



**ANÁLISIS DE SOSTENIBILIDAD AMBIENTAL DEL RELLENO SANITARIO DOÑA
JUANA, EN LA CUENCA DEL RÍO TUNJUELO A TRAVÉS DE LA METODOLOGÍA
IICA PARA LA DETERMINACIÓN DE HUELLA HÍDRICA**

HERRERA AGUILAR ANDRÉS
PRIETO RAMÍREZ RAFAEL

**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍAS
MAESTRÍA EN GESTIÓN DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS
BOGOTÁ
2019**

**ANÁLISIS DE SOSTENIBILIDAD AMBIENTAL DEL RELLENO SANITARIO DOÑA
JUANA, EN LA CUENCA DEL RÍO TUNJUELO A TRAVÉS DE LA METODOLOGÍA
IICA PARA LA DETERMINACIÓN DE HUELLA HÍDRICA**

**ANDRÉS HERRERA AGUILAR
RAFAEL PRIETO RAMÍREZ**

**Proyecto de investigación para optar por el título de:
MAGÍSTER EN GESTIÓN DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS**

Directoras:

**YULY ANDREA RODRÍGUEZ QUIÑONEZ
MSc. Ingeniería Ambiental**

**ESTHER JULIA OLAYA MARÍN
PhD. Ingeniería del Agua y Medio Ambiente
MSc. Planificación y Manejo Ambiental de Cuenas Hidrográficas**

**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍAS
MAESTRÍA EN GESTIÓN DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS
BOGOTÁ
2019**

Nota de aceptación:

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Bogotá D.C. Febrero de 2019

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a quienes han estado a mi lado y apoyándome en todo momento. Dios, mi familia: Mis padres Miriam y Rafael, mi hermana Érika, a mi esposa Zaridanei y mi hijo David.

Rafael

Dedico este trabajo a todas aquellas personas que de una u otra forma ayudaron y permitieron desarrollar esta investigación. Familia, amigos y compañeros de trabajo. Gracias.

Andrés

AGRADECIMIENTOS

A la Unidad Administrativa Especial de Servicios Públicos, Subdirección de Disposición Final, por su oportuna colaboración e interés en el tema.

A la profesora Ingeniera Yuly Rodríguez por su constante motivación.

A la profesora Doctora Esther Julia Olaya Marín por su invaluable acompañamiento y apoyo en el desarrollo de este trabajo.

A la profesora Yenifer García por sus aportes y disposición para acceso a espacios de difusión del proyecto.

Al ingeniero Oscar Andrés Chaparro García por su colaboración en la generación de cartografía.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	11
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	14
2. JUSTIFICACIÓN	18
3. OBJETIVOS	20
3.1. OBJETIVO GENERAL	20
3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	20
4. MARCO TEÓRICO.....	21
4.1. ESTADO DEL ARTE.....	21
4.1.1. Ámbito Internacional.....	21
4.1.2. Ámbito nacional.....	28
4.2. MARCO CONCEPTUAL	33
4.2.1. Sostenibilidad Ambiental.	33
4.2.2. Colombia y los Objetivos de Desarrollo Sostenible.	34
4.2.3. Colombia en la OCDE.	36
4.2.4. Gestión Integral de residuos sólidos.	39
4.2.5. Economía circular.....	41
4.2.6. Rellenos Sanitarios.	43
4.2.7. Marco tarifario relleno sanitario.	48
4.2.8. Metodologías de análisis de sostenibilidad ambiental.....	52
5. METODOLOGÍA.....	70
5.1. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	70
5.2. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA IICA PARA CÁLCULO DE HUELLA HÍDRICA GRIS	73
5.2.1. Contabilidad de huella hídrica gris.	73
5.2.2. Sostenibilidad Ambiental de la huella hídrica gris.	74
5.2.3. Sostenibilidad económica de la huella hídrica.....	75

5.2.4. Sostenibilidad social de la huella hídrica.	76
5.3. PARÁMETROS DE REFERENCIA.....	76
5.4. CAUDALES DEL EFLUENTE Y AFLUENTE O CUERPO RECEPTOR	78
5.5. AJUSTES METODOLÓGICOS.....	78
6. RESULTADOS	79
6.1. CUANTIFICACIÓN DE LA HUELLA HÍDRICA GRIS DEL RELLENO SANITARIO DOÑA JUANA, UBICADO EN EL TRAMO 2 DE LA CUENCA DEL RÍO TUNJUELO.	79
6.1.1. Huella hídrica gris total.....	80
6.1.2. Huella hídrica gris por grupos de contaminantes.	82
6.2. ANÁLISIS DE SOSTENIBILIDAD DE LA HUELLA HÍDRICA GRIS DEL RELLENO SANITARIO	87
6.2.1. Sostenibilidad ambiental.	87
6.2.2. Sostenibilidad Económica.	89
6.2.3. Sostenibilidad Social.	93
6.3. FORMULACIÓN DE ESTRATEGIAS DE RESPUESTA PARA LA GESTIÓN DE LA HUELLA HÍDRICA GRIS	95
7. DISCUSIÓN	97
7.1. ANÁLISIS DE SOSTENIBILIDAD ECONÓMICA	102
7.2.1. Prestaciones de la actividad de Disposición Final.....	104
7.2.2. Seguimiento al saneamiento básico del tramo 2 de la cuenca río Tunjuelo.	104
7.3. FORMULACIÓN DE ESTRATEGIAS DE RESPUESTA	106
8. CONCLUSIONES.....	107
9. RECOMENDACIONES	111
BIBLIOGRAFÍA	113

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Escenario tratamientos para lixiviados propuestos por Resolución 720.....	50
Tabla 2.Marco legal.....	59
Tabla 3. Tramos Río Tunjuelo-Resolución 5731 de 2008 - SDA.....	71
Tabla 4. Coordenadas geográficas extremos del RSDJ (Genivar, 2014).....	71
Tabla 5. Comparación de parámetros por resolución y valores finales de referencia.	77
Tabla 6. Valores de huella hídrica gris promedio por parámetro y total.	79

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1. Línea de Tiempo de la Huella Hídrica – Ámbito Internacional.....	27
Figura 2. Línea de Tiempo de la Huella Hídrica – Ámbito Nacional.	32
<i>Figura 3. Objetivos de Desarrollo Sostenible. Fuente: DNP, 2016.....</i>	<i>35</i>
Figura 4. OCDE – Colombia.....	37
Figura 5. Economía lineal vs Economía Circular.....	42
Figura 6. Diagrama de flujo de procesos Relleno Sanitario Doña Juana	47
Figura 7. Huella Hídrica.....	55
<i>Figura 8. Fases de la metodología IICA para cálculo de huella hídrica.....</i>	<i>56</i>
Figura 9. Área de estudio en la cuenca del río Tunjuelo	70
Figura 10. Estaciones de muestreo en el tramo 2 del río Tunjuelo	72
Figura 11: Distribución de la huella hídrica gris por parámetro analizado.	81
Figura 12: Conformación de la huella hídrica gris del grupo de metales en transición.	83
Figura 13: Conformación de la huella hídrica gris del grupo otros metales.	84
Figura 14: Conformación de la huella hídrica gris del grupo metales alcalinos, alcalinotérreos, metaloides y no metales.....	85
Figura 15: Conformación de la huella hídrica gris del grupo compuestos orgánicos..	86
Figura 16: Conformación de la huella hídrica gris de la demanda biológica de oxígeno DBO.	87
Figura 17. Índice de contaminación del agua, (NCA) en función de valores mínimos, promedio y máximos de huella hídrica gris total.....	88
Figura 18. <i>Índice de contaminación del agua, (NCA) por contaminante.</i>	<i>89</i>

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1. Resultados de laboratorios. ANALQUIM	122
Anexo 2. Medición de parámetros. Resolución 166 de 2008. Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca - CAR	123
Anexo 3. Coordenadas geográficas extremos del RSDJ	124
Anexo 4. Descripción de parámetros evaluados	128
Anexo 5. Conversión de datos	150
Anexo 6. Comparativo de los Contaminantes con los Parámetros establecidos en la Normativa:	151

INTRODUCCIÓN

Una generación cada vez mayor de residuos sólidos se está convirtiendo en un problema muy preocupante a nivel mundial, particularmente en economías emergentes, y países en desarrollo como Colombia. Por otro lado, en la mayoría de los centros poblados del mundo, el manejo de residuos sólidos se lleva a cabo mediante su disposición en sitios de confinamiento denominados rellenos sanitarios, los cuales generan impactos negativos al ambiente tales como la generación de lixiviados y gases (Giraldo, 2014), y en caso de manejarse inadecuadamente puede contaminar las aguas (superficiales y subterráneas), el aire, el suelo (superficial y subsuelo), para luego ingresar al ser humano ya sea por vía oral, aérea o por contacto (Secretaría Distrital de Salud, 2015).

En el caso de Bogotá y algunos municipios aledaños, existe el Relleno Sanitario Doña Juana, como la principal estrategia para la gestión de residuos sólidos, el cual viene funcionando desde 1988, (GENIVAR, 2013) generando desde su diaria operación, impactos en el ambiente, incluido el vertimiento de lixiviados al sistema hídrico natural, que en este caso es la cuenca del río Tunjuelo, donde se ubica dicho relleno, por lo que ha sido permanente objeto de cuestionamientos a cerca de su sostenibilidad ambiental.

Existen múltiples metodologías, matrices y modelos de evaluación de impactos ambientales, que su fin último como lo plantea Conesa (1993) es “establecer un equilibrio entre el desarrollo de la actividad humana y el Medio Ambiente, sin pretender llegar a ser una figura negativa u obstruccionista, ni un freno al desarrollo, sino un instrumento operativo para impedir sobreexplotaciones del medio natural” (p. 144).

Una de las metodologías más utilizadas para analizar el impacto de una actividad antrópica en el recurso hídrico, es el cálculo de huella hídrica, desarrollado ampliamente por el investigador Arjen Hoekstra (ÖZTAS y CELÍKYAY, 2018), quien incluyó el concepto de cuenca hidrográfica como unidad espacial de evaluación.

En 2017, y con base en lo anteriormente mencionado, el Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura IICA, publicó una guía metodológica basada en la medición de las huellas verde, azul y gris, de las actividades antrópicas desarrolladas dentro de una cuenca hidrográfica (IICA, 2017).

Los procedimientos utilizados actualmente para evaluar sostenibilidad ambiental, desde un enfoque de huella hídrica, no existen en el relleno sanitario Doña Juana. A la fecha, solo se procede con la consolidación de reportes de los análisis de laboratorios realizados a los vertimientos. Se carece de un enfoque que promueva y apoye el uso sostenible del recurso hídrico a través de información transparente y completa (construcción de indicadores), escasez en la organización de la información relacionada con el consumo y la contaminación del agua, en relación a su disponibilidad, no se cuenta con una metodología que permita la generación de propuestas para el mejoramiento en los procesos que se desarrolla al interior de un relleno a partir del análisis e interpretación de los resultados de vertimientos.

La metodología de medición de huella hídrica gris del Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura IICA, resulta una alternativa viable, económica y sencilla, no solo para la consolidación de la información de reportes, si no para ir un paso más adelante y construir propuestas de mejoramiento en los procesos inherentes a la construcción de indicadores.

El presente trabajo tuvo como objetivo desarrollar un análisis de sostenibilidad ambiental del relleno sanitario Doña Juana, a partir de los lineamientos establecidos por la metodología del Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura IICA, para cálculo de huella hídrica en una cuenca hidrográfica, aprovechando su flexibilidad y la posibilidad de generar estrategias de respuesta que conlleven a la reducción de impactos en la cuenca, y al mismo tiempo, probar la pertinencia y aplicabilidad de esta metodología para una actividad tan específica como la disposición final de residuos sólidos.

Se observó que el análisis de sostenibilidad, particularmente el económico y social, requiere mayor especificidad en función de las particularidades de la actividad de relleno

sanitario, lo que ha permitido plantear una nueva propuesta de análisis, como aporte de este trabajo.

Con el desarrollo del trabajo se pudo evidenciar que es posible hacer análisis de sostenibilidad desde el enfoque de huella hídrica, pero que actualmente existen limitaciones de tipo técnico, que impiden que los resultados sean concluyentes, y sean base para toma de decisiones y planteamiento de estrategias de respuesta.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Uno de los retos más antiguos para afrontar el crecimiento de los centros urbanos, es la disposición adecuada de residuos sólidos, no sólo aquellos generados desde la vivienda, sino desde el desarrollo de actividades productivas, lo que llevó a la creación de los rellenos sanitarios manejados técnicamente, con el fin de mitigar su impacto en el entorno, y lograr una actividad sostenible en términos ambientales. (CONPES 3874, 2016)

En Colombia el relleno sanitario es el método de tratamiento predominante para el manejo de los residuos sólidos municipales. Sin embargo, las opciones para emplazar nuevos depósitos son cada vez más limitadas y socio-ambientalmente más cuestionadas o socialmente en disputa, razón por la cual se requiere que los rellenos sanitarios realicen una gestión ambientalmente sostenible de los residuos. (CEPAL, 2014)

En el país, precisamente para la ciudad de Bogotá existe el Relleno Sanitario Doña Juana - RSDJ, ubicado en la localidad de Ciudad Bolívar, el cual realiza la disposición final de los residuos sólidos generados en la capital. La disposición controlada se lleva a cabo en este lugar, único vertedero de basura de Bogotá, ubicado en cerro tutelar de Doña Juana, entre los sectores de Mochuelo Alto y Mochuelo Bajo, tramo 2 de la cuenca del río Tunjuelo, que adicionalmente recibe los residuos sólidos generados en seis (6) municipios de Cundinamarca. (GENIVAR, 2013)

Estudios realizados por la administración distrital, calculan que, en el 2017, el sector residencial y comercial de la ciudad de Bogotá generó un total de 6.868 toneladas diarias de residuos, los cuales fueron conducidos al relleno Doña Juana. (UAESP, 2017). A pesar de que hoy la alternativa de disposición final de residuos sólidos más utilizada son los rellenos sanitarios, debido a su fácil implementación y al manejo masivo de desperdicios, estos generan un impacto ambiental negativo sobre los diferentes medios físicos, bióticos y sociales. (Muñoz y Sanchez, 2013)

El área actual del RSDJ es de 500 Ha; de éstas, 150 Ha han sido destinadas a la disposición de residuos, las cuales están repartidas en ocho zonas, donde se han

desarrollado las etapas de disposición de residuos sólidos ordinarios y de los residuos hospitalarios (Secretaría Distrital de Salud, 2015).

Según información reportada por el Centro de Gerenciamiento de Residuos Doña Juana S.A. E.S.P. ante la Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico – CRA, el relleno sanitario se encuentra en el proyecto Fase 2 de Optimización de Zona VIII, licenciado por la Corporación Autónoma Regional – CAR, cuya fase estimó una capacidad de disposición de (...) *1`6072.533 metros cúbicos que compactados a una tasa del 1.071ton/m<sup>3</sup> equivalente a 17`197.610 toneladas que representan una ampliación de la vida útil del RSDJ en aproximadamente 7,6 años a partir de mayo de 2015 hasta el primer trimestre 2022. (...)* (Decreto 843, 2018)

Se estima que en la Cuenca del Tunjuelo se encuentran asentadas 2.5 millones de personas, distribuidas en cinco localidades: Tunjuelito, Usme, Ciudad Bolívar, Bosa y Sumapaz. Un alto porcentaje de esta población vive en condiciones de marginalidad social, pobreza y segregación. (EAB - E.S.P., 2006)

Con la entrada en operación del relleno sanitario surgieron conflictos relacionados con la percepción de la comunidad sobre la ocurrencia de impactos negativos causados por el relleno en la salud de la población, situación que se agravó después de la emergencia sanitaria generada por el deslizamiento en la Zona II del RSDJ en el año de 1997. (Universidad del Valle, 2006)

Según la comunidad aledaña, el relleno es el mayor vector de contaminación en la cuenca del río Tunjuelo; su existencia y funcionamiento indisponen a la población, la cual se ve afectada por la emisión de gases tóxicos que contaminan el aire y afectan la salud; a lo anterior se suma el vertimiento de lixiviados que contaminan el aire, el agua y el suelo, desconociéndose aún su efecto, sobre las aguas subterráneas (Secretaría Distrital de Ambiente, 2007).

Estudios de la Agencia de Protección Ambiental de EE.UU, determinaron que los rellenos sanitarios se ubican como la veintiseisava fuente de emisión de compuestos peligrosos al aire, siendo los principales los Compuestos Orgánicos No Metanogénicos (NMOC), que bajo la forma de Compuestos Orgánicos Volátiles (COV) representan el

85% de éstos en rellenos mixtos. (Universidad del Valle, 2006).

En un proceso de caracterización adelantado por la Unidad Administrativa Especial de Servicios Públicos – UAESP se determinó que el 51,32% de los residuos sólidos que ingresan al relleno sanitario, lo conforma una fracción orgánica. (UAESP, 2017). Cabe destacar que en el proceso de descomposición de los residuos orgánicos, se produce metano (CH_4), un gas relevante en la generación de gases efecto invernadero. (Díaz Jiménez, *et al.*, 2017).

Una problemática plenamente identificada en la operación del relleno sanitario se relaciona con la generación de lixiviados, impacto que regularmente es objeto de inspección y vigilancia por las autoridades ambientales competentes y por la entidad encargada de velar por la operación del relleno. La composición del lixiviado está sujeta a las características físicas del área de operación, factores naturales como la lluvia, la humedad atmosférica y temperatura, la cantidad de residuos confinados, el nivel de degradación de los desechos y del volumen producido de los mismos. (Méndez *et al.*, 2004)

Resulta más complejo estimar la cantidad de lixiviado producido en un relleno sanitario que en un terreno natural. Debido a ello es que la estructura y composición de los residuos (del 5% al 30% de material pequeño) imposibilita que el relleno se humedezca en forma equilibrada, por lo cual es común la formación de canales gruesos de lixiviados (Lu *et al.*, 1985).

La cuenca urbana de drenaje del río Tunjuelo es la más pobre en infraestructura sanitaria troncal y secundaria, su cauce recibe las aguas residuales de la totalidad de los barrios ubicados en su vertiente sur, entre Usme y Bosa, y de la mayor parte de los barrios de la localidad de San Cristóbal, Usme y Ciudad Bolívar, ya sea por vertimiento directo o a través de las quebradas o zanjas que drenan barrios como: Yomasa, Santa Librada, Chiguaza, Quiba y Limas, entre otros. (Castaño, 2015)

A pesar de que el relleno sanitario cuenta con un Estudio de Impacto Ambiental que contempla los criterios técnicos de operación del lugar y suple las exigencias establecidas por la legislación ambiental, los procesos sancionatorios contra la UAESP han continuado por parte de la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales – ANLA, particularmente por (...) *el incumplimiento de la norma de vertimientos fijada para las descargas del Relleno Sanitario Doña Juana sobre la fuente de uso público denominada río Tunjuelo (...)* (Resolución 1462, 2018, art. 1)

Este tipo de sanciones han llevado a la UAESP a considerar no solo implementar formas más eficientes de manejo de lixiviados, si no también formas de evaluar el impacto ambiental producido por los vertimientos, desde enfoques que permitan dimensionar el impacto generado, y plantear estrategias de respuesta tangibles, que aporten realmente a la sostenibilidad ambiental de la operación del relleno sanitario.

Una vez contextualizada la operación y complejidad del relleno sanitario Doña Juana, es importante cuestionar la operación del relleno sanitario, desde el punto de vista de sostenibilidad ambiental, para lo cual, desde esta investigación, se plantea realizar un análisis de la sostenibilidad ambiental del RSDJ utilizando la metodología de medición de huella hídrica gris del IICA.

Bajo este contexto, la presente investigación busca dar respuesta a la siguiente pregunta:

¿Cuáles serían las condiciones mínimas requeridas para un análisis de sostenibilidad ambiental mediante el cálculo de la Huella Hídrica Gris en el relleno sanitario Doña Juana?

2. JUSTIFICACIÓN

El manejo de los Residuos Sólidos Urbanos implica un proceso que inicia con la generación de los residuos, involucra su almacenamiento, transporte y tratamiento, y culmina con su disposición en algún sitio controlado (Jiménez Martínez, 2015).

La gestión sostenible de los residuos sólidos constituye un desafío clave que enfrentan todas las ciudades del mundo (Organización de las Naciones Unidas - ONU-Hábitat, 2010), por lo que es urgente y necesario realizar estudios dirigidos a determinar si la actividad productiva de un relleno sanitario es sostenible ambientalmente, lo que permitirá contar con información de gran valor para apoyar la toma de decisiones; ya que según información de la ONU (2012), en América Latina, los residuos generados por un 54% de la población urbana son depositados en un relleno sanitario.

En este sentido, la opción que se plantea en el presente trabajo es el enfoque de evaluación de huella hídrica, toda vez que se constituye en un apoyo al uso sostenible del recurso hídrico, por el análisis que hace, con información relacionada con consumo y contaminación del agua, en función de su disponibilidad. Puntualmente permite dimensionar teóricamente el impacto de los lixiviados generados por la operación del relleno sanitario y da la posibilidad de plantear estrategias de respuesta. (Hoekstra, y Chapagain, 2011)

El Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura IICA, adapta la metodología de evaluación de huella hídrica propuesta por Hoekstra y Chapagain (2011), dándole un contexto espacial concreto, como es la cuenca hidrográfica, teniendo en cuenta que es la unidad espacial básica en la que se llevan a cabo interacciones y procesos, bióticos, abióticos, sociales, económicos, etc., todos en relación con el recurso agua. (IICA, 2017)

El Relleno Sanitario Doña Juana, se ubica en el tramo dos de la cuenca del río Tunjuelo, la cual reviste gran importancia para la ciudad, como soporte principalmente a la vivienda y actividades económicas, como la agricultura, ganadería, minería de agregados pétreos, curtiembres, industrias de productos de aseo, entre otras, además de brindar servicios ecosistémicos de gran valor para la sociedad. (Castaño, 2015)

Por lo anterior, se considera pertinente hacer un ejercicio académico, que aporte en alguna medida al análisis de sostenibilidad de la gestión del Relleno Sanitario Doña Juana, desde el enfoque de cálculo de huella hídrica, dentro de un contexto espacial, como es la cuenca hidrográfica, y que a futuro sirva como referente para otros análisis, tanto para actividades similares (rellenos sanitarios en otros sitios) como para aportar al cálculo de huella hídrica acumulada de la cuenca.

3. OBJETIVOS

3.1. OBJETIVO GENERAL

Evaluar la sostenibilidad ambiental del relleno sanitario Doña Juana, ubicado en la cuenca del río Tunjuelo, aplicando la metodología del Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura - IICA, para cálculo de huella hídrica gris.

3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Cuantificar la huella hídrica gris del relleno sanitario Doña Juana, ubicado en el tramo 2 de la cuenca del río Tunjuelo.
- Realizar análisis de sostenibilidad ambiental, económico y social de la huella hídrica gris del área de estudio.
- Formular estrategias de respuesta para la reducción del impacto generado por vertimiento de aguas residuales al tramo 2 del río Tunjuelo, por la operación del Relleno Sanitario Doña Juana.

4. MARCO TEÓRICO

4.1. ESTADO DEL ARTE

A continuación, de manera cronológica, se describen investigaciones de evaluación de huella hídrica como una herramienta de análisis para la sostenibilidad ambiental en un contexto internacional y nacional. (Figura 1 y 2)

4.1.1. Ámbito Internacional.

El concepto de huella hídrica fue introducido en el año 2002 por el investigador Arjen Hoekstra, como un indicador basado en el consumo de agua, diferente a los métodos tradicionales aplicables al sector de la producción.

Los métodos tradicionales toman los registros sobre el uso del agua, a través de la información referente de la extracción de agua reportados por los diferentes sectores económicos. Como ejemplo de referencia, las evaluaciones sobre la demanda de agua en un país. Aunque es un reporte útil, no es un indicador muy confiable sobre el agua que realmente necesitan las personas en determinado país. El hecho es que varios bienes consumidos por los habitantes de determinada región se producen en otros lugares, por lo cual, podría darse el caso en que la demanda real de agua de una la población sea mucho más alta de lo que sugieren las extracciones nacionales de agua o viceversa. (Chapagain y Hoekstra, 2004)

La primera evaluación de la huella hídrica de las naciones titulada *“Comercio virtual de agua: una cuantificación de los flujos virtuales de agua entre naciones en relación con el comercio internacional de cultivos”* fue realizada por Hoekstra y Hung (2002). Un año más tarde Chapagain y Hoekstra (2003) realizaron la investigación *“Flujos de agua virtuales entre naciones en relación con el comercio de ganado y productos pecuarios”*. Estudios actualmente considerados como rudimentarios, los estudios actuales intentan mejorar la

evaluación utilizando datos más precisos, cubriendo más productos y refinando la metodología donde se considere necesario. (Chapagain *et al.*, 2004)

En el 2011, el Centro de Estudios e Investigación para la Gestión de Riesgos Agrarios y Medioambientales - CEIGRAM, la Universidad Politécnica de Madrid, la Universidad Complutense de Madrid, UNEP, la Consejería de Agricultura y Pesca, Junta de Andalucía y la Oficina de Planificación de la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir, realizaron el análisis de la huella hídrica extendida de la cuenca del Guadalquivir, con el fin de facilitar información para la mejora de la asignación y gestión de los recursos hídricos en la cuenca. El estudio incluyó indicadores económicos, que permitieron identificar la huella hídrica en el ciclo hidrológico y su equilibrio en la escala de la cuenca.

Durante el período 1997-2008 se produjo la expansión de las áreas de regadío, principalmente relacionadas con la extracción de agua subterránea. Las aceitunas representan el mayor consumo de agua azul, en particular en la parte superior de la cuenca (área de la cuenca incluida en las provincias de Jaén y Granada); el consumo de agua azul es relevante en la sección inferior (provincia de Sevilla) con algodón, arroz y maíz. En relación con las aguas subterráneas, la relación de uso en contraste con las aguas superficiales es mayor para los cultivos con mayor valor económico. (Samoral, 2011)

Para el año 2012 Hoekstra y colaboradores en un trabajo para el Fondo Mundial para la Naturaleza (en inglés, World Wild Fund for Nature – WWF) realizaron la evaluación de huella hídrica del río Heihe en el Oeste de China. Estudio de caso que trabajó las implicaciones de la escasez de agua relacionado con la cuantificación de la huella hídrica, en cuencas hidrográficas de zonas áridas y semiáridas.

La cuenca del río Heihe se encuentra situada en el noroeste árido y semiárido de China. Para los años 2004 – 2006, los resultados muestran que la huella hídrica fue de 1768 millones de $\text{m}^3 \text{año}^{-1}$. Mientras que un 96% de huella hídrica estuvo representada en la producción agrícola, mayor consumidor de agua, (92% para la producción de cultivos y 4% para la producción ganadera). El restante 4% fue para los sectores industrial y

doméstico. Para la huella hídrica azul (agua superficial y subterránea) fue de 811 millones de $\text{m}^3 \text{año}^{-1}$, que corresponde a una proporción de agua azul del 46%, que es mucho más alta que el promedio mundial y el promedio de China, lo anterior, obedecería principalmente a la aridez de la cuenca del río Heihe y una alta dependencia del riego para la producción de cultivos. Sin embargo, incluso en una cuenca de este tipo, la huella hídrica azul es menor que la verde (agua del suelo). Determinan finalmente los resultados que, la producción de cultivos, la optimización de los modelos de siembra de cultivos, son la clave para conseguir un uso más sostenible del agua en las regiones áridas y semiáridas (Zeng, 2012).

También en el año 2012, los investigadores A. Hoekstra y A. Chapagain desarrollaron el Manual de Evaluación de Huella Hídrica, para de la Red Internacional de Huella Hídrica (WaterFootprint Network), manual que se concibió como una “herramienta que permitía estimar el contenido de agua oculta en cualquier bien o servicio consumido por un individuo o grupo de individuos de un área específica”, manual que contiene además una serie de definiciones y métodos para la contabilidad de la huella hídrica. Señala además cómo se calculan las huellas hídricas para los procesos y productos individuales, así como para los consumidores, las empresas e inclusive países. Incluye métodos para la evaluación de la sostenibilidad de la huella hídrica y una biblioteca de opciones de respuesta a la huella hídrica.

Un avance importante enfocado a la sistematización y estandarización de la huella hídrica se dio en el año de 2014, cuando la Organización Internacional de Estandarización –ISO (en inglés, International Organization for Standardization) - desarrolló la ISO 14046 “Gestión Ambiental- Huella de agua- Principios, requisitos y directrices”. Esta norma se destaca como una opción metodológica para evaluar el impacto potencial de productos, servicios u organizaciones al agua de manera integral, ya que toma en cuenta tanto la cantidad como la calidad del agua y un enfoque de ciclo de vida. La Metodología ISO 14046 cuenta con cuatro fases: i) definición del objetivo y el alcance, ii) análisis del

inventario de la huella de agua, iii) evaluación del impacto de la huella de agua e iv) interpretación de resultados.

La ISO 14046, huella de agua, es una metodología paralela a la metodología IICA, la diferencia principal, es que la propuesta de huella hídrica tiene el contexto enfocado a un área geográficamente delimitada, definida por el relieve, como lo es una cuenca hidrográfica. (IICA, 2017).

Ambas, son herramientas que pretenden conocer el consumo de agua asociado a diversas unidades de análisis y los impactos que esos consumos producen, pero se confrontan con diferente metodología. Cada enfoque tiene distinto campo de aplicación y la utilización de uno u otro dependerá del objetivo del estudio que se pretenda adelantar. (Centro de Análisis de Ciclo de Vida y Diseño Sustentable CADIS, Embajada de Suiza en Colombia, Agencia Suiza para la Cooperación y el Desarrollo COSUDE, 2016)

Para el año 2014, La Agencia Ambiental de Londres – Reino Unido, Zhang y colaboradores realizaron para las zonas de Hertfordshire y Norte de Londres la evaluación de las huellas hídricas de las cuencas en el área de estudio (35 subcuencas de los ríos Colne, Lee, Brent y Crane y Roding.) con miras a la formulación de estrategias para alcanzar la asignación más eficiente y sostenible posible del agua. Es relevante mencionar que los autores utilizaron la metodología Evaluación de la Huella Hídrica (en inglés Water Footprint Assessment - WFA). (Hoekstra, *et al.*, 2011), la cual es la misma que se utiliza en el presente trabajo investigativo. El proyecto trabajó sobre 6 aspectos: i) el nivel de subcuenca y escala de tiempo mensual; ii) uso del agua, a nivel industrial, doméstico y agrícola; iii) el uso del agua superficial y subterránea, iv) diferentes tipos de presión humana sobre los recursos hídricos; v) escasez de agua y nivel de contaminación del agua; y vi) cambios proyectados para el recurso hídrico, con una proyección a 2060. (demanda y cambio climático para un escenario húmedo y seco). Concluyen los investigadores que la aplicación de la metodología es una herramienta útil para facilitar la identificación de qué y dónde se encuentran las presiones sobre los recursos de agua, así

como cuales serían los cambios necesarios para mejorar la sostenibilidad, la eficiencia y la equidad del uso del agua. (Zhang, Mathews, Frapporti, Mekonnen, 2014).

Con un lineamiento más enfocado al tema de objeto de interés para este trabajo de investigación (huella hídrica en relleno sanitario) en el año 2015 en La Garriga, España, Morera y colaboradores realizaron la comparación de la huella hídrica azul y gris en tres escenarios de tratamiento de aguas residuales urbanas: i) Sin tratamiento. ii) Tratamiento secundario y iii) Tratamiento con remoción de fósforo. Su objetivo fue demostrar cómo la Estación Depuradora de Aguas Residuales (EDAR) contribuye a reducir la huella hídrica total en un 51,5% y 72,4% cuando existe un tratamiento secundario y de remoción de fósforo, respectivamente.

Gómez (2016), realizó la Evaluación de la Huella Hídrica del Ciclo Integral del Agua de la Mancomunidad de la Comarca de Pamplona, España. Detalla el autor que el Ciclo Integral del Agua – CIA, inicia en el abastecimiento de agua potable (captación, potabilización y distribución para su consumo) y termina en el saneamiento y depuración de las aguas residuales, antes de ser reintegradas al cauce natural. El concepto de CIA incluye además otros servicios y productos relacionados con la gestión del agua como la generación de energía en centrales hidroeléctricas y a partir de biogás o la valorización de residuos mediante compostaje.

La investigación da una relevancia importante al concepto de huella hídrica gris y al presente trabajo de grado pues como señala Gómez (2016) “La Huella Hídrica Gris es un indicador que no depende de la concentración de contaminantes sino de la carga total de los mismos y de las normas de calidad ambiental”. (p. 4).

La evaluación logró determinar que el 64% la huella hídrica total se genera en la red de abastecimiento debido al elevado volumen de agua no registrada, mientras que el 18% lo aporta la Estación de Tratamiento de Agua Potable (ETAP), por otro lado, el 14% corresponde a la huella hídrica de las fuentes de suministro, es decir, a la evaporación de los embalses. Por último, el 4% se genera en la Estación Depuradora de Aguas

Residuales (EDAR), debido principalmente a la evaporación del agua retenida en los decantadores y balsas de aireación (Gómez, 2016).

Por otro lado, se encuentra la aplicación del concepto de huella hídrica el cual es relativamente nuevo, a nivel nacional e internacional se han desarrollado algunos estudios que se relacionan a continuación: Para el 2017 el Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura, IICA desarrolló una guía metodológica para cálculo de huella hídrica en una cuenca hidrográfica. La metodología consta de 4 fases: Definición de objetivos, contabilidad de huella hídrica, análisis de sostenibilidad y formulación de estrategias de respuesta para la gestión de la huella hídrica (IICA, 2017).

Para el año 2018, los investigadores Leal, Cecilio y Zaneti, adelantaron un estudio de huella hídrica azul, verde y gris para la cuenca hidrográfica de Itapemirim, Espírito Santo, Brasil, tomado como referencia información recopilada durante los años 2007 a 2012, los sectores incluidos fueron el de agricultura, ganadería, silvicultura, suministro y saneamiento urbano. La huella hídrica total de la cuenca fue de 6,4 mil millones de m³ año⁻¹. Respecto a la huella hídrica gris se consideró la suma del agua gris proveniente de la agricultura (contaminación por fertilizantes nitrogenados) y del saneamiento. (parámetro Demanda Bioquímica de Oxígeno). (Leal, Cecilio, Roberto y Zanetti, 2018). El estudio en mención es útil como referencia para la presente investigación, en el entendido que los investigadores realizan el análisis de huella hídrica en el marco de una cuenca hidrográfica, con evaluación de huella hídrica gris.

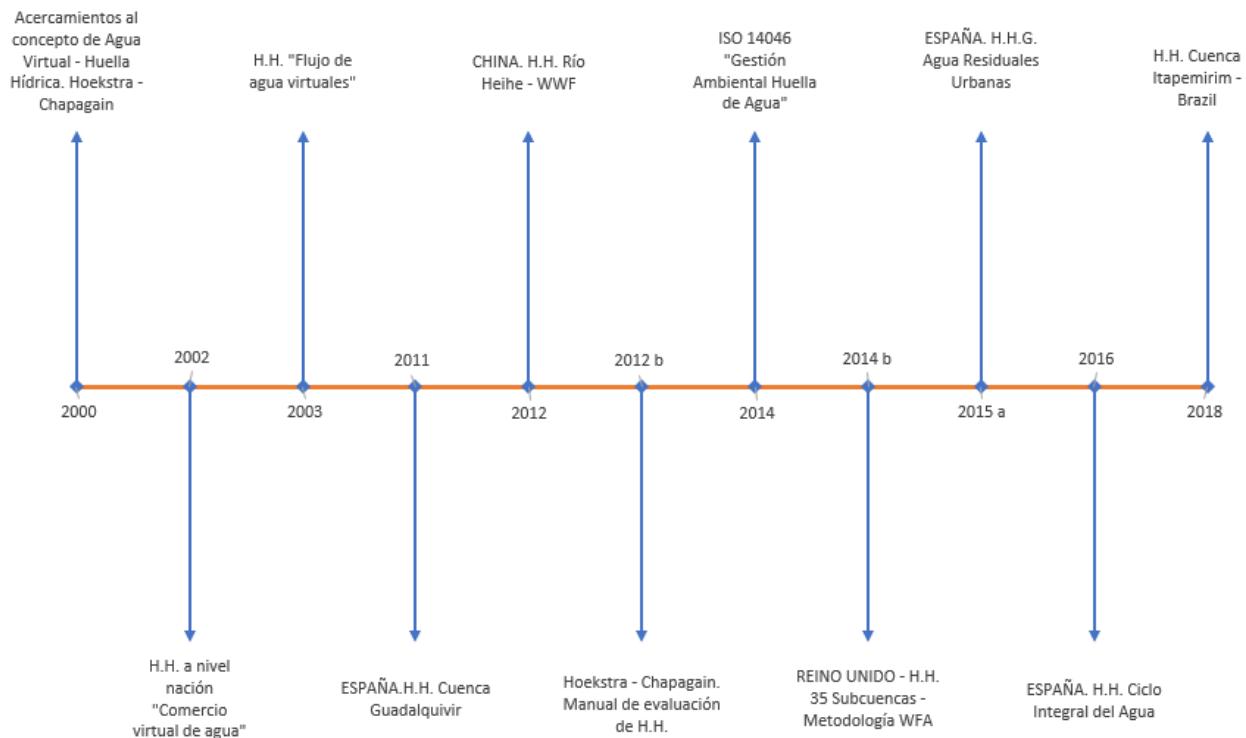


Figura 1. Línea de Tiempo de la Huella Hídrica – Ámbito Internacional

4.1.2. Ámbito nacional.

