



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Estimación del efecto del lixiviado del Relleno Sanitario Doña Juana sobre la calidad del agua del Río Tunjuelo y su posible tratamiento en la PTAR Canoas

Diana Lucía Cristancho Montenegro

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería

Bogotá, Colombia

2013

Estimación del efecto del lixiviado del Relleno Sanitario Doña Juana sobre la calidad del agua del Río Tunjuelo y su posible tratamiento en la PTAR Canoas

Diana Lucía Cristancho Montenegro

Trabajo Final presentado como requisito parcial para optar al título de:

Magister en Ingeniería Ambiental

Director:

MSc Ingeniería Ambiental, Ing. Sanitario. Carlos Julio Collazos Chávez

Codirector:

Ingeniero Sanitario MgSP. Héctor Collazos (Q.P.D)

Línea de Investigación:

Tratamiento de aguas residuales

Grupo de Investigación:

Resiliencia y Saneamiento – RESA-

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería

Bogotá, Colombia

2013

Le agradezco a Dios y a mis Padres por darme la oportunidad de terminar mi Maestría y permitir disfrutar hasta el día de hoy. Haberme guiado a lo largo de mi vida, por ser mi luz, apoyo y mi camino.

Agradecimientos

El autor expresa sus agradecimientos:

Un agradecimiento muy especial merece la comprensión, paciencia y el ánimo recibidos de mi familia y amigos.

A la UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA por darme la oportunidad de estudiar y ser un Magister en Ingeniería Ambiental, trascendental para mi profesión.

Al Ingeniero CARLOS JULIO COLLAZOS, MSc Ingeniería Ambiental, Ing. Sanitario, por ser mi Tutor del trabajo de grado, quien con su conocimiento, experiencia, paciencia y motivación influyo para la terminación de mi trabajo de grado.

Al Ingeniero HECTOR COLLAZOS, Ingeniero Sanitario MgSP., por ser mi cotutor del trabajo de grado, con su visión crítica de muchos aspectos y por su rectitud en su profesión como docente e investigador. (Q.P.D)

A las directivas de la UAESP – Unidad Administrativa Especial de Servicios Públicos-, que desde que inicié mi proyecto me han apoyado y colaborado para finalizar mi Trabajo de Grado.

A todas las Entidades y Organizaciones que de una u otra forma apoyaron mi proyecto de trabajo de grado.

A todas aquellas personas que de una u otra forma colaboraron en la realización de este trabajo de grado

Nota Aclaratoria: La información contenida en este documento solamente será autorizada y utilizada para fines académicos para esta Universidad.

Resumen

El trabajo consiste en analizar el posible efecto de la descarga del lixiviado del Relleno Sanitario Doña Juana sobre la calidad del agua del Río Tunjuelo y de forma hipotética evalúa la posibilidad de conectar dicho vertimiento al interceptor Tunjuelo-Canoas, que conduce las aguas residuales del sur de la Capital a la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales PTAR Canoas. Se analiza la posibilidad de efectuar un tratamiento conjunto con las aguas residuales domésticas evitando de esa manera el vertimiento directo de los lixiviados al río Tunjuelo. Para el efecto, se recolectó y analizó información disponible en diferentes entidades como la Unidad Especial de Servicios Públicos-UAESP, el Acueducto de Bogotá-EAAB, la Corporación Autónoma-CAR y la Secretaría Distrital de Ambiente-SDA, entre otras. Los resultados de la evaluación, considerando diferentes escenarios, muestran que el efecto de la descarga de los lixiviados, con o sin tratamiento previo, sobre la calidad del río Tunjuelo es considerable sin embargo debe tenerse en cuenta que el río viene con una alta contaminación río arriba, sin embargo y por tanto la conexión de la descarga al interceptor Tunjuelo-Canoas no solo resulta factible sino conveniente, dado que el aporte de carga orgánica y de sólidos suspendidos sería perfectamente asimilable en las instalaciones de la PTAR Canoas. Con este manejo, se contribuiría al saneamiento del río Tunjuelo en los tramos ubicados aguas abajo del actual punto de descarga.

Palabras clave: Vertimiento, Calidad del Agua, Relleno Sanitario, Lixiviados, Planta de tratamiento de Aguas Residuales, Río Tunjuelo, Contaminación Industrial.

Abstract

The work is to analyze the possible effect of the discharge of leachate Doña Juana Landfill on the water quality of the River Tunjuelo hypothetically and assesses the possibility of shedding the interceptor connecting said Tunjuelo - Canoas wastewater leading South Capital to Plant Wastewater Treatment Canoas WWTP. The possibility of combined treatment with domestic wastewater thus avoiding direct discharge of leachate to Tunjuelo River is analyzed. To this end , we collected and analyzed information available from different organizations such as the Special Unit - UAESP Public Services, the Bogota Water - EAAB -CAR the Autonomous Corporation and the Department of Environment - SDA , among others. The results of the evaluation, considering different scenarios show that the effect of the discharge of leachate, with or without treatment, quality Tunjuelo river is significant but must be noted that the river comes with a high pollution river above, however, and therefore the discharge connection interceptor Tunjuelo - Canoas not only feasible but desirable , since the contribution of organic matter and suspended solids would be perfectly assimilated in Canoas WWTP facilities . With this management would contribute to sanitation Tunjuelo river sections located downstream of the point of discharge current.

Keywords: Shedding, Water Quality, Landfill, Leachate, Plant Wastewater Treatment, Tunjuelo River, Industrial Pollution.

Contenido

	Pág.
Introducción	1
1 Objetivos.....	3
1.1 Objetivo General	3
1.2 Objetivos Específicos	3
2 Alcance y metodología.....	4
3 Antecedentes y Justificación.....	8
4 MARCO TEÓRICO	23
5 ESTUDIO DEL CASO	35
5.1. Relleno Sanitario Doña Juana.....	35
5.1.1. Ubicación	35
5.1.2. Descripción de las Zonas.....	37
5.1.3. Generación de Lixiviados en el RSDJ.....	40
5.1.4. Calidad del vertimiento.....	43
5.1.5. Sistema de Tratamiento de Lixiviados de Doña Juana.....	45
5.2. Cuenca del Río Bogotá	50
5.3. Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Canoas	60
5.4. Cuenca del Río Tunjuelo.....	65
5.5. Análisis y discusión de alternativas	80
6 Conclusiones y recomendaciones.....	103
6.1 Conclusiones	103

6.2 Recomendaciones.....	104
A. Anexo: Relación de los estudios realizados por estudiantes de la Universidad Nacional de Colombia	105
B. Anexo: Relación de otros estudios y acciones relacionados con el tema del trabajo de grado	108
C. Anexo: Relación de la generación de Caudal Vs precipitación a largo del tiempo. .	110
D. Anexo: Mapa de la Calidad del Río Tunjuelo, Estudio de Secretaría Distrital de Ambiente y la Universidad de los Andes (2010-2012). Calidad del Recurso Hídrico de Bogotá	111
E. Anexo:.....	113
F. Anexo:.....	115
Bibliografía	117

Lista de figuras

	Pág.
Figura 2-1. Esquema metodológico.....	7
Figura 5-1. Entrada al Relleno Sanitario Doña Juana.....	35
Figura 5-2. Representación de los límites del RSDJ	36
Figura 5-3. Mapa del Relleno Sanitario Doña Juana	37
Figura 5-4 Promedio Diario/año de Residuos Dispuestos en el RSDJ	39
Figura 5-5. Promedio Mensual/anual de Residuos Dispuestos en el RSDJ.....	39
Figura 5-6. Variación de la producción media anual de lixiviados en RSDJ período 2002-2012 y de los caudales tratados en la PTL (2012)	41
Figura 5-7. Caudales Generados en el RSDJ Vs Caudales Tratados en la PTL promedio mensual (Período 2009-2011).....	41
Figura 5-8. Precipitaciones mensuales en el RSDJ (Período 2010-2013)	42
Figura 5-9. Foto de Planta del Sistema de Tratamiento de Lixiviados.	45
Figura 5-10. Esquema del sistema de conducción, almacenamiento y tratamiento de lixiviados.	47
Figura 5-11. Diagrama de Flujo Proceso Tratamiento Lixiviado	49
Figura 5-12. Foto de la Planta de Tratamiento del Relleno Sanitario Doña Juana.....	50
Figura 5-13. Mapa de la Ubicación del Río Bogotá	51
Figura 5-14. Mapa de la Cuenca del Río Bogotá.....	53
Figura 5-15. Alternativa de tratamiento propuesta en 1993 (tres plantas)	55
Figura 5-16. Esquema General del Programa de Saneamiento del Río Bogotá (PSRB) .55	
Figura 5-17. Esquema inicial del proyecto PSRB a implementar.....	57
Figura 5-18. Esquema de los Objetivos de Calidad del Río Tunjuelo	58
Figura 5-19. Proyecto del Programa de Saneamiento del Río Bogotá Etapa I	58
Figura 5-20. Situación final del Proyecto.....	59
Figura 5-21. Fase I, PTAR Canoas	63
Figura 5-22. Fase II, PTAR Canoas.	64
Figura 5-23. Esquema de Planta de la PTAR Canoas- disposición de procesos.....	64
Figura 5-24. Mapa de la Ubicación del Río Tunjuelo	65
Figura 5-25. Concentración de parámetros de interés monitoreo río Tunjuelo 2004	67
Figura 5-26. Ubicación de los puntos de muestreo en el río Tunjuelo campaña 2007-2008	71
Figura 5-27. Relación de NTK vs Caudal en el punto Doña Juana 2007-2008.....	74
Figura 5-28. Comportamiento del Fósforo Total en los puntos de muestreo del río Tunjuelo 2007-2008	75
Figura 5-29. Concentraciones de DQO, DBO, SST y Grasas y Aceites.	76

Figura 5-30. Concentraciones de metales pesados y cianuro en el río Tunjuelo.	77
Figura 5-31. Relación del Lixiviado generado vs el tratado.....	84
Figura 5-32. Concentración de DBO5.....	86
Figura 5-33. Caudal Río Tunjuelo por Balance de Masa	88
Figura 5-34. Resultados concentraciones de Oxígeno Disuelto - OD (mg/l)	91
Figura 5-35. Resultados para el parámetro DBO5 (mg/l).....	92
Figura 5-36. Punto de vertimiento del efluente PTL (2013) en simulación	92
Figura 5-37. Variación de la Demanda Biológica de Oxígeno DBO ₅	94
Figura 5-38. Variación del Oxígeno Disuelto	95
Figura 5-39. Ubicación de vertimiento y pozo 1 de la red de alcantarillado.....	96
Figura 5-40. Conexión directa al pozo 1 (alternativa 1).....	97
Figura 5-41. Conexión por la ribera del Río Tunjuelo al pozo 1 (alternativa 2).....	97

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 3-1. Valores adoptados de Calidad para el Río Bogotá	15
Tabla 3-2. Objetivos de calidad de la Cuenca Media según Decreto 1594/84	15
Tabla 3-3. Objetivos de calidad de Vertimientos Industriales según Res 5731 de 2008 ..	16
Tabla 3-4. Objetivos de calidad a cuatro (4) años periodo (2009-2012)	17
Tabla 3-5. Objetivos de calidad a diez (10) años.....	17
Tabla 3-6. Calidad establecida por el Acuerdo 43 de 2006 para el agua Clase IV o agua para uso agrícola con restricciones.....	19
Tabla 3-7. Normatividad de la Calidad de los Lixiviados	20
Tabla 3-8. Normatividad Ambiental Distrital Vertimientos (SDA)	21
Tabla 4-1. Composición típica del lixiviado de un relleno sanitario.	26
Tabla 4-2. Composición típica del biogás generado en un relleno sanitario	26
Tabla 4-3. Periodo de degradación de la materia orgánica	27
Tabla 5-1. Coordenadas del Relleno Sanitario Doña Juana	36
Tabla 5-2. Descripción de las zonas del Relleno Sanitario Doña Juana	38
Tabla 5-3. Generación promedio mensual de lixiviados período 2002-2012 y caudales promedio tratados en el mismo período, según reportes de operación del relleno (2012).	40
Tabla 5-4. Proyección de Generación de Lixiviados en RSDJ.....	42
Tabla 5-5. Características del lixiviado Relleno Sanitario Doña Juana (Jun-Nov 2011)...	44
Tabla 5-6. Cronología de diseño del Sistema de tratamiento de lixiviados	46
Tabla 5-7. Unidades del Sistema de tratamiento de lixiviados del RSDJ.....	49
Tabla 5-8. Población y cobertura.....	60
Tabla 5-9. Proyecciones de Caudales y Estimación de las Cargas Contaminantes	60
Tabla 5-10. Cargas Contaminantes proyectadas	61
Tabla 5-11. Parámetros para el diseño de la PTAR Canoas (año saturación).....	62
Tabla 5-12. Ríos Urbanos de la ciudad de Bogotá, calidad del agua.	66
Tabla 5-13. Categorías de calificación del CCME-WQI	68
Tabla 5-14. Puntos de muestreo en la red de calidad hídrica del río Tunjuelo (2007-2008)	70
Tabla 5-15. Variación del caudal en los puntos de muestreo del río Tunjuelo 2007-2008	72
Tabla 5-16. Comportamiento de la DBO ₅ en los diferentes puntos de monitoreo del río Tunjuelo 2007-2008	73
Tabla 5-17. Concentración de NTK y Amonio en los puntos de muestreo del río Tunjuelo 2007-2008.....	73

Tabla 5-18. Concentración de NTK y Amonio en los puntos de muestreo del río Tunjuelo Fase 1, Fase 2 y Fase 3.....	78
Tabla 5-19. Valores de carga y población equivalente del lixiviado crudo	81
Tabla 5-20. Valores promedio de parámetros de interés en el efluente de la PTL relleno sanitario Doña Juana (enero-diciembre de 2011)	82
Tabla 5-21. Relación Caudal de lixiviado generado vs caudal tratado	83
Tabla 5-22. Valores de carga y concentración en efluente PTL (vertimiento tratado).	84
Tabla 5-23. Valores de referencia 50 m antes y 50 m después de la descarga del efluente de la PTL en el río Tunjuelo (junio-noviembre de 2011).	85
Tabla 5-24. Caudales aproximados del Rio	87
Tabla 5-25. Datos de Cabecera.....	88
Tabla 5-26. Punto de Descarga.....	89
Tabla 5-27. Datos hidráulicos	89
Tabla 5-28. Constantes de Reacción de DBO_5 , OD.....	89
Tabla 5-29. Coeficientes N, P y Algas	90
Tabla 5-30. Resultados de la simulación	90
Tabla 5-31. Datos utilizados para el balance de OD y DBO_5 en el modelo Streeter y Phelps	93
Tabla 5-32. Variación de la DBO_5 y OD aplicación modelo de Streeter y Phelps.....	93
Tabla 5-33. Comparación de la normatividad de vertimientos y cumplimiento de límites máximos permisibles	98
Tabla 5-34. Parámetros de diseño de la PTAR CANOAS.....	99
Tabla 5-35. Cargas que afectarían a la PTAR Canoas.....	101
Tabla 5-36. Diseño Hidráulico y empalme de colectores de alcantarillado.....	102

Introducción

En la mayoría de las grandes ciudades del mundo el acelerado crecimiento demográfico ocasiona un incremento en la demanda de servicios de aseo y limpieza, así como la generación de elevadas cantidades de residuos sólidos. Dentro de las alternativas de disposición final de esos desechos se utilizan los rellenos sanitarios, que son sitios seleccionados adecuadamente para depositar todos los residuos producidos, evitando así su dispersión y los posibles focos de infección que ello pueda ocasionar. Como resultado de la descomposición de los residuos sólidos que allí se depositan se genera un lixiviado con características muy variables en términos de caudal y composición, pero altamente contaminante. (Baig et al, 1999).

La ciudad de Bogotá produce actualmente cerca de 190.000 toneladas mensuales de residuos sólidos que están siendo dispuestos en el Relleno Sanitario Doña Juana, un predio de 453 hectáreas ubicado en la localidad de Ciudad Bolívar, al sur de la capital, sobre la margen izquierda del río Tunjuelo. Los lixiviados que genera el relleno sanitario Doña Juana son tratados en una planta de tratamiento de lixiviados-PTL antes de su descarga al cuerpo receptor, en este caso, el río Tunjuelo.(UAESP, 2012)

Por otra parte, el impacto de la descarga de los lixiviados del relleno sanitario Doña Juana ha venido siendo estudiado de manera regular tanto por las entidades ambientales (CAR, DAMA, Secretaría de Ambiente, etc.) como por los operadores del relleno, en coordinación con la Unidad Administrativa Especial de Servicios Públicos-UAESP. Otras entidades públicas y privadas como la Empresa de Acueducto y la Universidad de los Andes han contribuido en la recolección y análisis de la información a través de convenios interinstitucionales.

Lo cierto es que aunque la cuenca del río Tunjuelo recibe numerosos aportes tanto de tipo doméstico como industrial, producto de la dinámica socioeconómica que se adelanta en esa zona, el vertimiento de los lixiviados contribuye significativamente al deterioro de ese importante recurso hídrico y cualquier alternativa que permita reducir el impacto de la descarga a dicha corriente de agua redundará en el mejoramiento de las condiciones de vida de los habitantes del sector.

Con base en lo anterior y teniendo en cuenta que actualmente se adelanta el Plan de Saneamiento del Río Bogotá que contempla, entre otras obras, la construcción de interceptores paralelos a los ríos Fucha y Tunjuelo, se abre la posibilidad de incorporar los lixiviados del relleno sanitario Doña Juana a los colectores que conducen las aguas residuales del sur de la capital hacia la PTAR Canoas, en inmediaciones del municipio de Soacha. De esta manera se estaría evitando la descarga directa, con o sin tratamiento previo, de los líquidos lixiviados al río Tunjuelo.

Con este trabajo se pretende analizar el efecto de los lixiviados sobre la calidad del agua del río Tunjuelo y la posibilidad de un tratamiento conjunto con las aguas residuales municipales. Esto, teniendo en cuenta la necesidad de garantizar el cumplimiento de la norma de vertimientos establecida por la CAR, situación que demanda una optimización permanente y continua del proceso que se desarrolla en la Planta de Tratamiento de Lixiviados lo cual ha demandado y seguirá demandando mayores recursos, sin garantizar una sostenibilidad económica ni ambiental del sistema y su entorno.

El documento contiene 6 capítulos, sin incluir la bibliografía, ordenados de la siguiente manera:

1. Objetivos, 2. Alcance y metodología, 3. Antecedentes y justificación, 4. Marco teórico 5. Estudio de caso, 6. Conclusiones y Recomendaciones.

1 Objetivos

1.1 Objetivo General

Estimar los efectos del lixiviado del Relleno Sanitario Doña Juana sobre la calidad del Río Tunjuelo y el posible tratamiento de los mismos en la futura PTAR Canoas.

1.2 Objetivos Específicos

- a) Establecer y evaluar la información disponible de los lixiviados del Relleno Sanitario Doña Juana y de la calidad del agua del Río Tunjuelo en sus alrededores.
- b) Recopilar y analizar la información referente al interceptor del Río Tunjuelo y la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Canoas.
- c) Evaluar la factibilidad del tratamiento conjunto con aguas residuales domesticas en la PTAR Canoas.

2 Alcance y metodología

Dadas las limitaciones de recursos disponibles para el desarrollo del proyecto y teniendo en cuenta la complejidad de la problemática tratada, el alcance que se establece está limitado al planteamiento de una hipótesis que no ha sido contemplada en ninguno de los estudios adelantados por las entidades involucradas en el programa de saneamiento del río Bogotá y sus principales afluentes, para este caso particular el río Tunjuelo. Es por lo tanto una primera aproximación que deberá ser desarrollada con mayor profundidad en trabajos posteriores, aplicando herramientas de modelación al comportamiento del río y a la operación de la planta de tratamiento de aguas residuales que se construirá aguas abajo de la confluencia de los ríos Bogotá y Tunjuelo.

Para el planteamiento y análisis de alternativas se utilizará básicamente la información histórica disponible sobre la calidad del río Tunjuelo, la operación del Relleno Sanitario Doña Juana, el Plan de Saneamiento y Manejo de Vertimientos de la Capital del país, con énfasis en la implementación de la PTAR Canoas. Fundamentalmente el aporte del trabajo consistirá en analizar uno o varios escenarios que surgen de la posibilidad de suprimir la descarga directa, con tratamiento previo, de los lixiviados que genera la operación del relleno sanitario Doña Juana.

Pregunta de Investigación

¿Qué tan significativo es el impacto del vertimiento de los lixiviados del relleno sanitario Doña Juana sobre la calidad del río Tunjuelo?

¿Es factible un tratamiento conjunto de dichos lixiviados con las aguas residuales domésticas en la PTAR de Canoas?

Para intentar responder estas inquietudes planteadas es necesario analizar el comportamiento de los lixiviados del relleno sanitario Doña Juana, el funcionamiento del sistema de tratamiento de lixiviados (PTL), la capacidad de asimilación del río Tunjuelo y la funcionalidad del tratamiento en la PTAR Canoas. Son varios los escenarios a considerar:

Escenario 1: Tratamiento de los lixiviados en las instalaciones del relleno sanitario y descarga del efluente tratado en el río Tunjuelo (situación actual).

Escenario 2: Tratamiento de los lixiviados en las instalaciones del relleno sanitario y descarga del efluente tratado en el interceptor Tunjuelo para su post-tratamiento en la PTAR Canoas.

Escenario 3: Pre tratamiento fisicoquímico de los lixiviados en las instalaciones del relleno sanitario y descarga del efluente en el interceptor Tunjuelo para tratamiento secundario en la PTAR Canoas.

Escenario 4: Recolección y transporte del lixiviado del relleno sanitario, sin tratamiento previo, hasta la PTAR Canoas para el tratamiento conjunto con las aguas residuales municipales.

De los cuatro escenarios planteados se deben tener las siguientes consideraciones:

Un alternativa técnica que se realizó en el Relleno fue la recirculación de lixiviados¹: A nivel técnico, esta práctica se manejo como un pre tratamiento para el manejo de lixiviados no fue viable, puesto que empleo el relleno sanitario como un reactor anaerobio. Dichas prácticas se consideran en algunos rellenos sanitarios pues debe considerarse con especial cuidado puesto que puede influir significativamente en la estabilidad geotécnica del mismo, ya que la recirculación de lixiviado aumenta la humedad de la masa de residuos, aumenta la tasa de generación de gases y por consiguiente puede aumentar las presiones internas de gases y líquidos, que pueden llegar a comprometer la estabilidad estructural de los taludes del sistema. Por otro lado se debe tener en cuenta que la generación de lixiviados en el RSDJ se producen en función de diferentes aspectos como: la cinética de degradación y características de los residuos, contenido intrínseco de humedad, rutina de cobertura de celdas y de las condiciones de precipitación e infiltración de aguas lluvias; se realiza el drenaje y posterior conducción de estos líquidos, hacia una cadena de almacenamientos para regulación y homogenización y su posterior tratamiento en el STL.

La solución adoptada para el operador que construyo la planta de tratamiento de lixiviados la cual a la fecha continua en funcionamiento es la combinación de un proceso físico-químico (coagulación-precipitación química) con un proceso biológico (aireación extendida con desnitrificación), de hecho la literatura reportada por la EPA referenciaba esta combinación como la “BAT Mejor alternativa técnica disponible”.

A nivel contractual, el Distrito a través de la Unidad Administrativa Especial de Servicios Públicos (UAESP) adscrita a la Secretaria de Hábitat de Alcaldía Mayor de Bogotá, planea, coordina, supervisa y controla la prestación de los servicios de

¹ Giraldo E., "Manejo Integrado de Residuos Sólidos Urbanos", 1997. Disponible en: <https://revistaing.uniandes.edu.co/pdf/Rv14-A8.pdf>, consultado 29/07/2013.

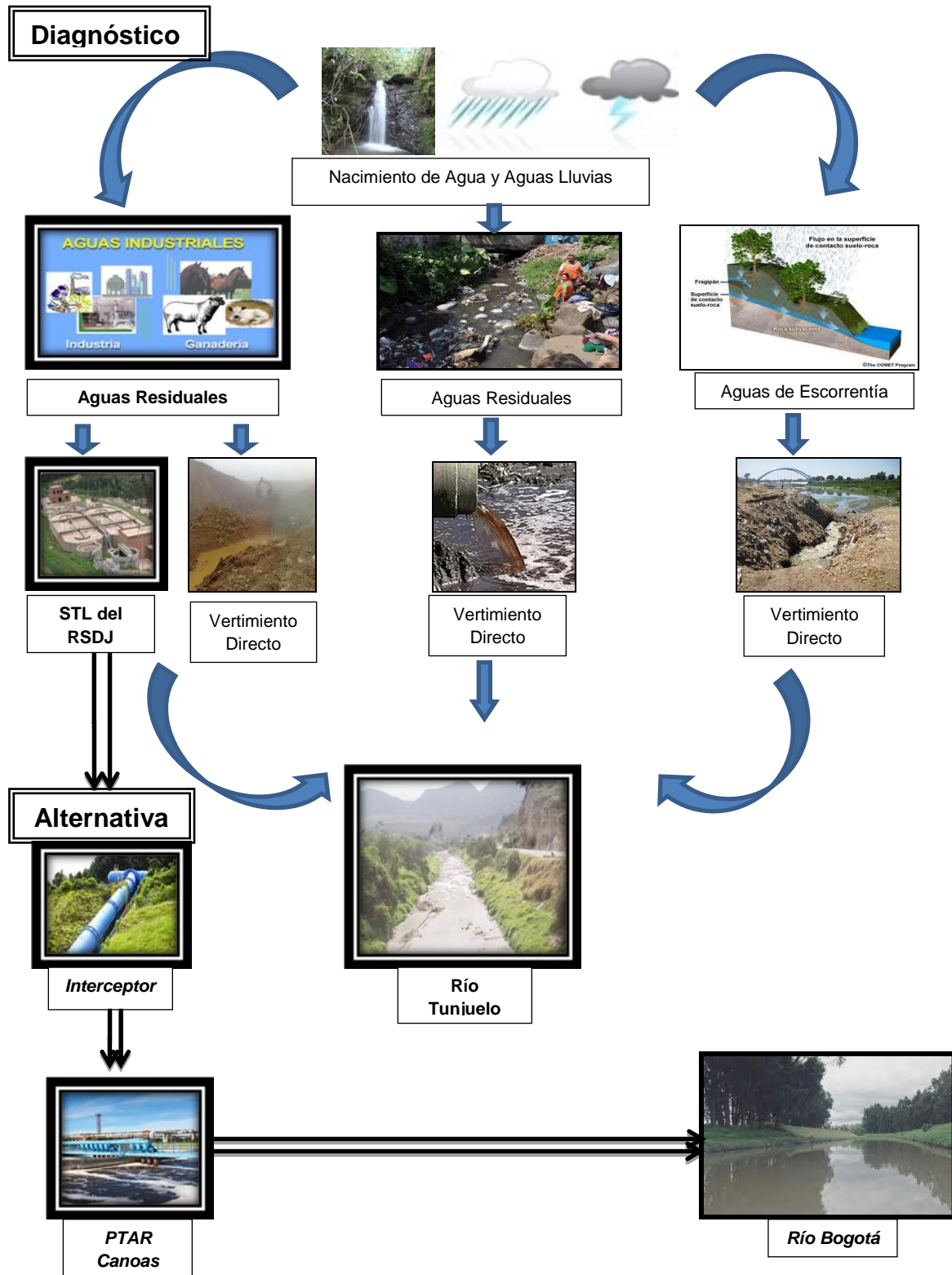
la disposición final de residuos sólidos de la ciudad de Bogotá, por lo cual se llevan procesos de contratos de concesión con un particular para ejercer la operación del Relleno Sanitario. Por lo anterior cualquier tipo de inversión en la operación debe ser justificada y utilizada en su totalidad.

Teniendo en cuenta lo anterior, para el desarrollo de la presente investigación se tomarán para el análisis los escenarios 1 y 2 que constituyen opciones complementarias encaminadas a la recuperación de la calidad del agua del cuerpo receptor actual, (Río Tunjuelo). Para el efecto se procederá al estudio de la información disponible sobre la generación y calidad del lixiviado, así como la calidad del agua del río Tunjuelo y condiciones de diseño de la PTAR Canoas. Se descartan los escenarios 3 y 4 puesto que es indispensable utilizar la infraestructura existente en el relleno sanitario Doña Juana para el tratamiento de lixiviados, la cual corresponde a tratamientos físicos, químicos y biológicos que permiten mejorar la calidad de lixiviado generado en el relleno; de no ser utilizadas se podría tener implicaciones legales, por tal razón se descartan del análisis estos dos escenarios dentro de la presente investigación.

Adicionalmente, se debe tener en cuenta la gran producción de lixiviado asociada también a un régimen de lluvias intenso en la cuenca del río Tunjuelo durante los últimos años, que a llevó a tomar medidas en el Relleno sanitario como la ampliación del tratamiento frente a los caudales que se generan para su posterior optimización, temas que se encuentran en proceso. Ya que estos temas deben realizarse en conjunto con la respectiva autoridad ambiental.

En síntesis, la metodología a seguir, considerando la compleja problemática de la cuenca se resume en el esquema adjunto.

Figura 2-1. Esquema metodológico



3 Antecedentes y Justificación

3.1. Antecedentes

Sin duda el desarrollo de las ciudades si bien produce beneficios económicos y sociales puede generar igualmente consecuencias desfavorables a nivel ambiental. Por lo regular los residuos sólidos generados en las actividades urbanas son enviados a rellenos sanitarios propiciando un deterioro en la calidad del recurso hídrico que recibe los lixiviados.

La experiencia colombiana en cuanto a la utilización de rellenos sanitarios como alternativa de disposición de residuos sólidos puede considerarse exitosa. Sin embargo, los resultados obtenidos respecto al tratamiento de los lixiviados no han sido totalmente satisfactorios. La dificultad para el tratamiento de lixiviados y la causa de los pocos éxitos obtenidos, radica en la gran cantidad de sustancias presentes así como su variabilidad en el tiempo. Esto implica que se requieren varias etapas de tratamiento y flexibilidad, aspectos que elevan los costos cuando se utilizan diferentes tipos de tecnologías.

Teniendo en cuenta lo anterior conviene evaluar la problemática de contaminación de los ríos la cual requiere esfuerzos continuos para su mitigación, minimización y en un futuro próximo su restauración, compensación y prevención. Estos esfuerzos deben estar soportados por un marco legislativo que ha venido desarrollándose en los últimos años en Colombia, como una necesidad de gestionar la calidad de las fuentes hídricas del país, especialmente las superficiales.

Para citar un ejemplo, la ciudad de Bogotá toma el agua de la región, la usa y luego la vierte como agua residual sin tratamiento previo. Este hecho generador de insalubridad y deterioro ambiental es inocultable, pero no ha conducido a plantear lo obvio: recuperar el río. En cambio, en los últimos veinte años, se vienen debatiendo diversas alternativas que apuntan más hacia aspectos parciales como la descontaminación o la prevención de inundaciones, sin una visión integral tanto del problema como de las soluciones.

Uno de los mayores aportes de contaminación al río Bogotá lo produce el río Tunjuelo, que abastece de agua a un amplio sector de la población urbana localizada al sur de la ciudad, y al mismo tiempo es víctima del aprovechamiento irracional en su cuenca por actividades como la extracción de materiales de

construcción, ladrilleras, la oferta formal e informal de vivienda y el Relleno Sanitario Doña Juana. (SDA, 2008)

La interventoría HMV-CONCOL del Relleno Sanitario Doña Juana revisó la situación integral del Río Tunjuelo, advirtiendo que actividades contaminantes se presentaban a través de toda su cuenca, donde se encontró que no sólo recibe el efluente del Sistema de Tratamiento de Lixiviados, sino los vertimientos de canteras, ladrilleras, curtiembres, mataderos, industria química y todas las aguas servidas del sistema de alcantarillado que se encuentra a su paso. Todo esto sucede, en gran parte, aguas abajo de la descarga del lixiviado tratado y todo el cumplimiento de la exigencia normativa a la altura del RSDJ, se pierde aguas abajo porque actualmente la solución a la problemática de este recurso hídrico no es integral ni equitativa. (HMV-CONCOL, 2008)

El 17 de Octubre de 2006, la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca – CAR expidió el Acuerdo Número 43 “Por el cual se establecen los objetivos de calidad del agua para la cuenca del río Bogotá a lograr en el año 2020”. La Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca - CAR, elaboró el Estudio “Propuesta de Metodología para la determinación de los objetivos de calidad de la cuenca del río Bogotá”, el cual recoge las evaluaciones de calidad cualitativas y cuantitativas disponibles respecto del recurso, y desarrolla una metodología para determinar los Objetivos de calidad para el río Bogotá, que contiene: i) Definición de la línea base a través de la identificación de los usuarios del recurso en la cuenca, y el cálculo de las cargas puntuales municipales en términos de Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) y Sólidos Suspendidos Totales (SST). ii) Diagnóstico del estado de la calidad de los cuerpos de agua de la cuenca, utilizando índices de calidad del recurso hídrico. iii) Definición de los usuarios del recurso hídrico en la cuenca. iv) Definición de escenarios de saneamiento de los cuerpos receptores y el estado futuro de la calidad del recurso hídrico en un horizonte proyectado al año 2020. v) Definición de objetivos de calidad para el recurso hídrico con base en el análisis de la información anterior.

El río Tunjuelo cuenta con numerosos afluentes entre los que se destacan las quebradas Yomasa, Santa Librada, Trompeta, Limas y la Chiguaza que atraviesa las localidades de San Cristóbal, Rafael Uribe y Tunjuelito. En la parte baja de la microcuenca de la quebrada La Chiguaza (cuenca baja del río Tunjuelo), existe una importante actividad industrial y minera que ha generado una serie de problemáticas asociadas (contaminación del aire, olores ofensivos y proliferación de vectores) y la consecuente afectación a la salud humana. (SDA, 2008)

De otro lado, como parte del Plan Maestro de Saneamiento la Empresa de Acueducto adelanta actualmente la construcción de un túnel que servirá para descontaminar el Río Bogotá y parte del Tunjuelo. La estructura cuenta con 8 kilómetros de largo y servirá para canalizar las aguas residuales de por lo menos tres millones de habitantes de la ciudad. La obra atraviesa las localidades de Bosa y Kennedy. El objetivo del túnel es llevar las aguas negras a la futura planta

de tratamiento de Canoas antes de ser entregada al Río Bogotá. En este proyecto se ha establecido que la actividad industrial se concentra principalmente en el barrio San Benito, que se ha especializado en la industria de curtiembres (agrupando aproximadamente 400 fábricas) y que llegó a este sector proveniente del barrio Santander en busca de un territorio que les permitiera facilidades de acceso al agua, fundamental para su producción, convirtiéndose en una de las principales fuentes de contaminación del río Tunjuelo puesto que el proceso de curtición se realiza con materia orgánica en descomposición, metales pesados (como el mercurio y el cromo) y combustión que generan olores fétidos, además de verter residuos líquidos al cuerpo de agua. (Rodríguez, Universidad de Manizales.2010)

Toda esta área se caracteriza también por ser objeto de intensa actividad minera y porque a lo largo de cuarenta años ha estado bajo el control de grandes compañías nacionales e internacionales (Holcim, Cemex y Fundación San Antonio). Después de las fuertes lluvias ocurridas a finales de mayo y comienzos de junio del 2002, el río Tunjuelo se desbordó y como consecuencia de ello, en las canteras de explotación quedaron almacenadas cerca de treinta millones de metros cúbicos de aguas contaminadas y además el cauce del río se vio afectado de tal manera que, en la actualidad, dicho cauce es “errático” en ese sector. (SDA, 2008)

Vale la pena mencionar que en noviembre de 1988 el Relleno Sanitario Doña Juana inició su operación con diseños desarrollados por el Ingeniero Héctor Collazos y se da cierre a los botaderos El Cortijo y Gibraltar donde se venían disponiendo a cielo abierto los residuos sólidos de la ciudad. El relleno sanitario fue adecuado a nivel de fondo con sistema de filtros para la recolección de lixiviados y con chimeneas en gaviones para la extracción de biogás. Posteriormente, en 1999, se contrataron los diseños de una planta para el tratamiento de los lixiviados producidos en el relleno sanitario Doña Juana y en Abril de 2000 se inició su construcción. Igualmente, en 1999 se pone en marcha el Plan Maestro de Residuos Sólidos contratado con la firma alemana Fischner, con el cual se busca definir las estrategias y tecnologías futuras para el manejo y disposición final de los residuos sólidos de Bogotá hasta el año 2015. (EIA, 2008).

Algunos estudios y proyectos han proporcionado información sobre la calidad del agua del río Tunjuelo. Entre otros vale la pena mencionar:

- Convenio interadministrativo No. 041/02 (numeración DAMA) y 198/02 (numeración IDEAM), cuyo objeto es realizar la instalación, el mantenimiento y la operación de la Red de Calidad del Recurso Hídrico de Bogotá, D.C.
- Convenio 017 de 2004, suscrito entre la SDA y la EAAB-ESP para la reubicación de puntos móviles y fijos así como para la selección del Índice de

Calidad del Agua más apropiado para las corrientes que atraviesan el perímetro urbano de la Capital. Informe de Calidad del Sistema Hídrico de Bogotá, 2004.

- Interventoría Unión Temporal Colombo Canadiense-UTCC (2006), “Análisis comparativo de la calidad de los vertimientos de lixiviados del Relleno Sanitario Doña Juana, la calidad del río Tunjuelo y la Resolución 3358 de 1990”. Las conclusiones del estudio fueron las siguientes: 1) El análisis demuestra que la norma para el vertido es estricta, que el río está contaminado y los lixiviados tratados no son los únicos aportes de contaminación al río. Existe dilución en el río y esto sucede sin que se altere su calidad 2) Es importante evaluar desde el punto de vista de eficiencia económica las inversiones públicas, los efectos que la resolución 3358/90 tiene y tenga para los bogotanos, considerando los aspectos sociales, económicos, ambientales y técnicos.
- Convenio No. 005 de 2006 SDA y EAAB-ESP para la implementación conjunta del programa de monitoreo. Informe Calidad del Sistema Hídrico de Bogotá 2007-2008.
- Universidad de los Andes, Secretaría Distrital de Ambiente, Bogotá. Estudio de la Calidad del Recurso Hídrico de Bogotá (2009-2010) La metodología propuesta, al igual que en las anteriores fases de monitoreo de la Red de Calidad Hídrica de Bogotá (RCHB), involucró la revisión de los puntos de monitoreo que hasta la fecha poseía la red. El tipo de monitoreo realizado históricamente los parámetros de caracterización de aguas medidos hasta el momento fueron mantenidos, con el objeto de robustecer la información que normalmente alimenta la base de datos de la RCHB, que ha demostrado ser apropiada para el establecimiento del estado del recurso hídrico superficial en la ciudad. Al comparar el Índice de calidad del agua (*Water quality index-WQI*) del lapso 2008-2009 con el del 2009-2010, se observa a pesar de que el tramo sigue clasificándose como pobre los parámetros más críticos fueron SST, Fosforo total y pH Por otra parte, las altas concentraciones de N total y coliformes fecales — parámetros importantes de calidad de agua y que también presentaron datos que no cumplían con los objetivos de calidad pueden atribuirse de nuevo a los vertimientos desde el relleno sanitario y a que el río, en este sector, recibe altas cantidades de estiércol por escorrentía, debido a la actividad ganadera. Dicho estudio evidencia, además, presencia de metales y cianuros por fuera de la norma establecida por la CAR al paso de la estación Yomasa ubicada aguas arriba del vertimiento de la PTL del RSDJ.
- Convenio SDA y UNIANDES: Calidad del Sistema Hídrico de Bogotá 2009-2010 y 2011-2012. En este último se menciona que en el segundo tramo del río Tunjuelo de los puntos comprendidos en Yomasa y Doña Juana, el 16% no cumplió el objetivo de calidad, por lo cual se califica como marginal. La calidad del río en ese tramo durante el periodo 2009-2010 fue pobre, mejoró en el periodo 2010-2011 cuando se clasificó como regular, pero decayó en el periodo 2011-2012 cuando se calificó como marginal. La mejoría en el 2010-2011 se puede

asociar a la temporada de lluvias como se puede observar en la anexo C, la cual tiene efectos de dilución en los contaminantes. Se adjunta mapa en el anexo D, donde se muestra la calidad del río Tunjuelo.

