

**APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA AL
SISTEMA DE ACUEDUCTO EN EL ÁREA METROPOLITANA DE
BUCARAMANGA**

MARTHA LUCÍA BARRERA PÉREZ

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
MAESTRÍA EN INGENIERÍA AMBIENTAL
BUCARAMANGA**

2017

**APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA AL
SISTEMA DE ACUEDUCTO EN EL ÁREA METROPOLITANA DE
BUCARAMANGA**

MARTHA LUCÍA BARRERA PÉREZ

Tesis de Maestría para optar el título de Magister en Ingeniería Ambiental

Director:

Dr. Alexander Meneses Jácome
Ingeniero Químico, Ph.D (C)

Co-Director:

Omar Alberto Ávila Rojas
Ingeniero Químico, M.Sc.

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
MAESTRÍA EN INGENIERÍA AMBIENTAL
BUCARAMANGA

2017

Dedicatoria

A Papito Dios

Por tu bondad y amor infinito.

A la memoria de mi Padre Octavio

Por enseñarme con tu ejemplo, a ser perseverante y a nunca rendirme.

A mi madre Margarita

Por tu apoyo constante y amor incondicional.

A mi preciosa hija Silvita

Por ti mi niña, cada día quiero ser una mejor persona y tu ejemplo de vida.

Agradecimientos

Gracias a Dios por guiarme en cada momento de mi vida, por ser mi fuerza en momentos de debilidad y por mostrarme su infinita misericordia.

Gracias a mi madre Margarita por apoyarme en todo momento, por todas sus valiosas enseñanzas, por ser madre y abuela abnegada e incondicional.

Gracias a mi princesa Silvita, por llenar mi vida de alegría y amor verdadero. Gracias mi niña por tu apoyo y paciencia. Te ofrezco este logro, porque tú haces parte de El.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	16
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	20
2. JUSTIFICACIÓN	21
3. OBJETIVOS	22
3.1. OBJETIVO GENERAL	22
3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	22
4. ACV DE SISTEMAS DE AGUA POTABLE: ESTADO DEL ARTE	23
5. FUNDAMENTOS DEL ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA	40
5.1. Etapas del Análisis de Ciclo de Vida	41
6. DESARROLLO METODOLÓGICO	46
6.1. Descripción General del Sistema de Potabilización en el Área Metropolitana de Bucaramanga	46
6.2. Definición del objeto y campo de estudio	49
6.3. Evaluación de Impacto de Ciclo de Vida (EICV)	51
6.4. Análisis de inventario	53
6.5 Análisis e Interpretación de Resultados	61
7. CONCLUSIONES	96
8. RECOMENDACIONES	98
BIBLIOGRAFÍA	100
ANEXOS	103

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1: Una Visión del Análisis de Ciclo de Vida	25
Figura 2. Diagrama de flujo simplificado del Sistema de Producción de Agua Potable en Sidney (Australia).....	26
Figura 3. Diagrama del proceso de tratamiento de agua potable para el ACV	28
Figura 4. Diagrama de Puntuación Única, para determinar el porcentaje de los impactos ambientales producidos en cada fase del proceso de potabilización del agua.....	29
Figura 5. Representación esquemática de dos sistemas de tratamiento de agua; a) Planta de nanofiltración; b) Planta convencional virtual.....	30
Figura 6. Contribución a las categorías de impacto, en las diferentes etapas del proceso de tratamiento de agua potable.....	32
Figura 7. Fronteras, entradas y salidas del sistema de agua urbana, para el municipio de Aveiro (Portugal) – Unidad de referencia (1 m ³ de agua potable)...	34
Figura 8. Diagrama de porcentajes de contribución de impactos en cada etapa del sistema, para cada categoría de impacto estudiada.....	35
Figura 9. Porcentajes de contribución de impactos ambientales en cada uno de los procesos tenidos en cuenta para el sistema de agua potable, en la ciudad de Sicilia (Italia).....	36
Figura 10. Porcentajes de contribución a los impactos ambientales sobre la toxicidad humana, ecotoxicidad del agua, y ecotoxicidad terrestre, en los diferentes procesos del sistema de agua urbana, usando los métodos ReCiPe, USETox e I2002+.....	39
Figura 11. Etapas del Análisis de Ciclo de Vida.....	41
Figura 12. Esquema del Análisis de Inventario	42
Figura 13. Elementos de la Evaluación de Impactos (EICV). Normas ISO 14040 de 2006.....	44
Figura 14. Fuentes hídricas de abastecimiento en Bucaramanga	47
Figura 15. Sistema de Potabilización de Agua, Área Metropolitana de Bucaramanga.	51
Figura 16. Diagrama de Flujos Sistema de Potabilización (AMB).....	59
Figura 17. Árbol de proceso la Planta de Tratamiento de Agua Potable FLORIDABLANCA (corte de visualización del 0.0009%).....	62
Figura 18. Árbol de proceso la Planta de Tratamiento de Agua Potable Bosconia (corte de visualización del 0.0008%)	64
Figura 19. Caracterización Global del Impacto Ambiental Potencial - PTAP FLORIDABLANCA.	66

Figura 20. Puntuación única por proceso - PTAP FLORIDABLANCA.	67
Figura 21. Puntuación única por categoría - PTAP FLORIDABLANCA.	67
Figura 22. Análisis del Perfil Medioambiental para la categoría Calentamiento Global - PTAP FLORIDABLANCA.	69
Figura 23. Análisis del Perfil Medioambiental para la categoría Formación de Ozono por vegetación - PTAP FLORIDABLANCA.	69
Figura 24. Análisis del Perfil Medioambiental para la categoría Formación de Ozono por actividades humanas - PTAP FLORIDABLANCA.	70
Figura 25. Análisis del Perfil Medioambiental para la categoría Eutrofización Acuática - PTAP FLORIDABLANCA.	72
Figura 26. Análisis del Perfil Medioambiental de la categoría Toxicidad Humana-PTAP FLORIDABLANCA.	73
Figura 27. Perfil Medioambiental de la categoría Acidificación- PTAP FLORIDABLANCA.	75
Figura 28. Perfil Medioambiental de la categoría Eco-toxicidad Crónica del Agua-PTAP FLORIDABLANCA.	76
Figura 29. Caracterización Global del Impacto Ambiental Potencial - PTAP BOSCONIA.	78
Figura 30. Puntuación única por proceso - PTAP BOSCONIA.	79
Figura 31. Puntuación única por categoría - PTAP FLORIDABLANCA.	80
Figura 32. Perfil ambiental de la categoría Calentamiento Global - PTAP BOSCONIA.	81
Figura 33. Perfil ambiental de la categoría Formación de Ozono por vegetación - PTAP BOSCONIA.	82
Figura 34. Perfil ambiental de la categoría Formación de Ozono por actividades humanas - PTAP BOSCONIA.	82
Figura 35. Perfil ambiental de la categoría por Eutrofización Acuática - PTAP BOSCONIA.	85
Figura 36. Perfil ambiental de la categoría Toxicidad Humana- PTAP BOSCONIA.	86
Figura 37. Perfil medioambiental de la categoría Acidificación- PTAP BOSCONIA.	87
Figura 38. Perfil ambiental de la categoría Eco-toxicidad crónica al agua- PTAP BOSCONIA.	88
Figura 39. Caracterización Global del Impacto Ambiental Potencial Comparativo para las PTAP FLORIDABLANCA Y BOSCONIA.	90
Figura 40. Puntuación única por categoría - PTAP FLORIDABLANCA Y BOSCONIA.	91

Figura 41. Puntuación única por proceso - PTAP FLORIDABLANCA Y BOSCONIA	92
Figura 42. Contribución comparativa del poder del Calentamiento Global para las plantas PTAP FLORIDABLANCA y BOSCONIA.....	94
Figura 43. Poder del Calentamiento Global a 20 años	94
Figura 44. Poder del Calentamiento Global a 100 años	95
Figura 45. Huella de Carbono a 500 años	95
Figura 46. Planta de Tratamiento Bosconia	105
Figura 47. Planta de Tratamiento La Flora	106
Figura 48. Planta de Tratamiento Morrórico	107
Figura 49. Planta de Tratamiento FLORIDABLANCA.....	107
Figura 50. Ubicación geográfica de Plantas de Tratamiento de Agua.	108

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Volumen de Agua Captada y Volumen de Agua Producida, en unidades de m ³ /mes. Año 2015.....	54
Tabla 2. Balance Volumétrico Global del agua tratada en las PTAP.	54
Tabla 3. Consumo Anual de Químicos: Planta FLORIDABLANCA.....	55
Tabla 4. Consumo Anual de Químicos: Planta Bosconia.....	55
Tabla 5. Consumo de Energía Eléctrica	56
Tabla 6. Consumo de Combustible para el sistema de bombeo.....	56
Tabla 7. Caracterización de Agua Cruda	56
Tabla 8. Caracterización de Agua Tratada	57
Tabla 9. Caracterización de Lodos	58
Tabla 10. Balance Global de Consumos máxicos y energéticos, PTAP FLORIDABLANCA.....	60
Tabla 11. Balance Global de Consumos máxicos y energéticos, PTAP Bosconia.....	60
Tabla 12. Resultados de la Caracterización Global del Impacto Ambiental Potencial – PTAP FLORIDABLANCA.....	65
Tabla 13. Resultados del Perfil Medio Ambiental categoría Calentamiento global - PTAP FLORIDABLANCA.....	70
Tabla 14. Resultados del Perfil Medio Ambiental categoría Formación de ozono por vegetación - PTAP FLORIDABLANCA.	71
Tabla 15. Resultados del Perfil Medio Ambiental categoría Formación de ozono por actividades humanas - PTAP FLORIDABLANCA.....	71
Tabla 16. Resultados del Perfil Medio Ambiental categoría Eutrofización Acuática - PTAP FLORIDABLANCA.....	71
Tabla 17. Resultados del Perfil Medio Ambiental categoría Toxicidad Humana - PTAP FLORIDABLANCA.....	73
Tabla 18. Resultados del Perfil Medio Ambiental categoría Acidificación - PTAP FLORIDABLANCA.....	74
Tabla 19. Resultados del Perfil Medio Ambiental categoría Eco-toxicidad crónica del agua - PTAP FLORIDABLANCA.....	75
Tabla 20. Resultados de la Caracterización Global del Impacto Ambiental Potencial - PTAP BOSCONIA.	77
Tabla 21. Resultados del Perfil Medio Ambiental categoría Calentamiento global - PTAP BOSCONIA.....	83
Tabla 22. Resultados del Perfil Medio Ambiental Formación de Ozono por Vegetación - PTAP BOSCONIA.....	83

Tabla 23. Resultados del Perfil Medio Ambiental Formación de Ozono por Actividades Humanas - PTAP BOSCONIA.....	83
Tabla 24. Resultados del Perfil Medio Ambiental por Eutrofización Acuática - PTAP BOSCONIA.....	84
Tabla 25. Resultados del Perfil Medio Ambiental por Toxicidad Humana - PTAP BOSCONIA.....	85
Tabla 26. Resultados del Perfil Medio Ambiental por Acidificación - PTAP BOSCONIA.....	87
Tabla 27. Resultados del Perfil Medioambiental por Toxicidad crónica del agua - PTAP BOSCONIA.....	88
Tabla 28. Resultados de la Puntuación única por Categoría Comparativo para las PTAP FLORIDABLANCA y BOSCONIA.....	90
Tabla 29. Resultados de la Puntuación única por proceso Comparativo para las PTAP FLORIDABLANCA y BOSCONIA.....	92
Tabla 30. Resultados del poder del Calentamiento Global Comparativo para las plantas PTAP FLORIDABLANCA y BOSCONIA.....	93
Tabla 31. Puntuación Única por Proceso (Pt) - Planta FLORIDABLANCA.....	123
Tabla 32. Puntuación Única por Categoría (Pt) - Planta FLORIDABLANCA.....	123
Tabla 33. Inventario Planta FLORIDABLANCA.....	123
Tabla 34. Inventario Planta Bosconia.....	126

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Plantas de Tratamiento de Agua en el Área Metropolitana de Bucaramanga.....	103
Anexo B. Descripción Etapas del Proceso de Tratamiento de Agua Potable	109
Anexo C. Glosario ACV	113
Anexo D. Categorías de Impacto Potencial	117
Anexo E. Normativa sobre el recurso hídrico.....	120
Anexo F. Inventario.....	123

RESUMEN

TITULO: APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA AL SISTEMA DE ACUEDUCTO EN EL ÁREA METROPOLITANA DE BUCARAMANGA. *

AUTOR: Martha Lucía Barrera Pérez **

PALABRAS CLAVES: Análisis de Ciclo de Vida, Impacto Ambiental, Tratamiento de Agua Potable, Ecotoxicidad Acuática, Análisis de Impactos.

El acceso al agua potable es una necesidad humana básica, y su disponibilidad depende en buena parte, de la dinámica de las empresas prestadoras del servicio. Es responsabilidad de las empresas de acueducto garantizar la producción de agua apta para el consumo humano. Dependiendo de las características físico químicas y bacteriológicas del agua cruda captada, es necesario aplicar un tratamiento adecuado para obtener agua potable.

El consumo de químicos, el uso de energía y las emisiones producidas en cada una de las etapas de tratamiento del agua cruda, generan impactos negativos al medio ambiente. Se hace necesario la evaluación de dichos impactos, con el fin de ejecutar acciones que reduzcan la afectación por el proceso de potabilización del agua, sobre los recursos agua, suelo y aire.

En este proyecto se aplicó la Metodología de Análisis de Ciclo de Vida (ACV) al Sistema de Producción de Agua Potable, para el Acueducto Metropolitano de Bucaramanga (AMB), con el fin de evaluar los impactos asociados a cada una de las etapas del proceso de potabilización del agua, incluido la energía de bombeo para la distribución. Para este estudio, se utilizó la herramienta SimaPro, en el marco de la NTC-ISO-14040/14044, de 2007, para la Gestión Ambiental: Análisis de Ciclo de Vida.

*Proyecto de Grado

**Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Maestría en Ingeniería Ambiental. Director: PhD (C) Alexander Meneses Jácome. Co-Director: M.Sc. Omar Alberto Ávila Rojas.

ABSTRACT

TITLE: APPLICATION OF THE METHODOLOGY OF ANALYSIS FOR THE LIFE CYCLE OF THE WATER SUPPLY SYSTEM IN BUCARAMANGA METROPOLITAN AQUEDUCT.*

AUTHOR: Martha Lucía Barrera Pérez **

KEYWORDS: Life Cycle Analysis, Environmental Impact, Drinking Water Treatment, Aquatic Ecotoxicity, Impact Analysis.

Access to drinking water is a basic human need and its availability depends in great part on the dynamics executed by the companies providing the services. It is the Aqueduct's responsibility to ensure the production of safe drinking water. Depending on the physicochemical and bacteriological characteristics of raw water collected, it is necessary to apply an appropriate treatment to extract drinking water.

The consumption of chemicals, the use of energy, and the emissions produced in each one of the stages of treatment of raw water generate negative impacts to the environment. These negative impacts make it necessary to evaluate such procedures with the purpose of taking actions that reduce the effects on the resources of water, soil, and air through the process of purification of the water.

This project applied The Methodology of Analysis of Life Cycle (ACV) to the system of production of drinking water used in the Metropolitan Aqueduct of Bucaramanga (MAB) with the purpose of assessing the impacts associated with each stage of the water purification process to include the energy required for pumping and distribution. The tool SimaPro has been used in this study within the frame of the NTC-ISO-14040 / 14044, of 2007 for the Environmental Management: Analysis of life cycle.

*Graduation Project

**Faculty of Physicochemical Engineering. Chemical Engineering School. MSc in Environmental Engineering. Director: PhD (C) Alexander Meneses Jácome. Co-Director: M.Sc. Omar Alberto Ávila Rojas.

INTRODUCCIÓN

La creciente contaminación de las fuentes hídricas y la imperante necesidad de cubrir la demanda de agua potable de la población, hace que las Plantas de Tratamiento de Agua Potable (PTAP), busquen alternativas cada vez más eficientes en el proceso de potabilización, para ofrecer un producto de óptima calidad, con mínimo impacto al medio ambiente. Razón por la cual es importante realizar un estudio de evaluación de impactos ambientales en el campo de los sistemas de potabilización de agua.

Diferentes métodos han sido desarrollados para la evaluación de impacto ambiental (EIA), sin embargo no todos suelen ser apropiados para todo tipo de estudio de impactos. Por tanto, es necesario seleccionar el método adecuadamente de acuerdo a las necesidades específicas del estudio y al tipo de actividad que se desarrolla.

Una metodología para EIA, basada en el cálculo del balance de materia y energía, en la que se usan los inventarios de las entradas y las salidas de un sistema de producción, es el Análisis de Ciclo de Vida, reglamentada mediante las Normas ISO 14040 – 14044, de 2007 (INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN, 2007). Esta metodología está siendo usada con frecuencia para evaluar los impactos ambientales producidos por emisiones contaminantes al aire, al agua y al suelo.

Con relación a estudios previos se puede establecer que desde el año 2000, comienzan a reportarse trabajos en el marco de Análisis de Ciclo de Vida, para evaluar impactos ambientales de los sistemas de agua urbanos. Un primer trabajo publicado por Shulze (Alemania), en el cual realiza la comparación de diferentes métodos de análisis de impacto por ciclo de vida para ecotoxicidad acuática,

(SCHULZE, et al., 2000), seguido por (LUNDIN, et al., 2002) quien desarrolló un procedimiento de evaluación del ciclo de vida para sistemas de agua urbanos.

Trabajos más recientes como el de (BONTON, et al., 2011) (Canadá), quien desarrolla un Análisis de Ciclo de Vida comparativo de plantas de tratamiento de agua potable: una planta de tratamiento convencional y una planta de nanofiltración. Uno de los trabajos más recientes fue publicado por (SLAGSTAD, et al., 2013) (Noruega), en el que se presenta el Análisis de ciclo de vida de un sistema de agua potable y de aguas residuales en Trondheim, Noruega. Solo por mencionar algunas investigaciones que han sido relevantes para el desarrollo de esta tesis.

En el presente trabajo se aplicó la Metodología de Análisis de Ciclo de Vida al sistema de producción de agua potable de la ciudad de Bucaramanga. Este enfoque permitió determinar el impacto ambiental, por el uso de recursos naturales, energéticos y por las emisiones generadas, en el tratamiento de agua potable. Los resultados de este estudio permitirán evaluar y llevar a la práctica estrategias de mejora ambiental. En este análisis se tuvo en cuenta las etapas de extracción, procesamiento de materias primas, producción y bombeo del agua tratada.

El sistema de potabilización de agua del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga (AMB), cuenta con cuatro plantas de tratamiento tradicionales, que desarrollan procesos físico-químicos y químicos para el tratamiento de agua cruda, tales como coagulación – floculación, sedimentación, filtración y desinfección química. A través del proceso de potabilización del agua, la PTAP podría contribuir con el agotamiento de los recursos naturales, la liberación indirecta de contaminantes en el agua, la tierra y el aire, por medio del uso de productos químicos y el consumo de energía.

A la fecha no hay información disponible sobre estudios de ACV, para sistemas de potabilización de agua en Colombia. Por tal razón, este trabajo supone una novedad importante, por cuanto se permitirá evaluar los impactos potenciales al

medio ambiente, causados por esta actividad. Para la aplicación de la metodología se requiere el desarrollo de cuatro etapas fundamentales: Definición del objetivo, alcance y unidad funcional, Inventario de Ciclo de Vida (ICV), evaluación del impacto de ciclo de vida (EICV) e interpretación del Ciclo de Vida.

En este trabajo se aplicó el ACV para dos de las cuatro plantas de tratamiento del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga (AMB), por tanto se tendrán como casos de estudio las Plantas de Tratamiento de Bosconia y FLORIDABLANCA, dado el interés por parte de la Dirección de Planeación y Proyectos del AMB. Para el análisis de impactos ambientales se usó el enfoque por atributos, así como se realizó un análisis comparativo entre las etapas de operación de ambas plantas, sin incluir el gasto energético requerido en el sistema de bombeo para la distribución del agua hacia el consumidor, dado que una de ellas hace la distribución del agua tratada por gravedad.

Como unidad funcional fue seleccionado un metro cúbico de agua tratada (1 m^3), dado que en los estudios encontrados como referentes internacionales de esta temática, se adopta como unidad funcional única para todos los sistemas de agua potable.

Para la aplicación del ACV a cada uno de los escenarios, fue necesario recoger el inventario de los flujos de entrada (materia prima, energía) y de salida (emisiones, lodos), asociados a cada una de las etapas del sistema de potabilización del agua. Esta fase ha sido la que más esfuerzo y tiempo ha demandado, dado que a pesar de contar con el apoyo de algunos funcionarios del AMB, buena parte de la información debió ser recolectada de trabajos de grado previos, en los cuales se presentaban caracterizaciones de lodos, y consumos de energía, entre otros. La caracterización aguas arriba, con los contaminantes de los afluentes que suministran el recurso a las plantas, se ha tomado de informes técnicos publicados en la web por el AMB.

Para realizar el análisis de inventario se usó SimaPro, un software especializado, desarrollado por la empresa holandesa PRé Consultants, que permite realizar Análisis de Ciclo de Vida (ACV), mediante el uso de bases de datos de inventario propias (creadas por el usuario) y bibliográficas (Ecoinvent 3, ELCD, EU27, Swis Input-Output, USA Input-Output, U.S. Life Cycle Inventory Database, entre otras). Las bases de datos de SimaPro fueron desarrolladas en el contexto europeo y norteamericano, por tanto es necesario adaptarse a ellas. Sin embargo, varios procesos utilizados para el tratamiento del agua en Colombia, difieren del sistema internacional, esto puede limitar el análisis. Para el caso de la energía se usó una base de datos propia al contexto colombiano. Para el ACV, de los dos casos de estudio se usó la base de datos de inventario Ecoinvent 3, y la metodología de evaluación de impactos EDIP 2003, para evaluación de las siguientes categorías de impacto: Calentamiento Global, Formación de Ozono, Acidificación, Eutrofización Terrestre y Acuática, Toxicidad Humana y Ecotoxicidad del agua.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La ciudad de Bucaramanga y su área metropolitana que incluye los municipios de FLORIDABLANCA, Girón y Piedecuesta, cuenta en la actualidad, con una buena disponibilidad y calidad de agua potable, gracias al esfuerzo que hace el Acueducto Metropolitano de Bucaramanga (Plantas de Bosconia, Morrórico, La Flora y FLORIDABLANCA) para realizar un adecuado saneamiento, con el fin de garantizar la calidad de vida de sus habitantes.

Sin embargo, el deterioro que vienen presentando las fuentes hídricas que abastecen a Bucaramanga y su área Metropolitana, debido a las cargas contaminantes a la que son sometidas por las actividades agrícolas, y mineras de la región principalmente; ha ocasionado la pérdida de la calidad del agua de sus afluentes, afectando de forma significativa la disponibilidad de fuentes de agua potable de fácil acceso. Esta problemática ha obligado a que se implementen otros métodos para la conservación del recurso hídrico y una mayor preocupación por lograr una gestión integral del ciclo del agua urbano, tanto en su componente de potabilización como en lo relativo a saneamiento. No obstante, existe un impacto ambiental colateral asociado a las funciones tecnológicas de potabilización y de saneamiento de aguas.

Dadas estas circunstancias, se requiere conocer los posibles impactos asociados al sistema de potabilización de agua, llevado a cabo por el Acueducto Metropolitano de Bucaramanga, en las PTAP Bosconia y FLORIDABLANCA. Para este propósito se usó el enfoque metodológico del Análisis de Ciclo de Vida (ACV). Se pretende que los resultados obtenidos sean usados para proponer acciones que minimicen los impactos al medio ambiente, atribuidos a las diferentes etapas del proceso de potabilización.

2. JUSTIFICACIÓN

El sistema de tratamiento y provisión de agua potable puede funcionar de manera eficiente si en cada una de las etapas del proceso, se minimizan los impactos al medio ambiente y se maximizan los beneficios económicos y sociales de los habitantes de una región.

De acuerdo a la literatura revisada, se puede determinar que el uso de la herramienta metodológica ACV, puede usarse para generar información sobre los impactos ambientales de un sistema de tratamiento y provisión de agua potable (MOHAMED-ZINE, et al., 2013) (VINCE, et al., 2007). El ACV permite analizar y comparar varios procesos de un sistema a través de su contribución a los impactos ambientales globales. La definición de una unidad funcional estándar facilita la comparación de diferentes sistemas. Se recomienda adoptar una misma unidad funcional, generalmente 1 m³ de agua tratada, para todos los sistemas de tratamiento de agua potable.

Es posible analizar los impactos en las diferentes etapas del ciclo de vida: extracción, producción, transporte, uso y disposición final. A partir de las entradas y las salidas del sistema, el ACV permite evaluar impactos sobre el cambio climático, el agotamiento del recurso, la toxicidad, entre otros. Por lo anterior, este trabajo aplicó las etapas de ACV, en un sistema de tratamiento para producir agua potable en la ciudad de Bucaramanga.

3. OBJETIVOS

3.1. OBJETIVO GENERAL

- Aplicar el ACV en la evaluación ambiental de un sistema de producción de agua potable en la ciudad de Bucaramanga y su área metropolitana, con el fin de determinar los impactos ambientales generados en las diferentes etapas del proceso.

3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar la problemática ambiental de la operación en los acueductos del área metropolitana de Bucaramanga.
- Revisar a través del estado del arte, las aproximaciones metodológicas del ACV, en su aplicación al sistema de potabilización del agua.
- Implementar el ACV desde un enfoque por atributos de acuerdo a la familia de normas ISO14040, en un caso de estudio seleccionado, dentro de uno de los sistemas de potabilización disponibles en el área metropolitana de Bucaramanga.

4. ACV DE SISTEMAS DE AGUA POTABLE: ESTADO DEL ARTE

En esta sección se hace una recopilación de los principales trabajos realizados sobre Análisis de Ciclo de Vida, en sistemas de potabilización de agua a nivel internacional. No se encontraron referentes nacionales y por tal razón no se tratan en esta revisión. Esta exploración se realizó cronológicamente, teniendo en cuenta las metodologías usadas en cada investigación y los avances alcanzados en la temática de estudio comprendido entre los años 2000 y 2014.

Uno de los primeros trabajos realizados para analizar los impactos ambientales generados por un sistema de provisión de agua potable, fue reportado por Margareta Lundin en (2002) en Suecia. Este estudio desarrolló un procedimiento iterativo que combina resultados empíricos y un marco analítico basado en la metodología ACV, usado en dos casos de estudio particulares: dos sistemas de agua urbana en dos regiones diferentes, una desarrollada (Göteborg, Suecia) y otra en desarrollo (King William's Town, Sur África); que permitieron analizar los indicadores de sostenibilidad ambiental para cada estudio. Los resultados obtenidos, revelaron una deficiencia en la calidad de la información al igual que deficiencias en la infraestructura del sistema de tratamiento y distribución del agua, teniendo en cuenta la alta población en esta región, afectando considerablemente las condiciones de salud de sus habitantes.

Friedrich (2002), publicó un trabajo en el que utilizó el Análisis de Ciclo de Vida como una herramienta de gestión ambiental, considerando dos sistemas de producción de agua potable diferentes. El primero, un sistema convencional que involucra procesos de pre-ozonización, adición de químicos, floculación, sedimentación, filtración, ozonización, cloración y almacenamiento; y el segundo, basado en el uso de una tecnología Sur Africana de filtración por membrana, seguido por procesos de pre-filtración, cloración y almacenamiento.

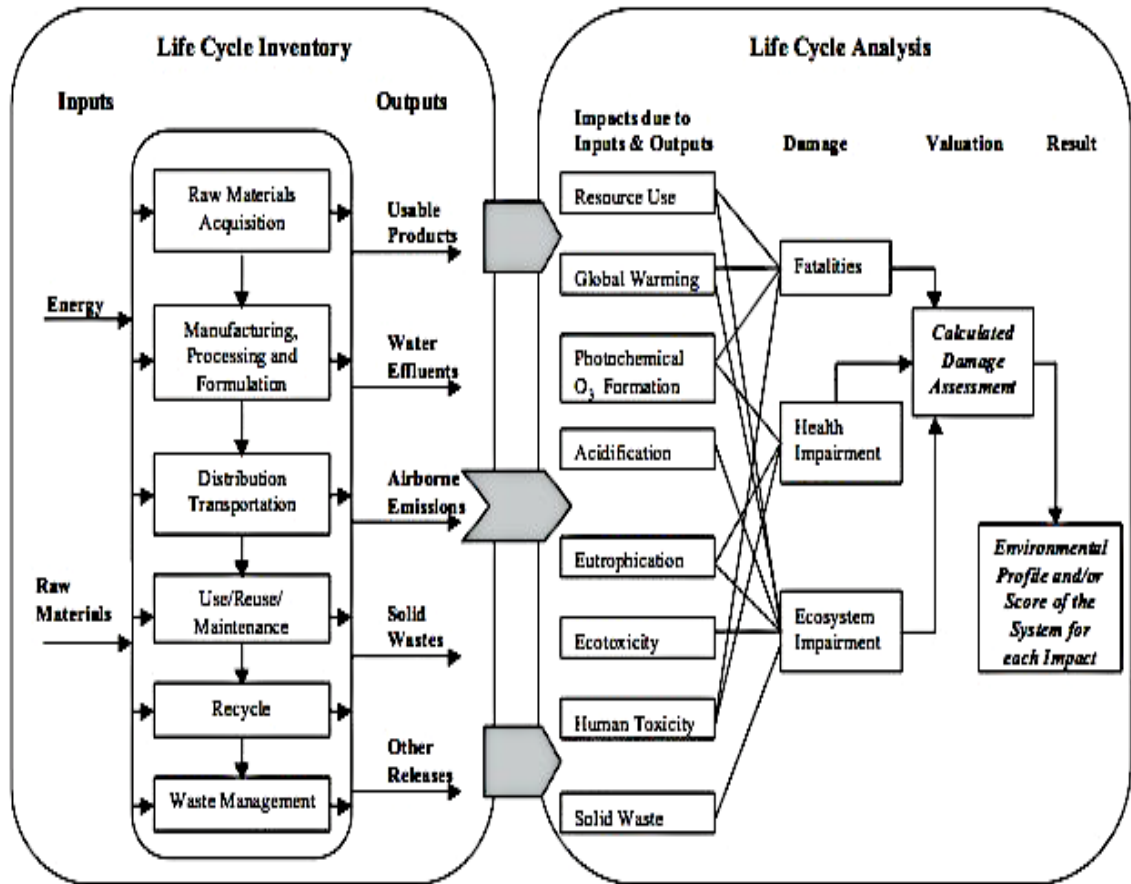
De acuerdo a la metodología ACV, se enumeran las entradas y salidas (materias primas y energía) y se cuantifican los productos, subproductos y emisiones al aire, agua y suelo) para los dos sistemas. Este inventario genera diferentes impactos al medio ambiente según el tipo de categoría (calentamiento global, agotamiento de la capa de ozono por emisión de gases de efecto invernadero, formación de smog, acidificación, eutrofización por enriquecimiento de nutrientes, eco-toxicidad y toxicidad humana).

Se evaluaron los impactos en cada escenario y de acuerdo a los resultados obtenidos en el análisis para ambos métodos de producción de agua potable, el ciclo de vida es dominado por las etapas de operación. Estas etapas tienen el más alto consumo de materia y energía, y la más alta puntuación en las categorías de impacto ambiental evaluadas. El proceso que produce mayor carga ambiental en la producción de agua potable, es el consumo de electricidad (FRIEDRICH, 2002), A continuación se presenta un esquema del Análisis de Ciclo de Vida, realizado en este estudio ver **Figura 1**.

Otro referente importante fue el estudio realizado por Lundie en 2004, en el cual se aplica exitosamente la metodología de Análisis de Ciclo de Vida para la planeación estratégica del sistema de producción de agua potable en Sídney (Australia), con el fin de tomar decisiones metodológicas sobre el nivel de detalle requerido en cada una de las etapas del proceso.