En el contexto nacional y local, se destacan los estudios en los cuales se realizaron estimaciones de la huella hídrica.

Iniciando la línea cronológica, en 2008 se adelantó una investigación de Huella Ecológica y Biocapacidad para la ciudad de Manizales. Considerando que es la capital del Departamento de Caldas, la ciudad juega un papel importante dentro las actividades cotidianas del departamento, pues aprovisiona los recursos, alimentos, el agua, la energía, materias primas para la construcción, vestido, los espacios para la disposición de residuos sólidos, etc. La Huella Ecológica para Manizales, se estimó en 2.899 hectáreas por persona año. Comparativamente hablando, es una huella que está por encima de la capacidad del planeta (2.1 ha/persona/año). Resalta la investigación que probablemente no es un indicador exacto, pues no se contó con toda la información requerida para estimar el indicador o parte de la información que se encontraba dispersa en muchas instituciones. Sin embargo, los resultados permitieron establecer una tendencia a considerar de cara a la posible adopción de políticas para la gestión ambiental en la ciudad. Se trae a referencia esta investigación por qué parte de sus resultados incluyeron el tema de gestión de residuos. Determinando que el Municipio presenta una considerable biocapacidad en términos de la disposición controlada de residuos sólidos en el Relleno Sanitario “La Esmeralda”, máxime si se asume la expansión de su vida útil hasta el año 2.025, siendo receptor incluso de los residuos generados en otras municipalidades del Departamento de Caldas. No obstante, en el estudio se menciona que debería analizarse las consecuencias de los lixiviados y olores dado que el relleno es a cielo abierto. (Tobasura, 2008)

En el año 2009, un proyecto piloto ejecutado por las empresas Suizagua Colombia y la Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación – COSUDE realizaron la medición de huella hídrica en cuatro empresas suizas con operación en Colombia: Clariant, Nestlé, Syngenta y Holcim., Desarrollaron el ciclo de vida de los productos o servicios que provee cada una de las empresas en mención. Obtuvieron la cuantificación de la cantidad de

agua consumida y contaminada, en qué lugar y en qué periodo. Con esta información lograron identificar las prioridades para la reducción, en las operaciones internas y en las cadenas de suministro. Enfocados en la promoción de la gestión del agua, identificaron acciones de responsabilidad social y ambiental empresarial.

Un resultado relevante de este proyecto es que permitió el escalamiento y replicación en los siguientes ámbitos: i) Contribución técnico-científica al desarrollo del estándar internacional ISO 14046 sobre Huella Hídrica: requisitos y lineamientos. ii) un grupo de 7 empresas colombianas avanzan en la medición y reducción de su Huella Hídrica, en coordinación con el Centro Nacional de Producción Más Limpia; iii) análisis de la Huella Hídrica en la cuenca en el Río Porce, en coordinación con el Centro de Ciencia y Tecnología de Antioquia (CTA); iv) en Chile y Perú, 10 empresas inician este proceso, en el marco del proyecto SuizAgua Andina. (COSUDE, 2013).

En el año 2012 la WWF desarrolló una Investigación que facilitó la priorización de un grupo de 21 subzonas hidrográficas (Bajo San Jorge, Ciénaga Grande de Santa Marta, Medio y Bajo Cesar, los ríos: Ariguanó, La Vieja, Lebrija, Chicamocha, Suárez, Carare, Bogotá, Morales, Negro, Lagunilla, Porce, Samaná, Saldaña y Paez, así como los directos Bajo Magdalena y Directos Bajo Cauca – Ciénaga La Raya). (Arévalo *et al.*, 2012). Trabajo que se fundamentó en los resultados de la cuantificación de la huella hídrica agrícola, que las propone como estudios de caso para reducir la escala y ahondar en la metodología. A partir de los resultados a escala nacional, se dio prioridad a la cuenca del río Porce para la ejecución de un primer estudio de caso que permitiría profundizar en la aplicación metodológica de los conceptos de huella hídrica y ampliaría el alcance del estudio incluyendo otros sectores prioritarios de la economía (CTA, 2013).

En el año 2013 el Centro de ciencia y tecnología de Antioquia - CTA realizó la evaluación de la huella hídrica del Río Porce. Su objetivo principal se concentró en procesos participativos de gestión integrada del recurso hídrico de la huella del río Porce y como complemento a los indicadores tradicionales de gestión del recurso hídrico por

cuenca a nivel nacional (IDEAM, 2014). Por lo cual se esperaba que sus resultados aportaran a la Formulación de una respuesta orientada a lineamientos de política pública, resultado de un proceso participativo e incluyente en el que participaron los principales tomadores de decisión de la cuenca. Por lo anterior, la investigación del CTA se identifica como un antecedente relevante en el tema de medición de huella hídrica.

En el estudio se realizó medición de las tres huellas hídricas (azul, verde y gris), se contemplaron los análisis ambientales, sociales y económicos de los ríos Aburrá, Río Grande, Porce Medio, Río Guadalupe, Porce Medio, Mata y Porce Bajo. Incluyeron información base de cinco sectores; agropecuario, industrial, doméstico, generación de energía hidroeléctrica y minero. El ejercicio práctico de aplicación geográfica de evaluación de huella hídrica en la cuenca del Río Porce detalla la situación específica, geográfica y temporalmente explícita, y reconoce su aplicación como una herramienta para la Gestión Integral del Recurso Hídrico. (CTA, 2013)

En el mismo año (2013) se identificó un trabajo de grado de maestría titulado Evaluación de la huella hídrica de la ciudad de Bogotá como una herramienta de gestión del recurso hídrico en el área urbana. En esta investigación se toma como fuente de información lo reportado en Sistema Único de Información – SUI y para la estimación de huella gris se tuvo en cuenta estadísticas de volúmenes de descarga de vertimientos al río Bogotá de los tres principales afluentes tributarios. Ríos Salitre, Fucha, Tunjuelo, tomando un único parámetro, sólidos totales en suspensión. (SST). (Ivanova, 2013).

Como resultado, la investigación concluyó que no existen registros históricos confiables de los parámetros de calidad del agua para poder evaluar su comportamiento a través de los años, así como la incertidumbre en los datos disponibles. Algo con lo que, a través del presente trabajo de investigación se coincide, toda vez que la información suministrada por el relleno sanitario Doña Juana, es bastante limitada.

Finalmente, la investigación arrojó una huella hídrica gris para la ciudad de Bogotá para el año 2008 de 562,242 M m³/año, necesarios para remover la concentración de los SST

hasta su concentración natural. (Ivanova, 2013)

Para el año 2014, en el marco de las obligaciones de vigilancia y control de la Contraloría de Bogotá D.C. se adelantó la estimación de las huellas hídricas y de carbono para el Distrito Capital, específicamente el estudio se centralizó en calcular la huella hídrica verde, azul, gris y huella virtual de diferentes sectores (doméstico, industrial, alimentos y disposición de residuos) de la ciudad. La metodología empleada para estimación de la Huella Hídrica de Bogotá se basó en la propuesta por el manual de Evaluación de huella hídrica (Hoekstra *et al.*, 2011)

Señala el estudio que los indicadores Huella Hídrica y Huella de Carbono son herramientas útiles para valorar el aprovechamiento y afectación de los recursos hídricos y atmosféricos de la ciudad. Así mismo, los indicadores utilizados permiten deducirlas afectaciones a las actividades humanas y los demás recursos en función al estado del agua y el aire. (Castillo Rodríguez y Castro Chaparro, 2016)

El estudio es relevante en el contexto de la presente investigación, en el entendido que, para la estimación de huella hídrica gris se contempló la disposición de residuos sólidos en el relleno sanitario Doña Juana, contemplando la utilización de tres parámetros (Demanda Bioquímica de Oxígeno - DBO5, Grasas y Aceites, Fenoles) y se convierte en un marco de referencia para el desarrollo de la presente investigación. Los resultados estimaron que la huella hídrica para la Bogotá está compuesta en un 51,78% por aportes de agua gris, principalmente generados por el sector doméstico seguido por el generado por Residuos sólidos y el sector industrial, un índice de contaminación de 9,14, lo evidencia la constante contaminación al recurso hídrico. Esto quiere decir que se debería emplear 9 veces la cantidad de agua de abastecimiento para llevarla a las condiciones establecidas por la legislación vigente. (Castillo Rodríguez *et al.*, 2016)

Los investigadores Ariza y Arévalo (2018), realizaron la estimación de la huella hídrica verde y azul para el sector cafetero del Huila, en el marco de apoyo y promoción del uso sostenible del recurso hídrico. Caracterizaron los procesos de cosecha y pos-cosecha del producto, para calcular el impacto generado sobre la cantidad del agua.

La metodología empleada fue la publicada por el manual de Evaluación de la huella hídrica, en 8 microcuencas del macizo colombiano (La Negra, Naranjos, Criollos, Guachicos, El Cedro, Guarapas, El Pital, Suaza). Reporta la investigación que los valores de huella hídrica verde por unidad de producto, en promedio por cuenca fue de 6.328 l/kg café; valores de huella hídrica azul, se dividieron en demanda hídrica por producto, el cual fue de 233,2 l/kg y el valor de producto presenta un promedio por cuenca que fue de 16,1 l/kg. (Ariza y Arévalo, 2018)

En Colombia hasta el presente, no se han adelantado estudios sobre medición de huella hídrica utilizando la metodología IICA, para relleno sanitario, por lo que el presente estudio constituye un aporte importante en esta área del conocimiento.

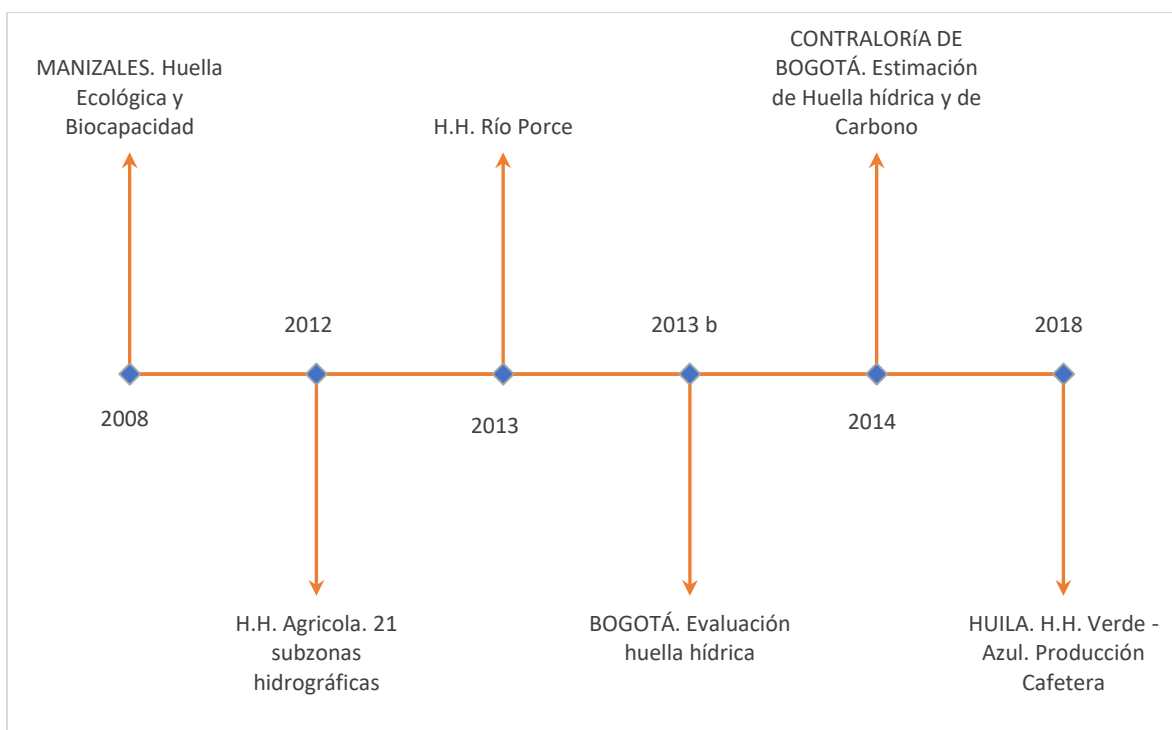


Figura 2. Línea de Tiempo de la Huella Hídrica – Ámbito Nacional.

4.2. MARCO CONCEPTUAL

4.2.1. Sostenibilidad Ambiental.

La sostenibilidad ambiental es un concepto que ha sido aplicado en mayor medida a nivel regional y nacional, pero poco usado nivel local (Mapar *et al.*, 2017). No obstante, actualmente la presión social ha hecho que los gobiernos trabajen en la implementación de principios y metas sostenibles a nivel local, incluyendo ciudades bajas en carbono, resilientes al clima, eficientes en el uso del agua y en el manejo de residuos (Mapar *et al.*, 2017). Este último, constituye uno de los desafíos más importantes para la gestión local dirigida a la sostenibilidad ambiental, pues es la externalidad que evidencia en gran medida el desequilibrio en la relación hombre-naturaleza desde el punto de vista sistémico (Castro, 2014). En los últimos años, por hacer parte integral del enfoque de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, aprobada en septiembre de 2015 por la Asamblea General de las Naciones, la cual establece una visión de cambio hacia la sostenibilidad económica, social y ambiental de los países que la suscribieron, entre ellos Colombia, y será la guía de referencia para el trabajo para los próximos 15 años (CEPAL, 2016).

La sostenibilidad ambiental no solo se concibe como el equilibrio necesario entre demanda de recursos para el desarrollo de una actividad productiva, con el menor impacto ambiental posible y sostenible en el tiempo, sino que involucra una dimensión empresarial, regional o local, que se presenta como una forma de visualización del impacto en cuanto a su magnitud e intensidad, medible por indicadores de diferentes grados de complejidad (León, 2013).

Por otra parte, la preocupación global por el desarrollo sostenible ha hecho replantear varios aspectos organizacionales a nivel estratégico, buscando contribuir a la minimización de los impactos negativos al ambiente. Para mitigarlos, las cadenas de suministro son responsables de garantizar que su gestión contemple estrategias como la reducción de residuos en la producción de bienes de consumo, las operaciones amigables

con el ambiente, el manejo de los mercados secundarios y el cumplimiento de normas ambientales (Kocabasoglu, Prahinski, & Klassen, 2007).

4.2.2. Colombia y los Objetivos de Desarrollo Sostenible.

Colombia, como miembro fundador de la Naciones Unidas en el año de 1945, se comprometió a cumplir los Objetivos de Desarrollo del Milenio (ODM), plataforma que ha permitido que los diferentes países alrededor del mundo se comprometieran en el logro de ocho desafíos, considerados el primer escalón del desarrollo humano. En la Declaración del Milenio se formularon ocho objetivos que incluyeron uno, relacionado con el sustento del medio ambiente, y en respuesta de aquellos que demandaban un cambio hacia posturas más sociales de los mercados mundiales y organizaciones financieras, se añadió el Objetivo 8: Fomentar una Asociación Mundial para el Desarrollo. (Figura 3)

Cada Objetivo se dividió en una serie de metas, un total de 18, cuantificables mediante 58 indicadores concretos. Por primera vez, la Agenda Internacional del Desarrollo puso una fecha para la consecución de acuerdos concretos y medibles. En el año 2015 Colombia se acogió a este compromiso de desarrollo global a través de los CONPES (Consejo de Política Económica y Social) 91 y 140, y de esta manera se convirtió en Política Pública Nacional (PNUD, 2015).

En los últimos años, se han generado 17 nuevos objetivos (Figura 3) contenidos en el borrador ZERO del grupo de trabajo abierto de Naciones Unidas. Muchos de ellos reiteran los desafíos planteados en los ODM, pero con metas mucho más universales que incluyen temas como el Desarrollo Económico Sostenible y la construcción de sociedades en paz como garantes del bienestar social. Esta agenda se implementará entre los años 2015 al 2030.

En este orden de ideas y desde el compromiso político del país, el Plan Nacional de Desarrollo 2014-2018 *“Todos por un nuevo país”* contempla objetivos y metas

estratégicas orientadas a la generación y fortalecimiento de las condiciones necesarias para construir una sociedad en paz, equitativa y educada (PNUD, 2015).



Figura 3. Objetivos de Desarrollo Sostenible. Fuente: DNP, 2016

De los objetivos de desarrollo sostenible, 17 tiene relación directa con la presente investigación son el objetivo 6 y 12.

Objetivo 6. Asegurar la disponibilidad y la gestión sostenible del agua y el saneamiento para todos. Métodos adecuados para el abastecimiento de agua, es un tema que afecta el bienestar y salud de los colombianos. Los esfuerzos relacionados con este objetivo apuntan para que, en el año 2030, el país tenga una cobertura total. Actualmente, la cobertura está en 92,9%, en los últimos siete años se ha logrado que 6,3 millones de colombianos tengan acceso a agua potable por primera vez y 7 millones a alcantarillado. (Departamento Nacional de Planeación, 2018)

Objetivo Propuesto 12. Garantizar modalidades de consumo y producción sostenible. Incrementar la tasa de reciclaje y nueva utilización de residuos sólidos es un tema que requiere amplios esfuerzos de los gobiernos locales y de todos los ciudadanos.

En el año 2012, se contaba una tasa de 7,2%; para el 2018 se cerrará en 10%. Para el 2030, se espera que el país llegue a 17,9%. Teniendo en cuenta el Objetivo 12, el gobierno nacional expidió la Política Nacional para la Gestión de Residuos Sólidos de manera integral en el marco de la economía circular, que permitirá alcanzar dichas metas. (Departamento Nacional de Planeación, 2018)

Cabe mencionar, que los preceptos del “desarrollo sostenible” (*“quien contamina paga”, el “consentimiento previo e informado”, las “responsabilidades comunes pero diferenciadas”*) (Leff, 2014) se han convertido en lemas poco creíbles, con alcances limitados y con dudas respecto a su aporte a una toma de decisiones que contribuya a un cambio de comportamental para mitigar la degradación ecológica.

En este sentido Duquino Rojas (2018), plantea consolidar una propuesta desde una perspectiva latinoamericana que considere los saberes ancestrales y locales, que permita recrear un nuevo sentido a relación sociedad -naturaleza, y generar la necesidad de cambios significativos en los actuales procesos de producción.

4.2.3. Colombia en la OCDE.

En el mes mayo de 2018, Colombia ingreso a la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos – OCDE, (Figura 4), con el objeto de fortalecer sus políticas públicas, que aporten al bienestar político y social de los colombianos y fortalecer los factores que impulsan el desarrollo económico, social y ambiental. (International Center for Trade and Sustainable Development, 2018).



Figura 4. OCDE – Colombia. Fuente: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Recuperado de: <http://www.minambiente.gov.co/index.php/noticias/2827-colombia-ingresa-al-comite-de-quimicos-de-la-ocde>

La organización cuenta con el Programa de Evaluaciones del desempeño ambiental que proporciona valoraciones independientes de los avances de cada país en el cumplimiento de los compromisos de sus políticas ambientales nacionales e internacionales y realiza las recomendaciones pertinentes sobre esas políticas. Este programa se ejecuta para la promoción del aprendizaje mutuo, fortalecer la rendición de cuentas de los gobiernos y para mejorar el desempeño ambiental de los países, tanto de forma individual como colectiva. Las evaluaciones se elaboran a partir de datos económicos y ambientales. Para el caso nacional, el informe corresponde a la primera evaluación del desempeño ambiental del país. Considera los avances logrados en el ámbito del desarrollo sostenible y el crecimiento verde, con especial atención a la gestión

de residuos, y a las políticas que promueven la protección de la biodiversidad, así como su aprovechamiento sostenible (OECD/UN ECLAC, 2014).

Según el informe, Colombia ha logrado progresos destacables en la elaboración de marcos normativos para el manejo de residuos municipales y de residuos peligrosos, se han establecido principios y objetivos de política y se cuentan con reglamentos técnicos, a pesar de ello, es importante que los municipios desarrollen planes de gestión integrada de residuos sólidos. La recopilación de información aun es limitada para la orientación de las políticas públicas. Se han concretado herramientas institucionales para reunir datos sobre desechos sólidos municipales y residuos peligrosos. (CEPAL, 2014)

En el tema de ordenación de cuencas hidrográficas, expone el informe que, se deben alinear de mejor manera los diversos instrumentos de planificación, como los planes de gestión de las cuencas hidrográficas (Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico de 2010). Considera de manera particular, como el gasto público en materia de agua y saneamiento se duplicó en el último decenio. Otro factor a tener en cuenta, considerado como un obstáculo para la ampliación de la infraestructura relacionada con el agua, es el bajo nivel de las tarifas a los usuarios, que siguen siendo inferiores al costo de la prestación de los servicios de abastecimiento. Recomendamos el informe, mejorar la sostenibilidad financiera, social y ambiental de la prestación de servicios de abastecimiento de agua y saneamiento mediante: i) la evaluación de los subsidios relacionados con el agua en todos los sectores, a fin de garantizar el no desperdicio de agua; ii) una mejor focalización de los recursos públicos para ampliar el acceso a los servicios de agua y saneamiento; iii) un incremento del gravamen por contaminación de agua con objeto de aumentar los ingresos disponibles para inversiones en infraestructura de tratamiento de aguas residuales, y iv) el desarrollo de capacidad de los municipios más pequeños para gestionar los contratos de prestación de servicios con el sector privado (OECD/UN ECLAC, 2014).

4.2.4. Gestión Integral de residuos sólidos.

Para el caso nacional, la problemática ambiental de los residuos sólidos ha tomado fuerza en la última década, y a través del tiempo ha sido reglamentada su recolección, transporte, tratamiento y disposición final. La política para la gestión de los residuos sólidos del país tiene su fundamento en la Constitución Política de Colombia, en la Ley 99 de 1993 y la Ley 142 de 1994.

Actualmente, existen lineamientos para abordar el tema residuos sólidos, y Colombia realiza los esfuerzos pertinentes para adoptar las medidas necesarias para cumplir diversos compromisos y metas nacionales e internacionales relacionadas con la gestión integral de residuos sólidos, sin embargo más que normativa, el país necesita revisar las experiencias exitosas de naciones desarrolladas, tomar conciencia y propiciar técnicas con el uso de tecnologías apropiadas, para llevar a cabo un adecuado aprovechamiento de los residuos sólidos y, específicamente, de aquellos depositados en los rellenos sanitarios (Severiche, Acevedo, y Jaimes, 2014).

La Política Nacional para la Gestión Integral de Residuos Sólidos se compone de cuatro ejes estratégicos; el primer eje tiene como fin adoptar medidas encaminadas hacia (i) la prevención en la generación de residuos; (ii) la minimización de aquellos que van a sitios de disposición final; (iii) la promoción de la reutilización, aprovechamiento y tratamiento de residuos sólidos; y (iv) evitar la generación de gases de efecto invernadero. Por otro lado, el segundo eje apunta a mejorar la cultura ciudadana, la educación e innovación en gestión integral de residuos sólidos para incrementar los niveles de separación en la fuente, de aprovechamiento y de tratamiento. Los ejes número tres y cuatro están relacionados con la generación de un entorno institucional propicio para la coordinación entre actores, que promueva la eficiencia en la gestión integral de residuos sólidos (DNP, 2016).

En cuanto a los Planes de Gestión Integral de Residuos Sólidos – PGIRS, de acuerdo con lo establecido en el artículo 2.3.2.1.1 del Decreto 1077 de 2015, el Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos (PGIRS) es el instrumento de planeación municipal que contiene un conjunto ordenado de objetivos, metas, programas, proyectos, actividades y recursos definidos por el ente territorial para el manejo de los residuos sólidos. El artículo establece que “corresponde a la entidad territorial la formulación, implementación, evaluación, seguimiento, control y actualización del PGIRS” (Unidad Administrativa Especial de Servicios Públicos - UAESP, 2016).

Puntualmente, el Distrito Capital, mediante el Decreto 495 de 2016 adoptó el PGIRS como el instrumento de planeación distrital, el cual incluye doce (12), programas, cada uno desarrollado con una serie de proyectos, actividades y recursos para el manejo de los residuos sólidos. Lo anterior adoptando las exigencias establecidas en la Resolución del Ministerio de Vivienda No. 754 de 2014. *“Por la cual se adopta la metodología para la formulación, implementación, evaluación, seguimiento, control y actualización de los Planes de Gestión Integral de Residuos Sólidos”*.

La resolución estipula que el PGIRS debe contar con los siguientes programas:

Programa institucional para la prestación del servicio público de aseo

De recolección, transporte y transferencia

Programa de barrido y limpieza de vías y áreas públicas

De limpieza de playas costeras y ribereñas *(No aplica para Bogotá D.C.)*.

De corte de césped y poda de árboles de vías y áreas públicas

De lavado de áreas públicas

De aprovechamiento

De inclusión de recicladores

De disposición final

De gestión de residuos sólidos especiales

De gestión de residuos de construcción y demolición

De gestión de residuos sólidos en el área rural

De gestión de riesgo

Para los temas relacionados con la gestión y manejo del relleno sanitario, es el *Programa de disposición final*, el que incluye una serie de actividades pertinentes a su servicio y administración. (Decreto 495, 2016).

4.2.5. Economía circular.

Tradicionalmente, los modelos económicos del planeta se han desarrollado de manera facilista, partiendo de la extracción, fabricación y descarte (desecho), sin considerar lo limitado de los recursos ni la gestión adecuada de los residuos.

Como ilustra la figura 5, la economía lineal actual, basada en «tomar, hacer, desechar» se basa en grandes cantidades de materias y energía baratas y de fácil acceso, ha sido el elemento fundamental del desarrollo industrial y ha generado un nivel de crecimiento sin precedentes. Sin embargo, el incremento de la volatilidad de los precios, los riesgos de la cadena de suministro y las crecientes presiones han alertado a los líderes empresariales y los responsables políticos sobre la necesidad de repensar el uso de las materias y la energía; para muchos, es el momento adecuado de aprovechar las ventajas potenciales de una economía circular (MacArthur, 2012).

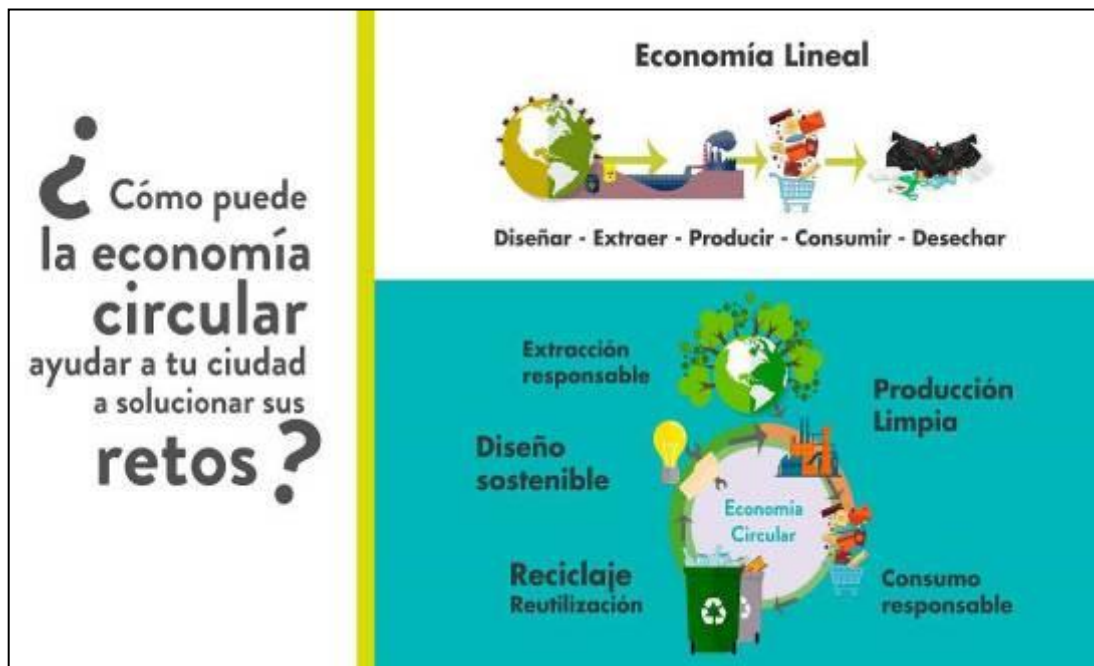


Figura 5. Economía lineal vs Economía Circular.

Recuperado de: <http://mimedellin.org/como-puede-la-economia-circular-ayudar-tu-ciudad-a-solucionar-sus-retos>

En Colombia, desde el sector de residuos sólidos, se propone avanzar hacia una economía circular, la cual busca que el valor de los productos y materiales se mantengan durante el mayor tiempo posible en el ciclo productivo (DNP, 2016).

Tradicionalmente, el país ha desarrollado un modelo de gestión de residuos sólidos acorde con el modelo económico de producción y consumo lineal, lo que ha traído implicaciones respecto a las pérdidas de recursos y aumento en la generación de residuos. (CONPES 3874, 2016)

Incentivar el aprovechamiento de los residuos sólidos permite reducir notablemente las toneladas que se disponen en rellenos sanitarios, en el entendido que la inadecuada disposición de residuos acarrea graves problemas ambientales relacionados con la contaminación hídrica, debido a los lixiviados y la contaminación atmosférica por la generación de gases de efecto invernadero, según lo señalado en el CONPES en la Política Nacional para la Gestión Integral de los Residuos Sólidos (CONPES 3874, 2016).

4.2.6. Rellenos Sanitarios.

El relleno sanitario, de acuerdo con la Sociedad Americana de Ingenieros Civiles (ASCE), es una *“técnica para la disposición de la basura en el suelo sin causar perjuicio al medio ambiente y sin causar molestia o peligro para la salud y seguridad pública. Este método, utiliza principios de ingeniería para confinar la basura en la menor área posible, reduciendo su volumen al mínimo practicable, y cubriendo la basura allí depositada con una capa de tierra con la frecuencia necesaria al fin de cada jornada”*(Meléndez, 2004).

Así mismo, el diseño de estas infraestructuras, comprende no solo la selección técnica del lugar de emplazamiento y los cálculos de las obras de ingeniería, sino la determinación del sistema de confinación, aislamiento y compactación de los residuos sólidos, así como la cobertura diaria, el control de gases y de lixiviados, la cobertura final y las obras de cierre (Quintero Torres, 2016).

En América Latina, los residuos generados por un 54% de la población urbana son depositados en un relleno sanitario, la técnica más sostenible ambiental y sanitariamente; los desechos de un 18% de los ciudadanos terminan en vertederos controlados, una opción que, sin ser ideal, evita los botaderos clandestinos. Los vertederos a cielo abierto reciben los residuos del 25% de la población, en países con transiciones urbanas más recientes, como Belice, Honduras y República Dominicana, se observan porcentajes importantes de quema a cielo abierto, lo que deriva en enormes riesgos sanitarios e impactos ambientales. Para el caso colombiano, el 80% de los residuos sólidos recolectados son confinados en rellenos sanitarios (UN-HABITAT, 2010).

Colom (2003), citado por Quintero (2016, p. 256) menciona que a pesar de que la población reconoce la necesidad de los rellenos sanitarios, su implementación, además de los retos asociados a los requerimientos técnicos y ambientales también hace frente al fuerte rechazo social.

Por otra parte, Salazar (2013), citado por Quintero (2016, p. 256) señala que los rellenos sanitarios están incluidos dentro de los proyectos tipo *No en mi patio trasero* o *Not In My Back Yard* (NIMBY, por sus siglas en inglés), la ubicación de este tipo de

infraestructuras requiere tanto de un planeamiento urbano como de un procedimiento burocrático largo y complejo. Por tanto, su localización debe ser el resultado de la gestión territorial e incorporado en el Plan de Ordenamiento Territorial. (Quintero Torres, 2016).

Antes de los años noventa, el tema de localización de los rellenos sanitarios no era un tema prioritario para el país, en especial porque Doña Juana, el principal relleno en ese entonces, solo aparece en el escenario nacional a finales de la década de los años ochenta, y su ubicación obedeció particularmente a intereses privados y a una planificación de índole económica. Con la Constitución del año 91, surge la necesidad de renovar la base legislativa para el manejo de los asuntos urbanos en el país. En atención a estas necesidades, el gobierno nacional expidió la ley 388 de 1997, conocida como la “Ley de Desarrollo Territorial”, que establece un mandato para que todos los municipios del país formulen sus Planes de Ordenamiento Territorial. (Quintero, 2016).

Dicha ley define el Ordenamiento Territorial como: *“...un conjunto de acciones político-administrativas y de planificación física concertadas, en orden a disponer de instrumentos eficientes para orientar el desarrollo del territorio bajo su jurisdicción y regular la utilización, transformación y ocupación del espacio, de acuerdo con las estrategias de desarrollo socioeconómico y en armonía con el medio ambiente y las tradiciones históricas y culturales.”* (Artículo 5, ley 388 de 1997).

De manera sucinta se describe a continuación el modelo de operación del Relleno Sanitario Doña Juana. Información suministrada por la Subdirección de Disposición Final de la UAESP (2018), tal como se esquematiza en la figura 6 y se describe a continuación:

- Ingreso de residuos. Los vehículos recolectores luego de cubrir las macrorrutas y microrrutas en la ciudad, llegan a la portería principal en donde se verifica que el vehículo pertenezca a los prestadores del servicio de recolección de la ciudad de Bogotá, y aquellos que tengan convenio vigente con la UAESP (Municipios) o que estén autorizados por ésta.

Se les permite el ingreso dirigiéndose al sistema de pesaje (Báscula de entrada) en la cual el vehículo es pesado lleno, entregándoles un tiquete donde queda consignada la información proporcionada por el operador del vehículo y el operador del sistema de pesaje como: macrorruta y microrruta, hora de ingreso, peso, empresa, placa o número interno del vehículo y número de tripulantes. El vehículo transita por las vías internas del relleno hasta la zona de disposición.

- Descargue de Residuos. En esta etapa todos los camiones o vehículos recolectores acceden a la zona de descargue o de disposición de residuos, excepto los que transportan residuos hospitalarios no peligrosos (cenizas), que se disponen en la celda específica para los mismos. En el frente de descargue, el personal del operador, supervisor de patio y auxiliares, regulan la entrada y salida de vehículos en función de la disponibilidad de espacio y de la facilidad de descargue, indicando a cada vehículo el lugar preciso para realizar esta actividad.

Los vehículos proceden al descargue de los residuos sobre el patio de maniobras adecuado para tal fin. Una vez efectuada la descarga en el lugar indicado, el vehículo se dirige a la zona de limpieza ubicada muy cerca del patio de maniobras, luego abandona la plataforma por la vía de salida que se le indique, sin entorpecer la llegada de nuevos vehículos al frente, transitando hasta la bahía de descargue de lixiviado.

El operador de disposición final (Centro de Gerenciamiento de Residuos Doña Juana –CGR-) continúa con los siguientes procesos (Figura 11):

- Disgregación: Una vez descargados los residuos se procede a extenderlos mecánicamente, con el objeto de romper las bolsas plásticas presentes en la masa para hacer más homogéneos los residuos y así posibilitar la salida de lixiviados y gases, buscando tener una mayor capacidad de disposición de residuos.

- Compactación: La compactación se realiza con maquinaria pesada y consiste en comprimir los residuos dispuestos en el menor volumen posible, actividad que genera importantes beneficios para el relleno sanitario.
- Conformación: Una vez realizadas las actividades anteriores, se configuran los domos de residuos, de manera que se establezca la apariencia geométrica determinada en los planos de diseño. Para lo cual existe una comisión de topografía permanentemente por parte del operador, cuya función es verificar que los bloques de residuos cumplan con la geometría establecida en el diseño.
- Cobertura Temporal: Posterior a la conformación, se realiza la cobertura temporal, esta actividad consiste en asegurar que luego de 24 horas el residuo disgregado, compactado y conformado, no quede expuesto a la intemperie. Para lograrlo se emplean dos tipos de materiales, arcilla y polietileno de baja densidad Calibre 8.

Las principales funciones de la cobertura temporal son controlar el ingreso de aguas lluvias a la masa de residuos, controlar la proliferación de olores y vectores y minimizar el impacto visual del relleno durante la operación.