- Estudio realizado por la Universidad de los Andes y la EAAB. De acuerdo con el Consejo Nacional de Política Económica y Social (CONPES, 2002), las cuencas alta y media del río Bogotá aportan 25 Ton/año de carga orgánica al río, mientras que la ciudad de Bogotá aporta más de 150 Ton/año. Por su parte, la Universidad de los Andes (UNIANDES) y la Empresa de Acueducto de Bogotá (EAAB), realizaron cinco campañas de monitoreo de calidad del agua sobre el río Bogotá, y sus principales afluentes y descargas (UNIANDES-EAAB, 2002). A partir de los resultados obtenidos en dicho estudio, se estimaron las cargas contaminantes promedio. Al comparar la carga medida en la Estación Vuelta Grande (aguas arriba de la confluencia del río Juan Amarillo), con la carga aportada por la ciudad de Bogotá (estimada sumando las cargas medidas en los ríos Salitre, Fucha y Tunjuelo, y en los principales vertimientos domésticos de la ciudad), se evidencia que la Capital es la principal fuente de contaminación del río Bogotá. La ciudad descarga más de diez veces la carga de DBO del río, mientras que en fósforo total (Pt) y nitrógeno total *Kjeldahl* (NTK), la ciudad aporta ocho y veinte veces la carga contaminante del río, respectivamente.

El escenario más favorable corresponde a la entrada en funcionamiento de las PTAR Salitre y Canoas, con nivel de tratamiento secundario, incluyendo desinfección. Dicho escenario genera reducciones en las carga de DBO y SST simuladas de hasta 80%, respecto a la situación actual. Sin embargo, los resultados de la simulación de dicho escenario aún reflejan condiciones anaeróbicas en la cuenca media del río Bogotá, así como altas concentraciones de nutrientes.

Los resultados obtenidos de la modelación de escenarios reflejan el impacto positivo de la separación de las aguas residuales del sistema pluvial de la ciudad, y el posterior tratamiento de dichas aguas residuales. Sin embargo, para todos los escenarios simulados se obtienen condiciones anaeróbicas en la cuenca media del río Bogotá. Este resultado evidencia la necesidad de complementar el programa de saneamiento previsto para la ciudad con medidas no estructurales como estrategias de control en la fuente y control local de las aguas combinadas de la ciudad. El análisis anterior es consistente con los resultados obtenidos en los escenarios simulados en el proyecto Modelación Dinámica de la Calidad del agua del Río Bogotá (EAAB-UNAL, 2010).

- Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca – CAR (Sobre Acuerdo 43). *“Propuesta de Metodología para la determinación de los objetivos de calidad de la cuenca del río Bogotá”*, el cual recoge las evaluaciones de calidad cualitativas y cuantitativas disponibles respecto del recurso, y desarrolla una metodología para determinar los Objetivos de calidad para el río Bogotá, que

contiene: i) Definición de la línea base a través de la identificación de los usuarios del recurso en la cuenca, y el cálculo de las cargas puntuales municipales en términos de Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) y Sólidos Suspendidos Totales (SST). ii) Diagnóstico del estado de la calidad de los cuerpos de agua de la cuenca, utilizando índices de calidad del recurso hídrico. iii) Definición de los usuarios del recurso hídrico en la cuenca. iv) Definición de escenarios de saneamiento de los cuerpos receptores y el estado futuro de la calidad del recurso hídrico en un horizonte proyectado al año 2020. v) Definición de objetivos de calidad para el recurso hídrico con base en el análisis de la información anterior.

Otros estudios están relacionados con la tratabilidad de los lixiviados de manera independiente ó conjuntamente con aguas residuales domésticas. El estudio *"Mitigación de la toxicidad anaerobia de lixiviados mediante mezclas con agua residual doméstica"* (Universidad del Valle, Torres Patricia, 2009) Menciona que los lixiviados contienen compuestos originalmente presentes en los residuos depositados en el relleno así como los formados en los procesos de degradación; cuando presentan altos contenidos de material orgánico y alta relación DBO₅/DQO, que el tratamiento biológico tiene gran potencial de aplicación; sin embargo, los altos niveles de nitrógeno y otros compuestos pueden ser inhibitorios o tóxicos para el proceso biológico. La evaluación de la toxicidad anaerobia permite determinar la magnitud y tipo de inhibición causada sobre los microorganismos encargados de la transformación final a metano y se determina comparando la Actividad Metanogénica Específica (AME) del lodo control alimentado únicamente con sustrato, con la AME del lodo alimentado con el mismo sustrato más el compuesto tóxico. Dado el creciente interés en el tratamiento de lixiviados con aguas residuales domésticas (ARD), se evaluó en escala de laboratorio la toxicidad anaerobia de lixiviados puros y mezclados con ARD para establecer el potencial efecto tóxico del lixiviado sobre la digestión anaerobia. En los ensayos usando lixiviado puro, se presentó una elevada reducción de la AME, identificándose dos tipos de inhibición: metabólica y fisiológica. En los ensayos usando mezclas de lixiviado y ARD (5 y 10%), el porcentaje de inhibición se redujo sustancialmente, alcanzándose condiciones de sustratos no tóxicos. Los resultados sugieren la potencialidad de aplicación del tratamiento con ARD como una estrategia adecuada de manejo de lixiviados.

En la Universidad de Valparaíso, Centro de Manejo y Disposición Final de Residuos Sólidos, Chile (2009) se hizo adelantó el *Estudio de Impacto Ambiental para una planta de Tratamiento de Lixiviados*. El caudal o flujo de líquido percolado se determinó a partir del balance hídrico realizado al relleno sanitario. Estos valores permitieron establecer el caudal de diseño para la Planta de Tratamiento de Lixiviado (PTL), estimando en 300 m³/d el máximo caudal generado durante un año lluvioso, flujo correspondiente al del año 13 luego de iniciado el funcionamiento del relleno sanitario. Se concluyó que el sistema propuesto deberá ser eficiente para cumplir con los estándares requeridos por las

normas respectivas. Además debe ser un sistema sustentable económicamente en cuanto a los costos de inversión, operación y mantenimiento.

En el Anexo A, se presenta una relación de los estudios realizados por estudiantes de la Universidad Nacional de Colombia con temas que, directa o indirectamente, son materia del presente trabajo.

En el Anexo B, se presenta una relación de estudios realizados por otras entidades o estamentos relacionados directamente o indirectamente con el tema del trabajo de grado.

3.2. Aspectos Legales

3.2.1. Acuerdos y Resoluciones CAR

El 17 de Octubre de 2006, la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca – CAR expidió el Acuerdo Número 43 “Por el cual se establecen los objetivos de calidad del agua para la cuenca del río Bogotá que se debe lograr en el año 2020”.

El artículo 6 del Decreto 3100 de 2003 modificado por el Decreto 3440 de 2004 ordena que previo al establecimiento de las metas de reducción de una cuenca, tramo o cuerpo de agua, la autoridad ambiental deberá entre otros aspectos establecer los objetivos de calidad de los cuerpos de agua de acuerdo a su uso conforme a los Planes de Ordenación del Recurso Hídrico, determinando que para el primer quinquenio de cobro, en ausencia de los Planes de Ordenamiento del Recurso, las autoridades ambientales competentes podrán utilizar las evaluaciones de calidad cualitativas o cuantitativas del recurso disponible.

De igual manera, el Acuerdo 43 menciona al Documento CONPES 3320 de 2004, que define la estrategia ambiental para el manejo del río Bogotá y plantea unas metas esperadas para el año 2020. En el mismo documento se encuentra un plan de acción cuyo horizonte de proyección está planteado bajo el principio de gradualidad y acorde con los recursos económicos para su desarrollo.

3.2.2. Valores adoptados para usos de agua a partir de la normatividad nacional e internacional para la Calidad en el Río Bogotá

Estudios desarrollados por la EAAB-ESP dentro del marco del programa de saneamiento del río Bogotá han permitido definir criterios de calidad que podrían ser aceptables para diferentes usos potenciales del recurso hídrico a lo largo de la cuenca.(Tabla 3-1).

Tabla 3-1. Valores adoptados de Calidad para el Río Bogotá

PRINCIPALES PARAMETROS PARA DETERMINAR EL REUSO DEL AGUA	ESTANDARES ADOPTADOS PARA USOS DE AGUA A PARTIR DE LA NORMATIVIDAD NACIONAL E INTERNACIONAL						
	Estético	Agrícola restringido	Agrícola no restringido	Urbano y Recreativo secundario	Urbano y Recreativo primario	Para potabilizar	Recuperación Ecológica
	1	2	3	4	5	6	7
Oxígeno disuelto OD			>0(6)	>0(3)	>0(3)		>4
DBO5 Total (mg/L)							
SST (mg/L)		<100(2)	<100(2)	<100(2)	<100(2)		
PH		4.5 - 9(5)	4.5 - 9(5)	5.0 - 9(5)	5.0 - 9(5)	5.0 - 9(5)	4.5 - 9(5)
Flotantes y Espumas	Ausente(6)	Ausente(6)	Ausente(6)	Ausente(6)	Ausente(6)	Ausente(6)	Ausente(6)
Grasas y aceites	Ausente(6)	Ausente(6)	Ausente(6)	Ausente(6)	Ausente(6)	Ausente(6)	Ausente(6)
Sólidos de fondo	Ausente(6)	Ausente(6)	Ausente(6)	Ausente(6)	Ausente(6)	Ausente(6)	Ausente(6)
Olor	Ausente(1)	Ausente(6)	Ausente(6)	Ausente(6)	Ausente(6)	Ausente(6)	Ausente(6)
Comp.Amoniacales						<1	<0.5
Cadmio (mg/L)		<0,01(5)	<0,01(5)	<0,01(5)	<0,01(5)	<0,01(5)	<0.005 (4)
Cobre (mg/L)		<0,2(5)	<0,2(5)	<0,2(5)	<0,2(5)	<1(5)	<0.001(4)
Cromo (mg/L)		<0,1(5)	<0,1(5)	<0,1(5)	<0,1(5)	<0,05(5)	<0.02(4)
Niquel (mg/L)		<0,2(5)	<0,2(5)	<0,2(5)	<0,2(5)		<0.01(4)
Plomo (mg/L)		<5(5)	<5(5)	<5(5)	<5(5)	<0,05(5)	<0.1(4)
Coliformes totales			<5000(5)	<5000(5)	<1000(5)	<20000(5)	N.D.
Coliformes fecales		<10000(2)	<1000(5)	<1000(2)	<200(5)	<2000(5)	N.D.

Fuente. EAAB, 2010

(1): Que no afecte las zonas pobladas, (2): Valor tomado de la normatividad del D.F. México, (3): Si es un uso recreativo el OD debe ser mayor de 4., (4): Valor estimado que debe ser precisado con ensayos., (5): El valor adoptado es tomado del decreto 1594/84. (6): Desarrollado por la U.T., (7): Valor tomado del conocimiento de los expertos a partir de observaciones, Nota: El uso recreativo secundario equivalente al restringido y el primero al no restringido.

3.2.3. Objetivos de calidad de la Cuenca Media según Decreto 1594/84 (Derogado por el Decreto 3930 de 2010)

El decreto 1594/84 fija objetivos de calidad en la cuenca media del Rio Bogotá que se relacionan en la Tabla 3-2.

Tabla 3-2. Objetivos de calidad de la Cuenca Media según Decreto 1594/84

PRINCIPALES PARAMETROS PARA DETERMINAR EL REUSO DEL AGUA	CALIDAD Y USOS POSIBLES (Por parámetro)						
	SITUACION ACTUAL (AÑO 2002)				SITUACION FUTURA (AÑO 2012)		
	Promedio	Usos	Crítico	Usos	95%	Promedio	Usos
Oxígeno disuelto OD (mg/L)	0	1 2 6	0	1 2 6	0	0	1 2 6
DBO5 Total (mg/L)	80.38	1 2 3 4 5 6 7	109.14	1 2 3 4 5 6 7	52.40	48.27	1 2 3 4 5 6 7
SST (mg/L)	123.20	1 6 7	229.71	1 6 7	33.21	28.23	1 2 3 4 5 6 7
PH	6.65	1 2 3 4 5 6 7	6.65	1 2 3 4 5 6 7			1 2 3 4 5 6 7
Flotantes y Espumas	Presentes(7)		Presentes(7)		Ausente	Ausente	1 2 3 4 5 6 7
Grasas y aceites	Presentes(7)		Presentes(7)		Ausente	Ausente	1 2 3 4 5 6 7
Sólidos de fondo	Presentes(7)		Presentes(7)		Ausente	Ausente	1 2 3 4 5 6 7
Olor	Presentes(7)		Presentes(7)		Ausente	Ausente	1 2 3 4 5 6 7
Comp.Amoniacales (mg/L)	16.79	1 2 3 4 5	22.63	1 2 3 4 5	10.02	9.29	1 2 3 4 5
Cadmio (mg/L)	0.003	1 2 3 4 5 6 7	0.004	1 2 3 4 5 6 7			1 2 3 4 5 6 7
Cobre (mg/L)	0.024	1 2 3 4 5 6	0.033	1 2 3 4 5 6			1 2 3 4 5 6 7
Cromo (mg/L)	0.041	1 2 3 4 5 6	0.080	1 2 3 4 5			1 2 3 4 5 6 7
Niquel (mg/L)	0.029	1 2 3 4 5 6	0.035	1 2 3 4 5 6			1 2 3 4 5 6 7
Plomo (mg/L)	0.032	1 2 3 4 5 6 7	0.053	1 2 3 4 5 6 7			1 2 3 4 5 6 7
Coliformes totales	2.15E+08	1 2	4.35E+08	1 2			1 2
Coliformes fecales	3.46E+07	1	7.65E+07	1			1

Fuente. EAAB, 2010

(1): Que no afecte las zonas pobladas, (2): Valor tomado de la normatividad del D.F. México, (3): Si es un uso recreativo del OD debe ser mayo de 4, (4): Valor estimado que debe ser preciso con ensayos, (5): El valor adoptado es tomado del decreto 1594/84, (6): Desarrollo por la U.T., (7): Valor tomado a partir del conocimiento de los expertos a partir de observaciones 4 y 5: usos urbanos únicamente., Nota: El uso recreativo secundario, equivalente al restringido y el primero al no restringido.

3.2.4. Resolución 5731 de 2008 (SDA)

“Por la cual se deroga la Resolución 1813 de 2006 y se adoptan nuevos objetivos de calidad para los Ríos Salitre, Fucha, Tunjuelo y el Canal Torca en el Distrito Capital”. Acuerda:

ARTÍCULO PRIMERO. Adoptar el documento titulado *"Concentraciones de referencia para los vertimientos industriales realizados a la red de alcantarillado y de los vertimientos industriales y domésticos efectuados a cuerpos de agua de la ciudad de Bogotá - Informe Objetivos de Calidad"*, como información de soporte para el establecimiento de los objetivos de calidad de los Ríos Salitre, Fucha y Tunjuelo y del Canal Torca, dentro del perímetro urbano de Bogotá. Así mismo, este documento servirá como base conceptual del programa de tasas retributivas adelantado por la Secretaría Distrital de Ambiente - SDA.

ARTÍCULO SEGUNDO. Para efectos de fijación de objetivos de calidad, se adoptan los siguientes tramos:

Tabla 3-3. Objetivos de calidad de Vertimientos Industriales según Res 5731 de 2008

Cuenca	Tramo	Límites	
		Desde	Hasta
Río Tunjuelo	1	Entrada perímetro urbano	Desembocadura Quebrada Yomasa
	2	Desembocadura Q. Yomasa	Avenida Boyacá
	3	Avenida Boyacá	Autopista Sur
	4	Autopista Sur	Desembocadura Río Tunjuelo
Río Fucha	1	Entrada perímetro urbano	Carrera 7ª
	2	Carrera 7ª	Desembocadura Canal Comuneros
	3	Desembocadura Canal Comuneros	Avenida Boyacá
	4	Avenida Boyacá	Desembocadura Río Fucha
Río Salitre	1	Entrada perímetro urbano	Carrera 7ª
	2	Carrera 7ª	Carrera 30
	3	Carrera 30	Avenida 68
	4	Avenida 68	Desembocadura Río Juan Amarillo
Canal Torca	1	Entrada perímetro urbano	Calle 183
	2	Calle 183	Desembocadura Canal Torca

ARTÍCULO TERCERO: De acuerdo con la división por tramos, se establecen los siguientes objetivos de calidad según las tablas 3-4 y 3-5:

Tabla 3-4. Objetivos de calidad a cuatro (4) años periodo (2009-2012)

OBJETIVOS DE CALIDAD - 4 AÑOS															
Parámetro	Unidades	Tramos -Canal Torca		Tamos - Río Salitre				Tramo-Río Fucha				Tramos -Río Tunjuelo			
		1	2	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
OD	Mg/L	3	0,5	1	2	0,5	0,5	7	4	0,2	12	7	2	1	0,5
DB05	Mg/L	15	150	5	80	150	150	5	50	250	250	5	100	100	250
DQO	Mg/L	50	300	35	200	350	350	35	150	400	400	35	200	200	500
N TOTAL	Mg/L	5	40	5	20	40	40	3	20	40	40	3	20	20	50
PTOTAL	Mg/L	1	6	1	6	6	6	0,1	3	8	8	0,2	3	5	8
SST	Mg/L	20	150	10	80	150	150	10	30	150	200	10	120	150	300
A Y G	Mg/L	20	30	10	20	30	30	10	25	40	60	20	20	20	50
Coniformes Fecales	NMP/1000 mL	1,E+05	1,E+06	1E+05	1,E+06	1,E+06	1,E+06	1 E+03	1E+06	1,E+06	1.E-06	1,E+03	1,E+06	1 E+06	1,E+06
pH	Unidad	6,0-9,0	6,0-9,0	6,0-9,0	6,0-9,0	6,0-9,0	6,0-9,0	6,0-9,0	6,0-9,0	6,0-9,0	6,0-9,0	6,0-9,0	6,0-9,0	6,0-9,0	6,0-9,0
SAAM	Mg/L	1	4	1	3	3	3	0,5	3	4	4	0,5	3	3	3

Tabla 3-5. Objetivos de calidad a diez (10) años

OBJETIVOS DE CALIDAD -10 AÑOS															
Parámetro	Unidades	Tramos -Canal Torca		Tamos - Río Salitre				Tramo-Río Fucha				Tramos -Río Tunjuelo			
		1	2	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
OD	Mg/L	5	2	8	5	2	2	8	5	0,5	0,5	8	5	2	1
DB05	Mg/L	5	100	5	60	100	100	5	40	60	60	5	50	50	100
DQO	Mg/L	30	250	30	90	250	250	30	90	180	160	30	100	100	200
N TOTAL	Mg/L	2	20	2	10	20	20	1,5	10	10	10	1,5	10	10	20
PTOTAL	Mg/L	0,2	1	0,2	1	1	1	0,1	1	1	1	0,1	1	1	1
SST	Mg/L	10	60	10	30	60	60	10	25	30	30	10	30	30	60
A Y G	Mg/L	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Coniformes Fecales	NMP/1000 mL	1,E+04	1,E+05	1,E+04	1,E+05	1,E+05	1,E+05	1,E+02	1,E+05	1,E+05	1,E+05	1,E+02	1,E+05	1,E+05	1,E+05
pH	Unidad	6,5	6,5-8,5	6,5	6,5-8,5	6,5	6,5	6,5-8,5	6,5	6,5.8,5	6,5.6,5	6,5.8,5	6,5-8,5	6,5.8,5	6,5-8,5
SAAM	Mg/L	0,5	1	0,5	1	1	1	0,5	1	1	1	0,5	1	1	1

3.2.5. Normatividad para el vertimiento del Relleno Sanitario Doña Juana

La normatividad que aplica para el vertimiento del Relleno Sanitario Doña Juana es competencia de la Autoridad Ambiental correspondiente, en este caso, la Corporación Autónoma Regional–CAR–, y comprende: Resolución CAR 3358 del

10 de julio de 1990, en la cual se fija una norma de vertimientos al río Tunjuelo y se toman otras determinaciones y la Resolución 166 de 2008.

Con respecto al río Tunjuelo, el Acuerdo 43 de la CAR determina lo siguiente:

“11.- CUENCA DEL RÍO TUNJUELO CODIGO: 2120-09

Comprendida por el río Tunjuelo y sus afluentes, desde su cabecera hasta la desembocadura del río Bogotá, incluidos los Embalses de la Regadera y Chisacá, así:

11.1.- Sub cuenca La Regadera - Chisacá:

a). Comprendida por el río Chisacá y sus afluentes, desde su cabecera hasta la descarga del Embalse de La Regadera, corresponden a la clase II.

Donde se define como Clase II, lo que corresponde a los valores de los usos del agua para consumo humano y doméstico con tratamiento convencional, uso agrícola con restricciones y uso pecuario.

b). Embalse de Chisacá y Embalse de La Regadera, corresponden a la clase III.

Donde se define como Clase III, lo que corresponde a los valores asignados a la calidad de los Embalses, Lagunas, humedales y demás cuerpos lénticos de aguas ubicados dentro de la cuenca del río Bogotá.

11.2.- Sub cuenca del río Bajo Tunjuelo: Comprendida por el río Tunjuelo y sus afluentes desde la descarga del Embalse de La Regadera, hasta su desembocadura en el río Bogotá, así:

a) Cuerpos de agua afluentes al río Tunjuelo desde la descarga del Embalse de la Regadera hasta el perímetro urbano de Bogotá, corresponden a la Clase II.

b) Río Tunjuelo desde el perímetro urbano de Bogotá hasta su desembocadura en el río Bogotá, corresponde a Clase IV

Además, el texto del Acuerdo 43 de 2006 establece lo siguiente:

ARTÍCULO QUINTO.- Los objetivos de calidad para el río Bogotá adoptados mediante de la presente acuerdo, se tendrán como uno de los requisitos previos al proceso de fijación de las metas de reducción de las cargas contaminantes para efectos del cobro de la tasa retributiva.

ARTÍCULO SEXTO.- Los Objetivos de calidad establecidos en el presente acuerdo, se convierten en un referente para la definición de las inversiones

encaminadas al saneamiento de la cuenca del río Bogotá por parte de las entidades del nivel nacional, departamental y municipal.

ARTÍCULO SÉPTIMO.- Una vez alcanzados los objetivos de calidad propuestos al año 2020 bajo el principio de gradualidad, se deben fijar unos nuevos objetivos que le apunten al escenario ideal del río Bogotá, Los objetivos de calidad para la Clase IV o agua para riego con restricciones se observa en la Tabla 3-6.

Tabla 3-6. Calidad establecida por el Acuerdo 43 de 2006 para el agua Clase IV o agua para uso agrícola con restricciones.

PARÁMETROS	EXPRESADO COMO	Valor más restrictivo (Máximo que se puede obtener)
PARÁMETROS ORGÁNICOS		
DBO	mg/l	50
COLIFORMES TOTALES	NMP/100 ml	20.000
PARÁMETROS NUTRIENTES		
NITRITOS	mg/l	10
SÓLIDOS SUSPENDIDOS	mg/l	40
PARÁMETROS DE INTERES SANITARIOS		
ALUMINIO	mg/l	5
ARSÉNICO	CL 96/50	0.1
BERILIO	CL 96/50	0.1
BORO	mg/l	0.3-0.4
CADMIO	CL 96/50	0.01
CINC	CL 96/50	2
COBALTO	mg/l	0.05
COBRE	mg/l	0.2
CROMO(CR+6)	mg/l	0.1
FLUOR	mg/l	1
HIERRO	mg/l	5
LITIO	mg/l	2.5
MANGANESO	mg/l	0.2
MERCURIO	mg/l	0.01
MOLIBDENO	mg/l	0.01
NIQUEL	mg/l	0.2
Ph	Unidades	4.5-9.0
PLOMO	mg/l	0.1
SALES	mg/l	3.000
SELENIO	mg/l	0.02
VANADIO	mg/l	0.1

Fuente: Acuerdo 43 de 2006. Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca-CAR-.

3.2.6. Normatividad para la calidad de los lixiviados

La calidad de los lixiviados se encuentra definida en la normatividad colombiana a través de 1984 y de las resoluciones 1074 de 1997, expedida por la SDA y 3358 de 1990 de la CAR. Esta última se encuentra modificada por la resolución 166 de 2008 en la que se incluye el cadmio dentro de los parámetros a monitorear y la concentración de boro (Ver Tabla 3-7).

Tabla 3-7. Normatividad de la Calidad de los Lixiviados

PARÁMETRO	EXPRESADO COMO	Resolución 1074 de 1997 DAMA	Resolución 3358 de 1990 CAR	Resolución 166 de 2008 CAR
		Valor de la Norma (mg/L)	Valor de la Norma (mg/L)	Valor de la Norma (mg/L)
Aluminio	Al	-	5.0	5.0
Arsénico	As	0.1	0.1	0.1
Bario	Ba	5	-	-
Berilio	Be	-	0.1	0.1
Boro	B	-	0.3	4.0
Cadmio	Cd	-	-	0.01
Cinc	Zn	5	2.0	2.0
Cianuro	CN	1	-	-
Cobalto	Co	-	0.05	0.05
Cobre	Cu	0.25	0.2	0.2
Cromo Total	Cr	1	0.1	0.1
DBO5	O2	-	100	100
DQO	O2	2000	-	-
Grasas y Aceites	G y A	100	2.0	2.0
Hierro	Fe	-	5.0	5.0
Litio	Li	-	2.5	2.5
Manganeso	Mn	0.12	0.2	0.2
Mercurio	Hg	0.02	0.01	0.01
Molibdeno	Mo	.	0.01	0.01
Níquel	Ni	0.2	0.2	0.2
Plomo	Pb	0.1	0.1	0.1
Selenio	Se	-	0.02	0.02
Tenso activos	SAAM	20	-	-
Sólidos Suspendedos Totales	SST	800	-	-
Vanadio	V	-	0.1	0.1
pH		-	4.5 a 9.0	4.5 a 9.1
Fenoles	Fenol	0.2	0.2	0.2
Difenil, policlorado	Agente activo	-	ND	ND
Compuestos organoclorados	Concentración del agente activo	-	0.05	0.05

3.2.7. Normatividad para vertimiento en Alcantarillados

La Resolución 3957 de junio de 2009 de la Secretaria Distrital de Ambiente, por la cual se adopta la norma técnica para control y manejo de los vertimientos realizados a la red de alcantarillado público en el Distrito Capital. Ver tabla 3-8.

Tabla 3-8. Normatividad Ambiental Distrital Vertimientos (SDA)

PARÁMETROS	EXPRESADO COMO	Resolución 3957 de 2009 SDA
Aluminio Total	mg/L	10
Arsénico Total	mg/L	0.1
Bario Total	mg/L	5
Boro Total	mg/L	5
Cadmio Total	mg/L	0.02
Cianuro	mg/L	1
Cinc Total	mg/L	2
Cobre Total	mg/L	0.25
Compuestos Fenólicos	mg/L	0.2
Cromo Hexavalente	mg/L	0.5
Cromo Total	mg/L	1
Hidrocarburos Totales	mg/L	20
Hierro Total	mg/L	10
Litio Total	mg/L	10
Manganeso Total	mg/L	1
Mercurio Total	mg/L	0.02
Níquel Total	mg/L	10
Plata Total	mg/L	0.5
Plomo Total	mg/L	0.5
Selenio Total	mg/L	0.1
Sulfuros Totales	mg/L	0.1
Color	Unidad Pt-Co	5
DBO5	mg/L	800
DQO	mg/L	1500
Grasas y Aceites	mg/L	100
pH	Unidades	5.00-9.00
Solidos sedimentados	mg/L	2
SST	mg/L	600
Temperatura	°C	30
Tensoactivos (SAAM)	mg/L	10
Berilio	mg/l	NR
Cobalto	mg/l	NR
Vanadio	mg/l	NR
Difenilo Policlorados	mg/l	NR
Compuestos órgano clorados	mg/l	NR

El objeto de dicha resolución es establecer, la norma técnica para el control y manejo de los vertimientos de aguas residuales realizadas al sistema de alcantarillado público en Bogotá D.C., al tiempo que fija las concentraciones o estándares para su vertido. Así como el campo de aplicación que será a los vertimientos de aguas residuales diferentes a las de origen doméstico dentro del perímetro urbano de Bogotá D.C.

3.3. Justificación

La complejidad de los lixiviados que genera un relleno sanitario y las limitaciones que presenta la planta de tratamiento de los lixiviados del relleno sanitario Doña Juana frente a la norma de vertimientos establecida por la autoridad ambiental de la zona (Corporación Autónoma Regional –CAR), demanda una optimización permanente de los procesos que allí se desarrollan lo cual genera costos significativos que no garantizan una sostenibilidad económica ni ambiental para la problemática de la cuenca.

Por esa razón, se quiere explorar otro tipo de manejo de dichos vertimientos entre los cuales cabe la posibilidad de efectuar un tratamiento conjunto con las aguas residuales domésticas del sur de la Capital, específicamente, en las instalaciones de la PTAR Canoas. Esto resulta razonable desde el punto de vista práctico y técnicamente factible a la luz de experiencias reportadas en diferentes investigaciones realizadas tanto a nivel nacional como internacional.

Entre las publicaciones que aluden a la posibilidad de combinación de estos residuos se destacan estudios de la Universidad de Antioquia (2010) “Mitigación de la toxicidad anaerobia de lixiviados mediante mezclas con agua residual doméstica” y de la Universidad del Valle (2010) “Influencia de la incorporación de lixiviados sobre la biodegradabilidad anaerobia de aguas residuales domésticas”, entre otros, los cuales han generado conclusiones que permiten vislumbrar la factibilidad del tratamiento conjunto.

Para los propósitos del presente estudio se considera el análisis de la información contenida en los registros de calidad de los lixiviados del Relleno Sanitario Doña Juana, para evaluar la magnitud de la carga contaminante del vertimiento y su impacto en la calidad del agua del Río Tunjuelo que podría revertirse mediante, la conexión de estos residuos al interceptor de la PTAR Canoas.

En síntesis, se pretende aportar nuevos elementos de juicio en la búsqueda de soluciones diferentes para la problemática que afronta la cuenca del río Tunjuelo a su paso por importantes sectores urbanos del sur de la Capital del país.

4 MARCO TEÓRICO

4.1 Relleno Sanitario

Un relleno sanitario es el lugar técnicamente seleccionado, diseñado y operado para la disposición final controlada de los residuos sólidos, sin causar peligro, daño o riesgo a la salud pública, minimizando y controlando los impactos ambientales, utilizando principios de ingeniería para la confinación y aislamiento de residuos sólidos en un área mínima con compactación de residuos, con cobertura temporal y final de los mismos y control de los gases y lixiviados. (Giraldo, 2002)

Para el diseño de un relleno sanitario es necesario tener en cuenta múltiples aspectos relacionados con la selección y preparación del sitio, entre otros:

- Ubicación
- Vías de acceso
- Condiciones hidrogeológicas
- Vida útil del terreno
- Material de cobertura
- Clima de la zona
- Costos
- Destinación futura de los predios

El método constructivo y la secuencia de operación del relleno sanitario están determinados por la topografía del terreno. En general, la operación de un Relleno Sanitario comprende básicamente (Harsem, 1983):

- La disposición final de residuos sólidos: ordinarios, residuos del tratamiento de los residuos hospitalarios peligros y no peligrosos, infecciosos y de material aprovechable. Esto incluye a su vez los procesos de diseño, construcción o adecuación del área de disposición, la operación (disposición, compactación y disgregación) de los residuos, la captación y conducción de lixiviados, la evacuación de gases y las actividades de cobertura temporal, clausura y post clausura de las zonas rellenadas.
- Tratamiento de lixiviados generados en el relleno sanitario, el tratamiento debe garantizar que el efluente cumple con la normatividad de vertimientos aplicable e incluye la deshidratación, transporte y disposición final de los lodos generados en el tratamiento.

- **Tratamiento y aprovechamiento de Biogás:** Incluye las actividades de extracción activa, conducción, operación, tratamiento, aprovechamiento del biogás y la administración y mantenimiento de este componente.
- **El mantenimiento y administración:** Incluye los procesos de mantenimiento de las zonas en operación, las zonas clausuradas, del sistema de almacenamiento temporal, conducción de lixiviados, de las redes e instalaciones para la prestación de los servicios públicos, de las vías, de las áreas libres e instalaciones y edificaciones existentes dentro del relleno sanitario. También se incluyen las actividades de vigilancia del Relleno Sanitario que garanticen la seguridad del mismo, así como el mantenimiento y reposición de los cerramientos externos e internos.
- **Seguimiento y control de estabilidad:** Incluye el monitoreo geotécnico y análisis de estabilidad estático y dinámico de todas las zonas del relleno. Diseño, suministro, instalación, operación y reposición de la instrumentación de las zonas rellenadas, en operación, así como de las zonas nuevas y demás infraestructura, tal como diques, pondajes, celdas, entre otros, adicionando aquella que se requiera y reponiendo la que se vaya averiando, así como el diseño y construcción de las obras de estabilización cuando se requiera.
- **Gestión social:** Se refiere a las relaciones con las comunidades vecinas al relleno sanitario y con la ciudadanía en general y las estrategias y acciones establecidas para mitigar y compensar los impactos sociales y económicos generados por la actividad del relleno sanitario sobre dichas poblaciones, componente a cargo de la UAESP.
- **Salud Ocupacional y seguridad industrial:** se refiere a las medidas y criterios de operación a las que debe sujetarse los Operadores, la Interventoría, los usuarios del relleno sanitario y los visitantes de acuerdo a su grado de permanencia en el relleno sanitario, a fin de garantizar la seguridad en la operación y las buenas prácticas de salud e higiene del trabajo.

4.1.1. Lixiviados

Los lixiviados son los líquidos residuales generados por la descomposición bioquímica de los residuos y como resultado de la percolación de agua a través de los desechos en proceso de degradación.

Los lixiviados se captan y se retiran de la masa de residuos para que estos se estabilicen, en el RSDJ los lixiviados captados se conducen a una planta de tratamiento de lixiviados donde a través de procesos físico-químicos y biológicos

se retiran los contaminantes y así realizar su respectivo vertimiento. Los líquidos resultantes deben cumplir con los requerimientos establecidos por la Autoridad Ambiental correspondiente. La composición de los lixiviados varía mucho de acuerdo al tipo de residuos, las precipitaciones en el área, las velocidades de descomposición química u otras condiciones del lugar.

Son varios los factores que determinan la composición de un lixiviado: su edad, la precipitación, las variaciones estacionales del clima, el tipo de residuo y su composición, etc. Sin embargo el factor más relevante es la edad del relleno sanitario, siendo asociada directamente a la composición del lixiviado (Baig et al. 1999).

En cuanto a la edad del relleno se pueden diferenciar en: jóvenes y maduros. Los lixiviados provenientes de rellenos jóvenes poseen una alta concentración de Ácidos Grasos Volátiles (AGV) producto de la fermentación anaerobia que se lleva a cabo dentro del relleno, llegando a ser cerca del 95% de la materia orgánica presente (Harsem 1983).

Una de las características de estos AGV es que corresponden a compuestos de fácil biodegradación. Por tanto, considerando que la determinación de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) mide la materia orgánica total y la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) mide sólo materia biodegradable, para los lixiviados generados en rellenos jóvenes la razón DBO/DQO puede encontrarse en alrededor de 0,5. En rellenos más maduros ocurre el proceso metanogénico, última reacción del proceso completo de digestión anaerobia, donde gran parte de los AGV son transformados en biogás (CH_4 y CO_2). En esta etapa los lixiviados son formados principalmente por material orgánico de difícil degradación por tanto la relación DBO/DQO baja considerablemente a valores menores que 0,1. (Giraldo, 2002). (Ver tabla 4-1)

Tabla 4-1. Composición típica del lixiviado de un relleno sanitario.

CONSTITUYENTE	EDAD DEL RELLENO SANITARIO		
	MENOS DE 10 AÑOS		MAYOR DE 10 AÑOS
	Rango (mg/l)	Típico (mg/l)	Rango(mg/l)
DBO ₅	2.000 - 30.000	10.000	100 - 200
COT	1.500 - 20.000	6.000	80 - 160
DBO	3.000 - 60.000	18.000	100 - 500
Total de sólidos en suspensión	200 - 2.000	500	100 - 400
Nitrógeno orgánico	10 - 800	200	80 - 120
Nitrógeno amoniacal	10 - 800	200	20 - 40
Nitrato	5 - 40	25	5 - 10
Total fósforo	5 - 100	30	5 - 10
Ortofósforo	4 - 80	20	4 - 8
Alcalinidad como CaCO ₂	1.000 - 10.000	3.000	200 - 1.000
pH	4.5 - 7.5	6	6.6 - 7.5
Dureza total como CaCO ₂	300 - 10.000	3.500	200 - 500
Calcio	200 - 3.000	1.000	100 - 400
Magnesio	50 - 1.500	250	50 - 200
Potasio	200 - 1.000	300	50 - 400
Sodio	200 - 2.500	500	100 - 200
Cloro	200 - 3.000	500	100 - 400
Sulfatos	50 - 1.000	300	20 - 50

Fuente: Pineda,2009.

4.1.2. Biogás

El biogás que se genera en los rellenos sanitarios es un subproducto de la descomposición anaerobia de los residuos orgánicos presentes en los desechos. El relleno en sí constituye un bioreactor anaerobio. La composición típica del biogás generado en un relleno sanitario se muestra en la Tabla 4-2.

Tabla 4-2. Composición típica del biogás generado en un relleno sanitario

COMPONENTE	VALOR TIPICO (% v/v)
Metano	63.8
Dióxido de Carbono	33.6
Oxígeno	0.16
Hidrógeno	0.05
Monóxido de Carbono	0.001
Vapor de Agua	1.8
Traza de Compuestos	0.006

Fuente: Stentiford, 2008

El periodo degradativo en un relleno sanitario es diferente para cada constituyente. Así, la materia orgánica, como es el caso de los residuos alimenticios, se degrada rápidamente. La degradación es moderada en los residuos de jardín, lenta para el papel, cartón, madera y textiles, y, prácticamente, nula para el plástico, piel y goma. Normalmente, se puede considerar que sólo los residuos alimenticios y de jardín y dos terceras partes del papel contenido en los residuos se degradan para generar biogás en el vertedero como se puede apreciar en la siguiente tabla (Fuente: Carreras et al., 2005).