El sistema caso de estudio es el proveedor del servicio de agua más grande de Australia, por lo tanto su modelado resulta ser complejo, razón por la que se adopta un modelo de segmentación, con el fin de facilitar el análisis. El autor realiza un estudio prospectivo en ACV, con el propósito de examinar los posibles impactos ambientales de las operaciones totales de Agua de Sídney hasta el año 2021 (LUNDIE, et al., 2004).

Figura 1: Una Visión del Análisis de Ciclo de Vida



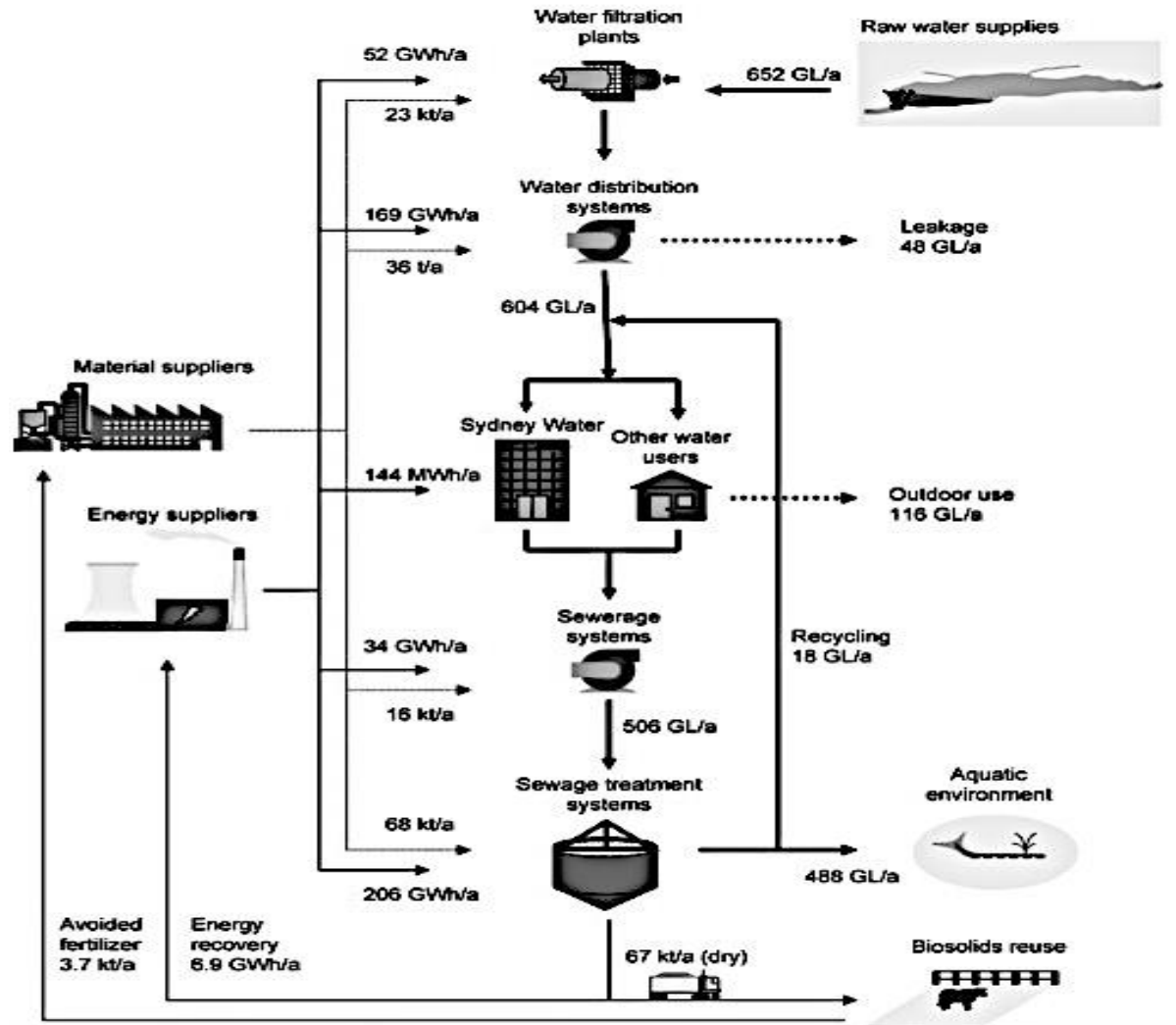
Fuente: Friedrich E. (2002).

Lundie logró crear un modelo de ACV para el sistema integrado de agua urbana (potable y residual), basado en el marco legal de la norma ISO 14040. La metodología fue aplicada para mostrar cuáles aspectos del proceso generan mayores cargas ambientales y comparar con futuros escenarios alternativos, para poder pensar en una provisión del servicio de agua potable sustentable. El principal objetivo de la investigación fue tratar de establecer el escenario que mejore el desempeño ambiental en todas las categorías de impacto.

En este caso, el mejor escenario será aquel en el que se tenga aumento de la demanda del servicio, mejor eficiencia energética, generación limpia y

recuperación de energía (LUNDIE, et al., 2004). El siguiente es un esquema que representa un diagrama de flujo simplificado del sistema de producción de agua potable de Sídney, ver **Figura 2**.

Figura 2. Diagrama de flujo simplificado del Sistema de Producción de Agua Potable en Sídney (Australia)



Fuente: Lundie, S., et al. (2004).

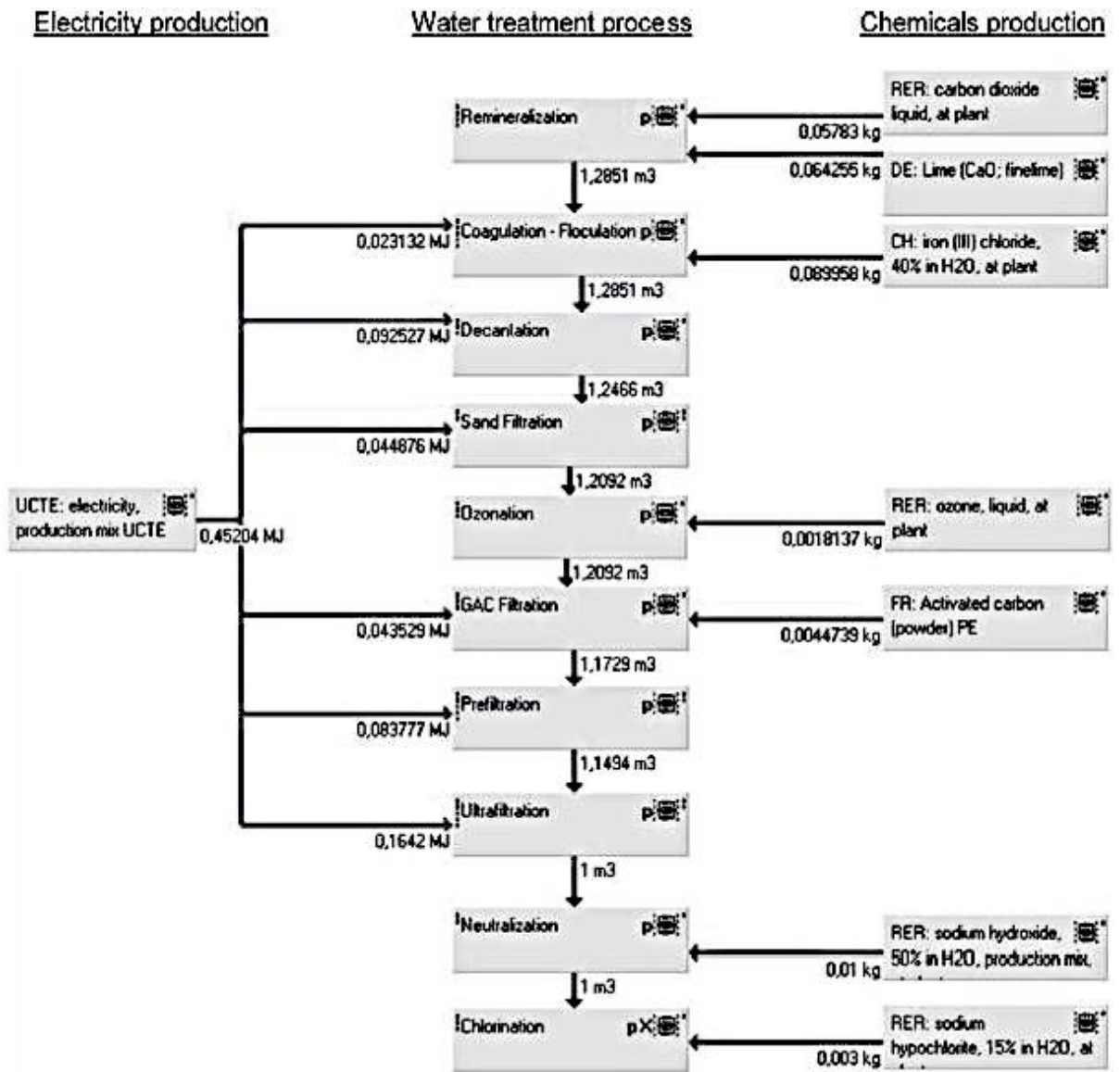
En 2008, Vince desarrolló una herramienta de evaluación de impacto ambiental para la producción de agua potable en la ciudad de París (Francia), en la que utiliza la metodología de ACV, de acuerdo a la norma ISO 14040 y usando

un software llamado Gabi 4.2, desarrollado por PE Consulting Group [PE, GABI, SOFTWARE: Documentation manual, PE Europe GmbH, 2004]. El autor usó la base de datos de Ecoinvent para los procesos industriales y químicos, y para la producción de electricidad. Los impactos fueron analizados con IMPACT 2002+, y los estudiados fueron: Calentamiento global, Extracción mineral, consumo de energía no renovable, radiación ionizante, efectos respiratorios, agotamiento de la capa de ozono, oxidación fotoquímica, y nitrificación y acidificación terrestre.

El flujo de referencia es la producción de 1 m³ de agua potable con una calidad mínima, apta para el consumo humano establecida por la CEE (Comunidad Económica Europea). En el estudio se consideraron tres sistemas frontera: Análisis en los procesos del tratamiento del agua, análisis en la producción de agua potable y análisis en el suministro de agua potable. En la **Figura 3**, se presenta el diagrama del proceso de tratamiento de agua, para la aplicación de la metodología de ACV (VINCE, et al., 2007).

De acuerdo a los resultados obtenidos, visualizados en el diagrama de puntuación única, se puede decir que en el proceso de tratamiento del agua, las etapas que acarrear la más alta carga ambiental son la adición de coagulantes (más de 30% para todos los impactos), el consumo de electricidad para la operación de la proceso de tratamiento del agua (25% para la mayoría de los impactos, así como también la producción de químicos para la re-mineralización (20% para la mayoría de los impactos). También la producción de ozono y de carbono activado granular, generan impactos significativos con una contribución del 10% para la mayoría de los impactos.

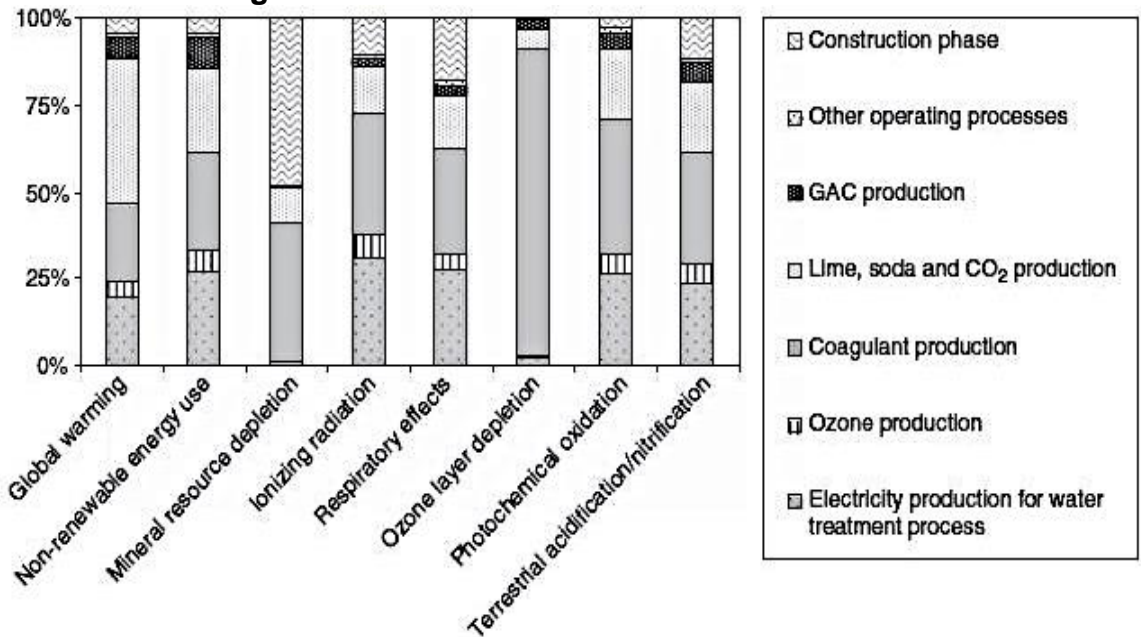
Figura 3. Diagrama del proceso de tratamiento de agua potable para el ACV



Fuente: Vince F., et al. (2008).

La siguiente gráfica, representa el diagrama de puntuación única, para el porcentaje de impactos producidos en cada etapa del proceso para la producción de agua potable (VINCE, et al., 2007).

Figura 4. Diagrama de Puntuación Única, para determinar el porcentaje de los impactos ambientales producidos en cada fase del proceso de potabilización del agua



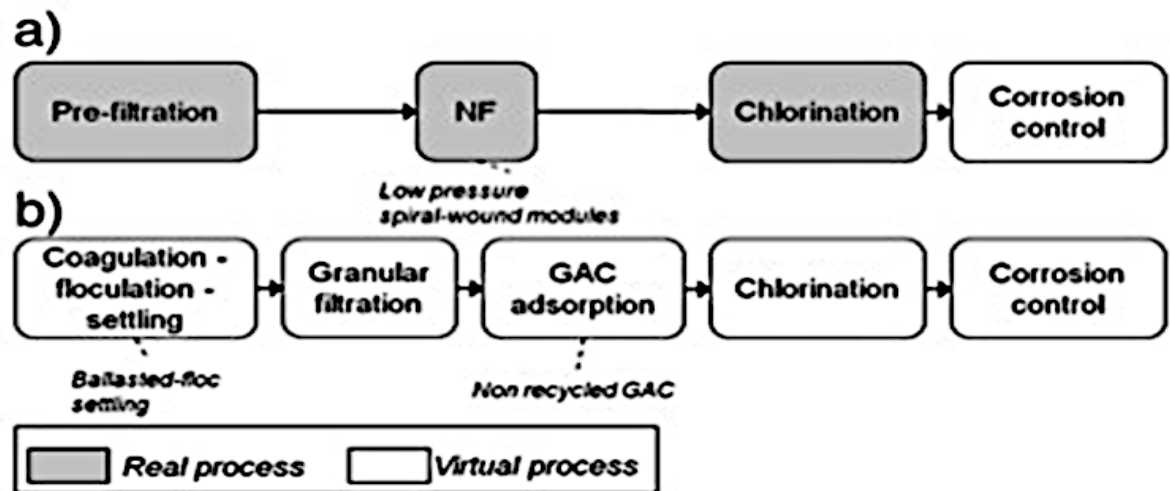
Fuente: Vince F., et al. (2008).

El consumo de electricidad en el proceso de tratamiento del agua es debido principalmente a la ultrafiltración y a la alta velocidad de decantación y a la producción de ozono. Las grandes dosis de coagulante, lima, CO₂ y soda que se requieren para mejorar la calidad del agua, son las responsables de más del 50% de los impactos generados durante el proceso, esto se debe a la energía requerida para la producción de químicos y a los gases emitidos en esta etapa (VINCE, et al., 2007).

Un ACV comparativo de dos plantas de tratamiento de agua fue realizado en 2012, por Bonton, de la Universidad Laval, en Quebec (Canadá), permitió evaluar los diferentes impactos producidos por cada una de ellas, utilizando el software Simapro, versión 7.3. Este software fue seleccionado, gracias a que incluye varias bases de datos y métodos de análisis de impacto, y, una interface gráfica que facilita el análisis e interpretación de los resultados. Las dos plantas que fueron

utilizadas para el estudio fueron: una planta convencional mejorada (proceso virtual) y una planta de nano-filtración, ubicada al norte de Quebec, la cual se encuentra operando por más de 10 años (proceso real). Para esta última, se tuvo en cuenta las fases de operación y de construcción de la misma (BONTON, et al., 2011). La planta convencional mejorada fue diseñada con fines comparativos. En el siguiente diagrama se presentan los esquemas de las fases de operación de cada una de ellas:

Figura 5. Representación esquemática de dos sistemas de tratamiento de agua; a) Planta de nanofiltración; b) Planta convencional virtual



Fuente: Bonton A., et al. (2012).

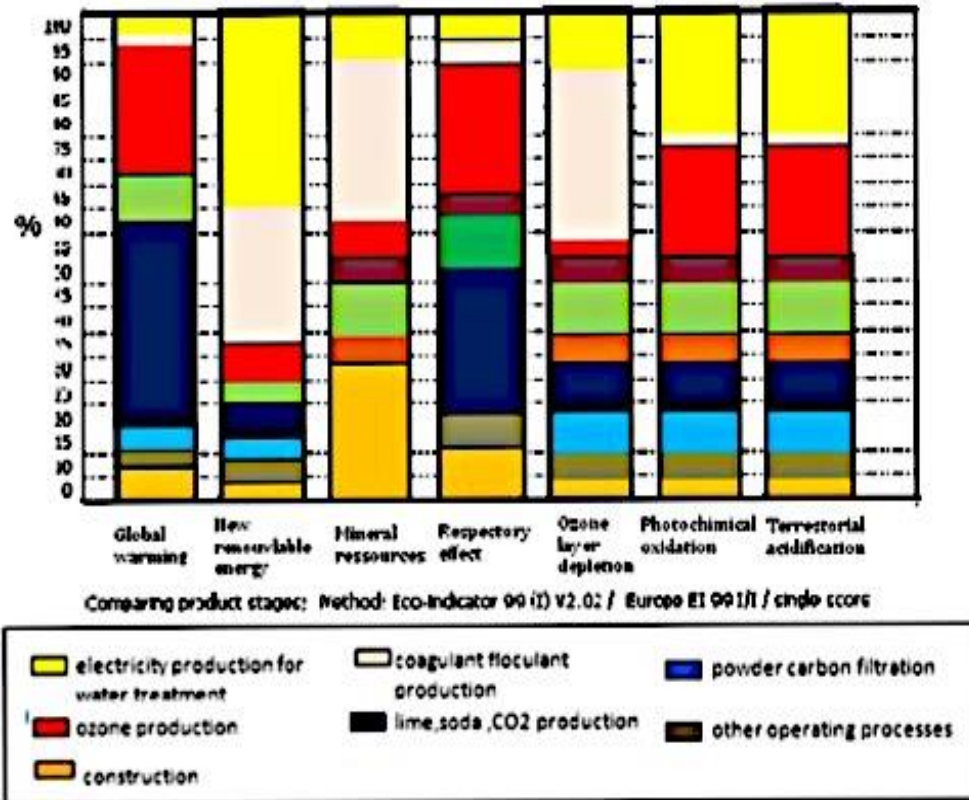
Para cada uno de los casos de estudio, se determinó el inventario de la energía, material y químico. La unidad funcional es la producción de 1 m³ de agua potable, todos los procesos inventariados fueron normalizados con respecto a esta unidad funcional. La base de datos usada para el análisis de entradas y salidas, ha sido Ecoinvent 2.0. El ACV realizado incluye las fases de construcción, operación y desmantelamiento de cada planta. Los resultados del análisis revelan que la fase de operación es la que genera los más altos impactos ambientales negativos. También se pudo evidenciar que la planta que causa mayores daños al ambiente es la convencional virtual, comparada con la planta real del sistema de

nanofiltración. Esto se debe al uso de carbón activado granular, que libera contaminantes al aire durante el funcionamiento del horno. También el uso de coagulante a base de aluminio, en la planta convencional, aporta mayor daño ambiental, al igual que el uso de productos químicos usados para evitar la corrosión de las redes de distribución, ponen en desventaja a la planta convencional virtual. En general, el estudio reveló diferentes impactos de las dos plantas, llamando la atención sobre la importancia de la elección de los productos químicos de tratamiento de agua y la energía usada en los procesos (BONTON, et al., 2011).

Un trabajo más reciente desarrollado por Mohaned-Zine en 2013, evaluó los impactos ambientales producidos por una planta de tratamiento de agua potable en Argelia, aplicando la metodología del ACV. Considera los procesos de tratamiento como son la sedimentación, la coagulación, la filtración y la desinfección.

Para aplicar la metodología se requiere la identificación y cuantificación de los materiales y la energía utilizados en todas las etapas del proceso. El software utilizado fue Simapro, versión 6, el cual se alimenta con toda la información del proceso de tratamiento de agua. Los resultados del análisis muestran que la preparación del coagulante, genera el mayor porcentaje de las cargas ambientales (30% para todos los impactos). En la preparación del sulfato de aluminio, se consumen recursos minerales y se producen emisiones de tetraclorometano, que deteriora la capa de ozono; lo cual genera cargas ambientales negativas (MOHAMED-ZINE, et al., 2013). También el uso de pequeñas cantidades de ozono y carbono activado, generan una contribución significativa del 10%, en la mayoría de las categorías de impacto, como se observa en la **Figura 6**.

Figura 6. Contribución a las categorías de impacto, en las diferentes etapas del proceso de tratamiento de agua potable



Fuente: Mohamed-Zine MB., et al. (2013).

La energía utilizada en la producción de bombas para la operación de la planta y para la ejecución de los procesos unitarios (coagulación, filtración y decantación), muestra un alto impacto ambiental, sobre la categoría de Cambio Climático. Así mismo, el uso de productos químicos como los coagulantes y los oxidantes, son la principal causa de los impactos sobre el deterioro de la capa de ozono, como se observa en el diagrama de puntuación única, de la **Figura 6**

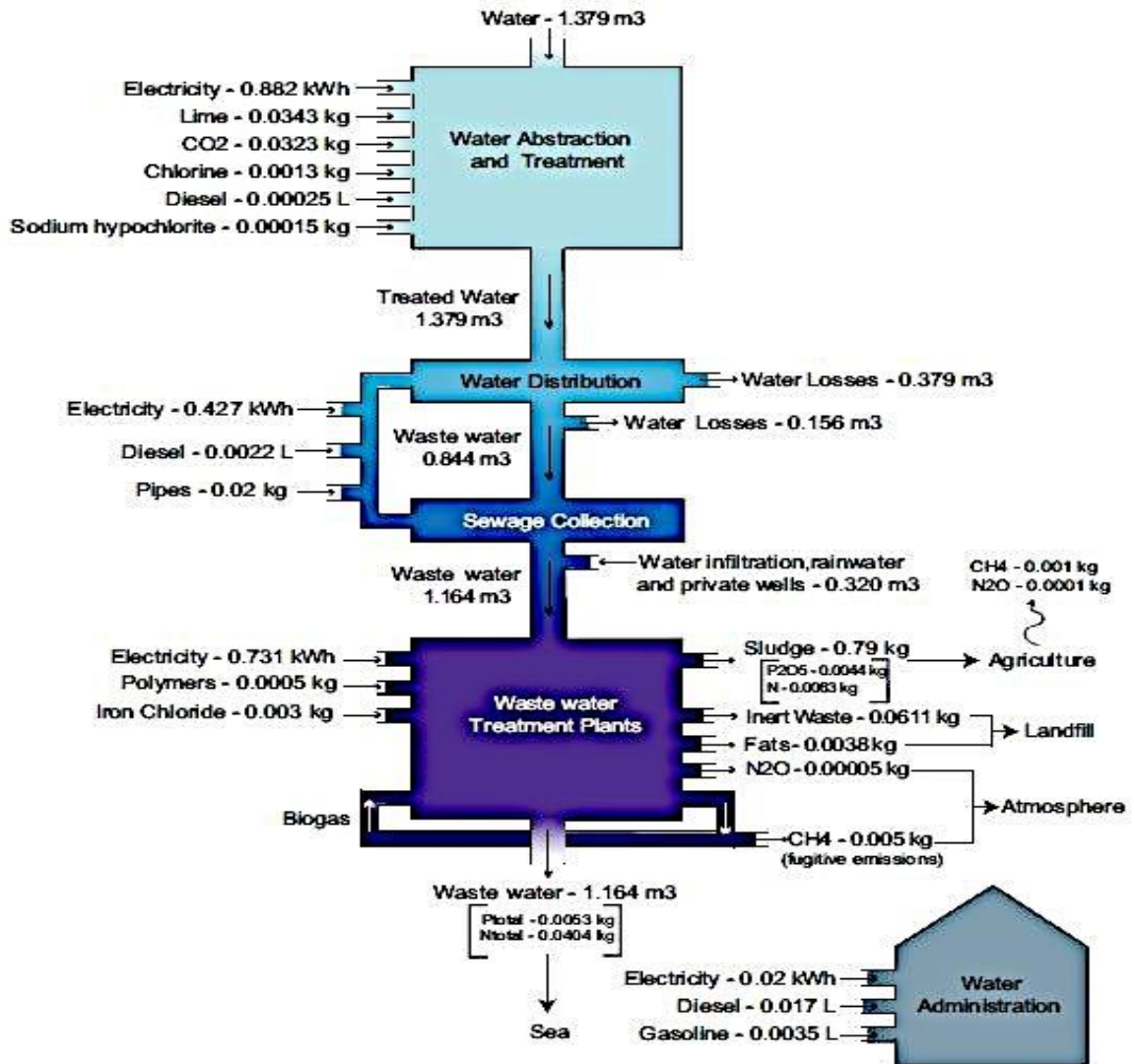
. Las altas emisiones de gases de efecto invernadero producidas por el consumo de producto químico generan un impacto ambiental alto (MOHAMED-ZINE, et al., 2013).

Otro estudio importante, que debe tenerse en cuenta en este estado del arte, es el realizado por Diogo Lemos en 2013, en el cual analiza los impactos ambientales derivados del sistema de agua urbana del municipio de Aveiro (Portugal), utilizando la metodología de Análisis de Ciclo de Vida (ACV), con el fin de identificar las etapas y los procesos que generan los mayores impactos ambientales, de esto modo proponer nuevos escenarios para mejorar los procesos.

Las etapas del sistema de agua urbana, tenidas en cuenta para el análisis fueron: captura, tratamiento y distribución del agua potable. Por otra parte también, la recolección, tratamiento y eliminación de aguas residuales, y el manejo del recurso hídrico. El siguiente diagrama representa las distintas etapas del sistema de agua urbana, con sus respectivas entradas y salidas (LEMOS, et al., 2013).

Los resultados del análisis, determinan que la etapa de extracción y de tratamiento de agua es la más importante para la mayoría de las categorías de impacto, porque la mayor parte del consumo de electricidad ocurrió durante esta etapa.

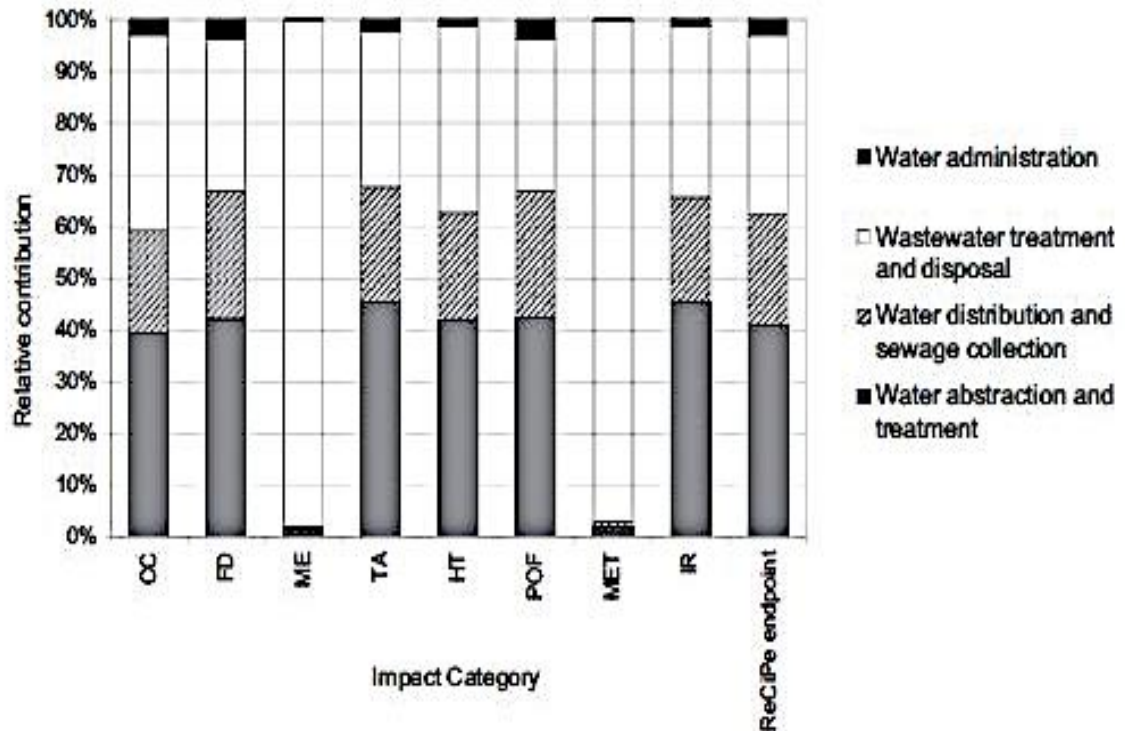
Figura 7. Fronteras, entradas y salidas del sistema de agua urbana, para el municipio de Aveiro (Portugal) – Unidad de referencia (1 m³ de agua potable)



Fuente: Lemos D., et al., (2013).

Para la eutrofización y ecotoxicidad marina, la etapa de tratamiento de aguas residuales y disposición lleva a la casi totalidad de la carga debido a la liberación de nitrógeno y fósforo en el mar, como se muestra en el diagrama de contribución de impactos presentado a continuación.

Figura 8. Diagrama de porcentajes de contribución de impactos en cada etapa del sistema, para cada categoría de impacto estudiada.



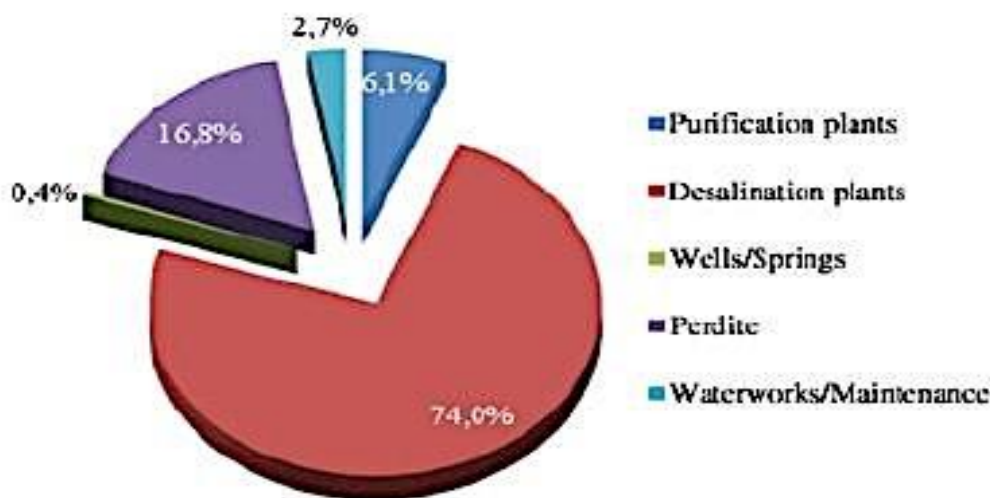
Fuente: Lemos D., et al., (2013).