- Salida del Vehículo recolector: Finalmente, el vehículo recolector vacío se dirige a la bahía correspondiente, para efectuar la descarga de los lixiviados producidos durante el transporte de los residuos sólidos, continúa su tránsito hacia el sistema de pesaje (báscula de salida), donde es pesado, el operador del vehículo entrega el ticket de ingreso y recibe el ticket definitivo emitido por el operador del sistema de pesaje.

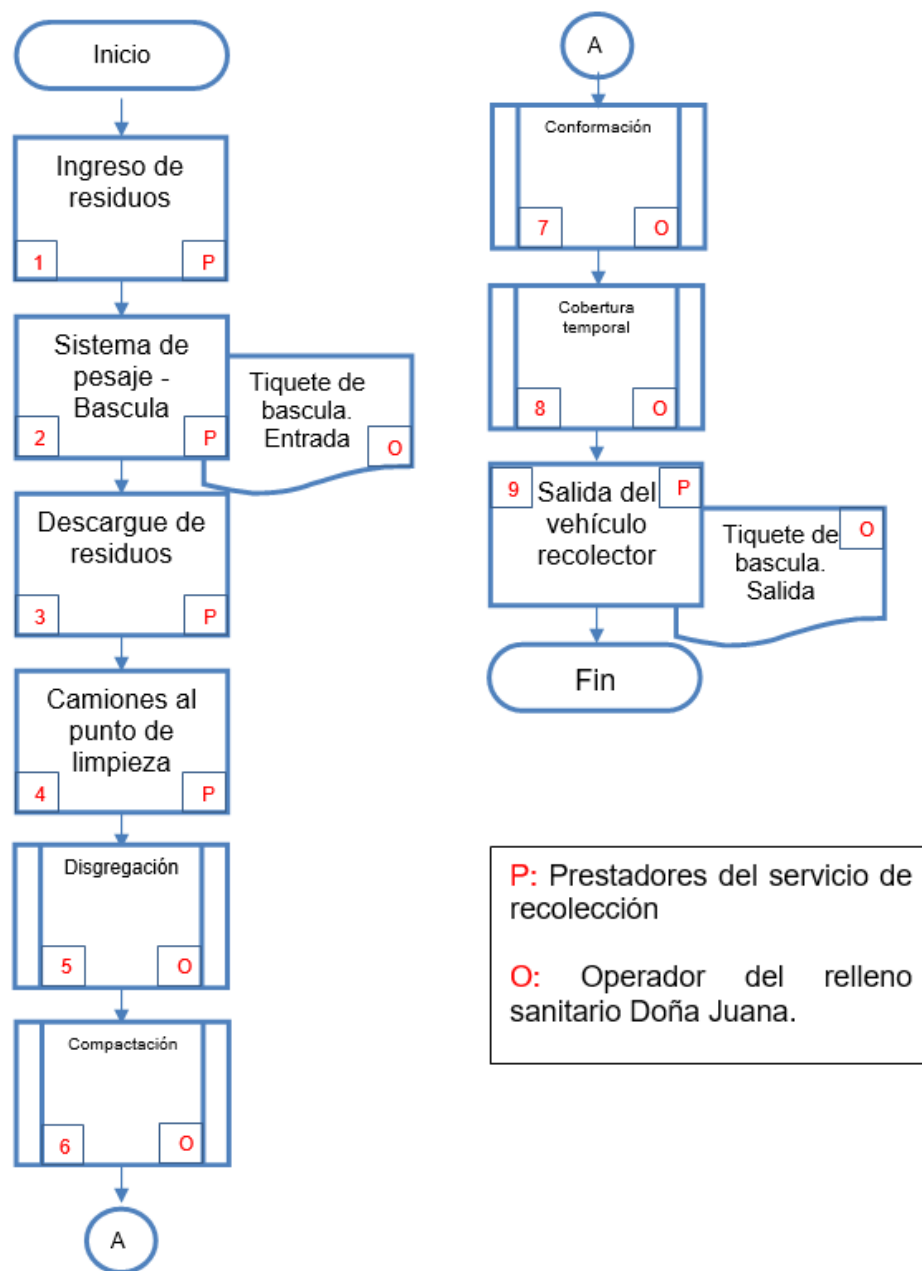


Figura 6. Diagrama de flujo de procesos Relleno Sanitario Doña Juana

4.2.7. Marco tarifario relleno sanitario.

El Relleno Sanitario Doña Juana hace parte de una actividad de servicios (Anexo II. Resolución 631 de 2015), mas no productiva, y que para operación del mismo no se extrae agua del tramo dos del Río Tunjuelo. El papel del río en la operación del RSDJ se centra en ser el receptor natural de los vertimientos generados, previos al paso por la Planta de Tratamiento de Lixiviados. De ahí la importancia de validar lo expuesto por la Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico respecto a los costos asociados al tratamiento de lixiviados.

Mediante la Resolución 720 de 2015 emitida por la Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básica – CRA, *“Por la cual se establece el régimen de regulación tarifaria al que deben someterse las personas prestadoras del servicio público de aseo que atiendan en municipios de más de 5000 suscriptores en áreas urbanas, la metodología que deben utilizar para el cálculo de las tarifas del servicio público de aseo y se dictan otras disposiciones”* en su Capítulo VI. De los costos de disposición final. Artículo 32 estableció el costo de tratamiento de lixiviados (CTL). La fórmula se detalla a continuación:

$$CTL = \frac{(CTLM * VL) + CMTLX}{QRS}$$

$$CTLM = CTLM_{vu} + CTLM_{PC}$$

$$k = 0.8415 * \ln(10 + \Delta T) - 0.9429$$

Donde:

CTL: Costo de Tratamiento de Lixiviados por tonelada (pesos de diciembre de 2014/tonelada).

CTLM: Costo de Tratamiento de Lixiviados por metro cúbico máximo a reconocer, según el objetivo de calidad (pesos de diciembre de 2014/m³).

CTLM_VU: Costo de Tratamiento de Lixiviados por vida útil de 20 años por tonelada (pesos de diciembre de 2014/tonelada).

CTLM_PC: Costo de Tratamiento de Lixiviados por período de la etapa de posclausura de quince (10) años, (pesos de diciembre de 2014/tonelada).

VL: Volumen promedio mensual de lixiviados tratados del semestre que corresponda (m³/mes), de acuerdo con lo definido en el ARTÍCULO 4

K: Factor que involucra el costo adicional por una duración superior a diez (10) años de la post clausura del relleno sanitario, según lo que determine a la autoridad ambiental.

At: Periodo adicional a diez (10) años de la duración de la post clausura del relleno sanitario, que ha sido aprobado por la autoridad ambiental

CMTLX: Costo Generado por la Tasa Ambiental para el vertimiento del tratamiento de lixiviados en rellenos sanitarios, con referencia a la tasa retributiva por la utilización directa o indirecta del agua como receptor de vertimientos. El costo a incluir corresponderá al cobro definido por la autoridad ambiental al usuario que realiza vertimientos puntuales en forma directa o indirecta al recurso hídrico, en \$/m³-mes, para el semestre anterior que corresponda.

QRS: Promedio mensual del semestre que corresponda de las toneladas de residuos recibidas en el relleno sanitario definido en el ARTÍCULO 28 [Resolución CRA 720 de 2015] (toneladas/mes).

Es así como, la Resolución 720 de 2015 estableció los costos eficientes del tratamiento del lixiviado mediante 4 escenarios de calidad y tratamiento en función de los posibles objetos de calidad que las autoridades ambientales establezcan. Adicionalmente selecciona un tren de tratamiento de referencia que determina el costo de referencia asociado como precio máximo. (Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico, 2015). En la tabla 1 se detallan los escenarios para tratamiento. Siendo el escenario número 4, el aplicable para el Relleno Sanitario Doña Juana.

Tabla 1. Escenario tratamientos para lixiviados propuestos por Resolución 720.

Objetivo de calidad de remoción de contaminantes	Procesos unitarios de tratamiento		
	Físico/Químico	Biológico	Filtración por membranas
	Opciones	Opciones	Opciones
Escenario 1			
SS, materia orgánica	Coagulación/floculación + precipitación	Tratamiento aerobio	
		Tratamiento anaerobio	
	Oxidación química		N/A
Escenario 2	Opciones	Opciones	Opciones
SS, materia orgánica	Coagulación/floculación + precipitación	Tratamiento aerobio + Nitrificación	
		Tratamiento anaerobio + Denitrificación	
	Adsorción		N/A
	Oxidación química		
Escenario 3	Opciones	Opciones	Opciones

Objetivo de calidad de remoción de contaminantes	Procesos unitarios de tratamiento		
	Físico/Químico	Biológico	Filtración por membranas
SS, materia orgánica	Coagulación/floculación + precipitación	Tratamiento aerobio	Microfiltración
Sustancias inorgánicas, Compuestos orgánicos	Adsorción	Tratamiento anaerobio	Ultrafiltración
			Osmosis Inversa
Escenario 4	Opciones	Opciones	Opciones
SS, materia orgánica	Coagulación/floculación + precipitación	Tratamiento aerobio + Nitrificación	Microfiltración
Sustancias inorgánicas, Compuestos orgánicos	Adsorción	Tratamiento anaerobio + Denitrificación	Ultrafiltración
			Osmosis Inversa
Escenario 5.			
Recirculación	N/A	N/A	N/A

La Tabla 1 expone los escenarios para tratamiento de lixiviados en el RSDJ, aplicados por la Resolución de la CRA 720 de 2015. Fuente: Revista de Agua Potable y Saneamiento Básico No. 19.

Entonces, la fórmula para el escenario 4 es la siguiente:

Vida Útil:

$$CTLM_{vu_4} = \min \left\{ 21.820; 2.554 + \frac{120.381.714}{vl} \right\}$$

Post clausura:

$$CTLM_{pc_4} = \min \left\{ 2.488; 261 + \frac{13.658.195}{vl} \right\} * k$$

4.2.8. Metodologías de análisis de sostenibilidad ambiental.

4.2.8.1. Sistema biobarrera secuencial (BBS).

Los autores Zapata Muños y Zapata Sánchez (2013), desarrollaron un *método de evaluación ambiental para la implementación del sistema biobarrera secuencial (BBS)* que incluyó análisis de interacciones físicas y bióticas. Allí identificaron impactos sobre los componentes ambientales. Como resultado, determinaron que, en la operación del relleno sanitario, el grado de dificultad del tratamiento de lixiviados es problemático, debido a la mezcla de los residuos sólidos almacenados; pues genera alteraciones al ciclo hidrológico y disminución de la calidad de aguas, tanto superficiales, como subterráneas. Concluyen finalmente que el plan de manejo ambiental para los lixiviados es el más importante y complejo; sintetizan que este tipo de planes deben ser pensados para cada una de las etapas de operación del relleno sanitario: producción, recolección, transporte, almacenamiento y tratamiento.

4.2.8.2. Ciclo de Vida.

La evaluación del ciclo de vida, es un método para estimar los impactos ambientales potenciales de un producto y ha sido utilizada en el campo de la gestión de residuos sólidos municipales desde la década de 1990 (Zhang, Mathews, Frapporti y Mekonnen, 2018). Al respecto han sido publicados un gran número de estudios que investigan diferentes aspectos de la gestión de los residuos sólidos en diferentes partes del mundo, por ejemplo, los estudios del ciclo de vida por lo general se centran en realizar comparaciones entre diferentes métodos de tratamientos alternativos de residuos sólidos, como es el caso de la investigación realizada por Bernstad Saraiva *et al.* (2017), quienes evaluaron los impactos ambientales de las alternativas de manejo de residuos sólidos en Río de Janeiro, se obtuvieron valiosos resultados que permitieron apoyar la gestión de residuos en la ciudad (Bernstad, Souza y Valle, 2017). A partir de la aplicación de la metodología de ciclo de vida, se analizaron de tres alternativas de manejo de residuos orgánicos municipales, i) relleno sanitario, ii) recolección selectiva de desechos orgánicos para la digestión anaeróbica y iii) digestión anaeróbica después de la separación de los desechos orgánicos. Los resultados más relevantes de la investigación apuntaron a que a pesar de existir cierto grado de incertidumbre en la gestión de residuos, la posibilidad de obtener ganancias energéticas (generación de electricidad) a partir de los residuos debe ser contemplada.

4.2.8.3. Huella Hídrica.

La Huella Hídrica (HH) es un indicador del consumo y contaminación de agua dulce, concepto introducido por primera vez en el año 2002 por el Dr. Arjen Hoekstra y desde entonces es difundido por la organización Water Footprint Network. Existen autores que destacan:

La Huella Hídrica, se presenta como un indicador de sostenibilidad que permite identificar relaciones causa-efecto a nivel socioambiental, siendo las actividades socioeconómicas el principal factor de presión sobre los recursos naturales. Ofrece igualmente, una visión del agua distinta a la

convencional, que facilita detectar impactos sobre el recurso hídrico a causa de los hábitos de consumo de grupos de población en ubicaciones geográficas específicas. De esta forma, se orientan los resultados a generar un cambio en la construcción del discurso, la apropiación de conceptos básicos por parte de los grupos sociales clave; y por último derivar una transformación de prácticas cotidianas asociadas a la relación agua – hombre. (Arévalo *et, al.* 2012).

La Organización Internacional de Estandarización –ISO (en inglés, International Organization for Standardization), estableció en el año 2014 la norma 14046 de huella hídrica, que busca establecer los requisitos necesarios para evaluar la huella del agua enfocada al ciclo de vida de los productos, evaluar todos los impactos ambientales que se generan desde las empresas tanto de forma directa como de forma indirecta, medir los volúmenes de agua utilizados y los niveles de contaminación. Esta norma pretende generar valor a la empresa, a las administraciones distritales y nacionales, puesto que el agua, que se considera un recurso natural renovable, es un recurso necesario y escaso.

Actualmente, es posible realizar análisis de huella hídrica azul (que hace referencia al consumo de agua en el proceso de producción de un determinado producto), la huella hídrica verde (corresponde al agua de lluvia que se incorpora en productos agrícolas). (Ver figura 7). La huella hídrica gris es la que representa los vertimientos generados a causa de procesos antrópicos, que llegan a fuentes de agua naturales y se identifican como una amenaza que puede alterar la condición de calidad natural del cuerpo receptor y, por tanto, reducir la disponibilidad de agua para los usuarios (IICA, 2017).



Figura 7. Huella Hídrica. Fuente: Esfera Viva. Recuperado de: <http://esferaviva.com/huella-hidrica-el-agua-oculta-en-lo-que-consumes/huella-hidrica-verde-azul-gris/>

4.2.8.4. Metodología IICA para cálculo de Huella Hídrica.

El Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA), en el marco del Proyecto Agricultura sostenible, seguridad alimentaria y cambio climático en América Latina - EUROCLIMA-IICA, con el financiamiento de la Unión Europea (UE), ha venido desarrollando el tema de la huella hídrica, como una propuesta que ofrece nueva información en relación a la adaptación al cambio climático del sector agrícola en Latinoamérica y el Caribe. Pretende fortalecer las capacidades técnicas e institucionalidad pública de los países en la Región, con el fin de desarrollar y evaluar nuevas estrategias para mejorar el uso eficiente del agua en la gestión territorial a nivel de cuenca (IICA, 2017). Esta guía se ha constituido en un referente importante para el desarrollo de

estudios de huella hídrica en diferentes sectores y con diversas finalidades, y está conformada por cuatro fases que se describen en la figura 8:



Figura 8. Fases de la metodología IICA para cálculo de huella hídrica.

Fuente: (Zárate, Fernández, Kuiper, Unión, e IICA, 2017)

- Fase 1: Definir los objetivos y el alcance del estudio.

En esta fase inicial, se establecen las razones para llevar a cabo el estudio, que dan base a la toma de decisiones durante y al final de estudio, incluyendo la revisión de supuestos y definiendo aspectos como propósito final del estudio, límites geográficos, sector o sectores económicos a incluir, alcance del análisis, tipo de huella hídrica (verde azul o gris) período de datos, entre otras.

- Fase 2: Contabilidad de la huella hídrica.

Al definir los objetivos y los alcances del estudio, se lleva a cabo la contabilidad de la huella hídrica, para lo cual se deben definir los siguientes aspectos:

- Contabilidad de huella hídrica para un sector o un actor

- ¿Se tendrá en cuenta la contaminación del agua?: la huella hídrica gris
- ¿Se hará la contabilización de las huellas hídricas para los diferentes sectores económicos operando en la microcuenca?
 - Fase 3: Análisis de sostenibilidad de la huella hídrica.

El análisis de sostenibilidad ambiental está principalmente en función de la apropiación del recurso hídrico por parte de los actores y sectores productivos que se encuentran en la cuenca, así como el impacto que se genera desde las actividades, en el caso de la medición de huella hídrica gris. Finalmente se busca establecer qué tan sostenible es dicha apropiación, y generar bases para discutir sobre una mejor asignación del recurso entre los usuarios.

En todo caso, el análisis debe hacerse desde tres ejes principales o perspectivas: ambiental, económica y social, y dependen básicamente de los siguientes aspectos:

- El alcance del análisis de sostenibilidad según el tipo de huella hídrica medida.
- Sostenibilidad ambiental: hace referencia al cumplimiento de los requerimientos de agua del medio ambiente - No excedencia de la capacidad de asimilación de contaminantes)
- Sostenibilidad Ambiental de la huella hídrica gris: Apunta a definir las condiciones en las que la cuenca estaría en capacidad de recibir cargas contaminantes, desde los actores y sectores productivos.
- Análisis de la sostenibilidad económica de la huella hídrica: más allá de establecer si una actividad es sostenible o no, este análisis permite comparar la eficiencia económica del uso del agua entre las diferentes actividades productivas presentes en la cuenca, para establecer comparaciones y apoyar a la formulación de estrategias de respuesta.

- Análisis de la sostenibilidad social de la huella hídrica: Desde esta perspectiva, se busca trabajar en criterios que ayuden a determinar el grado de equidad en el uso del agua de la cuenca, con la información obtenida, procesada, y de la mano de los otros dos enfoques de análisis, ambiental y económico.
 - Fase 4: Formulación de estrategias de respuesta para la gestión de la huella hídrica.

En esta instancia se plantean acciones, roles y responsabilidades que lleven a dar respuesta a las problemáticas identificadas durante el desarrollo del estudio. Dichas estrategias van en dos direcciones, dependiendo de los objetivos y el alcance de la investigación.

Para la formulación de este tipo de estrategias de respuesta, se debería realizar de manera integrada a nivel de cuenca, las acciones no deben ser establecidas de manera aislada, sino de manera conjunta e integradora entre los distintos actores implicados en la cuenca. (Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA), 2017)

Como ejemplo, puede desarrollarse en un proceso participativo con todos los actores de cuenca. En este caso, se requiere mayor nivel de detalle en los datos empleados para los cálculos. Por ejemplo, el trabajo desarrollado para la cuenca del río Porce en Colombia (Centro de Ciencia y Tecnología de Antioquía - CTA., 2013)

Comúnmente, las estrategias están enfocadas a la reducción de huella hídrica, pero en muchos casos no se trata exclusivamente de su reducción en consumo volumétrico por unidad de tiempo. Entran en juego otros factores, tales como, la necesidad de aumentar la eficiencia en el uso del agua, aumentar de la equidad en el uso del recurso, la productividad económica o protección de ecosistemas estratégicos. (Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA), 2017)

4.3. MARCO LEGAL

La gestión de los residuos sólidos y vertimientos en Colombia y en particular el funcionamiento del relleno sanitario Doña Juana se encuentra regida por las siguientes normas, resoluciones y acuerdos (Tabla 1).

Tabla 2. *Marco legal.*

Norma	Entidad	Observaciones	Análisis
Resolución 843 de 2018	Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico	<i>“Por la cual se resuelve la solicitud de modificación del costo económico de referencia para los componentes de Disposición Final — CDF y de Tratamiento de Lixiviados — CTL, presentada por Centro de Gerenciamiento de Residuos Doña Juana S.A. E.S.P..</i>	La resolución da viabilidad a la modificación de la tarifa e incrementos solicitados por el operador del Relleno Sanitario Doña Juana en lo que respecta a Disposición Final (CDF) y Costo de tratamiento de Lixiviado (CTL). Resolución de importancia frente al análisis de sostenibilidad económica de la huella hídrica gris.
Resolución 484 de 2018	Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible	<i>Por la cual se asume la competencia del proyecto “Relleno Sanitario Doña Juana” y se toman otras determinaciones. La Procuraduría General de la Nación emite un Auto donde resuelve la solicitud de impedimento respecto al trámite administrativo de licencia ambiental del Relleno Sanitario Doña Juana y designa a la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales ANLA. En consecuencia y según lo estipulado en el Artículo 3 de la resolución, la Corporación Autónoma Regional – CAR (...) debe abstenerse de adelantar cualquier actuación administrativa relacionada con el Relleno Sanitario Doña Juana (...)</i>	<i>Resolución que delega a la ANLA como entidad competente para seguimiento y control sobre las actividades inherentes al Relleno Sanitario Doña Juana.</i>

Norma	Entidad	Observaciones	Análisis
Consejo Nacional de Política Económica y Social – CONPES 3874.	Departamento Nacional de Planeación	<i>Política Nacional para la Gestión Integral de Residuos Sólidos (2016). Liderada por el Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio; el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible; y el DNP; en articulación con el Ministerio de Educación Nacional; el Ministerio de Minas y Energía; entidades adscritas; y el DANE. La política se implementará entre los años 2016 y 2030, y requiere una inversión de 187.578 millones de pesos.</i>	Este documento de Política Pública se convierte en el lineamiento del gobierno nacional para la aplicación del concepto de economía circular. Propende por el aprovechamiento de residuos sólidos, como una estrategia para tratar con prolongar la vida útil del relleno sanitario.
Decreto 495 de 2016	Alcaldía Mayor de Bogotá	<i>Se adopta el Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos PGIRS, disponiendo entre otros aspectos que, sin distinción del esquema prestación que implemente el Distrito Capital para la prestación del servicio público de aseo, la UAESP deberá garantizar la inclusión de la población recicladora de oficio en el mismo.</i>	Es la carta de navegación, con un horizonte a 12 años en el Distrito Capital, para la gestión integral de residuos sólidos. Actualmente contiene todos los programas, proyectos y actividades en relación a la gestión integral de residuos en Bogotá D.C.
Resolución 720 de 2015	Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico	<i>“Por la cual se establece el régimen de regulación tarifaria al que deben someterse las personas prestadoras del servicio público de aseo que atiendan en municipios de más de 5000 suscriptores en áreas urbanas, la metodología que deben utilizar para el cálculo de las tarifas del servicio público de aseo y se dictan otras disposiciones”. Entre otros aspectos inherentes a la prestación de servicio de aseo, establece la tarifa para el establecimiento del costo de disposición final (Capítulo VI, Artículo 28) y la formula tarifaria para el costo del tratamiento de lixiviado (Capítulo VI, Artículo 32).</i>	Marco tarifario mediante el cual se cobra el servicio público de aseo a nivel nacional. Resolución que aplica a la actividad del Relleno Sanitario Doña Juana. Es importante considerar la modificación por medio de la Resolución 843 de 2018



Norma	Entidad	Observaciones	Análisis
Resolución 631 de 2015	Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible	<i>“Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones”. Hace referencia a los vertimientos de aguas residuales. Especialmente lo establecido en su artículo 8. “Parámetros físicoquímicos y sus valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de aguas residuales domésticas - ARD de las actividades industriales, comerciales o de servicios; y de las aguas residuales (ARD y ARnD) de los prestadores del servicio público de alcantarillado a cuerpos de aguas superficiales”.</i>	<i>Establece parámetros y valores límites máximos permisibles que deberán cumplir quienes realizan vertimientos puntuales a los cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público. Así como los parámetros objeto de análisis y reporte por parte de las actividades industriales, comerciales o de servicios.</i>



Norma	Entidad	Observaciones	Análisis
Decreto 1076 de 2015.	Presidencia de la República	<p>“Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible”.</p> <p><u>Plan de Saneamiento y Manejo de Vertimientos</u> – PSMV.</p> <p>Establece las disposiciones relacionadas con los usos del recurso hídrico, el ordenamiento de los recursos hídrico y los vertimientos al recurso hídrico, al suelo y a los alcantarillados. (Artículo 2.2.3.3.1.1). Regula los requisitos del Plan de Gestión del Riesgo para el Manejo de Vertimientos (Artículo 2.2.3.3.5.4); la reglamentación de vertimientos (Artículo 2.2.3.3.7.1), el registro de los permisos (Artículo 2.2.3.3.8.1). <u>Vertimientos Aguas Residuales</u>. Señala la obligatoriedad del permiso de vertimiento para el proceso de aprovechamiento de aguas en cualquiera de los usos previstos en el artículo 2.2.3.2.7.1 del Decreto 1076 de 2015. (Artículo 2.2.3.2.20.2). Igualmente, prohíbe verter sin tratamiento, residuos sólidos, líquidos o gaseosos que puedan contaminar las aguas, causar daño o poner en peligro la salud humana o el normal desarrollo de la flora o fauna, o impedir u obstaculizar su empleo para otros usos. (Artículo 2.2.3.2.20.5). Establecer los requerimientos de la obtención de los permisos y los planes de cumplimiento (Artículo 2.2.3.3.5.1).</p>	Decreto Único Sectorial que establece todos los componentes del sector ambiente y Desarrollo Sostenible.

Norma	Entidad	Observaciones	Análisis
Decreto Único Reglamentario 1077 de 2015.	Presidencia de la República	<p><i>"Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Vivienda, Ciudad y Territorio"</i></p> <p>Rellenos Sanitarios</p> <p>Compila las disposiciones sobre servicio público de aseo. Contiene normas para promover y facilitar la planificación, construcción y operación de sistemas de disposición final de residuos sólidos, como actividad complementaria del servicio público de aseo, mediante la tecnología de relleno sanitario. Igualmente reglamenta el procedimiento a seguir por parte de las entidades territoriales para la definición de las áreas potenciales susceptibles para la ubicación de rellenos sanitarios. Asimismo, establece consideraciones ambientales y técnicas de planeación, construcción y operación de rellenos sanitarios (Artículo 2.3.2.3.1.1 al 2.3.2.3.).</p> <p><i>"Por la cual se adopta la metodología para la formulación, implementación, evaluación, seguimiento, control y actualización de los Planes de Gestión Integral de Residuos Sólidos"</i></p>	Decreto Único Sectorial que establece todos los componentes que integran la prestación del servicio público de aseo.
Resolución 754 de 2014	Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio	<p>Planes de Gestión Integral de Residuos Sólidos -PGIRS-. Es responsabilidad de los municipios, distritos y esquemas asociativos territoriales, la formulación, implementación, evaluación, seguimiento, control y actualización del PGIRS. La formulación o actualización de estos planes deberá realizarse con la participación de los actores involucrados en la gestión integral de residuos sólidos. Establece su ámbito de aplicación, adopción, incorporación en los planes de desarrollo municipales o distritales; articulación con la prestación del Servicio Público de Aseo y los Planes o Esquemas de Ordenamiento Territorial; aprovechamiento de residuos sólidos.</p>	<p>Planes de Gestión Integral de Residuos Sólidos - PGIRS</p> <p>Adopta la metodología para la formulación, implementación, evaluación, seguimiento, control y actualización. Esta resolución es el lineamiento por el cual el Distrito Capital construyó su PGIRS.</p>



Norma	Entidad	Observaciones	Análisis
Resolución 1351 de 2014.	Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca CAR.	<i>“Por medio de la cual se modifica la licencia ambiental única otorgada para el proyecto “Relleno sanitario Doña Juana” y se toman otras determinaciones”.</i>	<i>Estas normas hacen parte de todo el antecedente normativo que se aplicó a la operación del relleno sanitario</i>
Resolución 2320 de 2014.	Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca CAR.	<i>“Por medio de la cual se resuelven recursos de reposición interpuestos contra la Resolución 1351 de 18 de junio de 2014” En su articulado establece modificar e incluir las coordenadas del proyecto optimización Fase II de las Zonas VII y VIII del Relleno Sanitario Doña Juana y puntualmente en el artículo 6 autoriza la operación del proyecto fase de optimización.</i>	<i>Estas normas hacen parte de todo el antecedente normativo que se aplicó a la operación del relleno sanitario</i>
Decreto 2667 de 2012.	Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible	<i>“Por el cual se reglamenta la tasa retributiva por la utilización directa e indirecta del agua como receptor de los vertimientos puntuales, y se toman otras determinaciones”.</i> <i>Reglamenta la tasa retributiva por el uso directo o indirecto del agua como receptor de vertimientos de la que serán sujeto los usuarios que ejecuten la conducta que la origina. Le corresponde al Ministerio de Ambiente establecer los elementos, sustancias o parámetros contaminantes objeto del cobro, el dinero recaudado se destinará a proyectos de inversión en descontaminación hídrica y monitoreo de la calidad del agua. Tasas Retributivas por Vertimientos Líquidos</i> <i>Reglamenta la tasa retributiva por el uso directo o indirecto del agua como receptor de vertimientos de la que serán sujeto los usuarios que ejecuten la conducta que la origina.</i>	



Norma	Entidad	Observaciones	Análisis
Resolución 3957 de 2009.	Secretaría Distrital de Ambiente.	<p>“““Por la cual se establece la norma técnica, para el control y manejo de los vertimientos realizados a la <u>red de alcantarillado público en el Distrito Capital</u>”””.</p> <p>Vertimientos Aguas Residuales Establece la norma técnica, para el control y manejo de los vertimientos realizados al sistema de alcantarillado público en el Distrito Capital; fija los índices, factores, concentraciones o estándares máximos para su vertido. En el CAPITULO II de la resolución se establecen las Generalidades del registro de vertimiento, CAPITULO V establece los Vertimientos permitidos a través de los valores de referencia a través de tablas adjuntas. CAPITULO VI, Vertimientos no permitidos y el CAPITULO XI Las sanciones.</p>	<p>Acto administrativo que establece la norma para los vertimientos a la red de alcantarillado. Aplicable a muchos de los usuarios que están presentes en la ronda del río Tunjuelo en cada uno de sus tramos</p>
Resolución 3956 de 2009.	Secretaría Distrital de Ambiente.	<p>“““Por la cual se establece la norma técnica, para el control y manejo de los vertimientos realizados al <u>recurso hídrico en el Distrito Capital</u>”””.</p> <p>Vertimientos Líquidos de Interés Ambiental o de Interés Sanitario. Establece la norma técnica, para el control y manejo de los vertimientos realizados al sistema de alcantarillado público en el Distrito Capital; fija los índices, factores, concentraciones o estándares máximos para su vertido Vertimientos Líquidos de Interés Ambiental o de Interés Sanitario</p>	<p>Acto administrativo que establece la norma para los vertimientos al recurso hídrico. Objeto de revisión para el caso del presente trabajo investigativo.</p>



Norma	Entidad	Observaciones	Análisis
Resolución 5731 de 2008.	Secretaría Distrital de Ambiente.	<p><i>“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”.</i></p> <p>Objetivos de Calidad</p> <p>Artículo 2. Adopta los nuevos objetivos de calidad de los de los Ríos Salitre, Fucha y Tunjuelo y del Canal Torca, dentro del perímetro urbano de Bogotá. Establece que el seguimiento y Monitoreo a los objetivos de calidad definidos, se realizarán a las fuentes hídricas en los parámetros de calidad: DBO, SST, DQO, OD, Coliformes Fecales y pH.</p> <p>Adicionalmente los resultados del programa de monitoreo serán reportados anualmente al Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, los cuales se utilizarán como soporte de la herramienta de seguimiento al programa de tasas retributivas de dicho ministerio y serán publicados en la página Web de la Secretaría Distrital de Ambiente.</p>	<p>Sobre esta norma se realizaron los análisis pertinentes para evaluar los objetivos de calidad del Tramo 2 (Área objeto de estudio de la presente investigación), del río Tunjuelo, según la sectorización que esta resolución establece.</p>
Resolución 166 de 2008.	Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca CAR.	<p><i>“Por la cual se modifica una resolución y se toman otras determinaciones”</i></p> <p><i>En esta resolución se incluyen elementos químicos como el cadmio (Cd) dentro de los parámetros a monitorear y la concentración de boro (B)</i></p>	<p>Sobre esta norma se tomaron los análisis para valores máximos permitidos de las descargas del Relleno Sanitario. Ver Anexo B.</p>

Norma	Entidad	Observaciones	Análisis
Decreto Distrital 620 de 2007.	Alcaldía Mayor de Bogotá D.C.	<p><i>“Por medio del cual se complementa el Plan Maestro de Residuos Sólidos (Decreto 312 de 2006), mediante la adopción de las normas urbanísticas y arquitectónicas para la regularización y construcción de las infraestructuras y equipamientos del Sistema General de Residuos Sólidos, en Bogotá Distrito Capital.”</i></p>	<p><i>Respecto al tema de Rellenos Sanitarios, el acuerdo en mención adopta las normas urbanísticas y arquitectónicas para la regularización y construcción de las infraestructuras, equipamientos y mobiliario urbano, vinculados al Sistema General de Residuos Sólidos. Establece que las normas urbanísticas y arquitectónicas para los rellenos sanitarios que se localicen en el Distrito Capital, deben cumplir con las disposiciones contenidas en el Decreto Nacional 838 de 2005, por el cual se modifica el Decreto Nacional 1713 de 2002 sobre disposición final de residuos sólidos, y las normas que lo modifiquen o adicionen.</i></p>



Norma	Entidad	Observaciones	Análisis
Acuerdo 043 de 2006.	Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca CAR.	<p><i>“Por el cual se establecen los objetivos de calidad del agua para la cuenca del río Bogotá a lograr en el año 2020”.</i></p> <p><i>Objetivos de Calidad del Agua</i></p> <p><i>Artículo 1°. Clasificación de usos del agua para la cuenca del río Bogotá y valores de los parámetros de calidad a aplicar por clase.</i></p> <p><i>Cuenca del río Tunjuelo Código: 2120-09</i></p> <p><i>Artículo 5. Establece los objetivos de calidad del agua para la cuenca del río Bogotá a lograr en el año 2020, para ello clasifica en forma general los cuerpos de agua que se encuentran dentro de la jurisdicción de la CAR, teniendo en cuenta los usos para los cuales han sido asignados y establecerá los criterios y objetivos de calidad mínima que deben tener los diferentes tramos de la cuenca del río Bogotá, con un horizonte proyectado al año 2020.</i></p>	<p>Acto administrativo que estipula <i>Articular las acciones propuestas en el CONPES 3320 de 2004, respecto a los Planes de Saneamiento y Manejo de Vertimientos y todos los programas y proyectos del nivel nacional, departamental y municipal que se pretendan adelantar para la descontaminación y desarrollo en general de la cuenca del río Bogotá.</i></p>

Norma	Entidad	Observaciones	Análisis
Ley 142 de 1994	El Congreso de Colombia	<p><i>“Por la cual se establece el régimen de los servicios públicos domiciliarios y se dictan otras disposiciones”.</i></p> <p>Servicio Público Domiciliario</p> <p>Prohibición de prácticas discriminatorias, abusivas o restrictivas, art. 34. Deber de buscar entre el público las mejores condiciones objetivas. Artículo 35. Control de gestión de resultados, arts. 45 a 52. Sistemas de Información, art. 53. Contribuciones especiales, art. 85. Cobros no permitidos, art. 90.3. prohibición de prácticas tarifarias restrictivas de la competencia, art. 98. Información a los usuarios sobre las condiciones uniformes del contrato de prestación de servicios públicos domiciliarios, art. 131. Revisión previa de las facturas, art. 149.</p>	Estatuto básico de la prestación de servicios públicos domiciliarios en Colombia

La Tabla 2 muestra el marco legal inherente al proceso de investigación en referencia a el manejo de residuos sólidos y la operación del RSDJ.

5. METODOLOGÍA

5.1. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

La investigación se desarrolló en el Relleno Sanitario Doña Juana (RSDJ), el cual se encuentra localizado al costado sur-occidental de la ciudad de Bogotá. (Figura 9), en la Localidad de Ciudad Bolívar, en inmediaciones de la vereda Mochuelo Alto y Mochuelo Bajo, entre los 2.715 y 2.800 m.s.n.m., en la cuenca media del río Tunjuelo, en el tramo 2 del río. (Quintero Torres, 2016).

Al relleno sanitario le concurren al presente cerca del 100% de los residuos convencionales generados el Distrito Capital, y también los generados por los municipios de Fosca, Cáqueza, Choachí, Chipaque, Ubaque y Gutiérrez (Quintero Torres, 2016).