El proceso de degradación de la materia orgánica puede durar más de 20 años:

- Los residuos de comida se degradan en un 50% en 1-2 años
- Los residuos de jardín se degradan en unos 5 años
- Los residuos de papel, madera y textiles se degradan en unos 1.

Tabla 4-3. Periodo de degradación de la materia orgánica

GEI	COMPOSICIÓN MOLECULAR	GWP – SAR (CO ₂ e)	GWP - TAR (CO ₂ e)	VIDA MEDIA (AÑOS)	ORIGEN
Bióxido de carbono	CO ₂	1	1	50 a 200	Quema de combustibles fósiles y de biomasa, incendios forestales
Metano	CH ₄	21	23	12 ± 3	Cultivo de arroz, producción pecuaria, residuos sólidos urbanos, emisiones fugitivas
Óxido nitroso	N ₂ O	310	296	120	Uso de fertilizantes, degradación de suelos, algunos usos médicos
Hidrofluoro-carbonos	HFC-23	11,700	12,000	1.5 a 264	Refrigeración, aire acondicionado, extinguidores, petroquímica, solventes en producción de espumas, refrigerantes y aerosoles, producción y uso de halocarbonos
	HFC-125	2,800	3,400		
	HFC-134a	1,300	1,300		
	HFC-152a	140	120		
	HFC-227ea	2,900	3,500		
	HFC-236fa	6,300	9,400		
Perfluoro-carbonos	HFC-4310mee	1,300	1,500	2,600 a 50,000	Refrigerantes industriales, aire acondicionado, producción de aluminio, solventes, aerosoles, producción y uso de halocarbonos
	CF ₄	6,500	5,700		
	C ₂ F ₆	9,200	11,900		
	C ₄ F ₁₀	7,000	8,600		
	C ₆ F ₁₄	7,400	9,000		
Hexafluoruro de azufre	SF ₆	23,900	22,200	3,200	Aislante dieléctrico en transformadores e interruptores de redes de distribución eléctrica, refrigerante industrial, producción de aluminio, magnesio y otros metales, producción y uso de halocarbonos

Fuente: Gases Efecto Invernadora (GEI), considerados en el Protocolo de Kyoto. IPCC 2001.

4.2 Aguas Residuales Municipales

Es el conjunto de las aguas servidas transportadas a través del sistema de alcantarillado de una localidad. Aunque el origen de las mismas puede ser diverso, producto de las distintas actividades que realizan las personas y comunidades, predominan las de tipo doméstico.

Las labores domésticas contaminan el agua, especialmente aportan diferentes tipos de contaminantes a las aguas superficiales como son la materia fecal y detergentes. Los trabajos agrícolas y ganaderos pueden alterar las características físico químicas de las fuentes de agua sustancial de las aguas, en ríos y acuíferos, debido a los vertimientos de aguas cargadas de residuos orgánicos, procedentes de las labores de transformación de productos vegetales, o de los excrementos de los animales. Otra fuente de contaminación de las aguas son las industrias. Muchas de ellas, como la papelera, química, textil y siderúrgica, que requieren agua para desarrollar su actividad. Las centrales térmicas también necesitan una gran cantidad de agua para ser operativas; en este caso el agua residual, que no presenta contaminantes orgánicos o inorgánicos, tiene una temperatura mucho más elevada que la de los cauces a los que va a parar, ocasionando trastornos en los ecosistemas acuáticos. Teniendo en cuenta como lo menciona la Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS), definiendo el Coeficiente de Retorno como la relación que existe entre el caudal medio de aguas residuales y el caudal medio de agua que consume la población.

Un área metropolitana estándar vierte un volumen de aguas residuales entre el 60% y el 80% de sus requerimientos o consumos diarios totales, y el resto se usa para lavado de vehículos y riego de jardines; así como en procesos de empaqueo de alimentos.

4.2.1. Composición

La composición de las aguas residuales municipales se establece con diversas mediciones físicas, químicas y biológicas. Las mediciones más comunes incluyen la determinación del contenido en sólidos, la demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅), la demanda química de oxígeno (DQO) y el PH.

Los residuos sólidos comprenden los sólidos disueltos y en suspensión. Los sólidos disueltos son productos capaces de atravesar un papel de filtro, y los suspendidos los que no pueden hacerlo. Los sólidos en suspensión se dividen a su vez en sedimentables y no sedimentables, dependiendo del número de miligramos de sólido que se depositan a partir de 1 litro de agua residual en una hora en un cono de Imhoff. Todos estos sólidos pueden dividirse en volátiles y

fijos, siendo los volátiles, por lo general, productos orgánicos y los fijos materia inorgánica o mineral.

En resumen, Los sólidos, además de clasificarse por su origen, se pueden ordenar de la siguiente manera: Sólidos totales: es todo material residual que se pesa después de evaporar el agua a 105°, Sólidos fijos: son los sólidos que permanecen cuando se calienta el residuo anterior a 600°C durante 1 hora. Este dato se asocia a la presencia de sustancias inorgánicas, Sólidos volátiles: se denominan con este término a la diferencia de sólidos totales menos los fijos, Sólidos en suspensión: son aquellos con un tamaño de partícula de 1 micrón o más, Sólidos coloidales: el tamaño de partícula es entre 0.001 u y 1. Estos sólidos se eliminan por coagulación y floculación. Los de partículas inferiores a 0.001 u se eliminan por oxidaciones biológica y física.

La concentración de materia orgánica se mide principalmente con los análisis DBO₅ y DQO.

DBO₅: es la cantidad de oxígeno empleado por los microorganismos a lo largo de un periodo de cinco días para descomponer la materia orgánica de las aguas residuales a una temperatura de 20 °C. La DBO₅ suele emplearse para comprobar la carga orgánica de las aguas residuales municipales e industriales biodegradables, sin tratar y tratadas.

DQO: es la cantidad de oxígeno necesario para oxidar la materia orgánica por medio de dicromato en una solución ácida y convertirla en dióxido de carbono y agua. La DQO se usa para comprobar la carga orgánica de aguas residuales que, o no son biodegradables o contienen compuestos que inhiben la actividad de los microorganismos.

El valor de la DQO es siempre superior al de la DBO₅ porque muchas sustancias orgánicas pueden oxidarse químicamente, pero no biológicamente.

FOSFORO: El fósforo, como los compuestos nitrogenados, es nutriente esencial para la vida. Su exceso en el agua provoca eutrofización. El fósforo total incluye distintos compuestos como diversos ortofosfatos, polifosfatos y fósforo orgánico. La determinación se hace convirtiendo todos ellos en ortofosfatos que son los que se determinan por análisis químico.

NITRÓGENO: Varios compuestos de nitrógeno son nutrientes esenciales. Su presencia en las aguas en exceso es causa de eutrofización. El Nitrógeno se presenta en muy diferentes formas químicas en las aguas naturales y contaminadas. En los análisis habituales se suele determinar el NTK (Nitrógeno total Kendahl) que incluye el nitrógeno orgánico y el amoniacal. El contenido en nitratos y nitritos se da por separado.

pH: Índice que expresa el grado de acidez o alcalinidad de una disolución. El

contenido típico en materia orgánica en las aguas residuales domésticas es un 50% de carbohidratos, un 40% de proteínas y un 10% de grasas; y entre 6,5 y 8,0 puede variar el pH.

La concentración de un residuo industrial se puede transformar en el número de personas, o población equivalente (PE), necesario para producir la misma cantidad de residuos. Este valor acostumbra a expresarse en términos de DBO₅. Para la determinación de la PE se emplea un valor medio de DBO por persona y día. El equivalente de población de un matadero, por ejemplo, oscilará entre 5 y 25 PE por animal.

OXIGENO DISUELTO: El oxígeno disuelto (OD) es la cantidad de oxígeno que está presente en el agua y que es esencial para los riachuelos y lagos saludables. El nivel de oxígeno disuelto puede ser un indicador del grado de contaminación del agua y del grado de soporte disponible para la vida aeróbica (vegetal y animal). Normalmente, un nivel más alto de oxígeno disuelto indica agua de mejor calidad. Si los niveles de oxígeno disuelto son demasiados bajos, algunos peces y otros organismos acuáticos no pueden sobrevivir. La concentración de oxígeno disuelto en agua está determinada por la ley de Henry, que describe la relación de equilibrio entre la presión parcial de oxígeno atmosférico y la concentración de oxígeno en agua. Otros factores que influyen la concentración de oxígeno disuelto en agua son: la presión atmosférica (y por lo tanto la altitud sobre el nivel del mar), el contenido de sales en el agua, y la temperatura del agua. El contenido de oxígeno disuelto en cuerpos de agua puede disminuir significativamente por efecto de la respiración, especialmente la microbiana, resultante de la degradación de compuestos orgánicos.

4.2.2. Efectos de la Contaminación del Agua

Los efectos de la contaminación del agua incluyen los que afectan a la salud humana. Efectos provocados por los organismos patógenos, según la Organización Mundial de la Salud (OMS), los efectos que los diferentes tipos de organismos pueden producir sobre el hombre son los siguientes: Virus: infecciones víricas, inflamaciones cutáneas y oculares. Bacterias: infecciones gastrointestinales, endémicas o epidémicas, como el cólera, fiebre tifoidea, salmonelosis, etc. Protozoos y metazoos: enfermedades parasitarias como la hidatidosis, esquistosomiasis, etc.

La presencia de nitratos (sales del ácido nítrico) en el agua potable puede producir una enfermedad infantil que en ocasiones es mortal. El cadmio presente en el agua y procedente de los vertidos industriales, de tuberías galvanizadas deterioradas, o de los fertilizantes derivados del lodo puede ser absorbido por las plantas. De ser ingerido en cantidad suficiente, el metal puede producir un trastorno diarreico agudo, así como lesiones en el hígado y los riñones. Hace tiempo que se conoce o se sospecha de la peligrosidad de sustancias inorgánicas, como el mercurio, el arsénico y el plomo. Algunos de estos

contaminantes están presentes en las aguas residuales municipales que reciben aportes industriales y en los lixiviados de los rellenos sanitarios.

Los lagos, charcas, lagunas y embalses, son especialmente vulnerables a la contaminación. En este caso, el problema es la eutrofización, que se produce cuando el agua se enriquece de modo artificial con nutrientes, lo que produce un crecimiento anormal de las plantas acuáticas. Los fertilizantes químicos arrastrados por el agua desde los campos de cultivo contribuyen en gran medida a este proceso. El proceso de eutrofización puede ocasionar problemas estéticos, como mal sabor y olor del agua, y un cúmulo de algas o verdín que puede resultar estéticamente poco agradable, así como un crecimiento denso de las plantas con raíces, el agotamiento del oxígeno en las aguas más profundas y la acumulación de sedimentos en el fondo de los lagos. También se pueden producir otros cambios químicos, tales como la precipitación del carbonato de calcio en las aguas duras.

Otro problema cada vez más preocupante es la lluvia ácida. Los efectos ecológicos de la lluvia ácida se ven más claramente en los ambientes acuáticos, tales como arroyos, lagos y pantanos. La lluvia ácida fluye a los arroyos, lagos y pantanos después de caer sobre bosques, campos, edificios y caminos. La lluvia ácida también cae directamente en el hábitat acuático. La mayoría de los lagos y arroyos tienen un pH de entre 6 y 8, aunque algunos lagos son naturalmente ácidos aun sin los efectos de la lluvia ácida. La lluvia ácida afecta primordialmente a las capas de aguas sensibles, situadas en cuencas vertientes cuyos suelos tienen una capacidad limitada para neutralizar compuestos ácidos (llamada "capacidad de amortiguamiento"). Tanto los lagos como los arroyos se vuelven ácidos (por ejemplo, su valor de pH disminuye) cuando el agua misma y el terreno circundante no pueden amortiguar o estabilizar la lluvia ácida lo suficiente como para neutralizarla. En áreas con poca capacidad de amortiguamiento, la lluvia ácida desprende el aluminio de los suelos, el cual va a dar a los lagos y arroyos. El aluminio es sumamente tóxico para muchas especies de organismos acuáticos. (Velasco, 2002)

4.3 Tratamiento de las Aguas Residuales²

Los contaminantes presentes en el agua residual pueden eliminarse con procesos físicos, químicos y/o biológicos. Individualmente, los métodos suelen clasificarse en operaciones físicas unitarias, procesos químicos unitarios y proceso biológicos unitarios. A pesar de que estas operaciones y proceso se utilizan conjuntamente en los sistemas de tratamiento, se ha considerado ventajoso estudiar las bases

² Metcalf & Heddy. Ingeniería de Aguas Residuales. Volumen I. Editorial McGRAW-HILL/INTERAMERICANA DE ESPAÑA, S. A. U.

científicas de cada uno de ellos por separado, ya que los principios básicos son comunes.

4.3.1. Operaciones Físicas Unitarias

Los métodos de tratamiento en los que predomina la acción de fuerzas físicas se conocen como operaciones físicas unitarias. Puesto que la mayoría de estos métodos han evolucionado directamente a partir de las primeras observaciones de la naturaleza por parte del hombre, fueron los primeros en ser aplicados al tratamiento de las aguas residuales. El desbaste, mezclado, floculación, sedimentación, flotación, transparencia de gases y filtración son operaciones unitarias típicas. (Bedoya, 2009)

4.3.2. Procesos Químicos Unitarios

Los métodos de tratamiento en los cuales la eliminación o conversión de los contaminantes se consigue con la adición de productos químicos o gracias al desarrollo de ciertas reacciones químicas, se conoce como procesos químicos unitarios. Fenómenos como la precipitación, absorción y la desinfección son ejemplos de los procesos de aplicación más común en el tratamiento de las aguas residuales. (Echarri, 2007)

4.3.3. Procesos Biológicos Unitarios

Los métodos de tratamiento en los que la eliminación de los contaminantes se lleva a cabo gracias a la actividad biológica se conocen como procesos biológicos unitarios. La principal aplicación de los procesos biológicos es la eliminación de las sustancias orgánicas biodegradables presentes en el agua residual en forma, tanto coloidal, como en disolución. Básicamente, estas sustancias se convierten en gases, que se liberan a la atmósfera, y en tejido celular biológico, eliminable por sedimentación. (Bedoya, 2009) Los tratamientos biológicos también se emplean para la eliminar el nitrógeno contenido en el agua residual. Mediante un adecuado control del medio, el agua residual se puede tratar biológicamente en la mayoría de los casos. Por consiguiente es responsabilidad del ingeniero asegurar la adecuación y control efectivo del medio. Los objetivos del tratamiento biológico son tres:

- Reducir el contenido en materia orgánica de las aguas.
- Reducir su contenido en nutrientes.
- Eliminar los patógenos y parásitos.

Estos objetivos se logran por medio de procesos aeróbicos y anaeróbicos, en los cuales la materia orgánica es metabolizada por diferentes cepas bacterianas.

4.3.4. Etapas del Tratamiento

En el tratamiento de aguas residuales se pueden distinguir hasta cuatro etapas que comprenden procesos químicos, físicos y biológicos (Devlin,2004). En general una planta de tratamiento convencional puede incorporar las siguientes etapas:

- **Tratamiento preliminar:** el pretratamiento de las aguas residuales se define como el proceso de eliminación de los constituyentes de las aguas residuales cuya presencia pueda provocar problemas de mantenimiento y funcionamiento de los diferentes procesos, operaciones y sistemas auxiliares. Debe realizarse por medio de procesos físicos y/o mecánicos, como rejillas, desarenadores y trampas de grasa, dispuestos convencionalmente de modo que permitan la retención y remoción de materiales presentes en las aguas residuales y que puedan interferir en los procesos de tratamiento.
- **Tratamiento primario:** en el tratamiento primario se elimina una fracción de los sólidos en suspensión y de la materia orgánica del agua residual. Esta eliminación suele llevarse a cabo mediante operaciones físicas tales como el tamizado y la sedimentación. El efluente del tratamiento primario suele contener una cantidad considerable de materia orgánica y una DBO alta. Por ello, una alternativa de mejoramiento de la calidad es la utilización de productos químicos para incrementar la remoción de sólidos suspendidos a niveles intermedios entre primario y secundario. Esta modificación se conoce como Tratamiento Primario Químicamente Asistido-TPQA y constituye uno de los procesos contemplados en el programa de saneamiento del río Bogotá.
- **Tratamiento secundario:** el tratamiento secundario de las aguas residuales está principalmente encaminado a la eliminación de los sólidos en suspensión y de los compuestos orgánicos biodegradables, aunque a menudo se incluye la desinfección como parte del tratamiento secundario convencional como la combinación de diferentes procesos normalmente empleados para la eliminación de estos constituyentes, e incluye el tratamiento biológico con lodos activados, reactores de lecho fijo y los sistemas de lagunas.
- **Tratamiento de los lixiviados:** El tratamiento de los lixiviados es particularmente difícil no solo por la complejidad del agua residual misma sino por las variaciones que se presentan frecuentemente en el flujo y composición de los mismos. La calidad del lixiviado crudo está determinada principalmente por la naturaleza de los residuos sólidos, por los procesos de reacción

bioquímica y por factores ambientales. Para el tratamiento de los lixiviados la relación DBO_5/DQO es un parámetro importante en la selección de los procesos. Una relación $> 0,7$ caracteriza un lixiviado joven (rellenos con menos de 5 años de operación) mientras que una relación entre 0,3 y 0,7 representa residuos parcialmente estabilizados. En el primer caso se recomiendan los sistemas aerobios (lodos activados) y en el segundo caso los sistemas anaerobios (reactores UASB).

5 ESTUDIO DEL CASO

5.1. Relleno Sanitario Doña Juana

5.1.1. Ubicación

El Relleno Sanitario Doña Juana (RSDJ) está localizado en la localidad de Ciudad Bolívar, al sur de la Sabana de Bogotá, en predios ubicados sobre la margen izquierda de la cuenca del río Tunjuelo, y su entrada se ubica en el costado derecho de la autopista a Villavicencio, cuenta con una extensión de 453 hectáreas (Has) de las cuales han sido rellenas aproximadamente 120 Has. En la Figura 5-1 se muestra la entrada del RSDJ.

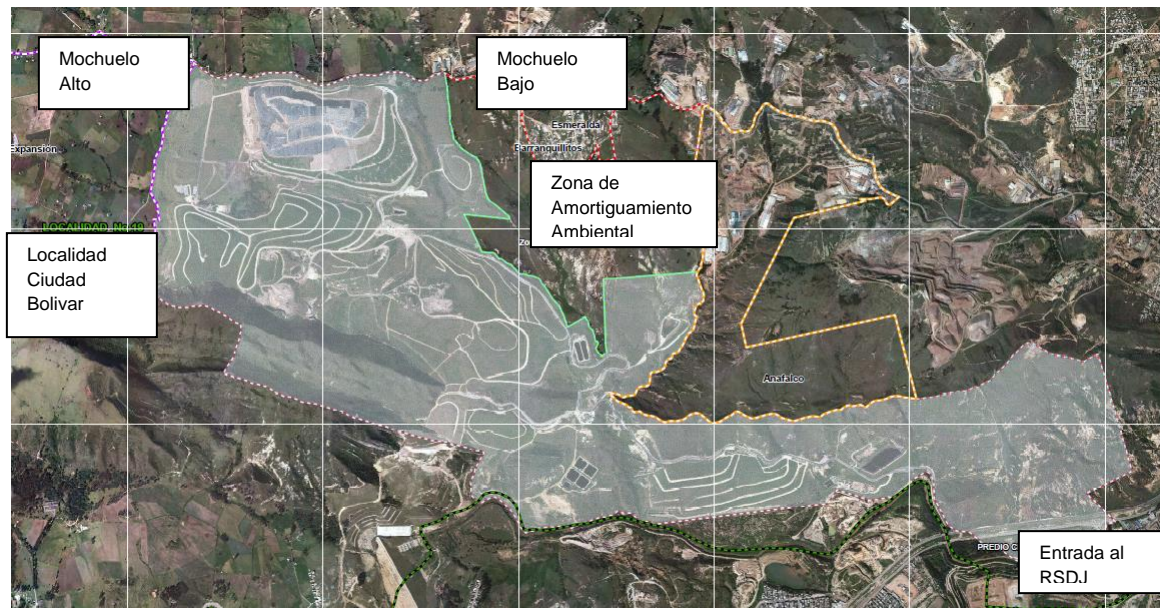
Figura 5-1. Entrada al Relleno Sanitario Doña Juana - RSDJ



Fuente: UAESP, 2012

El predio limita hacia el oriente con la Avenida Boyacá y el río Tunjuelo; al occidente con la vía rural a Pasquilla y predios de particulares de Mochuelo Bajo y Alto; al sur con la Quebrada Aguas Claras; y al norte con predios de particulares de Mochuelo Bajo. Como se observa en la Figura 5-2.

Figura 5-2. Representación de los límites del RSDJ



Fuente: UAESP, 2013.

Geográficamente, el relleno está ubicado en las coordenadas señaladas en la siguiente Tabla 5-1.

Tabla 5-1. Coordenadas del Relleno Sanitario Doña Juana

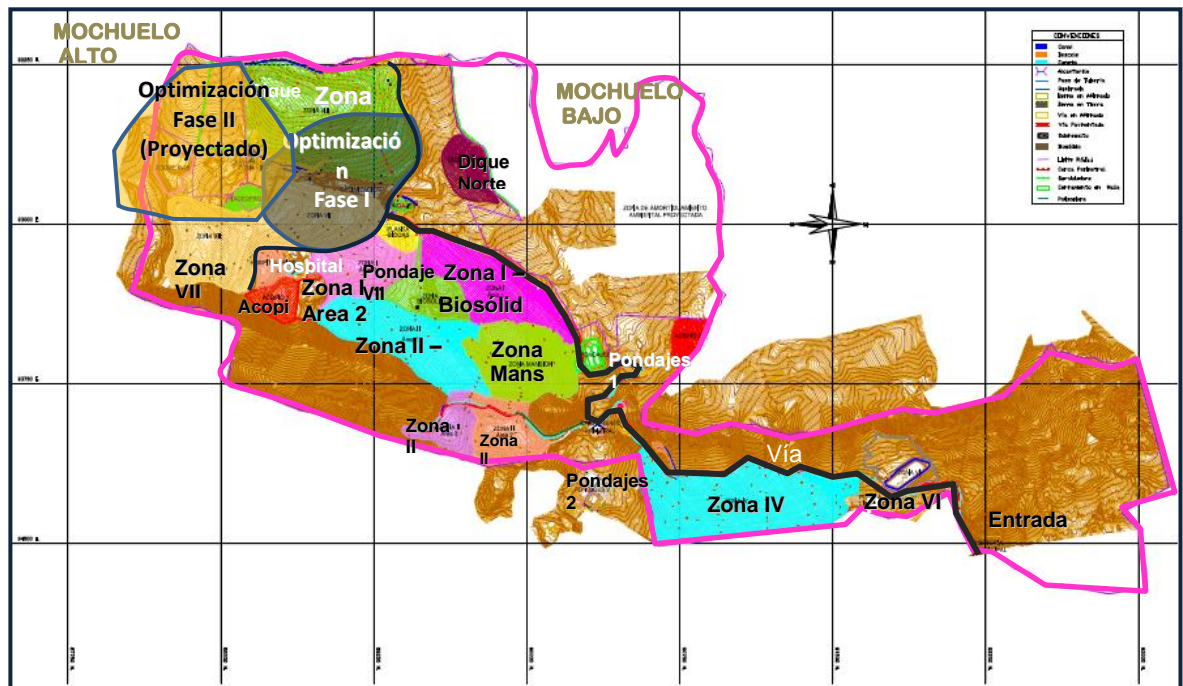
Coordenadas planas			
X	Y	X	Y
92151,64	88348,67	94328,27	91641,52
92251,45	88277,72	94383,06	91825,25
92493,30	88178,02	94250,00	92120,80
92810,01	88116,66	94808,73	93051,08
93017,31	88170,35	94352,00	92911,88
93165,11	88093,66	94229,38	93134,59
93328,27	88044,56	93616,25	92973,13
93479,91	88578,75	93566,88	92594,52
93735,19	88500,14	93794,61	92377,37
94141,16	89813,84	92939,09	90592,64
94407,28	89806,15	93331,53	90987,96
94365,75	89896,03	92372,83	90971,25
94549,18	90030,85	92322,66	90542,53
94520,92	90272,68	92657,09	90436,74
94455,09	90588,30	92712,83	90108,24
94512,14	90684,74	92261,35	90647,00
94398,71	91890,70	92149,80	88351,24

Fuente: UAESP, 2013

5.1.2. Descripción de las Zonas

El relleno sanitario de Doña Juana se ha constituido en el sitio para la disposición de los residuos sólidos urbanos generados en Santa Fe de Bogotá, desde noviembre de 1,998. Actualmente cuenta con 9 zonas rellenadas (Antigua, Mansión, Zona I, Zona II, Zona IV y Área 2, Zona VII, Zona VIII, Zona de Biosólidos) y un área en operación (Zona de Optimización) como se aprecia en la Figura 5-3.

Figura 5-3. Mapa del Relleno Sanitario Doña Juana



Fuente: UAESP, 2013.

El área total revisada a mayo de 2008, sin tener en cuenta predios nuevos para la Zona de Optimización ni predios nuevos de la Zona de amortiguamiento, es de 483,13 hectáreas, de las cuales solamente 189.69 hectáreas (37,15%) son utilizadas para la operación del Relleno Sanitario; esta última área se ha repartido en ocho (8) zonas, en las cuales se han desarrollado o están en proceso de desarrollo las etapas de disposición de residuos sólidos convencionales y de residuos hospitalarios, tal como se describen más adelante. Por otra parte, durante los años 2007, 2008, 2009, 2010 y 2011 la UAESP ha adquirido o está en proceso de adquisición de 94,46 hectáreas para Zona de amortiguamiento y 15,05 hectáreas para la Optimización de Zona VIII, con lo que el área total del

relleno una vez se culminen las adquisiciones, ascenderá a 592,64 hectáreas. (HVM-CONCOL, 2011) (Ver Tabla 5-2)

La siguiente tabla relaciona las zonas operadas y clausuradas, así como la zona actual de disposición de RSU, el promedio de generación de lixiviado aforado y la concentración de DBO5 en cada zona para el año 2012.

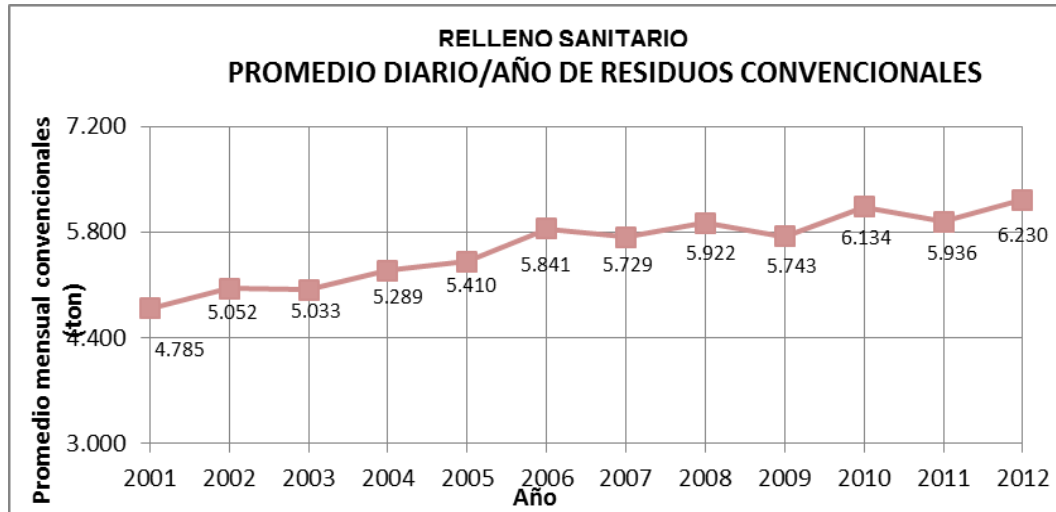
Tabla 5-2. Descripción de las zonas del Relleno Sanitario Doña Juana

Zona	Periodo de Operación	Vida Útil (Años)	Área (Ha)	Cantidad de Residuos (Ton)	Aforo Generación de Lixiviado 2012 (l/s)	Concentración de DBO5 2012 (mg/l)	Observaciones
Zona Antigua	Nov/88 - Sep/93	5	80	7000000	0,23	323	Actualmente Empradizada
Zona I	Sep/93 - Feb/95	1,5					
Zona Mansión	Feb/95 - Oct/95	0,8	10	1000000			Actualmente empradizada
Zona II Área I	Oct/95 - Sep/97	2	25	3000000	0,37	469,5	Zona del derrumbe del 27 de Septiembre de 1997, restaurada después del evento
Zona II Área II	Oct/98 - Jul/00	NA	6,1	Zona del Derrumbe	-	-	Actualmente empradizada, Zona de disposición de residuos provenientes del derrumbe
Zona IV	Sep/97 - Ene/99	1,4	19	2100000	0,14	215	Empradizada utilizada como zona de emergencia durante el derrumbe
Zona VI	NA	NA	3,2	NA	3,22	-	Actualmente adecuada como zona de emergencia y de disposición de lodos
Zona VII	Ene/99 - Dic/02	3	40	6000000	1,63	2076	Cerrada y empradizada
Zona VIII	Mar/02 - Sep/10	6,2	41	13040240	1,64	6837	En proceso de cierre y con sistema de captación de biogás
Zona II - Área 3	Sep/08 - May/09	1	3,3	515000	0,25	2044	Actualmente empradizada y con sistema forzado de extracción de Biogás
Biosólidos	Sep/10 - Abr/11	0,7	9,7	1200000	0,3	1663	En proceso de cierre y con sistema de captación de biogás
Celda Hospitalarios	Jul/98- A la fecha	18	4	36000			En Operación
Fase I de Optimización	Abr/11 - A la fecha	5	35	9300000	2,32	792	En Operación

Fuente: EIA, e Informes del RSDJ.

El Relleno Sanitario Doña Juana presta servicios de disposición final de Residuos a Bogotá Distrito Capital y a algunos municipios de Cundinamarca. En la figura 5-4 se muestra el Promedio Diario/año de Residuos Dispuestos en el RSDJ.

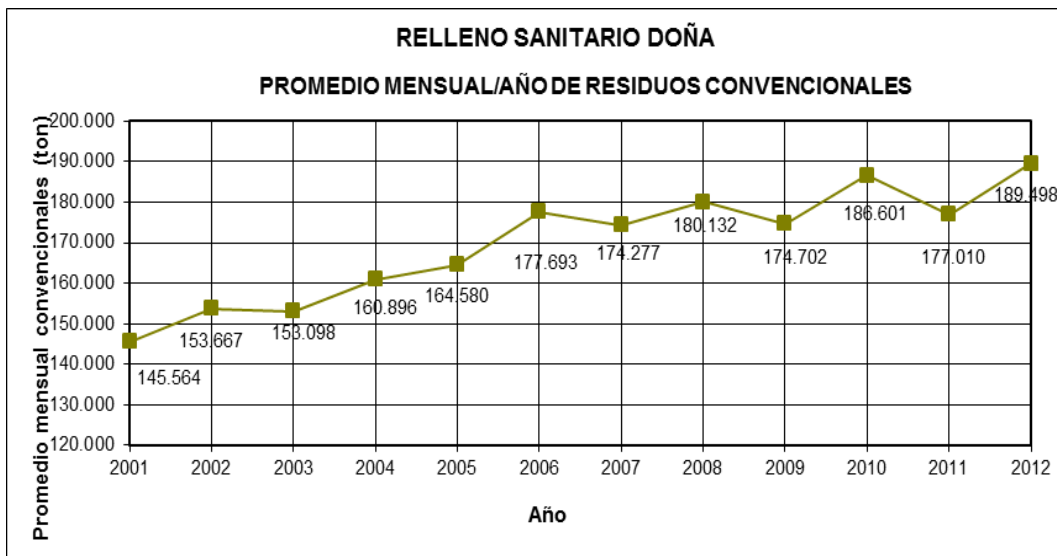
Figura 5-4. Promedio Diario/año de Residuos Dispuestos en el RSDJ



Fuente: Interventoría RSDJ, UAESP.

La figura 5-4 muestra el promedio diario/año de residuos convencionales y la figura 5-5 muestra el promedio mensual/año de residuos convencionales representan el aumento progresivo de la generación de Residuos Sólidos Urbanos (RSU), a partir del año 2001, lo cual puede considerarse como un comportamiento típico en generación de RSU.

Figura 5-5. Promedio Mensual/anual de Residuos Dispuestos en el RSDJ.



Fuente: Interventoría RSDJ, UAESP.

5.1.3. Generación de Lixiviados en el RSDJ

La generación de lixiviados está influenciada por diferentes factores como el nivel de precipitación de la zona, la composición de los residuos sólidos dispuesto, el manejo de áreas descubiertas en la operación del Relleno, etc.

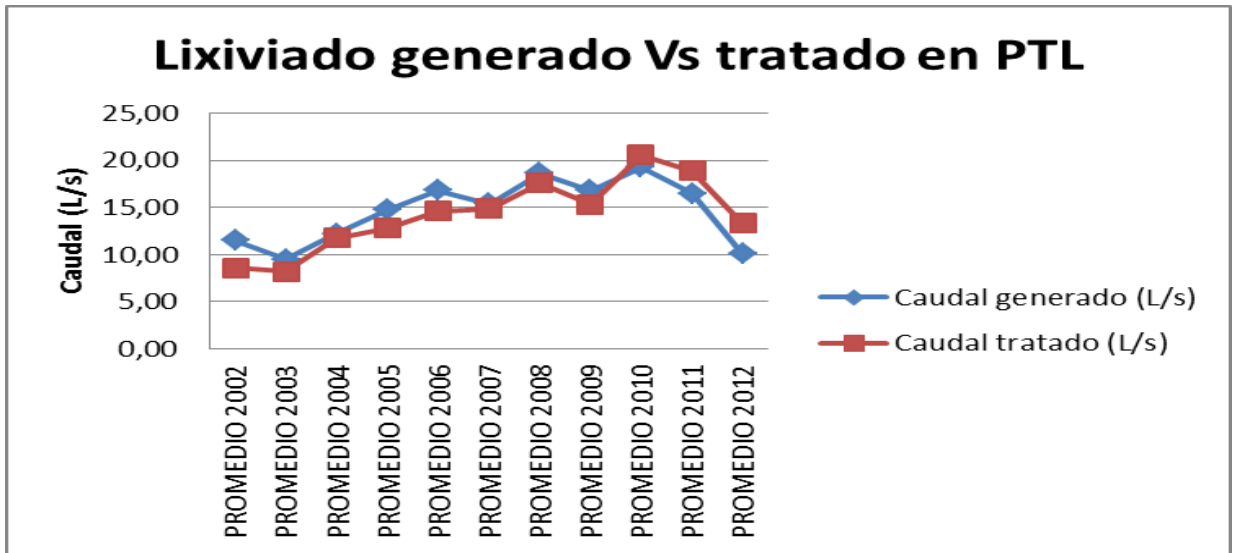
Los registros históricos muestran un incremento progresivo en la producción de lixiviados del relleno sanitario Doña Juana desde el año 2002. En la Tabla 5-3 se presenta el valor promedio anual generado en el período 2002-2012, con un valor medio de 16,16 l/s. De la misma manera, se presenta el caudal tratado en la PTL. En general el porcentaje de lixiviado tratado en ese período es, en promedio, del 69% aproximadamente. (Ver Figura 5-6)

Tabla 5-3. Generación promedio mensual de lixiviados período 2002-2012 y caudales promedio tratados en el mismo período, según reportes de operación del relleno (2012).

Año	Caudal Generado(l/s)	Caudal Tratado (l/s)
2002	11,54	8,58
2003	9,49	8,23
2004	12,21	11,80
2005	14,74	12,78
2006	16,85	14,63
2007	15,43	14,89
2008	18,65	17,59
2009	16,82	15,31
2010	19,26	20,61
2011	16,48	18,88
2012	10,10	13,30
PROM	16,16	15,66

Fuente: UAESP (2012)

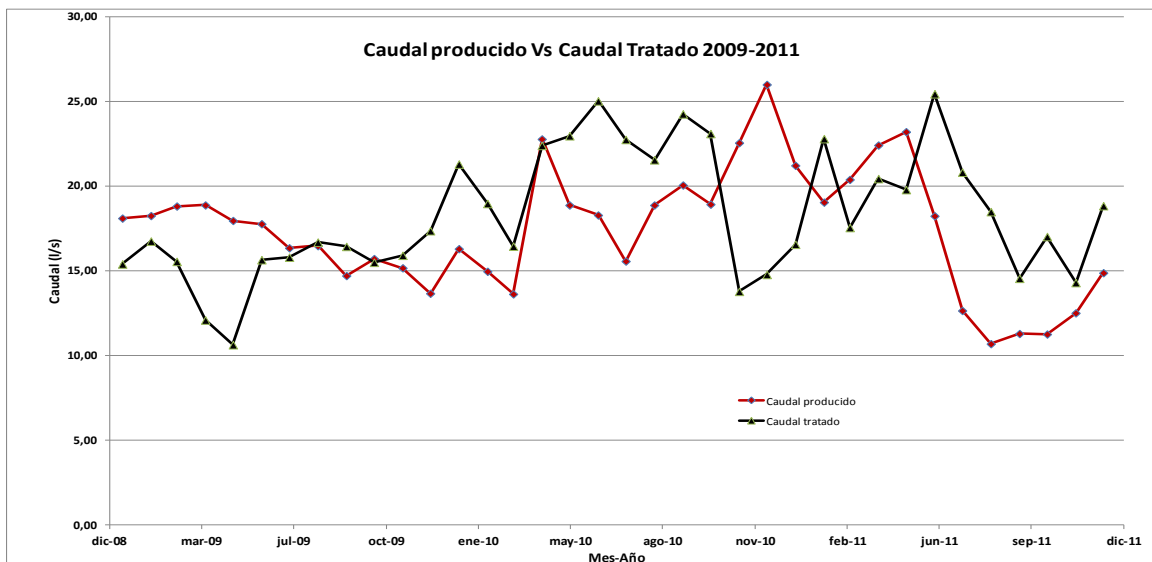
Figura 5-6. Variación de la producción media anual de lixiviados en RSDJ período 2002-2012 y de los caudales tratados en la PTL (2012)



Fuente: UAESP (2012)

Por otra parte, una mirada más detallada de los caudales generados en el RSDJ y tratados en la PTL durante los años recientes (2009, 2010 y 2011), se muestra en la figura 5-7. En este caso el porcentaje de caudal tratado supera ligeramente el volumen generado en el relleno. Esta tendencia se mantiene en el año 2012 de acuerdo con la información del operador.