El consumo de electricidad y el vertimiento de nutrientes al mar (eutrofización) han sido identificados como los principales aportantes a los impactos ambientales. Luego de analizar estos resultados, se propuso nuevos escenarios de mejora, enfocados al cambio en las cargas por vertimientos contaminantes al mar, con el fin de buscar la sostenibilidad ambiental en el sistema de agua urbana (LEMOS, et al., 2013).

Un trabajo similar, se realizó en Sicilia (Italia) por Del Borghi en 2013, en el cual se hizo el análisis de ciclo de vida para el sistema de suministro de agua potable de esta ciudad. Las etapas del sistema que se consideraron fueron: recolección, tratamiento y distribución de agua potable a través de la red de distribución regional. La fase de uso del agua no se tuvo en cuenta. El patrón metodológico estuvo de

acuerdo con los requisitos de una etiqueta ambiental en el marco de la normatividad de la EPD (Environmental Product Declaration). El análisis de ciclo de vida, muestra los efectos de los impactos generados en los diferentes procesos del sistema de agua potable para esta región, es decir, las plantas de purificación y desalinización, teniendo en cuenta las pérdidas de agua durante su abastecimiento, el consumo eléctrico de los sistemas de obras hidráulicas e impactos de mantenimiento de la red (DEL BORGHI, et al., 2013).

Figura 9. Porcentajes de contribución de impactos ambientales en cada uno de los procesos tenidos en cuenta para el sistema de agua potable, en la ciudad de Sicilia (Italia)



Fuente: Del Borghi A., et al. (2013).

Los resultados del ACV, muestran que con relación calentamiento global (GWP), el impacto de las plantas de purificación representa una carga del 6-7% del total, mientras que la desalación es del 74%. Las pérdidas de agua en las obras hidráulicas muestran un impacto de 15 a 17%; la contribución debido al consumo eléctrico de los sistemas de abastecimiento de agua y de actividades de mantenimiento de la planta es de 3%. Las plantas de desalinización generan la

mayor contribución en todas las categorías de impacto consideradas (DEL BORGHI, et al., 2013).

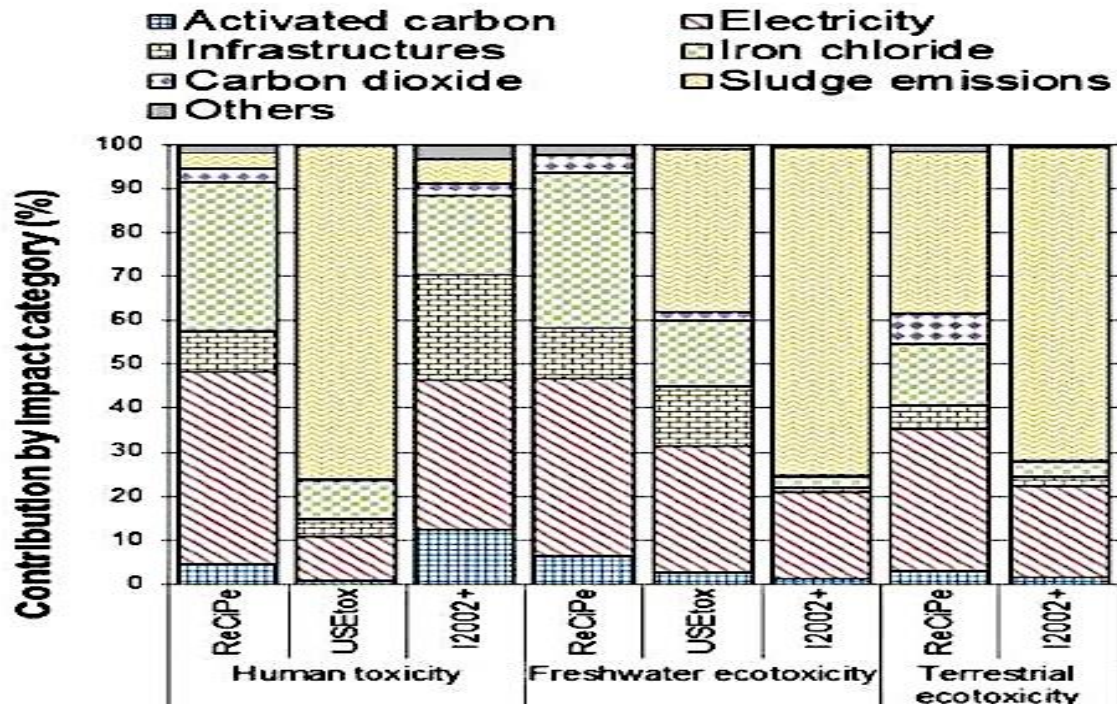
En otro estudio reportado, es el de María José Amores, en la ciudad de Tarragona (España), en el año 2013, en el que también se usó la metodología de ACV, para hacer un análisis de impactos ambientales, en todas las etapas del ciclo de agua urbana (extracción de agua, tratamiento de agua para su potabilización, bombeo, red de distribución, alcantarillado y tratamiento de aguas residuales). Se proponen tres posibles escenarios para mejorar el desempeño ambiental mediante la reducción del alto índice de escasez, como consecuencia de la creciente demanda y la limitación del recurso. Los escenarios propuestos fueron: el sistema convencional de agua potable (escenario I), reuso de agua (escenario II) y el uso de plantas de desalinización para abastecer de agua durante una sequía (escenario III). Se realizó un análisis de inventario con datos de la operación local.

Los resultados obtenidos en el análisis mostraron que, para el escenario I, las contribuciones más altas de impacto ambiental corresponden en un 35,2% a la red de distribución, 20,5% por el bombeo, y el 13,8% generado por la planta de tratamiento de aguas residuales, afectando la categoría de impacto correspondiente al Calentamiento Global. Estas contribuciones se deben principalmente al alto consumo de energía en cada una de los procesos. En el escenario II, no hay una variación significativa en la contribución de impactos ambientales, debido a las cargas ambientales aportadas en su tratamiento. Un aspecto favorable en este escenario es el ahorro en el consumo de agua dulce. En el escenario (escenario III), los resultados revelados por el ACV, muestran un incremento en el porcentaje de contribución en todas las categorías de impacto evaluadas. Con respecto al escenario II, se obtuvo un incremento del 18% en oxidación fotoquímica, del 21% en eutrofización por vertimiento de nutrientes, del 30% en el deterioro de la capa de ozono y en ecotoxicidad, del 36% de agotamiento de

recursos abióticos y demanda energética, del 38% calentamiento global y el 42% en acidificación (AMORES, et al., 2013).

Para finalizar este acercamiento a la literatura, relacionada con la aplicación de la metodología ACV, aplicada a los sistemas de tratamiento de agua potable, es importante referenciar un trabajo reciente, desarrollado en Francia por Igos E., en 2014, dado que en la mayoría de estudio de ACV para los sistemas de producción de agua potable, no muestran con claridad la contribución al impacto ambiental, de los procesos unitarios relacionados con la infraestructura de la planta y con el tratamiento de lodos. Los resultados del análisis muestran en el diagrama de puntuación única, que el mayor impacto ambiental es producido por el consumo de combustibles fósiles, directamente relacionados con el consumo de electricidad y la producción de carbón activado. Estos consumos se concentran principalmente en la unidad de procesos sedimentación y distribución (IGOS, et al., 2014). La **Figura 10** muestra los porcentajes de contribución a los impactos ambientales.

Figura 10. Porcentajes de contribución a los impactos ambientales sobre la toxicidad humana, ecotoxicidad del agua, y ecotoxicidad terrestre, en los diferentes procesos del sistema de agua urbana, usando los métodos ReCiPe, USEtox e I2002+.



Fuente: Igos E. (2014).

5. FUNDAMENTOS DEL ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA

El Análisis de Ciclo de Vida (ACV) es una metodología de evaluación de impacto ambiental, con la cual es posible calcular el impacto al medio ambiente de procesos o productos a lo largo de su ciclo de vida. Para desarrollarla se requiere definir el objetivo y el alcance del estudio, realizar un análisis del inventario, y evaluar el impacto ambiental generado, para finalmente hacer una interpretación de los resultados, que se espera sea de interés para las instituciones involucradas y para la autoridad ambiental, con el fin de mejorar procesos y así disminuir las cargas ambientales.

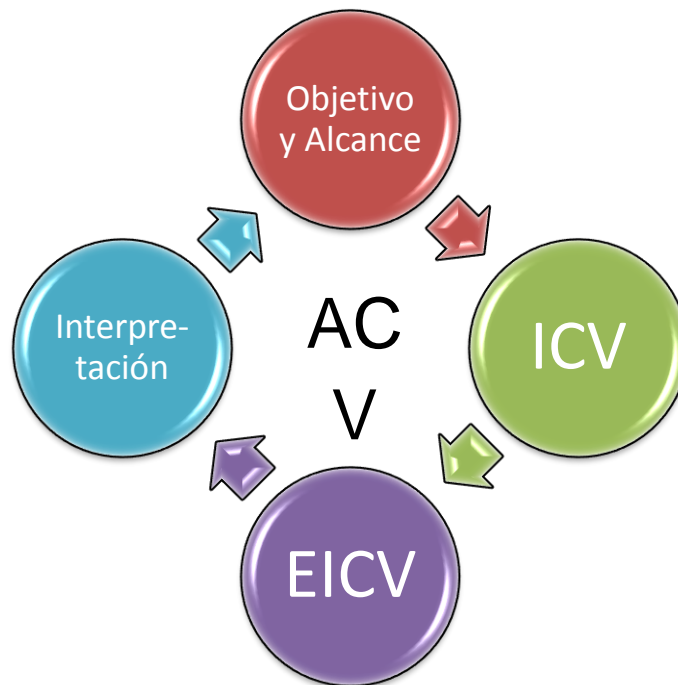
La metodología de ACV, es una de las herramientas más usadas hoy en día para evaluar impacto ambiental. Es posible aplicar esta metodología a lo largo de todo el ciclo de vida de un producto o proceso, desde la obtención de la materia prima, pasando por la producción, uso y aprovechamiento, tratamiento final, reciclaje, hasta su disposición final. Esto es conocido como “análisis de la cuna a la tumba”. Esta herramienta también permite evaluar los impactos ambientales entre algunas partes del proceso, por lo cual también es posible realizar análisis de la “cuna a la puerta”, o de la “puerta a la puerta”, etc.

El ACV permite obtener la valoración de los impactos ambientales, mediante el levantamiento del inventario de los recursos consumidos, la composición y cantidad de contaminantes generados en la obtención de un producto o proceso. La herramienta permite agrupar los impactos en un número finito de categorías, que facilita la gestión medioambiental en los sistemas de producción, para optimizar los recursos y minimizar los impactos negativos al medio ambiente.

Como se mencionó anteriormente, el ACV comprende de cuatro etapas: Definición del Alcance y Objetivos, Análisis de Inventario de ciclo de vida (ICV), Evaluación del Impacto de Ciclo de Vida (EICV) y la Interpretación de Resultados (INSTITUTO

COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN, 2007). En la **Figura 11**, se muestra un diagrama con las etapas del ACV y sus respectivas relaciones.

Figura 11. Etapas del Análisis de Ciclo de Vida



Fuente: Normas ISO 14040 de 2006

5.1. Etapas del Análisis de Ciclo de Vida

5.1.1. Definición del Objetivo y Alcance. En esta primera fase, se debe establecer con claridad los objetivos globales del estudio, así como los límites del sistema, lo que permite determinar qué procesos unitarios deben incluirse dentro del ACV.

La determinación del alcance, permite definir las funciones del sistema de estudio. En esta parte se define la unidad funcional, que describe la función principal del sistema a analizar. A su vez la definición de la unidad funcional, permite cuantificar las funciones identificadas del producto. El fin principal de la unidad funcional, es servir de referencia para normalizar los datos de entrada y de salida.

5.1.2. Análisis de Inventario (ICV). Esta etapa corresponde al levantamiento del inventario del sistema de producción. Se debe obtener toda la información cuantitativa de la entrada y salida de la materia y la energía, asociada a cada unidad de proceso y expresarla en función de la unidad funcional seleccionada en la etapa anterior. Dentro del inventario debe incluirse consumo de recursos naturales y energéticos, así como las emisiones de gases contaminantes, residuos sólidos, radiaciones, consumos de químicos, etc. A continuación se presenta el esquema de análisis de inventario, para la metodología de ACV:

Figura 12. Esquema del Análisis de Inventario



Fuente: Normas ISO 14040 de 2006

5.1.3. Evaluación de Impacto (EICV). Esta etapa tiene como propósito evaluar la magnitud de los impactos ambientales, utilizando los resultados del inventario. En esta fase se relacionan los datos del inventario con las categorías de impacto, de acuerdo al objetivo y alcance del estudio definido en la primera fase (GARRAÍN

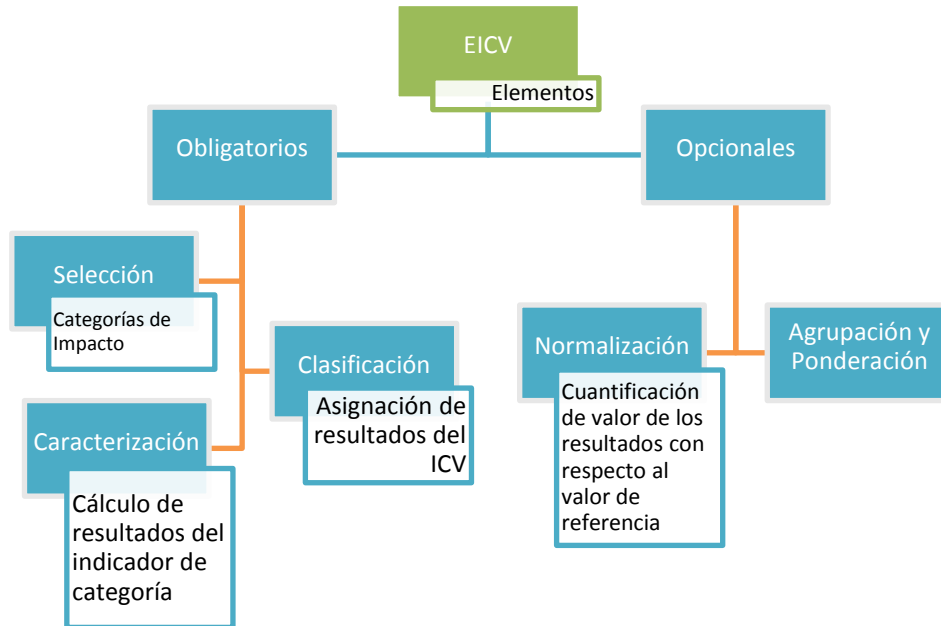
CORDERO, 2009). Para la EICV, es necesario desarrollar tres elementos que son obligatorios e indispensables para la evaluación, que son:

- **Selección:** En esta parte seleccionan las Categorías de Impacto y los Indicadores de Categorías.

- **Clasificación:** En la clasificación se asignan los datos de inventario a cada categoría de impacto según el efecto. La categoría de impacto es una clase que representa las consecuencias generadas en un sistema de producción o en un proceso.

- **Caracterización:** En esta fase se realiza el cálculo de los resultados de los indicadores de categorías asociados a los datos de inventario. Los parámetros de inventario se adicionan dentro de la categoría de impacto a la que contribuyen. Para la caracterización se selecciona el contaminante más representativo, que contribuye en mayor proporción a un impacto, expresando el resto en función de éste.

Figura 13. Elementos de la Evaluación de Impactos (EICV). Normas ISO 14040 de 2006



Las categorías de impacto a tener en cuenta en el ACV, según la Sociedad de Toxicología Medioambiental y Química (SETAC, 1993), se clasifican en: Consumo de Recursos Naturales, Impactos al Ecosistema, y Daños a la Salud. A su vez las categorías de impacto también pueden clasificarse según el tipo de impacto que genera, en Globales y Regionales o Locales.

Las Categorías de Impacto que se evalúan en el ACV, son Consumo de Recursos, Calentamiento Global, Deterioro de la Capa de Ozono, Toxicidad Humana, Ecotoxicidad, Acidificación, Eutrofización, Formación de Oxidantes Fotoquímicos, Uso del suelo, Ruido, Olores, Residuos y Conservación de Recursos y especies naturales.

Dentro de la Evaluación de Impactos hay una relación de elementos opcionales que puede ser desarrollado, dependiendo del alcance y los objetivos del ACV. Según la normatividad ISO 14044 de 2006, estos elementos son (INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN, 2007):

- **Normalización:** Es la relación de la magnitud cuantificada para una categoría de impacto, respecto a un valor de referencia que puede ser espacial o temporal.

- **Agrupación:** Consiste en la clasificación de las categorías de impacto basadas en juicios de valor. Normalmente esta clasificación se hace jerárquicamente, de acuerdo a su prioridad.

- **Ponderación:** Consiste en otorgar un peso relativo a las categorías de impacto, para después sumarlos y obtener el total del índice ambiental global del sistema de estudio.

5.1.4. Interpretación de Resultados. Esta es la fase final de ACV, que permite determinar en qué etapa del ciclo de vida o del proceso se genera las principales cargas o impactos ambientales negativos, para conocer que etapas o procesos representan mayor riesgo para el medio ambiente. En el caso en que el ACV sea comparativo, esta fase permite evaluar cuál es el producto o proceso que presenta mejor comportamiento. Los resultados obtenidos en esta etapa deberán ser coherentes con el objeto y el alcance de estudio, y permiten determinar las limitaciones del proceso productivo, así como ofrece la oportunidad de formular o generar planteamientos de posibles mejoras en el sistema productivo. (GARRAÍN CORDERO, 2009).

6. DESARROLLO METODOLÓGICO

6.1. Descripción General del Sistema de Potabilización en el Área Metropolitana de Bucaramanga

El Acueducto Metropolitano de Bucaramanga (AMB) es una empresa del estado, de naturaleza jurídica, constituida por escritura pública 500 del 29 de abril de 1966, con sede principal ubicada en la Diagonal 32 # 30^a-51 de Bucaramanga, Santander, Colombia. El AMB presta el servicio de producción y distribución de agua potable a las ciudades de Bucaramanga, Girón y FLORIDABLANCA, así como servicios de alcantarillado y saneamiento básico.

La infraestructura general con la que cuenta el AMB para el desarrollo de sus objetivos es:

- Cuatro plantas tratamiento (Bosconia, La Flora, Morrорico y FLORIDABLANCA)
- 37 tanques para almacenamiento de agua
- Un total de 1208 Km de tubería en redes de distribución.
- Un total de 11057 hectáreas de bosques propios.

El sistema actual del acueducto del Área Metropolitana de Bucaramanga, está conformado por tres sistemas de abastecimiento independientes: Sistema Rio Suratá (abastece PTAP Bosconia), Sistema Rio Tona (abastece PTAP Morrорico y La Flora) y Sistema Rio Frio (abastece PTAP FLORIDABLANCA), con una capacidad de tratamiento de 2000, 1400 y 600 litros por segundo respectivamente. La primera fuente maneja un sistema de distribución por bombeo y las dos últimas fuentes corresponden a sistemas por gravedad. Estos tres sistemas presentan interconexión a nivel de redes de distribución, tanques de almacenamiento y

compensación operados de manera sistemática a través del sistema SCADA, cuyo funcionamiento permite manejar distribución sectorizada y flexibilizar el abastecimiento en caso de salida de operación de alguno de los sistemas.

Figura 14. Fuentes hídricas de abastecimiento en Bucaramanga



Fuente: AMB

A continuación se presenta una descripción de los dos sistemas Río Suratá y Río Frio, los cuales son de especial interés para el desarrollo de este trabajo.

6.1.1. SISTEMA RÍO SURATÁ

- **Captación:**

Se capta el agua mediante bocatoma una estructura en concreto, tipo fondo, con un caudal de diseño de 2000 l/s, conformado por 3 compuertas graduables, que operan según al caudal programado en la planta, su aducción es mediante estructura en concreto de canal abierto y tubería en acero con diámetro de 48" la cual opera a gravedad y 2 desarenadores que funcionan de manera independiente con un caudal de diseño de 2000 l/s.

- **Planta de Tratamiento de Agua Potable – PTAP Bosconia**

La PTAP Bosconia está localizada en la vía que conduce de Bucaramanga al municipio de Matanza, diseñada con una capacidad de 2000 l/s de tipo convencional, conformado por procesos de pre-dosificación de químicos para coagulación, pre-sedimentación, canaleta Parshall, mezcla rápida, floculación mecánica, sedimentación, filtración, desinfección con cloro gaseoso y almacenamiento de 10000 m³ de capacidad. Esta planta cuenta con un sistema propio de Bombeo para distribución.

6.1.2. SISTEMA RÍO FRIO

- **Captación:**

Se capta el agua mediante estructura en concreto que conforma la bocatoma construida de tipo lateral con un caudal de diseño de 600 l/s, la aducción se realiza mediante canal abierto en concreto y tubería de concreto American Pipe, dos de 16” y una de 14”, con un caudal de diseño de 600 l/s y tres desarenadores con un caudal de diseño de 700 l/s.

- **Planta de Tratamiento de Agua Potable – PTAP FLORIDABLANCA:**

La PTAP FLORIDABLANCA está localizada en la zona suroriental del Área Metropolitana de Bucaramanga, en la parte alta de los barrios Bucarica y Caracolí del municipio de FLORIDABLANCA, a una altura media de 1042 m sobre el nivel del mar.

El sistema de potabilización se compone por dos plantas que funcionan de forma independiente, las cuales cuentan con sistema de bombas para dosificación de

sulfato, dentro de sus componentes estructurales se encuentra una canaleta Parshall, mezcla rápida, floculación hidráulica y mecánica, sedimentación, filtración, dos tanques de almacenamiento de coagulante y dos tanques de almacenamiento de agua tratada con capacidad de 1600 m³ y un tercero de 2400 m³. La planta no cuenta con permiso de vertimientos ni tratamiento de los lodos generados en los procesos de potabilización, lo cual contradice lo establecido en el Artículo 119 de la Resolución 1096 del 2000. (ACUEDUCTO METROPOLITANO DE BUCARAMANGA S.A. E.SP., 2014).

6.2. Definición del objeto y campo de estudio

Aplicar el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) a dos Plantas de Tratamiento de Agua Potable (PTAP Bosconia y FLORIDABLANCA) del Sistema del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga (AMB), mediante la utilización del SimaPro, para determinar el impacto ambiental de éstas, y realizar una comparación de los impactos entre los dos escenarios y proponer mejoras para disminuirlos.

6.2.1. Alcance del estudio. Los sistemas a analizar en este trabajo pertenecen al Sistema de Tratamiento de Agua Potable, del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga (AMB) y el afluente a cada planta desde su captación, hasta el bombeo para su distribución a otras plantas.

6.2.2. Función y unidad funcional. Los sistemas estudiados cumplen con la función de dar tratamiento a un afluente de agua cruda proveniente del Sistema Río Surata y Río Frío a partir de un proceso mecánico, biológico y químico. Para valorar dicha función se ha seleccionado como unidad funcional un metro cúbico (1 m³) de agua tratada.

6.2.3. Sistemas estudiados y límites. Los sistemas consisten en dos PTAP que dan tratamiento a una fuente de agua natural provenientes de la Cuenca del Río Suratá y de la Micro cuenca del Río Frio, respectivamente. Cada una de las plantas de tratamiento está constituida por un conjunto de equipos y operaciones unitarias que forman parte del proceso de tratamiento. En la Figura 15 se representa el sistema de tratamiento de agua potable del AMB, así como sus límites y las operaciones que en él se encuentran.

- **Límites geográficos**

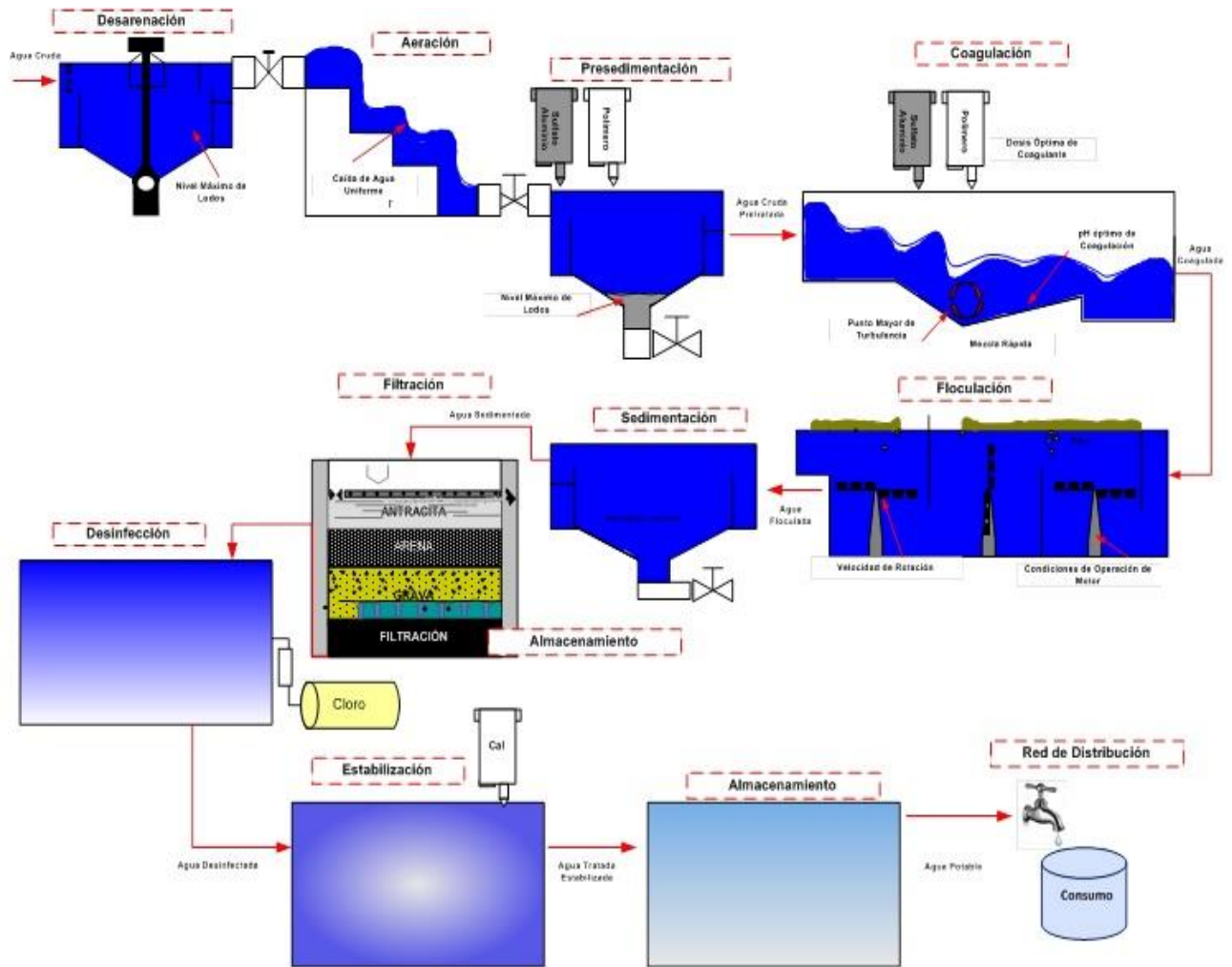
La planta de tratamiento de agua potable Bosconia está localizada al norte de la ciudad de Bucaramanga, vía al municipio de Matanza. La planta de tratamiento FLORIDABLANCA está localizada en el municipio de FLORIDABLANCA, a la salida del barrio Caracolí.

- **Límites temporales**

Como acotación temporal se consideraron los datos reportados recientemente por la planta e información bibliográfica, obtenidos entre los años 2010 y 2015.

6.2.4. Etapas excluidas del análisis. Quedan excluidas del análisis de impacto las cargas ambientales asociados a la red de distribución hacia el consumidor, el transporte de materias primas, los insumos utilizados para pruebas en los laboratorios, los equipos y maquinarias, la tubería de conducción del agua.

Figura 15. Sistema de Potabilización de Agua, Área Metropolitana de Bucaramanga.



Fuente: AMB (Modificado por autora)

6.3. Evaluación de Impacto de Ciclo de Vida (EICV)

Para la EICV se usó el método de evaluación de impacto EDIP 2003, que ha sido elegido, básicamente por que las categorías de impacto de interés son evaluadas en este método y fueron estudiadas en los trabajos reportados en el estado del arte mencionado. EDIP es un método particularmente incluyente de categorías de impacto relacionadas con la toxicidad, del cual es el tipo de contaminación directa

que se espera de una PTAP por efecto del uso de químicos y la disposición de lodos resultantes de su aplicación. (PRé, various authors., 2016).

6.3.1. Datos necesarios y requisitos de calidad. La mayor parte de los datos utilizados en este análisis provienen del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga (AMB). Sin embargo aquellos de los cuales ha sido imposible conseguir los datos directos de la planta, pero que tienen una contribución significativa en el impacto ambiental global como consumo eléctrico y producción de lodos se han obtenido después de una búsqueda bibliográfica juiciosa, todos los trabajos encontrados son Tesis de Grado de la Universidad Industrial de Santander, que desarrollaron alguna investigación característica en las plantas de tratamiento en estudio.

- **Información necesaria**

Los datos necesarios para llevar a cabo el análisis son: Datos de caudal, DBO₅ y DQO, nitrógeno total, nitratos, nitritos, fósforo, arsénico, cadmio, cobre, cromo, mercurio, níquel, plomo, zinc tanto del agua captada, como del agua tratada. También son necesarios los de procesos como consumo eléctrico, consumo de químicos y caracterización de lodos.

- **Requisitos de calidad de datos**

Los datos de consumos de químicos y caracterización de agua cruda que se manejan en este análisis, fueron suministrados por los Jefes de operación de cada PTAP, correspondientes al año 2015 (Yolanda Otero, 2016), (Jhon Barreneche, 2016). Los datos de caracterización de agua tratada fueron tomados de la página del acueducto (www.amb.gov.co). La información correspondiente a la caracterización de aguas arriba, se tomó de los informes técnicos publicados en la web, por el Acueducto Metropolitano de Bucaramanga (ACUEDUCTO METROPOLITANO DE BUCARAMANGA. A.M.B.S.A.E.P.S., 2011.) Los datos

debidos a los consumos energéticos de cada planta, fueron obtenidos de Tesis de Grado de la UIS (BONILLA FELIZOLA, 2006), de igual manera la información correspondiente a la caracterización de lodos, fue obtenida de estas fuentes (CACUA TIRADO, et al., 2008) (CENTRO DE ESTUDIOS E INVESTIGACIONES AMBIENTALES UIS., 2015).

6.3.2. Herramienta informática. La herramienta computacional utilizada en la evaluación ambiental para el análisis de ciclo de vida fue SimaPro, versión 7.1. Este software permitió analizar las contribuciones más importantes de la carga ambiental en las etapas de tratamiento del agua potable, también comparar los dos escenarios de estudio.

6.4. Análisis de inventario

6.4.1. Principales hipótesis y limitaciones. Para los dos escenarios utilizados, la caracterización de lodos y el consumo energético fue obtenida a partir de la búsqueda bibliográfica, así como la caracterización aguas arriba de la captación. Sin embargo, estos datos pueden considerarse confiables por tratarse de información suministrada directamente del acueducto, para trabajos de grado previos. También es importante destacar que la Planta de Bosconia posee una planta de Bombeo para la distribución hacia los sectores más altos, por el contrario en la Planta de FLORIDABLANCA el sistema de distribución se hace por gravedad.