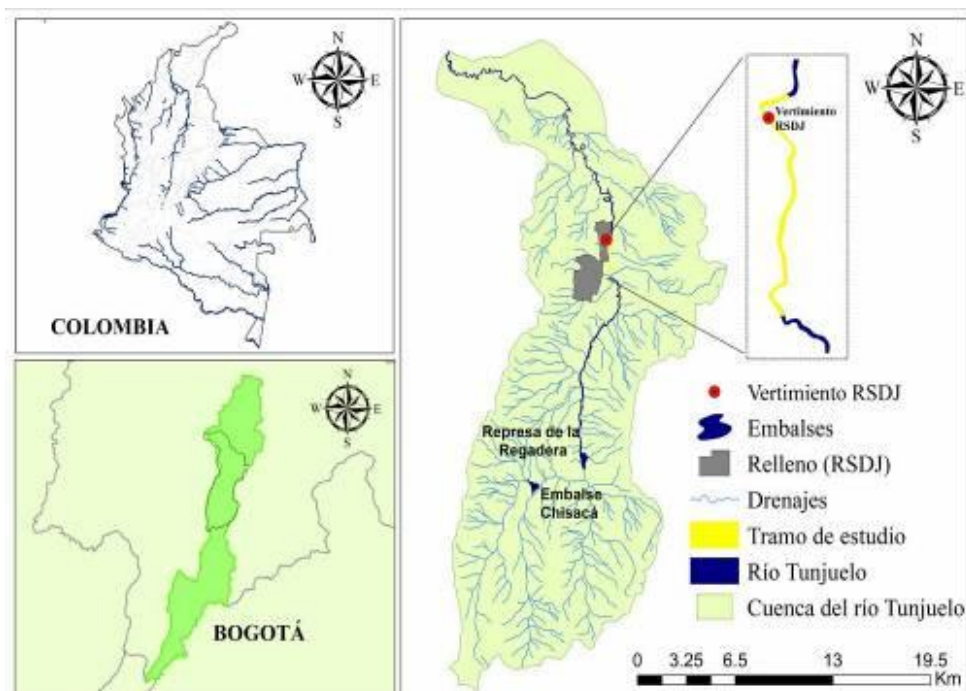


Figura 9. Área de estudio en la cuenca del río Tunjuelo

La Resolución 5731 de 2008, de la Secretaría Distrital de Ambiente (SDA) para efectos de fijación de objetivos de calidad en el río Tunjuelo establece cuatro tramos en el río. El propósito de establecer objetivos de calidad es el de evitar la contaminación y el de mejorar moderadamente la calidad de los tramos (Tabla 3).

Tabla 3. Tramos Río Tunjuelo-Resolución 5731 de 2008 - SDA

Cuenca	Tramo	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

La Tabla 3 ilustran los tramos adaptados por la resolución 5731 de 2008. Objetivos de calidad del río Tunjuelo. Fuente: SDA, 2008.

El relleno Sanitario Doña Juana se encuentra ubicado en las siguientes coordenadas (Tabla 4):

Tabla 4. Coordenadas geográficas extremos del RSDJ (Genivar, 2014)

Punto	Dirección	Latitud	Longitud
1	Norte	4° 32' 03.23"	74° 07' 46.08"
2	Sur	4° 29' 17.68"	74° 08' 15.92"
3	Este	4° 30' 41.19"	74° 07' 37.39"
4	Oeste	4° 30' 21.84"	74° 08' 50.47"

La Tabla 4 muestra las coordenadas geográficas de la ubicación del Relleno Sanitario Doña Juana. Fuente: Tomado de Genivar, 2014

Para dar respuesta a la pregunta de investigación, y a los objetivos propuestos, se abordó el enfoque de evaluación de huella hídrica, específicamente huella hídrica gris planteado por el Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura IICA, a partir de información relacionada con la concentración de sustancias contaminantes,

correspondiente al año 2016, exceptuando el mes de noviembre, obtenida por el operador del Relleno Sanitario Doña Juana (UAESP, 2016; ver anexo 1)

Los resultados obtenidos, se registraron en una matriz multimensual y se compararon con los parámetros establecidos en las disposiciones legales correspondientes. Para el presente estudio se tuvo en cuenta la serie de mediciones hecha en el año 2016, toda vez que es la más completa en cuanto a cantidad de contaminantes medidos y a la cantidad de periodos registrados. (Ver Anexo 2). E

En la figura 10 se ilustran los puntos de muestreo mencionados.

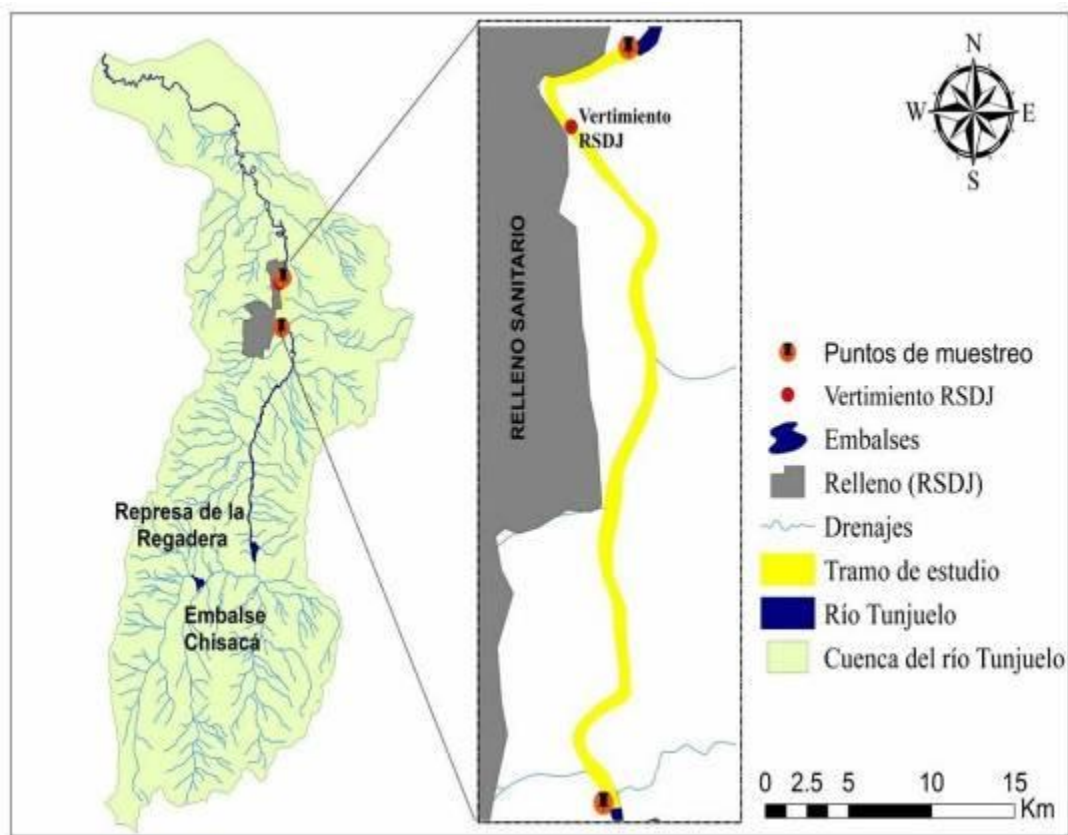


Figura 10. Estaciones de muestreo en el tramo 2 del río Tunjuelo

En el Anexo 3 se puede identificar cada uno de los tipos de muestra, fecha de la muestra y punto de captación. Información adaptada por el grupo de estudio según los reportes entregados por el laboratorio.

Se analizaron en total 21 parámetros que resultan de interés para la UAESP, según lo establecido en la Resolución 166 de 2008 de la CAR, los cuales obedecen a la siguiente clasificación:

- Un (1) metal alcalino
- Un (1) alcalinotérreo
- Dos (2) metaloides
- Un (1) no metal
- Once (11) metales en transición
- Dos (2) otros metales.

En el anexo 4 se presentan una descripción de los parámetros evaluados así como sus impactos a la salud e impactos al ambiente.

5.2. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA IICA PARA CÁLCULO DE HUELLA HÍDRICA GRIS

5.2.1. Contabilidad de huella hídrica gris.

De acuerdo con lo planteado por la Guía Metodológica para la Evaluación de la Huella Hídrica en una Cuenca Hidrográfica (Zárate, Fernándezsen, Kuiper, Unión, y IICA, 2017), se llevó a cabo el cálculo de huella hídrica gris, a partir de la siguiente ecuación:

$$HH_{proc, gris} = \frac{L}{C_{max} - C_{nat}} = \frac{Efl \times C_{efl} - Extr \times C_{real}}{C_{max} - C_{nat}}$$

Donde:

$HH_{proc, gris}$ Huella gris de un proceso específico o de un contaminante específico. Es el volumen teórico de agua dulce, en m³/mes, que se requiere para la asimilación de un contaminante crítico determinado,

en un cuerpo de agua receptor de agua gris, que en este caso es el tramo 2 del río Tunjuelo.

L	Carga de contaminante. Se trata de la carga de contaminante que se genera en el proceso y que llega al curso de agua receptor, expresado en kg/m^3 .
C_{max}	Norma ambiental para cada contaminante objeto de estudio. Se refiere a la concentración máxima permitida para cada contaminante en el agua, y se expresa en kg/m^3 .
C_{nat}	Concentración natural del contaminante en el agua. Es la concentración del contaminante que tendría el cuerpo de agua, sin ningún tipo de intervención humana. Se expresa en kg/m^3 .
E_{fl}	Caudal del efluente expresado en m^3/mes .
C_{efl}	Concentración del contaminante de interés en el efluente, expresado en kg/m^3 .
$Extr$	Caudal del agua extraída del cuerpo de agua para el desarrollo del proceso de tratamiento de residuos, en m^3/mes .
C_{real}	Concentración real del contaminante en el agua extraída para el desarrollo del proceso de tratamiento de residuos, expresado en m^3/mes .

5.2.2. Sostenibilidad Ambiental de la huella hídrica gris.

Para llevar a cabo el análisis de sostenibilidad ambiental, la metodología propone el Índice de contaminación del agua (NCA) que corresponde a la relación entre la huella hídrica gris total ($HH_{proc, gris}$) y la esorrentía real (R_{real}) (Zárate, Fernández, Kuiper, Unión, e IICA, 2017). Este índice finalmente mide la capacidad real de una cuenca o zona de captación, de asimilar una carga contaminante, en función de la esorrentía disponible. El NCA se expresa de la siguiente manera:

$$NCA = \sum \frac{HH_{proc, gris}}{R_{real}}$$

Cuando el índice NCA es mayor a 1, se considera que la actividad analizada mediante cálculo de huella hídrica gris es ambientalmente insostenible y que la capacidad de asimilación del cuerpo receptor ha sido totalmente consumida o incluso sobrepasada.

5.2.3. Sostenibilidad económica de la huella hídrica.

Más allá de establecer si una actividad es sostenible económicamente o no, este análisis permite comparar la eficiencia económica del uso del agua entre las diferentes actividades productivas presentes en la cuenca, para establecer comparaciones y apoyar a la formulación de estrategias de respuesta. y por tanto, complementa el análisis de sostenibilidad y apoya a la formulación de estrategias.

Para analizar la sostenibilidad económica de la huella hídrica se aplican generalmente dos indicadores:

Productividad aparente del agua: Permite estimar ingreso económico por metro cúbico de agua consumida. Es la relación del precio de un producto, a nivel de productor, sobre la huella hídrica, ya sea azul o verde.

$$APW_{azul} (\$/m^3) = \frac{\text{Precio del mercado } (\$/\text{unidad de producto})}{\text{Huella hídrica azul } (m^3/\text{unidad de producto})}$$

$$APW_{verde} (\$/m^3) = \frac{\text{Precio del mercado } (\$/\text{unidad de producto})}{\text{Huella hídrica verde } (m^3/\text{unidad de producto})}$$

Productividad aparente de la tierra: Este indicador representa el valor económico a precios constantes por hectárea de tierra cultivada, por lo cual aplica solo para el sector

agrícola. Se calcula multiplicando el precio de mercado del producto (\$/t) por su rendimiento (t/ha), para los cultivos, tanto en regadío como en secano.

$$ALP = \text{Precio del mercado (\$/tonelada)} \times \text{Rendimiento (tonelada/hectárea)}$$

5.2.4. Sostenibilidad social de la huella hídrica.

Desde esta perspectiva, se busca trabajar en criterios que ayuden a determinar el grado de equidad en el uso del agua de la cuenca, con la información obtenida, procesada, y de la mano de los otros dos enfoques de análisis, ambiental y económico.

Formulación de estrategias de respuesta para la gestión de la huella hídrica:

Esta fase comprende la definición de las acciones por tomar, teniendo en cuenta los resultados del estudio de huella hídrica realizado en las fases anteriores.

Las estrategias tradicionalmente están enfocadas a la reducción de huella hídrica, aunque no siempre se trata de su reducción en consumo volumétrico por unidad de tiempo, sino de encaminar esfuerzos al aumento de la eficiencia en el uso del agua, aumento de la equidad en el uso de esta, productividad económica o protección de ecosistemas estratégicos.

5.3. PARÁMETROS DE REFERENCIA

Los parámetros que definen las concentraciones máximas permisibles, y las sustancias contaminantes objeto de medición, son la base de comparación para un análisis simple de la gestión de lixiviados, y son suministrados por las siguientes disposiciones legales:

- Resolución 166 de 2008 de la Corporación Autónoma de Cundinamarca CAR, “Por la cual se modifica la Resolución No. 3358 de 1998, en lo relativo a la norma de vertimientos sobre el Río Tunjuelo”.

- Resolución 3956 de 2009 de la Secretaría Distrital de Ambiente, “Por la cual se establece la norma técnica, para el control y manejo de los vertimientos realizados a la red de alcantarillado público en el Distrito Capital”.
- Resolución 631 de 2015 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, “Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones”.

Para efectos de hacer una comprensión de los parámetros, y definir el conjunto más adecuado para aplicar en el estudio, se hizo una comparación de valores entre resoluciones, y se generó una combinación de parámetros, conformada por aquellos que presentaron menor valor, y que correspondieron a la información disponible en cuanto a las mediciones realizadas en el año 2016.

A continuación, se presenta el cuadro comparativo y los valores finales a utilizar para llevar a cabo el estudio:

Tabla 5. *Comparación de parámetros por resolución y valores finales de referencia.*

ITEM	Parámetro	Medida	Resolución			Valor de referencia para el estudio
			166/2008 CAR	3957 de 2009 SDA	631 de 2015 MADS	
1	Aluminio	mg/L Al	5,0	10	-	5,0
2	Arsénico	mg/L As	0,1	0,1	-	0,1
3	Berilio	mg/L Be	0,1	-	-	0,1
4	Boro	mg/L B	4,0	5	-	4,0
5	Cadmio	mg/L Cd	0,01	0,02	0,10	0,01
6	Zinc	mg/L Zn	2,0	2,0	3,0	2,0
7	Cobalto	mg/L Co	0,05	-	-	0,05
8	Cobre	mg/L Cu	0,2	0,25	1,0	0,2
9	Cromo total	mg/L Cr	0,1	1	0,5	0,1

ITEM	Parámetro	Medida	Resolución			Valor de referencia para el estudio
			166/2008 CAR	3957 de 2009 SDA	631 de 2015 MADS	
10	DBO Total	mg/L O ₂	100	800	90	90
	Grasas y					
11	Aceites	mg/L	2,0	100	10,0	2,0
12	Hierro	mg/L Fe	5,0	10	-	5,0
13	Litio	mg/L Li	2,5	10	-	2,5
14	Manganeso	mg/L Mn	0,2	1	-	0,2
15	Mercurio	mg/L Hg	0,01	0,02	0,02	0,01
16	Molibdeno	mg/L Mo	0,01	10	-	0,01
17	Níquel	mg/L Ni	0,2	0,5	0,5	0,2
18	Plomo	mg/L Pb	0,1	0,1	0,5	0,1
19	Selenio	mg/L Se	0,02	0,1	-	0,02
20	Vanadio	mg/L V	0,1	-	-	0,1
		mg/L				
21	Fenoles	Fenol	0,2	0,2	-	0,2

La Tabla 5 presenta el registro de las tres normas aplicables al seguimiento de vertimientos en el RSDJ. Fuente: Grupo de estudio

5.4. CAUDALES DEL EFLUENTE Y AFLUENTE O CUERPO RECEPTOR

Teniendo en cuenta que las mediciones a analizar corresponden al año 2016, y para efectos de cálculo, se tomó como caudal promedio del efluente para los meses revisados, un valor de 16 l/s, y se consideró el registro de caudal promedio mensual del río Tunjuelo en su tramo 2, para el mismo año, el cual fue de 1410 l/s. (VSV Consulting SAS, 2017).

5.5. AJUSTES METODOLÓGICOS

Como se mencionó anteriormente, la huella hídrica gris de cada contaminante, así como la sumatoria total del contaminante, se expresa en m³/mes. Para completar la homologación, los datos de concentración se convirtieron de mg/l a kg/m³. (Ver Anexo 5)

6. RESULTADOS

6.1. CUANTIFICACIÓN DE LA HUELLA HÍDRICA GRIS DEL RELLENO SANITARIO DOÑA JUANA, UBICADO EN EL TRAMO 2 DE LA CUENCA DEL RÍO TUNJUELO.

La Tabla 6 ilustra los resultados obtenidos en la aplicación de la ecuación de huella hídrica gris.

Tabla 6. *Valores de huella hídrica gris promedio por parámetro y total.*

No.	PARÁMETRO	TIPO	HH gris promedio (m³/mes)
		Metal en	
1	Manganeso	Transición	301.981,09
	Grasas y		
2	Aceites	Orgánico	96.691,29
		Metal en	
3	Molibdeno	Transición	82.566,98
		Metal en	
4	Cadmio	Transición	67.276,80
		Metal en	
6	Hierro	Transición	68.804,54
5	Plomo	Otros metales	39.754,47
		Metal en	
7	Cobalto	Transición	36.696,44
		Metal en	
8	Cobre	Transición	35.358,55
9	DBO Total	Biológico	23.738,01
		Metal en	
10	Níquel	Transición	19.494,98
11	Aluminio	Otros metales	16.451,28
		Metal en	
12	Vanadio	Transición	10.051,38
13	Selenio	No metal	8.409,60

14	Arsénico	Metaloide	6.077,85
		Metal en	
15	Mercurio	Transición	4.587,05
16	Fenoles	Orgánico	2.981,59
		Metal en	
17	Zinc	Transición	2.281,10
18	Boro	Metaloide	2.062,07
19	Berilio	Alcalinotérreo	925,06
20	Litio	Metal Alcalino	504,58
HUELLA HÍDRICA TOTAL			826.694,71

6.1.1. Huella hídrica gris total.

La huella hídrica gris calculada sobre el valor promedio de 20 parámetros, obtenidos de mediciones del año 2016 arrojó un total de 826.694,71 m³/mes, y está conformada por los valores individuales que se registran en la tabla 6:

El Anexo 6 muestra el reporte del comportamiento de las concentraciones de los contaminantes, frente a las concentraciones en el efluente permitidas por norma

En la figura 11 se observa la huella hídrica gris por elemento, en la que se destacan con el valor más alto el manganeso (metal en transición), seguido de grasas y aceites (compuestos orgánicos) molibdeno, cadmio y hierro (metales en transición), en su orden.

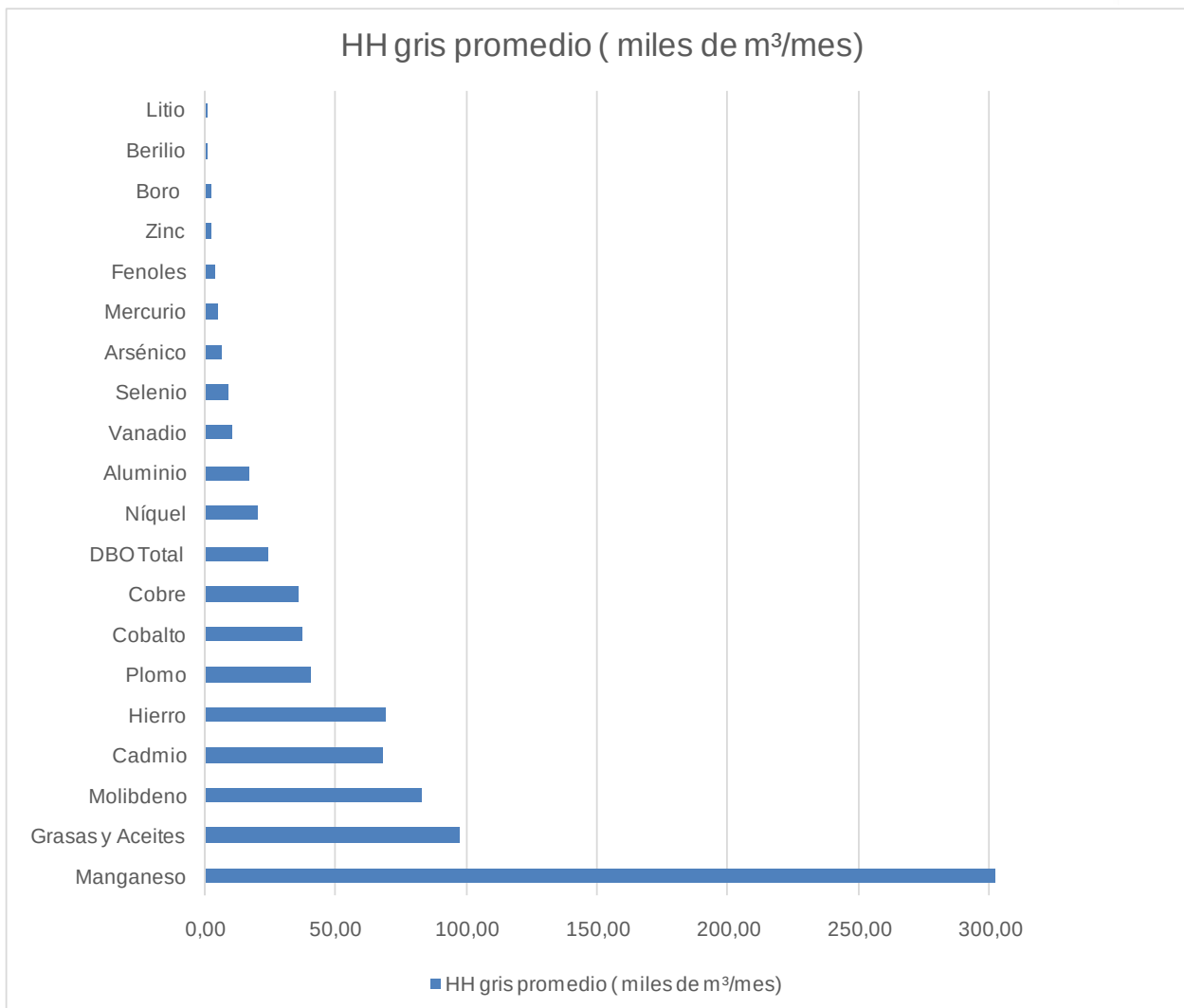


Figura 11: Distribución de la huella hídrica gris por parámetro analizado.

Por otra parte, los valores más bajos corresponden a litio (metal alcalino), berilio (metal alcalinotérreo), Boro (metaloide), Zinc (metal en transición) y Fenoles (compuestos orgánicos)

En cuanto a contaminantes, se observa que la huella hídrica gris más alta la registra el manganeso con 301.981,09 m³/mes, seguido de grasas y aceites cuyo valor es de 96.691,29 m³/mes. El valor más bajo acumulado lo registró el litio, con 504,58 m³/mes.

Dentro de la metodología de cálculo de huella hídrica gris, esto puede interpretarse como que, en teoría se habría requerido mínimo 826.694,71 m³/ mes en promedio, de agua dulce para asimilar la carga contaminante que vierte el Relleno Sanitario Doña Juana al río Tunjuelo.

Si se tiene en cuenta que el caudal promedio registrado para ese mismo periodo, del tramo 2 del río Tunjuelo fue de 1.410 l/seg, (VSV Consulting SAS, 2017) que corresponden a 3´705.480 m³/mes, podría decirse que la huella hídrica gris es menor que el caudal del afluente, por lo que el río Tunjuelo, en teoría estaría en capacidad de asimilar la carga contaminante reportada. Sin embargo, hay que considerar los problemas de contaminación que se registran en el río.

6.1.2. Huella hídrica gris por grupos de contaminantes.

6.1.2.1. Grupo: Metales en transición.

Este grupo de elementos tiene una representatividad del 76,1% en el total de la huella hídrica gris, y se destaca en este grupo el manganeso (Mn) con un 36,59%. Es el grupo más grande objeto de análisis (10 elementos en total). Los elementos con menor representatividad son el vanadio (V) el mercurio (Hg) y el Zinc (Zn), los cuales en conjunto conforman el 2,05% de la huella hídrica gris total.

En la figura 12 se representan las cantidades calculadas de huella hídrica gris para este grupo, mostrando el valor promedio, y los valores mínimos y máximos alcanzados en el año 2016.

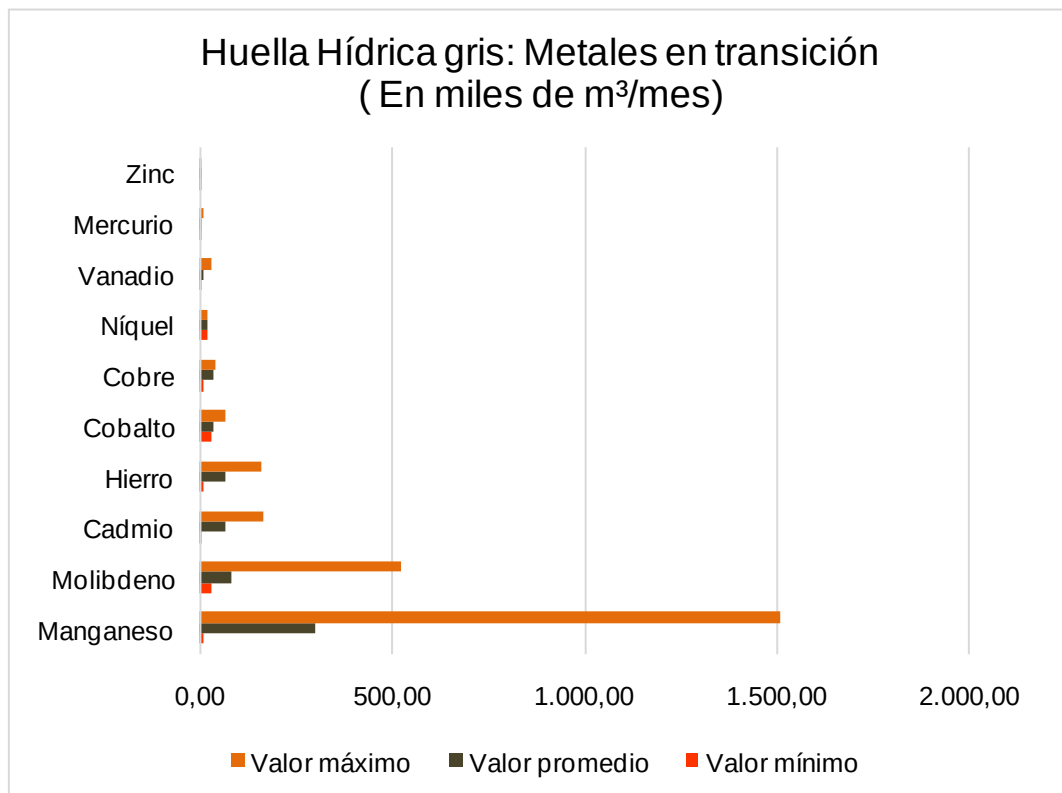


Figura 12: Conformación de la huella hídrica gris del grupo de metales en transición.

6.1.2.2. Grupo: Otros metales.

Este grupo, conformado por el aluminio (Al) y el plomo (Pb) constituyen el 6,8% de la huella hídrica gris total, siendo más significativo el segundo, ya que representa el 4.81% del total, con una huella de aproximadamente 40.000 m³/mes.

En la figura 13 se representan las cantidades calculadas de huella hídrica gris para este grupo, mostrando el valor promedio, y los valores mínimos y máximos alcanzados en el año reportado.

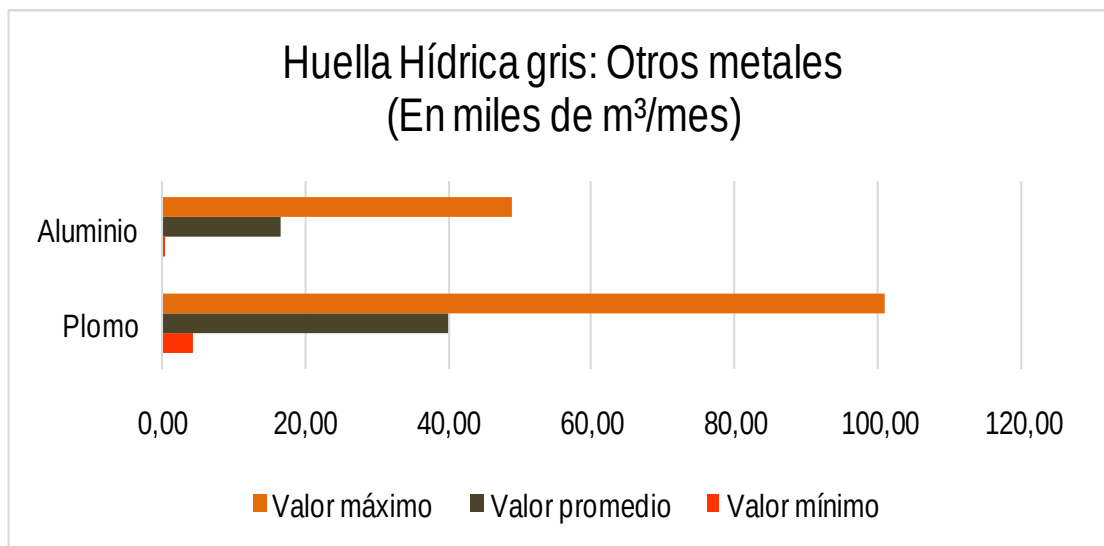


Figura 13: Conformación de la huella hídrica gris del grupo otros metales.

6.1.2.3. Grupo: Metales alcalinos, alcalinotérreos, metaloides y no metales.

En este grupo se encuentran elementos como el litio (Li), berilio, boro (B), arsénico (As) y selenio (Se). Constituyen el 2,17% del total de la huella hídrica gris calculada y se destaca el litio como el elemento menos representativo del total, con 504,58 m³/mes.

En la figura 14 se representan las cantidades calculadas de huella hídrica gris para este grupo, mostrando el valor promedio, y los valores mínimos y máximos alcanzados en el año 2016.

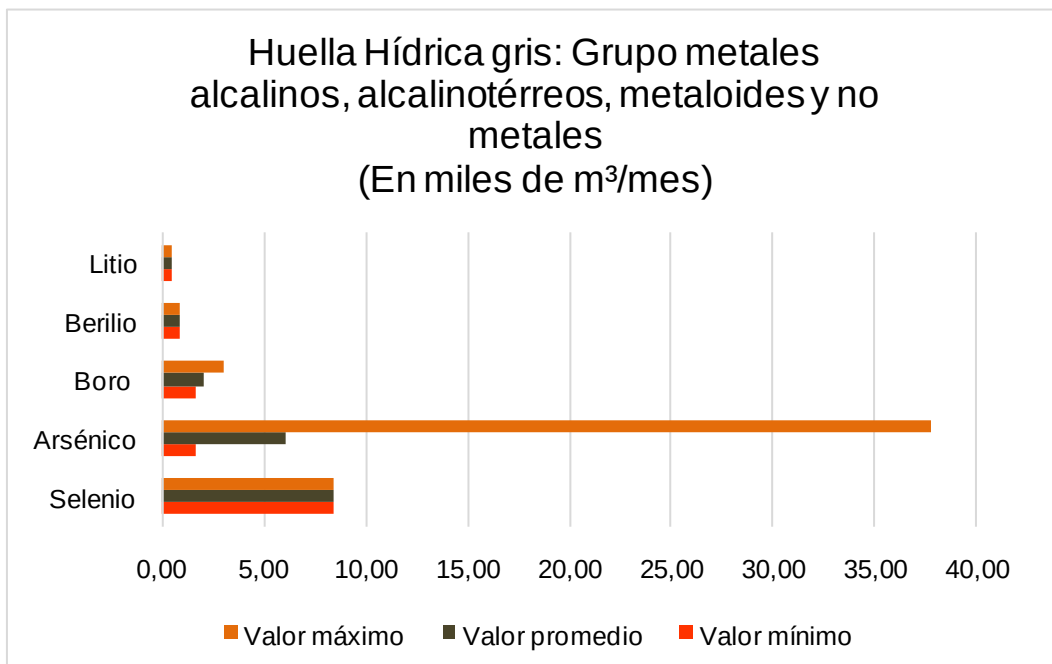


Figura 14: Conformación de la huella hídrica gris del grupo metales alcalinos, alcalinotérreos, metaloides y no metales.

6.1.2.4. Grupo: Compuestos orgánicos.

Este grupo constituye el 12,06% de la huella hídrica gris total, siendo el segundo en representatividad, principalmente por el parámetro de grasas y aceites, que representa el 11,7% de la huella. No obstante, los fenoles sólo representan el 0,36% del total

En la figura 15 se representan las cantidades calculadas de huella hídrica gris para este grupo, mostrando el valor promedio, y los valores mínimos y máximos alcanzados en el año 2016.

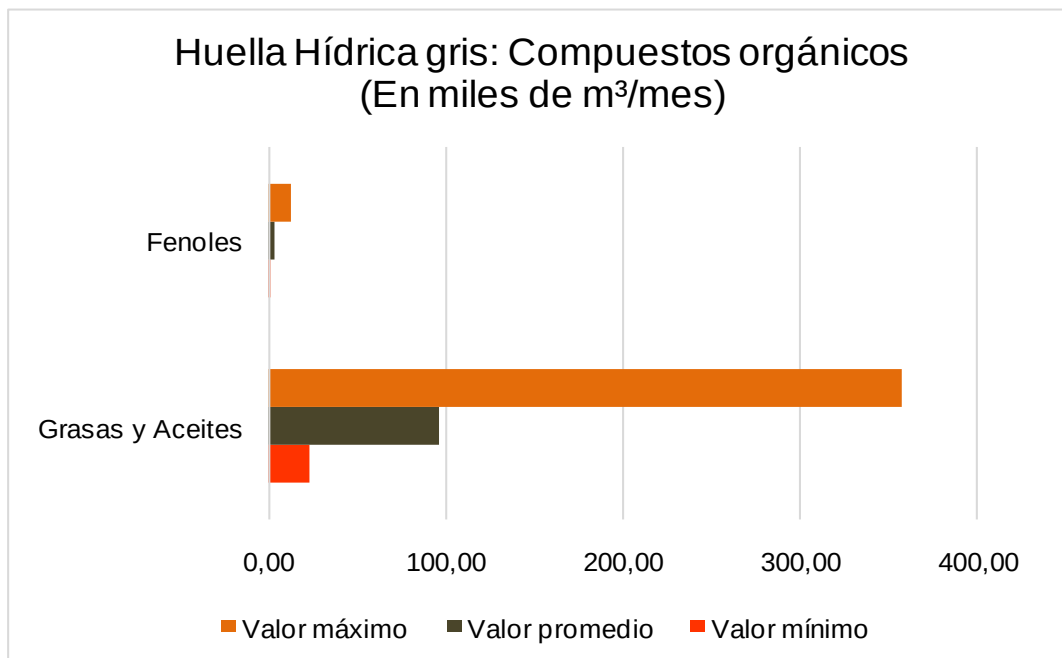


Figura 15: Conformación de la huella hídrica gris del grupo compuestos orgánicos.

6.1.2.5. Grupo: Procesos biológicos.

Este ítem está conformado sólo por el índice denominado demanda biológica de oxígeno (DBO), el cual mide la cantidad de oxígeno que se puede consumir al degradarse la materia orgánica que se encuentra en el agua contaminada (IDEAM, 2014). Conformar el 2,87% del total de la huella gris calculada, con 23.738 m³/mes.

En la figura 16 se representan las cantidades calculadas de huella hídrica gris para demanda biológica de oxígeno DBO, mostrando el valor promedio, y los valores mínimos y máximos alcanzados en el año 2016.