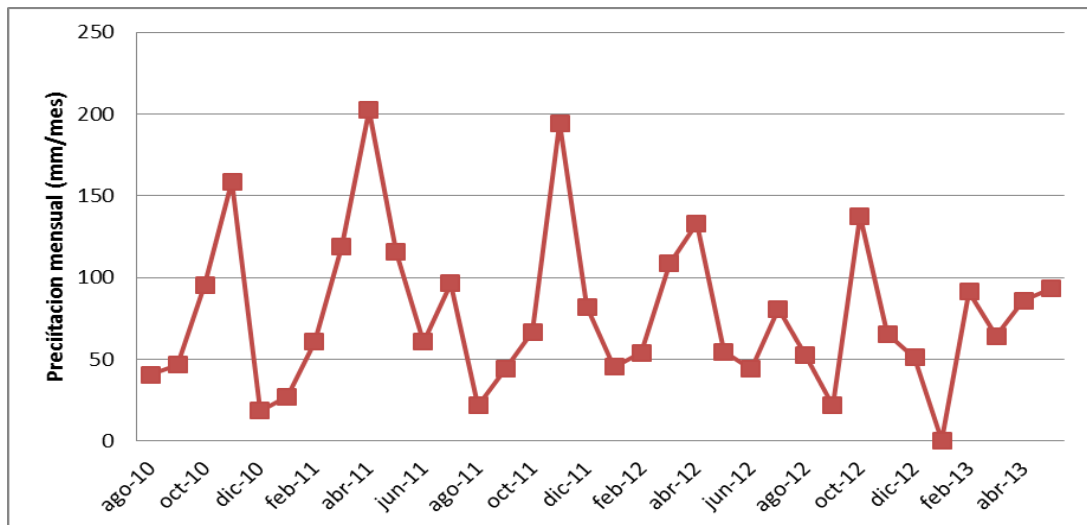
Figura 5-7. Caudales Generados en el RSDJ Vs Caudales Tratados en la PTL promedio mensual (Período 2009-2011)



Fuente: UAESP, 2012

Estos datos reportan un máximo de producción de lixiviado de 26 l/s presentado en el mes de Diciembre de 2010 y un mínimo de 10.69 l/s observado en agosto de 2011, con un valor medio de 17,4 l/s. lo anterior se puede presentar por la diferencia de niveles de precipitación mensual entre estos dos años como se muestra en la figura 5-8 los mm de precipitación mensual en los años 2010, 2011, 2012 y 2013. La figura muestra picos de precipitación 202,5 mm/mes en abril de 2011 y una disminución en la precipitación en el año 2012. Lo cual puede justificar el reporte de lixiviado tratado el cual supera (año 2012) el lixiviado generado, lo anterior permitió el mantenimiento de Pondajes en el año 2012 y el tratamiento de lixiviado alojado en la celda VI. (Ver Figura 5-8)

Figura 5-8. Precipitaciones mensuales en el RSDJ (Período 2010-2013)



Para la estimación de los caudales a tratar en los próximos años se realizó una proyección de la generación entre el 2010 y el 2031. En la Tabla 5-4 se muestra la proyección realizada en el Plan Director (UAESP) así como la efectuada por el Concesionario.

Tabla 5-4. Proyección de Generación de Lixiviados en RSDJ

Año	Residuos (Ton/año)	Plan Director		Proyección CGR	
		m3/año	l/s	m3/año	l/s
2010	38.159.593	669	21,22		
2011	39.772.353	709.338	22,49	223.906	7,1
2012	42.077.536	746.508	23,67	378.432	12
2013	44.470.873	788.478	25	473.040	15
2014	46.882.513	833.020	26,41	551.880	17,5
2015	49.379.268	879.113	27,88	630.720	20
2016	51.960.802	927.028	29,4	567.648	18
2017	54.606.456	976.349	30,96	599.184	19

2018	57.280.536	1.026.892	32,56	693.792	22
2019	59.564.436	1.077.079	34,15	709.560	22,5
2020	62.373.156	1.125.686	35,7		
2021	65.206.356	177.624	37,34		
2022	68.174.556	1.231.666	39,06		
2023	71.327.791	1.288.253	40,85		
2024	74.663.191	1.348.085	42,75		
2025	78044916	1410756	44,73		
2026	81.426.641	1.475.081	46,77		
2027	84.808.366	1.540.145	48,84		
2028	88.555.966	1.606.589	50,94		
2029	92.355.616	1.676.570	53,16		
2030	96.155.266	1.748.580	55,45		
2031	96.155.266	1.527.765	48,45		
Promedio			34.19		17.01

Fuente: Plan Director, Modelo Predictivo de lixiviado

Como se puede observar, el caudal Máximo esperado según la proyección de generación de residuos calculada en el Plan Director es de 55.45 l/s, con un valor promedio de 34.19 l/s; mientras el caudal proyectado por el concesionario para las zonas actuales del RSDJ mas la zona de proyección Optimización Fase II es 22.5 l/s, con un valor promedio de 17 l/s.

Así mismo, como se dijo anteriormente el caudal máximo histórico de generación de lixiviados evaluado en el período 2009, 2010 y 2011 es de 26 l/s. Con base en esta información, el caudal a considerar para el cálculo de la carga que aportaría el RSDJ al río Tunjuelo ó a la PTAR CANOAS, podría ser el valor medio de la proyección del Plan Director, es decir, 34 l/s aproximadamente. Esto, teniendo en cuenta la capacidad de almacenamiento y regulación (38.000 m³) que tiene el RSDJ en sus diferentes pondajes.

5.1.4. Calidad del vertimiento

Las características del lixiviado dependen de la zona de aporte. Las zonas recientes presentan concentraciones más altas que las zonas consolidadas de tiempo atrás. Igualmente, existe variación en la composición dependiendo de la ruta interna de tránsito. (Ver tabla 5-5)

Tabla 5-5. Características del lixiviado Relleno Sanitario Doña Juana (Jun-Nov 2011)

Parámetro	Unidad	E-SBR	E-PTL
Arsénico	mg As/L	0,029	0,0178
Berilio,	mg Be/L	<0,01	<0,01
Bifenilos Policlorados	mg/L	<0,0001	<0,0001
Cadmio,	mg Cd/L	0,031	0,0246
Cobalto,	mg Co/L	<0,05	<0,05
Cobre,	mg Cu/L	0,073	0,067
Cromo,	mg Cr/L	0,667	0,661
DBO ₅ , mg O ₂ /L	mg O ₂ /L	12368	6806
DQO Cerrado	mg O ₂ /L	20467	11302
Fenoles,	mg/L	3,72	3,137
Grasas y Aceites	mg/L	48	65,8
Hierro Total	mg Fe/L	43,7	17,73
In situ Oxígeno Disuelto	mgO ₂ /l	0,14-4,37	0,04-1,98
In situ pH	Unidad	7,14-8,23	7,18-9,31
Mercurio,	mg Hg/L	≤ 0,012	0,0098
Nitratos	mg N /L	≤ 0,1	<0,1
Plomo,	mg Pb/L	0,3	0,2283
Selenio,	mg Se/L	0,008	0,0075
Sólidos Suspendidos Volátiles	mg/L	967	613
SST	mg/L	16906	12304
Vanadio,	mg V/L	<0,2	<0,2
Zinc,	mg Zn/L	1,1	0,5883

Fuente: UAESP, 2012.

Por ejemplo, las áreas VII y VIII que alimentan el sistema SBR (Sequencing Batch Reactor. En español: Reactores Biológicos Secuenciales) los cuales se definen como reactores discontinuos en los que el agua residual se mezcla con un lodo biológico en un medio aireado. El proceso combina en un mismo tanque reacción, aeración y clarificación. El empleo de un único tanque reduce sustancialmente la inversión necesaria. Otras ventajas de los SBR son la facilidad para el control de la operación, la buena flexibilidad ante fluctuaciones de caudal y concentración de las aguas residuales, y los buenos resultados obtenidos en el tratamiento de compuestos refractarios a los sistemas biológicos convencionales.

El sistema de SBR presenta una concentración del lixiviado mayor que los residuos que ingresan a la PTL, ubicada en una fase posterior del proceso de tratamiento. Los pondajes como parte del sistema contribuyen a la homogenización y estabilización del desecho antes del tratamiento final en la PTL. Un registro de operación del sistema en el período Junio – Noviembre de 2011 muestra los valores promedios del lixiviado a la entrada de los sistemas de tratamiento antes mencionados. Sorprende la elevada concentración de SST en el desecho y que usualmente los sólidos que predominan en este tipo de residuos son los disueltos.

5.1.5. Sistema de Tratamiento de Lixiviados de Doña Juana

El sistema de tratamiento de lixiviados, como se observa en la Figura 5-9 es la combinación de un proceso físico-químico (coagulación-precipitación química) con un proceso biológico (aireación extendida con desnitrificación), solución que para 1995, momento en que se instaló, era óptimo desde el punto de vista costo-eficiencia, de hecho la literatura reportada por la EPA referencia esta combinación como la BAT (Best Available Techniques. En español: Mejor Tecnología Disponible). El sistema se diseñó para un caudal medio de 8 l/seg. En materia de contaminación orgánica las consideraciones de diseño establecían una carga de 10.500 kg/día de DBO y una concentración máxima de 15.000 mg/l. De igual forma la remoción de sustancias de interés sanitario restaba a ciertas características de entrada del lixiviado de acuerdo con la información disponible a la fecha sobre el Relleno Sanitario Doña Juana (RSDJ).

Figura 5-9. Foto de Planta del Sistema de Tratamiento de Lixiviados.



Fuente: Google earth, 2013

El flujo de lixiviados que se genera en las zonas de disposición del RSDJ se conduce a Pondajes o lagunas de almacenamiento y posteriormente se conduce a las unidades que componen el sistema de tratamiento. Este último inició su

diseño y construcción en 1998, desde su inicio ha tenido dos ajustes el primero en el año 2004 y el segundo en el año 2009, este último correspondió al plan de cumplimiento en su etapa Plan de Choque presentado ante la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca – CAR. En este momento se proyecta un tercer ajuste para el afino del efluente.

La capacidad nominal del sistema de tratamiento de lixiviados corresponde a los diferentes diseños de tratamiento, como se observa en la Tabla 5-6.

Tabla 5-6. Cronología de diseño del Sistema de tratamiento de lixiviados

Fase	Construcción inicial - 1999-2000	Primera ampliación – 2005 – 2006	Segunda ampliación Plan de choque*: 2009-2010
Q (L/s)	8	13,9	21,5
DBO5 (mg/L)	15000	15000	6911
DBO5 (Kg/d) calculado	10368	18014	12838
SST(mg/L)	2500	2500	650
Nitrógeno (mg/L)	2000	2000	2416,2
Unidades y adecuaciones implementadas	Pondajes PTL	Purga de lodos procedentes del decantador Lamelar	Reactores biológicos secuenciales -SBR
	Tratamiento físico-químico 1 y 2	Sistema de deshidratación de lodos –Centrifuga	Fisicoquímico 3
	Tratamiento biológico Zanjonés de oxidación	Pondajes 1	Filtro de anillas
	Sistema de tratamiento de lodos	Pondajes 2	
	Sistema de control de la planta	Operación en paralelo de las dos unidades fisicoquímicas	

* Los datos de diseño se basaron en análisis realizados entre Diciembre de 2008 y marzo de 2009.

Fuente: UAESP, 2013.

El lixiviado generado en Zona VII, VIII, Optimización, es conducido al Pondaje VII, luego es llevado al SBR, en el cual se implementa un tratamiento biológico y físico por presentar un proceso de sedimentación secundaria usando una secuencia de tiempo controlada. Este sistema se adaptó en los pondajes 1, para un caudal de 16 L/s. adicionalmente cuenta con unidades de deshidratación y secado de los lodos generados en este sistema. Posteriormente el lixiviado tratado en este sistema es transportado por la línea principal de conducción de lixiviados al grupo de Pondajes II. A este último confluye el lixiviado generado en la Zona I y Zona Mansión, Biosólidos y el almacenado en el pondaje secador de lodos.

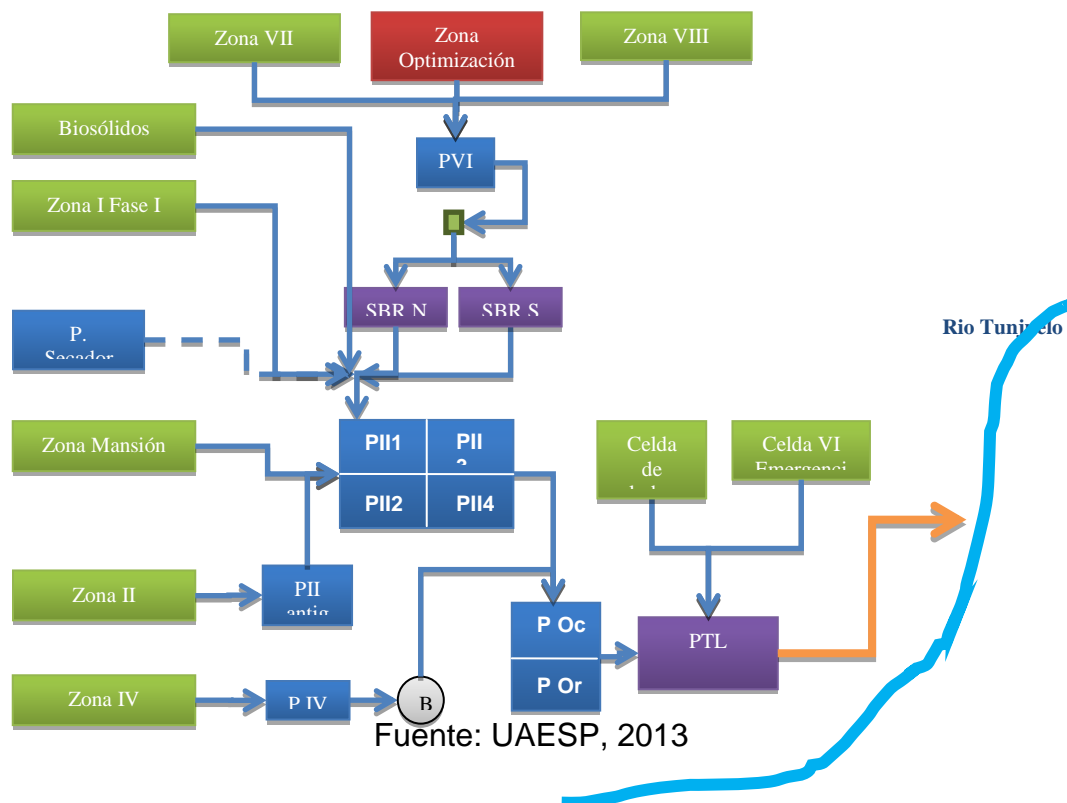
Los Pondajes II son un grupo de lagunas que reciben la alimentación desde los SBR y diferentes zonas de disposición de RSU del RSDJ. En total, los pondajes II

cuentan con un volumen de Almacenamiento del orden de los 32.000 m³ y presentan un Tiempo Hidráulico de Retención promedio de 27 días, evaluado en el periodo Enero a Diciembre de 2012 según los datos reportados en los informes mensuales de interventoría. El Sistema de almacenamiento del RSDJ está compuesto por diez lagunas o “pondajes” con capacidad aproximada de 38.800 m³, cuyo objetivo es el almacenamiento de lixiviados procedentes de las zonas de disposición, regulando el caudal que será enviado a tratamiento y adicionalmente permitiendo la sedimentación de sólidos suspendidos totales.

Luego de salir el lixiviado del grupo de pondajes, este es transportado por la Línea principal de conducción de lixiviados a la Planta de Tratamiento de Lixiviado – PTL; a esta línea de conducción se conecta la tubería de impulsión de la estación de bombeo de lixiviado generado en la zona IV del RSDJ. Teniendo en cuenta lo anterior el lixiviado generado en el RSDJ es conducido a la Cámara de entrada de la PTL, la cual deriva el caudal a los dos pondajes PTL, los cuales actúan como reguladores de caudal y ofrecen un tratamiento físico de sedimentación.

A continuación se ilustra el esquema del sistema de conducción, almacenamiento y tratamiento de los lixiviados generados en el Relleno Sanitario Doña Juana. (Figura 5-10)

Figura 5-10. Esquema del sistema de conducción, almacenamiento y tratamiento de lixiviados.



Actualmente la Planta de Tratamiento de Lixiviados (PTL), opera con el esquema de tratamiento que se describe a continuación:

- **Tratamiento Completo:** este tratamiento se emplea en condiciones normales operación del RSDJ, este sistema involucra tratamientos como el fisicoquímico 3, sedimentador primario 3, neutralización 3. Posteriormente se utiliza un pre-desnitrificador el cual realiza la conversión de los nitratos presentes en el lixiviado a nitrógeno gaseoso. Adicionalmente el lixiviado es tratado mediante dos unidades de reactores biológicos llamados zanjones de oxidación, en estos las colonias de microorganismos se encargan de utilizar como sustrato la contaminación orgánica disuelta en el lixiviado. El exceso de biomasa se extrae como “lodos biológicos” de los reactores, este lodo se deshidrata mediante centrifugas y son depositados en la celda de disposición final de lodos. Una vez el lixiviado es tratado en los zanjones éste es conducido al pos-desnitrificador pasando posteriormente por el sedimentador primario en donde se separa el lixiviado tratado de la masa bacterial en forma de lodos biológicos. Para terminar el tratamiento de lixiviado se emplea un filtro de anillas y un sistema de cloración; para luego transportar el lixiviado por medio del canal del descole de la PTL hacia el Río Tunjuelo.

Las características de estas unidades son:

- **Sistema de Tratamiento Físico-Químico:** tres unidades que manejan un caudal de 21,5 L/s, tienen como objetivo principal remover mediante precipitación, los metales pesados presentes en la mezcla de lixiviados producidos por las distintas zonas del Relleno Sanitario. Además, se remueven porcentajes variables de sólidos suspendidos totales, materia orgánica expresada como DBO5 y DQO, materia nitrogenada expresada como nitrógeno total, grasas y aceites.
- **Sistema de Tratamiento Biológico:** compuesto por varias estructuras: predesnitrificador, reactores de lodos activados y decantación conocidos como “Zanjones de Oxidación” y postdesnitrificador. En este sistema se extrae la contaminación orgánica disuelta y se realiza una desnitrificación parcial mediante bacterias adaptadas al medio de los lixiviados. Opera con un caudal entre 8 a 13.9 L/s.
- **Filtro de anillas** con una capacidad de 15 L/s para retención de sólidos con tamaños superiores a 25 micras.
- **Sistema de deshidratación de lodos** compuesto por un espesador y deshidratación con centrifugas con capacidad de 40 m³/h.
- **Celdas de Lodos**, para la adecuada disposición de los lodos generados en el tratamiento.

Los procesos de tratamiento de la planta de tratamiento de lixiviados descritos anteriormente se ilustran en la siguiente figura la cual representa el flujograma. (Figura 5-11 y la Tabla 5-7)

Figura 5-11. Diagrama de Flujo Proceso Tratamiento Lixiviado

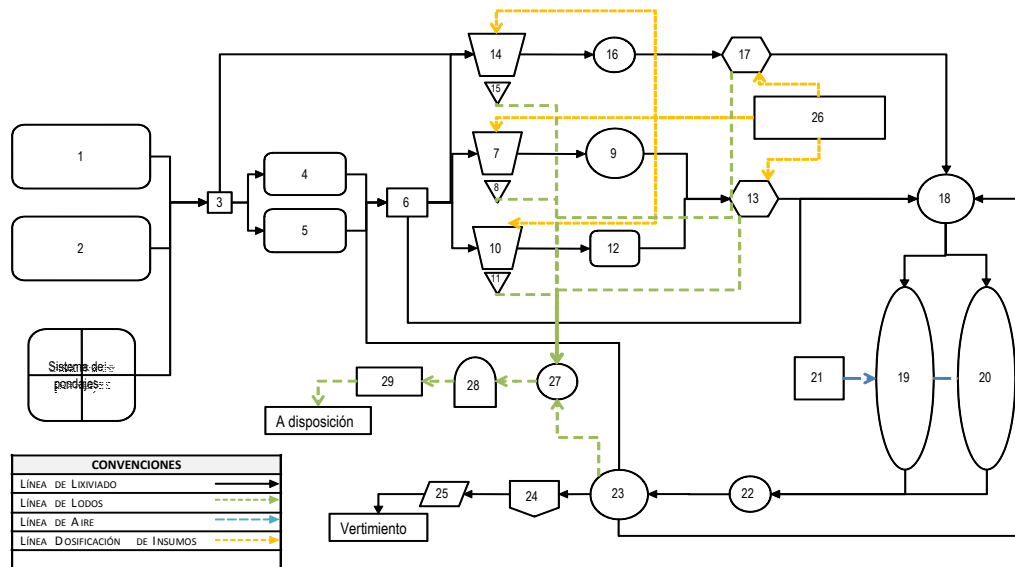


Tabla 5-7. Unidades del Sistema de tratamiento de lixiviados del RSDJ

Leyenda del Diagrama de Flujo		
1. Reactor biológico secuencial -SBR Norte	11. Purga de lodos	21. Edificio de soplantes
2. Reactor biológico secuencial -SBR Sur	12. Decantador lamelar	22. Post-desnitrificador
3. Caja de Entrada	13. Neutralización	23. Sedimentador secundario
4. Pondaje oriental	14. Fisicoquímico 3	24. Filtro de anillas
5. Pondaje occidental	15. Purga de lodos	25. Cloración
6. Pozo de bombeo	16. Sedimentador 3	26. Canaleta de salida
7. Fisicoquímico 1	17. Neutralización 3	27. Zona de reactivos
8. Purga de lodos	18. Pre-nitrificador	28. Espesador de lodos
9. Sedimentador primario	19. Reactor biológico zanjón de oxidación occidental	29. Deshidratadora
10. Fisicoquímico 2	20. Reactor biológico zanjón de oxidación oriental	30. Celda temporal de lodos

Fuente: Informes Mensuales de CGR Doña Juana diciembre 2012

En la actualidad el caudal de lixiviado generado en el RSDJ (Relleno Sanitario Doña Juana) durante el mes de Abril de 2013 fue en promedio de 11,44 l/s.

La presencia de lluvias y la humedad relativa en el área del relleno tuvieron un efecto negativo sobre la evaporación de parte de los lixiviados almacenados en los pondajes. El tratamiento biológico y el tiempo de retención en el reactor SBR sur y en los pondajes II coadyuvaron a reducir el contenido de materia orgánica y los sólidos suspendidos en el lixiviado que entró a tratamiento en la Planta de Tratamiento de Lixiviados –PTL- del Sistema de Tratamiento de Lixiviados del

Relleno Sanitario Doña Juana –STL/RSDJ- (Interventoría RSDJ, 2013). En la Figura 5-12 se observa la planta de tratamiento en la actualidad.

Figura 5-12. Foto de la Planta de Tratamiento del Relleno Sanitario Doña Juana



Fuente: UAESP, 2013.

5.2. Cuenca del Río Bogotá

5.2.1. Descripción

La cuenca del Río Bogotá se encuentra localizada en el altiplano Cundiboyacense, riega el departamento de Cundinamarca en sentido noreste-sur. El río Bogotá desde su nacimiento en el nor-orienté del municipio de Villapinzón a 3300 msnm hasta su desembocadura en el Río Magdalena a la altura del Municipio de Girardot a 280 msnm cubre un área total de 589.143 Hectáreas (POMCA, 2006).

En una longitud aproximada de 336 Km, el Río Bogotá recibe las aguas de los ríos Sisga, Tominé, Neusa, Tejar, Negro, Teusacá, Frío, Chicú, Salitre, Fucha, Tunjuelo, Soacha, Balsillas, Calandaima y Apulo, entre otros (EAAB-UNAL, 2010). Ver Figura 5-13.

Figura 5-13. Mapa de la Ubicación del Río Bogotá

Fuente: Gobernación de Cundinamarca. FOPAE. 2010

El Río Bogotá nace en el municipio de Villapinzón (Cundinamarca), a 3.300 msnm y desemboca en el Río Magdalena, en Girardot (Cundinamarca) a 280 msnm. En su recorrido drena un área de 5891.4 km², donde habitan alrededor de 8,04 millones de habitantes en 42 municipios, incluyendo la ciudad de Bogotá (CONPES, 2002).

En una longitud aproximada de 336 Km, el Río Bogotá recibe las aguas de los ríos Sisga, Tominé, Neusa, Tejar, Negro, Teusacá, Frío, Chicú, Salitre, Fucha, Tunjuelo, Soacha, Balsillas, Calandaima y Apulo, entre otros (EAAB-UNAL, 2010).

La cuenca del río Bogotá se puede dividir en tres subcuencas principales (EAAB-UNAL, 2010): cuenca alta, con una longitud de 145 km desde su nacimiento hasta el lugar conocido como Puente la Virgen; cuenca media, con 68 km desde Puente la Virgen hasta Alicachín, en el extremo sur de la Sabana de Bogotá; y, cuenca baja, con una longitud de 123 Km, hasta la desembocadura en el río Magdalena.

A lo largo de su recorrido, el río es receptor de vertimientos altamente contaminantes, generando graves impactos físicos, químicos, biológicos y estéticos sobre la calidad de sus aguas. El río recibe las descargas de aguas residuales domésticas de los municipios de Villapinzón, Chocontá, Suesca, Tocancipá, Gachancipá, Chía, Cota, entre otros. Algunos de estos municipios no cuentan siquiera con una PTAR, y la mayoría cuentan con un tratamiento deficiente. Adicionalmente, el río es receptor de gran cantidad de vertimientos industriales, e.g. las curtiembres ubicadas en el municipio de Villapinzón.

Debido a las descargas que ha recibido en su cuenca alta, el río llega a su cuenca media con una calidad del agua deficiente. En esta zona, el río recibe su mayor impacto, debido a las aguas lluvias y residuales de la ciudad de Bogotá, descargadas directamente, o a través de los ríos Salitre, Fucha y Tunjuelo (EAAB-UNAL, 2010).

En su cuenca media, el río Bogotá presenta características propias de un río de planicie, como una baja pendiente longitudinal, bajas velocidades, altura considerable sobre el nivel del mar, y bajas temperaturas (Rodríguez *et al.*, 2008). Las condiciones mencionadas dificultan la auto-depuración de la corriente, debido a bajos niveles de oxígeno disuelto de saturación, baja reaireación, y bajas tasas de reacción. El efecto combinado de las cargas contaminantes vertidas y la baja capacidad de asimilación, se refleja en la deficiente calidad del agua del río Bogotá en su cuenca media. De acuerdo con la Secretaría Distrital de Ambiente (SDA – EAAB, 2008), en esta el río presenta condiciones anaerobias, con concentraciones de DBO y SST entre 120 mg/l y 400 mg/l.

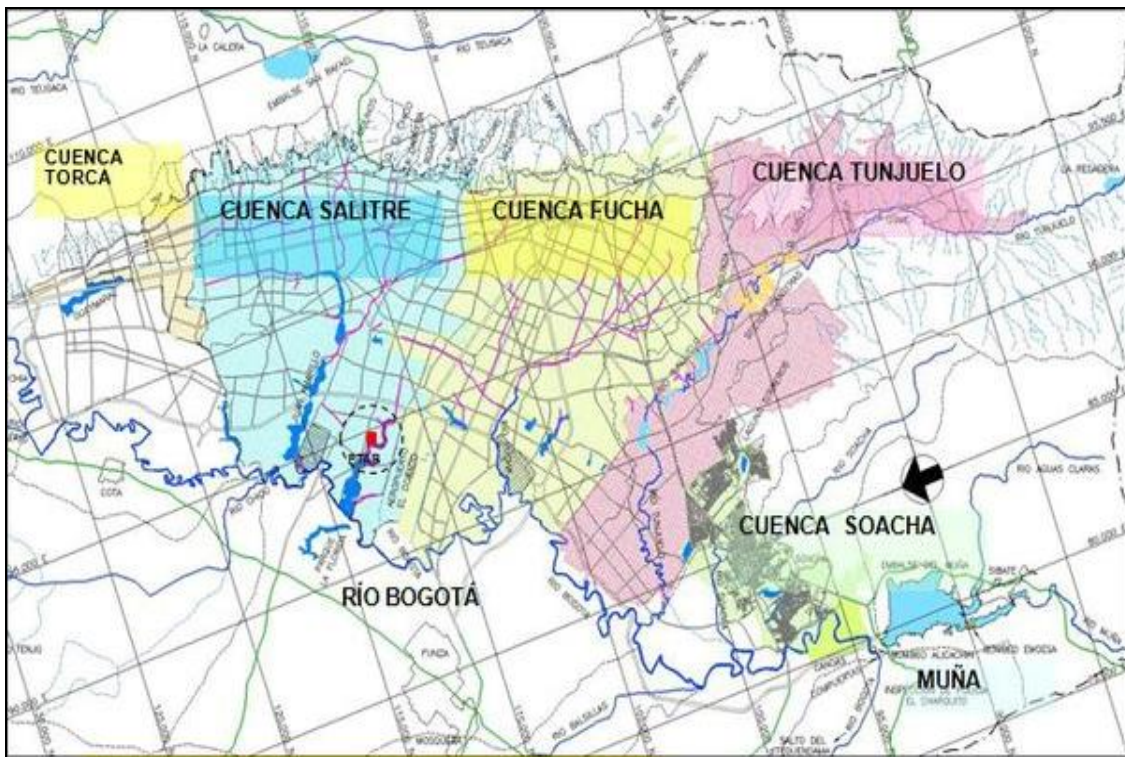
Debido al uso del río Bogotá para generación hidroeléctrica, y a las altas pendientes de la cuenca baja del río, en ésta zona se observa una recuperación del oxígeno disuelto, llegando incluso a concentraciones de hasta 7 mg/l. Sin embargo, las altas concentraciones de materia orgánica y nutrientes presentes en el río, generan que el oxígeno se vuelva a consumir rápidamente, llegando a niveles cercanos a cero en la confluencia con el río Magdalena (EAAB-UNAL, 2010).

El río Bogotá es el principal cuerpo receptor del sistema de drenaje de la ciudad de Bogotá. En dicha corriente desembocan los ríos Salitre, Fucha y Tunjuelo, y adicionalmente recibe descargas directas del alcantarillado de la ciudad. Lo anterior, sumado a la baja capacidad de asimilación del río, ha generado un deterioro notable en la calidad del agua, llegando a condiciones anaerobias a su paso por la ciudad (Rodríguez *et al.*, 2008).

La cuenca del río Bogotá se puede dividir en tres subcuencas principales (EAAB-UNAL, 2010) (Figura 5-14)

- Cuenca Alta: entre el municipio de Villapinzón y la estación hidrometeorológica Puente La Virgen, con una longitud de 145 km.
- Cuenca Media: entre la estación hidrometeorológica Puente La Virgen y las compuertas Alicachín, en inmediaciones del embalse del Muña (A su vez se divide en cuenca media occidental y oriental), en la cual se localiza el Distrito Capital, con una longitud de 68 km.
- Cuenca Baja: entre El Embalse del Muña y la desembocadura al río Magdalena, con una longitud de 123 Km.

Figura 5-14. Mapa de la Cuenca del Río Bogotá



Fuente: EAAB-UNAL, 2010

La cuenca del río Bogotá, sus sub-cuencas, la oferta y la demanda del recurso hídrico y la calidad del agua actual, es consecuencia de los diferentes factores de deterioro que se presentan en la región, entre los que se resaltan los vertimientos de aguas residuales domésticas, industriales y el fenómeno de conexiones erradas del sistema sanitario al pluvial.

5.2.2. Plan de Saneamiento del Río Bogotá-PSRB

El programa de saneamiento del río Bogotá cuenta con estudios técnicos y ambientales desarrollados desde el año 2002, y se fundamenta en los principios

de sostenibilidad de la oferta y uso eficiente del recurso hídrico, equidad, racionalidad económica, sostenibilidad financiera, participación ciudadana y coordinación institucional. El objetivo de dicho programa de saneamiento es dar una solución integral, a nivel de cuenca, a la problemática ambiental del río Bogotá, buscando maximizar los beneficios técnicos, económicos y ambientales obtenidos de las inversiones realizadas (EAAB-UNAL, 2008).

La estrategia actual de saneamiento del río Bogotá ha sido revisada y aprobada por diferentes entidades a nivel regional y nacional, y se encuentra descrita en el documento CONPES 3320 (CONPES, 2002). Dicho documento describe las acciones que deben desarrollar los diferentes municipios de la cuenca del río Bogotá, e incluye el plan de inversiones y las fuentes de financiación a nivel municipal, regional y nacional.

Numerosos estudios se han realizado en la búsqueda de soluciones para la recuperación del río Bogotá. Un resumen de los principales estudios contratados con ese propósito se presenta a continuación.

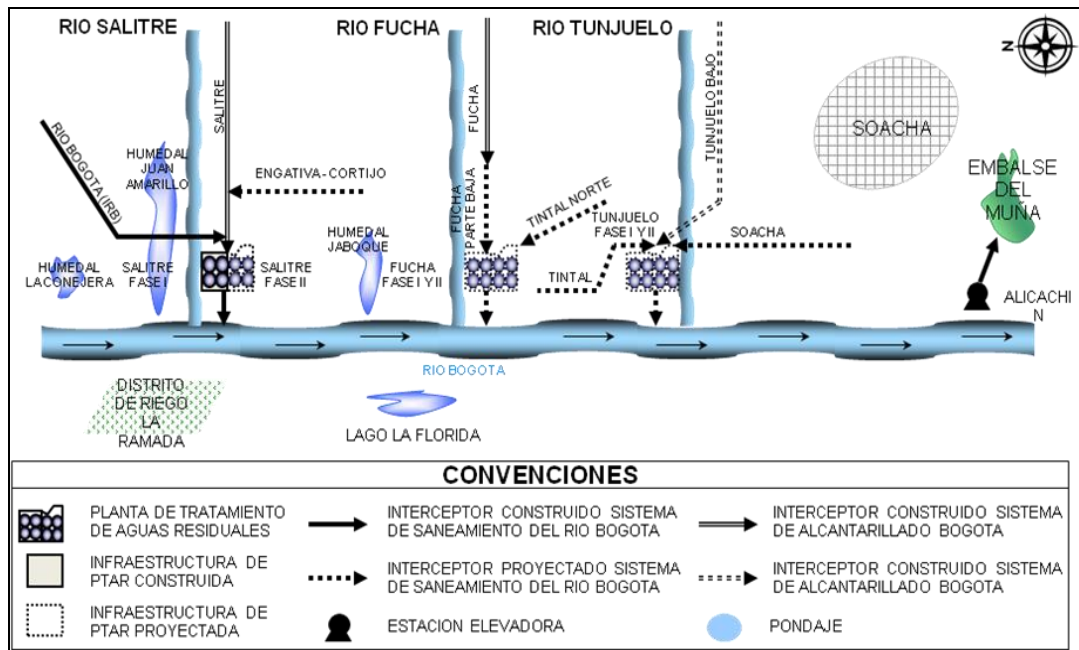
Años 1983-1985: Plan Maestro de Alcantarillado (Black & Veatch e Hidroestudios) analiza 16 alternativas de saneamiento y selecciona un gran interceptor paralelo al río Bogotá y una planta única en Canoas.

Año 1989: Biwater plantea como solución óptima la construcción de tres plantas de tratamiento en las desembocaduras de los Ríos Salitre, Fucha y Tunjuelo (Concesión privada)

En 1992: FONADE financió la realización de un estudio para evaluar las diferentes estrategias propuestas por estudios anteriores para la descontaminación del Río Bogotá. El estudio fue confiado a la firma EPAM LTDA, que entregó sus recomendaciones en mayo de 1993.

Posteriormente el Comité Interinstitucional del Río Bogotá, estudió los resultados y acogió las recomendaciones del estudio realizado por EPAM LTDA. La recomendación más importante fue la selección del esquema de tratamiento consistente en la ubicación de tres plantas en las desembocaduras de los Ríos Salitre, Fucha y Tunjuelo con el Río Bogotá. (Ver Figura No 5-15)

Figura 5-15. Alternativa de tratamiento propuesta en 1993 (tres plantas)

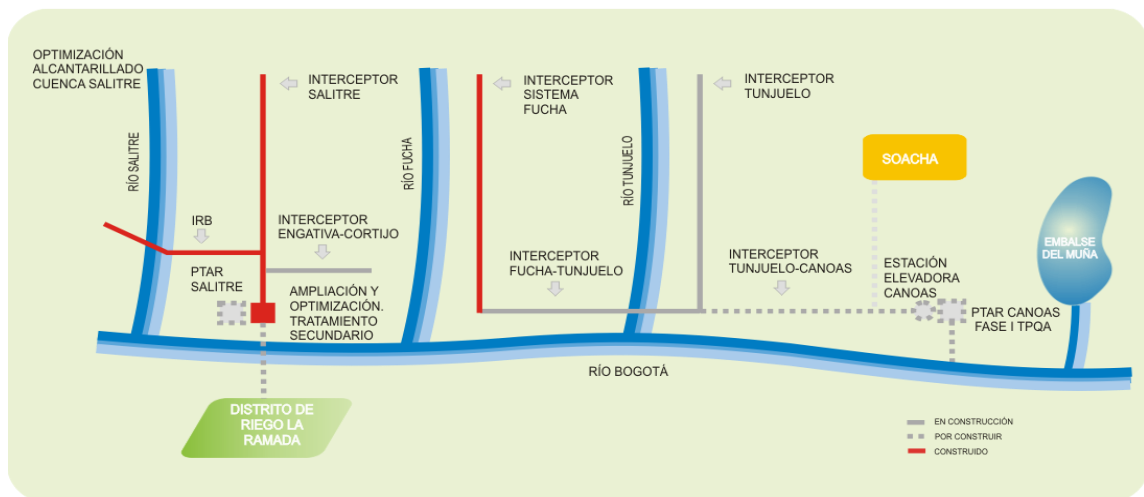


Fuente: EAAB, 1993

Año 2000

El acueducto de Bogotá contrató a UTSRB, para que mediante un estudio definiera los lineamientos sobre los cuales debería continuar el mejoramiento de la fuente hídrica. Este estudio concluyó que no se requieren las tres plantas. En su reemplazo propone la ampliación de la PTAR Salitre y la construcción de una segunda planta en Soacha o alternativamente en Tunjuelo (Figura 5-16)

Figura 5-16. Esquema General del Programa de Saneamiento del Río Bogotá (PSRB)



Fuente: EAAB, 2010

Año 2002.

Se realiza una mesa de trabajo en la que participaron las siguientes entidades: Alcaldía mayor de Bogotá, DAMA, EAAB, Secretaria De Hacienda y la CAR y los siguientes expertos: Emanuel Idelovitch, Mark Smith y John Wood asesores para la EAAB, Takasuru Nishikawa, Shuighi Okumoto, Hiroshi Kitajima consultores de ENRO para el DAMA, Menahem Libhaber del Banco Mundial, Alejandro Deeb, asesor Alcaldía Mayor de Bogotá.