6.4.2. Datos de Inventario de Ciclo de Vida. A continuación se muestran el inventario para cada una de las plantas de tratamiento Bosconia y FLORIDABLANCA, tomadas como casos de estudio:

Tabla 1. Volumen de Agua Captada y Volumen de Agua Producida, en unidades de m3/mes. Año 2015

MESES DEL AÑO	PLANTA FLORIDABLANCA		PLANTA BOSCONIA	
	Agua Tratada (m3/mes)	Agua Producida (m3/mes)	Agua Tratada (m3/mes)	Agua Producida (m3/mes)
Enero	1.430.190	1.418.522	1.896.665	1.864.975
Febrero	1.321.585	1.310.102	1.713.783	1.682.587
Marzo	1.412.456	1.399.822	1.893.453	1.854.555
Abril	1.420.992	1.408.264	1.219.921	1.188.565
Mayo	1.476.356	1.464.862	1.457.099	1.441.079
Junio	1.461.524	1.449.234	1.623.362	1.585.039
Julio	1.483.315	1.469.605	2.414.722	2.348.228
Agosto	1.380.553	1.368.316	2.872.792	2.797.616
Septiembre	1.207.192	1.195.581	3.119.111	3.038.214
Octubre	1.259.111	1.245.157	2.596.911	2.520.372
Noviembre	1.274.980	1.259.817	1.797.800	1.761.460
Diciembre	1.227.739	1.215.666	2.503.303	2.462.225
Total Año (m3)	16.355.993	16.204.948	25.108.922	24.544.915
Total Promedio año	1.362.999	1.350.412	2.092.410	2.045.410
Vol. Prom. (m3/día)	44.811	44.397	68.792	67.246

Tabla 2. Balance Volumétrico Global del agua tratada en las PTAP.

Sustancia	Planta FLORIDABLANCA		Planta Bosconia	
	% Tratamiento	m3 de Agua	% Tratamiento	m3 de Agua
Agua a tratar	100%	1,0092	100%	1,0225
Pérdida de Agua	0,92%	0,0093	2,2%	0,0230
Agua tratada	99,08%	0,9999	97,8%	0,9995

Tabla 3. Consumo Anual de Químicos: Planta FLORIDABLANCA

AÑO	POLIMERO	SULFATO DE ALUMINIO		PAC	COLORO	AGUA TRATADA	CAL	Dosis Sulfato (mg/L)		Dosis PAC	Dosis CLORO	Dosis CAL
	kg	kg sólido	kg líquido	kg	kg	m3	kg	sólido	líquido	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)
2006	450	287.745	-	-	18.364	14.720.562	76.750	19,5	-	-	1,25	5,21
2007	565	270.975	-	-	18.225	14.901.970	71.150	18,18	-	-	1,22	4,77
2008	200	307.825	-	-	18.131	14.045.294	55.511	21,9	-	-	1,29	3,95
2009	307	338.950	-	-	22.703	16.301.269	49.875	20,92	-	-	1,39	3,09
2010	669	359.975	-	-	23.399	16.840.995	58.775	23,55	-	-	1,39	3,53
2011	960	465.900	-	-	21.889	16.974.993	73.750	25,26	-	-	1,29	4,29
2012	596	419.425	-	-	22.004	17.165.833	57.950	24,45	-	-	1,28	3,38
2013	290	117.600	404.401	71.449	21.704	16.255.158	22.925	25,68	41,32	31,43	1,34	1,53
2014	7	43.875	484.999	83.115	21.542	15.481.197	15.700	22,08	46,25	38,75	1,39	1,17
2015	65	34.000	591.791	78.756	24.620	16.355.993	22.225	26,14	48,33	35,46	1,51	1,72

Tabla 4. Consumo Anual de Químicos: Planta Bosconia

AÑO	POLIMERO	SULFATO DE ALUMINIO		PAC	COLORO	AGUA TRATADA	CAL	Dosis Sulfato (mg/L)		Dosis PAC	Dosis CLORO	Dosis CAL
	kg	kg sólido	kg líquido	kg	kg	m3	kg	sólido	líquido	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)
2006	1.045	400.967	-	-	36.100	15.830.912	4.525	25,33	-	-	2,28	0,29
2007	1.580	93.725	554.644	-	40.574	16.145.562	4.950	14,84	44,01	-	2,51	0,31
2008	2.860	117.100	575.689	-	33.837	14.538.711	5.225	24,76	54,16	-	2,32	0,44
2009	1.175	38.625	532.936	-	31.397	12.555.446	1.475	31,77	51,35	-	2,47	0,32
2010	4.915	56.500	660.250	-	39.028	14.260.180	9.475	30,6	58,56	-	2,68	0,96
2011	13.270	229.050	1.117.161	-	49.043	24.335.388	21.825	37,82	59,12	-	2,02	1,55
2012	1.825	53.400	474.202	-	27.315	12.760.993	1.650	32,08	45,51	-	2,16	0,41
2013	2.795	25.050	721.889	-	36.991	16.337.458	1.300	37	48,75	-	2,27	11,49
2014	3.275	120.625	745.037	-	50.814	19.496.495	1.575	30,42	51,32	-	2,61	4,99
2015	2.763	86.100	1.003.601	-	64.329	25.108.922	8.075	22,96	46,78	-	2,58	4,02

Tabla 5. Consumo de Energía Eléctrica

CONSUMO ENERGÍA EN PTAP	% Contribución	Consumo (kWh/Mes)	Consumo (kWh/m3)	TOTAL
Bosconia - General	4,17%	108082	0,052841385	1,266861708
Sistema de Bombeo - Bosconia	95,83%	2483169	1,214020323	
FLORIDABLANCA - General	90,00%	18159	0,013446918	0,014941019
Sistema de Bombeo - FLORIDABLANCA	10,00%	2018	0,001494102	
Consumo Total (kWh)		2611428	1,28	1,28

Tabla 6. Consumo de Combustible para el sistema de bombeo.

Sistema de Bombeo	Consumo Combustible	
	(gal/m3)	(kg/m3)
Planta Bosconia	0,0001801	0,000600
Planta FLORIDABLANCA	0,0000309	0,000103
Total Consumo	0,0002109	0,0007027

Tabla 7. Caracterización de Agua Cruda

PARÁMETRO	UNIDADES	Planta FLORIDABLANCA	Planta Bosconia
DB05	mg O/L	0,575	-
Nitrógeno Total	mgN/L	0,883	-
Nitrógeno Amoniacal	mgN/L	0,123	-
Nitrógeno Orgánico	mgN/L	0,760	-
Nitritos	mgN/L	0,010	-
Nitratos		0,615	-
Fósforo Total	mg P/L	0,063	-
Sólidos Totales	mg/L	87,500	-
Sólidos Suspendidos	mg/L	18,250	-

Sólidos S. Volátiles	mg/L	7,500	-
pH		7,475	8,1592
Turbiedad	(UNT)	8,500	142,6992
Coliformes Totales	NMP/100ml	6757,500	-
PARÁMETRO	UNIDADES	Planta FLORIDABLANCA	Planta Bosconia
Coliformes Fecales	NMP/100ml	1972,500	-
Aluminio	mg Al/l	-	0,027
Zinc	mg Zn/l	-	0,107
Cobre	mg Cu/l	-	0,125
Plomo	mg Pb/l	-	0,070
Mercurio	mg Hg/l	-	1,087
Hierro Total	mg Fe/l	-	3,273
Arsénico	µg As/l	-	1,176
Cianuro	mg CN/l	-	0,013

Tabla 8. Caracterización de Agua Tratada

PARÁMETROS	BOSCONIA	FLORIDABLANCA	Res. 2115/07
# muestras fisicoquímicas	95,333	60,833	2/d
Cloro residual [mg Cl ₂ /L]	0,939	0,978	0,3-2
Turbiedad [UNT]	0,946	1,151	<2
Color Aparente [Pt-Co]	4,633	5,217	<15
pH [Unidades de pH]	7,333	7,129	6,5-9
Conductividad [µS/cm]	170,583	111,583	<1000
Aluminio [mg Al/L]	0,056	0,074	0,20
Alcalinidad [mg CaCO ₃ /L]	54,017	38,025	200,00
Dureza [mg CaCO ₃ /L]	72,017	50,275	300,00
Cloruro [mg Cl ⁻ /L]	3,967	3,492	250,00
Sulfatos [mg SO ₄ /L]	24,250	18,692	250,00
Hierro [mg Fe/L]	0,120	0,120	0,30
Nitratos [mg NO ₃ /L]	0,725	1,725	10,00
Nitritos [mg NO ₂ /L]	0,008	0,008	0,10

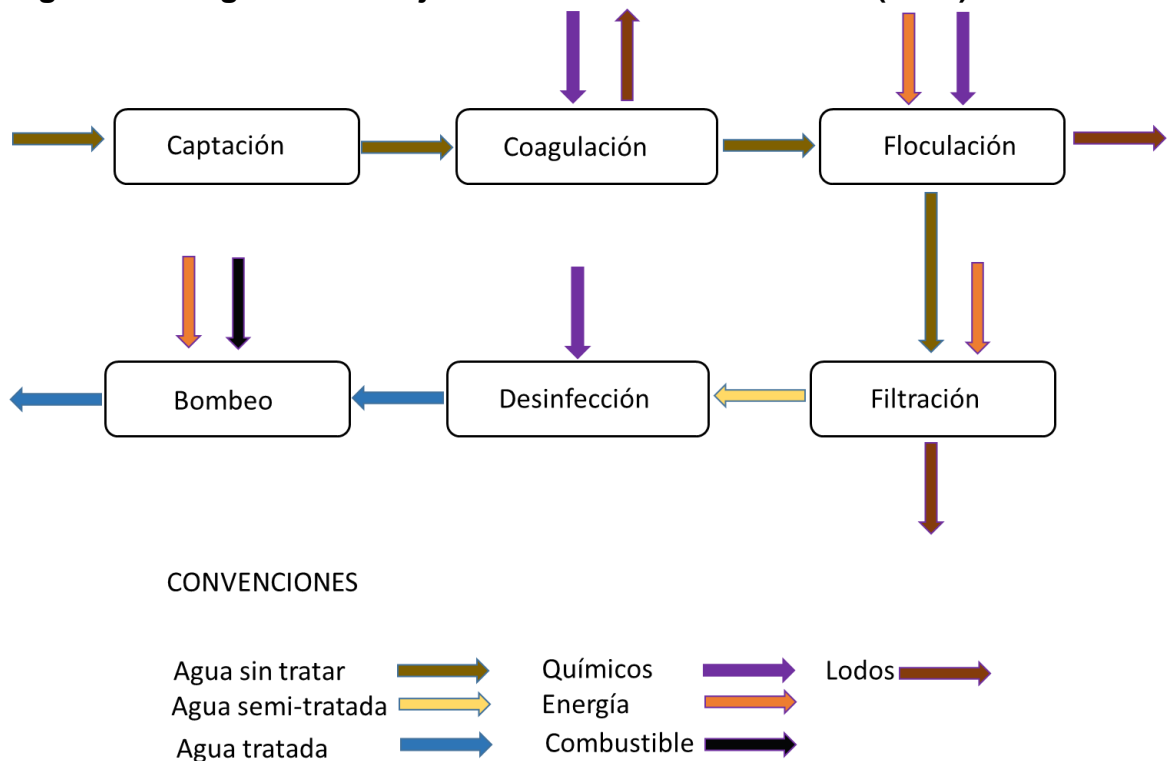
# Muestras Microbiológicas	181,000	150,833	5/d
Recuento heter. placa [UFC/100 ml]	38,417	18,500	100,00
ΣIRCA MENSUAL %	0,525	0,428	0-5

Tabla 9. Caracterización de Lodos

Parámetro	Unidad	PLANTA BOSCONIA		PLANTA FLORIDABLANCA			
		Sedimentador	Filtro	Planta Nueva	Filtro	Sedimentador	Floculador
Turbiedad	UNT	3911,00	192,33	41437,5	747,5	15187,5	43687,5
Sólidos totales	mg/l	647,00	408,67	68632,5	948	94937,5	34022,5
Sólidos Suspendidos	mg/l	553,67	244,67	9057,5	186	10850	4562,5
Sólidos Sedimentales	mg/l	15,33	12,33	-	-	-	-
DBO5	mg/l	31,67	14,67	93,62	10,04	20,7	11,665
DQO	mg/l	50,20	45,67	3105,905	68,02	5360,015	1943,335
E-coli	NPM/100 ml	50,00	38,67	11000	4400	2000	1650
Aerobio mesófilos	UFC/1ml	9100,00	656,67	-	-	-	-
Hg	µg Hg/l	6,53	3,16	-	-	-	-
Al	mg Al/l	55,33	5,75	2006,5	46,205	122,03	416,32
Fe	mg Fe/l	28,33	7,71	1209,5	10,67	1268,01	390,02
Pb	mg Pb/l	0,23	0,10	0,66	<0,26	<0,26	<0,26
Cu	mg Cu/l	1,21	0,18	0,669	<0,038	<0,038	0,219
Zn	mg Zn/l	1,47	0,15	-	-	-	-
Cadmio	mg Cd/L	-	-	<0,014	<0,014	<0,014	<0,014
Cromo	mg Cr/L	-	-	1,305	<0,076	<0,076	0,213
Magnesio	mg Mg/L	-	-	145,495	1,56	1,99	50,87
Coliformes Totales	NPM/100 ml	-	-	47150	15400	7550	20850

Una vez realizado el levantamiento de información del inventario para cada planta de tratamiento de agua potable objeto de estudio, se procedió a representar mediante un diagrama de bloques simplificado las etapas del proceso (bombeo, captación, coagulación, floculación, filtración, desinfección y consumo de energía para distribución) delimitadas en el estudio, así como las corrientes de entrada (consumo de químicos, energía eléctrica, combustible, agua, etc.) y las corrientes de salida (lodos), que permitan aclarar la forma por la cual se realizan los inventarios recopilados en las **tablas 10 y 11**.

Figura 16. Diagrama de Flujos Sistema de Potabilización (AMB)



Con relación al diagrama de flujo y al inventario recolectado en cada etapa de operación requerida en el tratamiento de 1 m³ de agua potable, se presenta en la siguiente tabla el balance global de los consumos másicos y energéticos suministrados en la PTAP Bosconia y FLORIDABLANCA.

Tabla 10. Balance Global de Consumos másicos y energéticos, PTAP FLORIDABLANCA.

Componente	Unidad	Bombeo	Captación	Coagulación	Floculación	Filtración	Desinfección	Consumo de Energía
ACPM	kg	0,0001	-	-	-	-	-	-
Energía	kWh	0,001494	-	-	0,003594	0,0342222	-	0,0134469
Agua sin Tratar	m3	-	1,00923	1,00923	1,00923	-	-	-
Sulfato Aluminio (s)	Kg	-	-	0,0020787	-	-	-	-
Sulfato Aluminio (l)	Kg	-	-	0,0312713	-	-	-	-
PAC	Kg	-	-	0,0050915	-	-	-	-
Cal	Kg	-	-	0,0014429	-	-	-	-
Cloro	Kg	-	-	-	-	-	0,0014897	-
Agua Tratada	m3	-	-	-	-	-	1	-
Lodo	Kg	-	-	0,002925	0,002925	0,002925	-	-

Tabla 11. Balance Global de Consumos másicos y energéticos, PTAP Bosconia.

Componente	Unidad	Bombeo	Captación	Coagulación	Floculación	Filtración	Desinfección	Consumo de Energía
ACPM	kg	0,0006	-	-	-	-	-	-
Energía	kWh	1,214	-	-	0,001561	0,0222923	-	0,05284
Agua sin Tratar	m3	-	1,02246	1,02246	1,02246	-	-	-
Sulfato Aluminio (s)	kg	-	-	0,00343	-	-	-	-
Sulfato Aluminio (l)	kg	-	-	0,03997	-	-	-	-
PAC	kg	-	-	0,00011	0,000003	-	-	-
Cal	kg	-	-	0,00032	-	-	-	-
Carbón Activado	kg	-	0,0004	-	-	-	-	-
Cloro	kg	-	-	-	-	-	0,00256	-
Agua Tratada	m3	-	-	-	-	-	1	-
Lodo	kg	-	-	0,002747	0,002747	-	-	-

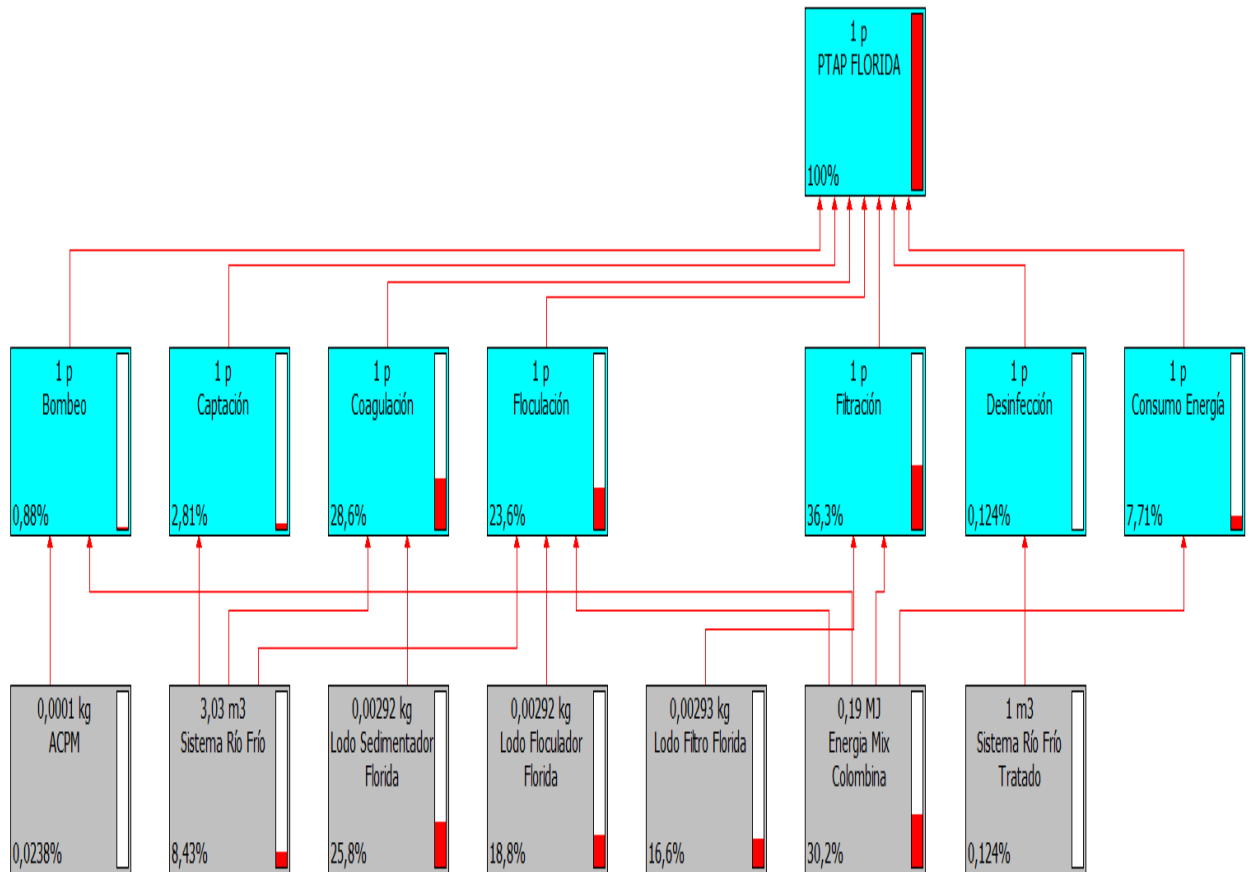
6.5. Análisis e Interpretación de Resultados

En esta etapa se analizaron los resultados obtenidos en las fases de análisis de inventario y de evaluación de impactos, y se establecieron conclusiones teniendo en cuenta el objetivo y alcance definidos al inicio. A continuación se presentan las principales cargas ambientales de todas las etapas los sistemas evaluados que pueden o deben mejorarse para reducir los impactos ambientales.

6.5.1. Contribución Ambiental Global. En la Figura 17 se observa la contribución ambiental generada en las diferentes etapas (cajas de color magenta: bombeo, captación, coagulación, floculación, filtración y desinfección) que constituyen el proceso de potabilización de la PTAP FLORIDABLANCA. La carga ambiental esta distribuida a lo largo del proceso destacando la participación de la etapa de filtración en un 36.3% correspondiente al consumo de energía eléctrica (sistema de bombeo para lavado de filtros) y a la caracterización del lodo generado por presencia de metales (Al, Cr, Cu, Pb, Fe, etc.).

Las etapas siguientes con mayor aporte en carga ambiental (28,6% y 23,6%) son el sistema de coagulación (28,6%) y floculación (23,6%); el impacto esta atribuido por el tratamiento del agua captada del Río Frío (contenido de nitratos, nitritos, fosforo y sólidos volátiles y totales), la generación de lodos (presencia de metales) y el consumo de energía eléctrica (sistema de agitación). La atribución del origen de la carga ambiental se encuentra detallada en las cajas de color gris como se evidencia en la figura (por ejemplo; el consumo de energía eléctrica aporta un 30.2% de carga ambiental sobre el análisis global de potabilización de 1 m³ de agua).

Figura 17. Árbol de proceso la Planta de Tratamiento de Agua Potable FLORIDABLANCA (corte de visualización del 0.0009%).



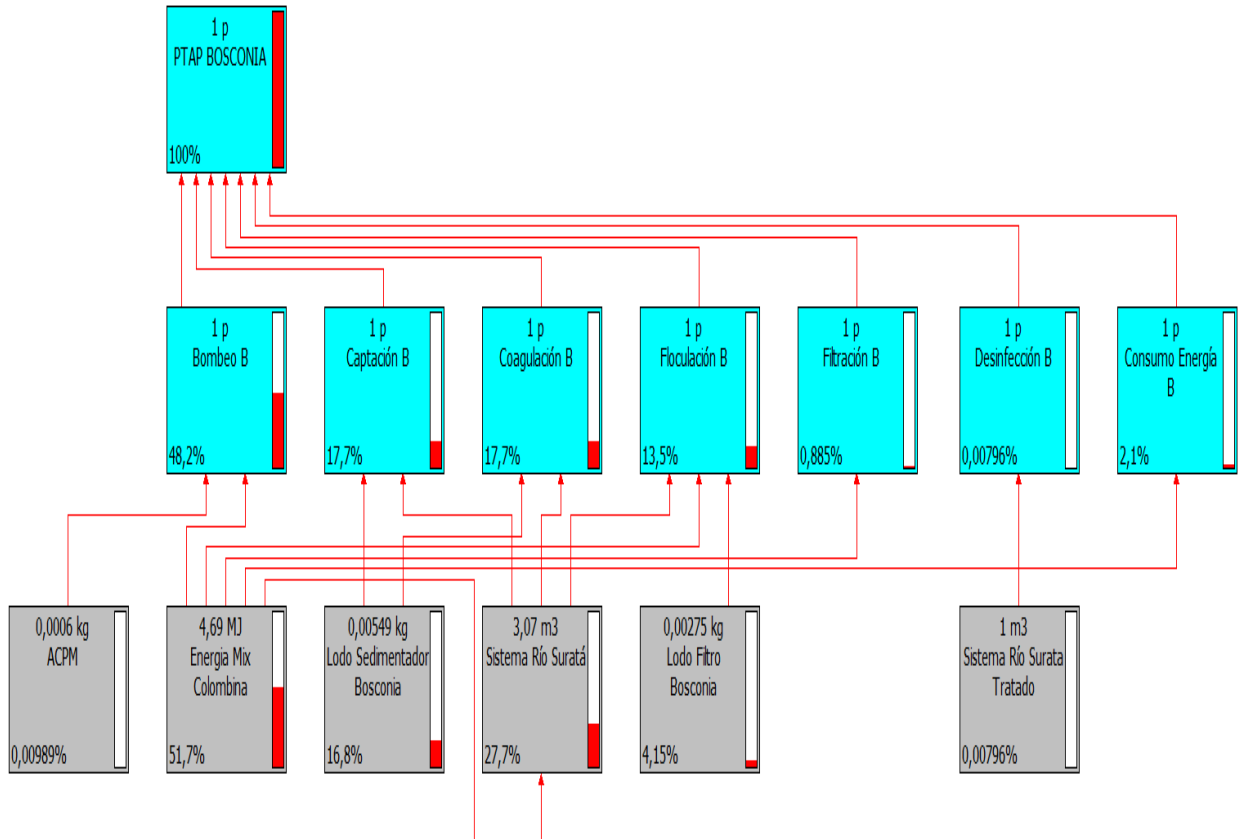
Fuente: Simapro v. 7.1.8 –Método EDIP2003.

Siguiendo con el análisis de contribución ambiental de la planta FLORIDABLANCA se logra observar en la figura anterior que las etapas con menor aporte en carga ambiental son las etapas de consumo de energía a nivel general de la planta (oficinas, laboratorios, etc.), etapa de captación y conducción del agua a tratar hacia la planta, el sistema de bombeo (bajo consumo energético ya que el agua es direccionada por gravedad) y finalmente la etapa de desinfección (uso de cloro), contribuyendo en un 7,71%; 2,81%; 0,88% y 0,124% respectivamente.

De igual forma se realizó el análisis de contribución ambiental para las diferentes etapas de proceso que integran la planta PTAP de Bosconia, tal como se presenta

en la **Figura 18**. Del análisis se resalta que la etapa de bombeo, presenta un contribución del 48,2% del total de impacto generado en el tratamiento de 1 m³ de agua potable. Al igual que la Planta de FLORIDABLANCA, las etapas de captación, coagulación y floculación son las contribuyen al impacto con una contribución del 17,7%, 17,7% y 13,5% respectivamente. La carga ambiental antes enunciada obedece al tratamiento del agua captada del río surata quien está caracterizada por la presencia de metales (Hg, Cd, As, Cl, Fe, etc.) y también se atribuye la carga ambiental por la generación de lodos (alto contenido de nitratos, nitritos, agentes biológicos y diferentes metales) como el consumo de energía eléctrica. Las etapas restantes: consumo de energía, filtración y desinfección, aportan en bajo porcentaje (2,1%; 0,89% y 0,00% respectivamente) al impacto global del proceso, como se presenta en la siguiente **Figura 18**.

Figura 18. Árbol de proceso la Planta de Tratamiento de Agua Potable Bosconia (corte de visualización del 0.0008%)



Fuente: Simapro v. 7.1.8 –Método EDIP2003.

De la figura, es importante resaltar que la mayor contribución ambiental corresponde al tratamiento del agua obtenida del río Suratá, el cual según la caracterización suministrada por el Acueducto AMB, está contaminado de forma directa por los vertimientos generados aguas arriba de la PTAP por la industria minera, aguas de la actividad agrícola y efluentes de mataderos bovinos clandestinos. Otro aporte significativo en la afectación ambiental proviene del consumo de energía eléctrica, usado en mayor cantidad por el sistema de bombeo en la extracción de agua de la fuente hídrica y el consumo de energía para la distribución de agua a otras plantas.

6.5.2. Análisis por Atributos – Planta FLORIDABLANCA. El análisis por atributos consiste en realizar la descripción e interpretación de los resultados

obtenidos en la etapa de caracterización o determinación del perfil medio ambiental (impactos ambientales potenciales) del sistema objeto de estudio, que se obtiene del software Simapro para cada planta de tratamiento PTAP evaluada.

En la **Tabla 12** se presentan los resultados obtenidos de la caracterización por cada etapa de estudio (bombeo, captación, coagulación, floculación, filtración, desinfección y consumo de energía) respecto a las categorías de evaluación definidas en el método de estudio EDIP 2003. De los resultados se enfatiza que las categorías con mayor relevancia fueron la ecotoxicidad crónica del agua, ecotoxicidad aguda del agua, la toxicidad humana aire y agua; con una contribución ambiental del 79,7%, 8,14%, 8,83% y 2.51% respectivamente.

Tabla 12. Resultados de la Caracterización Global del Impacto Ambiental Potencial – PTAP FLORIDABLANCA.

Categoría de impacto	Unidad	Bombeo	Captación	Coagulación	Floculación	Filtración	Desinfección	Consumo Energía
Calentamiento Global	kg CO2 eq	1,05E-03	0,00E+00	0,00E+00	1,52E-03	1,45E-02	0,00E+00	5,70E-03
Formación Ozono (vegt.)	m2.ppm.h	9,20E-02	0,00E+00	0,00E+00	2,19E-01	2,09E+00	0,00E+00	8,20E-01
Acidificación	m2	4,15E-04	0,00E+00	0,00E+00	9,79E-04	9,32E-03	0,00E+00	3,66E-03
Eutrofización terrestre	m2	1,21E-03	0,00E+00	0,00E+00	2,89E-03	2,75E-02	0,00E+00	1,08E-02
Eutrofización Acuática	kg N	4,59E-06	8,59E-05	8,59E-05	9,68E-05	1,04E-04	2,36E-07	4,09E-05
Toxicidad humana (aire)	m3	3,20E-02	0,00E+00	0,00E+00	7,33E-02	6,98E-01	3,38E+01	2,74E-01
Toxicidad humana (agua)	m3	0,00E+00	0,00E+00	4,18E+00	3,05E+00	2,70E+00	6,05E-06	0,00E+00
Ecotoxicidad crónica agua	m3	0,00E+00	0,00E+00	1,29E+02	1,24E+02	6,11E+01	2,03E-02	0,00E+00
Ecotoxicidad aguda agua	m3	0,00E+00	0,00E+00	1,31E+01	1,29E+01	6,16E+00	5,34E-03	0,00E+00

En la **Figura 22** se evidencian los resultados explicados, en la **Tabla 12** donde las etapas de mayor influencia fueron la coagulación, floculación, filtración, desinfección y el consumo de energía con una participación del 37%, 36%, 18,4%, 8,6% y 0,29% para cada etapa, lo anterior fue asociado directamente por el tratamiento de aguas contaminadas por metales, el consumo de químicos, la generación de lodos y el consumo de energía eléctrica. Siguiendo con el análisis, se procedió a realizar la

evaluación y análisis por contribución para cada etapa del proceso objeto de estudio según la valoración de puntuación única (Pt).

En la **Figura 20** se observan los resultados de contribución ambiental en donde se validan que los procesos con mayor atribución ambiental fueron la filtración, coagulación y floculación con un aporte del 36,3%, 28,6% y 23,6%, asociados al tratamiento del influente (presencia de metales según caracterización de laboratorio), consumo de energía eléctrica, consumo de combustible y la generación de lodos. La afectación de los impactos involucrados en cada proceso contribuye negativamente las categorías de toxicidad humana (agua) en un 77,48% del impacto global, seguido de la categoría formación de ozono (9,79%), eutrofización terrestre (8,61%) y acidificación (3,02%) principalmente, tal como se logra observar en la **Figura 21**, contribución ambiental por categorías según la puntuación única.

Figura 19. Caracterización Global del Impacto Ambiental Potencial - PTAP FLORIDABLANCA.