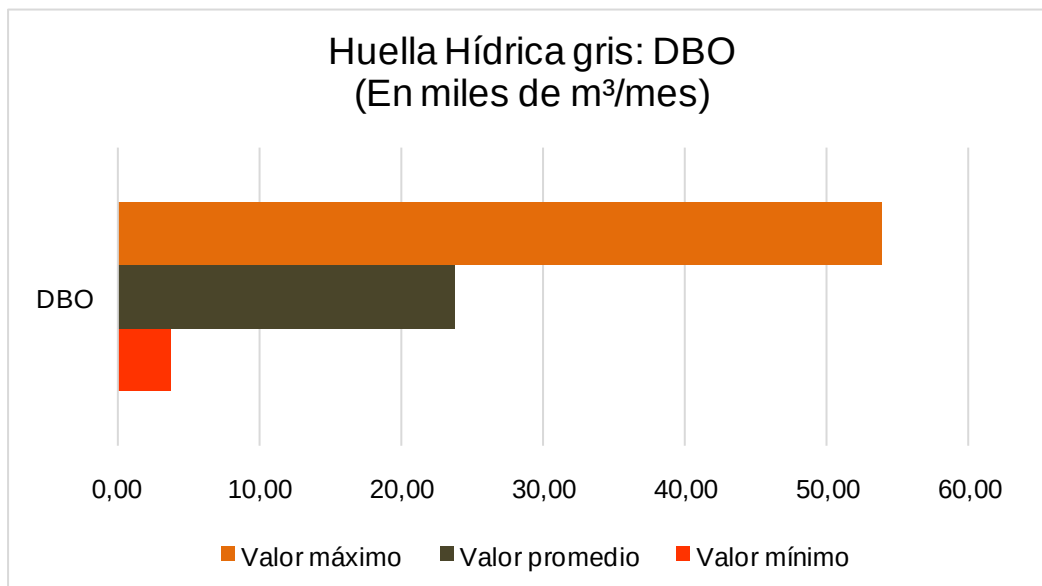


Figura 16: Conformación de la huella hídrica gris de la demanda biológica de oxígeno DBO.

6.2. ANÁLISIS DE SOSTENIBILIDAD DE LA HUELLA HÍDRICA GRIS DEL RELLENO SANITARIO

6.2.1. Sostenibilidad ambiental.

Cuando el índice NCA es mayor a 1, se considera que la actividad analizada mediante cálculo de huella hídrica gris es ambientalmente insostenible.

Para el caso de la presente investigación, en el relleno sanitario Doña Juana, con datos del año 2016, el índice NCA es inferior a 1, por lo cual, es sostenible. Sin embargo, se deben tener en cuenta los problemas de contaminación de la cuenca del río Tunjuelo y la dificultad de obtener datos reales de la concentración de los contaminantes en el río antes de recibir las descargas del relleno sanitario.

Con el fin de aportar al análisis del índice NCA, se calculó con tres grupos de datos, correspondientes a los valores mínimos, promedio y máximos de huella hídrica gris total, arrojando valores de NCA de 0.045, 0.223 y 0.853 respectivamente.

En la figura 17 se muestran los valores para cada grupo de datos, de forma comparativa.

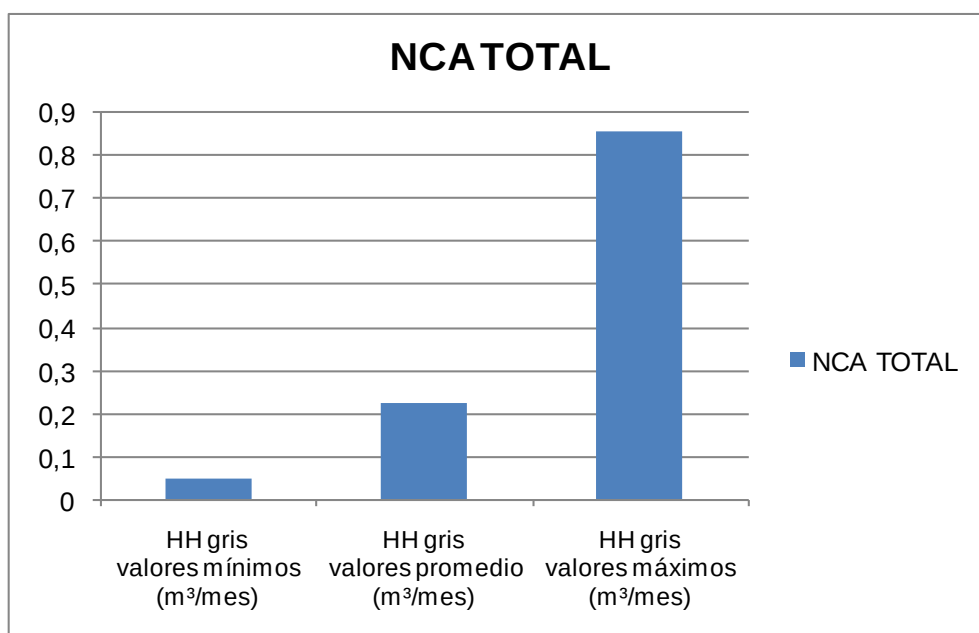


Figura 17. Índice de contaminación del agua, (NCA) en función de valores mínimos, promedio y máximos de huella hídrica gris total.

Se observa proporcionalidad relacionada con la magnitud de los valores utilizados para calcular índice NCA. Sin embargo, en ninguno de los tres casos, el índice es mayor a 1, aunque el valor de NCA calculado a partir de huella hídrica gris sobre valores máximos, se acerca considerablemente.

En cuanto al índice NCA por parámetro medido, se pudo observar que para el periodo de estudio y a partir de la huella hídrica promedio, el índice NCA por contaminante, se representa en la siguiente figura:

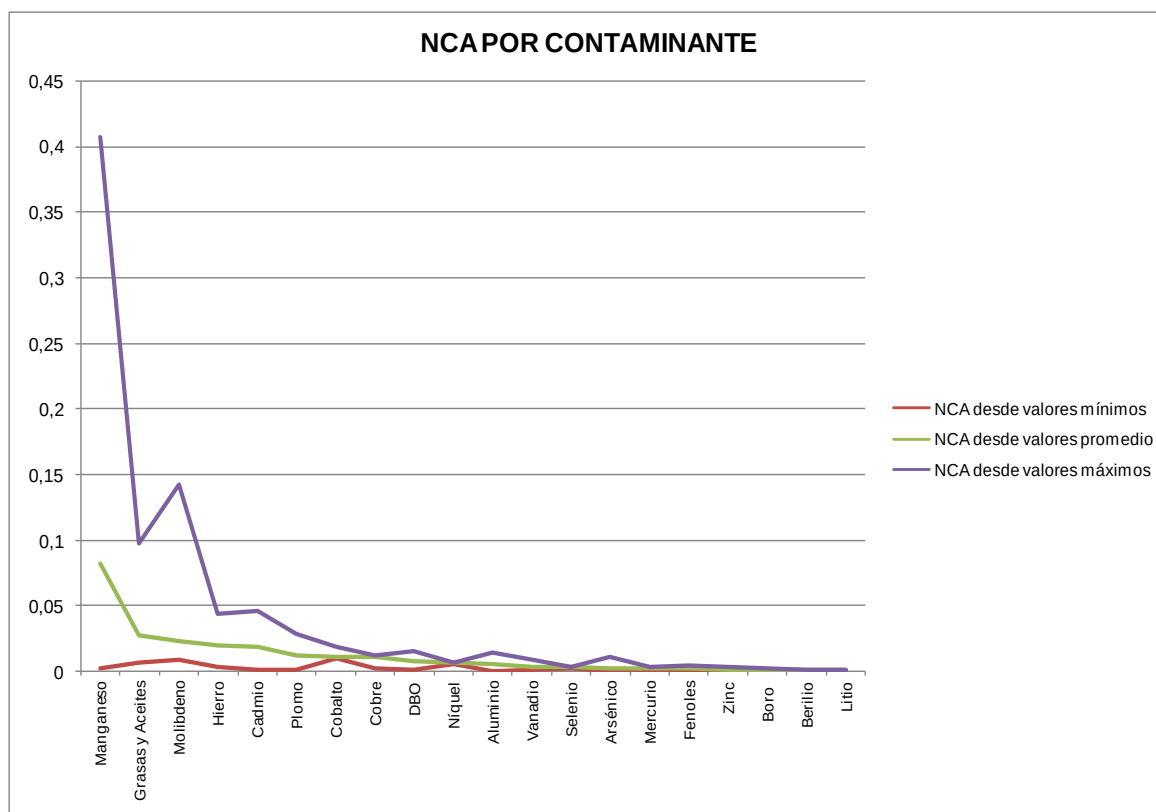


Figura 18. Índice de contaminación del agua, (NCA) por contaminante.

El índice de contaminación del agua NCA, por contaminante analizado, muestra que todos están por debajo de 0.4 y que se presentan unos valores relevantes para elementos como el manganeso, el molibdeno y el cadmio, además de grasas y aceites.

6.2.2. Sostenibilidad Económica.

Como se planteó desde el marco metodológico, la guía del Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura IICA, propone análisis de sostenibilidad económica sólo para las huellas hídricas azul y verde, debido a su aplicabilidad en sectores productivos.

Sin embargo, desde el presente trabajo se plantea la posibilidad de evaluar la sostenibilidad económica de la huella hídrica del Relleno Sanitario Doña Juana, desde el enfoque del esquema tarifario, ya que permite visualizar el costo de procesar los residuos, sumado al costo del tratamiento de los lixiviados.

El análisis que se propone de sostenibilidad económica se enfoca a partir de los costos asociados a la actividad tratamiento de lixiviado que se realiza en el relleno, que según normatividad del marco tarifario vigente, la considera como actividad fundamental de la operación y post clausura de la disposición final de residuos sólidos. Los costos asociados a esta actividad dependen de dos factores; i) cantidad y composición del lixiviado, ii) objetos de tratamiento impuestos por la autoridad ambiental competente. (Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico, 2015).

Según el informe de Evaluación de Impacto Ambiental de 2013, el costo de tratamiento de un metro cúbico en la planta de tratamiento de lixiviados presente en el área del RSDJ, actualmente oscila entre \$9.500 y \$11.500 por m³ (GENIVAR, 2013)

Así las cosas, para el mes de agosto de 2018 la tarifa por costo de tratamiento de lixiviado fue:

CTL Agosto 2018 = \$1.936,65/ Tonelada dispuesta.

Por lo anterior, y debido a las condiciones tan particulares del objeto de estudio, como es el relleno sanitario Doña Juana, se plantea abordar el análisis de sostenibilidad económica, desde un nuevo modelo tarifario.

Las principales limitaciones para desarrollar la investigación de huella hídrica gris en el relleno sanitario fue la falta de información tanto en medición de parámetros, como en la adecuada periodicidad del mismo (reportes mensuales), lo anterior y según información de la UAESP se debe a los incumplimientos del operador del relleno sanitario. En atención a estas limitaciones y los múltiples inconvenientes que el relleno sanitario presenta hace varios años, el operador del relleno sanitario solicitó ante la Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico – CRA, la modificación del costo económico de referencia de las actividades de Disposición Final – CDF y Tratamiento de Lixiviados – CTL. Argumentando principalmente que:

(...) el Relleno Sanitario Doña Juana cuenta con particularidades de inversiones y operación determinadas por la Licencia Ambiental, Estudio de Impacto Ambiental, Plan de Manejo y normatividad de vertimientos (...), que difieren de los modelos establecidos

por la CRA para la tecnología de referencia para el relleno sanitario tipo RSU 1 y el escenario 4 de tratamiento de lixiviados, y que deben ser reconocidas en los componentes de disposición final — CDF y tratamiento de lixiviados - CTL para garantizar el desarrollo de los proyectos de disposición final y tratamiento de lixiviados adelantados por CGR para de la adecuada disposición de los residuos del servicio público de aseo de Bogotá D.C. y algunos municipios de Cundinamarca (...) (Resolución 834 de 2018)

(...) Que los escenarios de tratamiento van conteniendo un mayor grado de complejidad a medida que a se incrementen los objetivos de calidad fijados por la autoridad ambiental. En este orden de ideas, el Escenario 1 de la Resolución CRA 720 de 2015 corresponde a un objetivo de calidad mínimo cuyo fin es remover sólidos suspendidos y materia orgánica; mientras que el Escenario 4, que es el que aplica al solicitante, corresponde al nivel de tratamiento más exigente posible a nivel nacional, asociado a la remoción de sólidos suspendidos, materia orgánica, nitrógeno, compuestos orgánicos y sustancias inorgánicas de interés sanitario. (...) (Resolución 834 de 2018)

Es así como la CRA se pronunció mediante la Resolución CRA 843 de 2018 “*Por la cual se resuelve la solicitud de modificación del costo económico de referencia para los componentes de Disposición Final— CDF y de Tratamiento de Lixiviados — CTL, presentada por Centro de Gerenciamiento de Residuos Doña Juana S.A. E.S.P.*” en los siguientes términos:

(...) Que una vez realizado el análisis de la información del costo de Disposición Final —CDF- que reposa en el expediente de la solicitud de modificación de costos del Centro de Gerenciamiento de Residuos Doña Juana S.A.E.S.P., se demostró que en el Relleno Sanitario Doña Juana existen particularidades, en relación con: i) Diseño del relleno sanitario: método constructivo y período del proyecto, ii) Mayor escala de operación y iii) Exigencias derivadas de la Licencia Ambiental; las cuales requieren de un costo mayor al reconocido por el modelo eficiente definido por la Resolución CRA 720 de 2015. (...) (Resolución 834 de 2018)

La Resolución en mención resolvió entonces en su artículo segundo. ACCEDER a la modificación del Costo Económico de Referencia para el componente de Tratamiento de Lixiviados — CTL, por la causal de mutuo acuerdo presentada por el Centro de Gerenciamiento de Residuos Doña Juana S.A. E.S.P., de conformidad con lo expuesto en la parte motiva de esta resolución, en razón de lo cual dicho Costo de Disposición Final se calculará teniendo en cuenta si hay o no aportes bajo condición, así:

“2.1. Costo de Tratamiento de Lixiviados (CTL). El costo máximo de tratamiento de lixiviados por metro cúbico (CTLM) para el relleno sanitario Doña Juana se calculará con las funciones a continuación. Tanto el volumen a incluir en el cálculo, como la selección del escenario de tratamiento de lixiviados, se harán de acuerdo con los objetivos de calidad que establezca la autoridad ambiental en la norma de vertimientos o la respectiva licencia ambiental. El costo de tratamiento de lixiviados por tonelada se calculará de la siguiente forma:

$$CTL = \frac{(CTLM * VL) + CMTLX}{QRS}$$

$$CTLM = CTLM_VU_{RSDJ} + CTLM_PC_{RSDJ}$$

Donde:

CTL: Costo de Tratamiento de Lixiviados por tonelada (pesos de diciembre de 2014/tonelada).

CTLM: Costo de Tratamiento de Lixiviados por metro cúbico máximo a reconocer, según el objetivo de calidad (pesos de diciembre de 2014/m³).

CTLM_VU_{RSDJ}: Costo de Tratamiento de Lixiviados por vida útil de 20 años, el cual será como máximo \$36.984,20 por metro cúbico (pesos de diciembre de 2014/m³).

CTLM_PC_{RSDJ}: Costo de Tratamiento de Lixiviados por período de la etapa de posclausura de quince (15) años, el cual será como máximo \$8.432,22 por metro cúbico (pesos de diciembre de 2014/m³).

VL: Volumen promedio mensual de lixiviados tratados del semestre que corresponda (m³/mes), de acuerdo con lo definido en el ARTÍCULO 4 [Resolución CRA 720 de 2015]. En el caso de personas prestadoras que inicien actividades con posterioridad de la entrada en vigencia de la fórmula tarifaria, podrán utilizar períodos inferiores hasta acumular seis (6) meses.

CMTLX: Costo Generado por la Tasa Ambiental para el vertimiento del tratamiento de lixiviados en rellenos sanitarios, con referencia a la tasa retributiva por la utilización directa o indirecta del agua como receptor de vertimientos. El costo a incluir corresponderá al cobro definido por la autoridad ambiental al usuario que realiza vertimientos puntuales en forma directa o indirecta al recurso hídrico, en \$/m³mes, para el semestre anterior que corresponda.

QRS: Promedio mensual del semestre que corresponda de las toneladas de residuos recibidas en el relleno sanitario definido en el ARTÍCULO 28 [Resolución CRA 720 de 2015] (toneladas/mes).

Así las cosas, el costo de tratamiento de lixiviado por vida útil de 20 años sería de \$36.984,20 por metro cúbico. Es decir, aumentaría en promedio \$25.000 m³ respecto a lo definido por la Resolución 720 de 2015.

6.2.3. Sostenibilidad Social.

Desde la perspectiva de Guía Metodológica para la Evaluación de la Huella Hídrica en una Cuenca Hidrográfica del IICA se pretende desarrollar criterios que ayuden a determinar el grado de equidad en el uso del agua de la cuenca, con la información obtenida, procesada, y de la mano de los otros dos enfoques de análisis, ambiental y económico. Hasta la fecha, se han realizado muy pocos estudios de caso que incluyan el

análisis de sostenibilidad social de la huella hídrica gris en cuenca. Por lo anterior y sumando a ello, la inexistencia de antecedentes de medición de huella hídrica gris en relleno sanitario, se presenta un amplio grado de complejidad al momento de abordar el tema de sostenibilidad social.

Por tal razón, esta investigación plantea un análisis de sostenibilidad social de la huella hídrica gris calculada para el relleno sanitario Doña Juana, no desde un enfoque de equidad del uso del agua, como lo propone originalmente la guía del IICA, si no desde i) las prestaciones de la actividad del servicio de Disposición Final que presta en relleno sanitario y ii) el seguimiento al saneamiento básico del tramo 2 de cuenca del río Tunjuelo.

Respecto a las prestaciones de la actividad de Disposición Final, según estudios adelantados por la UAESP se calcula que para el año 2017, el sector residencial y comercial de la ciudad de Bogotá generó un total de 6.868 Toneladas/día, las cuales son llevadas a disposición final al relleno sanitario Doña Juana. (Consortio NCU - UAESP, 2017).

Adicionalmente, se deben considerar los aportes de los seis (6) municipios de Cundinamarca, que no hacen parte de la cuenca del río Tunjuelo, y a los cuales el RSDJ presta sus servicios. Une (9.561 habitantes), Cáqueza (17.303 habitantes), Choachí (10.553 habitantes), Chipaque (8.401 habitantes), Ubaque (5.958 habitantes), Fosca (7.852 habitantes), Gutiérrez (4.312 habitantes). (DANE, 2005). Que, para efectos prácticos, estos 70.000 habitantes, equivaldrían a la sumatoria de dos veces la población de la localidad de La Candelaria.

El modelo propuesto para el seguimiento al saneamiento básico se articula en su totalidad con los objetivos establecidos en el Plan Hídrico Nacional. (MAVDT, 2010) los cuales se presentan a continuación:

- Oferta: Conservar los ecosistemas y los procesos hidrológicos de la cuenca del río Tunjuelo.

- Demanda: Caracterizar, cuantificar y optimizarla demanda de agua en la cuenca del río Tunjuelo.
- Calidad: Mejorar la calidad y minimizar la contaminación del recurso hídrico.
- Riesgos: Desarrollar la gestión integral de los riesgos asociados a la oferta y disponibilidad del agua.
- Fortalecimiento Institucional: Generar las condiciones para el fortalecimiento institucional en la gestión integral del recurso hídrico.
- Gobernabilidad: Consolidar y fortalecer la gobernabilidad para la gestión integral del recurso hídrico.

6.3. FORMULACIÓN DE ESTRATEGIAS DE RESPUESTA PARA LA GESTIÓN DE LA HUELLA HÍDRICA GRIS

Desde este ejercicio teórico de validación de la metodología de huella hídrica para análisis de sostenibilidad ambiental, sólo es posible plantear la necesidad de establecer:

- i) Estrategia de monitoreo y seguimiento a los parámetros exigidos por las disposiciones legales vigentes, según lo expuesto en el capítulo 9 del estudio de impacto ambiental complementario. (GENIVAR, 2013).
- ii) La estandarización de procedimientos, protocolos y toma de muestras establecidos por la Norma Técnica Colombia NTC ISO 5667-10 y el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM, bajo los lineamientos de la norma NTC-ISO/IEC 17025 *“Requisitos Generales de Competencia de Laboratorios de Ensayo y Calibración”*, y según lo estipulado en el Decreto 1600 de 1994 y la Resolución No. 0176 del 31 de octubre de 2003. Es importante considerar el procedimiento de muestreo partiendo de la reubicación del punto de toma de muestras, de tal forma que sea lo menos afectado posible por variables como infiltraciones, conexiones erradas, entre otras, así mismo medir los mismos parámetros en la parte alta de la cuenca, en la misma intensidad y

frecuencia, con el fin de establecer concentraciones naturales reales de los parámetros de interés, y así llegar a una cuantificación de huella hídrica gris más ajustada a la realidad y finalmente hacer registro permanente de caudales, tanto del efluente, como del cuerpo receptor.

- iii) Análisis de resultados que interpreten las mediciones de los parámetros en tiempo real, asociados a las actividades de disposición final en el relleno versus caracterización del material dispuesto, un esquema práctico y permanente de medición de los parámetros establecidos por la normatividad vigente, el cual pueda proporcionar información periódica y constante, insumo principal para la medición y monitoreo de la huella hídrica gris.
- iv) Aplicación de un modelo estadístico multivariado, que permita aplicar métodos de dependencia y métodos de interdependencia. (Mira, 2006)
- v) Actualización del formato de *Informe mensual de supervisión y control de Disposición Final. Punto 4. Sistema de tratamiento de Lixiviados*. Documento modelo en el cual la UAESP reporta los seguimientos realizados al RSDJ. Toda vez que los 24 parámetros desarrollados en el documento corresponden a la Resolución CAR 166 de 2008, y la normatividad vigente es la Resolución 631 de 2015 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.

7. DISCUSIÓN

Basados en los resultados obtenidos del análisis de huella hídrica, para las condiciones evaluadas en el Relleno Sanitario Doña Juana se consideraría ambientalmente sostenible. Sin embargo, en la aplicación de la metodología se identificaron limitantes que impiden asumir los resultados obtenidos como concluyentes, teniendo en cuenta los siguientes aspectos:

Disponibilidad y cantidad de información. Para efectos del análisis de información, se tomó la serie más completa de mediciones con la que cuenta la Unidad Administrativa Especial de Servicios Públicos UAESP, que corresponde al año 2016 exceptuando el mes de noviembre.

Dimensión temporal. El ejercicio desarrollado plantea un escenario o “imagen” de la situación de huella hídrica gris para el periodo inmediatamente anterior descrito. Así mismo es importante tener en cuenta que los contaminantes de interés no corresponden al total de los requeridos por el marco legal actual.

Frente al tema de lixiviados, es importante considerar que adicional a la operación del relleno sanitario, la cuenca del río Tunjuelo recibe numerosas descargas de tipo doméstico e industrial, producto de toda la dinámica social y económica que tiene la zona. Interventorias realizadas al Relleno Sanitario Doña Juana, informan que actividades contaminantes se presentaban a través de toda su cuenca, a saber: i) vertimientos de canteras, ii) ladrilleras, iii) curtiembres, iv) mataderos, v) industria química y vi) todas las aguas servidas del sistema de alcantarillado que se encuentra a su paso. Es así como actualmente la solución a la problemática de este recurso hídrico no es integral ni equitativa. (HNV – CONCOL, 2008).

Por las razones expuestas anteriormente el vertimiento de este tipo de lixiviados deteriora de manera significativa el recurso hídrico. (Montenegro, 2013), lo que supondría que es necesario reubicar los puntos de muestreo fuera del área de influencia del relleno sanitario.

Respecto al índice de calidad ambiental (NCA) el resultado de la investigación arrojó que ninguno de los contaminantes supera el valor de 1. el cual es definido como sostenible según la fórmula de la metodología. (IICA, 2017). Sin embargo debe considerarse que este indicador se ve sensiblemente afectado por el valor del caudal del cuerpo receptor. En este caso se utilizó un caudal promedio para los once meses de medición, en el tramo dos, de la cuenca del río Tunjuelo. (Genivar, 2014)

Existen unas consideraciones especiales sobre las variables de la ecuación. Para el caso del relleno sanitario Doña Juana, se encontraron condiciones particulares que afectaron la aplicación de la fórmula de cálculo de huella hídrica gris, especialmente en dos variables de Concentración Natural (C_{nat}). Esta variable hace alusión a la concentración de cada contaminante presente en el cuerpo de agua receptor, como si este no tuviera intervención humana.

Al respecto se deben tener en cuenta lo siguiente: No hay disponibilidad de valores de concentración natural de los parámetros analizados, lo que también es reportado por Castillo y Rodríguez (2016), por lo cual se asume para este ejercicio teórico que el valor de concentraciones naturales es de cero.

Otra consideración con la variable de la ecuación se refiere a él Volumen de agua extraída ($Extr$). la ecuación plantea que esta variable corresponde al agua que utiliza un proceso, extraída del cuerpo de agua principal de la cuenca.

En este caso, el relleno sanitario Doña Juana no hace extracción de agua del río Tunjuelo para desarrollar su proceso de tratamiento de residuos sólidos ordinarios, por lo que esta variable se manejó con un valor de cero.

La rigurosidad en el análisis de huella hídrica gris se ve notablemente afectada por factores como tiempo, intensidad de muestro, cantidad de parámetros objeto de análisis, normatividad vigente, disponibilidad de información.

Ahora bien, revisando estudios similares adelantados por otros investigadores se encontró una estimación de huella hídrica para Bogotá por parte de la Contraloría de Bogotá (Castillo-Rodríguez, 2018), quienes llevaron a cabo cálculo de huella hídrica y de carbono para la ciudad de Bogotá, para varios sectores productivos y doméstico en el año de 2014, y presentan un aparte dedicado al cálculo de huella hídrica gris de los lixiviados del relleno sanitario Doña Juana, a partir de la siguiente ecuación:

$$WPPTL_{Gris} = \frac{L}{C_{max} - C_{nat}}$$

Donde:

L: Corresponde a las concentraciones mensuales de: Grasas y aceites, DBO5 y fenoles, según reportes de la Unidad Administrativa Especial de Servicios Públicos UAESP, para el año 2015.

C_{max} : Concentraciones máximas permitidas por la autoridad ambiental para los parámetros de calidad evaluados

C_{nat} : Concentración natural del río Tunjuelo.

De acuerdo al reporte de la Contraloría, para el año 2015, la huella hídrica gris más relevante, correspondió a la de grasas y aceites con un valor de 1.306 millones de metros cúbicos al año, seguido de DBO con 1.058 millones de metros cúbicos al año, y por último los fenoles con 225 millones de metros cúbicos por año, aproximadamente. (Castillo-Rodríguez, 2018)

Si se expresan estos valores en metros cúbicos por mes, para hacer una comparación sencilla, los valores aproximados serían de 108 millones, 88 millones y 18 millones de metros cúbicos mes, respectivamente.

Al comparar con los resultados obtenidos en la presente investigación, estos tres parámetros presentan una diferencia muy significativa, ya que los valores más altos para grasas y aceites, DBO y fenoles corresponden respectivamente a 357 mil, 53 mil y 12 mil metros cúbicos al mes.

Es posible que estas diferencias radiquen en la forma de procesar datos, la conversión de medidas, incluso en la interpretación de las variables que establece la ecuación general para cuantificación de huella hídrica gris.

En cuanto a cálculo del índice de contaminación del agua NCA, el estudio mencionado utiliza un factor denominado *suministro confiable continuo* (SCC) (Castillo-Rodríguez, 2018) cuyo valor es de 17.04 m³/s, (equivalentes a 17.040 l/s) el cual reemplaza el valor de disponibilidad real de agua, sobre el que se divide la huella hídrica gris total para cada contaminante.

Bajo estas condiciones, los índices de contaminación del agua fueron de 1.91 para DBO, 2.43 para grasas y aceites y 0.42 para fenoles. Esto implica que sólo fue sostenible ambientalmente la huella hídrica gris de los fenoles, para el año 2015 y con los condicionantes de cálculo mencionadas.

En el caso del presente trabajo, no se usó el factor SCC, sino el caudal promedio del río Tunjuelo para el tramo 2 en el año 2016, correspondiente a 1.410 l/s, y los valores de NCA fueron de 0.09 para grasas y aceites, 0.014 para DBO, y 0.003 para fenoles.

Estas diferencias también pueden tener origen en la forma en que se hizo conversión de medidas, y principalmente por el uso de un factor como es el de suministro confiable

continuo (SCC), cuya aplicabilidad es cuestionable, toda vez que corresponde a un caudal de suministro constante de agua potable vía acueducto (Empresa de Acueducto, Alcantarillado y Aseo de Bogotá - ESP, 2015), y no al caudal que pueda presentar el cuerpo de agua receptor, que en este caso es el río Tunjuelo.

Otro estudio realizado en el año 2013, relacionado con cálculo de huella hídrica para Bogotá, basa su análisis en el parámetro de sólidos totales en suspensión (SST), registrados en el año 2008 y arroja como resultado final una huella hídrica gris de 515.987.041 m³/año sólo para el río Tunjuelo, el cual aporta el 92 % de la huella hídrica gris de Bogotá, pero lo atribuye más a la densidad poblacional y a la diversidad de actividades económicas que se desarrollan en su cuenca, que a la presencia e impacto de la actividad del relleno sanitario Doña Juana. (Ivanova, 2013)

En dicho estudio, llama la atención que, habla de estimar la huella hídrica gris de la cuenca del río Tunjuelo, basando su cálculo en la siguiente ecuación:

$$HH_{gris.Tunjuelito} = \frac{L_{Tunjuelo}}{C_{max} - C_{nat.San Bernardino}}$$

En la que las variables corresponden a:

$L_{Tunjuelo}$: Concentración del contaminante (Sólidos totales en suspensión) vertido directamente al río Bogotá a través del río Tunjuelo.

C_{max} : Concentración máxima permitida por normativa.

$C_{nat.San Bernardino}$: Concentración de los SST antes de los vertimientos generados por el río Tunjuelo, medidos en un punto de monitoreo denominado “San Bernardino” ubicado cerca de la confluencia con el río Bogotá.

Claramente se observan deficiencias en la interpretación de las variables de este estudio, específicamente en el caso de la concentración natural, ya que no toma el valor de la concentración de sólidos en suspensión en un punto de la cuenca en el que no haya intervención humana, (como se define desde la metodología para cálculo de huella hídrica gris), sino desde un punto en el que el río tiene una carga contaminante alta, poco antes de llegar al río Bogotá.

De esta forma no hay manera de evidenciar contraste entre la concentración máxima permitida y la concentración natural, en el denominador de la ecuación. Además el cálculo se simplifica a tal punto que el desarrollo del cálculo se asemeja más a la situación de un vertimiento, que a la complejidad que supone el flujo de agua gris de una cuenca como la del río Tunjuelo.

Si bien se dificulta comparar los resultados entre los trabajos revisados, y los que arrojó la presente investigación, la misma dificultad evidenciada y descrita se constituye en un punto de interés para analizar y reflexionar, en cuanto al por qué de las diferencias de alcance, forma de interpretar y aplicar las ecuaciones para cálculo de huella hídrica, y la forma de interpretar los resultados, y aún así presentar resultados suficientes para presentar una huella hídrica total.

7.1. ANÁLISIS DE SOSTENIBILIDAD ECONÓMICA

Si bien, para el análisis de sostenibilidad económica, la metodología plantea un enfoque comparativo entre actores dedicados a la misma actividad, para evaluar la eficiencia del uso, tanto del agua como de la tierra. (IICA, 2017), cosa que no es posible con una actividad tan particular y única en el área de estudio, como lo es el Relleno Sanitario Doña Juan, en el marco de la presente investigación se sugiere adoptar el nuevo marco tarifario de la Resolución 843 de 2018 *"Por la cual se resuelve la solicitud de modificación del costo económico de referencia para los componentes de Disposición*

Final — CDF y de Tratamiento de Lixiviados — CTL, presentada por Centro de Gerenciamiento de Residuos Doña Juana S.A. E.S.P."

Si se asume un costo por metro cúbico de lixiviado tratado, equivalente a \$ 11.500 y el caudal del efluente oscila entre 16 y 22 l/s (Genivar, 2014), el costo de tratamiento de lixiviados en un año sería entre \$ 6.291.432.000 y \$ 7.615.944.000. No obstante, la tarifa que se cobra a la ciudadanía es de \$ 1.700 por metro cúbico tratado, muy por debajo del costo real de tratamiento de lixiviados (Parra, 2017).

En estos términos, el tratamiento de lixiviados del relleno sanitario Doña Juana se consideraría económicamente insostenible, lo que representa una oportunidad de formulación de estrategia de respuesta.

Sin embargo, es importante tener en cuenta que la operación de la planta de tratamiento de lixiviados, comparada con los valores que se manejan en países desarrollados, es de un costo muy bajo. Si a 2013 el costo de tratamiento de lixiviados equivaldría a U\$ 5,75 /m³, un tratamiento básico y con bajo nivel de infraestructura (Humedales, evaporación), puede oscilar entre 1 y 5 U\$/m³, mientras que tratamientos más complejos y combinados como Ósmosis inversa o procesos físicoquímicos pueden estar entre los 25 U\$ y los 40 U\$ por metro cúbico (Giraldo, 2014).

7.2. ANÁLISIS DE SOSTENIBILIDAD SOCIAL

En lo que respecta al análisis de sostenibilidad social, la metodología lo define como el enfoque de equidad en cuanto al acceso al recurso hídrico por parte del universo de actores de la cuenca, el que se plantea como base para el análisis. De esta forma se observa que el análisis de sostenibilidad social se da en el contexto de la cuenca, y que la huella hídrica del relleno sanitario Doña Juana es solamente un insumo para llegar a establecer, con el consolidado de otras actividades y actores, si el uso del agua es equitativo o no.

7.2.1. Prestaciones de la actividad de Disposición Final.

Como lo afirma Hoekstra *et al.* (2011), el análisis de esta dimensión es complejo y por la misma razón ha sido muy poco trabajado, entre otras porque se busca determinar el grado de equidad en el uso del agua de una cuenca, combinado con las necesidades sociales de sus habitantes.

Pero se considera importante resaltar que el relleno sanitario presta su actividad de servicio público, de disposición final de residuos sólidos a aproximadamente 8 millones de habitantes, de la ciudad de Bogotá y de seis (6) municipios aledaños a la ciudad.

7.2.2. Seguimiento al saneamiento básico del tramo 2 de la cuenca río Tunjuelo.

El monitoreo y seguimiento a las actividades del RSDJ están dispuestas en una serie de normas descritas anteriormente. El escenario ideal para el seguimiento y control del tramo 2 de la cuenca del río Tunjuelo, espacio en el cual tiene lugar la operación del RSDJ, es lograr establecer diferentes modelos de calidad de agua, que tienen por finalidad determinar las nuevas concentraciones de contaminantes del cuerpo de agua en cada punto y a lo largo de zonas de interés, cuando las condiciones de modificación y el estado primitivo son conocidas. (Castaño, 2015)

Así mismo es ideal conocer la medida de autodepuración del tramo 2 de la cuenca del río Tunjuelo; determinada como la capacidad de los sistemas naturales para modificar la composición del agua que reciben, y eliminar contaminantes (materia orgánica, sustancias en suspensión, etc.) (Rueda, 2005)

Respecto a los limitantes por marco legal, se considera que el cálculo de huella hídrica gris y el análisis de sostenibilidad ambiental consiguiente, pueden volverse tan dinámicos, como sean dinámicas las disposiciones legales que definen los parámetros de concentración máxima permisible. Al respecto es importante mencionar que, según la

Resolución 631 de 2015, *Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones.* Artículo 14. *Parámetros fisicoquímicos a monitorear y sus valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de aguas residuales no domesticas (ARND) de actividades asociadas con servicios y otras actividades.* Respecto a los veintiún metales y metaloides a evaluar, siete de ellos (Berilio, Boro, Cobalto, Estaño, Litio, Manganeso, Molibdeno) están sujetos a “*Análisis y Reporte*”, quiere decir que no le establece ningún límite máximo permitido, lo que genera un vacío en la interpretación e impacto del contaminante.

Por otra parte comparando la Resolución CAR 166 de 2008 con la Resolución MADS 631 de 2015 se evidencia que es más laxa la resolución de orden nacional con parámetros como Cadmio, Zinc, Cobre, Cromo, Níquel, Plomo, Selenio y Vanadio. La Resolución de orden nacional solo es más exigente en parámetro como Aluminio y Bario.

El presente trabajo se llevó a cabo en el marco de la resolución CAR 166 de 2008 y de la resolución 631 de 2015 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Las dos disposiciones legales, si bien son de diferente origen, son complementarias entre sí, toda vez que la norma nacional presenta vacíos en cuanto a valores de concentraciones máximas permitidas, y su aplicación e interpretación son básicas para el cálculo de huella hídrica gris. (Resolución 631, 2018)

Con el objeto de aportar al cumplimiento de los objetivos de desarrollo sostenible ODS, relacionados con saneamiento ambiental y calidad de agua, a futuro se darán modificaciones a los parámetros, que determinarán en gran medida las acciones y estrategias que deban adoptar los actores y las actividades que se desarrollan en la cuenca, y para este caso en particular, de la gestión de residuos en el relleno sanitario Doña Juana. (MAVDT, 2010)

7.3. FORMULACIÓN DE ESTRATEGIAS DE RESPUESTA

Como ya se ha venido mencionando, uno de los principales inconvenientes para la toma de decisiones y formulación de estrategias de respuesta, lo constituye la falta de registro constante y robusto de los datos relacionados con concentraciones de contaminantes, tanto en la salida de la planta de tratamiento de lixiviados como en la parte alta del río Tunjuelo para el monitoreo de concentración natural de parámetros de interés. (Castaño, 2015)

Esto hace que cobre importancia establecer un protocolo de medición constante de concentraciones, por lo menos en los puntos mencionados, para llegar a cuantificar huella hídrica gris de forma dinámica y confiable, suficiente para toma de decisiones.