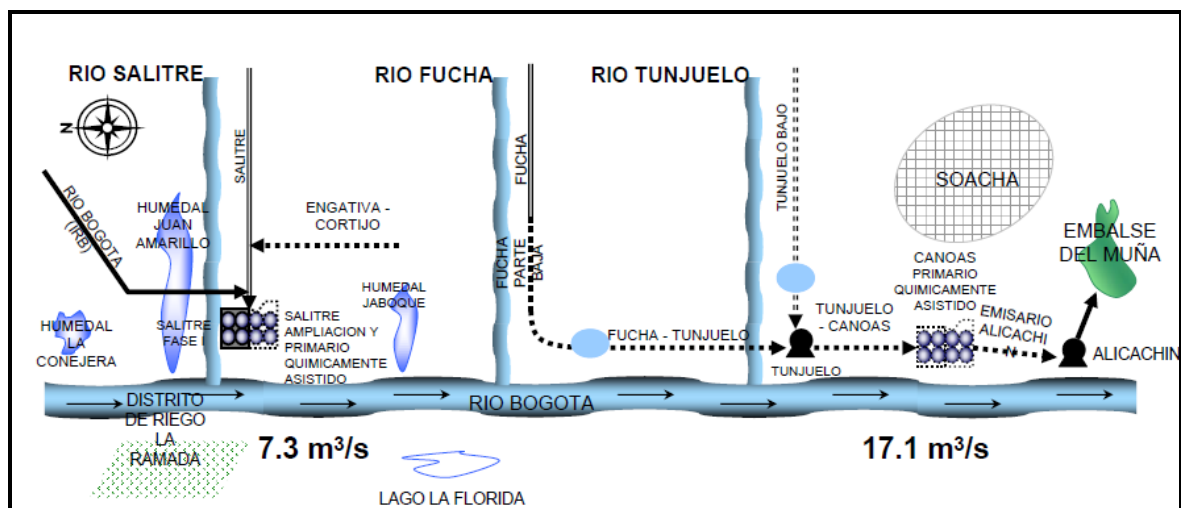
A manera de conclusión, se estableció que el programa de descontaminación del río debía tener una perspectiva integral y regional. Así mismo, se definió el tratamiento primario químicamente asistido –TPQA, como una alternativa más atractiva que el tratamiento secundario y se modificó el esquema previsto en 1993 por razones financieras y técnicas (mayor efecto en menor tiempo). Esta es la solución que aún se contempla para la descontaminación del río Bogotá.

Para la cuenca media del río, y específicamente para el tramo que atraviesa la ciudad de Bogotá, se contempla la construcción de interceptores y colectores en las principales subcuencas del sistema hídrico de la ciudad, la ampliación de la actual PTAR Salitre y la construcción de la PTAR Canoas, con la cual se pretende realizar el tratamiento de las aguas residuales producidas específicamente en las cuencas de los ríos Fucha y Tunjuelo (CONPES, 2002).

Igualmente, se ha previsto la rehabilitación de estructuras de alivio y redes troncales, y la identificación y control de vertimientos y conexiones erradas. El Plan de Ordenamiento Territorial (POT) de la ciudad de Bogotá prevé la implementación de las siguientes acciones (EAAB-UNAL, 2008; CONPES, 2002), como se observa en la Figura 5-17, así:

- Ampliación y adecuación de la PTAR Salitre a 8 m³/s.
- Construcción del Interceptor Fucha - Tunjuelo.
- Construcción del Interceptor Tunjuelo - Canoas.
- Construcción de la PTAR Canoas: caudal medio estimado de 14 m³/s y tratamiento a nivel secundario.
- Manejo de humedales y dragado

Figura 5-17. Esquema inicial del proyecto PSRB a implementar



Fuente: EAAB, 2010

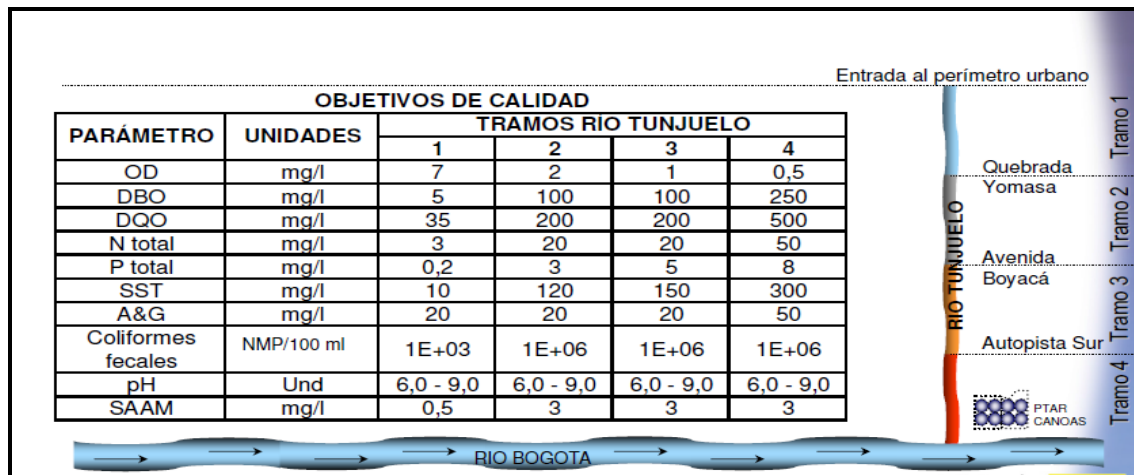
La cuenca del río Tunjuelo es la que presenta el menor desarrollo en redes de acueducto y alcantarillado de la ciudad (EAAB, 2007). De acuerdo con el PSMV (EAAB, 2007), la EAAB tiene contemplada la construcción de obras de expansión para el sistema separado, que eliminarían el 90% de los vertimientos directos al río Tunjuelo, interceptando las cargas contaminantes para luego conducirlos a la futura PTAR Canoas. Dichas obras comprenden la construcción de los interceptores alto derecho, alto izquierdo, medio de refuerzo, y bajo del Tunjuelo.

Las aguas residuales generadas en la parte alta de la cuenca serán recolectadas por los interceptores Tunjuelo alto izquierdo y derecho, que finalmente descargarán en el interceptor Tunjuelo medio. Paralelo a este último, se tiene proyectada la construcción del interceptor Tunjuelo medio de refuerzo, el cual conducirá, junto con el interceptor existente, las aguas generadas en las cuencas alta y media, drenando un área de 7562 ha, aproximadamente. El interceptor de refuerzo proyectado tiene una longitud de 6,8 km, en diámetros entre 1.1 y 2.0 m (EAAB, 2007).

Finalmente, el interceptor Tunjuelo-Canoas proyectado se diseñó como un túnel circular de flujo libre, cuyo trazado incluye varios cruces bajo el río Tunjuelo, así como 25 estructuras o pozos de inspección y mantenimiento. Tendrá una longitud de 8.3 km, 4 de ellos con un diámetro de 2.5 m y los 4.3 restantes con 2.7 m. Su pendiente promedio es de 0.128%. (EAAB, 2007)

A continuación se muestran los objetivos de Calidad para el río Tunjuelo con sus diferentes tramos (Figura 5-18) y el proyecto del programa de saneamiento del Río Bogotá Etapa I.

Figura 5-18. Esquema de los Objetivos de Calidad del Río Tunjuelo



Fuente: EAAB, 2010.

La Empresa de Acueducto y alcantarillado planea que todas las obras deben estar en operación entre 2021 y 2025. Sin embargo debido a los costos financieros del proyecto se contempla un tratamiento gradual el cual incluye las siguientes etapas:

- Primera Fase: Tratamiento primario químicamente asistido (Ver Figura 5-19), (TPQA).
- Segunda Fase: Extensión de la PTAR a un tratamiento biológico convencional.-
- Tercera Fase: Extensión de la PTAR a un tratamiento con remoción de nitrógeno y fósforo.

Figura 5-19. Proyecto del Programa de Saneamiento del Río Bogotá Etapa I



Fuente: EAAB, 2012

Adicionalmente se contempla la construcción de interceptores Engativá - Cortijo, Fucha - de aguas residuales hacia la PTAR llevaría a cabo el tratamiento de las aguas residuales generadas en el sur de la ciudad, implica la combinación de varias tecnologías de tratamiento de vertimientos, lo cual complementaría en parte el tratamiento de la PTAR El Salitre, la cual en época de invierno disminuye su eficiencia debido a que recibe aguas residuales y aguas lluvias conjuntamente, situación generada por la existencia de conexiones erradas en el alcantarillado que mezclan estos dos tipos de aguas. (Figura 5-20)

Figura 5-20. Situación final del Proyecto.



Fuente: EEAB, 2009

Las obras proyectadas en la cuenca media del río Bogotá tienen como objetivo eliminar todos los vertimientos que actualmente descargan en el río, transportando las aguas residuales interceptadas a la PTAR Salitre existente o a la futura PTAR Canoas.

El interceptor Fucha-Tunjuelo captará las aguas residuales de los colectores que actualmente descargan directamente a los ríos Fucha y Bogotá, ordenando el sistema sanitario de las subcuentas de Fucha, Tintal, Fontibón y Zona Franca (EAAB, 2007). El interceptor recorrerá una longitud de 9.4 km aproximadamente, comprendida entre el pondaje proyectado en la parte baja de la cuenca del Río Fucha, y la margen izquierda del río Tunjuelo, en cercanías a sus confluencia con el río Bogotá (EAAB, 2007). EL interceptor se propuso como un túnel revestido en doveles de concreto, con un diámetro interno de 3.75 m, y una pendiente longitudinal de 0.05%.

Finalmente, el interceptor Tunjuelo- Canoas proyectado recogerá las aguas residuales de las cuencas de los ríos Fucha y Tunjuelo, así como el emisario de Soacha, para transportar a la futura planta de tratamiento de Canoas. Para tal fin, se proyectó la construcción de un túnel de 8.1 km de largo, ubicado entre la estructura de unión de los interceptores Fucha-Tunjuelo e ITB, y la futura estación de bombeo Canoas. El túnel tendrá un diámetro interno de 4.2 m, con una pendiente de 0.113 % aproximadamente.

5.3. Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Canoas

5.3.1. Localización

Los estudios previos indican que la mejor ubicación de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales PTAR se encuentra en el predio denominado Canoas, ubicado en el municipio de Soacha, zona destinada para este fin en el Plan de Ordenamiento Territorial, POT. La ubicación también se basa en la necesidad de los caudales de aguas residuales generados por Bogotá para la generación de energía, teniendo en cuenta la concesión existente de las aguas otorgadas por la Corporación Autónoma Regional (CAR) a la Empresa Generadora y Comercializadora de Energía, Emgesa.

La PTAR Canoas es concebida hasta el momento por etapas, lo cual, de ser así, permitiría viabilizar económicamente su construcción y adicionalmente conocer el comportamiento y recuperación real del río Bogotá ante la calidad del vertimiento generado. (EAAB, 2010).

5.3.2. Proyecciones y cargas

Para el predimensionamiento de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales PTAR Canoas se tuvieron en cuenta los siguientes datos en la Tabla 5-8 y 5-9:

Tabla 5-8. Población y cobertura

CUENCA	Área Total (ha)	Población 2007	Población a Saturación	Puntos Seleccionados
Tunjuelo	10.336	1.925.601	2.763.909	Interceptor Tunjuelo Alto Derecho
				Interceptor Tunjuelo Medio
				Est. Elevadora Grancolombiana
				Est. Elevador la Isla

Fuente: EAAB, 2009

Tabla 5-9. Proyecciones de Caudales y Estimación de las Cargas Contaminantes

PROYECCIONES DE POBLACIÓN TOTAL DE BOGOTA Y SOACHA POR CUENTAS SANITARIAS POBLACIÓN EN HABITANTES									
CUENCA TUNJUELO	AÑO								
	2000	2005	2010	2015	2020	SATURACIÓN			
	2,111,618	2,448,870	3,775,736	3,047,517	3,298,957	3,422,820			
CAUDALES SANITARIOS MEDIOS ANUALES (m3/s)									
CUENCA TUNJUELO + SOACHA	AÑO								
	2000	2005	2010	2015	2020	SATURACIÓN			
	5,7	6,4	7,2	7,8	8,2	8,3			
ESTIMATIVO DE CARGAS CONTAMINANTES POR CUENCAS									
CUENCA TUNJUELO	CARGA PERCÁPITA		AÑO 2000			SATURACIÓN			
	DBO ₅	SST	POBLACIÓN	DBO ₅	SST	POBLACIÓN	DBO ₅	SST	
	g/hb- dia	g/hab- dia	Según TEA 99	por UT	ton/año	por UT	ton/año	ton/año	
	50	52	2,470,644	45,089	46,893	4,216,075	76,943	80,39	

Fuente: EAAB, 2009

Tabla 5-10. Cargas Contaminantes proyectadas

CARGAS CONTAMINANTES PROYECTADAS (ton/año)			
AÑO	CUENCA TUNJUELO		
	DBO ₅	SSV	Concentración de Amonio
2000	45,089	33,059	7,124
2005	52,622	38,582	8,314
2010	59,908	43,924	9,465
2015	65,995	48,388	10,427
2020	71,48	52,409	11,294
SATURACIÓN	76,943	56,415	12,157

Fuente: EAAB, 2009

5.3.3. Interceptor Tunjuelo- Canoas

El interceptor Tunjuelo- Canoas es el emisario final del sistema de alcantarillado de las cuencas del Fucha, Tintal, Tunjuelo y del municipio de Soacha. Tiene como función conducir sus aguas residuales hacia la futura planta de tratamiento de Canoas.

Se proyecta en una longitud de más de 11 kilómetros desde el río Tunjuelo hasta su entrega directa al río Bogotá. Se construirá en túnel con revestimiento en concreto y diámetro interno de 4,2 metros.

Con su construcción se busca el drenaje de un área de 28 mil 909 hectáreas que beneficia a una población de aproximadamente cuatro millones 700 mil habitantes.

5.3.4. Parámetros de diseño

En la siguiente tabla se indican los parámetros de diseño del tratamiento. Esto de acuerdo con la toma de muestras realizadas en los diferentes tramos del Río Tunjuelo. (Tabla 5-11)

Tabla 5-11. Parámetros para el diseño de la PTAR Canoas (año saturación)

	PARÁMETROS	VALOR
1	Área drenada	28.827 hectáreas
2	Población servida	7.322.000 hab
3	Caudal medio de aguas residuales de diseño	14.0 m ³ /s
4	Caudal máximo seco	18.0 m ³ /s
5	Caudal máximo de diseño	28.0 m ³ /s
6	Sólidos Suspendidos Totales (SST)	412 ton/día
7	Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5)	416 ton/día
8	Nitrógeno Total (NT)	118 ton/día
9	Fósforo Total (PT)	16 ton/día

Fuente: EAAE, 2009

5.3.5. Etapas de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales PTAR Canoas

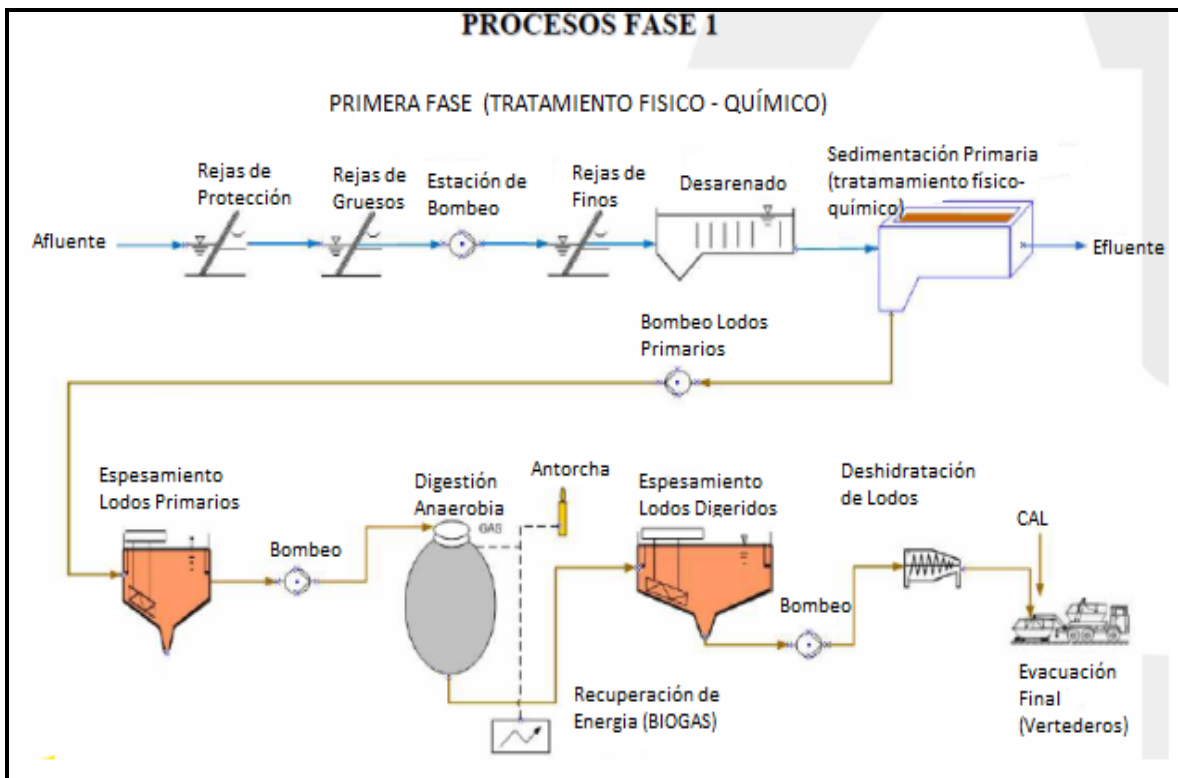
En las etapas contempladas se proyecta inicialmente un tratamiento primario químicamente asistido, con remoción del 50 por ciento de carga orgánica y 70 por ciento de material en suspensión. El tratamiento secundario con una remoción entre 80-85 por ciento, que asegure un efluente con concentraciones de 30 miligramos por litro, más desinfección para la remoción de coliformes. El tratamiento terciario consiste en remover nutrientes y la fracción remanente de carbono.

Lo anterior permite proyectar una PTAR Canoas con capacidad de 14 metros cúbicos por segundo en caudal medio con capacidad de tratar un caudal pico de

hasta 28 metros cúbicos por segundos en cortos períodos, en el proceso de saneamiento del Río Bogotá.

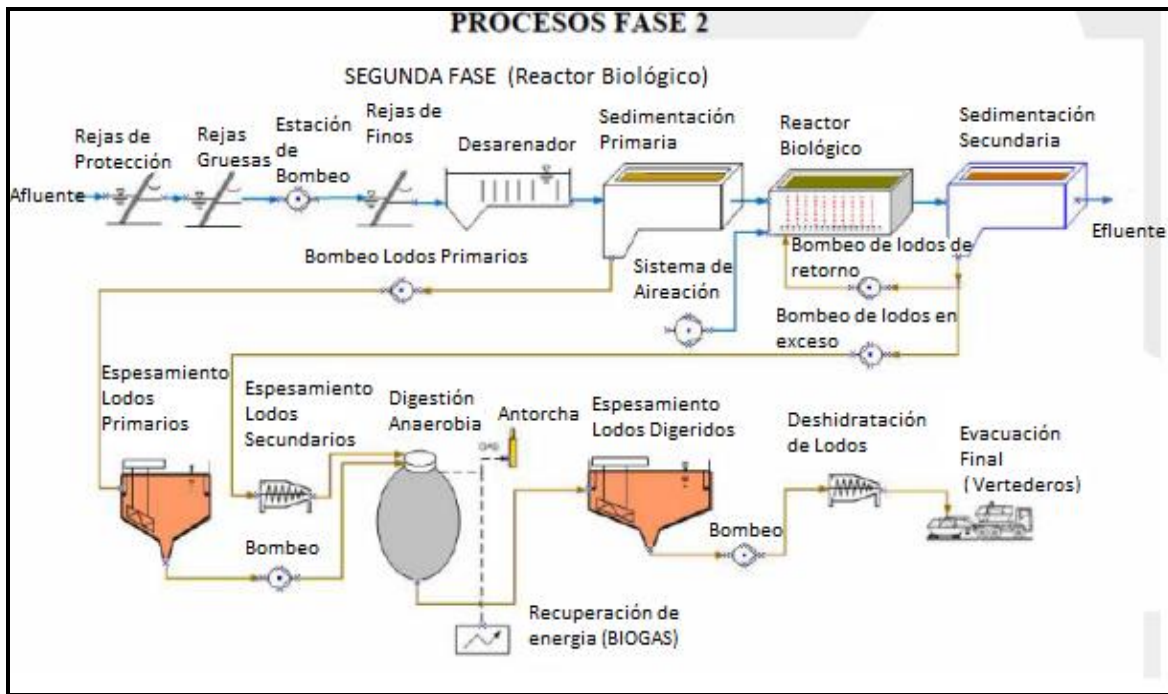
La implementación de la Planta de tratamiento Canoas está contemplada en tres fases, así: la Fase I, Tratamiento primario químicamente asistido, (TPQA) (Figura 5-21), Fase II, Extensión de la PTAR a un tratamiento biológico convencional (Figura 5-22) y Fase III, Extensión de la PTAR a un tratamiento con remisión de nitrógeno y fósforo.

Figura 5-21. Fase I, PTAR Canoas



Fuente: EAAB, 2009

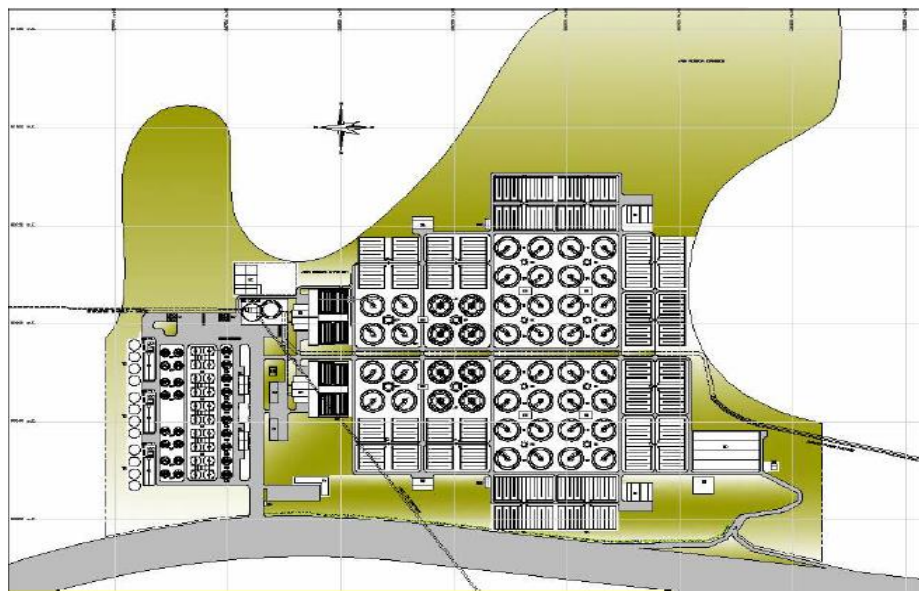
Figura 5-22. Fase II, PTAR Canoas.



Fuente: EAAB, 2010.

A continuación se ilustra un diseño general del sistema en la Figura 5-23.

Figura 5-23. Esquema de Planta de la PTAR Canoas- disposición de procesos.



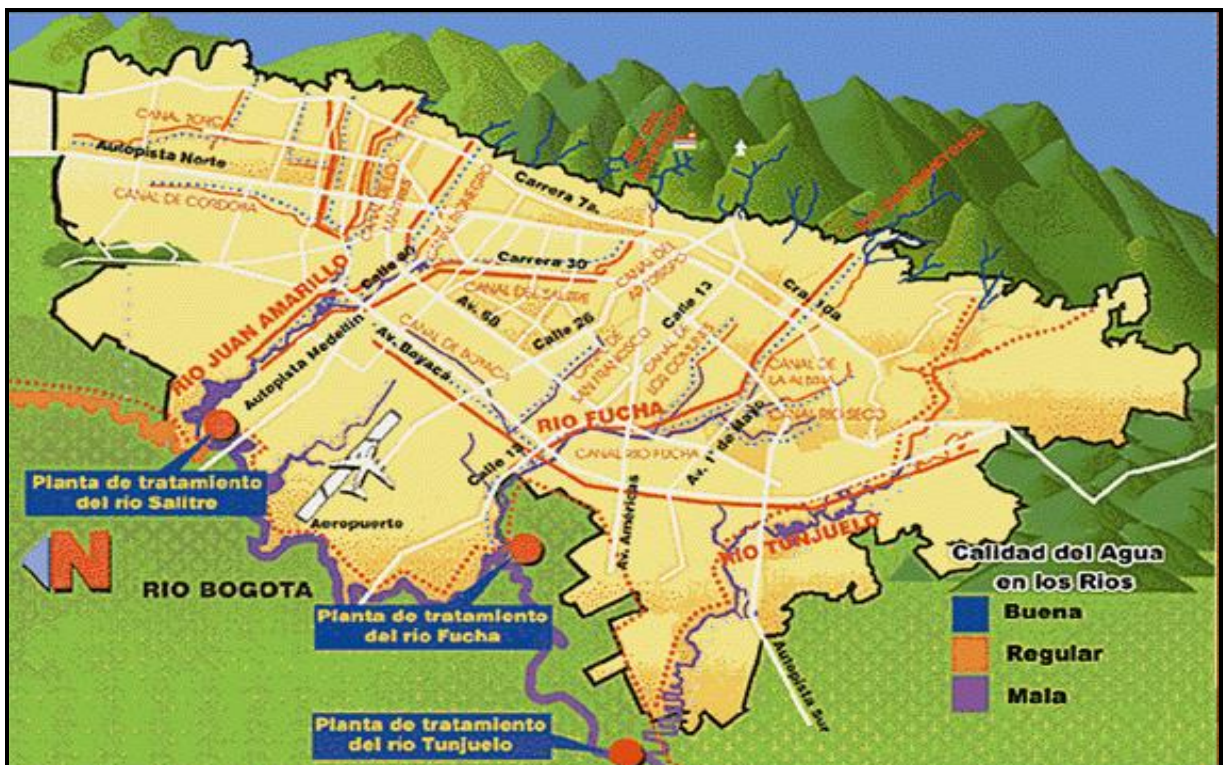
Fuente: EAAB, 2010.

5.4. Cuenca del Río Tunjuelo

5.4.1. Ubicación

Situada en la zona sur de Bogotá, con un área de drenaje de aproximadamente 45000 hectáreas (EAAB, 2007). El río Tunjuelo nace en el páramo de Sumapaz, a partir de la confluencia de los ríos Chisacá, Mugroso y Curubital. Con una longitud de 28 kilómetros, el río fluye en dirección predominante sur – norte hasta la parte baja de la cuenca, en donde gira en dirección occidente (EAAB, 2007). Como se muestra en la Figura 5-24.

Figura 5-24. Mapa de la Ubicación del Río Tunjuelo



Fuente: EAAB, 2001.

La principal fuente de contaminación en el río Tunjuelo es el vertimiento de aguas residuales domésticas e industriales. En la Tabla 5-11 se presenta la calidad del agua para condiciones de caudal promedio de los ríos urbanos, de acuerdo con los estudios realizados por EAAB y la SDA. El caudal se expresa en m³/s.

Tabla 5-12. Ríos Urbanos de la ciudad de Bogotá, calidad del agua.

	Caudal Promedio	DBO mg/l	DQO mg/l	Oxígeno Disuelto	Sólidos Suspendidos mg/l
Canal Torca	0.526	57	140	0.4	62
R. Salitre	4.66	268	895	2	94
R. Fucha	9.168	243	621	0	189
R. Tunjuelo	6.685	195	569	0.1	346

Fuente: Calidad del sistema hídrico de Bogotá. 1 Ed. Editorial Pontificia Universidad Javeriana – Alcaldía de Bogotá, Secretaría de Ambiente y EAAB. 2008.

El río Tunjuelo es uno de los principales afluentes del río Bogotá a su paso por la capital del país y uno de los principales receptores de los vertimientos líquidos de la ciudad. La cuenca del río Tunjuelo cuenta con 1371 kilómetros de redes de alcantarillado, de los cuales 9.85% corresponden al sistema combinado, 22.03% al pluvial y 68.12% al sanitario (UNIANDÉS, 2007). Sin embargo, es la cuenca más pobre en términos de infraestructura sanitaria de la ciudad (EAAB, 2007), situación que ha generado impactos negativos considerables sobre la calidad del agua del río.

En los últimos años, se ha observado un crecimiento considerable en la población de la cuenca (EAAB, 2007), lo que hace necesario implementar medidas efectivas de saneamiento.

5.4.2. Calidad

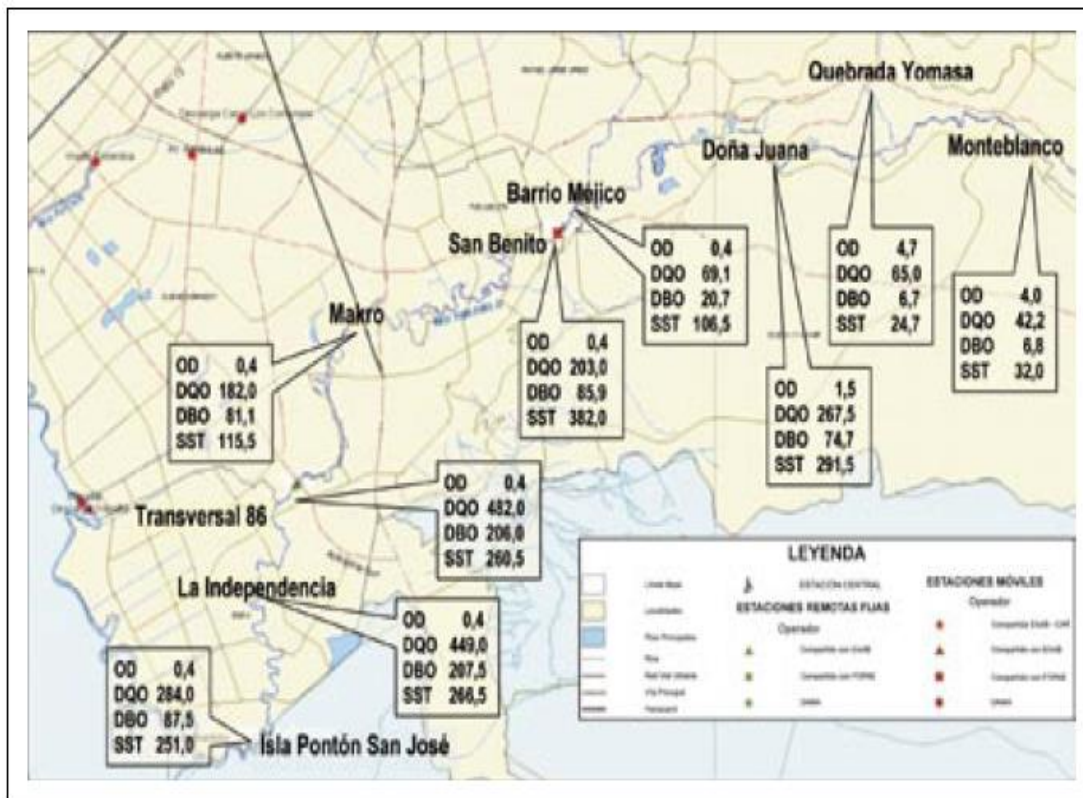
A lo largo de su paso por el sur de la ciudad, el río Tunjuelo, recibe múltiples descargas de aguas residuales, así como las confluencias de las quebradas Chiguaza, Yomasa, El Triángulo, El Zuque, Santa Librada, Juan Rey, La Pichosa, Moralvia, Nueva Delhi, Gaviotas, Zanjón de la Estrella y Trompeta. En el sector de Bosa, se encuentra ubicado el Humedal Tibanica, cuya calidad del agua se ha visto afectada por la realización de rellenos ilegales, debido a la construcción de viviendas en zonas de invasión (EAAB, 2007).

El monitoreo de la calidad del agua del río Tunjuelo se inició con el convenio 041 de 2002, suscrito entre la Alcaldía de Bogotá y el IDEAM, mediante el cual se acordó la instalación, mantenimiento y operación conjunta de la Red de Calidad del Recurso Hídrico de Bogotá, con cobertura sobre los ríos Juan Amarillo, Fucha, Tunjuelo y Bogotá. La campaña de muestreo se adelantó entre los años 2003 y 2004. De manera específica, para el río Tunjuelo, se definieron los siguientes puntos de muestreo, para 33 parámetros de interés:

- Monteblanco
- Quebrada Yomasa (antes de confluencia con el río Tunjuelo)
- Doña Juana
- México
- San Benito
- Makro
- Transversal 86
- La Independencia
- Isla Pontón San José

De la misma manera, en la Figura 5-25 se presentan los resultados para OD, DQO, DBO y SST.

Figura 5-25. Concentración de parámetros de interés monitoreo río Tunjuelo 2004



Fuente: Ideam, Alcaldía de Bogotá, 2004

Como se puede observar, en la estación Doña Juana, ubicada aguas abajo de la descarga de los lixiviados del relleno sanitario se produce la primera gran alteración de la calidad del agua y, posteriormente, como consecuencia de las descargas sucesivas de aguas residuales domésticas e industriales, entre otras, el río alcanza niveles muy altos de contaminación orgánica.

Posteriormente, en el año 2004, el Distrito suscribió un convenio con la EAAB-ESP (Convenio 017 de 2004) para la reubicación de los puntos de muestreo y la selección del índice de calidad más apropiado. Para este proyecto se emplea un índice de calidad de agua que permite mediante expresión matemática agrupar grandes cantidades de variables de datos de calidad de agua y representar las características positivas y negativas de cualquier fuente superficial. (National Sanitation Foundation – INSF 1970), para lo cual el índice analiza los aspectos fisicoquímicos, biológicos y no acuáticos. Para este propósito se seleccionó el índice de calidad CCME-WQI (Canadian Council Of Ministers of the Environment Water Quality Index), el cual se implementó, a través del convenio 005 de 2006, suscrito entre la SDA y la EAAB-ESP. En este caso, se tomó como referencia la Resolución 1813 de 2006-DAMA y el Acuerdo 43 de 2006-CAR. Esto con el fin de establecer una línea base para orientar la recuperación progresiva del recurso hídrico de Bogotá.

El CCME-WQI incorpora tres elementos, el alcance el cual es el número de variables que no cumplen con el objetivo de calidad o límite máximo permisible, estipulado en la norma, la frecuencia - el número de veces que estos objetivos no se cumplen, y amplitud que corresponde a la cantidad por la que no se cumplen los objetivos.

El índice produce un rango de datos o un número entre 0 (peor calidad del agua) y 100 (mejor calidad del agua). Estos números se dividen en 5 categorías descriptivas para simplificar la presentación de resultados.

A continuación se relacionan las categorías de calificación del CCME-WQI para la calidad del agua con la metodología seleccionada se presentan en la Tabla 5-12.

Tabla 5-13. Categorías de calificación del CCME-WQI

Categorías	Rango	Descripción
Excelente	95-100	La calidad del agua se encuentra protegida y presenta una virtual ausencia de amenaza o menoscabo, se consideran condiciones muy cercanas a niveles naturales o vírgenes.
Buena	80-94	La calidad del agua se encuentra con un grado mínimo de amenaza o deterioro; las condiciones presentadas presentan unas desviaciones mínimas de los niveles naturales o deseables
Aceptable	65-94	La Calidad del Agua generalmente se encuentra en condiciones aceptables pero presenta condiciones de amenazadas que salen de los niveles naturales o deseable
Marginal	45-64	La calidad del agua se ve amenazada frecuentemente, presentando condiciones que a menudo salen de los niveles naturales o deseables.
Pobre	0-44	La calidad del agua es permanentemente amenazada, las condiciones salen de niveles naturales o deseables.

Fuente: Consejo Canadiense del Ministerio del Medio Ambiente, CCME-WQI

Para el cálculo del índice se emplea la siguiente metodología:

Como primera medida es necesario determinar el cuerpo de agua que va a ser objeto de análisis, como siguiente medida es necesario determinar el periodo de tiempo de análisis, así como las variables y los objetivos con los cuales se va a realizar el comparativo, una vez determinado lo anterior se procede a calcular el Índice.

F1: Este factor representa el Alcance, el cual corresponde al porcentaje de variables que no cumplen los objetivos de calidad determinados inicialmente. Se debe contar la totalidad de variables que no cumplieron, lo anterior significa que aun cuando una variable no haya cumplido con el objetivo una sola vez en el periodo de tiempo establecido se debe contar. lo anterior se relaciona con el número total de variables medias.

$$\text{Ecuación 1.} \quad F_1 = \left(\frac{\text{Numero de Variables fuera del Objetivo}}{\text{Numero Total de Variables Analisadas}} \right) * 100$$

F2: llamado también frecuencia, el porcentaje (calculado individualmente) del número de veces que cada variable no cumplió los objetivos de calidad, también se puede llamar “ensayos fallidos”.

$$\text{Ecuación 2.} \quad F_2 = \left(\frac{\text{Numero de Ensayos Fallidos}}{\text{Numero Total de Ensayos}} \right) * 100$$

F3: Representa la Amplitud o la desviación numérica entre el parámetro que no cumplió con el objetivo y el objetivo de calidad propuesto. Para calcular este factor se emplean los siguientes tres pasos:

$$\text{Ecuación 3.} \quad \text{excursión} = \left(\frac{\text{Valor Variable Fuera del Objetivo}}{\text{Valor Objetivo}} \right) - 1$$

$$\text{Ecuación 4.} \quad nse = \left(\frac{\sum_{i=1}^n \text{excursion}}{\# \text{ de Ensayos}} \right)$$

$$\text{Ecuación 5.} \quad F_3 = \left(\frac{nse}{0.01nse + 0.01} \right)$$

A continuación se representa el cálculo del índice CCME-WQI

$$\text{Ecuación 6. } CCME - WQI = 100 - \left(\frac{\sqrt{(F_1^2 + F_2^2 + F_3^2)}}{1.732} \right)$$

Con la anterior expresión se calcula el índice y se determina la categoría donde se encuentra el cuerpo hídrico analizado.

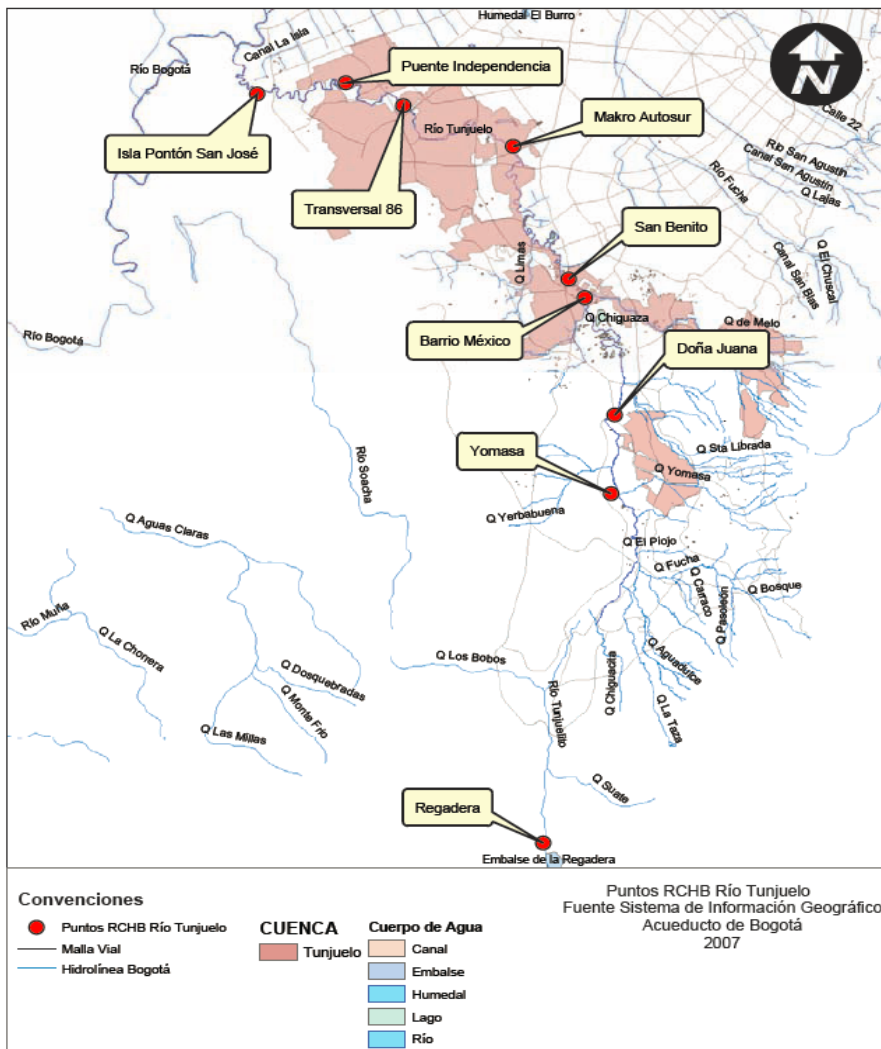
Para determinar el índice de calidad CCME-WQI para el río Bogotá, se determinó localización de los puntos de muestreo los cuales se presentan en la Tabla 5-14 y Figura 5-26.