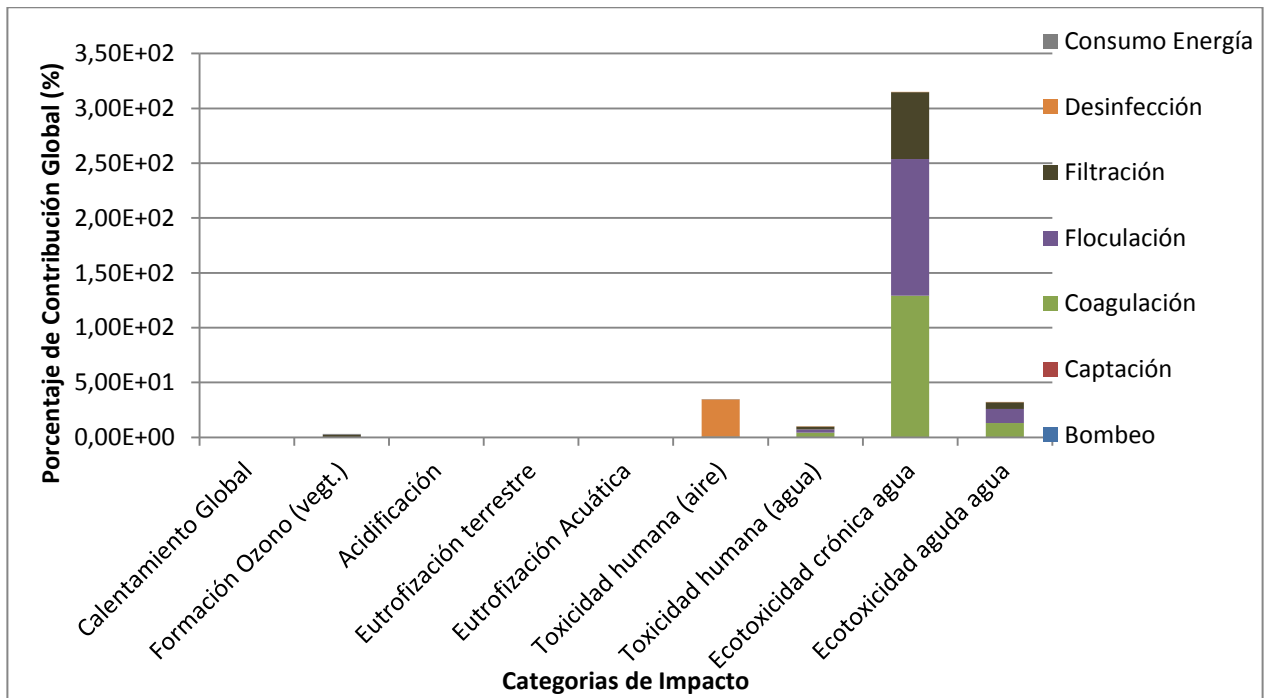


Figura 20. Puntuación única por proceso - PTAP FLORIDABLANCA.

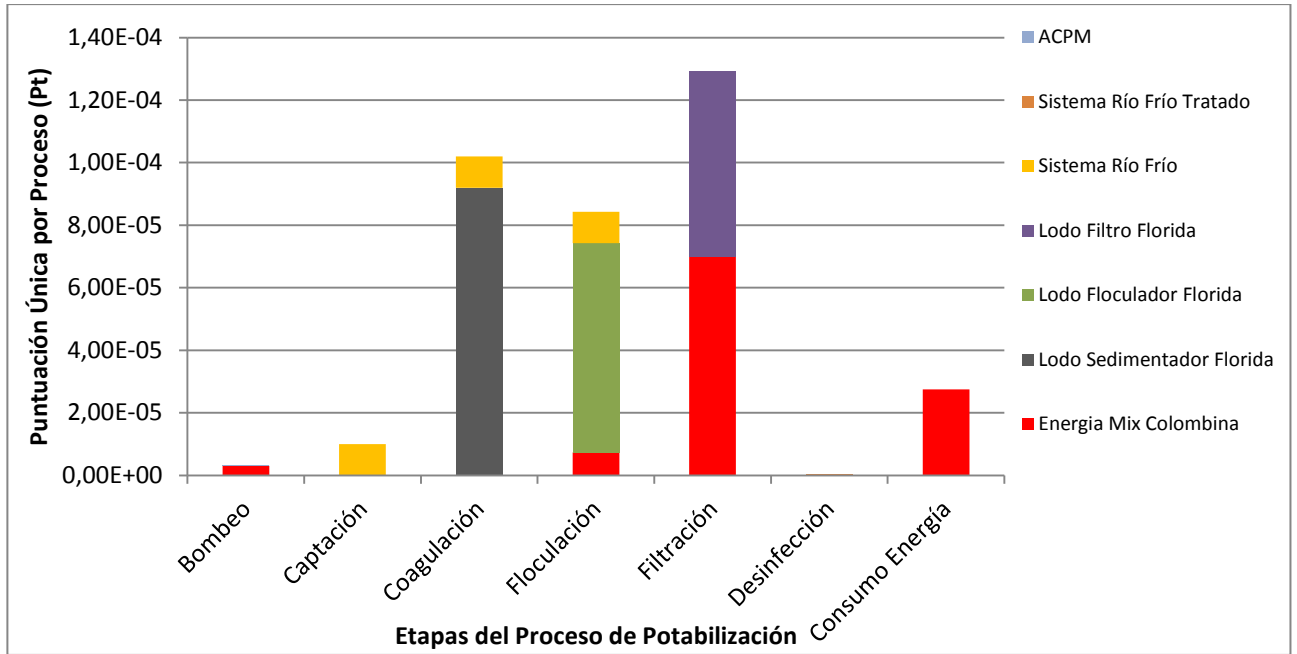
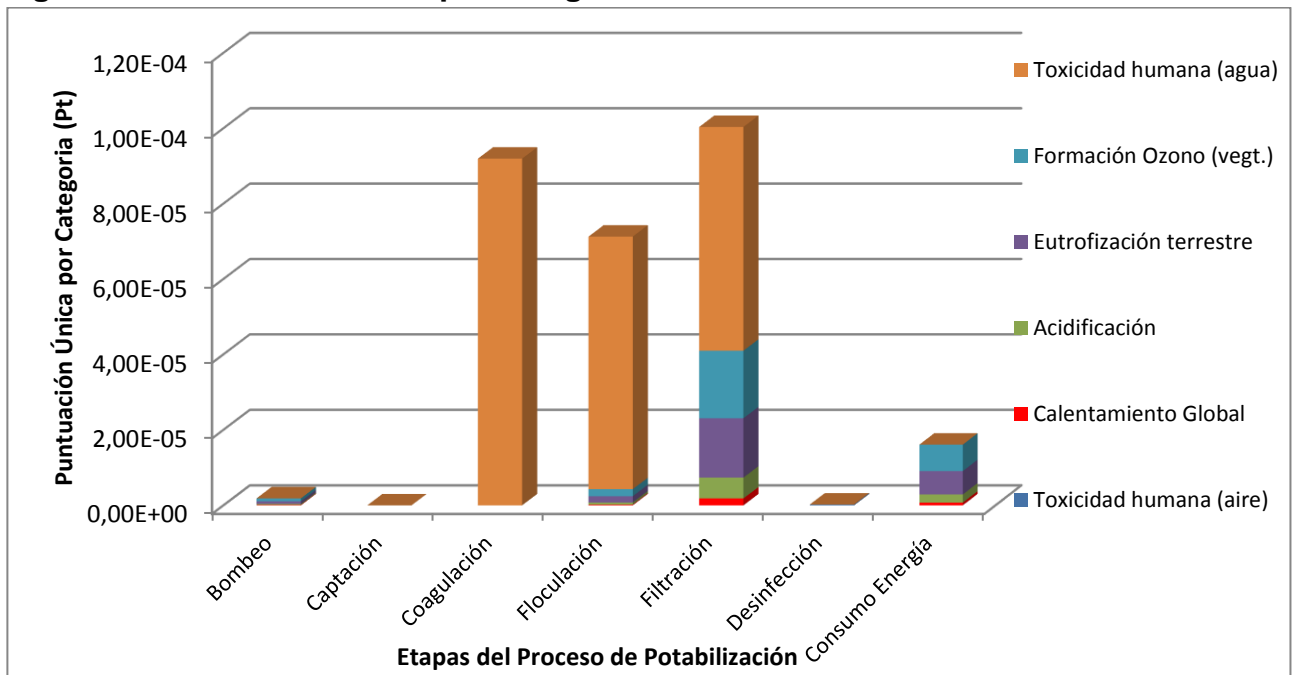


Figura 21. Puntuación única por categoría - PTAP FLORIDABLANCA.



Para detallar el análisis por contribución, a continuación se presenta el análisis de caracterización puntual para cada una de las categorías de estudio:

- ***Análisis del Perfil medioambiental para la categoría de Calentamiento Global, formación de ozono por vegetación y por actividades humanas.***

Al realizar el siguiente análisis se encontró que las categorías de calentamiento global ($\text{kg CO}_{2\text{eq}}$), formación de ozono por vegetación ($\text{m}^2\cdot\text{ppm}\cdot\text{h}$) y formación de ozono por actividades humanas ($\text{persona}\cdot\text{ppm}\cdot\text{h}$) se ven afectadas por el consumo directo de energía eléctrica y combustible (ACPM), por ende, se optó por agrupar el análisis de las tres categorías en este ítem. El impacto ambiental potencial para estas categorías está asociado a las emisiones de los componentes metano, monóxido y dióxido de carbono.

En las **Figuras 22, 23 y 24**, se logra observar que las etapas con mayor incidencia en la afectación de las categorías son las etapas de filtración, consumo de energía, floculación y bombeo, con una contribución ambiental de 64%, 25%, 6% y 5% respectivamente. Este comportamiento es similar para las tres categorías calentamiento Global (59% CH_4 y 40% CO_2), formación de ozono vegetal y humano (93% NO_x y 6% CH_4) y es influenciado por la composición y cantidad de gases emitidos a la atmosfera.

Figura 22. Análisis del Perfil Medioambiental para la categoría Calentamiento Global - PTAP FLORIDABLANCA.

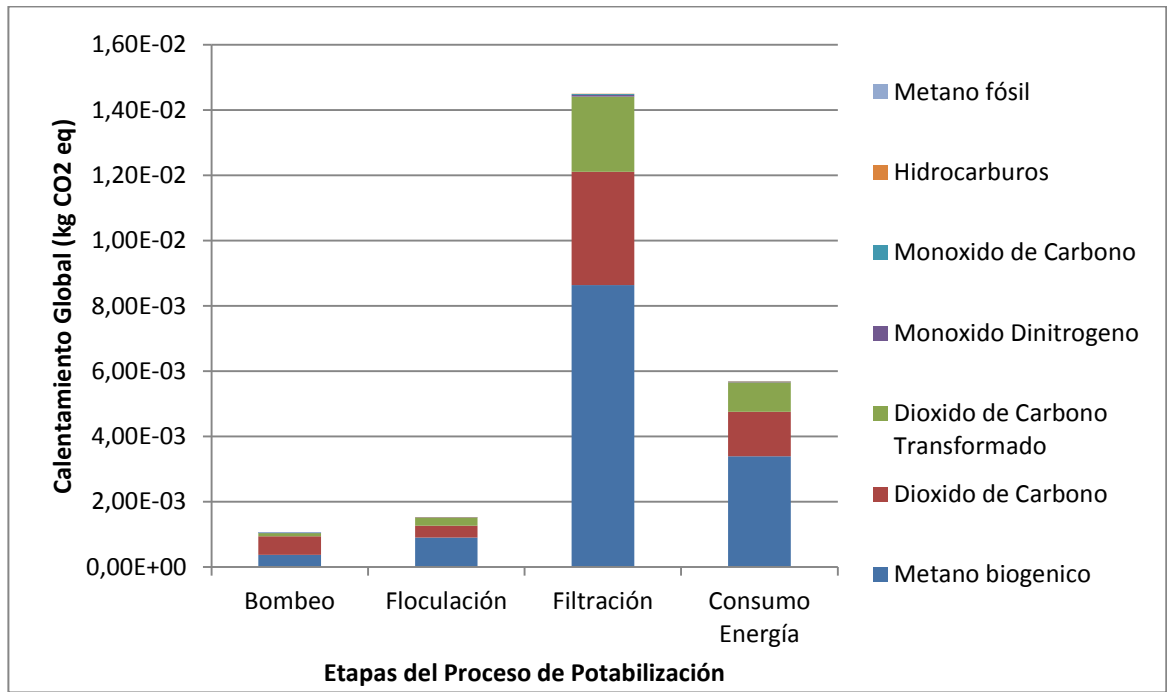


Figura 23. Análisis del Perfil Medioambiental para la categoría Formación de Ozono por vegetación - PTAP FLORIDABLANCA.

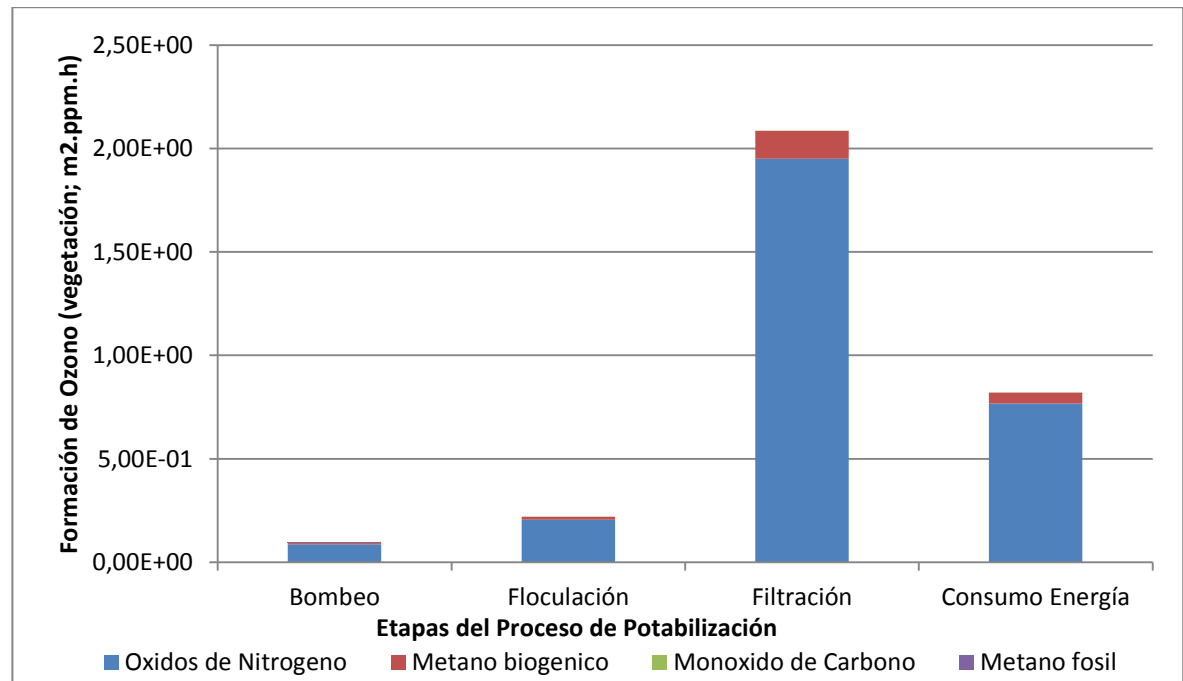
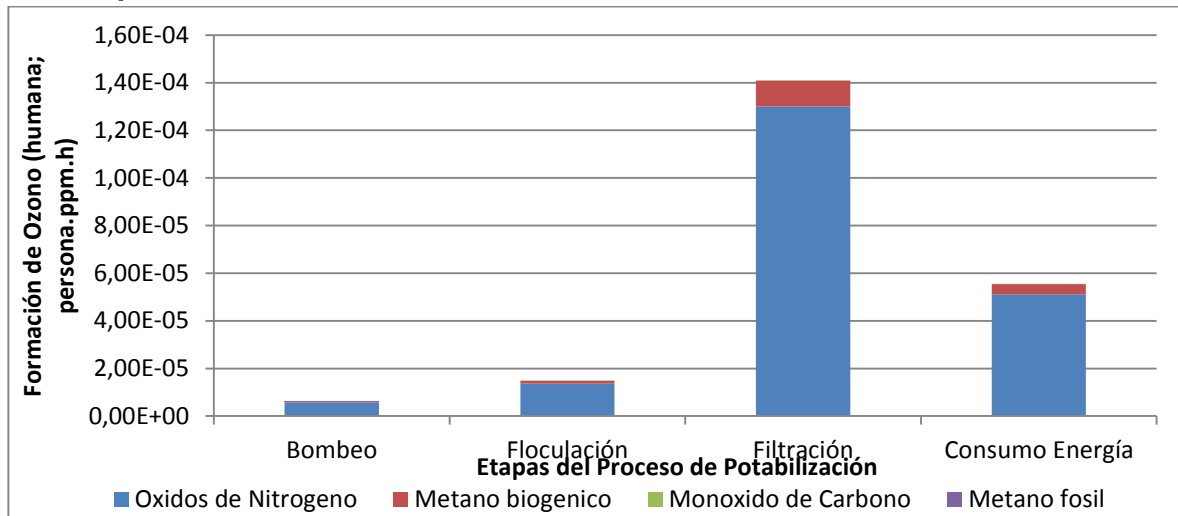


Figura 24. Análisis del Perfil Medioambiental para la categoría Formación de Ozono por actividades humanas - PTAP FLORIDABLANCA.



La contribución de las categorías mencionadas se ven afectadas por el consumo de energía eléctrica y combustible (ACPM) en un 98,8% y 1,2% promedio por los mismos y que son requeridos en las etapas de consumo de energía, filtración, floculación y bombeo.

En las **Tabla 13**, **Tabla 14** y **Tabla 15** se presentan los resultados que validan la afectación de las categorías estudiadas principalmente por el consumo de energía eléctrica y el consumo de ACPM. De las tablas se logra determinar que el proceso con mayor contribución es la filtración (65%), seguido del proceso de consumo de energía (25%), del sistema de floculación (7%) y por ultimo del sistema de bombeo (3%) aproximadamente.

Tabla 13. Resultados del Perfil Medio Ambiental categoría Calentamiento global - PTAP FLORIDABLANCA.

Corriente	Bombeo	Floculación	Filtración	Consumo Energía
Energía Mix Colombiana	6,33E-04	1,52E-03	1,45E-02	5,70E-03
ACPM	4,18E-04	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Total (kg CO2 eq)	1,05E-03	1,52E-03	1,45E-02	5,70E-03

Tabla 14. Resultados del Perfil Medio Ambiental categoría Formación de ozono por vegetación - PTAP FLORIDABLANCA.

Corriente	Bombeo	Floculación	Filtración	Consumo Energía
Energía Mix Colombiana	9,11E-02	2,19E-01	2,09E+00	8,20E-01
ACPM	9,00E-04	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Total (m2.ppm.h)	9,20E-02	2,19E-01	2,09E+00	8,20E-01

Tabla 15. Resultados del Perfil Medio Ambiental categoría Formación de ozono por actividades humanas - PTAP FLORIDABLANCA.

Corriente	Bombeo	Floculación	Filtración	Consumo Energía
Energía Mix Colombiana	6,16E-06	1,48E-05	1,41E-04	5,54E-05
ACPM	6,05E-08	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Total (persona.ppm.h)	6,22E-06	1,48E-05	1,41E-04	5,54E-05

- **Análisis del Perfil medioambiental para la categoría de Eutrofización acuática**

En la **Tabla 16** se presenta los resultados que validan la contribución del impacto ambiental potencial asociado a la categoría de eutrofización acuática (kg N) y atribuido por las diferentes etapas de proceso en la potabilización de 1 m³ de agua. La contribución está dada principalmente en las etapas de filtración, floculación, coagulación, captación y consumo de energía en un 25%, 23%, 20,5%, 20,5% y 10% para cada etapa respectivamente.

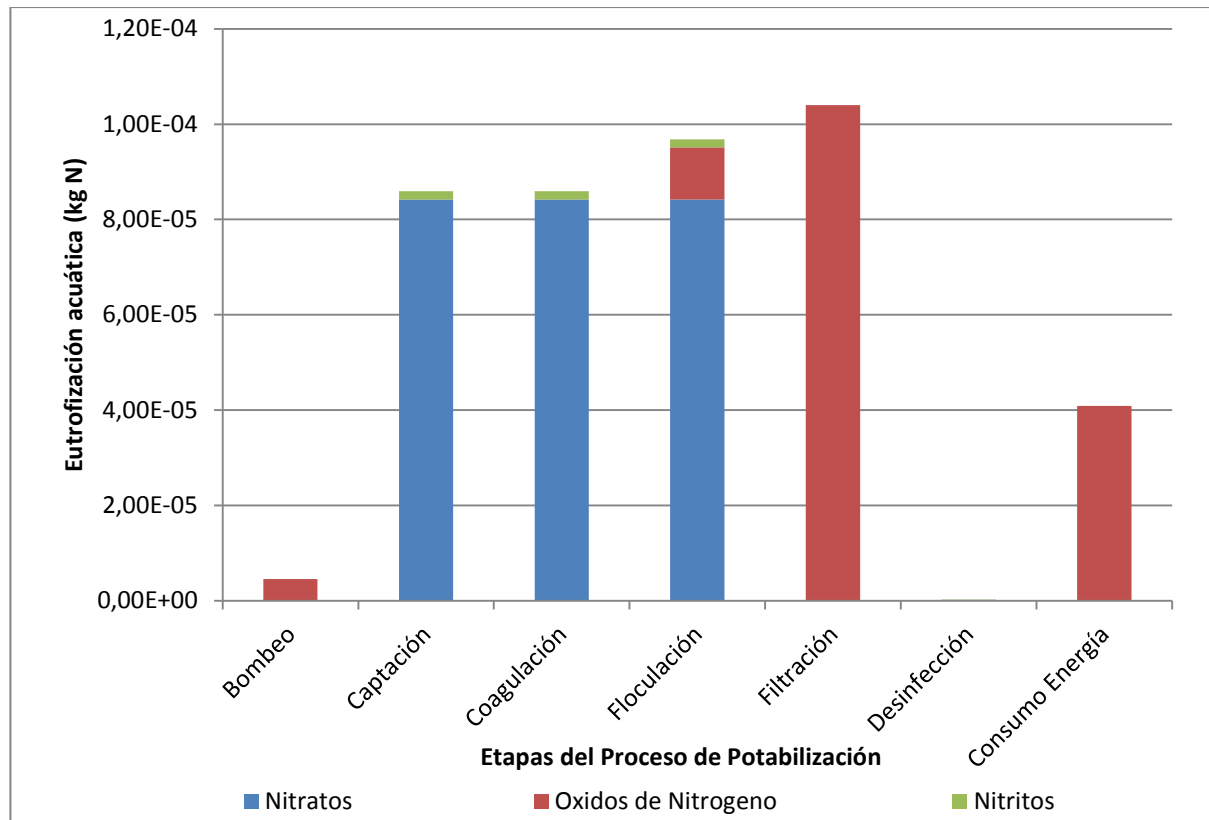
El impacto antes descrito está relacionado directamente al tratamiento de agua proveniente del río Frío en un 62% (contenido de nitratos, nitritos y otros), al consumo de energía eléctrica en 38% (presencia de óxidos de nitrógeno) y al consumo de ACPM 0,01% (contenido de óxidos de nitrógeno); como se puede observar en la **Figura 25**.

Tabla 16. Resultados del Perfil Medio Ambiental categoría Eutrofización Acuática - PTAP FLORIDABLANCA.

Corriente	Bombeo	Captación	Coagulación	Floculación	Filtración	Desinfección	Consumo Energía
Sistema Río Frío	0,00E+00	8,59E-05	8,59E-05	8,59E-05	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Energía Mix Colombiana	4,54E-06	0,00E+00	0,00E+00	1,09E-05	1,04E-04	0,00E+00	4,09E-05
Sistema Río Frío Tratado	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	2,36E-07	0,00E+00
ACPM	4,61E-08	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00

Total kg N	4,59E-06	8,59E-05	8,59E-05	9,68E-05	1,04E-04	2,36E-07	4,09E-05
------------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------

Figura 25. Análisis del Perfil Medioambiental para la categoría Eutrofización Acuática - PTAP FLORIDABLANCA.



- **Análisis del Perfil medioambiental para la categoría de Toxicidad Humana.**

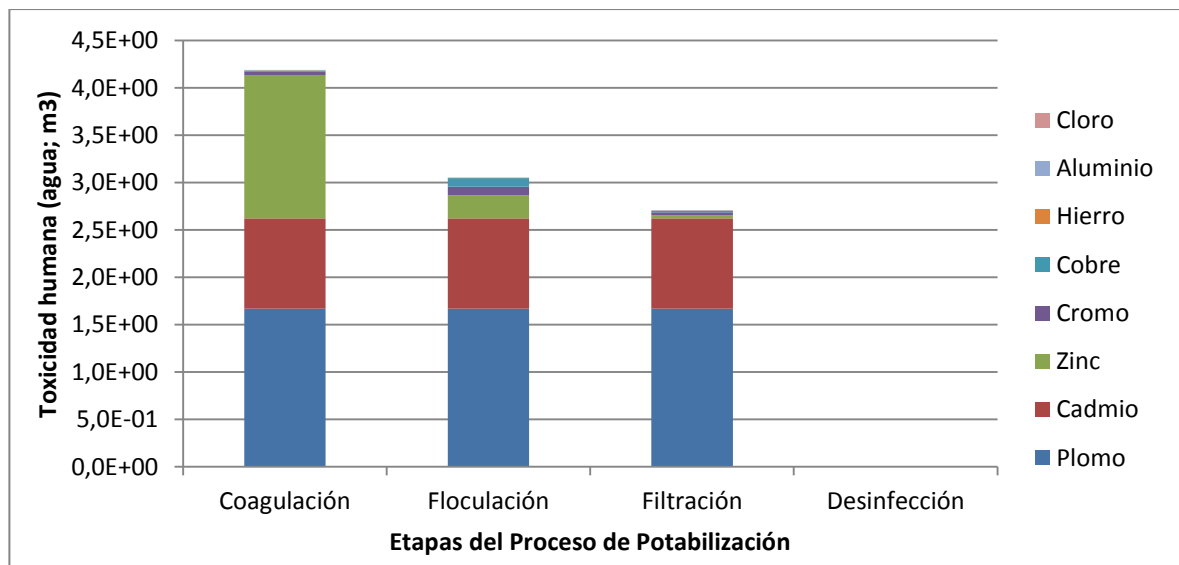
Respecto a la categoría de Toxicidad humana al agua (m³), esta se ve afectada por las etapas de coagulación, floculación, filtración y desinfección, con una contribución ambiental de 42%, 31%, 27% y 0,001% para los procesos mencionados, como se presenta en la **Tabla 17**. El impacto ambiental potencial está asociado por la generación de lodos en un 99% (presencia de metales y compuestos orgánicos) y el tratamiento del agua proveniente del río Frío en 1 % (contenido de metales y material inorgánico).

Tabla 17. Resultados del Perfil Medio Ambiental categoría Toxicidad Humana - PTAP FLORIDABLANCA.

Corriente	Coagulación	Floculación	Filtración	Desinfección
Lodo Sedimentador FLORIDABLANCA	4,18E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Lodo Floculador FLORIDABLANCA	0,00E+00	3,05E+00	0,00E+00	0,00E+00
Lodo Filtro FLORIDABLANCA	0,00E+00	0,00E+00	2,70E+00	0,00E+00
Sistema Río Frío Tratado	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	6,05E-06
Total (m3)	4,18E+00	3,05E+00	2,70E+00	6,05E-06

En la **Figura 26**, se logra observar la contribución ambiental directa por la generación de lodos, pues se debe al gran contenido de metales como son el plomo (50%), cadmio (29%), zinc (18%) y cromo (2%), principalmente.

Figura 26. Análisis del Perfil Medioambiental de la categoría Toxicidad Humana- PTAP FLORIDABLANCA.



- **Perfil medioambiental para la categoría de Acidificación.**

El análisis sobre el impacto ambiental potencial asociado a la categoría de Acidificación está representado por los compuestos de óxidos de azufre (SOx) y por óxidos de nitrógeno (NOx) emitidos por el uso y consumo de la energía eléctrica y ACPM, como presenta en la siguiente tabla. Estos impactos se asocian

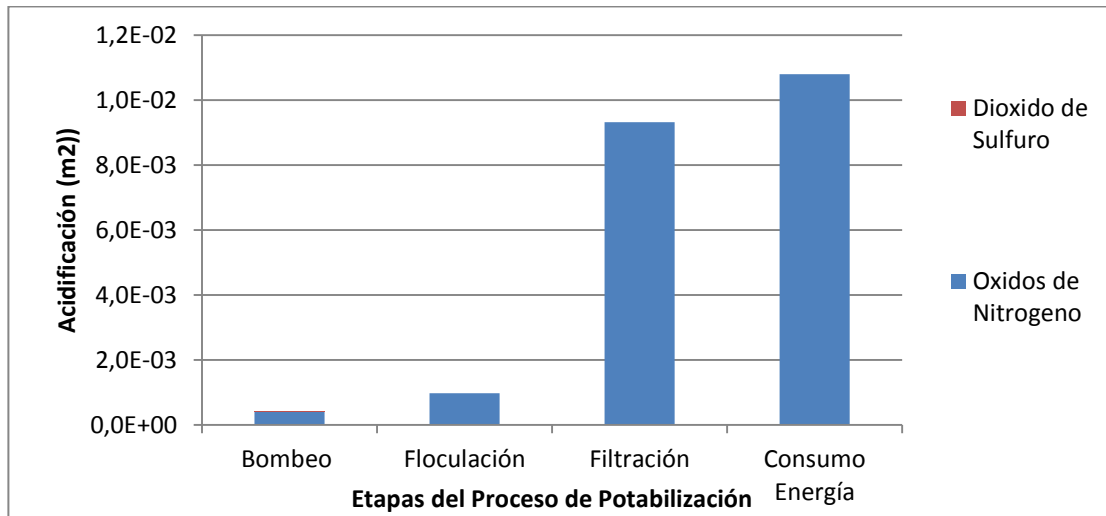
principalmente a las etapas de filtración, consumo de energía, floculación y sistema de bombeo con una participación porcentual de 65%, 25%, 7% y 3% respectivamente.

Tabla 18. Resultados del Perfil Medio Ambiental categoría Acidificación - PTAP FLORIDABLANCA.

Corriente	Bombeo	Floculación	Filtración	Consumo Energía
Energía Mix Colombiana	4,07E-04	9,79E-04	9,32E-03	3,66E-03
ACPM	7,67E-06	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Total (m2)	4,15E-04	9,79E-04	9,32E-03	3,66E-03

En la **Figura 27**, se logra visualizar el impacto atribuido por el dióxido de sulfuro (1%) y los óxidos de nitrógeno en un 99%. Estas sustancias al estar presentes en el medio sufren un proceso de oxidación dando lugar a la formación de ácidos (sulfúrico y nítrico), los cuales se disuelven en el agua, afectando negativamente el agua, suelo y aire.

Figura 27. Perfil Medioambiental de la categoría Acidificación- PTAP FLORIDABLANCA.



- **Análisis del Perfil medioambiental para la categoría de Eco-toxicidad crónica del agua.**

Finalmente se analiza la categoría de Eco-toxicidad crónica al agua (m³) asociada directamente en los procesos de coagulación, floculación, filtración y desinfección con una contribución ambiental de 41%, 40%, 19% y 1% respecto a cada proceso, como se presenta en la siguiente tabla. El impacto ambiental se atribuye a la generación de lodos en cada etapa (sedimentador, floculador y filtros) y más porque estos contienen variedad de contaminantes (aluminio, cadmio, hierro, etc.).

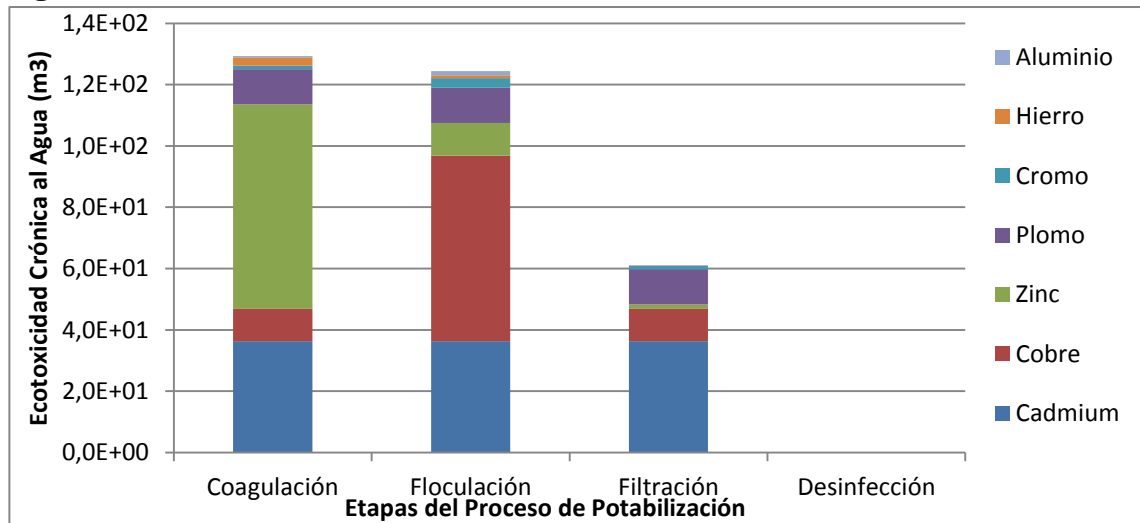
Tabla 19. Resultados del Perfil Medio Ambiental categoría Eco-toxicidad crónica del agua - PTAP FLORIDABLANCA.

