tramo del río Fucha, aunque conservó su categoría [Marginal], registró un descenso de 6 unidades, con un deterioro concentrado en la estación FU-Ferroca, que aportó el 89% de los datos que excedieron los objetivos de calidad (57 registros). Esta afectación se atribuye principalmente a los aportes de las estructuras de alivio asociadas con el sistema de alcantarillado combinado que descargan en los canales Río Seco y Albina.
- Los tramos bajos de la cuenca del río Fucha (FU-T3 y FU-T4) mantuvieron sus categorías [Aceptable] y [Marginal] respectivamente en relación con el periodo anterior, aunque experimentaron un descenso significativo en la magnitud de sus índices WQI. En el tramo tres, el deterioro se concentra principalmente en la estación final FU-Boyaca, que registró los 6 determinantes que incumplieron los valores objetivo en este tramo (F1=60%) y acumuló el 57% de los datos que excedieron las concentraciones de referencia. Esta afectación se atribuye a la carga contaminante proveniente de la red Troncal Pluvial AC 13 (RFU-T3-0360), ubicada entre las estaciones FU-América y FU-Boyaca, que recibe

conexiones erradas del sector industrial localizado en los barrios Salazar Gómez, Lusitania, Granjas de Techo y Montevideo.

- El tramo final evidencia un deterioro más generalizado, reflejado en el comportamiento de sus tres estaciones de monitoreo (FU-VisionC, FU-ZFranca y FU-Alameda). Este tramo registró el factor F2 más alto del río (30.87%), indicando que aproximadamente un tercio del total de datos no cumple con los valores objetivo, distribuidos en 8 determinantes. Las variables más críticas fueron GyA, SAAM y Col.Fec, que concentraron el 75% de los datos que incumplieron en este tramo (109 registros). Esta degradación de la calidad hídrica se relaciona directamente con las descargas de los interceptores del sistema de alcantarillado sanitario, que aportan elevadas cargas contaminantes en el tramo.
- El periodo 2023-2024 estuvo marcado por la influencia del fenómeno El Niño, que evolucionó de una intensidad débil en junio 2023 hasta categorizarse como fuerte entre noviembre 2023 y marzo 2024. Este fenómeno provocó una reducción significativa en las precipitaciones de la ciudad, evidenciada en las estaciones meteorológicas de los tramos iniciales: la estación Paraíso (río Salitre) registró la mayor reducción con 1010.6 mm, seguida por las estaciones del Colegio Agustín Fernández (Torca) con 747.3 mm y Vitelma (Fucha) con 503.1 mm, mientras que Pasquilla (Tunjuelo) presentó la menor diferencia con 211 mm. Esta disminución en la precipitación se reflejó en los caudales de los tramos iniciales, donde las estaciones TU-Regader, FU-Delirio y TO-BosqueP experimentaron reducciones entre 26.4% y 46.2% en la mediana de los caudales, mientras que SA-ParqNal registró una reducción menor del 15.5%. La reducción en los volúmenes de agua afectó directamente la capacidad de dilución de los sistemas hídricos, resultando en mayores concentraciones de contaminantes. Esta situación, sumada a las presiones permanentes de descargas de aguas residuales y conexiones erradas, contribuyó al descenso de la calidad del agua, especialmente en los tramos medios y bajos de los sistemas hídricos de la ciudad.
- Al comparar la evolución de ríos urbanos por categoría de calidad de agua según el WQI, para los períodos 2022-2023 y 2023-2024 se observa una disminución en los kilómetros de río en las categorías **Aceptable**, **Buena** que representa un deterioro en la

calidad hídrica, el cual, se correlaciona con el déficit hidrológico experimentado durante el periodo de evaluación, caracterizado por una reducción significativa en la frecuencia e intensidad de eventos de precipitación. Esta condición ha resultado en un incremento en la extensión de tramos con valores del WQI inferiores a 65 unidades, aunque es importante destacar que se mantuvo la condición establecida durante los tres últimos periodos (2020- 2021, 2021-2022 y 2022-2023), en la que ningún río presentó una categoría de calidad de agua **Pobre** ($\text{WQI} < 45$), situación que históricamente nunca había sucedido, lo cual representa un esfuerzo significativo en el continuo desarrollo de actividades de evaluación, control y seguimiento sobre los factores de impacto ambiental derivados de las actividades que inciden sobre el recurso hídrico de la ciudad.

- Si bien durante los últimos años ha habido un avance positivo en la calidad del agua de los ríos de la ciudad, 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, por tal razón se debe propender en el desarrollo de una herramienta que permita la evaluación de la calidad del agua de manera prospectiva y con valores más restrictivos que conlleve a tener una mayor certeza de las características y del estado de calidad de los ríos consecuente con las condiciones actuales.

REFERENCIAS

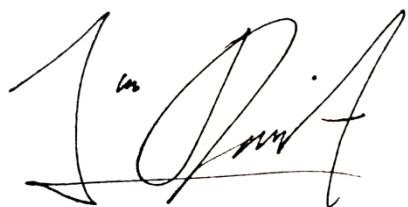
- Fayyad, U., Piatetsky-Shapiro, G., y Smyth, P. (1996) "Knowledge discovery and data mining: Towards a unifying framework" in *Discovery and Data Mining*. Portland, OR, Proc. 2nd Int. Conf. on Knowledge Discovery and Data Mining, 82–88.
- Fayyad, U., Piatetsky-Shapiro, G., y Smyth, P. (1996) "Knowledge 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 Rodriguez, C. (2004). On Detection Of Outliers And Their Effect In Supervised Classification.

Iglewicz B., y 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 databases perspective", IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). (n.d.). Boletín de seguimiento al ciclo ENOS. <https://www.ideam.gov.co/sala-de-prensa/boletines/Bolet%C3%ADn-de-seguimiento-al-ciclo-ENOS>



JUAN DAVID ARISTIZABAL GONZALEZ
SUBDIRECCION DE RECURSO HIDRICO Y DEL SUELO

Elaboró:

DAVID FELIPE PEREZ SERNA CPS: SDA-CPS-20242138 FECHA EJECUCIÓN: 19/12/2024

Revisó:

DAVID FELIPE PEREZ SERNA CPS: SDA-CPS-20242138 FECHA EJECUCIÓN: 19/12/2024

**Aprobó:
Firmó:**

JUAN DAVID ARISTIZABAL GONZALEZ CPS: FUNCIONARIO FECHA EJECUCIÓN: 19/12/2024