Tabla 5-14. Puntos de muestreo en la red de calidad hídrica del río Tunjuelo (2007-2008)

Cuenca	Puntos de Monitoreo	Tramo Fuente	Abscisado	Coordenadas geográficas WGS84	
				Latitud	Longitud
Río Tunjuelo	La Regadera	1	k0+000	4,24181	74,08403
	100 mt aguas abajo despues de la Quebrada Yomasa	2	k12+881	7,30138	74,07399
	Doña Juana	2	k15+760	4,31318	74,07367
	Barrio México	3	k21+801	4,33308	74,08037
	San Benito	3	k22+652	4,33488	74,08227
	Makro, Autopista Sur	4	k31+839	4,35588	74,09077
	Transversal 86	4	k36+036	4,36448	74,10487
	Puente Independencia	4	k38+725	4,37058	74,11467
	Isla Pontón San José	4	k43+550	4,36548	74,13037

Fuente: Consejo Canadiense del Ministerio del Medio Ambiente, CCME-WQI

Figura 5-26. Ubicación de los puntos de muestreo en el río Tunjuelo campaña 2007-2008



Fuente: Convenio 005/2006 SDA - EAAB-ESP.

Fuente: Convenio 005/2006 SDA-EAAB-ESP.

El caudal del río Tunjuelo se ve afectado por factores climáticos y por la operación del embalse La Regadera, tal como se observa en la Tabla 5-15.

Tabla 5-15. Variación del caudal en los puntos de muestreo del río Tunjuelo 2007-2008

Punto de Monitoreo	No. de Tramo	Valores de Caudal (l/s) en el río Tunjuelo			
		Valor mínimo	Valor máximo	Valor Promedio	Valor mediano
La Regadera	1	2	300	26,5	11,5
100 mt aguas abajo despues de la Quebrada Yomasa	2	135	44.702	3.481	456,7
Doña Juana	2	207	15.751	2450,1	585,7
Barrio México	3	317	15.024	1902,8	777,9
San Benito	3	634,1	42.000	6162,3	1.477,60
Makro, Autopista Sur	4	676	19.436	4.696	1.665,50
Transversal 86	4	1339	23.686	5518,3	3.130,40
Puente Independencia	4	2352	20.753	5.160	3.173,80
Isla Pontón San José	4	2252	20.748	6.686	4.802,50

Fuente: Convenio 005/2006 SDA-EAAB-ESP.

Sobre calidad del agua, el informe establece lo siguiente:

“En el tramo 2 del río Tunjuelo se encuentran los puntos aguas abajo de la quebrada Yomasa y Doña Juana. En el primero se registró una concentración promedio de 43 mg/l y un valor máximo de 123 mg/l el cual se reportó el 9 de octubre de 2006 en condiciones nubladas en la jornada de la mañana. En Doña Juana, después de la descarga de la planta de tratamiento de lixiviados, se incrementa la DBO₅ a valores promedio de 100 mg/l debido al aporte de aguas residuales y de origen industrial provenientes de algunos predios donde se desarrollan actividades extractivas y de recuperación de materiales. La mayor concentración (278 mg/l) se reportó en la jornada de la tarde en condiciones secas. Para este tramo los valores promedio no superan el límite establecido por la Resolución 1813 de 2006 del DAMA”. Más adelante, con relación al parámetro NTK se dice “Es de especial interés el fuerte cambio en la concentración de NKT en el río luego de la recepción de los vertimientos de la planta de tratamiento de lixiviados en el punto Doña Juana”. Estos y otros datos para los demás tramos del río se muestran en las Tablas 5-16 y 5-17.

Tabla 5-16. Comportamiento de la DBO₅ en los diferentes puntos de monitoreo del río Tunjuelo 2007-2008

Punto de Monitoreo	No. de Tramo	Res 1813/06 del DAMA (mg/l)	Concentración de DBO ₅ en el río Tunjuelo (mg/l)			
			Valor mínimo	Valor máximo	Valor Promedio	Valor mediano
La Regadera	1	<100	2	4	2	2
100 mt aguas abajo después de la Quebrada Yomasa	2	<110	2	123	43	43
Doña Juana	2	<110	4	278	100	106
Barrio México	3	<110	6	89	45	49
San Benito	3	<110	13	180	88	95
Makro, Autopista Sur	4	<150	13	201	66	57
Transversal 86	4	<150	20	534	213	215
Puente Independencia	4	<150	38	405	233	245
Isla Pontón San José	4	<150	54	711	195	164

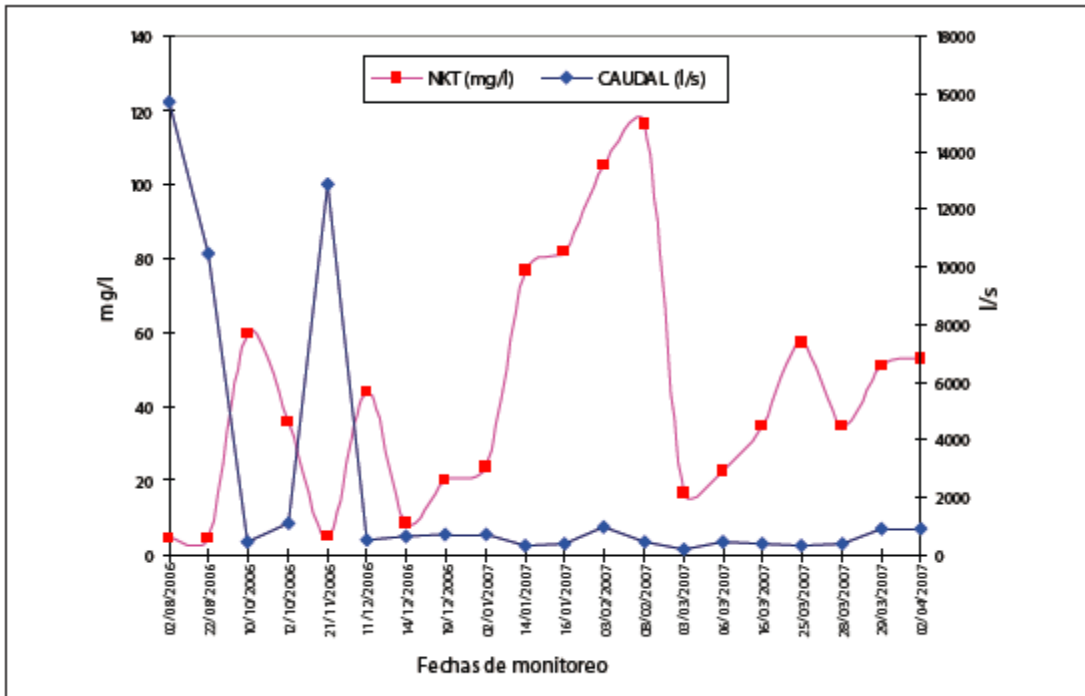
Fuente: Convenio 005/2006 SDA-EAAB-ESP.

Tabla 5-17. Concentración de NTK y Amonio en los puntos de muestreo del río Tunjuelo 2007-2008

Punto de Monitoreo	NTK (mg/l)				Amonio (mg/l)			
	Valor mínimo	Valor máximo	Valor Promedio	Valor mediano	Valor mínimo	Valor máximo	Valor Promedio	Valor mediano
La Regadera	0,3	3	1,46	1,45	0,3	1,1	0,47	0,3
100 mt aguas abajo después de la Quebrada Yomasa	2,5	28,5	13,1	12,9	0,9	22,6	9	7,3
Doña Juana	4,4	116	42,81	35,45	2,3	84,5	29,59	23,8
Barrio México	5,9	62,9	25,19	24,75	4	45,3	19,65	21,5
San Benito	8,5	43,5	26,31	27	6,6	37,3	22	22,8
Makro, Autopista Sur	5,9	57	25,64	27,85	5,9	36,4	21,6	24,4
Transversal 86	11	95	47,78	50,1	8,7	56,2	35,29	36,2
Puente Independencia	15,6	109,6	51,38	49,85	10,3	68	40,31	41,2
Isla Pontón San José	20,9	79,1	48,12	54,6	17,3	63,5	40,76	43,8

Fuente: Convenio 005/2006 SDA-EAAB-ESP.

Figura 5-27. Relación de NTK vs Caudal en el punto Doña Juana 2007-2008



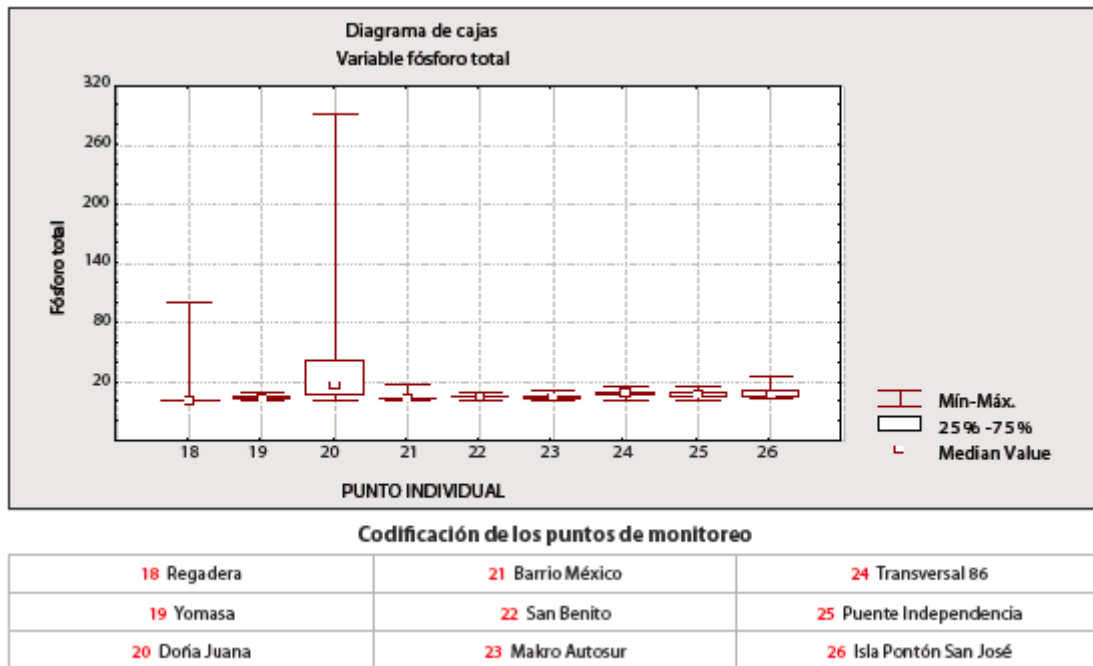
Fuente: Convenio 005/2006 SDA - EAAB-ESP.

Fuente: Convenio 005/2006 SDA-EAAB-ESP.

Con respecto al parámetro Fósforo total, el informe establece lo siguiente:

“Las concentraciones más elevadas en todo el cauce se presentaron luego de la descarga de la planta de tratamiento de lixiviados del relleno sanitario Doña Juana en el punto de monitoreo denominado Doña Juana, teniendo en cuenta que el contenido de fósforo en agua residual doméstica es en promedio de 15 mg/l y en agua lluvia se encuentra entre 0,02 a 4,3 mg/l. Los valores determinados indican que el río en el punto Doña Juana recibe descargas con características de aguas residuales industriales”. (Ver Figura 5-27)

Figura 5-28. Comportamiento del Fósforo Total en los puntos de muestreo del río Tunjuelo 2007-2008



Fuente: Convenio 005/2006 SDA - EAAB-ESP.

Fuente: Convenio 005/2006 SDA-EAAB-ESP.

Mas tarde, en el estudio de calidad del agua realizado en el año 2009, mediante convenio entre la Secretaría Distrital de Ambiente y la Universidad de los Andes, se encontró que en el punto de monitoreo del tramo 1, correspondiente a La Regadera, se recogieron 180 datos (2009-2010), de los cuales 12 (6,6%) excedieron los objetivos de calidad, lo que permitió que la calidad del agua para este primer tramo fuera buena, el parámetro que más veces excedió los objetivos de calidad del agua fueron los SST, seguido de Fosforo Total y Oxígeno Disuelto. El resto de parámetros cumplió plenamente con los objetivos de calidad.

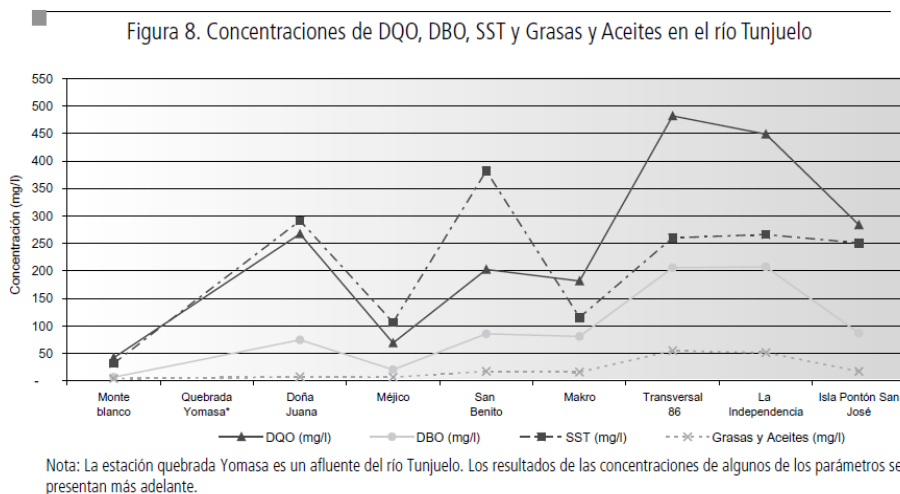
En el tramo 2 el río tiene dos puntos de monitoreo (Yomasa y Doña Juana). Sobre los caudales se generaron 416 datos de calidad de la fase líquida, de los cuales 108 no cumplieron los objetivos de calidad. En este tramo la calidad del río se clasificó como pobre. Se observa que todos los parámetros excedieron, al menos una vez, los objetivos de calidad. El pH, SST y Fosforo total fueron los parámetros que más veces estuvieron fuera, mientras que G y A, DBO y SAAM, los que menos. Debido a la actividad minera de la zona, el tramo 2 se caracterizó por presentar altas concentraciones de SST. Por otra parte, el pH en este tramo puede llegar a valores por encima de diez unidades, lo cual, en algunos momentos, le da características alcalinas al río. Este último fenómeno puede atribuirse a que los sólidos vertidos al río como consecuencia de la actividad minera pueden presentar altas concentraciones de material alcalino.

Para el tramo 3, con cuatro puntos de monitoreo (Doña Juana, Barrio México, San Benito y Makro AutoSur), se tomaron un total de 831 datos, de los cuales 254 (30%) no cumplieron los objetivos de calidad. Todos los parámetros excedieron en alguna medida los límites establecidos. El oxígeno disuelto y el Ntotal fueron los que tuvieron la mayor cantidad de datos por encima de los objetivos, con 33 y 32 datos respectivamente; mientras que G y A y DBO, con 14 y 17, respectivamente, fueron los parámetros con menor cantidad de datos fuera de los objetivos de calidad.

Al comparar los tramos 2 y 3, se observa una muy leve mejoría en el WQI, al pasar de 32,76 (tramo 2) a 33,9 (tramo 3). Esto se debe a que varios parámetros como DBO, DQO, Ntotal, Ptotal y SST mejoran cuando el río pasa por las zonas inundadas entre las estaciones Doña Juana y Barrio México. Sin embargo, nuevamente en la estación San Benito el río pierde la poca calidad que había recuperado y se deteriora aún más en la estación de Makro AutoSur, debido a las descargas doméstica se industriales que recibe. Finalmente, en el tramo 4 (Makro AutoSur, Transversal 86, Puente Independencia e Isla Pontón San José se utilizaron 822 datos para el cálculo del wqi, de los cuales 266 no alcanzaron los objetivos de calidad. La calidad del agua para este tramo se clasificó como pobre. Toda la trazabilidad de clasificación se resume en la Figura 3-11.

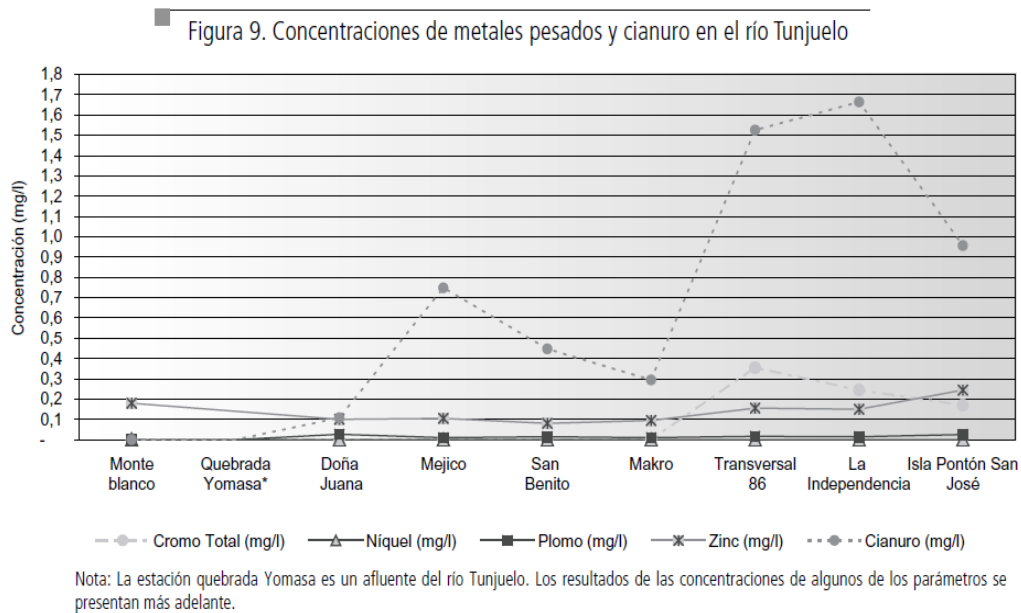
De acuerdo con la Figura 5-29, se observan incrementos en las concentraciones de todos los parámetros, las cuales pueden ser originadas desde la quebrada Yomasa; por la actividad extractiva e industrial de la zona, por el vertimiento de lixiviados se puede apreciar un incremento en cierto parámetros, así como por reciclaje de escombros y por la descarga sobre el Río Tunjuelo en inmediaciones del Cementerio del Apogeo.

Figura 5-29. Concentraciones de DQO, DBO, SST y Grasas y Aceites.



En cuanto a los resultados de metales pesados y cianuro (Ver Figura 5-30), se observa que las concentraciones de Níquel a lo largo del río, se encuentran por debajo de los límites de detección. Las concentraciones de cromo se incrementan en la estación Makro y se maximizan en la estación Transversal 86, siendo esta la mayor concentración para este parámetro, resultado de la descarga al río Tunjuelo localizado en inmediaciones del Cementerio del Apogeo.

Figura 5-30. Concentraciones de metales pesados y cianuro en el río Tunjuelo.



El estudio de monitoreo más reciente (Calidad del Recurso Hídrico de Bogotá 2011-2012) realizado también mediante convenio de la SDA y la Universidad de los Andes hace una evaluación de la situación actual con respecto a los estudios anteriores (Fase 1, Fase 2 y Fase 3), poniendo de presente los logros y retos de la gestión realizada. En la tabla 5-18 se presenta el resumen de los Objetivos de la Calidad de agua (OC) del Río Tunjuelo.

Tabla 5-18. Concentración de NTK y Amonio en los puntos de muestreo del río Tunjuelo Fase 1, Fase 2 y Fase 3.

Tunjuelo: tramo 1										
	pH	OD	DBO5	DQO	SST	SAAM	GyA	Ptotal	Ntotal	C. Fecales
Concentración (mg/l)	6-9	7	5	35	10	0,5	20	0,2	3	1,0E+03 UFC
Históricos	85%	68%	100%	94%	95%	100%	100%	90%	100%	100%
Fase 1	100%	59%	100%	100%	57%	100%	100%	67%	100%	100%
Fase 2	100%	56%	100%	100%	14%	100%	100%	88%	100%	88%
Fase 3	100%	57%	100%	100%	15%	100%	100%	62%	100%	85%
Tunjuelo: tramo 2										
	pH	OD	DBO5	DQO	SST	SAAM	GyA	Ptotal	Ntotal	C. Fecales
OC(mg/l)	6-9	7	5	35	10	0,5	20	0,2	3	1,0E+03 UFC
Históricos	86%	78%	73%	62%	26%	100%	93%	40%	53%	78%
Fase 1	87%	83%	87%	62%	43%	80%	97%	47%	63%	73%
Fase 2	93%	100%	100%	94%	29%	100%	100%	63%	88%	88%
Fase 3	79%	100%	96%	75%	42%	100%	100%	65%	83%	100%
P. Crítico			TU-DJuana	TU-DJuana	TU-DJuana			TU-DJuana	TU-DJuana	TU-DJuana
Tunjuelo: tramo 3										
	pH	OD	DBO5	DQO	SST	SAAM	GyA	Ptotal	Ntotal	C. Fecales
OC(mg/l)	6-9	1	100	200	150	3	20	5	20	1,0E+06
Históricos	84%	21%	73%	53%	51%	90%	98%	69%	34%	61%
Fase 1	94%	56%	70%	47%	57%	57%	77%	62%	45%	48%
Fase 2	100%	48%	100%	94%	66%	78%	94%	84%	88%	78%
Fase 3	78%	30%	97%	73%	42%	84%	89%	89%	72%	77%
P. Crítico		Tu-Sbenito	Tu-Sbenito	TU-DJuana	TU-DJuana	Tu-Makro	Tu-Sbenito	TU-DJuana	TU-DJuana	Tu-Sbenito
Tunjuelo: tramo 4										
	pH	OD	DBO5	DQO	SST	SAAM	GyA	Ptotal	Ntotal	C. Fecales
OC(mg/l)	6-9	0,5	250	500	300	3	50	8	50	1,0E+06
Históricos	76%	3%	76%	65%	68%	74%	79%	66%	63%	20%
Fase 1	100%	55%	65%	48%	91%	13%	53%	80%	45%	20%
Fase 2	100%	13%	94%	63%	87%	19%	53%	100%	66%	31%
Fase 3	98%	27%	92%	80%	79%	45%	60%	98%	80%	25%
P. Crítico		Tu-Ptelnde	Tu-Ptelnde	Tu-Ptelnde	Tu-Ptelnde	Tu-IslaPon	Tu.Tv86	Tu.Tv86	Tu-IslaPon	Tu.Tv86

Fuente: Calidad del Recurso Hídrico de Bogotá 2011-2012

En el río tunjuelo, el primer incremento en las concentraciones se produce en el punto de Yomasa debido al vertimiento de la quebrada del mismo nombre en la cual se realizan descargas de aguas residuales domesticas.

En el tramo 1 se refleja muy buena calidad de agua en la mayoría de parámetros. Los puntos más críticos del río Tunjuelo se encuentran a partir del tramo 2. El primero es Doña Juana, donde se observa el impacto del lixiviado y las descargas provenientes de la explotación minera de la zona. Lo anterior genera un aumento considerable en las concentraciones de metales, nutrientes y sólidos que alejan en gran proporción la posibilidad de cumplir con los objetivos de calidad. Por lo tanto, se debe dar prioridad a las acciones correctivas para intervenir estas descargas y así lograr una mejora en la calidad del río. Adicionalmente, al observar el mapa de la calidad del río Tunjuelo (Anexo C) se puede apreciar que la calidad del agua comienza a disminuir desde el punto de Yomasa y continúa decreciendo progresivamente hasta su desembocadura en el río Bogotá.

5.5. Análisis y discusión de alternativas

Antes de proceder a efectuar un análisis de las alternativas posibles para el manejo del lixiviado del relleno sanitario Doña Juana conviene establecer la magnitud del vertimiento en términos de carga y población equivalente. Esto facilitará el análisis teniendo en cuenta que la PTAR Canoas se está diseñando para una determinada población a servir.

5.5.1. Cargas y población equivalente del lixiviado del RSDJ

- Cargas y Población equivalente del residuo crudo

Con el fin de unificar el valor del aporte per cápita de aguas residuales domésticas con el aporte equivalente del lixiviado del relleno sanitario Doña Juana se procede a establecer el aporte unitario del colector Tunjuelo Canoas que sirvió de base para el diseño de la PTAR. La información correspondiente es:

- Caudal medio de aguas residuales. 14 m³/d
- Carga promedio esperada en la PTAR Canoas: 416 Ton/d de DBO₅
- Carga promedio esperada de SST en la PTAR Canoas: 412 Ton/d de SST
- Población servida: 7'322.000 habitantes

Lo anterior significa que la concentración media de DBO₅ que se espera a la entrada de la PTAR Canoas sería de 344 mg/l y el aporte per cápita correspondiente de 56,8 g DBO/hab.d. De la misma manera, para los sólidos suspendidos totales se tendría una concentración de 341 mg/l y un aporte per cápita de 56,3 g SST/hab.d. Cabe anotar que en los diseños del interceptor Tunjuelo los valores per cápita adoptados en el Plan de Saneamiento del Río Bogotá fueron de 50 g/hab.d de DBO y 52 g/hab.d de SST, respectivamente. Sin embargo, se debe tener en cuenta que el aporte del interceptor Canoas es mayor por los vertimientos industriales que recoge en zona del Fucha.

Por otra parte, de acuerdo con la proyección de generación de lixiviados realizada en el capítulo 5 se estima un caudal promedio de lixiviados de 34 l/s (2937,6 m³/d). Esto, teniendo en cuenta la capacidad de almacenamiento y regulación que proporcionan los 38.000 m³ de volumen de pondajes que tiene el RSDJ en sus diferentes zonas de operación. Con base en la consideración anterior y en los registros históricos de funcionamiento del relleno se puede asumir, para efectos

del presente ejercicio, una concentración media de lixiviado (crudo) de 6806 mg/l de DBO₅ (promedio del período Junio- Noviembre de 2011 a la entrada a la PTL).

Con esta información, la carga proyectada para el vertimiento del lixiviado del relleno sanitario Doña Juana, sería: de 19993 kg/d de DBO₅, lo que representa una población equivalente de 351.871 habitantes (Lixiviado Crudo). Resulta interesante observar que si en lugar de considerar el valor de entrada a la PTL se considera el residuo crudo que llega al sistema SBR (más concentrado) la población equivalente sería de 639.427 habitantes (12368 mg/l de DBO₅).

De acuerdo con lo anterior, la sobrecarga que llegaría a la PTAR Canoas sería de 20 Ton/d de DBO₅, lo que equivale a elevar en un 4,8% la carga de diseño (< 5%).

Así mismo, desde el punto de vista hidráulico el incremento en el caudal de diseño de la planta sería solo de 0,24%, lo cual es técnicamente irrelevante para la operación del sistema. La Tabla 5-19 presenta el resumen de lo indicado anteriormente.

Tabla 5-19. Valores de carga y población equivalente del lixiviado crudo

REFERENCIA	VALOR	UNIDAD	OBSERVACIONES
Caudal Plan Director	55,45	l/s	
Caudal CGR	22,5	l/s	
Caudal Promedio Plan Director	34	l/s	Adoptado
	2937,6	m3/d	
DBO prevista lixiviado crudo	12368	g/m3	Entrada SBR
	6806	g/m3	Entrada PTL
Carga Orgánica	36332	kg/d de DBO	Entrada SBR
	19993	kg/d de DBO	Entrada PTL
Aporte Percápita-APC	56,8	g/hab.d de DBO	
Población equivalente-PE	639427	habitantes	Entrada SBR
	351.871	habitantes	Entrada PTL
SST previstos lixiviado crudo	16906	g/m3	Entrada SBR
	12304	g/m3	Entrada PTL
Carga SST	49663	kg/d de SST	Entrada SBR
	36144	kg/d de SST	Entrada PTL
Residuo Crudo:			
Relación Caudal Lixiviados/Ptar	0.24	%	En PTAR Canoas
Sobrecarga en PTAR DBO	4.81	%	Residuo crudo
Sobrecarga en PTAR SST	12.1	%	Residuo crudo

Fuente: registros de operación STL (UAESP)

- Cargas y población equivalente del efluente de la PTL (residuo tratado)

En la tabla 5-20 se consigna la concentración promedio mensual de los parámetros más representativos en el efluente de la PTL para el período enero-diciembre de 2011, que bien puede considerarse como representativa de la calidad del vertimiento tratado.

Con esta información y la proyección de caudal a 34 l/s en promedio se procede al cálculo de la población equivalente y las cargas contaminantes que serán descargadas al río Tunjuelo en caso de mantenerse la tendencia actual.

Tabla 5-20. Valores promedio de parámetros de interés en el efluente de la PTL relleno sanitario Doña Juana (enero-diciembre de 2011)

Parámetro	Promedio total
Aluminio, mg Al/L	0,44
Arsénico mg As/L	0,02
Berilio, mg Be/L	<0,01
Boro, mg/L	1,86
Cadmio, mg Cd/L	0,02
Cobalto, mg Co/L	<0,05
Cobre, mg Cu/L	0,06
Cromo, mg Cr/L	0,49
DBO ₅ , mg O ₂ /L	2185
Fenoles, mg/L	0,95
Grasas y Aceites mg/L	32,53
Hierro, mg Fe/L	14,09
Litio, mg Li/L	0,07
Manganeso, mg Mn/L	0,17
Mercurio, mg Hg/L	0,01
Molibdeno, mg Mo/L	<0,06
Níquel, mg Ni/L	0,52
pH Unidades	9,10
Plomo, mg Pb/L	0,20
Selenio, mg Se/L	0,01
Vanadio, mg V/L	<0,2

Zinc, mg Zn/L	0,56
Nitrogeno Total, mg N/L	58
Nitrogeno Amoniacal NH ₃ - N/L	692
DQO Cerrado mg O ₂ /L	5183
Temperatura °C	28,84
Solidos Suspendidos Volatiles mg/L	1386
SST mg/L	4875

Fuente UAESP (2013)

Como complemento a la información anterior, en la Tabla 5-21 y en la Figura 5-31 se muestra la relación entre el caudal generado y el caudal tratado en el relleno sanitario durante el año 2011.

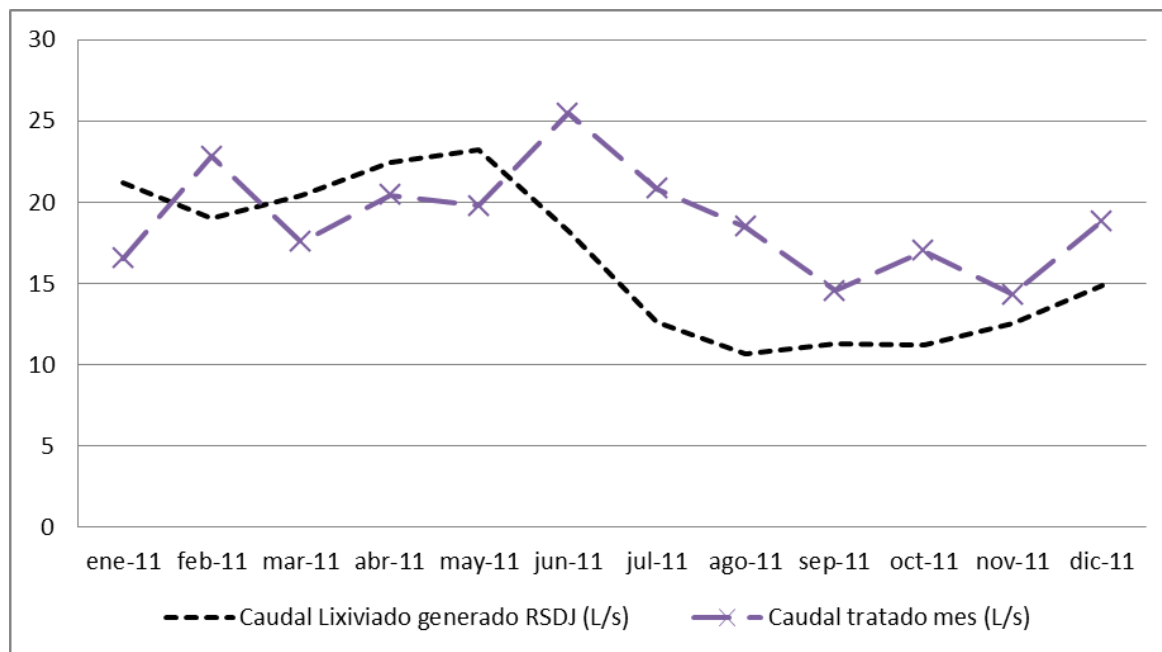
Tabla 5-21. Relación Caudal de lixiviado generado vs caudal tratado

Meses	Caudal Lixiviado generado RSDJ (L/s)	Caudal Tratado en PTL (L/s)	DBO ₅ promedio
ene-11	21,22	16,56	1371
feb-11	19,05	22,80	2662
mar-11	20,39	17,55	1613
abr-11	22,42	20,44	2823
may-11	23,21	19,79	3271
jun-11	18,24	25,45	896
jul-11	12,65	20,82	365
ago-11	10,69	18,49	1169
sep-11	11,29	14,55	3237
oct-11	11,26	17,02	2111
nov-11	12,51	14,30	1978
dic-11	14,88	18,84	3398
PROMEDIO 2011	16,48	18,88	2.074

Fuente: UAESP (2012)

Con base en la concentración del vertimiento tratado se calcula la carga y la población equivalente del desecho. En la Tabla 5-22 se presentan los resultados correspondientes. Como se puede observar, el caudal proyectado (34 l/s) será siempre el mismo, independientemente de que exista o no pretratamiento del lixiviado.

Figura 5-31. Relación del Lixiviado generado vs el tratado.



Fuente: UAESP (2012)

Tabla 5-22. Valores de carga y concentración en efluente PTL (vertimiento tratado).

REFERENCIA	VALOR	UNIDAD	OBSERVACIONES
Caudal Plan Director	55,45	l/s	
Caudal CGR	22,5	l/s	
Caudal Promedio Plan Director	34	l/s	Adoptado
	2937,6	m ³ /d	
DBO prevista lixiviado crudo	2101	g/m ³	Efluente PTL
Carga Orgánica	6173	kg/d DBO	Efluente PTL
Aporte Percápita-APC	56,8	g/hab.d de DBO	
Población equivalente-PE	108.647	habitantes	Efluente PTL
SST previstos lixiviado crudo	5383	g/m ³	Efluente PTL
Carga SST	15814	kg/d de SST	Efluente PTL
Efecto en PTAR Canoas Residuo Crudo:			
Relación Caudal Lixiviados/Ptar	0.24	%	En Canoas
Sobrecarga en PTAR DBO	1.48	%	Efluente PTL
Sobrecarga en PTAR SST	3.8	%	Efluente PTL

De acuerdo con la Tabla anterior, la carga proyectada para el efluente del lixiviado tratado en el STL del relleno sanitario Doña Juana, sería: de 6173 kg/d de DBO₅, lo que representa una población equivalente de 108647 habitantes.

En esas condiciones, la sobrecarga que llegaría a la PTAR Canoas a través del interceptor Tunjuelo-Canoas sería de 6,2 Ton/d de DBO₅, lo que equivale a elevar en un 1,48% la carga de diseño (< 2%) en la PTAR Canoas.

La sobrecarga en términos de SST sería en este caso de 3,8% aproximadamente. Así mismo, desde el punto de vista hidráulico el incremento en el caudal de diseño de la planta se mantendría en 0,24%.

5.5.2. Escenario 1: Situación actual (vertimiento al río Tunjuelo)

En la actualidad el efluente del sistema de tratamiento de lixiviados del relleno sanitario Doña Juana-PTL está siendo tratado y descargado al río Tunjuelo. Como se indicó en el capítulo anterior, los diferentes estudios realizados desde el año 2006 por la SDA, indican que la descarga del efluente de la Planta de Tratamiento -PTL de Lixiviados del Relleno Sanitario Doña Juana –RSDJ-, puede contribuir al deterioro de la calidad del agua del río Tunjuelo.

El análisis del método de población equivalente estimada para el lixiviado con y sin tratamiento previo es, de todas maneras, muy significativa, comparable con la población asentada en algunos de los sectores aledaños.

Con el objetivo de analizar el efecto de la descarga del vertimiento de la PTL (Lixiviado tratado) del RSDJ al río Tunjuelo, en el presente trabajo se realiza una modelación de la calidad de agua empleado como línea base los datos de los promedios de junio – Noviembre de 2011 de concentración de diferentes parámetros en puntos de muestro en el Rio 50 m antes y 50 m después de la descarga del efluente tratado. Lo anterior se ilustra en la Tabla 5-23, cuyos datos relacionados corresponden a muestreos compuestos tomados mensualmente durante seis meses, en los tramos del cuerpo hídrico mencionado.

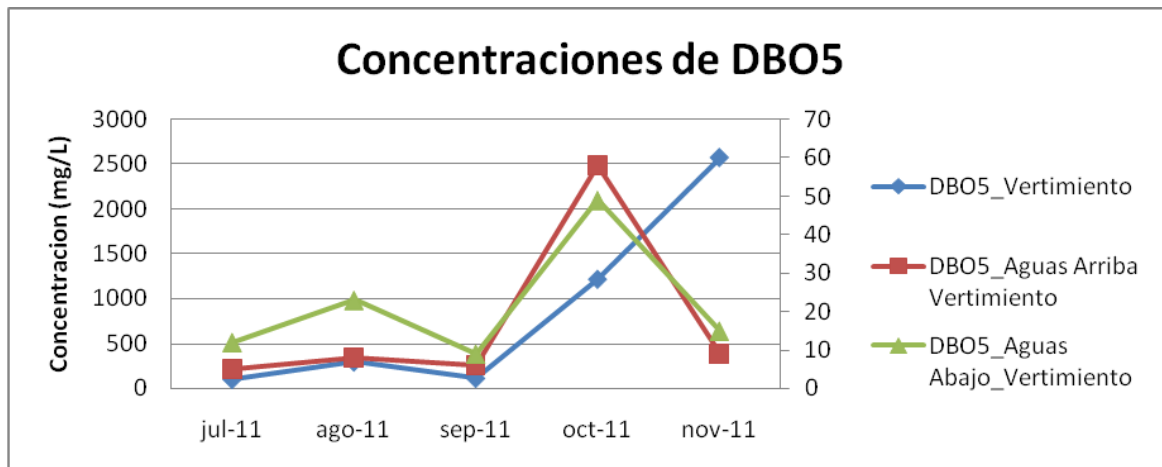
Tabla 5-23. Valores de referencia 50 m antes y 50 m después de la descarga del efluente de la PTL en el río Tunjuelo (junio-noviembre de 2011).