Corriente	Coagulación	Floculación	Filtración	Desinfección
Lodo Sedimentador FLORIDABLANCA	1,29E+02	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Lodo Floculador FLORIDABLANCA	0,00E+00	1,24E+02	0,00E+00	0,00E+00
Lodo Filtro FLORIDABLANCA	0,00E+00	0,00E+00	6,11E+01	0,00E+00
Sistema Río Frío Tratado	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	2,03E-02
Total (m3)	1,29E+02	1,24E+02	6,11E+01	2,03E-02

En la siguiente figura se ilustra el comportamiento y contribución ambiental de los compuestos presentes en los lodos y el agua obtenida del río Fío, destacando la

mayor afectación por la presencia de cadmio (34,6%), seguido del cobre (25,9%), zinc (25%) y plomo (10,9%), entre los más importantes.

Figura 28. Perfil Medioambiental de la categoría Eco-toxicidad Crónica del Agua- PTAP FLORIDABLANCA.



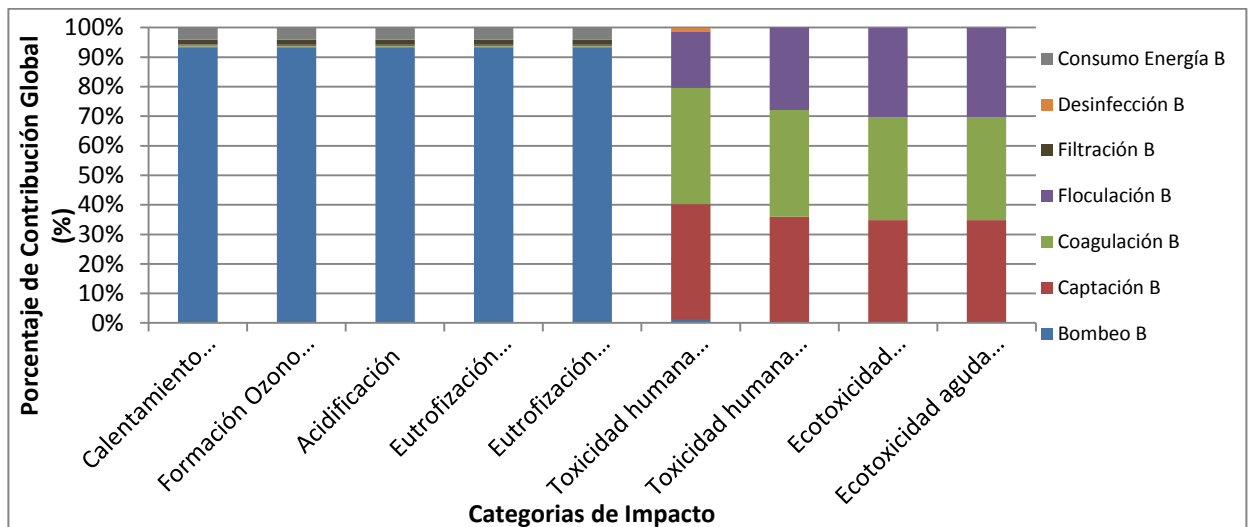
6.5.3. Análisis por Atributos – Planta Bosconia. Al igual que la planta de potabilización FLORIDABLANCA para la planta de Bosconia se realizó el respectivo análisis de contribución ambiental asociado al tratamiento de 1 m³ de agua y a las diferentes etapas que lo integran como son: bombeo, captación, coagulación, floculación, filtración, desinfección y consumo de energía. En laTabla 20, se presentan los resultados obtenidos de la caracterización de los impactos ambientales potenciales por cada etapa de estudio, respecto a las categorías de evaluación definidas en el método de estudio EDIP 2003. De los resultados se destaca que las categorías con mayor participación ambiental fueron: la eco-toxicidad crónica del agua, la toxicidad humana por aire, eco-toxicidad agua del agua, y toxicidad humana por agua; con una contribución ambiental del 65,6%, 25,9%, 6,57% y 1,1% respectivamente.

Tabla 20. Resultados de la Caracterización Global del Impacto Ambiental Potencial - PTAP BOSCONIA.

Categoría de impacto	Unidad	Bombeo B	Captación B	Coagulación B	Floculación B	Filtración B	Desinfección B	Consumo Energía B
Calentamiento Global	kg CO2 eq	5,17E-01	1,69E-03	1,69E-03	2,35E-03	9,45E-03	0,00E+00	2,24E-02
Formación Ozono (vegt.)	m2.ppm.h	7,40E+01	2,43E-01	2,43E-01	3,38E-01	1,36E+00	0,00E+00	3,22E+00
Acidificación	m2	3,31E-01	1,09E-03	1,09E-03	1,51E-03	6,07E-03	0,00E+00	1,44E-02
Eutrofización terrestre	m2	9,77E-01	3,21E-03	3,21E-03	4,46E-03	1,79E-02	0,00E+00	4,25E-02
Eutrofización Acuática	kg N	3,69E-03	1,21E-05	1,21E-05	1,69E-05	6,78E-05	1,00E-07	1,61E-04
Toxicidad humana (aire)	m3	2,48E+01	9,95E+02	9,95E+02	4,83E+02	4,55E-01	3,24E+01	1,08E+00
Toxicidad humana (agua)	m3	0,00E+00	3,86E+01	3,86E+01	2,99E+01	0,00E+00	6,02E-06	0,00E+00
Ecotoxicidad crónica agua	m3	0,00E+00	2,23E+03	2,23E+03	1,94E+03	0,00E+00	1,89E-02	0,00E+00
Ecotoxicidad aguda agua	m3	0,00E+00	2,24E+02	2,24E+02	1,94E+02	0,00E+00	4,73E-03	0,00E+00

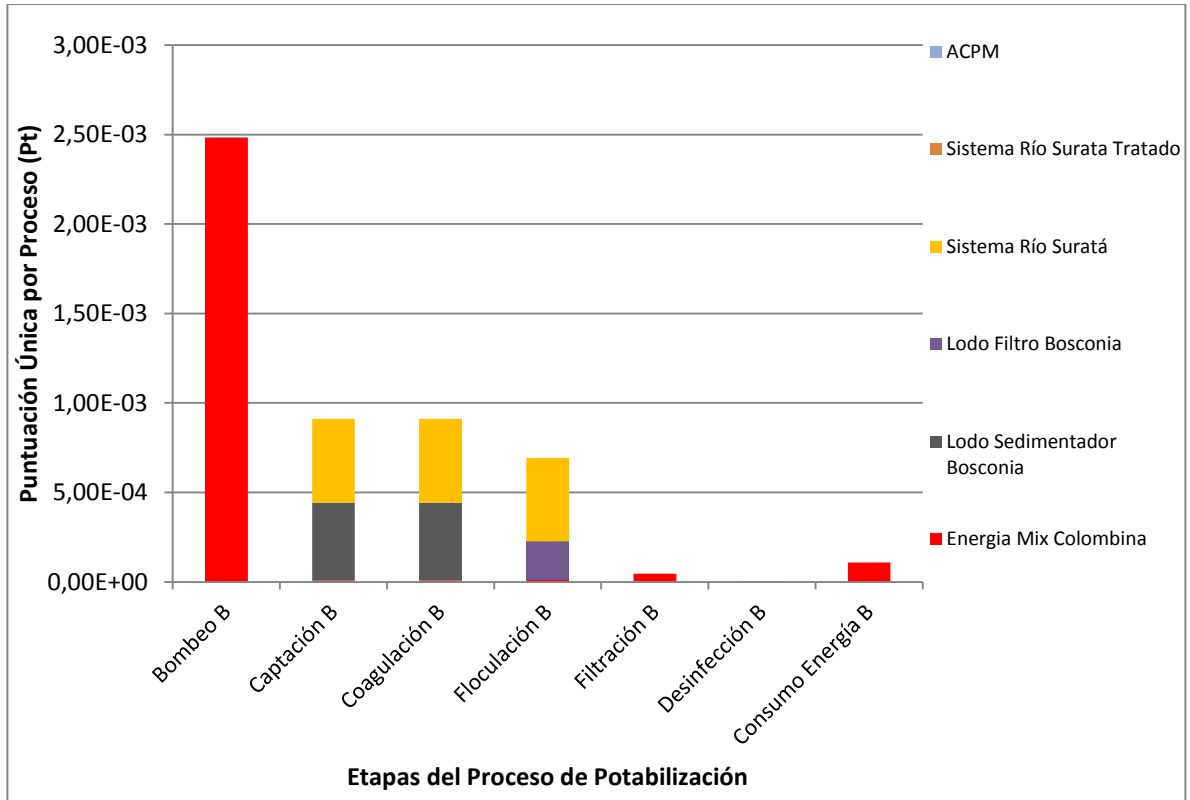
Así mismo, en la siguiente figura se evidencian los resultados explicados en la **Tabla 20**, donde al igual que la Planta FLORIDABLANCA, las etapas de mayor influencia fueron la captación, coagulación, floculación, bombeo, desinfección, filtración y el consumo de energía con una participación del 35,7%, 35,7%, 27,1%, 1%, 0,33%, 0,045% y 0,019% para cada etapa. El análisis anterior fue asociado directamente por el tratamiento del agua obtenida del Río Suratá (contaminadas por metales), el consumo de energía eléctrica para el proceso de potabilización como el servicio de distribución, el consumo de químicos y la generación de lodos.

Figura 29. Caracterización Global del Impacto Ambiental Potencial - PTAP BOSCONIA.



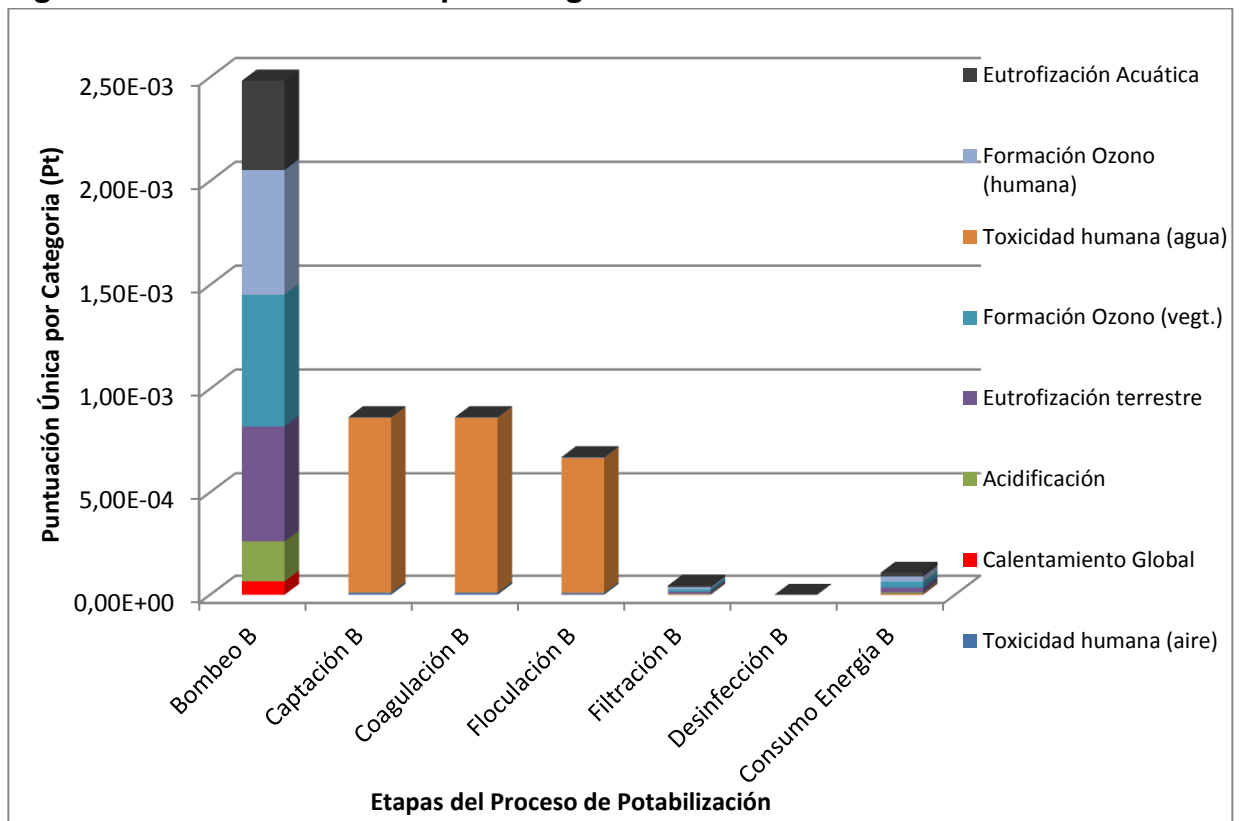
El paso siguiente del análisis global de la planta Bosconia fue la evaluación y análisis por contribución para cada etapa del proceso objeto de estudio según la valoración de puntuación única (Pt). En la **Figura 30**, se visualizan los resultados de contribución ambiental validados para cada proceso, resaltando los de mayor contribución ambiental como fue el caso del sistema de bombeo, captación, coagulación y filtración, en donde el aporte ambiental para cada una de ellas fue del 48,2%, 17,7% y 13,5%. Estos aportes de impacto ambiental potencial están asociados al consumo de energía eléctrica en 52% (emisión de atmosférica por contaminantes como CH₄, NO_x, SO_x), el tratamiento del influente en 28% (presencia de metales según caracterización de laboratorio) y la generación de lodos (presencia de compuestos inorgánicos, orgánicos y metales) en 22% de la contribución global ambiental.

Figura 30. Puntuación única por proceso - PTAP BOSCONIA



En la **Figura 31**, se presenta la afectación de los impactos involucrados en cada proceso y que contribuyen de forma negativa las categorías de estudio, como fueron: de toxicidad humana (agua) en un 46,75% del impacto global (Pt), seguido de la categoría formación de ozono por vegetación (13,52%), formación de ozono por actividades humanas (12,79%) y eutrofización terrestre (11,89%) y acuática (9,17%) y la acidificación (4,17%) principalmente, tal como se logra observar en la siguiente figura de contribución ambiental por categorías según la puntuación única evaluada en Pt.

Figura 31. Puntuación única por categoría - PTAP FLORIDABLANCA.



Como contribución y aporte al análisis global de impactos potenciales se realizó el análisis de caracterización para cada perfil medioambiental según las categorías de impacto de mayor significancia para la planta de Bosconia. A continuación se describen las categorías más influyentes en el proceso:

- ***Análisis Perfil medioambiental para la categoría de Calentamiento Global, formación de ozono por vegetación y por actividades humanas.***

Como se explicó en el análisis de la planta Bosconia, en este caso también se agruparon las categorías de calentamiento global, formación de ozono por vegetación y por actividades humanas pues están asociadas por el consumo de energía eléctrica y consumo de APCM. En las **Figuras 32, 33 y 34**, se presentan los perfiles medioambientales que reflejan el impacto ambiental potencial obtenido

por causa de las emisiones de metano, monóxido y dióxido de carbono y algunos hidrocarburos generados por el consumo de energía eléctrica y de ACPM. De las figuras cabe destacar que las etapas de proceso con mayor afectación por las tres categorías: el sistema de bombeo, el consumo de energía y la etapa de filtración, considerando una contribución ambiental del 93%, 4% y 3% respectivamente. Este comportamiento es similar para las tres categorías calentamiento Global (59% CH₄ y 40% CO₂), formación de ozono vegetal y humano (93% NO_x y 6% CH₄) y es influenciado por la composición y cantidad de gases emitidos a la atmosfera.

Figura 32. Perfil ambiental de la categoría Calentamiento Global - PTAP BOSCONIA.

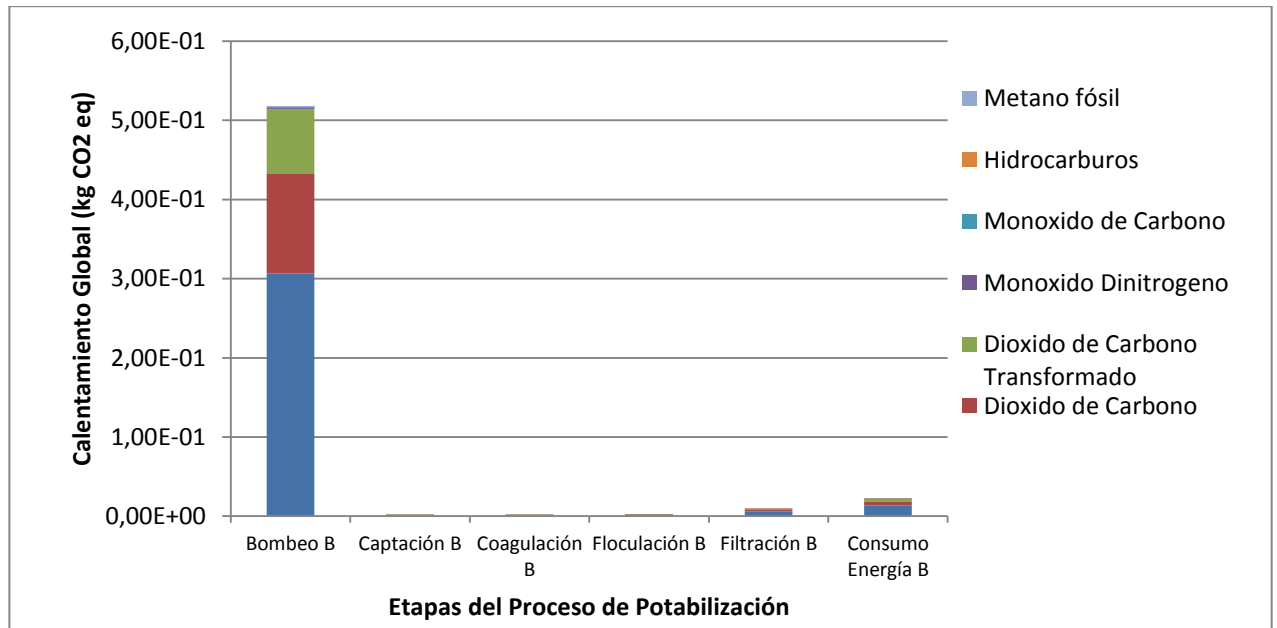


Figura 33. Perfil ambiental de la categoría Formación de Ozono por vegetación - PTAP BOSCONIA.

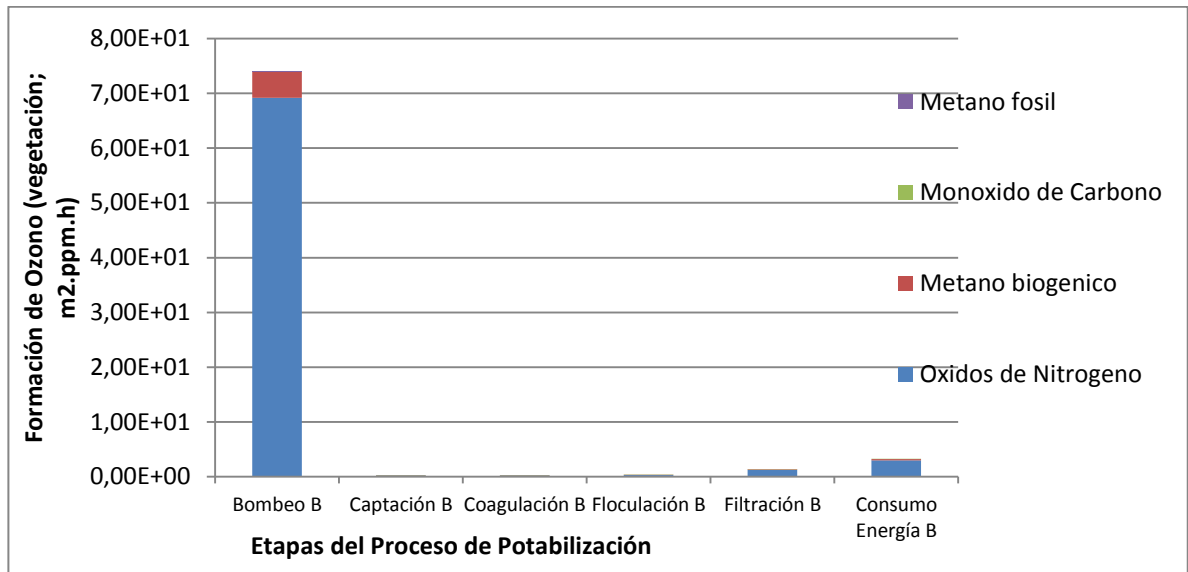
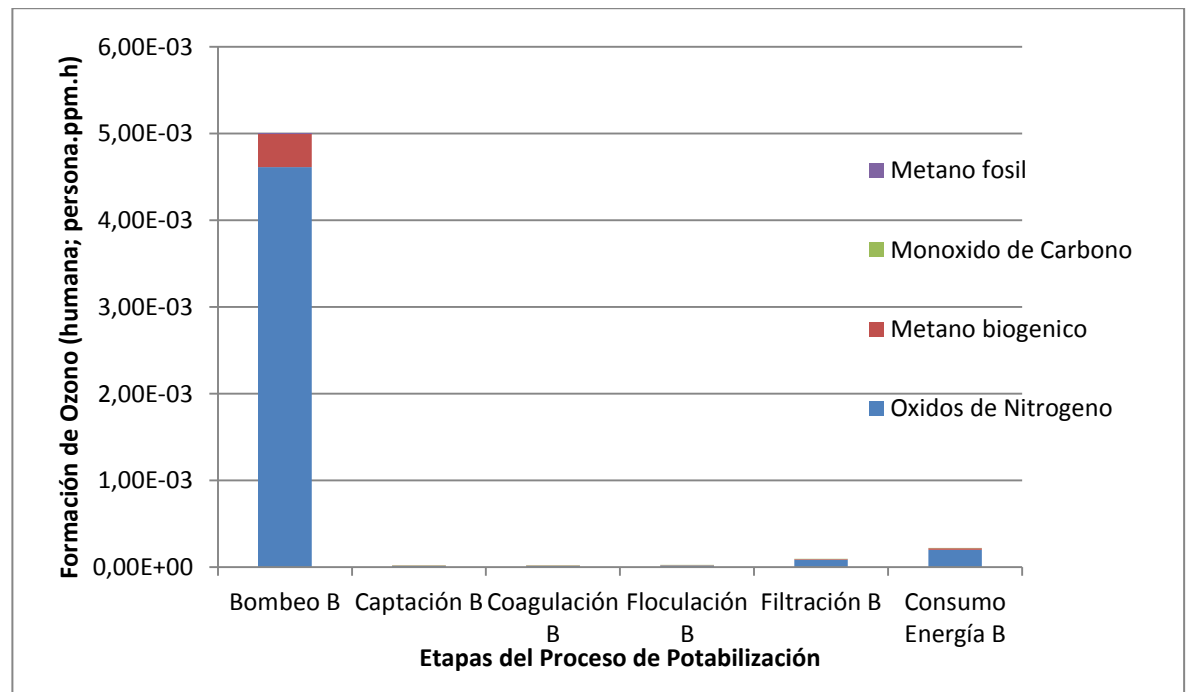


Figura 34. Perfil ambiental de la categoría Formación de Ozono por actividades humanas - PTAP BOSCONIA.



Como aporte adicional se presenta en las **Tablas 21, 22 y 23**, los resultados del perfil medioambiental antes explicado para cada categoría. De las tablas se puede extraer que la etapa con mayor contribución en las categorías en el sistema de bombeo (93%), seguido del consumo de energía (4%) y de la etapa de filtración (2%), donde el impacto es atribuido al consumo de energía eléctrica para las etapas en un 99%.

Tabla 21. Resultados del Perfil Medio Ambiental categoría Calentamiento global - PTAP BOSCONIA.

Corriente	Bombeo B	Captación B	Coagulación B	Floculación B	Filtración B	Consumo Energía B
Energía Mix Colombiana	5,14E-01	1,69E-03	1,69E-03	2,35E-03	9,45E-03	2,24E-02
ACPM	2,51E-03	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Total (kg CO2eq)	5,17E-01	1,69E-03	1,69E-03	2,35E-03	9,45E-03	2,24E-02

Tabla 22. Resultados del Perfil Medio Ambiental Formación de Ozono por Vegetación - PTAP BOSCONIA.

Corriente	Bombeo B	Captación B	Coagulación B	Floculación B	Filtración B	Consumo Energía B
Energía Mix Colombiana	7,40E+01	2,43E-01	2,43E-01	3,38E-01	1,36E+00	3,22E+00
ACPM	5,40E-03	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Total (m2.ppm.h)	7,40E+01	2,43E-01	2,43E-01	3,38E-01	1,36E+00	3,22E+00

Tabla 23. Resultados del Perfil Medio Ambiental Formación de Ozono por Actividades Humanas - PTAP BOSCONIA.

Corriente	Bombeo B	Captación B	Coagulación B	Floculación B	Filtración B	Consumo Energía B
Energía Mix Colombiana	5,00E-03	1,64E-05	1,64E-05	2,29E-05	9,18E-05	2,18E-04
ACPM	3,63E-07	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Total (persona.ppm.h)	5,00E-03	1,64E-05	1,64E-05	2,29E-05	9,18E-05	2,18E-04

- **Análisis del Perfil medioambiental para la categoría Eutrofización Acuática**

Los impactos ambientales atribuidos al perfil medioambiental de la categoría Eutrofización Acuática obedecen al consumo de energía eléctrica (99%), consumo de combustible (0,007%) y al tratamiento del agua captada del río Suratá (0,0025%), tal como se presenta en la siguiente tabla. A su vez, se ratifica que la etapa con

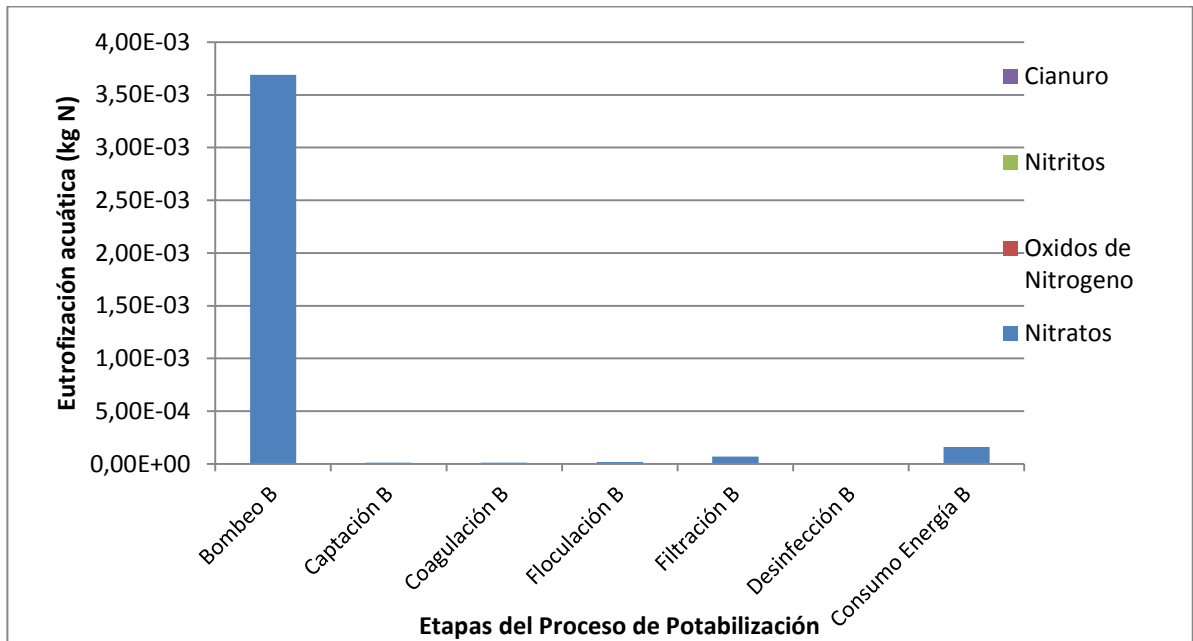
mayor contribución ambiental (93%) es el sistema de bombeo (consumo de energía para el bombeo y distribución del agua desde la PTAP hasta el consumidor), seguido de la etapa de consumo de energía (4,1%) y del proceso de filtración (1,7%).

Tabla 24. Resultados del Perfil Medio Ambiental por Eutrofización Acuática - PTAP BOSCONIA.

Corriente	Bombeo B	Captación B	Coagulación B	Floculación B	Filtración B	Desinfección B	Consumo Energía B
Energía Mix Colombiana	3,69E-03	1,21E-05	1,21E-05	1,69E-05	6,78E-05	0,00E+00	1,61E-04
ACPM	2,76E-07	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Sistema Río Suratá Tratado	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,00E-07	0,00E+00
Sistema Río Suratá	0,00E+00	4,23E-12	4,23E-12	4,23E-12	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Total (kg N)	3,69E-03	1,21E-05	1,21E-05	1,69E-05	6,78E-05	1,00E-07	1,61E-04

Así mismo, en la Figura 35, se observa la contribución ambiental por parte de la generación de nitratos (99%) y de óxidos de nitrógeno (0,0025%) obtenidos en las diferentes etapas de proceso principalmente en el sistema de bombeo (93.19%), seguido de la etapa de consumo de energía (4,06%) y del proceso de filtración (1,71%). Es de resaltar que el proceso de energía eléctrica impacto no solo las categorías con relación a las emisiones atmosféricas sino también esta categoría del recurso hídrico, debido a que la energía colombiana es generada principalmente por hidroeléctricas.

Figura 35. Perfil ambiental de la categoría por Eutrofización Acuática - PTAP BOSCONIA.



- **Análisis del Perfil medioambiental para la categoría Toxicidad Humana.**

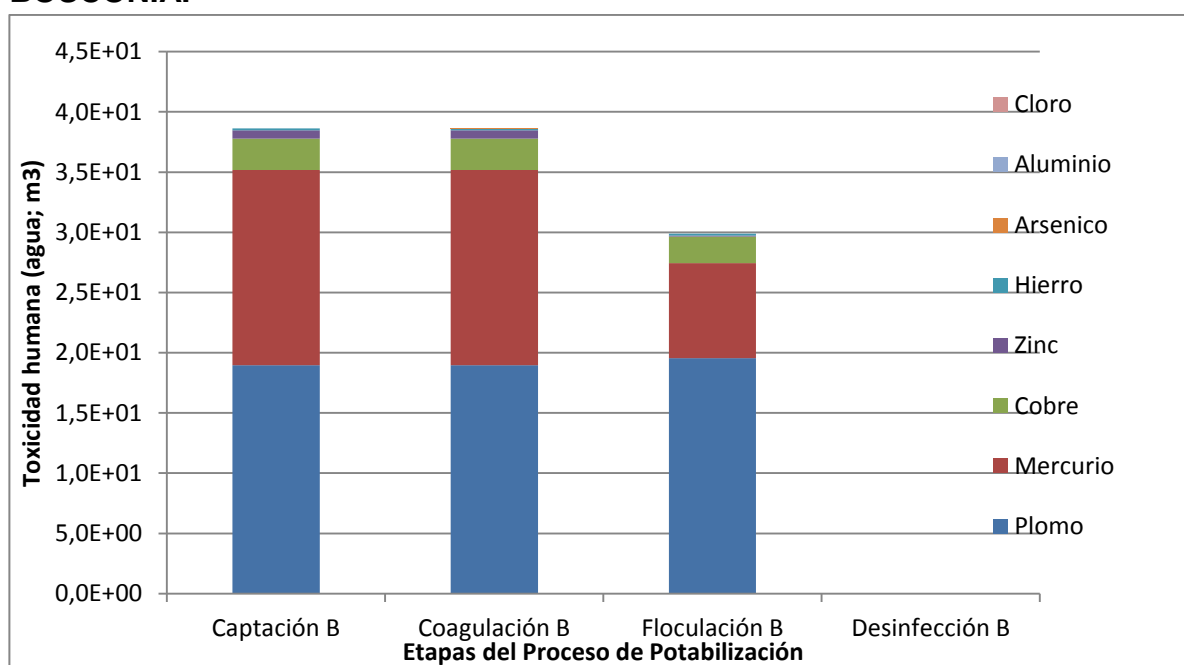
En esta categoría se asocia el impacto ambiental potencial por el tratamiento del agua proveniente del río Surata en un 59,66% (presencia de contaminantes) y la generación de lodos en las diferentes etapas, con una participación ambiental de 40,33%. En la siguiente tabla se presentan los resultados del perfil ambiental del cual es importante mencionar la contribución ambiental por parte de la etapa de captación (36,06%), coagulación (36,06%) y floculación (27,88%) respectivamente.