De esta manera se puede construir una base de datos sólida y pertinente, que realmente sirva para la toma de decisiones en cuanto a la gestión de la huella hídrica, y pueda considerarse como insumo relevante, en el momento de aportar información a la gestión de la huella hídrica de la cuenca del río Tunjuelo.

8. CONCLUSIONES

El Enfoque de huella hídrica gris aporta a los criterios técnicos, objetivos y medibles respecto a la situación del recurso hídrico, información fundamental para la toma de decisiones respecto a la gestión del recurso. (ÖZTAS y CELÍKYAY, 2018).

Cabe destacar como resultado relevante de este trabajo con finalidad académica, que es posible hacer análisis de sostenibilidad ambiental del relleno sanitario Doña Juana, aplicando la metodología del Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura - IICA, para cálculo de huella hídrica gris, pero solucionando limitaciones técnicas como la falta de información, la intensidad de muestreo, entre otras, lo que conlleva a pensar que el análisis de sostenibilidad ambiental, desde huella hídrica, requiere contar con una infraestructura mínima y protocolos concretos de muestreos, que estarían a cargo de la Unidad Administrativa Especial de Servicios Públicos UAESP.

Al contar con una base técnica y estadística robusta, con buena cantidad y calidad de datos, obtenidos desde metodologías fiables, garantiza en gran medida una cuantificación de huella hídrica gris, con capacidad para convertirse en un instrumento de análisis dinámico y constante, sobre el que se puedan tomar decisiones que vayan finalmente dirigidas a una adecuada gestión de los lixiviados generados de la operación del relleno sanitario.

La importancia de que se haga análisis de sostenibilidad del relleno sanitario Doña Juana, utilizando la metodología IICA, para cálculo de huella hídrica, se puede ver desde dos perspectivas: una desde el punto de vista de actividad de alto impacto sobre el recurso hídrico, que finalmente es resultado de asumir la carga residual de otras actividades tanto productivas como asociadas al sector residencial, ubicadas dentro y fuera de la cuenca del río Tunjuelo, y otra desde el punto de vista de contexto geográfico objeto de manejo y gestión como lo es la cuenca hidrográfica, que es susceptible de análisis de sostenibilidad,

a partir del cálculo de las huellas hídricas de las actividades que se desarrollan en su territorio.

De esta manera, si se opta por efectuar un análisis de sostenibilidad para la cuenca del río Tunjuelo, tal como se llevó a cabo en la cuenca del río Porce (Zárate, Fernández, Kuiper, Unión, e IICA, 2017) se podría considerar como un antecedente, este primer ejercicio desarrollado para uno de los actores más importantes contenidos en su espacio.

Sin embargo, existen elementos que deben revisarse para la implementación de la metodología, los cuales tienen que ver directamente con las variables que tienen las ecuaciones de cuantificación de huella hídrica gris, y son los siguientes:

En primera instancia está el desarrollo de la variable L en el denominador de cuantificación de huella hídrica gris, que es donde realmente se incluyen variables de cuenca, ya que no solo tiene en cuenta el valor de concentración del contaminante (Zeng, 2012), sino que la convierte en la diferencia entre la concentración del contaminante de interés, presente en el caudal del efluente, y la concentración del mismo parámetro en el agua que entra en el proceso productivo. (Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA), 2017)

Este punto reviste gran importancia para el caso del relleno sanitario Doña Juana, porque dadas sus condiciones particulares de operación, no usa agua del río Tunjuelo para el manejo de los residuos a tratar, en estricta interpretación de la variable propuesta.

Lo anterior se constituye en una oportunidad de investigación a futuro, con miras a acercar más a la realidad el modelo teórico de cálculo de huella hídrica gris, por lo menos para el caso específico del RSDJ, indagando por una forma de definir alguna variable alternativa o la pertinencia de incluir entradas de agua al sistema como precipitación, escorrentías secundarias en el área de operación, etc.

En relación con el análisis del efluente en cuanto a caudales y concentraciones de parámetros, nuevamente resalta la necesidad de monitoreo constante, periódico y con rigurosidad científica basada en metodologías de muestreo adecuadas, que no se quede en la toma de datos para evitar procesos sancionatorios por parte de las autoridades ambientales, (Londoño Carvajal, 2010) sino que sea base para un análisis completo y concluyente de sostenibilidad ambiental.

Esto lleva a destacar la necesidad de reconsiderar el punto de muestreo a partir de un análisis científico detallado, toda vez que el actual se encuentra solamente a 200 metros del punto de salida del efluente sobre el río Tunjuelo (Genivar, 2014), lo que significa que aún se encuentra dentro del área de influencia del relleno sanitario. En consideración al punto denominado aguas arriba.

Así mismo es necesario establecer un punto permanente de muestreo en la parte alta de la cuenca del río Tunjuelo, en donde se pueda hacer toma de datos relacionadas directamente con la concentración natural de los parámetros de interés, presente en el río Tunjuelo, antes de ser afectado por actividades antrópicas, definido también a partir de un estudio juicioso y objetivo.

Por otra parte, y en línea con lo sugerido por Ivanova (2013), la forma de cuantificar huella hídrica gris se basa en concentraciones máximas permitidas en disposiciones técnicas legales y no tienen en cuenta otros aspectos como las características dinámicas de flujo y proceso de difusión de contaminantes en las corrientes hídricas.

De esta forma, la huella hídrica gris será sostenible, siempre y cuando cumpla con parámetros establecidos y representados en la ecuación de contabilidad de huella hídrica gris en la variable de concentración máxima (C_{max}), que mientras más altos sean, menor será el tamaño de la huella.

A manera de reflexión, el análisis de sostenibilidad desde el enfoque de huella hídrica, como lo señala Tobasura (2008), debe constituirse en la base de la generación y adopción

de políticas para mejorar la gestión del recurso hídrico, buscando reducir la tendencia de la “sustentabilidad débil” en la que se busca reemplazar el capital natural por capital elaborado por el ser humano, y hacer transición hacia la “sustentabilidad fuerte” que implica cambios sustanciales en paradigmas de consumo, apropiación de los recursos naturales y adaptación al entorno. (Kavanaugh, 2017)

Por tal razón, es necesario situar la recuperación de los residuos en el centro de los nuevos modelos económicos. La Comisión Europea ha querido demostrar que un uso más eficaz de los recursos puede dar lugar a nuevas perspectivas de crecimiento y oportunidades de empleo. (Frérot. 2014) y se puede reducir la presión sobre los sitios de disposición final de residuos sólidos y migrar del paradigma de pago por compensación de impactos a los recursos naturales, a una verdadera mitigación de impactos y búsqueda de alternativas de producción amigables con el ambiente.

Además, los objetivos de desarrollo sostenible 6. Asegurar la disponibilidad y la gestión sostenible del agua y el saneamiento para todos. y 12 Garantizar modalidades de consumo y producción sostenible (Departamento Nacional de Planeación, 2018) relacionados directamente con la presente investigación, y que reúnen los desafíos a los que se ven enfrentados los centros urbanos en constante crecimiento, se encuentran totalmente alineados al concepto de economía circular.

9. RECOMENDACIONES

Dando respuestas a la pregunta de investigación, sobre las condiciones mínimas requeridas para un análisis de sostenibilidad ambiental mediante el cálculo de la Huella Hídrica Gris en el relleno sanitario Doña Juana, se detallan a continuación los aspectos a tener en cuenta.

Es necesario contar con información completa y precisa, basada en la medición constante de la mayor cantidad de contaminantes posible, en la parte alta de la cuenca, y en el tramo 2 del río Tunjuelo, y siempre en función de los parámetros de concentración máxima vigentes, con el fin de hacer un análisis de sostenibilidad a partir de huella hídrica gris más consistente y capaz de brindar elementos para planear estrategias de respuesta oportunas y acordes a la realidad que va cambiando, en función de variables como el marco legal, el volumen de residuos tratados, el caudal del efluente, el caudal del cuerpo de agua receptor, entre otras.

Aparentemente, la ecuación para cuantificar huella hídrica gris propuesta por la metodología del Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura IICA, parte de unos preceptos que no se cumplen en su totalidad para el caso del presente estudio, como cuerpo de agua receptor sin intervención humana, utilización de agua extraída del cuerpo de agua para desarrollar una actividad, etc., por lo que es importante hacer registro permanente de concentraciones de contaminantes en la parte alta del río Tunjuelo.

En línea con lo anterior, es importante trabajar en alternativas de análisis de sostenibilidad económica y social, que no sólo se basen en agua azul y verde, y que realmente puedan ir en doble vía: hacia el contexto de cuenca y desde el contexto de actor o actividad, para llegar a desarrollar verdadera integralidad en el análisis y por consiguiente en la toma de decisiones para la gestión de la huella hídrica, tanto de la cuenca como de los actores y actividades.

Una vez entre en operación el nuevo marco tarifario, se recomienda realizar los seguimientos periódicos pertinentes a la medición de los parámetros fisicoquímicos.

Si bien la aplicación de la fórmula de Huella Hídrica Gris es aplicable al tramo 2 de la cuenca del río Tunjuelo para la actividad que presta el RSDJ, el análisis económico y social debe reorientarse a un balance entre la prestación de un servicio, y el riguroso seguimiento al saneamiento básico, buscando la construcción de indicadores acordes a la realidad del relleno sanitario y su entorno.

BIBLIOGRAFÍA

Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación – COSUDE – (2013). SuizAgua Colombia “huella hídrica puesta en práctica”. Recuperado de: http://www.gestrategica.org/templates/noticias_detalle.php?id=934

Al-Hassan, Abdul Wahab & N. Valentine, P & W. Njoroge, L & Kpatinde, Aime & Avellino, Oting. (2018). Agriculture Water Footprint: Approaches and Methodologies. International Journal of Scientific and Research Publications (IJSRP). 8. 10.29322/IJSRP.8.3.2018.p7516.

Arévalo Uribe. D., Lozano Arango. J., Martínez Arboleda J. (2012). Una mirada a la agricultura de Colombia desde su huella hídrica. Word Wildlife Found – WWF. 2012

Ariza, W., Arevalo D. (2018). Estimación de la huella hídrica azul y verde de la producción cafetera en ocho cuencas el en sur del departamento del Huila. Revista de Investigación Agraria y Ambiental. (9), 338-354. Retrieved from <http://hemeroteca.unad.edu.co/index.php/riaa/article/view/2284/2856>

Arora, R., Paterok, K., Banerjee, A., & Saluja, M. S. (2017). Potential and relevance of urban mining in the context of sustainable cities. IIMB Management Review, 29(3), 210–224. <https://doi.org/10.1016/j.iimb.2017.06.001>

Autoridad Nacional de Licencias Ambientales . ANLA (5 de Septiembre de 2018) Artículo 1. “Por la cual se impone una sanción ambiental y se toman otras determinaciones”. [Resolución 01462 de 2018]. Recuperado de: http://portal.anla.gov.co/sites/default/files/res_1462_05092018_ct_5104_ct_5106_ct_5113.pdf

Bernstad Saraiva, A., Souza, R. G., & Valle, R. A. B. (2017). Comparative lifecycle assessment of alternatives for waste management in Rio de Janeiro – Investigating the influence of an attributional or consequential approach. Waste Management, 68, 701–710.

Caicedo, L. (2016). Hablando de medio ambiente y nos mandaron el basurero encima: Las resistencias en Mochuelo Alto frente al relleno sanitario Doña Juana. (tesis de maestría). Universidad Distrital. Bogotá D.C. Colombia

Castro, A. (2014). Planificación territorial en la ciudad de Cartagena: Una relación dialéctica entre desarrollo sostenible y sostenibilidad ambiental. *Revistas CURN Corporación Universitaria Rafael Nuñez*, 5(1), 1–20.

Castaño, J. (2015). Modelación de la calidad del agua del río Tunjuelo en dos escenarios de implementación del plan de saneamiento de Bogotá. (tesis de maestría). Universidad Nacional. Bogotá D.C., Colombia

Castillo-Rodríguez, Á., Castro-Chaparro, M., Gutiérrez-Malaxechebarría, Á., & Aldana-Gaviria, C. (2018). Estimación sectorial de la huella hídrica de la ciudad de Bogotá generada en el año 2014. *Revista UIS Ingenierías*, 17(2), 19–32. <https://doi.org/https://doi.org/10.18273/revuin.v17n2-2018002>

Centro de Análisis de Ciclo de Vida y Diseño Sustentable CADIS, Embajada de Suiza en Colombia, Agencia Suiza para la Cooperación y el Desarrollo COSUDE. Martínez A., Chargoy J., Puerto M., Suppen N., Rojas D. Autores contribuyentes: Alfaro S, Ayes D., Barrantes L., Carrasco L., Castro J., Charlón V., Civit B., Conza A., Díaz C., Díaz L., Farrell C., Francke I., García A., Gmünder S., González M., Grisales C., Laura R., Lloret P., Monteiro R., Naranjo C., Papi S., Peña C., Petrocelli N., Revilla V., Rodríguez L., Rosa E., Sacayón E., Toro C., Vera A., Victoria J., Villarraga J. (2016) *Huella de Agua (ISO 14046) en América Latina, análisis y recomendaciones para una coherencia regional*. 90 p.

Centro de Ciencia y Tecnología de Antioquía - CTA. (2013). Resumen de resultados. *Evaluación de la Huella Hídrica en la Cuenca del Río Porce*. Colombia.

CEPAL. (2016). *Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible Una oportunidad para América Latina y el Caribe*. Santiago de Chile: Naciones Unidas.

Chapagain, A.K. and Hoekstra, A.Y. (2003) 'Virtual water flows between nations in relation to trade in livestock and livestock products', *Value of Water Research Report*

Series No. 13, UNESCO-IHE, Delft, the Netherlands.
<http://www.waterfootprint.org/Reports/Report13.pdf>

Chapagain, A.K. and Hoekstra, A.Y. (2004) 'Water footprints for nations', Value of Water Research Report Series No. 16, UNESCO-IHE, Delft, the Netherlands.
<http://www.waterfootprint.org/Reports/Report16.pdf>

Colom Oriol, N. (2003). ¡Aquí, no!: Els conflictes territorials a Catalunya (Empuries E). Barcelona: Biblioteca Universal Empuries.

Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico. (19 de julio de 2018). "Por la cual se resuelve la solicitud de modificación del costo económico de referencia para los componentes de Disposición Final — CDF y de Tratamiento de Lixiviados — CTL, presentada por Centro de Gerenciamiento de Residuos Doña Juana S.A. E.S.P." [Decreto 843 de 2018]. Recuperado de https://tramitesccu.cra.gov.co/normatividad/admon1202/files/RESOLUCION_CRA_843_DE_2018.pdf

Conesa, V. (1993). Guía metodológica para la evaluación del impacto ambiental. (Editorial Mundi-Prensa, Ed.), FI-UNNE (pp. 1–61). [https://doi.org/S0168-8227\(08\)00381-1](https://doi.org/S0168-8227(08)00381-1) [pii]r10.1016/j.diabres.2008.08.003

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 3358/90II. 2008.

Das, S. (2006). Emerging Trends in Aluminum Recycling: Reasons and Responses. Lexington.

Díaz Jiménez, A.F., Martínez Gámez, A., Moreno Hernández, G., Velandia Gómez, D., Acosta Espejo, K., & D.P, T.-F. (2017). Problemática de Basuras en el Relleno Sanitario Doña Juana. Revistas Fundación Universitaria. Retrieved from http://www.unihorizonte.edu.co/revistas/semilleros/vol/Vol_2_Nro_1_2017/1/Impacto_Ambiental_Centro_de_Acopio_DONA_JUANA.pdf

Delgado Ramos, G. C. (2016). Residuos sólidos municipales, minería urbana y cambio climático. *El Cotidiano*, (195), 75–84. Retrieved from <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=32543454009>

DNP. (2016). CONPES 3874-Política Nacional para la Gestión Integral de Residuos Sólidos. Bogotá: MADS.

Duquino-Rojas, L. G. (2018). Sustentabilidad ambiental urbana, alternativas para una política pública ambiental. *Bitacora Urbano Territorial*, 28(1), 133–141. <https://doi.org/10.15446/bitacora.v28n1.52029>

Empresa de Acueducto, Alcantarillado y Aseo de Bogotá E.S.P. (2006). Plan de Saneamiento y Manejo de Vertimientos de Bogotá. EAB E.S.P., Gerencia Ambiental, Bogotá.

Frérot, A. (2014). Economía circular y eficacia en el uso de los recursos : un motor de crecimiento económico para Europa. *Cuestión de Europa*, (331), 10. Retrieved from <https://www.robert-schuman.eu/es/doc/questions-d-europe/qe-331-es.pdf>

Genivar. (2013). Estudio de impacto ambiental complementario para la fase 2 de optimización de zonas VII y VIII del Plan de Manejo Ambiental. Bogotá.

Giraldo, E. (2014). Tratamiento De Lixiviados De Rellenos Sanitarios: Avances Recientes. *Revista de Ingeniería*, 14, 44–55. Retrieved from <https://ojsrevistaing.uniandes.edu.co/ojs/index.php/revista/article/view/538>

Gobierno de España. (2018). Registro Estatal de Emisiones y Fuentes Contaminantes. Fenoles. España. Recuperado de <http://www.prtr-es.es/Fenoles,15658,11,2007.html>.

Gómez, L. (2016). Evaluación de la Huella Hídrica del Ciclo Integral del Agua de la Mancomunidad de la Comarca de Pamplona. Ekaina, España: Universidad Pública de Navarra.

Hoekstra, A.Y. and Hung, P.Q. (2002) 'Virtual water trade: A quantification of virtual water flows between nations in relation to international crop trade', *Value of Water*

Research Report Series No. 11, UNESCO-IHE Institute for Water Education, Delft, the Netherlands. <http://www.waterfootprint.org/Reports/Report11.pdf>

Hoekstra, A. Y., Chapagain, A. K., Aldaya, M. M., & Mekonnen, M. M. (2011). The Water Footprint Assessment Manual. Febrero 2011(p. 228). <https://doi.org/978-1-84971-279-8>

IDEAM. (2014). Estudio Nacional del Agua. Bogotá: IDEAM.

IICA. (2017). Guía metodológica para la evaluación de la huella hídrica en una cuenca hidrográfica. San José de Costa Rica.

International Center for Trade and Sustainable Development. (2018). *Colombia ingresa a la OCDE*. Recuperado de <https://www.ictsd.org/bridges-news/puentes/news/colombia-ingresa-a-la-ocde>

Ivanova, Y. (2013). Evaluación de la huella hídrica de la ciudad de Bogotá como una herramienta de gestión del recurso hídrico en el área urbana (tesis de maestría). Universidad Javeriana, Bogotá D.C., Colombia

Jiménez Martínez, N. M. (2015). La gestión integral de residuos sólidos urbanos en México: entre la intención y la realidad. Letras Verdes. Revista Latinoamericana de Estudios Socioambientales, 17, 29–56. Retrieved from <http://revistas.flacsoandes.edu.ec/letrasverdes/article/view/1419>

Kocabasoglu, C., Prahinski, C., & Klassen, R. D. (2007). Linking forward and reverse supply chain investments: The role of business uncertainty. Journal of Operations Management. <https://doi.org/10.1016/j.jom.2007.01.015>

Krook, J., Svensson, N., & Eklund, M. (2012). Landfill mining: A critical review of two decades of research. Waste Management, 32(3), 513–520. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.10.015>

Leal, A.P.P.N. & Cecilio, Roberto & Zanetti, Sidney. (2018). Water footprint on Itapemirim watershed. Scientia Agraria. 19. 100-113.

León A, S. (2013). Indicadores de tercera generación para cuantificar la sustentabilidad urbana: ¿Avances o estancamiento? EURE (Santiago), 39(118), 173–198. <https://doi.org/10.4067/S0250-71612013000300008>

Lenntech. (2018). Tabla Periódica. Litio. Recuperado de: <https://www.lenntech.es/periodica/elementos/li.htm>

Litter, M. I., Armienta, M. A., & Farías, S. S. (2009). Metodologías analíticas para la determinación y especiación de arsénico en aguas y suelos. IBEROARSEN, CYTED, Buenos Aires, Argentina (p. 242).

Londoño Carvajal, A., Giraldo Gómez, G. I., & Gutierrez gallego, Á. (2010). Métodos analíticos para la evaluación de la calidad fisicoquímica del agua. Environment International, 1(1), 1–149. Retrieved from <http://www.bdigital.unal.edu.co/49658/7/9789588280394.pdf>

Lu j., Eichenberger B. & Stearns R. (1985). "Leachate from municipal landfills production and management", Pollution Technology Review, No.119, Noyes Publications, USA.

MacArthur, E. (2012). Hacia una economía circular: motivos económicos para una transición acelerada. Washington. Mapar, M., Jafari, M. J., Mansouri, N., Arjmandi, R., Azizinejad, R., & Ramos, T. B. (2017). Sustainability indicators for municipalities of megacities: Integrating health, safety and environmental performance. Ecological Indicators, 83, 271–291. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.08.012>

Meléndez, C. (2004). Guía práctica para la operación de celdas diarias en rellenos sanitarios pequeños y medianos. El Salvador.

Méndez, R., Castillo, E., María, S., Quintal, C., Giacoman, G., & Jiménez, B. (2004). Tratamiento fisicoquímico de los lixiviados de un relleno sanitario. Red de Revistas Científicas de América Latina y El Caribe, España y Portugal, 8(2), 155–163. Retrieved from http://www.researchgate.net/profile/German_Giacoman_Vallejos/publication/2406431

88_Tratamiento_fisicoquimico_de_los_lixiviados_de_un_relleno_sanitario/links/543816c60cf2d6698bdd35b7.pdf

Mira. L, (2006). Análisis estadístico multivariado de los parámetros de calidad del agua en vertimientos urbanos en la ciudad de Bogotá. (Tesis de pregrado) Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia.

Montenegro, D. (2013). Estimación del efecto del lixiviado del Relleno Doña Juana sobre la calidad del agua Río Tunjuelo y su posible tratamiento en la PTAR Canoas. Universidad Nacional de Colombia. Retrieved from <http://www.bdigital.unal.edu.co/45405/1/52480760.2013.pdf>

Muñoz, A., & Sánchez, C. (2013). Un método de gestión ambiental para evaluar rellenos sanitarios. *Gestión y Ambiente*, 16(2), 105–120.

OECD/UN ECLAC. (2014). Evaluaciones del desempeño ambiental: Colombia 2014. Santiago de Chile.

Oztas, Rukiye & Celikyay, Selma. (2018). An Alternative Indicator on Water Management In Planning-Water Footprint.

Parra, H. (23 de abril de 2017). Ponen lupa a "hueco" de 18.000 millones en el relleno Doña Juana. *El Tiempo*. <https://www.eltiempo.com/bogota/lupa-a-finanzas-de-relleno-dona-juana-80840>. Consultado 15 de enero de 2019.

PNUD. (2015). Objetivos de Desarrollo Sostenible, Colombia. Herramientas de aproximación al contexto local. Bogotá: PNUD.

Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010. Bogotá D.C. Colombia.

Puig Ventosa, I., Calaf Forn, M., Jofra Sora, M. (2014) Minería urbana: extracción de recursos de los vertederos. Fundación Mapfre. Seguridad y Medio Ambiente, 134, p. 44-57.

Quintero Torres, D. I. (2016). El papel de la gestión territorial en la ubicación de rellenos sanitarios. Caso de estudio: relleno sanitario Doña Juana, Bogotá, Colombia . Perspectiva Geográfica . scieloco .

Ramalho, R. (2003). Tratamiento de Aguas Residuales. Barcelona: España, Editorial Reverté, S.A.

Samoral, G., Dumont, a., Aldaya, M. M., Rodriguez-Casado, R., a., G., & Llamas, M. R. (2011). Análisis de la huella hídrica extendida de la cuenca del Guadalquivir. Fundación Botín- Observatorio Del Agua, Junio, 91.

M. Savage, George & G. Golueke, Clarence & L. von Stein, Edward. (1993). Landfill mining. Past and present. BioCycle. 34. 58-61.

Secretaría Distrital de Salud. (2015). Relleno Sanitario Doña Juana. Bogotá: Alcaldía Mayor de Bogotá.

Severiche Sierra, C. A., Acevedo Barrios, R. L., & Jaimes Morales, J. D. C. (2014). Minería de rellenos sanitarios como alternativa de gestión para residuos sólidos . Producción + Limpia . scieloco.

Snoeyink, V.L. y D. Jenkins. Water Chemistry, J. W. & S. (2008). Caracterización De Aguas Residuales Por Dbo Y Dqo. Ingeniería de Tratamiento de Aguas Residuales, 1–7. Retrieved from <http://www.oocities.org/edrochac/residuales/dboydqp2.pdf>

Tobasura, I. (2008). Huella ecológica y biocapacidad: indicadores biofísicos para la gestión ambiental. El caso de Manizales, Colombia. Luna Azul, 26(26), 119–136. Retrieved from http://lunazul.ucaldas.edu.co/downloads/Lunazul26_7.pdf

Tolón-Becerra, Lastra-Bravo, X., & Fernández, V. (2013). Huella Hídrica y sostenibilidad del uso de los recursos hídricos. M+A. Revista Electrónica@ de Medio Ambiente, Volumen 14, número 1: 56-86
http://dx.doi.org/10.5209/rev_MARE.2013.v14.n1.42123

Unidad Administrativa Especial de Servicios Públicos - UAESP. (2017). Informe 2. Informe del proceso de caracterización y categorización de residuos en Bogotá Distrito Capital. Consorcio NCU - UAESP. Bogotá, Diciembre de 2017

UN-HABITAT. (2010). Solid waste management in the world's cities (Vol. 50). Washington. <https://doi.org/10.1002/9780470999677>

Universidad Nacional Santiago de Antúnez de Mayolo. (2010). Facultad de Ciencias del Ambiente. Protocolo de monitoreo de agua. Laboratorio de calidad ambiental. Huaraz, Perú.

VSV Consulting SAS. Informe Final Contrato 255 de 2016. Evaluación de las Alternativas de Optimización de la Planta de Tratamiento de Lixiviados del Relleno Sanitario Doña Juana. Bogotá, Mayo de 2017. 53p.

Zeng, Z., Liu, J., Koeneman, P. H., Zarate, E., & Hoekstra, A. Y. (2012). Assessing water footprint at river basin level: A case study for the Heihe River Basin in northwest China. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(8), 2771–2781. <https://doi.org/10.5194/hess-16-2771-2012>

Zhang, G. P., Mathews, R. E., Frapporti, G., Mekonnen, M. M. (2014). Water Footprint Assessment for the Hertfordshire and North London Area. Environment Agency, London, UK., Report RES(August). <https://doi.org/10.1203/00006450-199408000-00016>

Zhang, G., Mathews, R., Frapporti, G., & Mekonnen, M. (2018). Steps towards more environmentally sustainable municipal solid waste management – A life cycle assessment study of São Paulo, Brazil. *Journal of Cleaner Production*, 196, 150–162. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.005>

ANEXOS

Anexo 1. Resultados de laboratorios. ANALQUIM



Monitoreos
Tunjuelo 2016.pdf

Anexo 2. Medición de parámetros. Resolución 166 de 2008. Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca - CAR

			166/2008	ENERO AGUAS ARRIBA	ENERO AGUAS ABAJO	FEBRERO AGUAS ARRIBA	FEBRERO AGUAS ABAJO	MARZO AGUAS ARRIBA	MARZO AGUAS ABAJO	ABRIL AGUAS ARRIBA	ABRIL AGUAS ABAJO	MAYO AGUAS ARRIBA	MAYO AGUAS ABAJO	JUNIO AGUAS ARRIBA	JUNIO AGUAS ABAJO	JULIO AGUAS ARRIBA	JULIO AGUAS ABAJO	AGOSTO AGUAS ARRIBA	AGOSTO AGUAS ABAJO	SEPTIEMBRE AGUAS ARRIBA	SEPTIEMBRE AGUAS ABAJO	OCTUBRE AGUAS ARRIBA	OCTUBRE AGUAS ABAJO	NOVIEMBRE	DICIEMBRE AGUAS ARRIBA	DICIEMBRE AGUAS ABAJO
1	Aluminio	mg/L Al	5,0	4,95	<0,05	0,13	<0,05	2,4	<0,05					2,1	1,9	1,5	1,1	<1,0	5,8	2,1	1,4				17,0	5,33
2	Arsénico	mg/L As	0,1	0,010	<0,010	<0,010	<0,010	<0,010	<0,010	<0,010	<0,010	<0,010	<0,010	<0,010	<0,010	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005		<0,005	0,008
3	Berilio	mg/L Be	0,1	<0,0023	<0,0023	<0,0023	<0,0023	0,0040	<0,0023	<0,0023	<0,0023	<0,0023	<0,0023	<0,0023	<0,0023	<0,0023	<0,0023	<0,0023	<0,0023	<0,0023	<0,0023	<0,0023	<0,0023		<0,0023	<0,0023
4	Boro	mg/L B	4,0	<0,1620	<0,1620	<0,1620	<0,1620	<0,162	0,292	<0,162	0,286	<0,162	<0,162	<0,162	<0,162	0,179	<0,162	0,162	<0,162	<0,162	<0,162	<0,162	0,278		0,162	0,173
5	Cadmio	mg/L Cd	0,01	0,02	0,02	<0,01	<0,01	<0,003	<0,003	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,01	<0,01		<0,01	<0,01
6	Zinc	mg/L Zn	2,0	<0,02	0,22	0,37	0,36	0,10	0,20	0,23	0,00	0,07	0,04	0,05	0,04	0,03	<0,02	0,05	0,03	<0,02	<0,02	0,107	0,1		0,1	0,085
7	Cobalto	mg/L Co	0,05	<0,05	<0,05	<0,05	0,08	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	0,05	<0,05	<0,05	<0,05		<0,05	<0,05
8	Cobre	mg/L Cu	0,2	<0,20	<0,20	<0,20	<0,20	<0,05	<0,05	0,09	0,10	<0,20	<0,20	<0,20	<0,20	<0,20	<0,20	<0,20	<0,20	<0,20	<0,20	<0,20	<0,20		<0,20	<0,20
9	Cromo total	mg/L Cr	0,1																							
10	DBO Total	mg/L O ₂	100	16	25	14	67	5	15	36	52	11	29	11	16	5	9	16	116	25,9	55,0	19	128		9,4	109,0
11	Grasas y Aceites	mg/L	2,0	<2,1	<2,1	2,6	2,1	<2,1	<2,1	<1,2	<1,2	<1,2	<1,2	<1,2	<1,2	9	6,0	8	7	<1,2	<1,2	<1,2	10		<1,2	17
12	Hierro	mg/L Fe	5,0							17,7	18,9			4,51	9,48	4,75	1,52	8,14	4,53	7,02	4,91				20,2	9,75
13	Litio	mg/L Li	2,5	<0,04	<0,04	<0,04	<0,04	<0,04	<0,04	<0,05	<0,04	<0,04	<0,04	<0,04	<0,04	<0,04	<0,04	<0,04	<0,04	<0,04	<0,04	0,11	<0,04		<0,04	<0,04
14	Manganeso	mg/L Mn	0,2	2,64	7,18	2,41	6,25	0,05	0,07	1,24	1,54	0,32	0,13	0,06	0,06	0,05	<0,05	0,15	0,11	0,07	0,08	0,163	0,1		0,290	0,24
15	Mercurio	mg/L Hg	0,01	<0,002	<0,002	<0,002	0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002		0,007	<0,002
16	Molibdeno	mg/L Mo	0,01	<0,0073	<0,0073	<0,0073	<0,0073	0,123	0,125	0,0091	<0,0073	<0,0073	0,0262	<0,0073	<0,0073	<0,0073	<0,0073	<0,0073	<0,0073	<0,0073	<0,0073	<0,0073	<0,0073		<0,0073	<0,0073
17	Níquel	mg/L Ni	0,2	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,05	0,10	0,09	0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10		<0,10	<0,10
18	Plomo	mg/L Pb	0,1	<0,02	<0,02	0,25	0,24	1	<0,10	<0,02	0,07	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10		<0,10	<0,10
19	Selenio	mg/L Se	0,02	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	0,65	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005		<0,005	<0,005
20	Vanadio	mg/L V	0,1	0,0570	0,0470	0,0358	0,0685	0,096	0,046	0,04320	0,04360	0,01610	<0,00496	0,00496	<0,00496	0,00500	0,00500	0,00700	0,00800	0,00500	<0,00496	0,01300	0,01200		0,03600	0,01800
21	Fenoles	mg/L Fenol	0,2	<0,003	0,01	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003	0,011	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003	0,004	0,0050	<0,07	<0,07	<0,003	<0,003	0,003	<0,003		0,005	0,057

Anexo 3. Coordenadas geográficas extremos del RSDJ

INFORME DE RESULTADOS LABORATORIOS 2016							
Tipo de muestra		Agua Superficial		Tipo de muestra		Agua Superficial	
Fecha de muestra		04-ene-16		Fecha de muestra		04-ene-16	
Punto de captación		RIO TUNJUELO ANTES N:991819 E:994451		Punto de captación		RIO TUNJUELO DESPUÉS N:992058 E:994265	
Tipo de muestra		Agua Superficial		Tipo de muestra		Agua Superficial	
Fecha de muestra		08-feb-16		Fecha de muestra		08-feb-16	
Punto de captación		RIO TUNJUELO AGUAS ARRIBA N:4°3'20.0" W :74°7'39.0"		Punto de captación		RIO TUNJUELO AGUAS ABAJO N:4°3'27.5" W :74°7'45.3"	
Tipo de muestra		Agua Superficial		Tipo de muestra		Agua Superficial	
Fecha de muestra		07-mar-16		Fecha de muestra		07-mar-16	
Punto de captación		RIO TUNJUELO AGUAS ARRIBA N:991819 E:994455		Punto de captación		RIO TUNJUELO AGUAS ABAJO N:992058 E:994267	
Tipo de muestra		Agua Superficial		Tipo de muestra		Agua Superficial	
Fecha de muestra		11-abr-16		Fecha de muestra		11-abr-16	

INFORME DE RESULTADOS LABORATORIOS 2016

Punto de captación	RIO TUNJUELO AGUAS ARRIBA N:991818 E:994450	Punto de captación	RIO TUNJUELO AGUAS ABAJO N:992061 E:994268
Tipo de muestra	Agua Superficial	Tipo de muestra	Agua Superficial
Fecha de muestra	02-may-16	Fecha de muestra	02-may-16
Punto de captación	RIO TUNJUELO AGUAS ARRIBA N:991818 E:994450	Punto de captación	RIO TUNJUELO AGUAS ABAJO N:992061 E:994268
Tipo de muestra	Agua Superficial	Tipo de muestra	Agua Superficial
Fecha de muestra	07-jun-16	Fecha de muestra	07-jun-16
Punto de captación	RIO TUNJUELO AGUAS ARRIBA N:991818 E:994450	Punto de captación	RIO TUNJUELO después ABAJO N:992061 E:994268
Tipo de muestra	Agua Superficial	Tipo de muestra	Agua Superficial
Fecha de muestra	11-jul-16	Fecha de muestra	11-jul-16
Punto de captación	RIO TUNJUELO ANTES N:991818 N:994450	Punto de captación	RIO TUNJUELO DESPUÉS N:992061 N:994268
Tipo de muestra	Lixiviado	Tipo de muestra	Lixiviado

INFORME DE RESULTADOS LABORATORIOS 2016

Fecha de muestra	08-ago-16	Fecha de muestra	08-ago-16
Punto de captación	RIO TUNJUELO ANTES N:991818 E:994450	Punto de captación	RIO TUNJUELO DESPUÉS N:992061 E:994268
Tipo de muestra	Agua Superficial	Tipo de muestra	Agua Superficial
Fecha de muestra	19-sep-16	Fecha de muestra	19-sep-16
Punto de captación	RIO TUNJUELO 100 MTS AGUAS ARRIBA DE LA DESCARGA DE PTL	Punto de captación	RIO TUNJUELO 100 MTS AGUAS ABAJO DE LA DESCARGA DE PTL
Tipo de muestra	Agua Superficial	Tipo de muestra	Agua Superficial
Fecha de muestra	24-oct-16	Fecha de muestra	24-oct-16
Punto de captación	RIO TUNJUELO ANTES N:991818 E:994450	Punto de captación	RIO TUNJUELO DESPUÉS N:992061 E:994268
Tipo de muestra	N/A	Tipo de muestra	N/A
Fecha de muestra	NOVIEMBRE	Fecha de muestra	NOVIEMBRE
Punto de captación	N/A	Punto de captación	N/A

INFORME DE RESULTADOS LABORATORIOS 2016

Tipo de muestra	Agua Superficial			Tipo de muestra	Agua Superficial		
Fecha de muestra	12-dic-16			Fecha de muestra	12-dic-16		
Punto de captación	AGUAS	ARRIBA	RIO	Punto de captación	AGUAS	ABAJO	RIO
	TUNJUELO				TUNJUELO		

Fuente: Adaptación del Grupo de estudio de los resultados entregados por ANALQUIM

Anexo 4. Descripción de parámetros evaluados

Clasificación tabla periódica de elementos					
Elemento	Símbolo químico	Número Atómico	Generalidades	Impactos sobre la salud	Impactos sobre el ambiente
Metales alcalinos					
Litio	Li	3	Metal más liviano existente, es blando, de bajo punto de fusión y reactivo. Uso industrial del Li es en forma de estearato de litio como espesante para grasas lubricantes, cerámica, de modo específico en la formulación de esmaltes para porcelana; como aditivo para alargar la vida y el rendimiento en acumuladores alcalinos y en soldadura autógena y soldadura para latón.	El Li no presenta uso biológico conocido, y no es absorbido fácilmente por el cuerpo humano. La mayor parte del elemento se excreta directamente, la sustancia es corrosiva para los ojos, la piel y el tracto respiratorio. Corrosivo si es ingerido. La inhalación de la sustancia puede causar edema pulmonar.	El hidróxido de litio representa un peligro potencialmente significativo porque es extremadamente corrosivo. Se debe prestar especial atención a los organismos acuáticos.