Parámetro	Vertimiento PTL	Promedio 50 m aguas arriba RT	Promedio 50m aguas abajo RT
Arsénico	0.023	<0.006	<0.006
Berilio	<0.01	<0.01	<0.01
Bifenilos Policlorados	<0.0001	<0.0001	<0.001
Cadmio	0.023	(0;0.01)	<0.003
Cobalto	<0.05	<0.05	<0.05

Cobre	0.052	<0.05	<0.05
Cromo	0.39	<0.06	<0.06
DBO5	740	15	18
DQO	5166.5	64	605
Fenoles	<1.42	<0.07	<0.07
Grasas y Aceites	191	19	(0;14)
Hierro total	10.90	0.9	0.97
In situ OD	0.07-2.65	5.2	5.2
In situ pH	8.11-8.91	7.81	8.19
Mercurio	0.0082	<0.002	<0.02
Nitratos	3.84	(0;0.75)	(0;0.67)
Plomo	0.23	<0.02	<0.02
Selenio	0.0065	<0.005	<0.005
SSV	1213	219	224
SST	9244	1264	2200
Vanadio	<0.2	<0.02	<0.02
Zinc	0.478	0.1	0.08

Fuente: UAESP 2011

Figura 5-32. Concentración de DBO₅



Para corroborar el efecto anteriormente analizado e ilustrado en la Figura 5-32, se desarrolló un ejercicio de simulación aplicando para el efecto el modelo QUAL2E (versión libre-EPA), el cual es un modelo de calidad de agua desarrollado por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos-EPA, La ventaja que ofrece este modelo es principalmente involucrar variables de dispersión para el análisis del cuerpo hídrico, adicionalmente trabaja con algoritmo basado en el modelo de Streeter and Phelps.

El modelo QUAL2E maneja una corre bajo un sistema operativo DOS, y permite modelar parámetros como Demanda Bioquímica de Oxígeno -DBO, Coliformes Fecales, Sólidos Suspendidos Totales – SST, Temperatura, y Oxígeno Disuelto – OD.

Dado lo anterior se escoge este modelo aplicándolo a el área de estudio delimitado por un tramo comprendido entre 200 m antes y 200 m después de la descarga del vertimiento del lixiviado de plan de tratamiento de lixiviados del RSDJ. Para el efecto se tuvieron en cuenta las siguientes condiciones

Datos de entrada para la implementación del modelo QUAL2E, del headwater o cabecera y del punto de vertimiento.

Cabecera la cual corresponde al punto 200 m aguas arriba del vertimiento:

Caudal - Flow: para determinar el caudal en la cabecera del tramo a analizar se tomó el caudal calculado por la interventoría HMV-CONCOL en el documento. El cual fue calculado por balance de masa. (Ver Tabla 5-24 y Figura 5-33)

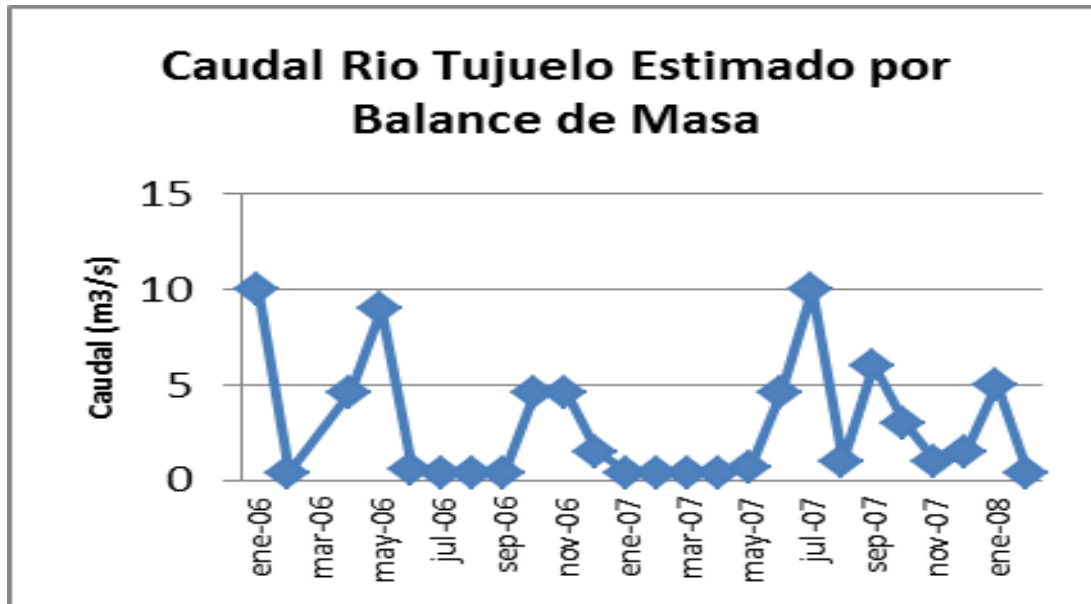
Tabla 5-24. Caudales aproximados del Rio

FECHA	CAUDAL	
	l/s	m ³ /s
ene-06	10000	10
feb-06	400	0,4
abr-06	4600	4,6
may-06	9000	9
jun-06	600	0,6
jul-06	400	0,4
ago-06	400	0,4
sep-06	400	0,4
oct-06	4600	4,6
nov-06	4600	4,6
dic-06	1500	1,5
ene-07	400	0,4
Feb-07	400	0,4

FECHA	CAUDAL	
	l/s	m ³ /s
mar-07	400	0,4
abr-07	400	0,4
may-07	700	0,7
jun-07	4600	4,6
jul-07	10000	10
ago-07	1000	1
sep-07	6000	6
oct-07	3000	3
nov-07	1000	1
dic-07	1500	1,5
ene-08	5000	5
feb-08	400	0,4
PROMEDIO	2852	2,852

Fuente: UAESP-HMVCONCOL, Análisis De La Calidad Del Rio Tunjuelo, Vertimiento del RSDJ y Propuesta de Modificación de La Resolución 3358/90 pag. 21.

Figura 5-33. Caudal Río Tunjuelo por Balance de Masa



Fuente: Interventoría RSDJ, 2008.

Para determinar el valor de los parámetros como Temperatura, Oxígeno Disuelto, Demanda Biológica de Oxígeno –DBO₅, Sólidos Suspendidos Totales –SST, Coliformes Fecales se tomaron los valores promedio de los análisis fisicoquímicos y microbiológicos (año 2012) del punto aguas arriba de vertimiento localizado a 200 metros antes de la descarga, en la table 5-25 se relacionan los características del punto de muestreo aguas arriba.

Tabla 5-25. Datos de Cabecera

Datos de Cabecera							
Nombre de Cabecera	Flow (m³/s)	Temperatura (°C)	DO (mg/l)	BOD (mg/l)	SST (mg/l)	Coliformes Fecales (NMP/100ml)	Fuente
Río Tunjuelo	2,82	14,73	6,17	17,08	1887,5	5,55E+04	Autor

Punto de descarga:

Los datos de la descarga o vertimiento de la planta de tratamiento de lixiviados del RSDJ, se reportan en el anexo 3. Para determinar los datos y características del vertimiento se promediaron los resultados de los análisis fisicoquímicos de los años 2010, 2011 y 2012, en la tabla 5-26 se relacionan las características del punto de descarga.

Tabla 5-26. Punto de Descarga

Punto de Descarga							
Punto de Descarga	Flow (m ³ /s)	Temperatura (°C)	DO (mg/l)	BOD (mg/l)	SST (mg/l)	Coliformes Fecales (NMP/100ml)	Fuente
Descarga	0,013	27,6	2	1000 ³	1048	2,55E+04	autor

Nota: ¹ La concentración promedio equivale a 1637 mg/l de DBO₅ pero el programa solo acepta hasta 1000 mg/l en la descarga.

En la tabla 5-27 se relacionan los datos de las características hidráulicas de los tramos a analizar, en la tabla 5.28 se encuentran las constantes de reacción en relación a DBO₅, OD

Tabla 5-27. Datos hidráulicos

Datos Hidráulicos										
Tramos	Constante de dispersión	Fuente	Pendiente de pared para ambos lados	Fuente	Ancho del canal (m)	Fuente	Pendiente del canal	Fuente	Coefficiente de Manning (n)	Fuente
1	300	Modelo de dispersión para el Rio Chicamocha departamento de Boyacá	0,3	Autor	8	Autor	0,02	Autor	0,5	Manual Qual2E Tabla II-1.pág 18
2	300		0,3		8		0,02		0,5	
3	300		0,304		7		0,025		0,5	
4	300		0,304		7		0,025		0,5	

Tabla 5-28. Constantes de Reacción de DBO₅, OD

BOD and DO Reaction Rate Constants						
Reach	BOD Decay (1/day)	Fuente	BOD Settling (1/day)	Fuente	SOD Rate (gO ₂ /m ² -day)	Fuente
1	0,4	Manual Qual2E Tabla III-3.pág 55	0,25	Manual Qual2E Tabla III-3.pág 55	1,6	Manual Qual2E Tabla III-3.pág 55
2	0,4		0,25		1,6	
3	1,1		0,25		1,6	
4	1,1		0,25		1,6	

Los coeficientes para nitrógeno (N), Fosforo (P) y algas se relacionan en la tabla 5-29.

³ La concentración promedio equivale a 1637 mg/l de DBO₅ pero el programa solo acepta hasta 1000 mg/l en la descarga.

Tabla 5-29. Coeficientes N, P y Algas

N, P and Algae Coeficients						
Reach	Coliform Decay (1/day)	Fuente	Decaimiento de sustancia no conservativa(SS) (1/day)	Fuente	Sedimentación de sustancia no conservativa (SS) (1/day)	Fuente
1	1,1	Chapra (1989), pag 509	0,5	Asumida	0,2	Chapra (1989). Pagina: 301; Tabla 17.3
2	1,1		0,5		0,2	
3	1,1		10		0,2	
4	1,1		10		0,2	

Los resultados arrojados por el modelo con la información anterior se presentan en la Tabla 5-30.

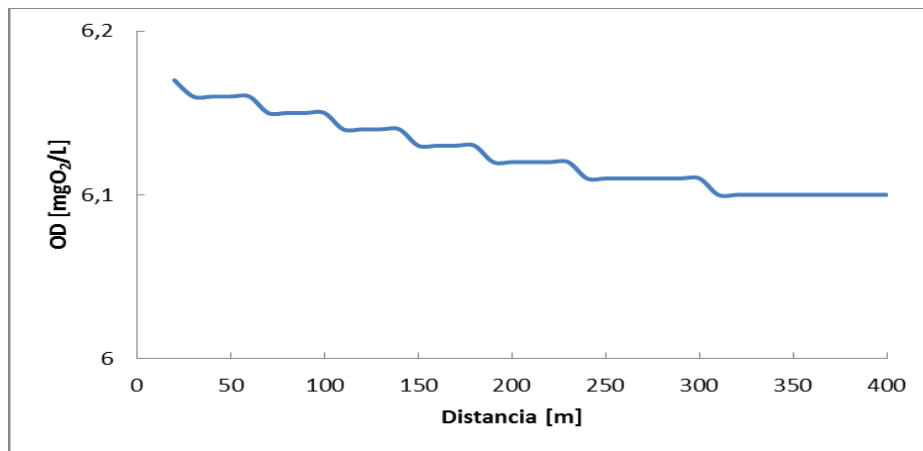
Tanto en los registros del vertimiento 50 m antes y 50 m después como en los resultados de la modelación 200 m antes y 200 m después se observan valores de DBO₅ y SST del mismo orden de magnitud, lo cual demostraría su representatividad. No obstante, hay que tener en cuenta que la concentración del lixiviado varía continuamente así como también el caudal del vertimiento y el caudal del cuerpo receptor, por esa razón solo debe considerarse como una foto instantánea (en tiempo y lugar). Habrá, sin duda, situaciones en las cuales la carga contaminante impactará en mayor grado la calidad del río Tunjuelo. Por esa razón es conveniente evitar la descarga directa a ese cuerpo receptor. La Figura 5-34 muestra una imagen de la zona de descarga actual y la Tabla 5-30 los datos utilizados para la simulación de OD y DBO₅.

Tabla 5-30. Resultados de la simulación

Distancia (m)	Tramo	Temperatura (°C)	OD (mgO ₂ /L)	DBO ₅ (mgO ₂ /L)	Coliformes Fecales NMP/100ml	SST (mg/L)
00	1	14,73	6,17	17,14	55458,21	1886,73
20	1	14,73	6,17	17,19	55458,45	1885,9
30	1	14,74	6,16	17,25	55458,73	1885,06
40	1	14,74	6,16	17,31	55459,06	1884,2
50	1	14,74	6,16	17,37	55459,42	1883,34
60	1	14,74	6,16	17,43	55459,83	1882,47
70	1	14,74	6,15	17,5	55460,28	1881,58
80	1	14,75	6,15	17,56	55460,77	1880,68
90	1	14,75	6,15	17,62	55461,31	1879,78
100	1	14,75	6,15	17,69	55461,89	1878,85
110	2	14,75	6,14	17,76	55462,52	1877,92
120	2	14,75	6,14	17,83	55463,2	1876,98
130	2	14,75	6,14	17,9	55463,92	1876,02
140	2	14,76	6,14	17,97	55464,69	1875,05
150	2	14,76	6,13	18,04	55465,51	1874,06

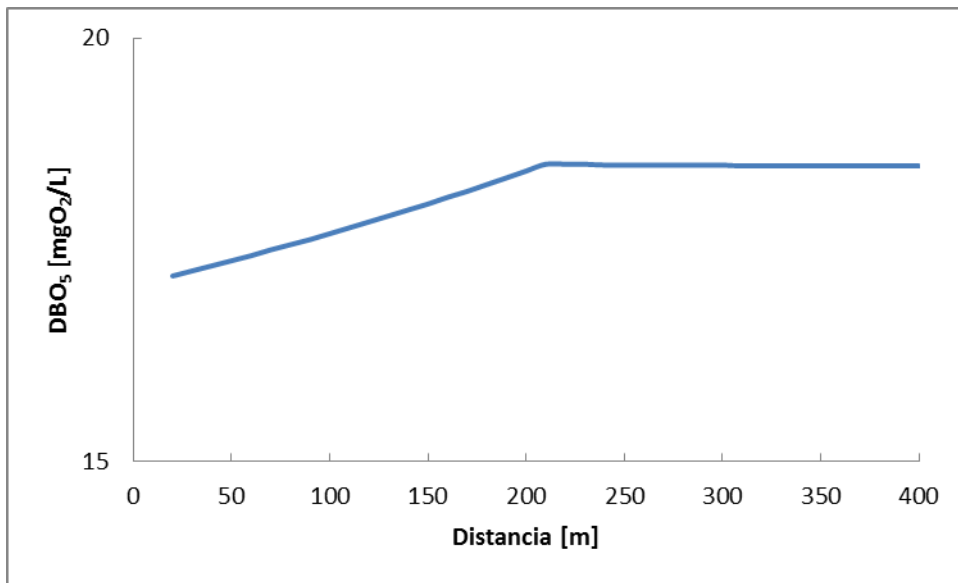
160	2	14,76	6,13	18,12	55466,38	1873,07
170	2	14,76	6,13	18,19	55467,3	1872,06
180	2	14,76	6,13	18,27	55468,28	1871,03
190	2	14,76	6,12	18,35	55469,3	1869,99
200	2	14,77	6,12	18,43	55470,38	1868,94
210	3	14,77	6,12	18,51	55471,52	1867,87
220	3	14,77	6,12	18,51	55471,02	1866,96
230	3	14,77	6,12	18,51	55470,55	1866,08
240	3	14,77	6,11	18,5	55470,1	1865,25
250	3	14,77	6,11	18,5	55469,67	1864,47
260	3	14,77	6,11	18,5	55469,27	1863,73
270	3	14,77	6,11	18,5	55468,9	1863,04
280	3	14,77	6,11	18,5	55468,54	1862,39
290	3	14,77	6,11	18,5	55468,22	1861,79
300	3	14,77	6,11	18,5	55467,92	1861,23
310	4	14,77	6,1	18,49	55467,64	1860,73
320	4	14,77	6,1	18,49	55467,4	1860,27
330	4	14,77	6,1	18,49	55467,17	1859,87
340	4	14,77	6,1	18,49	55466,98	1859,51
350	4	14,77	6,1	18,49	55466,82	1859,21
360	4	14,77	6,1	18,49	55466,68	1858,96
370	4	14,77	6,1	18,49	55466,57	1858,76
380	4	14,77	6,1	18,49	55466,5	1858,62
390	4	14,77	6,1	18,49	55466,45	1858,54
400	4	14,77	6,1	18,49	55466,43	1858,51

Figura 5-34. Resultados concentraciones de Oxígeno Disuelto - OD (mg/l)



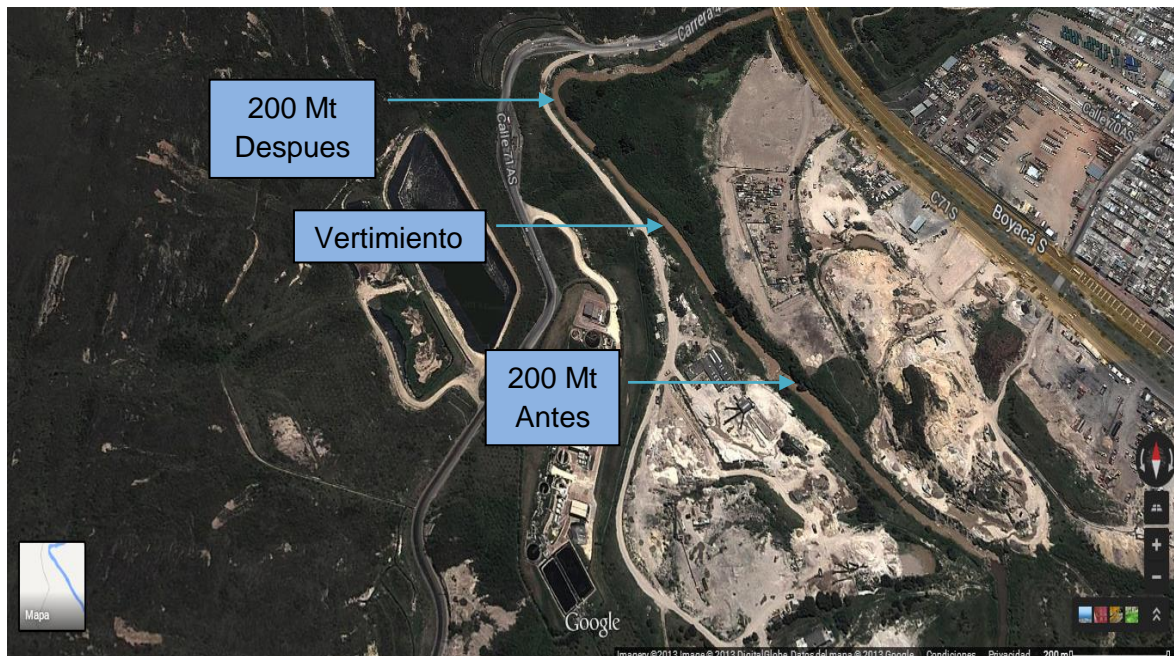
Según la aplicación del modelo se evidencia un decaimiento del oxigenon disuelto en el cuerpo hidrico, lo anterior puede presentarse por la degradacion de la materia organica aportada por el vertimiento del sisitema de tratamiento de lixivados, en la figura 5-35 se ilustra el resultado de la aplicaicon del modelo para el parametro DBO5. Se evidencia una relacion entre el aumento de la DBO5 y el decaimiento del Oxigeno disuelto.

Figura 5-35. Resultados para el parámetro DBO5 (mg/l)



La información completa de los resultados de la simulación se presenta en el Anexo E.

Figura 5-36. Punto de vertimiento del efluente PTL (2013) en simulación



Fuente: GoogleEarth, vista octubre 2013

Adicionalmente, se hizo una simulación del balance de Oxígeno Disuelto y DBO₅ en el tramo de 200m después del vertimiento al Rio Tunjuelo de la PTL del RSDJ. Los resultados se relacionan en la tabla 5-31.

Tabla 5-31. Datos utilizados para el balance de OD y DBO₅ en el modelo Streeter y Phelps

CONSTANTES Y VARIABLES			
Caudal Rio	Qr	2,52	m3/s
Concentración Rio (DBO ₅)	Cr	17,08	mg/l
Caudal Vertimiento	Qv	0,013	m3/s
Concentración Vertimiento (DBO ₅)	Cv	1330	mg/l
Oxigeno Disuelto Rio	ODr	6,17	
Oxigeno Disuelto Vertimiento	ODv	2,64	
Velocidad	V	0,49	m/s
Área	A	5,14	m2
Tasa Efectiva Debida a la Sedimentación	Ka	0,4	d ⁻¹
Tasa Efectiva de desoxigenacion	Kd	0,25	d ⁻¹
Tasa Total de remoción de DBO	Kr	0,25	d ⁻¹
Tiempo Critico	Tc	2,01	d

Fuente: Autor

El tramo a evaluar es muy pequeño para llegar a concluir una afectación de la calidad del Rio en términos de Oxígeno Disuelto y Demanda Biológica de Oxigeno, lo cual se evidencia con los valores mostrados en la Tabla 5-32.

Tabla 5-32. Variación de la DBO₅ y OD aplicación modelo de Streeter y Phelps

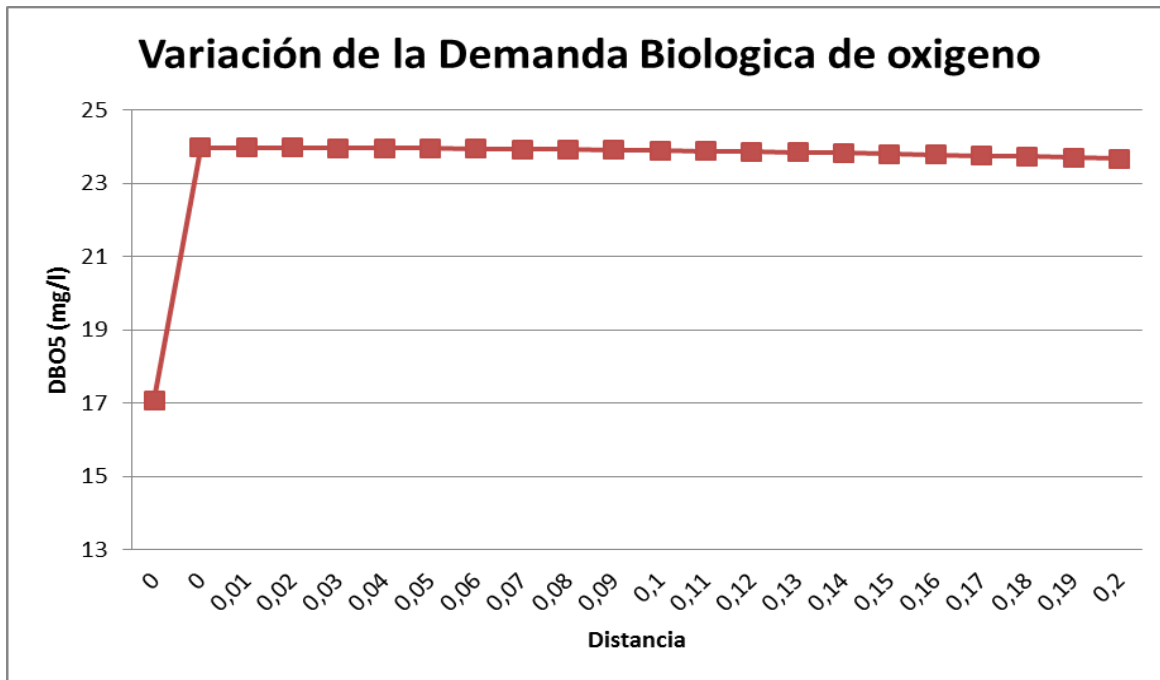
VARIACIÓN DE LA DBO5 Y OXIGENO DISUELTO				
Distancia (Km)	Deficit Oxigeno	OD (mgO2/l)	DBO5 (mgO2/l)	Tiempo
0	0	6,17	17,08	0
0	0,018532744	6,15146726	23,9729207	0
0,01	0,019946519	6,15005348	23,9715051	0,000236206
0,02	0,022773417	6,14722658	23,9686742	0,000472411
0,03	0,027012136	6,14298786	23,9644284	0,000708617
0,04	0,032660724	6,13733928	23,9587685	0,000944822
0,05	0,039716577	6,13028342	23,9516956	0,001181028
0,06	0,048176447	6,12182355	23,9432108	0,001417234
0,07	0,058036439	6,11196356	23,9333157	0,001653439
0,08	0,069292013	6,10070799	23,922012	0,001889645
0,09	0,08193799	6,08806201	23,9093017	0,00212585
0,1	0,095968552	6,07403145	23,8951871	0,002362056

0,11	0,111377248	6,05862275	23,8796707	0,002598262
0,12	0,128156996	6,041843	23,8627551	0,002834467
0,13	0,146300087	6,02369991	23,8444435	0,003070673
0,14	0,16579819	6,00420181	23,8247389	0,003306878
0,15	0,186642358	5,98335764	23,803645	0,003543084
0,16	0,208823031	5,96117697	23,7811654	0,003779289
0,17	0,232330042	5,93766996	23,7573041	0,004015495
0,18	0,257152626	5,91284737	23,7320653	0,004251701
0,19	0,283279422	5,88672058	23,7054534	0,004487906
0,2	0,310698483	5,85930152	23,6774731	0,004724112

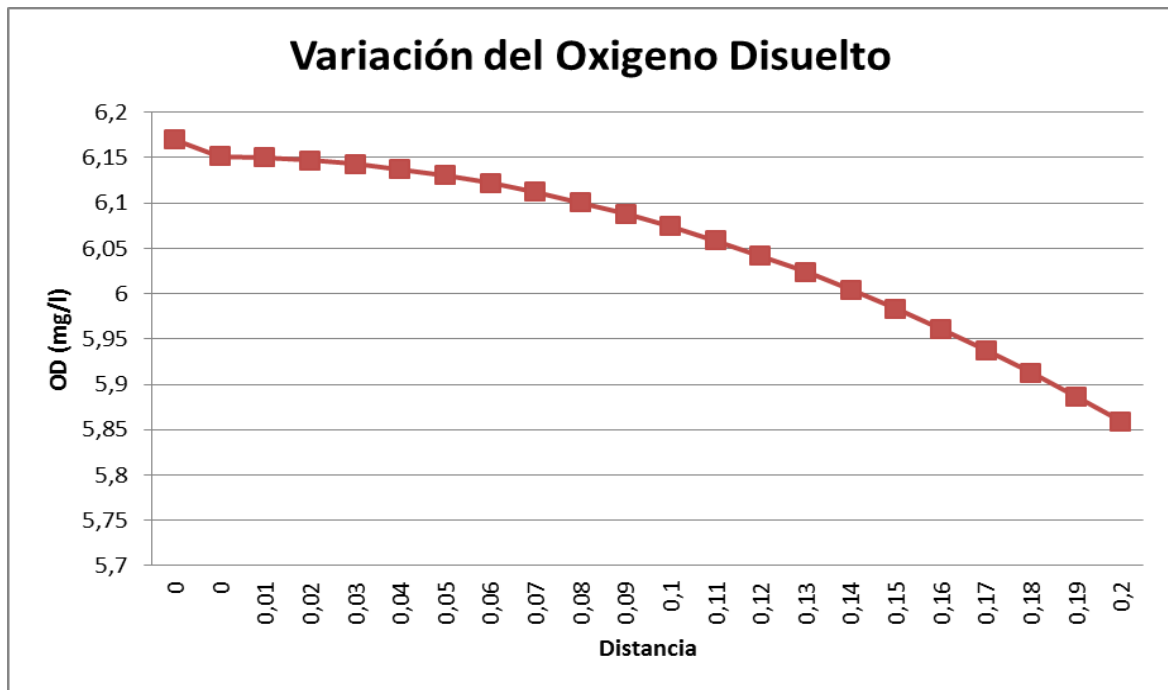
Fuente: Autor

En las figuras 5-37 y 5-38 muestran las variaciones de la demanda bioquímica de oxígeno y el oxígeno disuelto

Figura 5-37. Variación de la Demanda Biológica de Oxígeno DBO₅



Fuente: Autor

Figura 5-38. Variación del Oxígeno Disuelto

Fuente: Autor

5.5.3. Escenario 2: Conexión del efluente tratado al interceptor Tunjuelo-Canoas

Teniendo en cuenta la falta de información acerca de los diseños de los interceptores del río Tunjuelo, y los diseños definitivos de la PTAR Canoas que actualmente están siendo evaluados y revisados por los técnicos de la EAAB, se puede considerar la posibilidad de conectar el efluente del sistema de tratamiento de lixiviados a la red de alcantarillado de la ciudad de Bogotá, por lo cual se hace una exploración frente al tema.

Por esto se buscó el interceptor más cercano al vertimiento del PTL del cual arrojó que el Interceptor Tunjuelo Alto Derecho era el más viable, este interceptor recorre en paralelo en la mayoría del río Tunjuelo por su margen derecha, en una longitud aproximada de 10 kilómetros, desde la cabecera alta de la localidad Usme, hasta su entrega al interceptor Tunjuelo Medio, en inmediaciones de la Escuela de Artillería. El Interceptor Tunjuelo Alto Derecho en la actualidad tiene como función captar las aguas residuales de la parte alta de la cuenca del Tunjuelo, drena principalmente los barrios circundantes pertenecientes a la localidad de Usme entre los cuales se destacan: casco urbano de Usme, El Oasis, La lira, Brazuelos, Santa Inés Monteblanco, predios Cantarrana, Quintas de Granada, La Aurora, La Picota, La Escuela de Artillería y Abraham Lincoln. Con su construcción se baso en dos etapas una que inició en km 200 y se busca el drenaje de un área de dos mil 649 hectáreas de la parte alta de la cuenca del

río Tunjuelo por la margen derecha y beneficia a una población de aproximadamente un millón 215.000 habitantes.

Como primera medida se busco el pozo más cercano al Relleno Sanitario Doña Juana y más exactamente al sitio de vertimiento del efluente del sistema de tratamiento de lixiviados, del cual se encontró que el pozo 1 que se referencia en la Figura 5-39, es el punto más cercano al vertimiento el cual arrojo dos posibilidades de realizar la respectiva conexión el primero con una conexión directa en una longitud aproximada de 425 metros (Ver Figura 5-40) y el segundo recorriendo la ribera del rio en una longitud aproximada de 870 metros (Ver Figura 5-42).

Figura 5-39. Ubicación de vertimiento y pozo 1 de la red de alcantarillado



Fuente: Google Earth, vista octubre 2013

En esta imagen se ilustra el punto de vertimiento de la PTL y el pozo de inspección más cercano para la conexión del vertimiento de la PTL del RSDJ al sistema de alcantarillado sanitario de Bogotá DC.

Figura 5-40. Conexión directa al pozo 1 (alternativa 1)

Fuente: Google Earth, vista octubre 2013

Esta opción comprende menor longitud por ser una línea recta, aun con esto es pertinente evaluar la servidumbre de los predios, así como las condiciones topográficas del terreno, así como la actividad económica de los predios a afectar.

Figura 5-41. Conexión por la ribera del Río Tunjuelo al pozo 1 (alternativa 2)

Fuente: Google Earth, vista octubre 2013

La anterior opción se plantea a nivel conceptual, puesto que no se cuenta con un levantamiento topográfico que permita determinar la viabilidad de esta conexión.

Teniendo en cuenta la consideración anterior, y respetando la normatividad vigente para el vertimiento de los lixiviados del Relleno Sanitario Doña Juana; la Resolución 166 de 2008 emitida por la CAR y la norma para el vertimiento a la red de alcantarillado de la ciudad de Bogotá la Resolución 3957 de 2009, emitida por la Secretaria Distrital de Ambiente, se realizó un análisis de la calidad del

vertimiento que frente al promedio de los últimos tres meses del presente año. Esto permite confrontar el cumplimiento de la norma y la viabilidad de la conexión, al día de hoy, como se muestra en la siguiente Tabla 5-33.

Tabla 5-33. Comparación de la normatividad de vertimientos y cumplimiento de límites máximos permisibles

Parámetros	Expresado como	Vertimiento promedio 3 meses 2012	Resolución 3957 de 2009 SDA	Estado	Resolución n 166 de 2008 CAR	Estado
1 Aluminio Total	mg/L	0,515	10	cumple	5	cumple
2 Arsénico Total	mg/L	0,026	0,1	cumple	0,1	cumple
3 Bario Total	mg/L	NR	5	cumple	NR	NA
4 Boro Total	mg/L	1,55	5	cumple	4	cumple
5 Cadmio Total	mg/L	0,025	0,02	no cumple	0,01	no cumple
6 Cianuro	mg/L	NR	1	NA	NR	NA
7 Cinc Total	mg/L	0,39	2	cumple	2	cumple
8 Cobre Total	mg/L	0,056	0,25	cumple	0,2	cumple
9 Compuestos Fenolicos	mg/L	0,07	0,2	cumple	0,2	cumple
10 Cromo Hexavalente	mg/L	NR	0,5	cumple	NR	NA
11 Cromo Total	mg/L	0,32	1	cumple	0,1	no cumple
12 Hidrocarburos Totales	mg/L	NR	20	NA	NR	NA
13 Hierro Total	mg/L	9,66	10	cumple	5	no cumple
14 Litio Total	mg/L	0,078	10	cumple	2,5	cumple
15 Manganeseo Total	mg/L	0,09	1	cumple	0,2	cumple
16 Mercurio Total	mg/L	0,009	0,02	cumple	0,01	cumple
17 Niquel Total	mg/L	0,525	10	cumple	0,2	no cumple
18 Plata Total	mg/L	NR	0,5	NA	NR	NA
19 Plomo Total	mg/L	0,24	0,5	cumple	0,1	no cumple
20 Selenio Total	mg/L	0,006	0,1	cumple	0,02	cumple
21 Sulfuros Totales	mg/L	NR	0,1	NA	NR	NA
22 Color	Unidad Pt-Co	NR	5	NA	NR	NA
23 DBO5	mg/L	273,7	800	cumple	100	no cumple
24 DQO	mg/L	2699	1500	no cumple	NR	NA
25 Grasas y Aceites	mg/L	26,8	100	cumple	2	no cumple
26 pH	Unidades	8,09	5,00-9,00	cumple	4,5-9	cumple
27 Solidos sediment	mg/L	NR	2	NA	NR	NA
28 SST	mg/L	700	600	no cumple	NR	NA
29 Temperatura	°C	29,2	30	cumple	NR	NA

30	Tensoactivos (SAAM)	mg/L	NR	10	NA	NR	NA
31	Berilio	mg/l	0,01	NR	NA	0,1	cumple
32	Cobalto	mg/l	0,15	NR	NA	0,05	no cumple
33	Vanadio	mg/l	0,1	NR	NA	0,1	cumple
34	Compuestos organo clorados	mg/l	0,0001	NR	NA	0,05	cumple

12	parámetros nuevos	3	no cumplirían	8	no cumple
9	no analizados	31	cumplirían	26	cumple

De acuerdo a la anterior tabla se puede observar que la normatividad para el vertimiento para alcantarillado es más flexible ya que estos interceptores tienen como fin llegar a un tratamiento en una planta de aguas residuales y la normatividad que rige para el vertimiento directo a un cuerpo receptor es más estricta.

Al comparar los parámetros de la referencia, 8 de ellos no cumplen con la Resolución 166 de 2008 (CAR), mientras que si estuvieran regulados por la Resolución 3957 de 2009 (SDA) solo 3 parámetros no cumplirían. Esto, considerando, además, que 6 parámetros no están incluidos dentro de esta última resolución.

Adicionalmente se analizó el posible **efecto de la carga del vertimiento tratado (efluente PTL) en la PTAR Canoas**, según la información recopilada los parámetros de diseño de la PTAR CANOAS los cuales se relacionan en la tabla 5-34

Tabla 5-34. Parámetros de diseño de la PTAR CANOAS.

Parámetro		Valor
1	Área drenada	28,827.0 Hectáreas
2	Población servida	7,322,000.0 Habitantes
3	Caudal medio de aguas residuales de diseño	14.0 m3/s
4	Caudal Máximo seco	18.0 m3/s
5	Caudal de diseño	28.9 m3/s
6	Demanda Biológica de Oxígeno	416 Toneladas/día
7	Sólidos Suspendidos Totales (SST)	412 Toneladas/día
8	Nitrógeno Total (NT)	118 Toneladas/día
9	Fósforo Total (PT)	16 Toneladas/día

- **Determinación de la carga del vertimiento de la PTL del RSDJ**

Caudal: según los datos reportados de generación de lixiviado y de proyección de generación de lixiviado en el RSDJ en el capítulo anterior, el caudal máximo presentado según la proyección de generación de residuos calculada en el Estudio realizado por la UAESP denominado *Plan director* es 55.45 l/s, el caudal proyectado por el concesionario para las zonas actuales del RSDJ más la zona de proyección Optimización Fase II es 22.5 l/s, según el histórico de generación de lixiviados evaluado en el año 2010, 2011 y 2012 es 26 l/s, por lo anterior el caudal que se utilizará para calcular la carga que aportaría el RSDJ a la PTAR CANOAS, será el promedio entre la proyección del concesionario y el Estudio de la UAESP, lo anterior debido a la amortiguación de caudales y capacidad de almacenamiento (38.000 m³) que tiene el RSDJ con sus diferentes Pondajes. Caudal promedio aportado por el Relleno Sanitario Doña Juana – RSDJ, con la siguiente ecuación (Ecuación 5.1):

Ecuación 7.

$$Q = \bar{Q}_{CGR} * \bar{Q}_{Plan_Director} = \frac{\left(17.01 \frac{l}{s} + 34.19 \frac{l}{s}\right)}{2} = 25,6 \frac{l}{s}$$

Lo que equivale a 0,0256 m³/s

Demanda Bioquímica de Oxígeno – DBO₅:

Para determinar la demanda bioquímica de oxígeno – DBO₅, se analizaron los datos de los análisis físico químicos del punto del vertimiento al Río Tunjuelo, presentando una concentración promedio de 1649,22 mgO₂/l, en el punto de vertimiento analizado en un periodo comprendido entre octubre de 2010 y Septiembre de 2012.

Lo anterior equivale a 0,001649 Ton/m³

Solidos Suspendidos Totales – SST:

Para determinar la Concentración de SST, se analizaron los datos de los análisis físico químicos del punto del vertimiento al Río Tunjuelo, presentando una concentración promedio de 1048,1 mg/l, en el punto de vertimiento analizado en un periodo comprendido entre octubre de 2010 y Septiembre de 2012.