Tabla 25. Resultados del Perfil Medio Ambiental por Toxicidad Humana - PTAP BOSCONIA.

Corriente	Captación B	Coagulación B	Floculación B	Desinfección B
Sistema Río Suratá	2,13E+01	2,13E+01	2,13E+01	0,00E+00
Lodo Sedimentador Bosconia	1,73E+01	1,73E+01	0,00E+00	0,00E+00
Lodo Filtro Bosconia	0,00E+00	0,00E+00	8,57E+00	0,00E+00
Sistema Río Suratá Tratado	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	6,02E-06
Total	3,86E+01	3,86E+01	2,99E+01	6,02E-06

De igual forma se presenta en la siguiente figura la contribución ambiental (kg N) aportado por las diferentes etapas del proceso en relación al contenido de sustancias contaminantes. Del análisis es válido enunciar la contribución ambiental importante que hace el Plomo, Cobre, Mercurio y Zinc del 53,64%, 37,61%, 6,93% y 1,36% respectivamente, en relación a su presencia en el agua tratada y el lodo generado.

Figura 36. Perfil ambiental de la categoría Toxicidad Humana- PTAP BOSCONIA.



- **Análisis del Perfil medioambiental para la categoría Acidificación.**

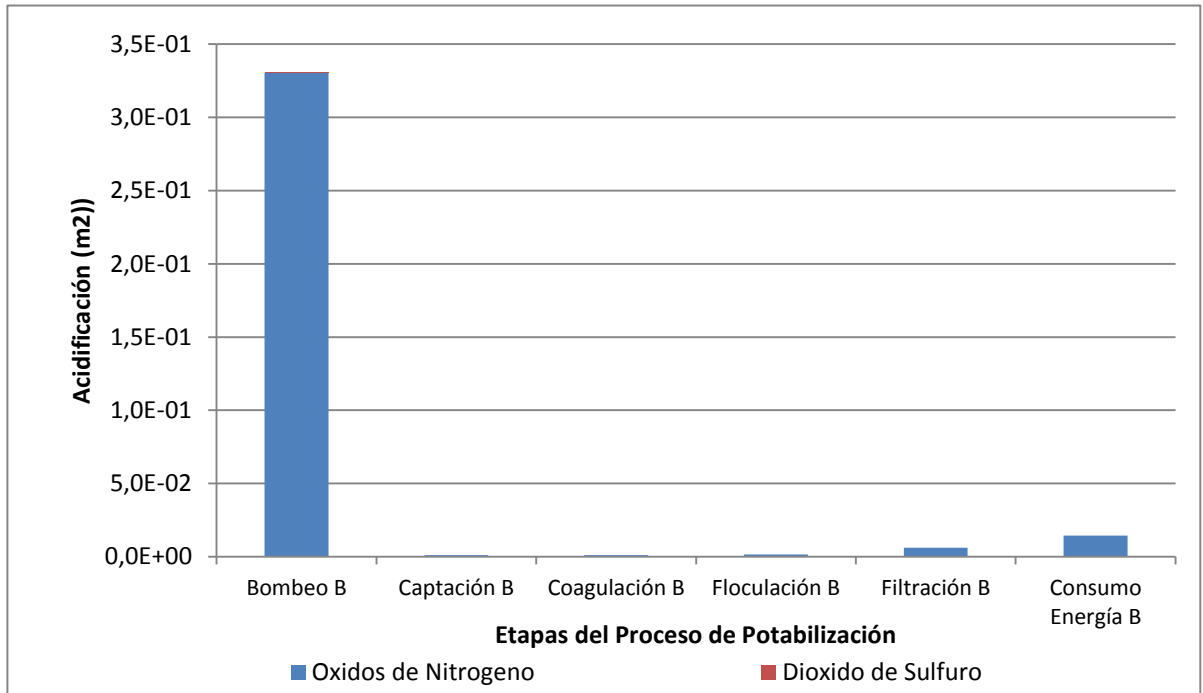
El impacto ambiental potencial asociado a esta categoría está dada por el consumo de energía eléctrica en un 99,9% y por el consumo de ACPM en un 0,01%, específicamente en los procesos de sistema de bombeo (93.19%), seguido de la etapa de consumo de energía (4,06%) y del proceso de filtración (1,71%), tal como se presenta en la siguiente tabla.

Tabla 26. Resultados del Perfil Medio Ambiental por Acidificación - PTAP BOSCONIA.

Corriente	Captación B	Coagulación B	Floculación B	Desinfección B
Sistema Río Suratá	1,89E+03	1,89E+03	1,89E+03	0,00E+00
Lodo Sedimentador Bosconia	3,45E+02	3,45E+02	0,00E+00	0,00E+00
Lodo Filtro Bosconia	0,00E+00	0,00E+00	5,42E+01	0,00E+00
Sistema Río Suratá Tratado	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,89E-02
Total	2,23E+03	2,23E+03	1,94E+03	1,89E-02

Finalmente, en la Figura 37, se presenta el aporte dado por los contaminantes emitidos por el uso de la energía eléctrica y el consumo de combustible. De la figura se logra apreciar que el principal contaminante es el óxido de nitrógeno con una contribución ambiental del 99,01% y del dióxido de azufre del 0,01%, agentes presentes en la materia prima mencionada y que se emiten en la etapa de bombeo y consumo de energía.

Figura 37. Perfil medioambiental de la categoría Acidificación- PTAP BOSCONIA.



- **Análisis del Perfil medioambiental para la categoría Ecotoxicidad crónica al agua.**

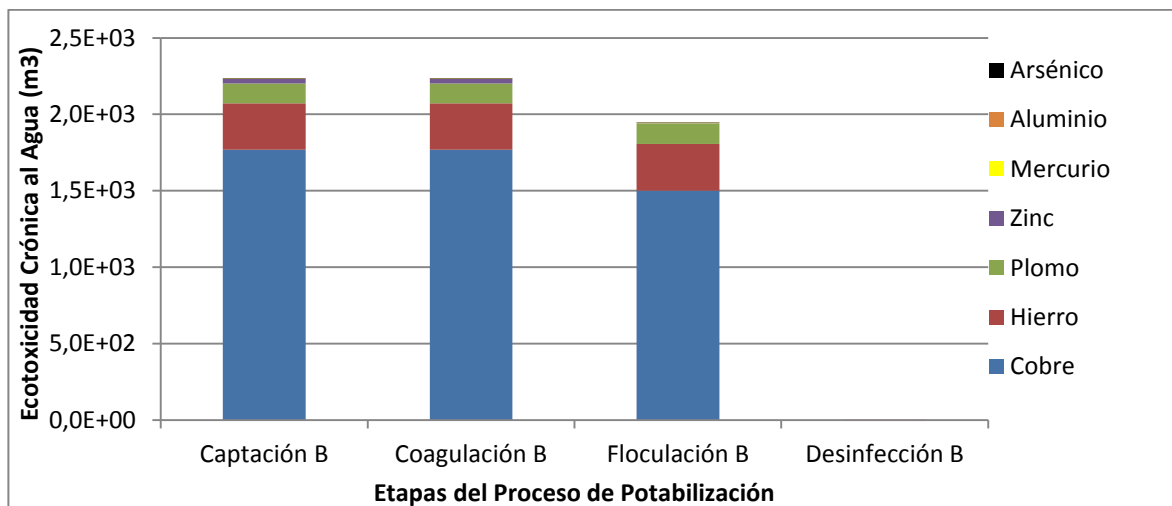
El análisis del perfil medioambiental para esta categoría permitió establecer que el impacto ambiental potencial está asociado por el tratamiento del agua captada del Río Suratá (88,39%) y de la generación de lodos en el sedimentador (10,76%) y el filtro (0,85%). El impacto ambiental en porcentaje, atribuido a las etapas de captación, coagulación y floculación fue de aproximadamente del 34,84%, 34,84% y 30,81% respectivamente, tal como se presenta en la siguiente tabla.

Tabla 27. Resultados del Perfil Medioambiental por Toxicidad crónica del agua - PTAP BOSCONIA.

Categoría de impacto	Unidad	PTAP FLORIDABLANCA SIN BOMBEO	PTAP BOSCONIA SIN BOMBEO
Calentamiento Global	Pt	2,75E-06	4,75E-06
Formación Ozono (vegt.)	Pt	2,68E-05	4,63E-05
Formación Ozono (Human)	Pt	2,53E-05	4,38E-05
Acidificación	Pt	8,26E-06	1,43E-05
Eutrofización terrestre	Pt	2,36E-05	4,07E-05
Eutrofización Acuática	Pt	4,83E-05	3,14E-05
Toxicidad humana (agua)	Pt	2,18E-04	2,35E-03
Total	Pt	3,54E-04	2,67E-03

Como soporte al análisis anterior, se incluye en la siguiente figura la contribución ambiental en porcentaje, sobre las afectaciones que tiene cada etapa del proceso respecto a la sustancia presente en la misma. Por lo anterior, se destaca la participación del cobre con una contribución total del 78,56%, seguido del hierro (14,25%), plomo (6%) y zinc (1%) aproximadamente.

Figura 38. Perfil ambiental de la categoría Eco-toxicidad crónica al agua- PTAP BOSCONIA.



6.5.4. Análisis Comparativo. Finalizado el análisis por atributo para el tratamiento de 1m^3 de agua por las planta de potabilización Floridablanca y Bosconia, se procedió a realizar un escenario comparativo entre las dos plantas con la eliminación previa de la etapa de bombeo, puesto que la planta de Floridablanca tiene un funcionamiento por gravedad a diferencia de la planta Bosconia quien tiene mayor consumo energético por captación y distribución del mismo servicio. Por ende, al realizar ese ajuste, las dos plantas quedaron en igualdad de condiciones, permitiendo así realizar la comparación respectiva.

En la comparación se determinó que la planta con mayor contribución ambiental según los resultados presentados en la **Figura 39**, corresponden a la planta Bosconia, con una contribución porcentual del 96% comparada a la planta Floridablanca que obtuvo un impacto ambiental potencial del 4%, respecto al total. Estos impactos están atribuidos principalmente a las categorías de toxicidad humada al agua (62% Floridablanca; 88% Bosconia) y la eutrofización acuática (14% Floridablanca; 1% Bosconia) y terrestre (7% Floridablanca; 2% Bosconia) respectivamente, tal como se presenta en la Tabla 28 y se representa en la **Figura 40**.

Figura 39. Caracterización Global del Impacto Ambiental Potencial Comparativo para las PTAP FLORIDABLANCA Y BOSCONIA.

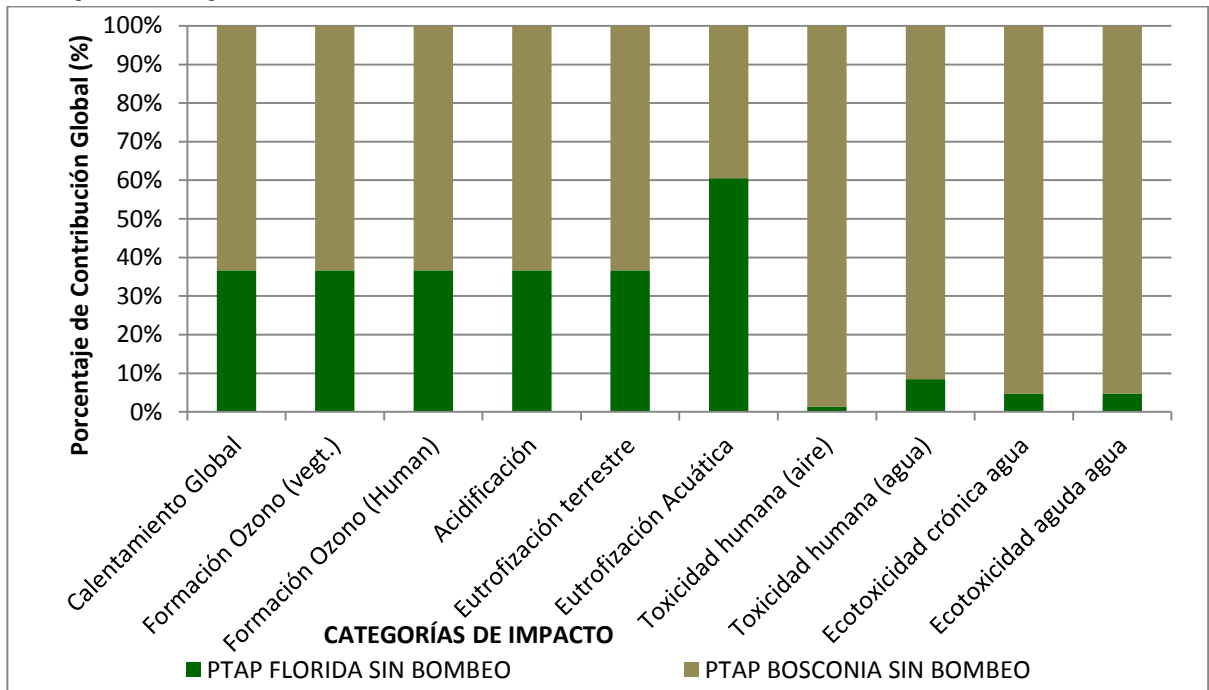


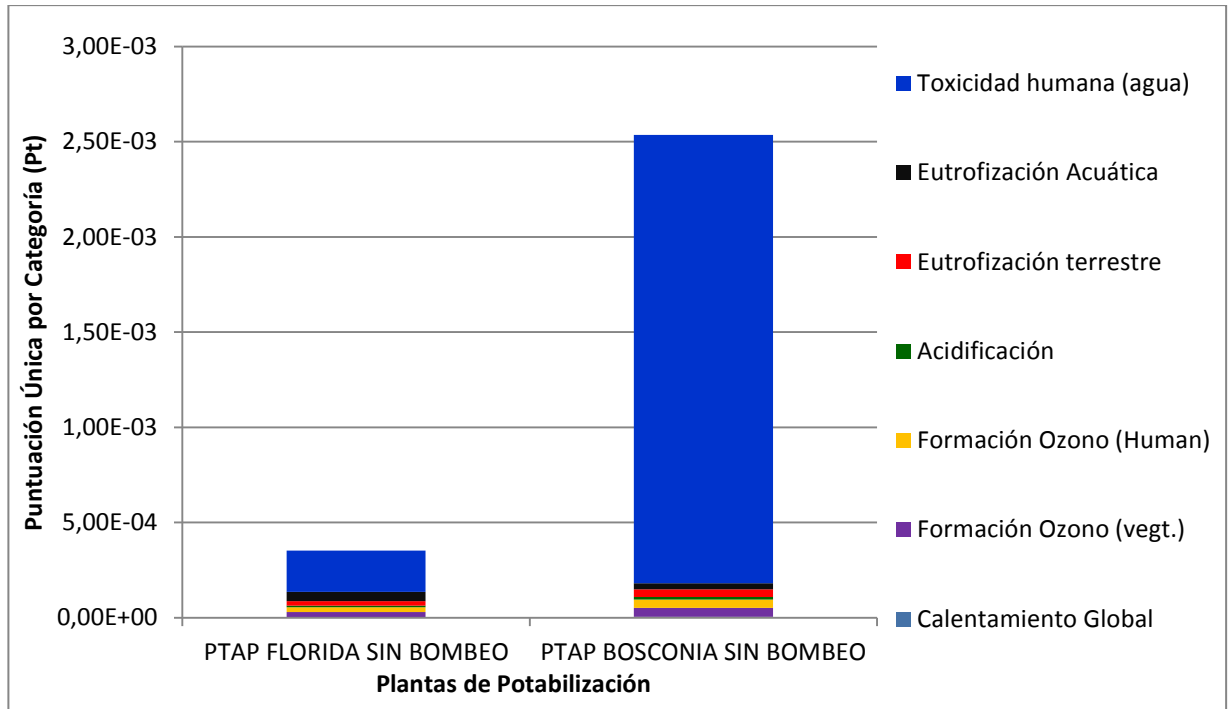
Tabla 28. Resultados de la Puntuación única por Categoría Comparativo para las PTAP FLORIDABLANCA y BOSCONIA.

Categoría de impacto	Unidad	PTAP FLORIDABLANCA SIN BOMBEO	PTAP BOSCONIA SIN BOMBEO
Energía Mix Colombina	Pt	1,05E-04	1,81E-04
Lodo Sedimentador FLORIDABLANCA	Pt	9,19E-05	0,00E+00
Lodo Floculador FLORIDABLANCA	Pt	6,70E-05	0,00E+00
Lodo Filtro FLORIDABLANCA	Pt	5,94E-05	0,00E+00
Sistema Río Frío	Pt	3,01E-05	0,00E+00
Sistema Río Frío Tratado	Pt	4,43E-07	0,00E+00
Sistema Río Surata Tratado	Pt	0,00E+00	4,10E-07
Sistema Río Suratá	Pt	0,00E+00	1,41E-03
Lodo Sedimentador Bosconia	Pt	0,00E+00	8,68E-04
Lodo Filtro Bosconia	Pt	0,00E+00	2,14E-04
Total Procesos	Pt	3,54E-04	2,67E-03

Según la valoración de puntuación única (Pt) por categoría, se obtuvo que la planta de Bosconia contribuyera al impacto ambiental potencial en un 88% del total, comparado a la planta de Floridablanca que aportó el 12% del impacto. Este comportamiento se observa en la **Figura 40**, la afectación a las categorías de

toxicidad humada al agua, la eutrofización acuática y terrestre, como se explicó con antelación.

Figura 40. Puntuación única por categoría - PTAP FLORIDABLANCA Y BOSCONIA



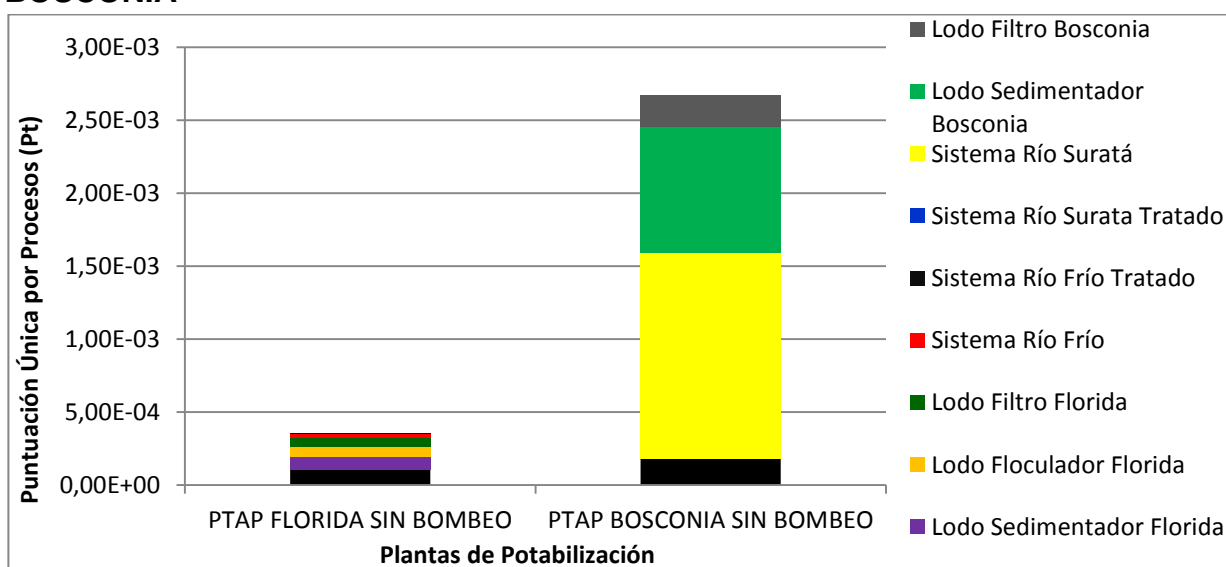
Como soporte al análisis descrito se presentan los resultados obtenidos de la puntuación única por proceso en cada planta, visualizados en la **Tabla 29**. En los resultados se logra apreciar que del 100% de la contribución ambiental estos corresponden principalmente al consumo de energía eléctrica, tratamiento de aguas proveniente de los ríos Frío y Suratá y a la generación de lodos en las diferentes etapas. Al igual que la puntuación por categoría, en esta evaluación la planta Bosconia contribuye en un 88% del total del impacto comparado a la planta de Floridablanca que aporta el 12% del impacto.

Tabla 29. Resultados de la Puntuación única por proceso Comparativo para las PTAP FLORIDABLANCA y BOSCONIA.

Categoría de impacto	Unidad	PTAP FLORIDABLANCA SIN BOMBEO	PTAP BOSCONIA SIN BOMBEO
Energía Mix Colombina	Pt	1,05E-04	1,81E-04
Lodo Sedimentador FLORIDABLANCA	Pt	9,19E-05	0,00E+00
Lodo Floculador FLORIDABLANCA	Pt	6,70E-05	0,00E+00
Lodo Filtro FLORIDABLANCA	Pt	5,94E-05	0,00E+00
Sistema Río Frío	Pt	3,01E-05	0,00E+00
Sistema Río Frío Tratado	Pt	4,43E-07	0,00E+00
Sistema Río Surata Tratado	Pt	0,00E+00	4,10E-07
Sistema Río Surata	Pt	0,00E+00	1,41E-03
Lodo Sedimentador Bosconia	Pt	0,00E+00	8,68E-04
Lodo Filtro Bosconia	Pt	0,00E+00	2,14E-04
Total Procesos	Pt	3,54E-04	2,67E-03

Finalmente, en esta figura se corrobora lo ya mencionado, en donde se visualiza la mayor contribución de impacto en la planta Bosconia por el tratamiento del agua del sistema de Río Frío (53%), seguido de la generación de lodos en el sedimentador (33%) y un 8% de aporte por la generación de lodos en la filtración. Al comparar con la planta Floridablanca esta se ve afectada en menor proporción respecto al valor total del impacto, y los procesos con mayor afectación fueron el consumo de energía (30%) y la generación de lodos (62%).

Figura 41. Puntuación única por proceso - PTAP FLORIDABLANCA Y BOSCONIA



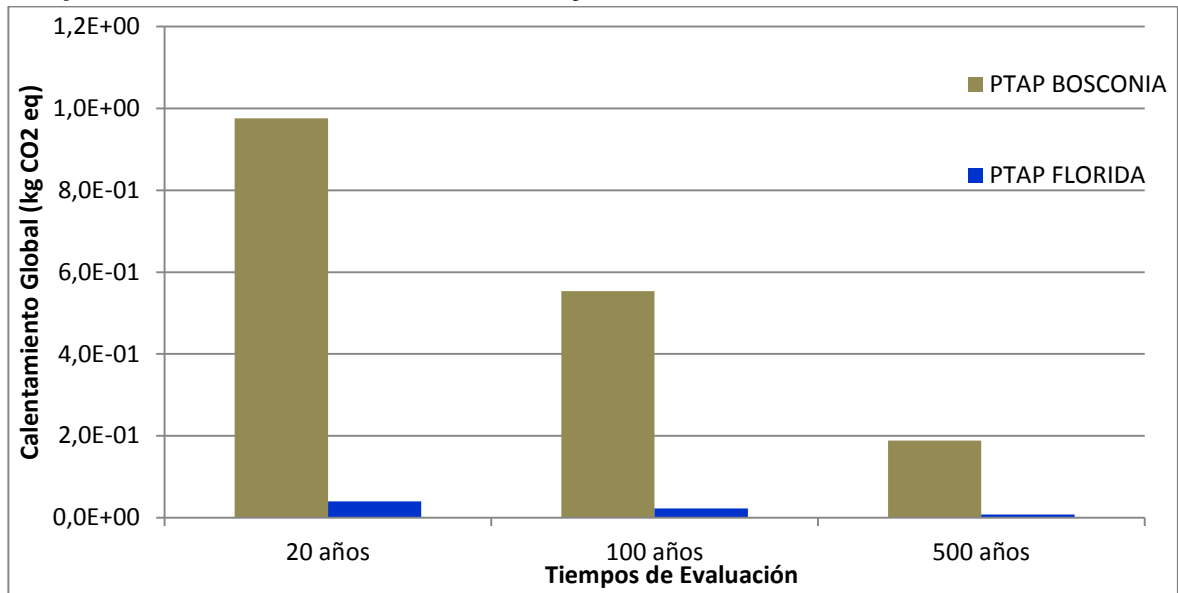
6.5.5. Análisis de Contribución al Poder del Calentamiento Global. Como valor agregado al proyecto se realizó el análisis de contribución al poder del calentamiento global asociado a cada planta, mediante el uso del método IPCC GWP adscrito al Software Simapro. Con este método se valoró la afectación ambiental del calentamiento global (kg CO₂eq) en los diferentes periodos de tiempo estimados por el método (20, 100 y 500 años). En la siguiente tabla, se presentan los resultados obtenidos en la evaluación y que son la base para la comparación de las dos unidades de proceso. Como se puede observar en la tabla, la contribución del calentamiento global esta originado principalmente por el consumo de energía eléctrica proveniente de una central hidroeléctrica en un 99% y la diferencia del impacto, atribuida al consumo de combustible (1% ACPM).

Tabla 30. Resultados del poder del Calentamiento Global Comparativo para las plantas PTAP FLORIDABLANCA y BOSCONIA.

ETAPA	PTAP FLORIDABLANCA			PTAP BOSCONIA		
	20 años	100 años	500 años	20 años	100 años	500 años
Energia Mix Colombiana	3,95E-02	2,23E-02	7,64E-03	9,76E-01	5,51E-01	1,89E-01
ACPM	6,20E-06	4,18E-04	7,00E-07	3,72E-05	2,51E-03	4,20E-06
Total (kg CO₂eq)	3,95E-02	2,27E-02	7,64E-03	9,76E-01	5,54E-01	1,89E-01

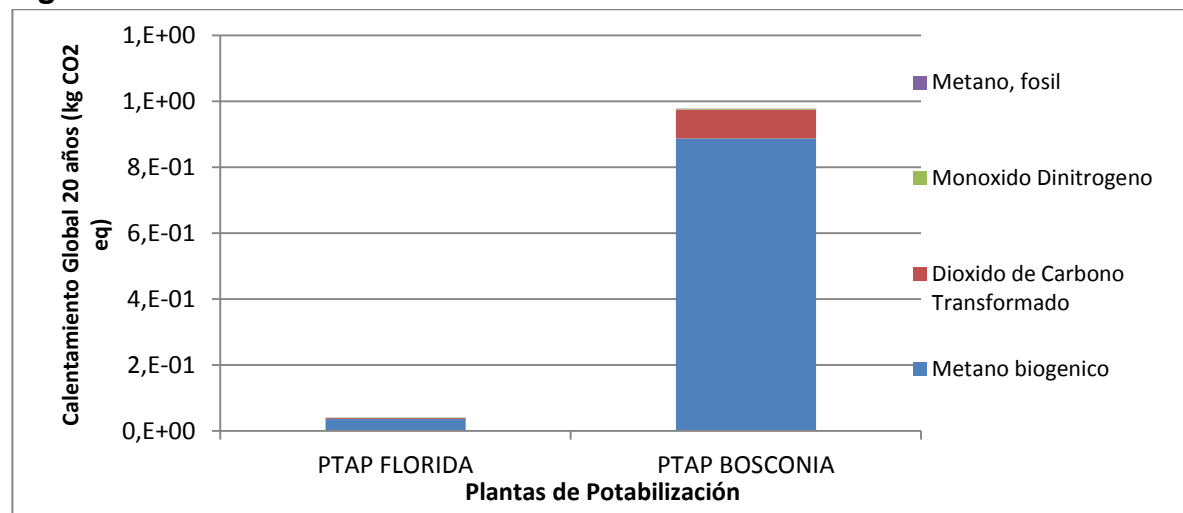
En la siguiente figura se presentan las variaciones de las emisiones de CO₂eq, a lo largo del tiempo, para las dos plantas de estudio (FLORIDABLANCA y Bosconia). En la figura se logra observar que la mayor contribución para cada periodo evaluado es de aproximadamente un 96% por parte de la planta Bosconia. Lo anterior se debe, al mayor consumo de energía eléctrica en el proceso distribución del agua a la planta Morrórico y a otras plantas. De la figura también se aprecia que con el paso del tiempo la atmosfera se ve afectada en menor proporción dependiendo del tiempo de permanencia de los gases de efecto invernadero y por el potencial de calentamiento global de cada uno de ellos.

Figura 42. Contribución comparativa del poder del Calentamiento Global para las plantas PTAP FLORIDABLANCA y BOSCONIA.



Soportando el análisis anterior, cabe mencionar que para el caso del metano (CH_4) este tiene mayor afectación (90%) en un tiempo de 20 años como se observa en la **Figura 43**, comparado al impacto que origina la emisión de dióxido de carbono (CO_2) en un 8% del total de aporte del poder del Calentamiento Global, en ambas plantas.

Figura 43. Poder del Calentamiento Global a 20 años



Para un tiempo de 100 años la contribución del metano es del 59% comparado al dióxido que atribuye un 40.5% del CO_{2eq} como se aprecia en la **Figura 44**; finalmente al evaluar la afectación en un tiempo de 500 años se encuentra un aporte similar como se ilustra en la **Figura 45**. Es de mencionar que dependiendo del tipo de contaminante (gas), este tiene un factor de emisión para cada tiempo de evaluación.