Clasificación tabla periódica de elementos

Elemento	Símbolo químico	Número Atómico	Generalidades	Impactos sobre la salud	Impactos sobre el ambiente
Alcalinotérreos					
Berilio	Be	4	<p>El principal uso del berilio metálico se encuentra en la manufactura de aleaciones berilio-cobre y en el desarrollo de materiales. La adición de un 2% de Be al cobre forma una aleación no magnética seis veces más fuerte que el cobre. Estas aleaciones berilio-cobre tienen numerosas aplicaciones en la industria de herramientas ya que no producen chispas.</p>	<p>Es uno de elementos químicos más tóxicos que se conocen. Es un metal que puede ser muy perjudicial cuando es respirado por los humanos, porque puede dañar los pulmones y causar neumonía. El efecto más comúnmente conocido del berilio es la llamada beriliosis, una peligrosa y persistente enfermedad de los pulmones que puede incluso dañar otros órganos, como el corazón.</p>	<p>El Be entra en el aire, agua y suelo como resultado de procesos naturales y actividades humanas. Entra en el agua durante los procesos de desintegración de suelos y rocas.</p>

Clasificación tabla periódica de elementos

Elemento	Símbolo químico	Número Atómico	Generalidades	Impactos sobre la salud	Impactos sobre el ambiente
Metaloides					
Boro	B	5	Se emplea principalmente en la industria metalúrgica. Su gran reactividad a temperaturas altas, en particular con oxígeno y nitrógeno, lo hace útil como agente metalúrgico degasificante. Útil para refinar el aluminio y facilitar el tratamiento térmico del hierro maleable. Ingrediente importante en variedad de detergentes, jabones, ablandadores de agua, almidones para planchado, adhesivos, preparaciones para baño, cosméticos, talcos y papel encerado. Se utiliza en retardantes a la flama, desinfectantes de frutas y madera, control de hierbas e insecticidas, así como en la manufactura de papel, cuero y plásticos.	El B ha sido encontrado en los tejidos animales, pero este no parece ser que se acumule. Cuando los animales absorben grandes cantidades de B en un periodo de tiempo corto a través de la comida o el agua los órganos reproductivos masculinos pueden verse afectados.	En grandes concentraciones es muy tóxico para la vegetación. En la naturaleza hay sólo un número limitado de localidades con concentraciones altas de B o grandes depósitos de minerales; los más importantes parecen ser de origen volcánico. La exposición al B a través del aire y del agua no es muy frecuente que ocurra.

Clasificación tabla periódica de elementos

Elemento	Símbolo químico	Número Atómico	Generalidades	Impactos sobre la salud	Impactos sobre el ambiente
Arsénico	As	33	<p>El arsénico se encuentra distribuido ampliamente en la naturaleza. El arsénico elemental tiene pocos usos. Es uno de los pocos minerales disponibles con un muy alto grado de pureza. En el estado sólido se ha empleado ampliamente en los materiales láser. El óxido de arsénico se utiliza en la elaboración de vidrio. Los sulfuros de arsénico se usan como pigmentos y en juegos pirotécnicos.</p>	<p>El As es uno de los más tóxicos elementos que pueden ser encontrados. La exposición al Arsénico inorgánico puede causar varios efectos sobre la salud, como es irritación del estómago e intestinos, disminución en la producción de glóbulos rojos y blancos, cambios en la piel, e irritación de los pulmones.</p>	<p>El As es un componente que es extremadamente duro de convertir en productos solubles en agua o volátiles, emitido por las industrias productoras de cobre, pero también durante la producción de plomo y zinc y en la agricultura. Este no puede ser destruido una vez que este ha entrado en el ambiente.</p>

Clasificación tabla periódica de elementos

Elemento	Símbolo químico	Número Atómico	Generalidades	Impactos sobre la salud	Impactos sobre el ambiente
			No metales		
Selenio	Se	34	<p>Elemento ampliamente distribuido en la corteza terrestre. Sus minerales no se encuentran en suficiente cantidad para tener utilidad, como fuente comercial del elemento, los minerales de sulfuro de cobre seleníferos son los que representan la fuente primaria. Se utiliza en el proceso de fotocopiado xerográfico, la decoloración de vidrios teñidos por compuestos de hierro, y también se usa como pigmento en plásticos, pinturas, barnices, vidrio y cerámica y tintas.</p>	<p>La exposición al Se tiene lugar principalmente a través de la comida, presente naturalmente en cereales y carne. El Se procedente de cultivos y de lugares donde hay residuos peligrosos acabará en las aguas subterráneas o superficiales por irrigación. La Agencia Internacional de la Investigación del Cáncer (IARC) ha incluido al selenio dentro del grupo 3 (el agente no es clasificable en relación a su carcinogenicidad en humanos.).</p>	<p>Existe evidencia de que el Se puede acumularse en los tejidos corporales de los organismos y puede ser transportada en la cadena alimenticia hacia niveles superiores. Normalmente esta biomagnificación de Se comienza cuando los animales ingieren muchas plantas que han estado absorbiendo enormes cantidades de Se. Debido a la irrigación, las concentraciones de Se en la escorrentía tienden a ser muy altas en organismos acuáticos en muchas zonas.</p>

Clasificación tabla periódica de elementos

Elemento	Símbolo químico	Número Atómico	Generalidades	Impactos sobre la salud	Impactos sobre el ambiente
Metales en transición					
Vanadio	V	23	Varios de los compuestos de V se emplean en la industria química, sobre todo en la fabricación de catalizadores de oxidación, y en la industria cerámica como agentes colorantes. En su forma pura es blando y dúctil. Puede trabajarse en caliente y frío fácilmente.	La mayor acumulación de V en los seres humanos tiene lugar a través de las comidas, (trigo, semilla de soja, aceite de oliva, aceite de girasol, manzanas y huevos). El V acumulado en el aire, puede causar bronquitis y neumonía.	Las pruebas de laboratorio con animales han mostrado, que el V puede causar daño en el sistema reproductivo de animales machos, y puede causar alteraciones del ADN en algunos casos.
Manganeso	Mn	25	Aunque poco conocido o usado en su forma pura, reviste gran importancia práctica en la fabricación de acero. El dióxido de manganeso se usa como un agente desecante o catalizador en pinturas y barnices y como decolorante en la fabricación de vidrio y en pilas secas. El Mn es un metal bastante reactivo, aunque el metal sólido reacciona lentamente, el polvo metálico reacciona con facilidad y en algunos casos, muy vigorosamente.	Los efectos del manganeso mayormente ocurren en el tracto respiratorio y el cerebro. Los síntomas por envenenamiento con Manganeso son alucinaciones, olvidos y daños en los nervios. El Manganeso puede causar Parkinson, embolia de los pulmones y bronquitis.	Los humanos aumentan las concentraciones de Mn en el aire por las actividades industriales y a través de la quema de productos fósiles. El Mn que deriva de las fuentes humanas puede también entrar en la superficie del agua, aguas subterráneas y aguas residuales, a través de la aplicación como pesticida.

Clasificación tabla periódica de elementos

Elemento	Símbolo químico	Número Atómico	Generalidades	Impactos sobre la salud	Impactos sobre el ambiente
Hierro	Fe	26	El Fe es el metal más barato y uno de los metales más comunes. Casi el 5,6% de la corteza terrestre y casi todo el núcleo terrestre está formado por hierro. Grandes cantidades de Fe se utilizan para producir acero, (aleación de hierro y carbono). El Fe desempeña un papel en la fotosíntesis de las plantas y es una parte esencial de la hemoglobina.	El Fe puede causar varias enfermedades cuando entra en el tejido y permanece allí. La inhalación crónica de altas concentraciones de vapores de óxido de hierro o aerosoles puede resultar en el desarrollo de neumonía	El Fe elemental es insoluble en agua en condiciones normales. Esto podría jugar un papel importante en el ciclo del carbono, debido a que el Fe es esencial para la unión de la reducción de nitrógeno y nitrato, probablemente sea un factor limitante para el crecimiento del fitoplancton. La solubilidad en agua salada es muy baja.

Clasificación tabla periódica de elementos

Elemento	Símbolo químico	Número Atómico	Generalidades	Impactos sobre la salud	Impactos sobre el ambiente
Cobalto	Co	27	Se encuentra distribuido con amplitud en la naturaleza. Entre sus aplicaciones comerciales más importantes están; la preparación de aleaciones para uso a temperaturas elevadas, aleaciones magnéticas, aleaciones para máquinas y herramientas, sellos vidrio a metal y la aleación dental, en agricultura para remediar la deficiencia de Co en el suelo y en la vegetación natural.	El Co es beneficioso para los humanos porque forma parte de la vitamina B12. Cuando se respiran elevadas concentraciones de Co se producen efectos en los pulmones, como asma y neumonía. Los suelos cercanos a minas y fundiciones pueden contener una alta cantidad de Co	Se aporta Co al ambiente por liberación por la combustión de carbón y la minería, y no puede ser destruido una vez que este ha entrado en el ambiente,

Clasificación tabla periódica de elementos

Elemento	Símbolo químico	Número Atómico	Generalidades	Impactos sobre la salud	Impactos sobre el ambiente
Níquel	Ni	28	Se emplea en el acero inoxidable y otras aleaciones resistentes a la corrosión. También es importante en monedas como sustituto de la plata. elemento bastante abundante, constituye cerca de 0.008% de la corteza terrestre y 0.01% de las rocas ígneas. En algunos tipos de meteoritos hay cantidades apreciables de níquel.	El chocolate y las grasas son conocidos por contener altas cantidades. El Ni puede ser consumido en vegetales procedentes de suelos contaminados. Los fumadores tienen un alto grado de exposición al níquel a través de sus pulmones. El Ni puede ser encontrado en detergentes.	El Ni es liberado al aire por las plantas de energía y las incineradoras de basuras, se deposita en el suelo o cae después de reaccionar con las gotas de lluvia. Usualmente lleva un largo periodo de tiempo para que el Ni sea eliminado del aire, puede también terminar en la superficie del agua cuando es parte de las aguas residuales.

Clasificación tabla periódica de elementos

Elemento	Símbolo químico	Número Atómico	Generalidades	Impactos sobre la salud	Impactos sobre el ambiente
Cobre	Cu	29	Importante metal no ferroso, la mayor parte del Cu del mundo se obtiene de los sulfuros minerales como la calcocita, covelita, calcopirita, bornita y enargita. No es magnético, su conductividad térmica y eléctrica son muy altas. Es uno de los metales que puede tenerse en estado más puro, es moderadamente duro, es tenaz en extremo y resistente al desgaste. La fuerza del cobre está acompañada de una alta ductibilidad.	Las personas que viven en casas que todavía tiene tuberías de cobre están expuestas a más altos niveles de Cobre. Exposiciones de largo periodo al cobre pueden irritar la nariz, la boca y los ojos y causar dolor de cabeza, de estómago, mareos, vómitos y diarreas. Una toma grande de cobre puede causar daño al hígado y los riñones e incluso la muerte.	Los ríos están depositando barro en sus orillas que están contaminados con Cu, debido al vertido de aguas residuales contaminadas. El Cu entra en el aire, mayoritariamente a través de la liberación durante la combustión de combustible. Es a menudo encontrado cerca de minas, asentamientos industriales, vertederos y lugares de residuos.

Clasificación tabla periódica de elementos

Elemento	Símbolo químico	Número Atómico	Generalidades	Impactos sobre la salud	Impactos sobre el ambiente
Cinc	Zn	30	Los usos más importantes del Zn los constituyen las aleaciones y el recubrimiento protector de otros metales. El hierro o el acero recubiertos con zinc se denominan galvanizados. El Zn es uno de los elementos menos comunes; se estima que forma parte de la corteza terrestre en un 0.0005-0.02%.	Niveles altos de Zn pueden dañar el páncreas y disturbar el metabolismo de las proteínas, y causar arterioesclerosis. Exposiciones al clorato de Zinc intensivas pueden causar desordenes respiratorios.	La mayoría del Zn es adicionado durante actividades industriales, como es la minería, la combustión de carbón y residuos y el procesado del acero. Al Zn no se le atribuye nivel de clasificación de riesgo para el agua, no obstante, esto sólo se refiere al Zn elemental, ya que algunos derivados como arsenato de cinc y cianuro de cinc, pueden ser extremadamente peligrosos.

Clasificación tabla periódica de elementos

Elemento	Símbolo químico	Número Atómico	Generalidades	Impactos sobre la salud	Impactos sobre el ambiente
Molibdeno	Mo	42	La mayor parte del Mo proviene de minas donde su recuperación es el objetivo primario de la operación, el restante se obtiene como un subproducto de ciertas operaciones del beneficio del cobre. La química del elemento es extremadamente compleja y con excepción de los halogenuros y calcogenuros, son muy pocos los compuestos simples conocidos.	Basado en experimentación animal, el Mo y sus compuestos son altamente tóxicos. Se ha informado de alguna evidencia de disfunción hepática con hiperbilirubinemia en trabajadores crónicamente expuestos a una planta soviética de molibdeno y cobre.	Su baja toxicidad reduce el riesgo por cantidades rastro en agua y suelo, que pudieran formar parte en la cadena alimentaria de los seres vivos.

Clasificación tabla periódica de elementos

Elemento	Símbolo químico	Número Atómico	Generalidades	Impactos sobre la salud	Impactos sobre el ambiente
Cadmio	Cd	48	<p>Elemento químico relativamente raro, metal dúctil, de color blanco, con un ligero matiz azulado. Es más blando y maleable que el zinc, pero poco más duro que el estaño. El Cd no se encuentra en estado libre en la naturaleza. Uso comercial importante del Cd anticorrosión, en baterías de níquel-cadmio y reactivo químico y pigmento.</p>	<p>Alimentos ricos en Cd, son patés, champiñones, mariscos, mejillones, cacao y algas secas. Unas exposiciones a niveles significativamente altas ocurren cuando la gente fuma, el humo del tabaco transporta el Cd a los pulmones. Otra alta exposición puede ocurrir con gente que vive cerca de los vertederos de residuos peligrosos o fábricas que liberan Cd en el aire y gente que trabaja en las industrias de refinerías del metal.</p>	<p>Las aguas residuales con Cd procedentes de las industrias mayoritariamente terminan en suelos. Las causas de estas corrientes de residuos son por ejemplo la producción de Zinc, minerales de fosfato e industrias que procesan estiércol. El Cd de las corrientes residuales pueden también entrar en el aire a través de la quema de residuos urbanos y de la quema de combustibles fósiles. puede entrar al agua a través del vertido de aguas residuales de casas o industrias.</p>

Clasificación tabla periódica de elementos

Elemento	Símbolo químico	Número Atómico	Generalidades	Impactos sobre la salud	Impactos sobre el ambiente
Mercurio	Hg	80	El mercurio sólido es tan suave como el plomo. El metal y sus compuestos son muy tóxicos. El Hg forma soluciones llamadas amalgamas con algunos metales (por ejemplo, oro, plata, platino, uranio, cobre, plomo, sodio y potasio). El Mercurio metálico es usado en una variedad de productos de las casas, como barómetros, termómetros, bombillas fluorescentes.	El Hg no es encontrado de forma natural en los alimentos, pero este puede aparecer en la comida, así como ser expandido en las cadenas alimentarias por pequeños organismos que son consumidos por los humanos, por ejemplo, a través de los peces.	Es liberado al aire a través de la quema de productos fósiles, minería, fundiciones y combustión de residuos sólidos. Algunas formas de actividades humanas liberan Hg directamente al suelo o al agua, por ejemplo en la aplicación de fertilizantes en la agricultura y los vertidos de aguas residuales industriales.

Clasificación tabla periódica de elementos

Elemento	Símbolo químico	Número Atómico	Generalidades	Impactos sobre la salud	Impactos sobre el ambiente
Aluminio	Al	13	<p>El Al puro es blando y tiene poca resistencia mecánica, pero puede formar aleaciones con otros elementos para aumentar su resistencia y adquirir varias propiedades útiles, es el elemento metálico más abundante en la tierra, pero nunca se encuentra en forma libre en la naturaleza. Se halla ampliamente distribuido en plantas y rocas, sobre todo en las ígneas, que contienen aluminio en forma de minerales de aluminio silicato.</p>	<p>La forma soluble en agua del Aluminio causa efectos perjudiciales, partículas llamadas iones. La toma de concentraciones significantes de Aluminio puede causar un efecto serio en la salud como daño al sistema nervioso central. Personas que trabajan en fábricas donde el Al es aplicado durante el proceso de producción pueden aumentar los problemas de pulmón cuando ellos respiran el polvo de Al.</p>	<p>Los efectos del Al son debido a los problemas de acidificación, puede acumularse en las plantas y causar problemas de salud a animales que consumen esas plantas. Altas concentraciones de Al no sólo pueden ser encontrados en lagos ácidos y aire, también en aguas subterráneas y suelos ácidos. Hay fuertes indicadores de que el Al puede dañar las raíces de los árboles cuando estas están localizadas en las aguas subterráneas.</p>

Clasificación tabla periódica de elementos

Elemento	Símbolo químico	Número Atómico	Generalidades	Impactos sobre la salud	Impactos sobre el ambiente
Plomo	Pb	82	Metal pesado, de color azulado, que se empaña para adquirir un color gris mate, El Pb rara vez se encuentra en su estado elemental, el mineral más común es el sulfuro, la galeana, los otros minerales de importancia comercial son el carbonato, cerusita, y el sulfato, anglesita, que son mucho más raros. El uso más amplio se encuentra en la fabricación de acumuladores, fabricación de tetraetilplomo, forros para cables, elementos de construcción, pigmentos, soldadura suave y municiones.	El Pb es uno de los cuatro metales que tienen un mayor efecto dañino sobre la salud humana. Este puede entrar en el cuerpo humano a través de la comida (65%), agua (20%) y aire (15%). Puede entrar en el agua potable a través de la corrosión de las tuberías. Esto es más común que ocurra cuando el agua es ligeramente ácida.	Debido a la aplicación del Pb en gasolinas un ciclo no natural del elemento tiene lugar. En los motores de los coches el Pb es quemado, eso genera sales de Plomo (cloruros, bromuros, óxidos), entran en el ambiente a través de los tubos de escape de los coches. Las partículas grandes precipitarán en el suelo o la superficie de aguas. Se puede acumular en organismos individuales, pero también entrar en las cadenas alimenticias.

Fuente: Lenntech Water Treatment Solutions (2018). Clasificación periódica de los elementos químicos. [Tabla].
Recuperado de: Lenntech. Delfgauw, Países Bajos

Respecto a compuestos orgánicos, para el cálculo de huella hídrica gris se consideraron dos; fenoles y grasas y aceites. En la tabla 6 se detallan los Fenoles, parámetro incluido en el análisis de la huella hídrica gris. Identificado como compuesto orgánico aromáticos que contiene el grupo hidroxilo (OH-) como grupo funcional. La débil acidez del grupo fenólico ha determinado que estas sustancias sean agrupadas químicamente junto a los ácidos carboxílicos y a los taninos, conformando así el grupo de los ácidos orgánicos. (Gobierno de España, 2018)

Descripción de compuestos orgánicos - Fenoles

Compuesto	Formula	Generalidades	Impactos sobre la salud	Impactos sobre el ambiente
Fenoles	C ₆ H ₅ OH	<p>El fenol puro, es un sólido blanquecino, a diferencia del producto comercial que es líquido, aunque en ambos casos, se forman por oxidación parcial del benceno, con olor dulce y alquitranado. Las principales fuentes de contaminación de estos compuestos se producen en la industria farmacéutica, en especial fabricación del ácido acetilsalicílico, y en la producción de resinas fenólicas.</p> <p>Es utilizado también en la manufactura del nylon y otras fibras sintéticas; como desinfectante para eliminar bacterias y hongos. (Gobierno de España, 2018)</p>	<p>Compuestos que se absorben por la inhalación del vapor, en contacto con la piel y por ingestión, alcanzándose una concentración nociva en el ambiente por evaporación de la sustancia a 20° C. Cuando la exposición a la sustancia es de corta duración, el vapor es corrosivo al contacto con los ojos, la piel y el tracto respiratorio, pudiendo causar graves quemaduras.</p> <p>Por inhalación provoca alteraciones en el sistema nervioso central, el corazón y el riñón, convulsiones, alteraciones cardíacas, fallos respiratorios, colapsos, estado de coma e incluso la muerte. (Gobierno de España, 2018)</p>	<p>Sustancia nociva para los organismos acuáticos, provoca efectos adversos de distinta magnitud en función de la concentración a la que se encuentren expuestos. Esta sustancia está clasificada como Compuesto Orgánico Volátil (VOC) y puede contribuir potencialmente a la formación de ozono troposférico, dañino para los cultivos, la fauna y el hombre. Se encuentran presentes en las aguas superficiales, como resultado de la contaminación ambiental y de los procesos naturales de descomposición de la materia orgánica. (Gobierno de España, 2018)</p>

Fuente: Registro Estatal de Emisiones y Fuentes Contaminantes (2018). Fenoles, [Tabla]. Recuperado de: PRTR. España

Respecto a Grasas y Aceites, se define como una variedad de sustancias orgánicas que son extraídas de suspensiones o de soluciones acuosas por el hexano o por el freón. A diferencia de algunos componentes que representan elementos químicos, iones compuestos o grupos de compuestos concretos, los aceites y las grasas se definen por el método utilizado para su determinación. Incluye aquellas sustancias de carbono de cadena larga, principalmente ácidos grasos, grasas ceras y aceites cuya concentración en el agua produce manchas aceitosas sobre la superficie del agua corriente o represada; acumulaciones de grasa sobre las paredes. (Londoño Carvajal, 2010)

Descripción de compuestos orgánicos – Grasas y Aceites

Compuesto	Formula	Generalidades	Impactos sobre la salud	Impactos sobre el ambiente
Grasas y Aceites	N/A	Muy pocas plantas tienen la posibilidad de separar estos materiales para su disposición en los sistemas de recolección de grasa o en los incineradores; en consecuencia, el residuo que se separa en forma de nata en los tanques de sedimentación primaria, normalmente es transferido a las unidades de disposición junto con los sólidos sedimentados. En los tanques de digestión de lodos, los aceites y grasas tienden a separarse y a flotar en la superficie para formar densas capas de natas, debido a su escasa solubilidad en el agua y a su bajo peso específico. (Universidad del Valle, 2002)	Los filtros percoladores y los procesos de lodos activados son afectados adversamente por las excesivas cantidades de grasa que envuelven las formas biológicas lo suficiente para interferir con la transferencia de oxígeno del líquido al interior de las células vivientes. Este fenómeno se describe algunas veces como acción “asfixiante”. (Universidad del Valle, 2002)	Al aceite y la grasa se les concede especial atención por su escasa solubilidad en el agua y su tendencia a separarse de la fase acuosa. A pesar de que estas características son una ventaja para facilitar la separación del aceite y la grasa mediante el uso de sistemas de flotación, su presencia complica el transporte de los residuos por las tuberías, su eliminación en unidades de tratamiento biológico y su disposición en las aguas receptoras (Universidad del Valle, 2002)

Fuente: Universidad del Valle (2002). Conceptos básicos de la contaminación del agua y parámetros de Medición, [Tabla]. Recuperado de: Biblioteca Virtual en Desarrollo Sostenible y Salud Ambiental. Santiago de Cali

Finalmente se describe el parámetro DBO (Demanda Bioquímica de Oxígeno), como uno de los parámetros de mayor importancia en el estudio y caracterización de las aguas no potables. La determinación de DBO indica la presencia y biodegradabilidad del material orgánico presente, es una forma de estimar la cantidad de oxígeno que se requiere para estabilizar el carbono orgánico y conocer con qué rapidez este material será metabolizado por las bacterias presentes en las aguas residuales. (Snoeyink, 2008)

El (DBO), está definido como la medida de la cantidad de oxígeno requerido para oxidación de la materia orgánica biodegradable, presente en la muestra de agua, como resultado de la acción de oxidación aerobia (Ramalho, 2003).

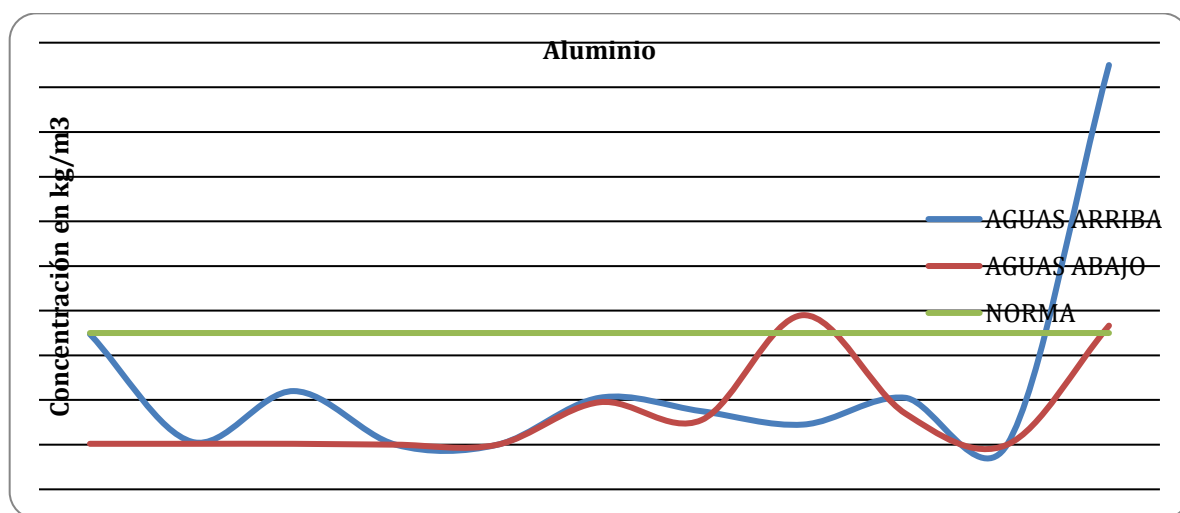
Anexo 5. Conversión de datos

PARÁMETRO	CONCENTRACIONES MENSUALES POR PARÁMETRO OBJETO DE ANÁLISIS																					
	ENERO AGUAS ARRIBA	ENERO AGUAS ABAJO	FEBRERO AGUAS ARRIBA	FEBRERO AGUAS ABAJO	MARZO AGUAS ARRIBA	MARZO AGUAS ABAJO	ABRIL AGUAS ARRIBA	ABRIL AGUAS ABAJO	MAYO AGUAS ARRIBA	MAYO AGUAS ABAJO	JUNIO AGUAS ARRIBA	JUNIO AGUAS ABAJO	JULIO AGUAS ARRIBA	JULIO AGUAS ABAJO	AGOSTO AGUAS ARRIBA	AGOSTO AGUAS ABAJO	SEPTIEMBRE AGUAS ARRIBA	SEPTIEMBRE AGUAS ABAJO	OCTUBRE AGUAS ARRIBA	OCTUBRE AGUAS ABAJO	DICIEMBRE AGUAS ARRIBA	DICIEMBRE AGUAS ABAJO
	kg/m3	kg/m3	kg/m3	kg/m3	kg/m3	kg/m3	kg/m3	kg/m3	kg/m3	kg/m3	kg/m3	kg/m3	kg/m3	kg/m3	kg/m3	kg/m3	kg/m3	kg/m3	kg/m3	kg/m3	kg/m3	kg/m3
1 Aluminio	0,00495	0,00004	0,00013	0,00004	0,0024	0,00004	0	0	0	0	0,0021	0,0019	0,0015	0,0011	0,0009	0,0058	0,0021	0,0014	0	0	0,017	0,00533
2 Arsénico	0,00001	0,00009	0,000009	0,000009	0,000009	0,000009	0,000009	0,000009	0,000009	0,000009	0,000009	0,000009	0,000004	0,000004	0,000004	0,000004	0,000004	0,000004	0,000004	0,000004	0,000004	0,000008
3 Berilio	0,0000022	0,0000022	0,0000022	0,0000022	0,000004	0,0000022	0,0000022	0,0000022	0,0000022	0,0000022	0,0000022	0,0000022	0,0000022	0,0000022	0,0000022	0,0000022	0,0000022	0,0000022	0,0000022	0,0000022	0,0000022	0,0000022
4 Boro	0,0001619	0,0001619	0,0001619	0,0001619	0,000161	0,000292	0,000161	0,000286	0,000161	0,000161	0,000161	0,000161	0,000179	0,000161	0,000162	0,000161	0,000161	0,000161	0,000161	0,000278	0,000162	0,000173
5 Cadmio	0,00002	0,00002	0,000009	0,000009	0,000002	0,000002	0,000009	0,000005	0,000001	0,000001	0,000001	0,000001	0,000004	0,000004	0,000004	0,000004	0,000004	0,000004	0,000001	0,000009	0,000009	0,000009
6 Zinc	0,00001	0,00022	0,00037	0,00036	0,0001	0,0002	0,00023	0	0,00007	0,00004	0,00005	0,00004	0,00003	0,00001	0,00005	0,00002	0,00001	0,00001	0,000107	0,0001	0,0001	0,000085
7 Cobalto	0,00004	0,00004	0,00004	0,00008	0,00004	0,00004	0,00004	0,00004	0,00004	0,00004	0,00004	0,00004	0,00004	0,00004	0,00005	0,00004	0,00005	0,00004	0,00004	0,00004	0,00004	0,00004
8 Cobre	0,00019	0,00019	0,00019	0,00019	0,00004	0,00004	0,00008	0,0001	0,00019	0,00019	0,00019	0,00019	0,00019	0,00019	0,00019	0,00019	0,00019	0,00019	0,00019	0,00019	0,00019	0,00019
9 DBO Total	0,016	0,025	0,014	0,067	0,005	0,015	0,036	0,052	0,011	0,029	0,011	0,016	0,005	0,009	0,016	0,116	0,0259	0,055	0,019	0,128	0,0094	0,109
10 Grasas y Aceites	0,00209	0,00209	0,0026	0,0021	0,002	0,002	0,0011	0,0011	0,0011	0,0011	0,0011	0,0011	0,009	0,006	0,008	0,007	0,0011	0,0011	0,0011	0,01	0,0011	0,017
11 Hierro	0	0	0	0	0	0	0,0177	0,0189	0	0	0,00451	0,00948	0,00475	0,00152	0,00814	0,00453	0,00702	0,00491	0	0	0,0202	0,00975
12 Litio	0,00003	0,00003	0,00003	0,00003	0,00003	0,00003	0,00004	0,00003	0,00003	0,00003	0,00003	0,00003	0,00003	0,00003	0,00003	0,00003	0,00003	0,00003	0,00011	0,00003	0,00003	0,00003
13 Manganeso	0,00264	0,00718	0,00241	0,00625	0,00005	0,00007	0,00124	0,00154	0,00032	0,00013	0,00006	0,00006	0,00005	0,00004	0,00015	0,00011	0,00007	0,00008	0,000163	0,0001	0,00029	0,00024
14 Mercurio	0,000001	0,000001	0,000001	0,000002	0,000001	0,000001	0,000001	0,000001	0,000001	0,000001	0,000001	0,000001	0,000001	0,000001	0,000001	0,000001	0,000001	0,000001	0,000001	0,000001	0,000007	0,000001
15 Molibdeno	0,0000072	0,0000072	0,0000072	0,0000072	0,000123	0,000125	0,0000091	0,0000072	0,0000073	0,0000262	0,0000072	0,0000072	0,0000072	0,0000072	0,0000072	0,0000072	0,0000072	0,0000072	0,0000072	0,0000072	0,0000072	0,0000072
16 Níquel	0,00009	0,00009	0,00009	0,00009	0,00004	0,0001	0,00009	0,0001	0,00009	0,00009	0,00009	0,00009	0,00009	0,00009	0,00009	0,00009	0,00009	0,00009	0,00009	0,00009	0,00009	0,00009
17 Plomo	0,00001	0,00001	0,00025	0,00024	0,001	0,00009	0,00001	0,00007	0,00009	0,00009	0,00009	0,00009	0,00009	0,00009	0,00009	0,00009	0,00009	0,00009	0,00009	0,00009	0,00009	0,00009
18 Selenio	0,000004	0,000004	0,000004	0,000004	0,000004	0,000004	0,000004	0,000004	0,000065	0,000004	0,000004	0,000004	0,000004	0,000004	0,000004	0,000004	0,000004	0,000004	0,000004	0,000004	0,000004	0,000004
19 Vanadio	0,000057	0,000047	0,0000358	0,0000685	0,000096	0,000046	0,0000432	0,0000436	0,0000161	0,00000495	0,00000496	0,00000495	0,000005	0,000005	0,000007	0,000008	0,000005	0,00000495	0,000013	0,000012	0,000036	0,000018
20 Fenoles	0,000002	0,00001	0,000002	0,000002	0,000002	0,000002	0,000002	0,000011	0,000002	0,000002	0,000002	0,000002	0,000004	0,000005	0,000006	0,000006	0,000002	0,000003	0,000003	0,000002	0,000005	0,000057

Anexo 6. Comparativo de los Contaminantes con los Parámetros establecidos en la Normativa:

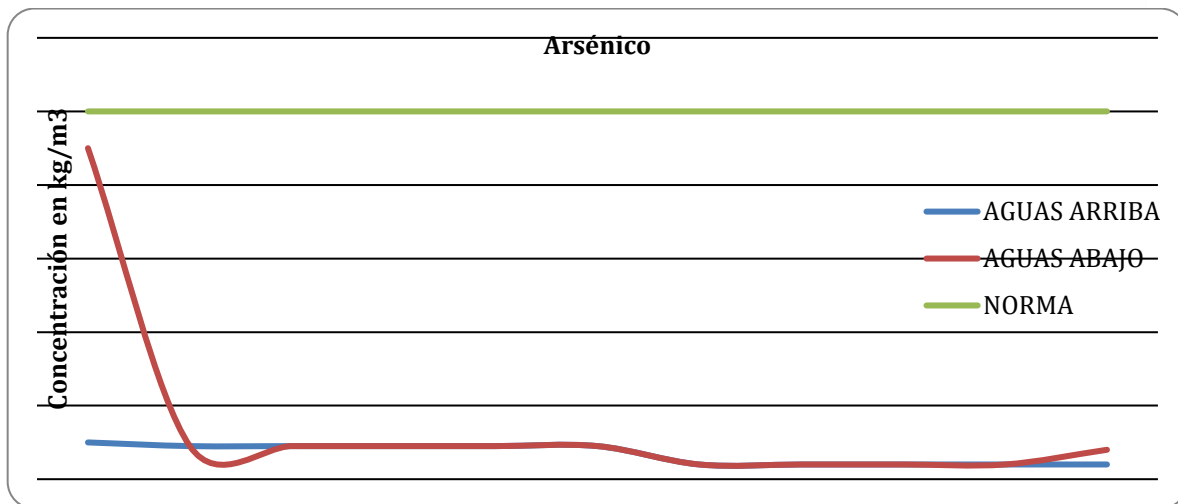
Uno de los productos básicos que genera el reporte base para análisis, es el comportamiento de las concentraciones de los contaminantes de interés, frente a las concentraciones en el efluente permitidas por norma, lo que ha generado de primera mano, un insumo para la evaluación de la gestión de los lixiviados en el relleno sanitario Doña Juana.