Lo anterior equivale a 0,001048 Ton/m³

Nitrógeno Total – N_T:

Para determinar la Concentración de N_T, se analizaron los datos de los análisis físico químicos del punto del vertimiento al Río Tunjuelo, presentando una

concentración promedio de 539,4 mg/l, en el punto de vertimiento analizado en un periodo comprendido entre octubre de 2010 y Septiembre de 2012.

Lo anterior equivale a 0,000539 Ton/m³

Por lo tanto las cargas que afectarían el sistema de tratamiento de la PTAR Canoas serian, (Ver Tabla 5-35):

Tabla 5-35. Cargas que afectarían a la PTAR Canoas

DATOS		PTL – RSDJ	PTAR Canoas, sin PTL-RSDJ	PTAR Canoas, con PTL-RSDJ	
Parámetro	Unidad	Valor	Valor	Valor	
1	Caudal	m ³ /s	0,0256	28,0	28,0256
2	DBO5	Ton/día	3,65	416,0	419,65
3	SST	Ton/día	2,32	412	414,32
4	NT	Ton/día	1,93	118	119,93

Fuente: Autor

una vez calculadas las cargas orgánicas con el escenario de conectar el efluente de la PTL del RSDJ al alcantarillado sanitario de Bogotá DC, y tratar ese vertimiento en la PTAR Canoas se evidencia que la carga aportada por la PTL del RSDJ es en el caso de la DBO5 el 1% de la carga que llegaría a PTAR Canoas, en cuanto a SST la carga aportada por el vertimiento de la PTL corresponde al 0,7% de la carga aportada por las aguas residuales domésticas. Por lo cual se infiere que en términos de cargas orgánicas la afectación en el diseño puede llegarse a despreciar, teniendo en cuenta la magnitud del proyecto canoas y las cargas a tratar.

Adicionalmente se aclara que la evaluación de cargas se fundamentó en cargas orgánicas, por ser el tratamiento principal de la PTAR Canoas, pero se encuentra pertinente evaluar los aportes en cuanto a metales pesados considerando cargas de índole inorgánico.

Calculo de la capacidad hidráulica del interceptor

- Caudal de diseño (q): Se estima como la suma de QMH+QCE+QINF. Cuando el caudal de diseño calculado en el tramo sea inferior a 1,5 l/s, debe adoptarse este valor como caudal de diseño⁴.

COTAS

⁴ Teoría y Diseño de Acueductos y Alcantarillados, pag.

- Cota clave o batea: es la cota clave o batea de la tubería cuando sale (superior) y llega (inferior) a la cámara o pozo. Cuando hay dos tramos consecutivos, la cota batea de salida de uno es la cota batea de llegada del anterior menos una caída en la cámara o pozo.
- Cota rasante: Es la cota del terreno
- Cabeza de energía $\left(\frac{V^2}{2g}\right)$ = Calcula la cabeza energía en ese tramo.
- Energía Especifica: Es la cabeza de energía + la altura de la lámina de agua
- Alineamiento: Es la pendiente del terreno en %, calculada con la ecuación (5.2):

Ecuación 8.
$$\frac{cotaRasanteSup - CotaRasanteInf}{Distancia} * 100$$

En la tabla 5-36 se relaciona el cálculo hidráulico de empalme de colectores al alcantarillado sanitario por método de línea de energía.

Tabla 5-36. Diseño Hidráulico y empalme de colectores de alcantarillado.

Diseño Hidráulico y empalme de colectores de alcantarillado sanitario por Línea de Energía																		
Tramo	Q Dis	s	Dc		Qo	Vo	Q/Qo	V/Vo	d/D	R/Ro	H/D	V		v ² /2g	R	t		d
De - A	(l/s)	Diseño	Nom (")	int (m)	l/s	m/s						m/S		(m)	(m)	(N/m ²)		(m)
1-2	8400	0,001	100,00	2,54	10312,7 1	2,04	0,815	0,99	0,76	1,21	0,75	2,01	ok	0,21	0,77	9,61	ok	1,94
2-3	8425,60	0,001	100,00	2,54	10312,7 1	2,04	0,817	0,99	0,77	1,21	0,77	2,01	ok	0,21	0,77	9,63	ok	1,96

6 Conclusiones y recomendaciones

6.1 Conclusiones

- Diferentes estudios sobre el análisis de la calidad del agua del río Tunjuelo muestran la presencia de numerosas actividades contaminantes a través de toda su cuenca. Es por eso que el deterioro de este importante recurso hídrico no se puede atribuir exclusivamente al vertimiento de los lixiviados del relleno Sanitario Doña Juana ni tampoco se puede atribuir a que es el mayor contaminante. Este es solo uno de los múltiples aportes que contribuyen al deterioro del recurso hídrico de la zona. Hay vertimientos de igual o mayor carga contaminante provenientes de la explotación de canteras, curtiembres, ladrilleras, mataderos, industria química y otras, así como también las aguas servidas de la población urbana y rural establecida en ese sector de la Capital y circundante. Existe un porcentaje mínimo que realiza su descarga antes del vertimiento de lixiviados, sin embargo, buena parte de las descargas se producen aguas abajo del vertimiento del lixiviado, lo cual obliga a la implementación de una solución integral que preserve los niveles de calidad establecidos para la corriente y no desestime los esfuerzos e inversiones que se hacen individualmente por parte de algunos sectores involucrados. La construcción del interceptor Tunjuelo-Canoas contribuirá en gran medida al saneamiento integral de este cuerpo de agua. Por ello, es conveniente buscar la forma de integrar todas esas descargas en un mismo colector.
- La carga contaminante que genera el lixiviado del relleno sanitario Doña Juana, con la infraestructura existente, representa una población equivalente-PE entre 108.000 y 352.000 habitantes aproximadamente, dependiendo de que exista o no un tratamiento previo. En términos globales esto equivale a un aporte que oscila entre 6 y 20 Ton/d de DBO_5 y entre 16 y 36 Ton/d de SST. Esto se une a una población residente en la zona que supera los dos millones de personas y genera un aporte de carga superior a 165 Ton/d de DBO_5 y 120 Ton/d de SST, según las cifras contempladas en el Plan de Saneamiento del Río Bogotá.
- Las mediciones realizadas del relleno sanitario Doña Juana 50 m antes y 50 m después del vertimiento del efluente tratado en la Planta de Tratamiento de Lixiviados-PTL muestran variaciones tanto en caudal como en las características fisicoquímicas y microbiológicas. No obstante, una buena parte de los parámetros de control cumplen con los límites establecidos, especialmente en lo que se refiere a la concentración de metales. En términos de DBO_5 y SST esos datos coinciden con los valores reportados en una prueba de simulación aplicando el modelo QUAL2E en un tramo 200 m antes y 200 m después del punto de descarga. De todas maneras, la concentración resultante después del punto de mezcla dependerá, en la práctica, del funcionamiento del sistema de tratamiento de los lixiviados y de las condiciones del cuerpo receptor. Estas últimas están estrechamente ligadas a factores climáticos que varían con la época del año.

- El bajo caudal de base del río Tunjuelo y la elevada carga contaminante que recibe a través de su corto recorrido por la zona sur de la ciudad son elementos que limitan su capacidad real de asimilación y recuperación. Por esa razón, la autodepuración no constituye una alternativa efectiva y sostenible para la descontaminación de esa corriente de agua.
- La posibilidad de conectar el vertimiento de la planta de tratamiento de lixiviados al colector Tunjuelo-Canoas con el fin de efectuar un tratamiento conjunto con aguas residuales domésticas en la PTAR Canoas es factible según el análisis realizado. En primer lugar, la distancia de conexión al pozo 1 del interceptor Tunjuelo estaría entre 425 m y 870 m, dependiendo de la ruta a seguir lo cual no requeriría mayor gasto. En segundo lugar, la relación de caudales $Q_{\text{lixiviado}}/Q_{\text{PTar}}$ es de 0,26% lo cual indica que no se afectaría la capacidad hidráulica del sistema. Adicionalmente podría regularse la descarga en horarios apropiados aprovechando la capacidad de almacenamiento existente en el relleno sanitario (38000 m³ de pondajes). En tercer lugar, la carga contaminante que recibiría la PTAR Canoas desde la PTL no afectaría su eficiencia pues representa solo un incremento promedio del 1,48% en DBO₅ y 3,8% en SST, rango asimilable por el sistema.

6.2 Recomendaciones

- La eventual conexión del efluente de la PTL al sistema canoas debe ser complementada con acciones internas en predios del relleno sanitario. Entre otras, se requiere la ejecución de obras que contribuyan a reducir la escorrentía hacia los pondajes y la infiltración de aguas lluvias a través de las distintas capas del relleno. Esto con el fin de minimizar el caudal de los lixiviados.
- Es conveniente mantener programas de monitoreo y seguimiento a las diferentes descargas que recibe el río Tunjuelo directamente o a través de las pequeñas corrientes que lo alimentan para adoptar de manera oportuna las medidas de control que sean necesarias para garantizar los niveles de calidad establecidos.
- Se sugiere utilizar diferentes herramientas de modelación para ampliar los elementos de juicio aportados en el presente estudio, extendiendo la simulación a todos los tramos del río.
- Se recomienda la construcción de una planta piloto, a escala de campo o de laboratorio, para evaluar el desempeño de los procesos de tratamiento previstos en la PTAR Canoas cuando se adiciona una determinada proporción de lixiviados para su correspondiente perfeccionamiento.

A. Anexo: Relación de los estudios realizados por estudiantes de la Universidad Nacional de Colombia

PRODUCTO	PROYECTO	AÑO
Tesis	Comportamiento histórico de parámetros representativos de la calidad fisicoquímica de los lixiviados generados en el RSDJ.	2005
Libro	Estudio de la caracterización climática de Bogotá y cuenca alta del Río Tunjuelo	2007
Libro	El Río Tunjuelo en la historia de Bogotá 1900-1990	2007
Artículo de revista	Cálculo de probabilidad de falla para taludes mineros en el río Tunjuelo en Bogotá D.C.	2006
Tesis	Tratabilidad de los lixiviados del relleno sanitario doña Juana en un reactor uasb	2006
Tesis	Inundaciones en la cuenca del río tunjuelito (Bogotá, Colombia)	2004
Tesis	Génesis del cono del Río Tunjuelo sureste de Bogotá, Cundinamarca	2003
Tesis	Tratamiento de las aguas residuales de Bogotá D.C.	2003
Tesis	Estudio ecológico para el ordenamiento y manejo integrado de la cuenca hidrográfica del río Tunjuelo	1983
Artículo	Estudio ecológico para el ordenamiento y manejo integrado de la cuenca hidrográfica del río Tunjuelo	1983
Artículo	Estudio socio-economico del Valle Alto del Rio Tunjuelo	1975

Libro	Estudio socio-economico del valle alto del rio Tunjuelo	1975
Libro	Historia de la Localidad de Tunjuelito	1990
Tesis	Evaluación de la carga contaminante producida por la industria de curtiembres en la cuenca del rio Tunjuelo	----
Tesis	Evaluación de la carga contaminante de las industrias químicas situadas en la parte baja del Río Bogotá	----
Tesis	Calibración de los parámetros de proceso de las cuencas que componen el futuro embalse La Regadera	----
Libro	Monitoreo de gases y lixiviados en el sector de Moravia - Medellín	2007
Tesis	Tratabilidad de los lixiviados del relleno sanitario doña Juana en un reactor UASB	2006
Tesis	Evaluación de un sistema integrado de tratamiento de lixiviados en el relleno sanitario de Ibagué	2003
Tesis	Efectos de la disposición y manejo de los residuos sólidos en la estabilidad de taludes en relleno sanitario	2003
Tesis	Investigación acerca de modelos para el cálculo de la producción de gases y lixiviados en relleno sanitario	2002
Tesis	Generación, control y tratamiento de lixiviados en rellenos sanitarios	2001
Artículo	Manejo y disposición de residuos sólidos urbanos	1998

Artículo	Relleno sanitario dona Juana	1986
Tesis	Evaluación de un relleno sanitario como reactor anaerobio en el tratamiento de lixiviados	----
Tesis	Contaminación de acuíferos por efluentes de tanques sépticos	----
Tesis	Determinación y valoración de contaminantes metálicos (mercurio y cromo) en los lixiviados	----

B. Anexo: Relación de otros estudios y acciones relacionados con el tema del trabajo de grado

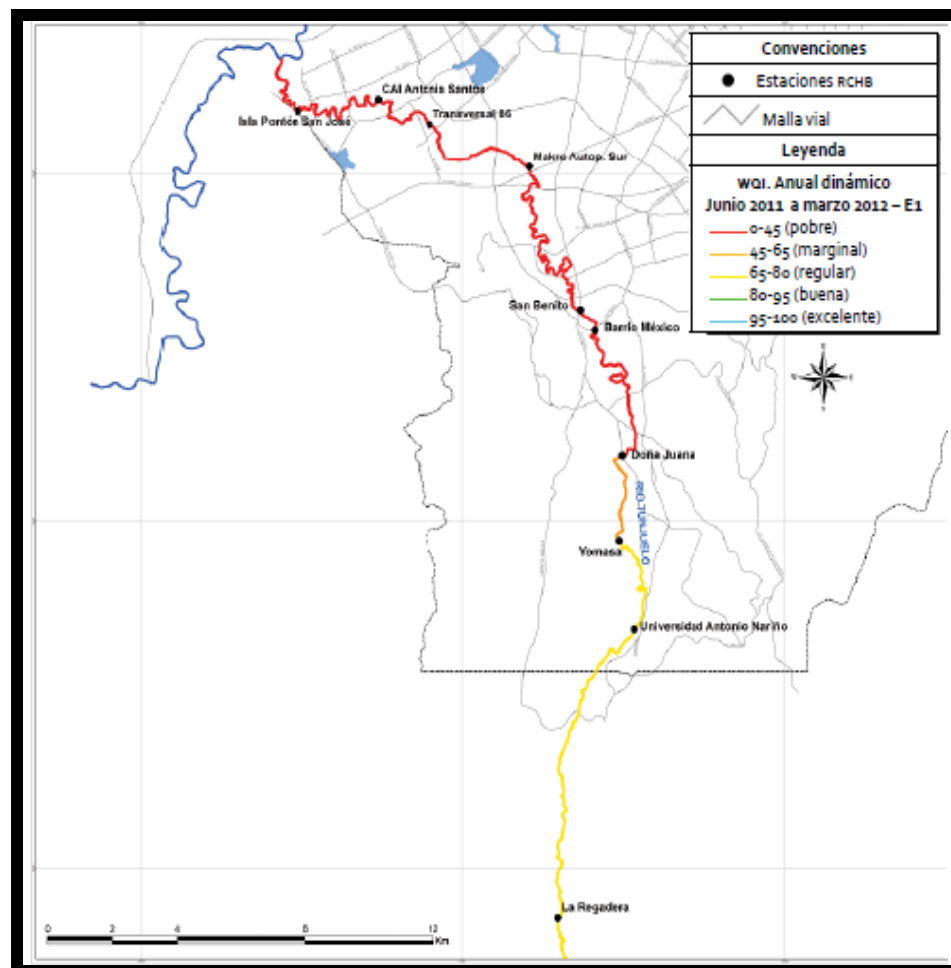
ESTUDIOS 1906- 2004		
AÑO	ESTUDIO – ENTIDAD	OBSERVACIONES
1906	Pearson	Recomienda tratar aguas residuales antes de verterlas al río.
1927	White J.G. Engineering Corporation	Construir interceptores y una planta en Fucha.
1979	Banco Mundial	Construir un gran interceptor que lleve las aguas hasta Tunjuelo y a una gran planta de tratamiento.
1989	Bywatter de Gran Bretaña	Construcción de tres plantas; propuso celebrar un contrato de concesión; la EAAB solicitó la presentación de propuestas adicionales. Respondieron BYWATTER y DEGREMONT que propusieron tres plantas (Salitre, Fucha y Tunjuelo). DRAGADOS Y CONSTRUCCIONES DE ESPAÑA sugirió, además de las tres, otra en Torca, en reemplazo del interceptor Torca – Salitre. Este proceso no avanzó por el cambio de administración.
1990	Banco Mundial: misión integrada por oficiales del Banco y el Dr. Daniel Okun	Concluyó en que se debía construir un gran interceptor a lo largo del río y una planta en la Sabana o en Tocaima. Solución similar a las planteadas en 1974 y 1985. Recomendó avanzar en la construcción de interceptores y crear un comité interinstitucional.
1993	EPAM LTDA	a. Construcción de las tres plantas en los ríos Tunjuelo, Fucha y Salitre por un valor de USD \$1.490 millones; b. Construcción de un interceptor y una planta en Tocaima: USD \$1.159 millones, y la de un interceptor y una planta en Soacha: USD \$1.490 millones. Sin embargo, recomendó la primera. Proyecto previsto a 30 años.
1992	El Comité Interinstitucional y el Banco Internacional de Reconstrucción y Fomento (BIRF)	Contempla la necesidad de formular un estudio de impacto ambiental para la hoya media y baja de la cuenca, estudios sobre los residuos y proyectos pilotos frente a las curtiembres, las canteras, las textileras y los lavadores de autos.
2000	Unión Temporal Saneamiento Río Bogotá	Concluyó que no se requieren las tres plantas. En su reemplazo propone la ampliación de la PTAR Salitre y la construcción de una segunda planta en Soacha o alternativamente en Tunjuelo.
2000	Plan de Ordenamiento de Bogotá (POT) de 2000 (Art. 60)	Señala que la solución para el río es la construcción de las tres plantas. Sin embargo, señala que el Distrito debe contratar estudios técnicos, jurídicos y financieros para evaluar dicha solución, así como el contrato 015 de 1994.
2001	Foster Weelher	Señala que se debe continuar con el esquema aprobado en 1993, esto es, la construcción de las tres plantas en sus dos fases.
2001	Unión Temporal Saneamiento del Río Bogotá, Water Research Centre de Inglaterra WRc PLCV y la Universidad	Hay necesidad de modificar el esquema del año 1993, por razones de costos, financiamiento, técnicas y tiempo.

	de los Andes	
2001	Unión Temporal Hans Wolf & Partner GMBH e Hidrotec	Informes de operación y mantenimiento de la PTAR Salitre.
2002	Mesa de trabajo en la que participaron las entidades distritales y la CAR	Determinó que el programa de descontaminación del río debía tener una perspectiva integral y regional. De igual forma, se definió el Tratamiento Primario Químicamente Asistido (TPQA) como una alternativa más atractiva que el tratamiento secundario y se modificó el esquema previsto en 1993 por razones financieras y técnicas (mayor efecto en menor tiempo).
2002	"3er Encuentro Mundial de Ríos – Empate de Ríos", promovido por la Fundación al Verde Vivo	Expertos internacionales recomiendan mejorar y construir nuevas plantas de tratamiento, un plan de arborización, controlar la calidad del agua, negociaciones con las comunidades a lo largo del río, entre otras.
2002	Water Research Center	Evaluación Técnica de la PTAR Salitre.
2002	Unión Temporal Saneamiento río Bogotá	Usos y Estándares de la Calidad del río Bogotá.
2003	Carlos Giraldo López	Captación de las Aguas Residuales de la Cuenca Salitre.
2003	Instituto Quinaxi - Carlos Giraldo López	Análisis de la situación de la PTAR Salitre desde la perspectiva técnico ambiental.
2003	Unión Temporal Saneamiento del Río Bogotá	Programa de saneamiento del río Bogotá. Definición de la alternativa a seguir.
2003	Rodríguez Azuero Asociados S.A.	Programa de saneamiento del río Bogotá. Definición de la alternativa a seguir.
2003	Taller de Estrategia	Análisis financiero del Contrato 015 de 1994.
2004	Universidad de los Andes	Estudio sobre el río Bogotá.

C. Anexo: Relación de la generación de Caudal Vs precipitación a largo del tiempo.



D. Anexo: Mapa de la Calidad del Río Tunjuelo, Estudio de Secretaría Distrital de Ambiente y la Universidad de los Andes (2010-2012). Calidad del Recurso Hídrico de Bogotá



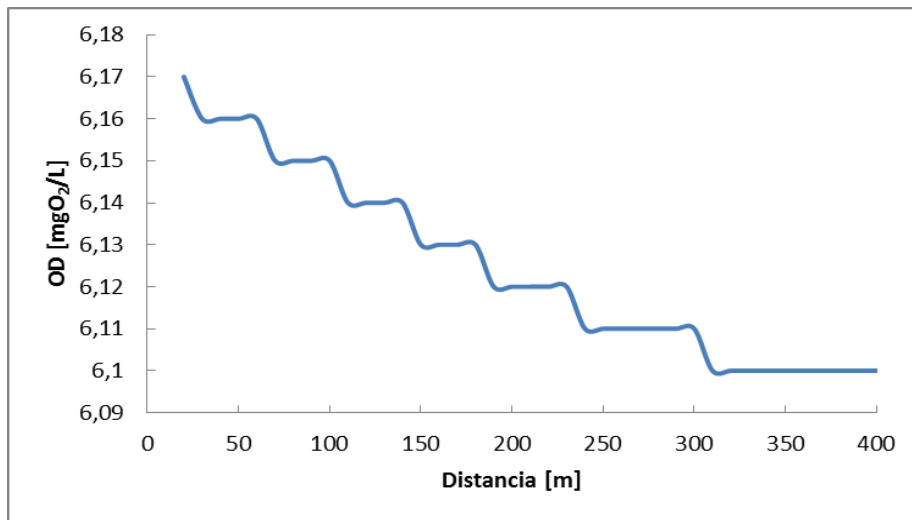
E. Anexo: Concentraciones medidas en el río Tunjuelo para los parámetros indicados en el Plan de Manejo Ambiental del relleno sanitario Doña Juana periodo Abril a Octubre de 2006 y 2007 de los vertimientos del RSDJ

Parámetro	Acuerdo 43 CAR/2006 (Clase IV)	Unidades	Abr-06		Jul-06		Sep-06		Oct-06	
			200 m antes del STL	200 m después del STL	200 m antes del STL	200 m después del STL	200 m antes del STL	200 m después del STL	200 m antes del STL	200 m después del STL
Sitio de muestreo										
Conductividad		microhmios/cm	521	866	200	667	327	885	254	489
Sólidos Disueltos Totales	3000	mg/l	291.76	484.96	112	373.52	183.12	495.6	142.24	273.84
Coliformes fecales	20000	UFC/100 mL	3300000.0	8900000.0	680000	870000	280000	640000	770000	1200000
DBO ₅	50	mg /L-O ₂	130	108	47	208	59	124	134	147
DQO	—	mg/L-O ₂	162	154	128	260	140	160	165	169
Fósforo	—	mg/L P	3.26	3.3	4.6	20.6	2.1	2.2	1.02	1.08
Grasas y Aceites	—	mg /L	11	12	LD	LD	9	8	LD	LD
Nitrógeno total	—	mg/L-N	29.4	28.0	9.2	28	17.1	44.2	2.8	12.1
Nitritos	10	mg /L								
Sólidos suspendidos	40	mg/L-SS	409	278	1042	421	4477	2077	1722	2078
pH	4.5-9.0	(iones H ⁺)	9.3	9.1	8.2	8.7	7.1	7.6	7.2	7.6
Temperatura	—	°C	16.9	17.1	15.9	15.9	19	19	15.8	15.8
Oxígeno (mg/L)	—	mg/L-O ₂	0.6	0.6	6	5.8	1.4	1	5.4	5.3
CADMIO	0.01	(mg/L Cd) (CL 96/50)	0.001	0.001	0.001	0.001	0.01	0.001	0.001	0.001
MERCURIO	0.01	mg/L Hg	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
NIQUEL	0.2	mg/L Ni	0.02	0.01	0.01	1.78	0.01	0.01	0.01	0.01
PLOMO	0.1	mg/L Pb	0.01	0.01	0.01	0.01	0.1	0.1	0.1	0.1
ZINC	2	(mg/L Zn) (CL 96/50)	0.04	0.05	0.070	0.041	0.09	0.06	0.192	0.173

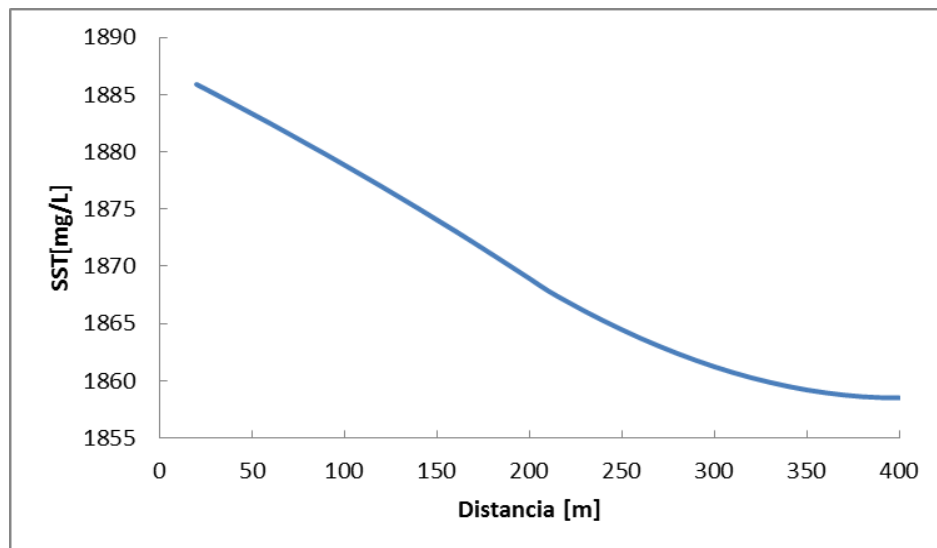
Parámetro	Acuerdo 43 CAR/2006 (Clase IV)	Unidades	Ene-07		Abr-07		Jul-07		Oct-07	
			200 m antes del STL	200 m después del STL	200 m antes del STL	200 m después del STL	200 m antes del STL	200 m después del STL	200 m antes del STL	200 m después del STL
Sitio de muestreo										
Conductividad		microhmios/cm	335	1756	282	1184	55	36	38	111
Sólidos Disueltos Totales	3000	mg/l	187.6	983.36	157.92	663.04	30.8	20.16	21.28	62.16
Coliformes fecales	20000	UFC/100 mL	890000	1100000	110000	160000	47000	71000	12000	610000
DBO ₅	50	mg/L-O ₂	47	168	38	87	35	32	26	36
DQO	—	mg/L-O ₂	76	192	94	216	49	45	56	59
Fósforo	—	mg/L P	17.90	65.00	18.9	52.2	1.28	2.50	4.01	2.93
Grasas y Aceites	—	mg /L	LD	LD	9	LD	LD	6	LD	LD
Nitrógeno total	—	mg/L-N	14.6	81.2	12.3	52.1	1.68	2.8	1.12	1.68
Nitritos	10	mg /L								
Sólidos suspendidos	40	mg/L-SS	4717	14900	4469.0	3729	138	344	1805	1175
pH	4.5-9.0	(iones H ⁺)	7.28	8.51	7	8.48	8.63	8.43	6.08	7.01
Temperatura	—	°C	17.8	18.2	19	19.8	13.6	13.6	16.2	16.1
Oxígeno (mg/L)	—	mg/L-O ₂	3.3	2.93	5	4.5	7	7.12	7.92	6.67
CADMIO	0.01	(mg/L Cd) (CL 96/50)	0.001	0.001	0.03	0.03	0.001	0.001	0.002	0.002
MERCURIO	0.01	mg/L Hg	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
NIQUEL	0.2	mg/L Ni	0.01	0.01	0.01	0.06	0.01	0.01	0.01	0.01
PLOMO	0.1	mg/L Pb	0.1	0.1	0.15	0.15	0.01	0.01	0.02	0.02
ZINC	2	(mg/L Zn) (CL 96/50)	0.001	0.07	0.360	0.370	0.01	0.03	0.06	0.07

F. Anexo: Resultados de la simulación con el modelo QUAL2E.

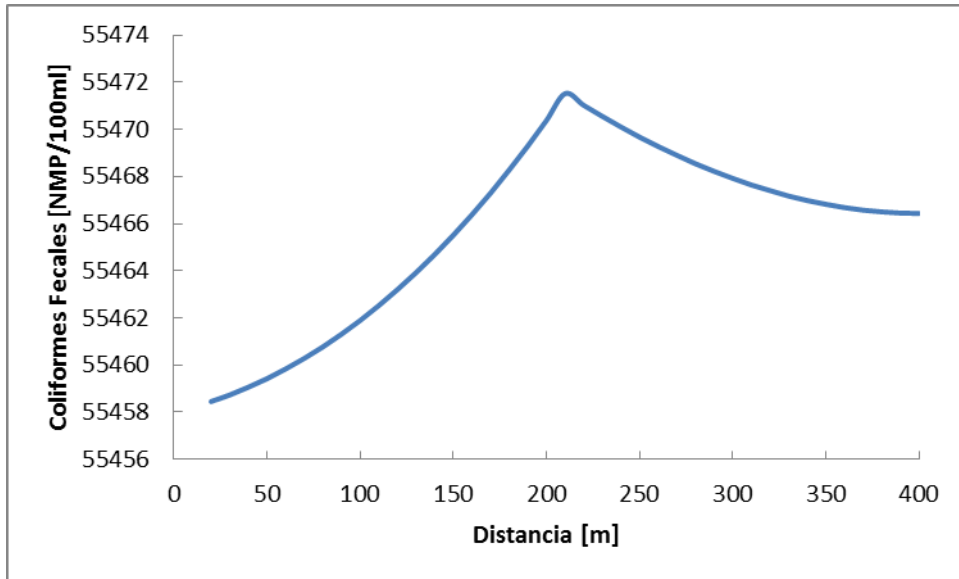
Oxigeno Disuelto



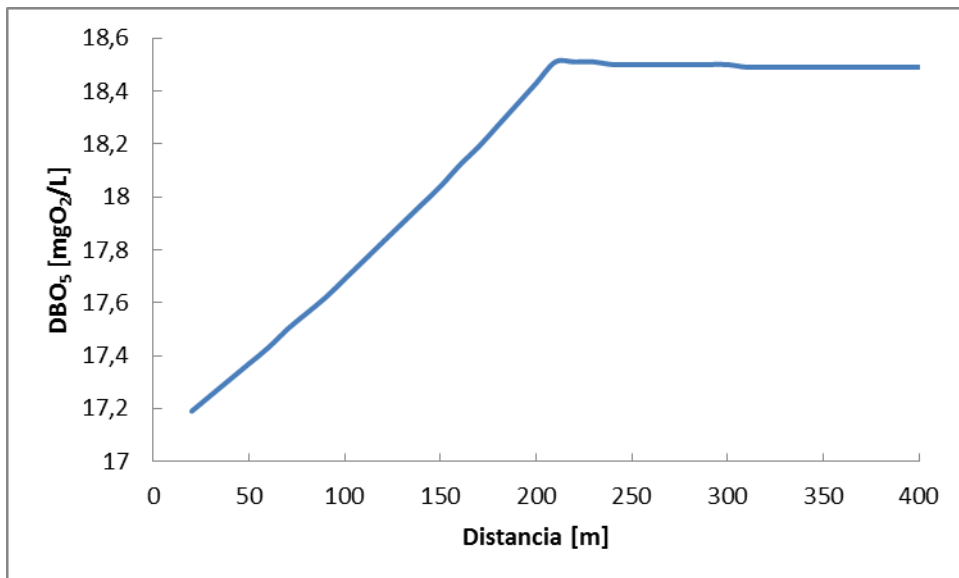
Sólidos Suspendidos Totales



Coliformes Fecales



Demanda Biológica de Oxígeno DBO5



Bibliografía

CHAPMAN, Deborah. Water Quality Assessments. Londres y New York: E & FN Spon. 626p. 1988.

CONPES. “CONPES 3320: Estrategia para el manejo ambiental del río Bogotá.” Consejo Nacional de Política Económica y Social. República de Colombia. Departamento Nacional de Planeación. 2002.

Consejo Canadiense del Ministerio del Medio Ambiente, CCME-WQL, Observatorio Ambiental de Bogotá. 2013 CONSORCIO HVM INGENIEROS LTDA –CONSULTORIA COLOMBIANA S.A.. “Análisis de la calidad del río Tunjuelo, vertimiento del RSDJ y propuesta de modificación de la resolución 3358/90”. 2008.

CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DE CUNDINAMARCA, CAR. “Acuerdo 43 del 17 de octubre de 2006: Por el cual se establecen los objetivos de calidad del agua para la cuenca del río Bogotá a lograr en el año 2020.”. 2006.

CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DE CUNDINAMARCA, CAR.. “Acuerdo 43 del 17 de octubre de 2006: Por el cual se establecen los objetivos de calidad del agua para la cuenca del río Bogotá a lograr en el año 2020.”. 2006

CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DE CUNDINAMARCA, CAR. “Propuesta de Metodología para la determinación de los objetivos de calidad de la cuenca del río Bogotá”. 2006.

CRITES, Ron, TCHOBANOGLOUS, George. Tratamiento de Aguas Residuales en Pequeñas Poblaciones. McGraw Hill, 441p. 2000.

DIAZ, B. “Modelación de la calidad del agua en el interceptor río Bogotá en los tramos Fucha - Tunjuelo - Canoas.” Universidad de los Andes, Facultad de Ingeniería. Bogotá. 2004.

EMPRESA DE ACUEDUCTO Y ALCANTARILLADO DE BOGOTÁ. “Construcción de las obras de canalización del río Tunjuelo, interceptor y obras anexas.” 2009.

EMPRESA DE ACUEDUCTO Y ALCANTARILLADO DE BOGOTÁ. *Plan de Saneamiento y Manejo de Vertimientos - PSMV.* Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá, E.S.P, Gerencia Ambiental. 2007.

EMPRESA DE ACUEDUCTO Y ALCANTARILLADO DE BOGOTÁ. “Programa de Saneamiento del río Bogotá, Cuenca media.” *Foro Río Bogotá: Recuperación a paso lento, Revista SEMANA.* 2010.

EMPRESA DE ACUEDUCTO Y ALCANTARILLADO DE BOGOTÁ Y UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA. “Modelación Dinámica de la Calidad del Agua del Río Bogotá”. Informe Producto 4b: Implementación, Calibración y Validación de Modelos de Transporte de Solutos y de Calidad del Agua. 2010

EMPRESA DE ACUEDUCTO Y ALCANTARILLADO DE BOGOTÁ. “Interceptor Tunjuelo Alto y Medio Derecho”. Recuperado el 18 de octubre de 2011 en: <http://www.acueducto.com.co/wps61/wsp/html/resources/06/riotunjuelo/ObrasrioTunjuelo.pdf>.

EMPRESA DE ACUEDUCTO Y ALCANTARILLADO DE BOGOTÁ. *Mega obras: interceptor Tunjuelo Alto Derecho.* Recuperado el 2 de noviembre de 2011.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, EPA (US). Modelo QUAL2E. <http://eng.odu.edu/cee/resources/model/qual2eu.shtml>.

FAIR MASKEW, Gordon, Ingeniería Sanitaria y de Aguas Residuales. Madrid; Limusa, 1980,254 p.

GIRALDO, E. “Tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios: Avances recientes”. Universidad de los Andes. Bogotá. 2001 .

HMV Y EMPRESA DE ACUEDUCTO Y ALCANTARILLADO DE BOGOTÁ. “Pre dimensionamiento Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Canoas”. 2006.

INGETEC & SDA. Secretaria Distrital de Ambiente. “Informe final Relleno Sanitario Doña Juana: Monitoreo de la calidad fisicoquímica y bacteriológica de vertimientos puntuales y de las fuentes hídricas de Bogotá”. 2008.

IDEAM, Red Hidrometeorológica y Ambiental. 2013.

J RODIER. Análisis de las Aguas Naturales, Aguas Residuales, Aguas De Mar. 3ª Ed. Barcelona: Omega S.A. 1998. 1059p.

MECALF AND EDDY. Ingeniería Sanitaria, Tratamiento, Evaluación y Reutilización de Aguas Residuales. Madrid; Labor S.A., 969p.1985.

MURRAY, Spiegel, Estadística. McGraw Hill.Bogotá. Colombia.1970

OBREGÓN, N. ANGARITA Héctor. Modelación cuantitativa de la producción de lixiviados en el Relleno Sanitario Doña Juana. UTCC. 2004

OROZCO, Álvaro, Tratamiento Biológico de Aguas Residuales. Acodal, 1999.

PINEDA, S.I. “Manejo y disposición de residuos sólidos urbanos”. ACODAL. Bogotá. 1998

ROBINSON, H. “The composition of leachates from very large landfills: An international review”. *CWRM*. 2007

RODRÍGUEZ, Juan. 2004. “Desarrollo de un modelo integrado de transporte y calidad de agua para un alcantarillado. Proyecto de Grado de Ingeniería Ambiental.” Universidad de los Andes, Facultad de Ingeniería. Bogotá.

RODRÍGUEZ, Juan. 2005. “Desarrollo y aplicación de un modelo de calidad del agua del interceptor Fucha - Tunjuelo - Canoas. Tesis de Maestría en Ingeniería Civil y Ambiental.” Universidad de los Andes, Facultad de Ingeniería. Bogotá.

SECRETARIA DISTRITAL DE AMBIENTE, Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá. “Calidad del sistema hídrico de Bogotá”. Editorial Pontificia Universidad Javeriana. 2008.

SECRETARIA DISTRITAL DE AMBIENTE, Normatividad para vertimiento a la red de alcantarillado de la ciudad de Bogotá. <http://sistec.acueducto.com.co/EAABWF/ArchivoFi.nsf/a43808a0e0d1c863052575230054de3c/19d9c3a1e20623d0052576dd00747c00?OpenDocument>. 2009

UAESP, Unidad Administrativa Especial de Servicios Públicos. Informes de las Interventorias del Relleno Sanitario Doña Juana. Bogotá. 2012.

UAESP, Unidad Administrativa Especial de Servicios Públicos. Estudios de las Interventorias del Relleno Sanitario Doña Juana. Bogotá. 2008

UNION TEMPORAL INTER DJ, Consultoría Ingenieros. Interventoría actual del Relleno Sanitario Doña Juana. 2013.

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES, Facultad de ingeniería. 2007. “Instrumentación, monitoreo y estimación de cargas contaminantes afluentes a los Ríos Salitre, Fucha y Tunjuelo y a la PTAR Salitre”. Centro de Investigaciones en Ingeniería Ambiental, CIIA.

UTCC, Unión Temporal Colombo Canadiense. Interventoria del Relleno Sanitario Doña Juana del periodo de 2000 a 2004.

UTCC, Unión Temporal Colombo Canadiense. Modelación cuantitativa de lixiviados en el RSDJ. 2006.

UTCC, “Análisis comparativo de la calidad de los vertimientos de lixiviados del Relleno Sanitario Doña Juana, la calidad del río Tunjuelo y la Resolución CAR 3359/90”. 2005.

VELASCO, S. Lluvia ácida en los bosques del poniente del estado de México.2002.

VEGA, J.C. “Tratabilidad de los lixiviados del Relleno Sanitario Doña en un reactor UASB”. Bogotá. Universidad Nacional de Colombia.