Durante el desarrollo del ejercicio, se hizo una comparación entre las concentraciones reportadas tanto aguas arriba como aguas abajo para cada mes (UAESP, 2017), con el parámetro establecido en el marco legal vigente, cuya representación gráfica se presenta a continuación:



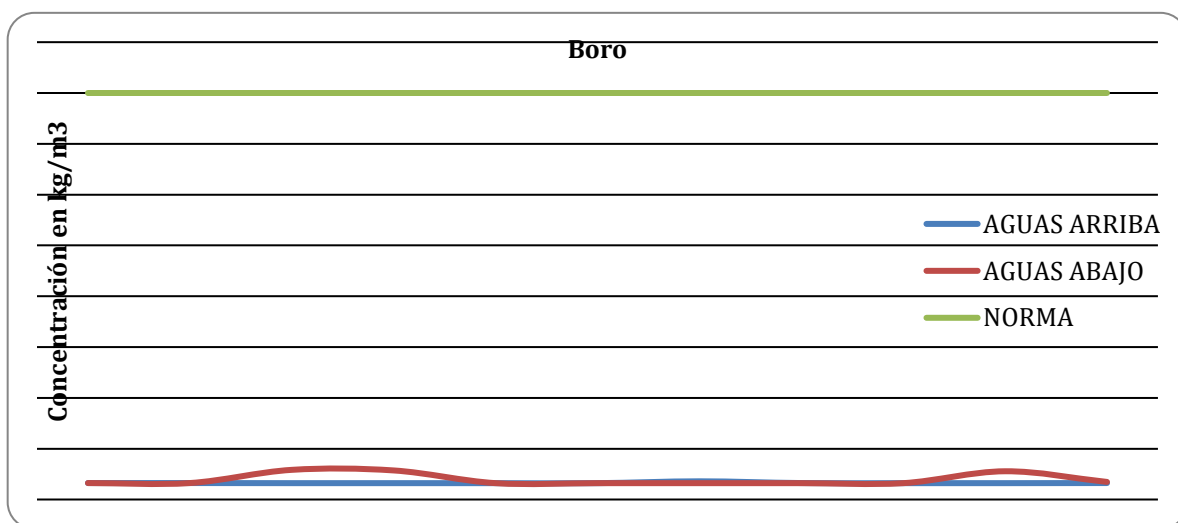
Comparativos Al

Parámetro con un comportamiento relativamente variable durante las mediciones del año 2016, para los meses enero, agosto y diciembre se observó un incremento en el agua superficial y superó los parámetros límites de la norma



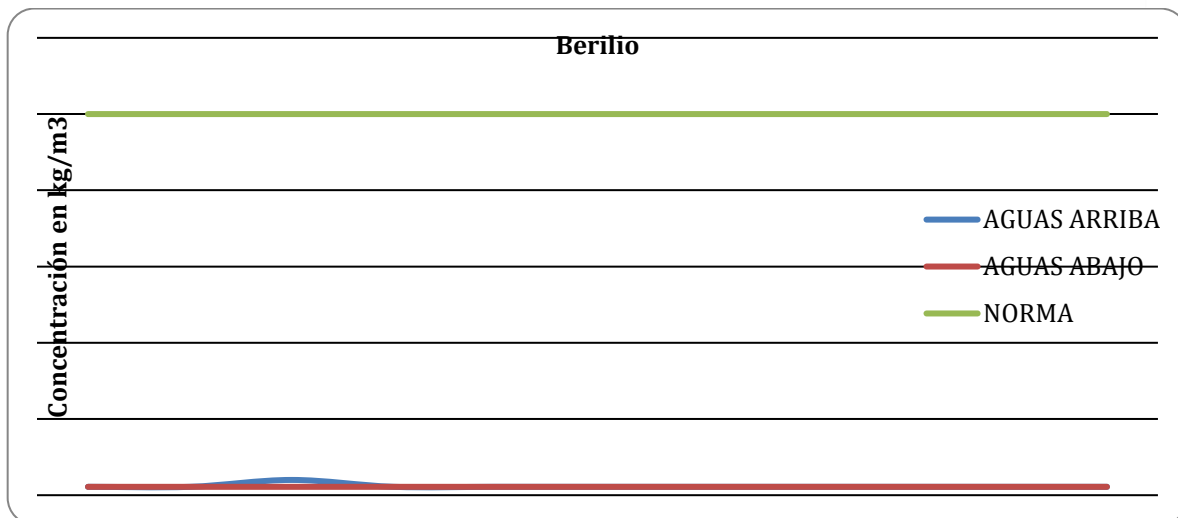
Comparativos As

Metaloide que mantuvo sus valores siempre por debajo del valor establecido por la norma, durante el periodo de estudio



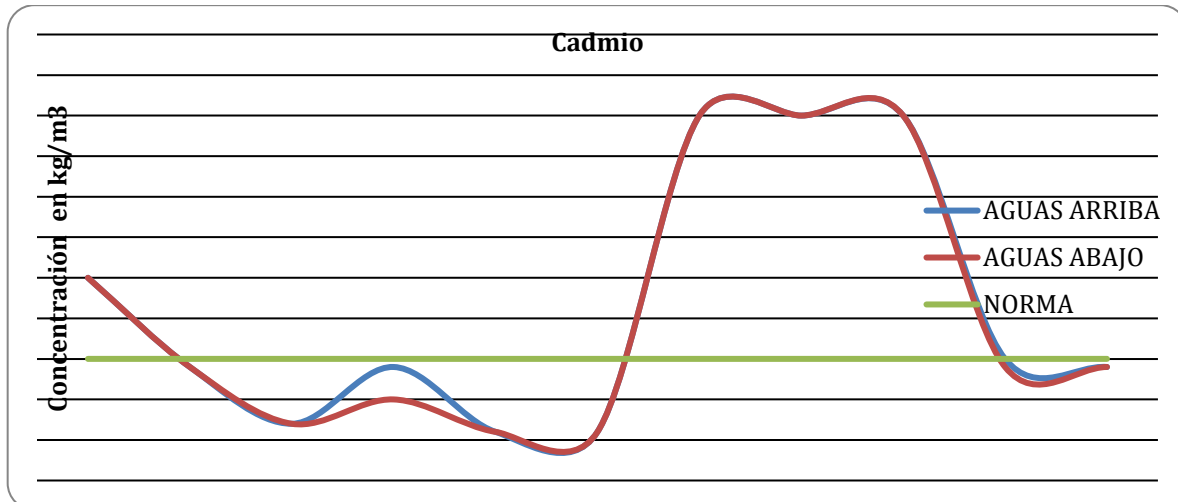
Comparativos B

El Boro es un elemento de especial interés para la norma modificado por la Resolución 166 de 2008, durante todo el 2016 su comportamiento fue estable e inclusive no superó los parámetros establecidos por la norma.



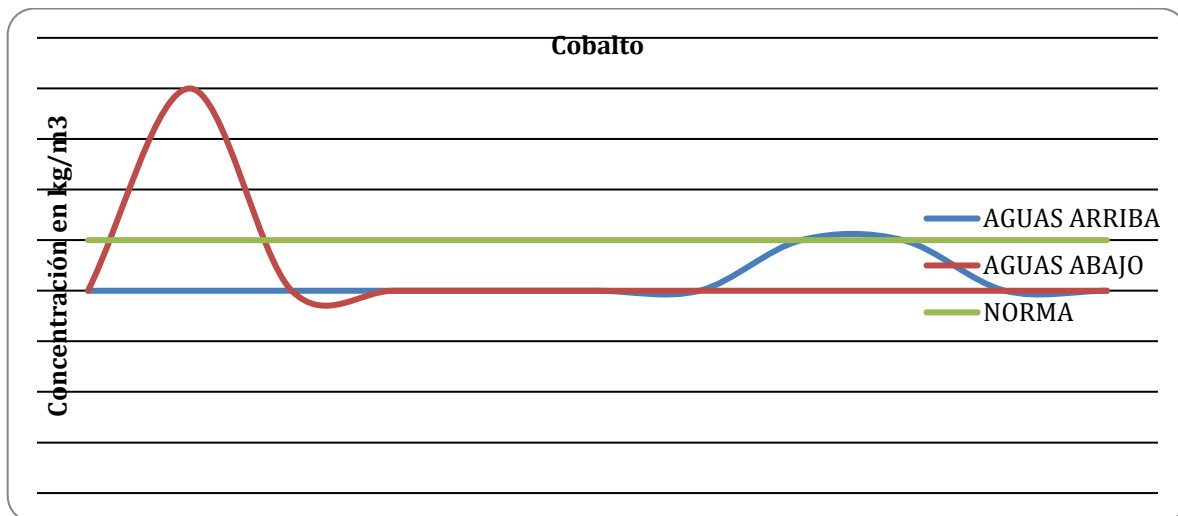
Comparativos Be

Alcalinotérreo con un comportamiento muy homogéneo durante el 2016, inclusive no superó el límite máximo permitido por la norma



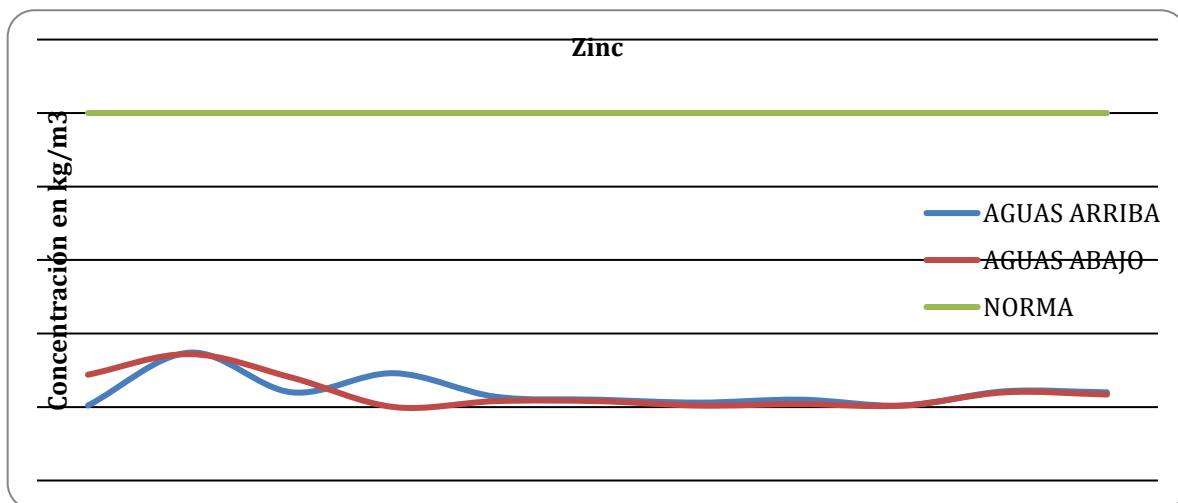
Comparativos Cd

Metal de transición que se genera por la actividad relacionada con los rellenos sanitarios, en promedio, durante el año 2016 superó los parámetros máximos establecidos por la norma.



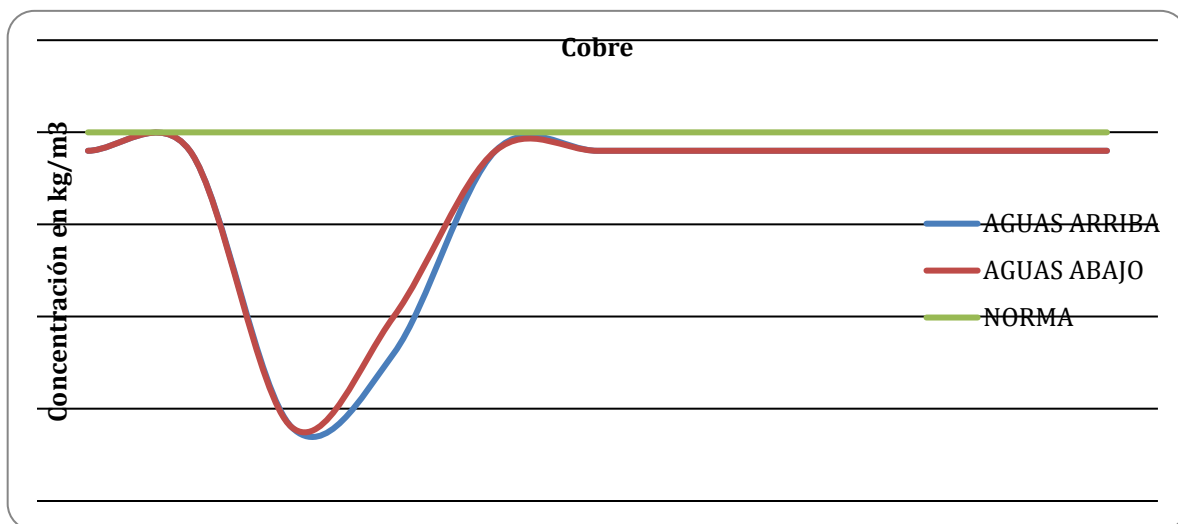
Comparativos Co

Elemento químico que para el año 2016, en el mes de febrero, no cumplió con la norma, sin embargo, para los otros meses del año, tanto las mediciones aguas arriba y aguas abajo cumplieron con los parámetros.



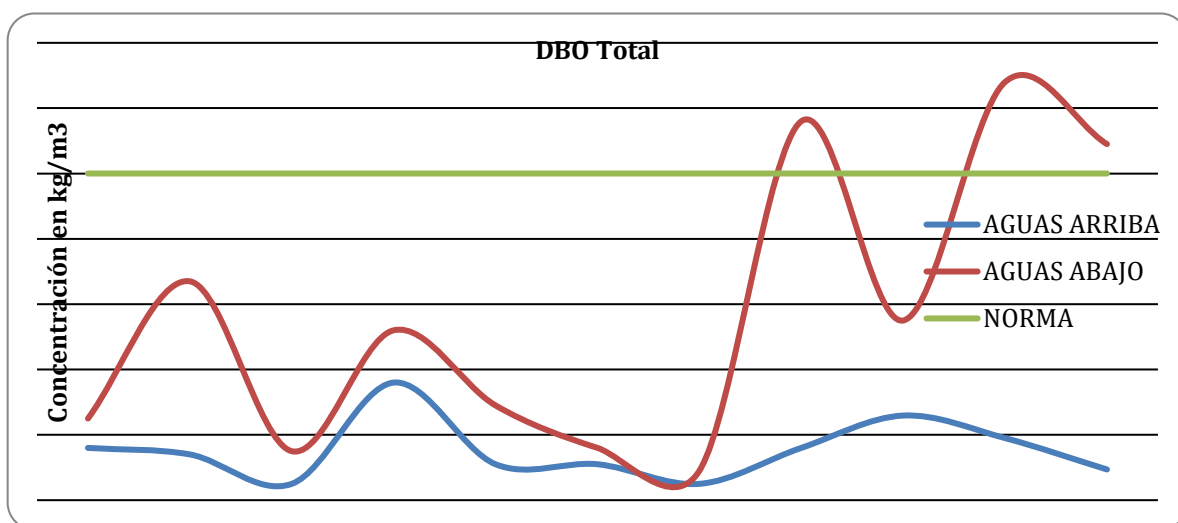
Comparativos Zn

Elemento químico que para el año 2016, cumplió con la norma, tanto las mediciones de arriba y aguas abajo.



Comparativos Cu

Elemento químico que para el año 2016, cumplió con la norma, tanto las mediciones de arriba y aguas abajo. Identificándose una medición notablemente baja en el mes de marzo.

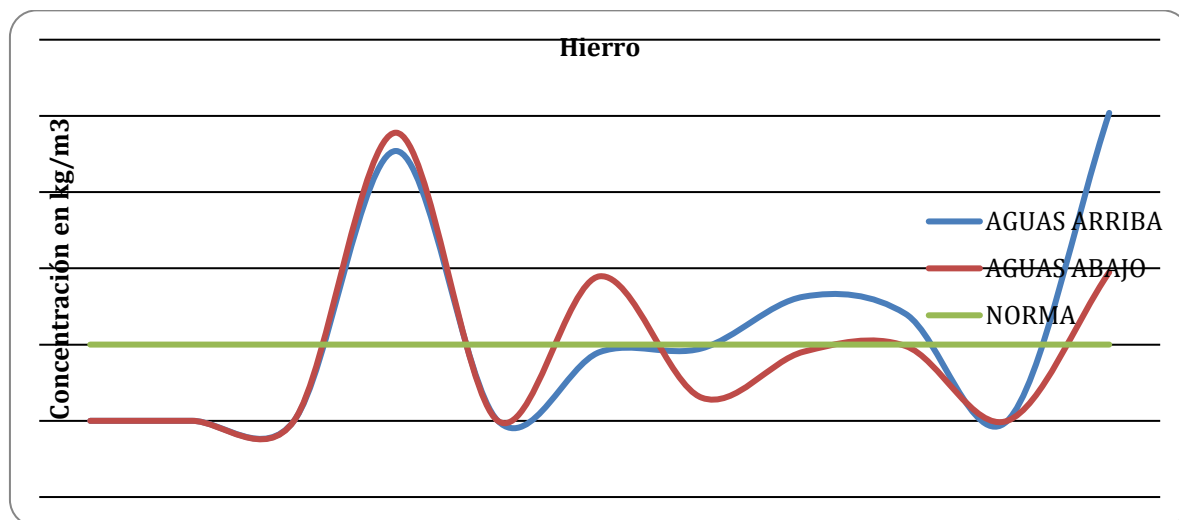


Comparativos DBO Total



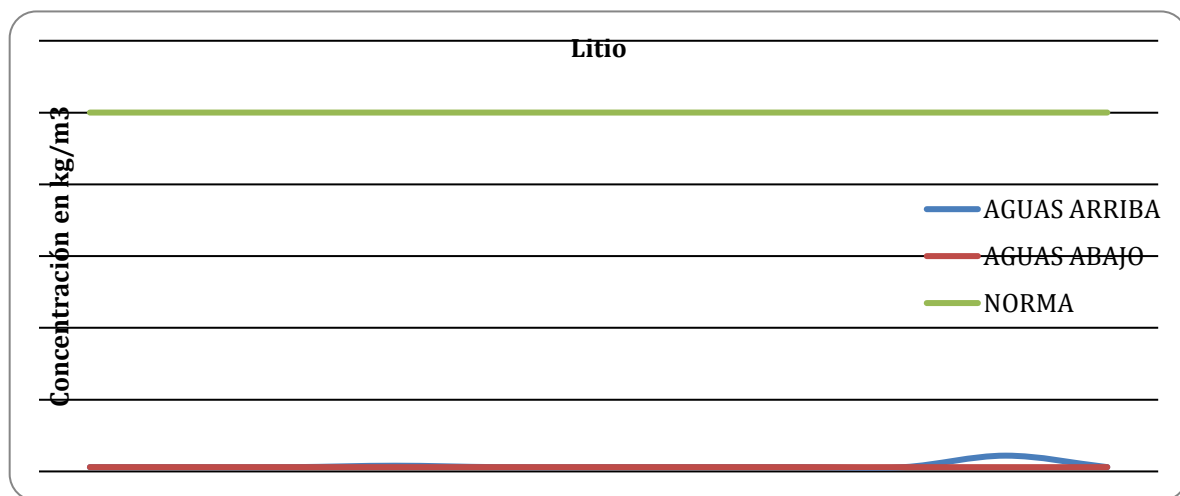
Comparativos Grasas y Aceites

El parámetro de grasas y aceites, en 2016 presentó una fluctuación similar, tanto para las mediciones aguas arriba, como para las de aguas abajo, en la se evidencian registros superiores a lo establecido por normativa, en la mayoría del tiempo, con discrepancia significativa en los valores correspondientes al mes de octubre y diciembre.



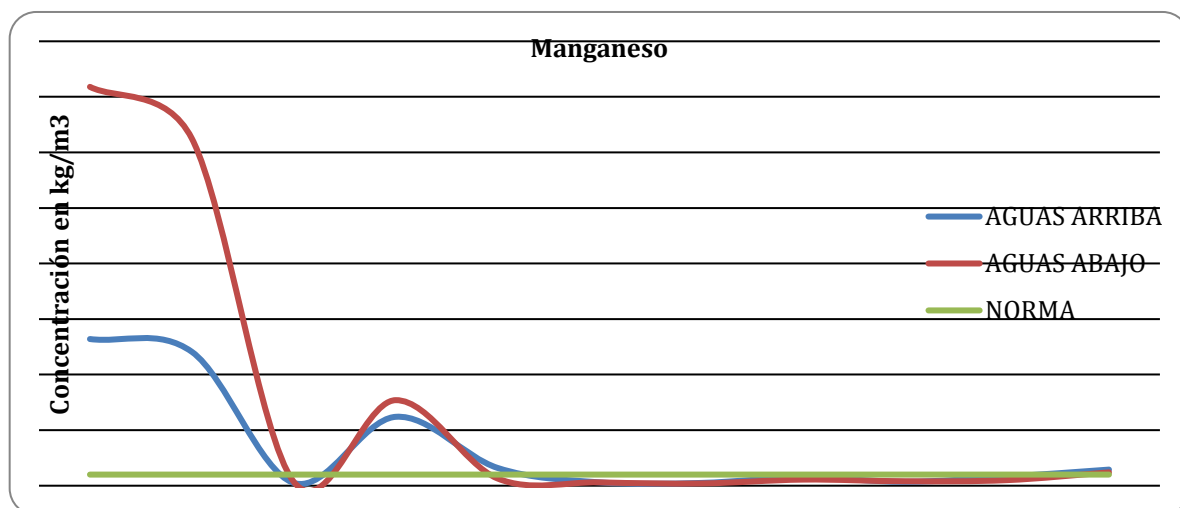
Comparativos Fe

Elemento químico con un comportamiento muy similar en las mediciones de aguas arriba y aguas abajo, en los meses de abril, agosto, septiembre y diciembre, excedió los parámetros establecidos por la norma



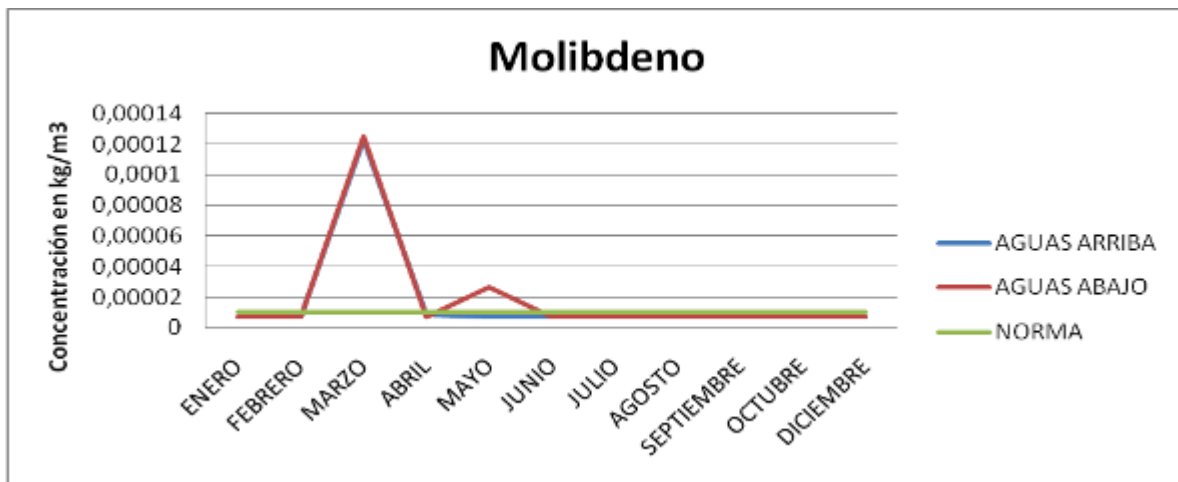
Comparativos Li

Metal alcalino, de comportamiento similar en las mediciones, tanto en aguas arriba, como en aguas abajo, que durante el año 2016 no sobrepasó los parámetros establecidos por la norma.



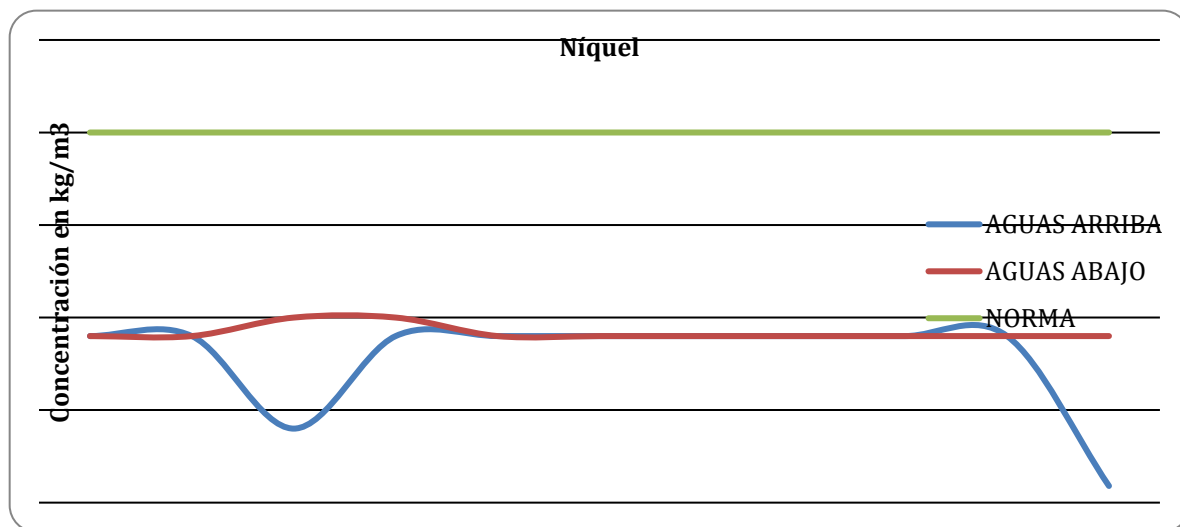
Comparativos Mn

Metal de transición que, durante los primeros cuatro meses de 2016, tanto en las mediciones de arriba y aguas abajo, no cumplió con la norma. Para el segundo semestre de 2016 el parámetro se comportó de manera muy homogénea sin sobrepasar el parámetro establecido en la norma



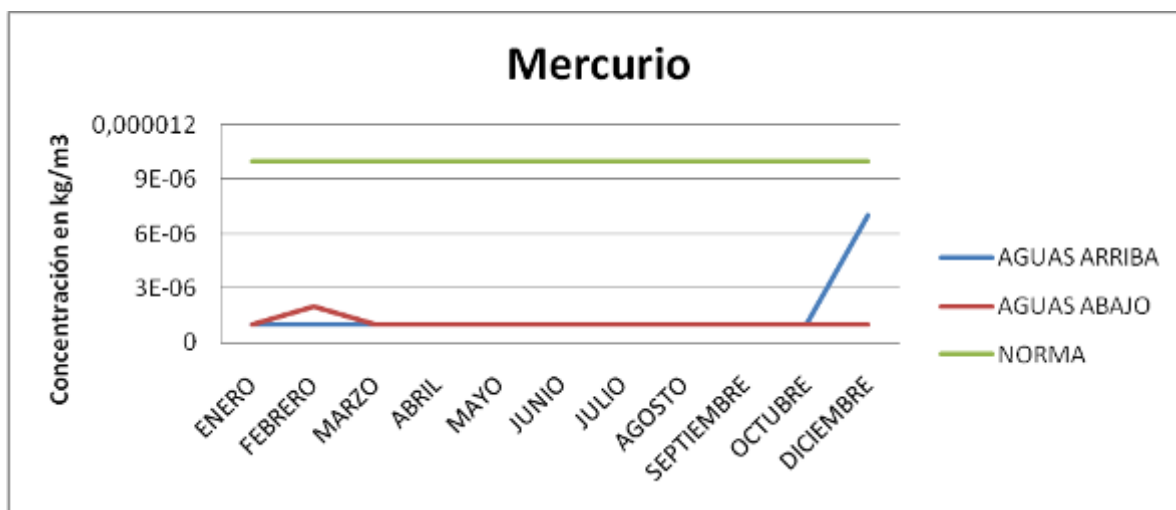
Comparativos Mo

Elemento químico que para el año 2016, durante los meses de marzo y mayo sobrepaso los parámetros establecidos en la norma.



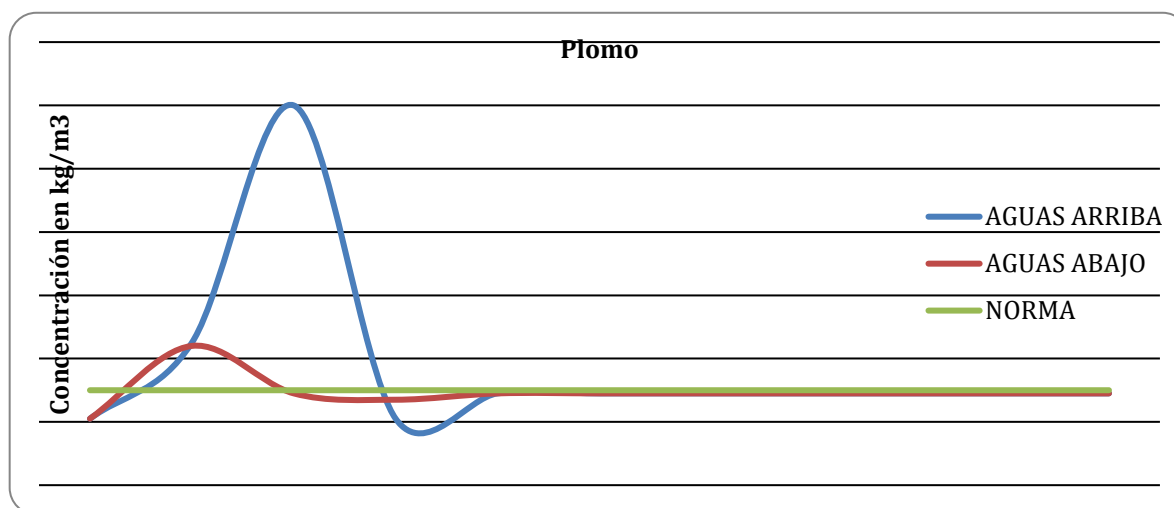
Comparativos Ni

Metal de transición que durante todo el 2016 no superó el parámetro establecido por la norma.



Comparativos Hg

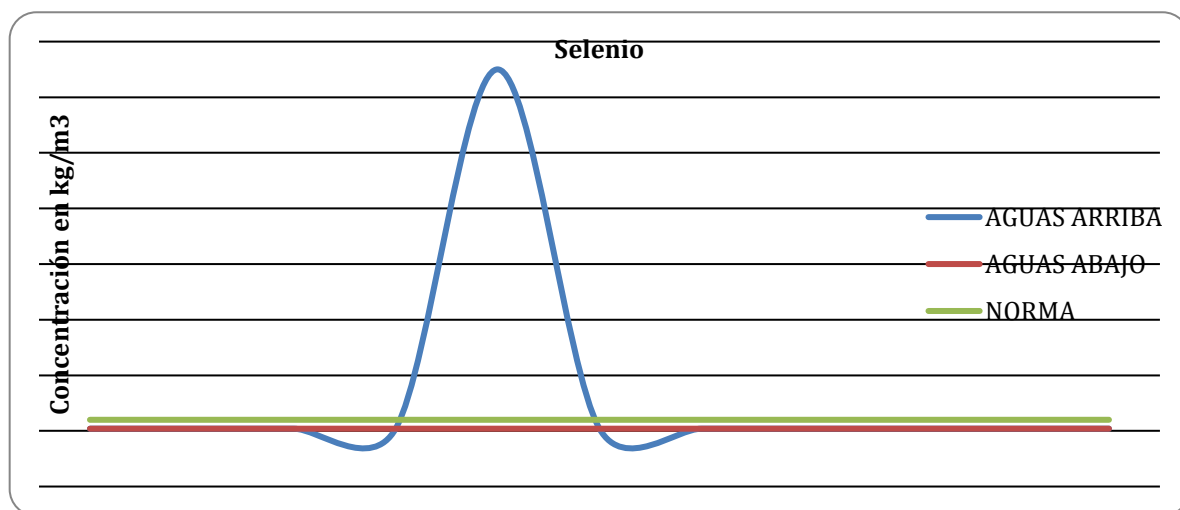
Elemento químico que para el año 2016, siempre estuvo por debajo del parámetro establecido por la norma, tanto las mediciones de arriba y aguas abajo.



Comparativos Pb

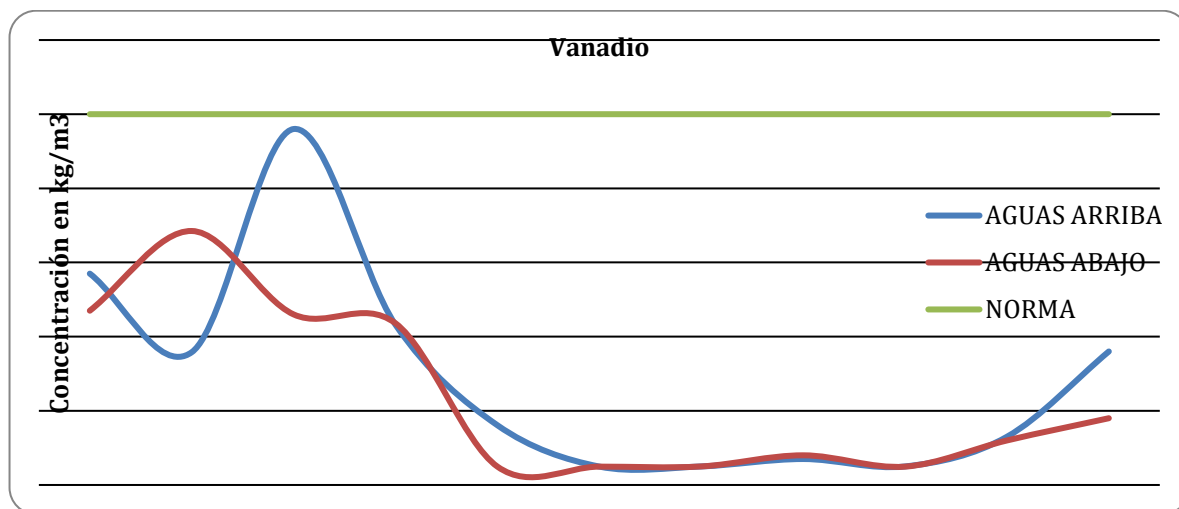
Elemento químico que durante los meses de febrero y marzo superó los parámetros de la norma en las mediciones de aguas arriba, posteriormente se comportó de manera

homogénea sin superar los parámetros de la norma. Elemento de especial interés por su grado de toxicidad y posibles afectaciones en la salud y el ambiente



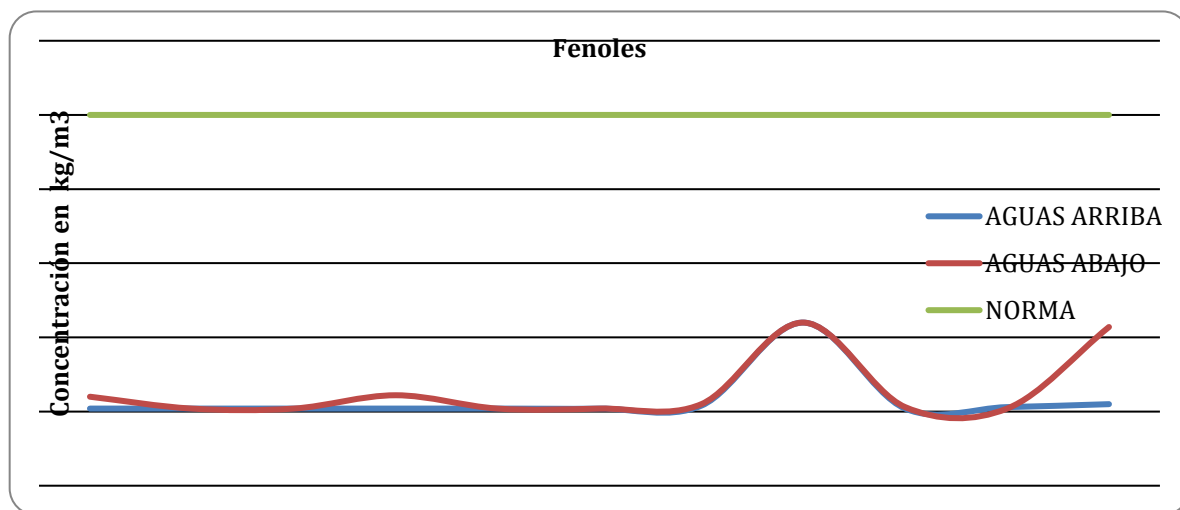
Comparativos Se

Elemento químico que para el año 2016, solo incumplió el parámetro en la medición de aguas arriba del mes de mayo. Se observa para las mediciones de aguas abajo el parámetro siempre cumplió con el parámetro de la norma.



Comparativos V

Metal de transición que para el año 2016, cumplió con la norma, tanto las mediciones de arriba y aguas abajo, sin embargo, la gráfica evidencia que aguas arriba tuvo incrementos de concentración para los meses de marzo y diciembre



Comparativos Fenoles

Los compuestos orgánicos clasificados en el grupo de los fenoles no presentaron durante el periodo de reporte, registros por encima de lo establecido por la norma.