Figura 44. Poder del Calentamiento Global a 100 años

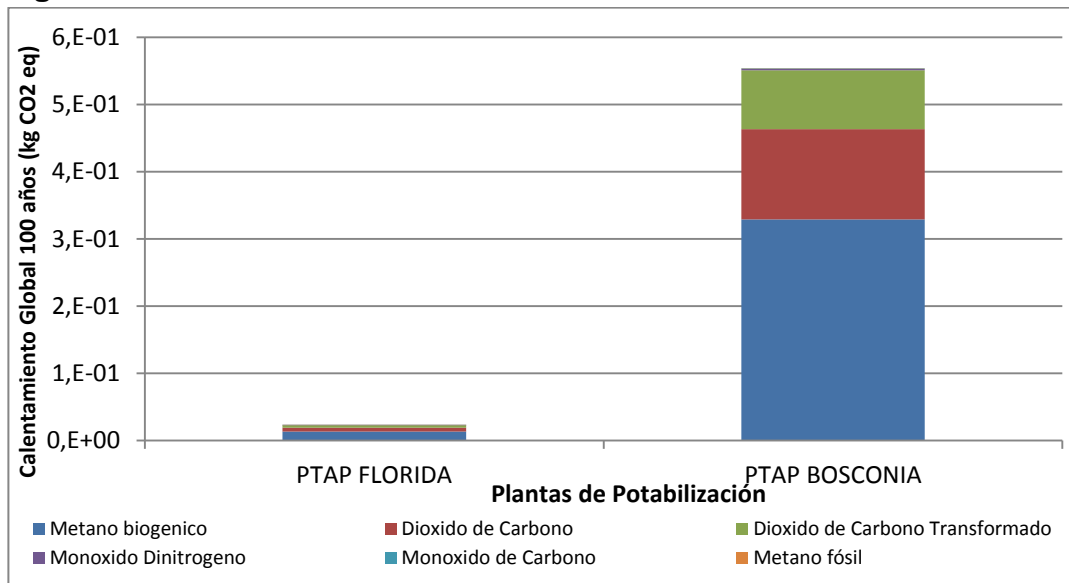
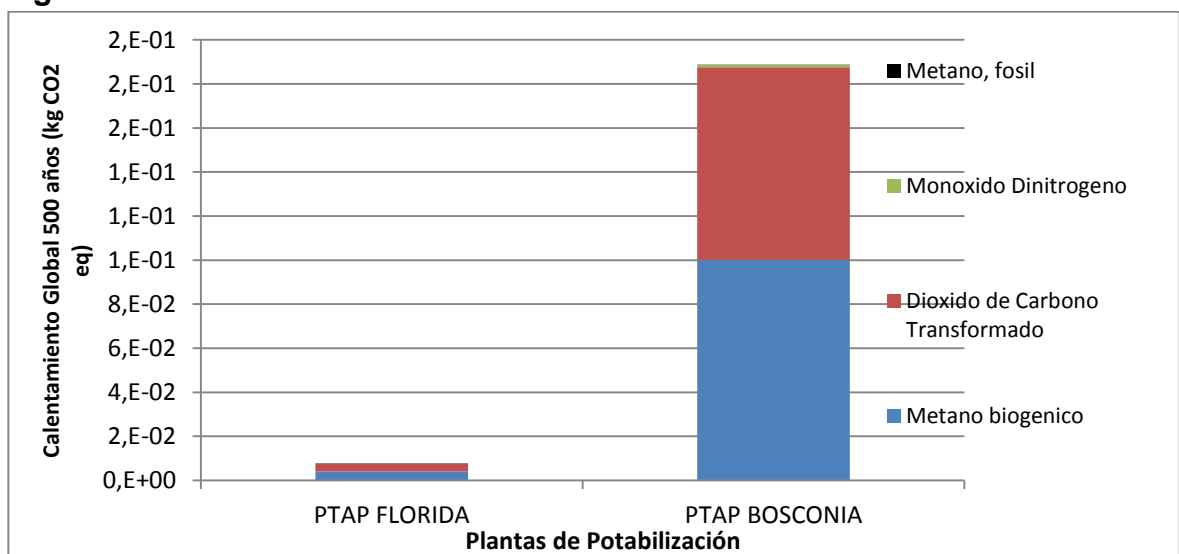


Figura 45. Huella de Carbono a 500 años



7. CONCLUSIONES

Después de analizar e interpretar los resultados obtenidos respecto a los impactos ambientales potenciales asociados al tratamiento de 1 m³ de agua potable en dos plantas potabilizadoras (Floridablanca y Bosconia) del Acueducto de Bucaramanga, se obtuvo las siguientes conclusiones:

- Según el análisis de contribución ambiental global, se logró establecer la carga ambiental para las diferentes etapas del proceso que integra el sistema de potabilización de las plantas de tratamiento de agua potable, Floridablanca y Bosconia; con una contribución importante en la etapa de filtración, por el consumo de energía eléctrica requerido para el lavado de filtros y la generación de lodos producidos en el tratamiento del agua cruda, en las etapas de coagulación y floculación. Es necesario mencionar el alto porcentaje (48,2%) de contribución al impacto ambiental, de la energía eléctrica, consumida en el sistema de bombeo de la planta de Bosconia, requerido para la distribución del agua tratada.
- En el análisis por atributos, se obtuvo que la categoría de impacto de mayor importancia fue la toxicidad humana en el agua, con un 77,48% del impacto global, para la PTAP Floridablanca y en el caso de la PTAP Bosconia la categoría de mayor influencia fue la eco-toxicidad crónica del agua con un 65,6%.
- De acuerdo a los resultados en la caracterización en el ACV, las categorías con mayor afectación fueron: la formación de ozono y el calentamiento global asociado al consumo de energía eléctrica por la emisión a la atmósfera de contaminantes como CH₄, NO_x, SO_x; La toxicidad humana y la ecotoxicidad que se atribuyen a la generación de lodos y su alto contenido de nitratos, nitritos, agentes biológicos y diferentes metales como Plomo, Cadmio, Cromo, Mercurio, Zinc, Cobre, Hierro); así como la Eutrofización y la acidificación por la baja calidad

del agua de los ríos de donde es captado el recurso para su tratamiento y su alto contenido de metales.

- En el análisis comparativo de las plantas Bosconia y Floridablanca, se excluyó el sistema de bombeo de la primera planta en mención, con el fin de comparar el impacto en las etapas del tratamiento. El resultado permitió determinar que la planta Bosconia contribuye en un 96% del impacto total comparada a la planta Floridablanca con un 4%. El alto porcentaje de contribución de la planta Bosconia se debe principalmente a la contaminación del Río Suratá, que afecta la categoría de toxicidad humana al agua. En la planta de Floridablanca, el mayor impacto es producido en la generación de lodos, que son vertidos de nuevo al Río Frio.
- En el análisis de Contribución al Poder del Calentamiento Global usando el método IPCC GWP a 20, 100 y 500 años, permitió concluir que el impacto es originado principalmente por el consumo de energía eléctrica del 99% y por el consumo de combustible (1% ACPM).

8. RECOMENDACIONES

- Se recomienda al Acueducto Metropolitano de Bucaramanga que realice monitoreo y seguimiento de la caracterización de agua cruda de manera más frecuente, específicamente sobre diferentes puntos de los afluentes que abastecen el recurso a las plantas, con el fin de contar con información actualizada.

- De acuerdo al estudio realizado, con relación al alto impacto ambiental potencial generado por el consumo de energía eléctrica por el sistema de Bombeo en la planta de Bosconia, se recomienda hacer uso de energías alternativas o renovables, como la energía eólica o la energía solar que permitan disminuir estos impactos, o en su defecto, realizar una revisión permanente sobre el funcionamiento y mantenimiento de equipos eléctricos, pues estos podrían presentar fallas y estar consumiendo más energía de la requerida (actualización de equipos).

- De igual forma, es importante que el AMB conozca el consumo energético por cada una de las etapas de tratamiento, debido a que la información suministrada es global y fue necesario a partir de cálculos, estimar la energía requerida en cada etapa del proceso, con base en la información recopilada en trabajos e informes de años anteriores.

- Es notorio el alto impacto que produce la generación y vertimiento de lodos en la PTAP de Floridablanca, pues estos son descargados directamente a la cuenca hídrica, por lo que es de suma necesidad el diseño e implementación de una planta de tratamiento de lodos o la implementación de una tecnología que permita dar uso y aprovechamiento a este subproducto y así mismo se pueda minimizar el impacto ambiental potencial generado al medio ambiente.

- Por último es de anotar, que a pesar de que en las PTAP se tiene la caracterización del agua captada día a día, puede verse en los registros de consumo

de químicos (coagulantes y floculantes) que generalmente se usa la cantidad máxima de producto sugerida por el fabricante, por lo que se requiere que se tenga en cuenta los análisis de caracterización de aguas, para luego aplicar la dosis adecuada, con el fin de disminuir los consumos y de paso generar menos cantidad de lodos a la salida de los filtros.

- Finalmente, se sugiere a largo plazo la instalación de plantas de tratamiento de agua potable o sistemas de distribución de agua, en las partes más altas de la ciudad, aprovechando la topografía montañosa colombiana, pues esta permitiría la conducción y distribución del agua por gravedad.

BIBLIOGRAFÍA

ACUEDUCTO METROPOLITANO DE BUCARAMANGA (AMB) www.amb.com.co [Online]. - Marzo 03, 2016.

ACUEDUCTO METROPOLITANO DE BUCARAMANGA S.A. E.SP. Capítulo 4: Aspectos Técnicos y Operativos. [Book Section]// Evaluación Integral de Prestadores de Servicios Públicos Domiciliarios.. - Bogotá D.C. : [s.n.], 2014.

ACUEDUCTO METROPOLITANO DE BUCARAMANGA. A.M.B.S.A.E.P.S. Gerencia de Planeación y Proyectos. Informe Técnico. [Report]. - Bucaramanga : AMB, 2011..

AMORES María José and ál. et Environmental assessment of urban water cycle on Mediterranean conditions by LCA approach. [Journal]. - [s.l.] : Journal of Cleaner Production., 2013. - Vol. 43. - pp. 84-92.

BONILLA FELIZOLA Willian Arley. Propuesta para un uso racional de la energía en el Acueducto Metropolitano de Bucaramanga en el sistema Subestación Alimentadora Sistema de Bombeo de la Planta de Bosconia. [Book]. - Bucaramanga : Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Universidad Industrial de Santander, 2006.

BONTON Alexandre and ál. et Comparative life cycle assessment of water treatment plants. [Journal]. - [s.l.] : ELSEVIER. Desalination, 2011. - Vol. 284. - pp. 42-54 .

CACUA TIRADO Carolina and SARAVIA SAMPAYO Dionisio Orlando. Diseño conceptual del proceso de tratamiento de lodos para la planta Bosconia del A.M.B S.A E.S.P. Bucaramanga. [Book]. - Bucaramanga : Trabajo de grado (Ingeniero Químico). Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Químicas., 2008.

CENTRO DE ESTUDIOS E INVESTIGACIONES AMBIENTALES UIS. Informe Final AMB. [Report]. - Bucaramanga : Universidad Industrial de Santander., 2015.

CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL PARA LA DEFENSA DE LA MESETA DE BUCARAMANGA (CDMB) Informe anual de la red de monitoreo de Calidad de Agua [Informe]. - Bucaramanga : CDMB, 2013.

DEL BORGHI Adriana and al. et Water supply and sustainability: life cycle assessment of water collection, treatment and distribution service. [Journal]. - [s.l.] : Int J Life Cycle Assess, 2013. - Vol. 18. - pp. 1158-1168.

FRIEDRICH E. Life-cycle assessment as an environmental management tool in the production of potable water. [Journal]. - [s.l.] : Water Science and Technology., 2002. - 9 : Vol. 46. - pp. 29-36.

GARRAÍN CORDERO Daniel. Capítulo 2: Desarrollo y aplicación de las categorías de impacto ambiental de ruido y de uso de suelo en la metodología de análisis de ciclo de vida. [Book Section] // Análisis de Ciclo de Vida.. - España : Castellón de la Plana. Universitat Jaum, 2009.

IGOS Elorry and al. et Life Cycle Assessment of water treatment: ¿What is the contribution of infrastructure and operation at unit process level. [Journal]. - [s.l.] : Journal of Cleaner Production, 2014. - Vol. 65. - pp. 24- 431.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN NTC 14040: Manejo Ambiental. Análisis de Ciclo de Vida. Principios y Marcos de Referencia.. - Bogotá : [s.n.], 2007.

Jhon Barreneche Jefe de PTAP Bosconia. Funcionamiento operacional del Sistema de Potabilización [Entrevista]. - Bucaramanga : [s.n.], 10 de Junio de 2016.

LE MOS Diogo and ál. et Environmental assessment of an urban water system. [Journal]. - [s.l.] : Journal of Cleaner Production, 2013. - Vol. 54. - pp. 1-9.

LUNDIE Sven and ál. et Life Cycle Assessment for Sustainable Metropolitan Water Systems Planning. [Journal]. - [s.l.] : Environmental Science Technology, 2004. - Vol. 38. - pp. 3465-3473..

LUNDIN Margareta and MORRISON Gregory. A life cycle assessment based procedure for development of environmental sustainability indicators for urban water systems. [Journal]. - [s.l.] : ELSEVIER, 2002. - Vol. 4. - pp. 145-152.

MOHAMED-ZINE Messaoud-Bouregghda and ál. et The study of potable water treatment process in Algeria (boudouaou station) – by the application of life cycle assessment (LCA). [Journal]. - [s.l.] : Journal of Environmental Health Science & Engineering, 2013. - 37 : Vol. 11. - ISSN: 2052-336.

PRé, various authors. Manual Methods Library. [Book]. - USA : SimaPro Database., 2016.

ROBAYO MELENDEZ Carlos A. Normalización, diseño y documentación del sistema de gestión de la calidad para el proceso de tratamiento de agua potable en el Acueducto Metropolitano de Bucaramanga AMB.. - Bucaramanga : Universidad Industrial de Santander, Junio 10, 2005.

SCHULZE Carsten and ál. et Comparison of Different Life-Cycle Impact Assessment Methods for Aquatic Ecotoxicity. [Journal]. - [s.l.] : Environmental Toxicology and Chemistry, 2000. - 9 : Vol. 20. - pp. 2122-2132.

SERRANO Nathalie La agonía de los Recursos Hídricos de Santander [Informe]. - Bucaramanga. : Universidad Pontificia Bolivariana, 2015.

SLAGSTAD Helene and BRATTEBØ Helge. Life cycle assessment of the water and wastewater system in Trondheim, Norway – A case study. [Journal]. - [s.l.] : Urban Water Journal., 2013. - Vol. 11. - pp. 323-334.

VINCE François and ál. et LCA tool for the environmental evaluation of potable water production. En: [Journal]. - [s.l.] : Elsevier. Desalination, 2007. - Vol. 220. - pp. 37-56.

Yolanda Otero Jefe de PTAP FLORIDABLANCA Funcionamiento operacional del Sistema de Potabilización [Interview]. - FLORIDABLANCA : [s.n.], Junio 7 , 2016.

ANEXOS

Anexo A. Plantas de Tratamiento de Agua en el Área Metropolitana de Bucaramanga

Según la autoridad ambiental, la calidad del agua de las fuentes hídricas que recorren el área metropolitana se ha deteriorado en los últimos años por la falta de conciencia ambiental de los ciudadanos. (SERRANO, 2015). A continuación se presenta un listado de los recursos hídricos que pasan por el área de Bucaramanga y su aporte negativo por los diferentes sectores:

- ✓ Río Tona: Sufre deterioro en su recorrido, por vertimientos de origen agropecuario y doméstico rural. Recibe aguas negras del Municipio de Tona.

- ✓ Río Frío: Recibe aguas negras de asentamientos sub-normales y conexiones erradas de alcantarillado en la zona urbana de FLORIDABLANCA. Su calidad es pésima, sobre todo aguas abajo de la Planta de Tratamiento de Río Frío.

- ✓ Quebrada La Iglesia: Recibe aguas sanitarias e industriales, además de lixiviados provenientes de El Carrasco.

- ✓ Río Lato: Hay vertimientos de aguas domésticas, parcelaciones e industrias en su parte baja. La calidad es dudosa a su entrega al Río de Oro.

- ✓ Río de Oro: Tiene calidad deficiente debido a la actividad de las zonas industriales de Girón, Chimitá, así como de Piedecuesta, FLORIDABLANCA, Girón y gran parte de Bucaramanga.

Así mismo y respecto a la opinión de la Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga (CDMB), autoridad ambiental que tiene la función de conservar las fuentes hídricas de los trece municipios donde tiene jurisdicción del área metropolitana de Bucaramanga. Desde el año 2011 y con el fin de conocer el estado del agua de los ríos y quebradas en varios municipios de Santander, la entidad realizó el Informe de Estado de Calidad del Agua con 65 puntos de monitoreo en las diferentes fuentes hídricas. (CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL PARA LA DEFENSA DE LA MESETA DE BUCARAMANGA (CDMB), 2013).

Las corrientes más contaminadas son la parte baja del río Frío y de Oro y las quebradas Soratoque, La Iglesia, Chimitá, La Cuyamita, Las Navas, La Picha y El Carrasco que recibe el vertimiento generado en la planta de tratamiento de lixiviados del sitio de disposición de residuos sólidos El Carrasco. En total hay once ríos y quebradas que pasan por el casco urbano del área metropolitana y tienen la más baja calidad (pésima) debido a los vertimientos domésticos del sistema de alcantarillado y a los desechos que son derramados por las industrias.

A continuación se presenta una breve descripción de cada una de las cuatro plantas de tratamiento de agua, que conforman el sistema de producción de agua potable del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga. Se describen sus procesos y capacidades de tratamiento. El sistema de producción lo componen las plantas de Bosconia, Morrónico, La Flora y FLORIDABLANCA. La descripción de cada planta de tratamiento es la siguiente:

✓ **Planta de Tratamiento Bosconia:**

Esta planta de tratamiento hace parte del proyecto Suratá, cuyos estudios fueron realizados en el año de 1980, y el cual se realizó con el objeto de ampliar el suministro al Área Metropolitana de Bucaramanga, con un horizonte de diseño al

año 2000, el cual comprendió la construcción de: la captación del río Suratá, las obras de Pretratamiento: tanques desarenadores y presedimentadores, la planta de tratamiento de Bosconia, estación de Bombeo de agua tratada, subestación eléctrica, línea de impulsión y el sistema de redes y Tanques para la distribución del agua a la ciudad.

Figura 46. Planta de Tratamiento Bosconia



Fuente: AMB

La planta de Bosconia está localizada en la vía que conduce de Bucaramanga, al municipio de Matanza, al Nororiente de la ciudad, entre las cotas topográficas 685 y 675 msnm. La planta tiene una capacidad de 2000 l/s, y es del tipo convencional con tanques desarenadores, presedimentadores, mezcla rápida, floculación mecánica, sedimentación y filtración.

✓ **Planta Tratamiento La Flora (Río Tona):**

La Planta la Flora está localizada en la parte alta Oriental de Bucaramanga en la zona de Morrórico, sobre la margen izquierda de la carretera que conduce a Pamplona, a la altura del kilómetro dos entre las cotas topográficas 1170 y 1195 msnm. La planta la flora está destinada a tratar aguas provenientes de las fuentes de la hoya del río Tona, para abastecer las redes Norte, Oriente y Sur del sistema

de distribución. Funciona conjuntamente con las plantas "Morrórico" (Sistema Río Tona), "FLORIDABLANCA" (Sistema Río Frío) y "Bosconia" (Sistema Río Suratá), constituyendo entre todas el sistema de tratamiento del área del triángulo Bucaramanga, FLORIDABLANCA, y Girón.

Figura 47. Planta de Tratamiento La Flora



Fuente: AMB

✓ **Planta de Tratamiento Morrórico:**

La planta de Morrórico está localizada al Oriente de la carrera 33A entre la avenida Quebrada Seca y Calle 32 de Bucaramanga, entre las cotas topográficas 1050 y 1081 msnm. La planta es del tipo convencional, con unidades de medición de caudal, mezcla rápida, floculación hidráulica, sedimentación y filtración; su capacidad es 400 l/s. (361,74 l/s año 1995). El agua llega al tanque Morro Alto a través de una conducción mixta de presión y flujo libre, que recibe las aguas aforadas en la canaleta Parshall, de 1,5 pies con capacidad máxima de 696,6 l/s dotada de reglilla graduada para lectura del caudal.

Figura 48. Planta de Tratamiento Morrórico



Fuente: AMB

✓ **Planta de Tratamiento de FLORIDABLANCA:**

Está localizada en la zona Suroriental del Área Metropolitana de Bucaramanga, en la parte alta de los barrios Bucarica y Caracolés del municipio de FLORIDABLANCA, a una altura media de 1042 msnm. Su construcción inicial se hizo entre los años 1970-1971; fue optimizada para darle mayor capacidad, en los años 1976-1977, y ampliada para tratar todo el caudal aprovechable del Río Frío, en los años 1982-1983.

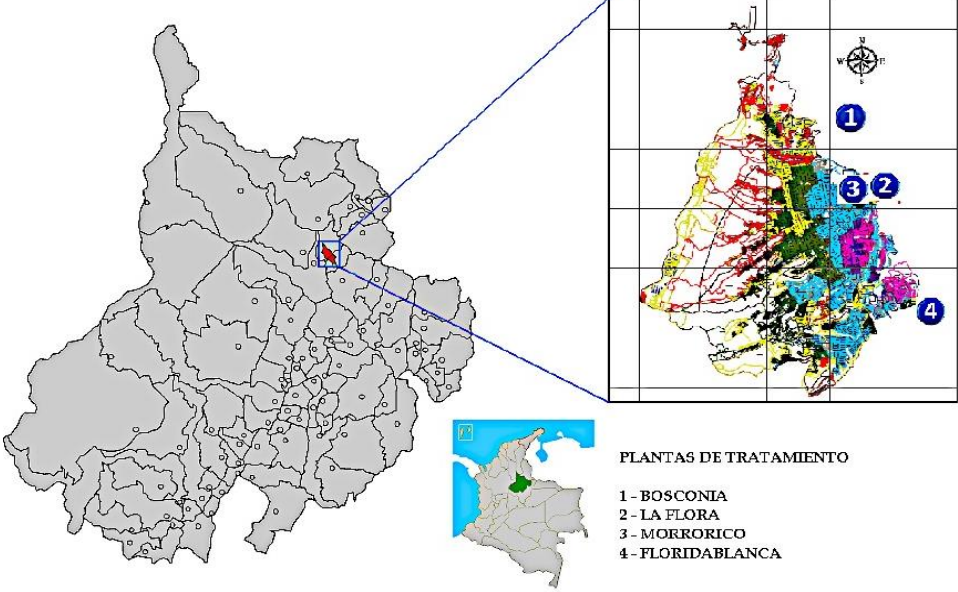
Figura 49. Planta de Tratamiento FLORIDABLANCA



Fuente: AMB

La ubicación geográfica de las plantas de tratamiento de agua descritas en párrafos anteriores se presenta en la siguiente figura:

Figura 50. Ubicación geográfica de Plantas de Tratamiento de Agua.



Fuente: AMB

Anexo B. Descripción Etapas del Proceso de Tratamiento de Agua Potable

Captación: consiste de una estructura colocada directamente en la fuente a fin de captar o extraer el agua que se va a tratar y conducirla por la línea de aducción hasta la siguiente etapa. La captación se puede realizar por gravedad o por bombeo, y su control es importante para asegurar el caudal requerido en el proceso de potabilización.

Aducción: sistema destinado a transportar agua mediante un conducto desde la captación hasta el desarenador.

Desarenación o presedimentación: estructura que permite la remoción del material sólido que no es retenido en las rejillas de la captación. El proceso se realiza mediante la retención del agua, de modo tal que las partículas de arena puedan decantar por acción de la fuerza de gravedad principalmente, como función del tamaño, peso y forma de las partículas. Estos tanques permiten mantener el caudal de salida igual al caudal de entrada, por ende se consideran de flujo continuo.

Conducción: es la fase destinada a transportar el agua mediante un conducto desde el desarenador hasta la planta de tratamiento. Estas líneas (canales y tubos de conducción) pueden ser por gravedad o por bombeo.

Aireación: etapa empleada para oxigenar el agua y oxidar ciertos elementos como hierro, manganeso y materia orgánica para luego eliminar otros en forma de gases que producen olores y sabores indeseables al agua. Esta etapa puede ser efectuada por caídas de agua (cascadas, bandejas múltiples) o por difusión (burbujear mecánicamente el aire).

Presedimentación: Eliminación de partículas sólidas y la turbidez, en los tanques de quietamiento.

Medición de flujo: determinación del caudal o cantidad de agua que entra a tratamiento.

Dosificación de alumbre: Consiste en agregar al agua la cantidad necesaria de sulfato de aluminio, para eliminar la mayor cantidad de partículas.

Mezcla Rápida: consiste en dispersar de forma rápida y uniforme el coagulante a través del flujo de agua. La mezcla se puede realizar mediante turbulencia generada por medios hidráulicos o mecánicos, los cuales incluyen:

- Canaletas Parshall
- Vertederos rectangulares
- Tuberías de succión de bombas.
- Mezcladores mecánicos en línea
- Rejillas difusoras
- Resaltos hidráulicos en canales.
- Tanque con equipo de mezcla rápida.

Coagulación: proceso que consiste en la adición de una sustancia química soluble y coagulante al agua, quien a través de procesos químicos captura partículas no sedimentales y coloidales, y los convierte en sólidos fácilmente sedimentales. Adicionalmente, esta fase se utiliza para remover del agua el color, la turbiedad, bacterias, virus, entre otros.

Los factores que influyen la coagulación son:

- La caracterización del agua (pH, olor, turbiedad, alcalinidad)

- La caracterización de los coagulantes (tipo, cantidad y concentración de la sustancia).
- Las condiciones de las estructuras de la planta como: el tiempo de residencia, floculadores y mezcla rápida.

Los coagulantes más usados son sales de hierro y de aluminio, siendo el sulfato de aluminio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) el más utilizado por su bajo costo y manejo simple.

Ayudantes de Coagulación: ayudan al proceso de coagulación como puente para unir las partículas, sin ser coagulantes. La diferencia con el coagulante es que este último anula las acciones repulsivas entre partículas coloidales, iniciando la formación del microfloc, y el ayudante engloba el microfloc, aumentando su tamaño y densidad de forma que sedimenten fácilmente. Dentro de los ayudantes se encuentran los obtenidos de la síntesis de amoníaco para obtener polímeros y los que se obtienen de almidones.

Los coagulantes se deben aplicar siempre en los puntos de máxima agitación o mezcla rápida para obtener una mezcla íntima del producto con el agua, pues se genera una reacción instantánea.

Floculación: es el proceso de agitación suave y continua del agua con coagulante, esto con el propósito de lograr la aglomeración de las partículas previamente coaguladas por el choque generado por su movimiento relativo, para formar partículas más grandes denominadas "Floc".

Sedimentación: A través de ella se separa el agua de los FLOC'S los cuales se decantan en el fondo de los tanques de sedimentación.

Filtración: Este mecanismo hace que las partículas de turbidez que no fueron retenidas en la sedimentación, sean totalmente eliminadas.

Desinfección: se adiciona la cantidad de cloro necesaria para destruir los microorganismos que puedan estar presentes en el agua.

Control de Calidad: Se analiza el agua de los ríos, las plantas de tratamiento y en la red, mediante ensayos de laboratorio.

Almacenamiento: Finalmente, el agua tratada sale de las plantas de tratamiento hacia los tanques de almacenamiento para distribuirla por tuberías hacia los barrios.

Distribución: entrega del agua al usuario, vía tubos de conducción para el consumo humano.

Anexo C. Glosario ACV

Asignación: Fase del ACV en lo cual se determina, como se distribuyen los flujos de entrada o salida de una unidad de proceso, en el interior del sistema de producción al estudio.

Cambio Climático: Se llama cambio climático a la modificación del clima con respecto al historial climático en una escala global o regional. Tales cambios se producen en muy diversas escalas de tiempo y sobre todos para los parámetros climáticos: temperatura, precipitaciones, nubosidad, etc. En teoría, son debidos tanto a causas naturales como antropogénicas.

Categoría de Impacto: Grupo representativo de impactos potenciales al medio ambiente, a los cuales se asignan los resultados del inventario del ciclo de vida.

Declaración Ambiental de Producto, EPD: Método estandarizado (ISO 14025) para comunicar el rendimiento con el medio ambiente, de un producto o servicio basado en datos de ACV.

Dióxido de Carbono - CO₂: El dióxido de carbono (CO₂) es un gas incoloro, denso y poco reactivo. Forma parte de la composición de la tropósfera (capa de la atmósfera más próxima a la Tierra) actualmente en una proporción de 380 ppm. Su ciclo en la naturaleza está vinculado al del oxígeno.

Eco Indicador: Los valores estándar de los eco-indicadores se pueden considerar como cifras sin dimensión, como base se utiliza el “Eco Punto Pt”. En las listas de eco indicadores se utiliza la unidad de milipuntos (mPt), es decir: 700mPt=0,7Pt. El valor absoluto de los puntos no es demasiado relevante ya que el objetivo principal es el de comparar las diferencias relativas entre productos o componentes. La escala se elige de tal forma que el valor de un Pt represente una centésima parte

de la carga ambiental anual de un ciudadano Europeo, cuyo valor se ha establecido, dividiendo la carga total en Europa entre el número de habitantes y multiplicado por 100 (factor de escala).

Emisión: Descarga de elementos químicos o físicos (sustancias, calor, ruido, etc.) de un sistema de producción al medio ambiente.

Emisión de Gases Efecto Invernadero: Masa total de un GEI liberado a la atmósfera en un determinado período de tiempo.

Evaluación del ciclo de vida, LCA: Una gestión normalizada herramienta (ISO 14040-44) para evaluar y cuantificar el total de impacto ambiental de los productos o actividades a lo largo de su ciclo de vida del neumático de determinados materiales, procesos, productos, tecnologías, servicios o actividades.

Factor de Caracterización: Factor derivado de un modelo que se aplica para convertir los resultados asignados de un ICV en unidades equivalentes de una sustancia con potencial capacidad de promover el impacto al medio ambiente.

Factor de Emisión de Gases Efecto Invernadero: Factor que relaciona los datos de la actividad con las emisiones de GEI.

Fuente de Emisión de GEI: Unidad o proceso físico que libera un Gas Efecto Invernadero hacia la atmósfera.

Flujo Elemental: Materia o energía introducido en el sistema, sometido a estudio, que ha sido sacado del medio ambiente sin la previa transformación humana o material o energía salido del sistema, sometido a estudio, que ha sido desechado en el medio ambiente sin una subsiguiente transformación.

Gas Efecto Invernadero – GEI: Componente gaseoso de la atmósfera, tanto natural como antropogénico, que absorbe y emite radiación a longitudes de onda específicas dentro del espectro de radiación infrarroja emitida por la superficie de la Tierra, la atmósfera y las nubes. Algunos de los GEI son: Dióxido de Carbono (CO₂), Metano (CH₄), Óxido Nitroso (N₂O), Hidrofluorocarbonados (HFC), Perfluorocarbonados (PFC) y Hexafluoruro de Azufre (SF₆).

Impacto Medioambiental: Consecuencia atribuida al flujo de entrada o salida de un sistema de producción al medio ambiente.

Indicador de Impacto: Atributo o aspecto natural del medio ambiente, salud humana o recursos, que se identifica como una preocupación o problema ambiental.

Indicador Medioambiental: Parámetro representativo del daño de un producto al medio ambiente, obtenido por el análisis de ciclo de vida.

Límites del Sistema: Interfaces entre un sistema de producción y el medio ambiente u otros sistemas de producción.

Metano - CH₄: El metano es el hidrocarburo alcano más sencillo, cuya fórmula química es CH₄. Cada uno de los átomos de hidrógeno está unido al carbono por medio de un enlace covalente. Es una sustancia no polar que se presenta en forma de gas a temperaturas y presiones ordinarias. Es incoloro e inodoro y apenas soluble en agua en su fase líquida. En la naturaleza se produce como producto final de la putrefacción anaeróbica de las plantas. Este proceso natural se puede aprovechar para producir biogás. Muchos microorganismos anaeróbicos lo generan utilizando el CO₂ como aceptor final de electrones.

Óxido Nitroso - N₂O: El óxido de nitrógeno (I), óxido de dinitrógeno, protóxido de nitrógeno, anhídrido nitroso, óxido nitroso, gas hilarante, o también gas de la risa

(N₂O) es un gas incoloro con un olor dulce y ligeramente tóxico. Provoca alucinaciones, un estado eufórico y en algunos casos puede provocar pérdida de parte de la memoria humana. No es inflamable ni explosivo, pero soporta la combustión tan activamente como el oxígeno cuando está presente en concentraciones apropiadas con anestésicos o material inflamable.

Recursos Renovables: Los materiales elaborados con materias primas y energías renovables o muy abundantes, son preferibles ante, que otros que utilizan fuentes convencionales o escasas (combustibles fósiles, minerales escasos, etc.) debido al carácter preservante y al efecto o biodegradabilidad de sus fuentes.

Reglas de categoría de producto, PCR: Un conjunto de reglas para la preparación de ACV y DAP dentro de una clase funcionalmente definido de productos. Un documento de la PCR es un componente necesario de cualquier Tipo III Programa de la Declaración Ambiental (ISO 14025).

Unidad Funcional: Especificación física o funcional de un producto o sistema productivo para su uso como unidad de referencia en un estudio de análisis del ciclo de vida.

Unidad del Proceso: La porción más pequeña de un sistema de análisis que reúne los datos necesarios para realizar el análisis del ciclo de vida.

Anexo D. Categorías de Impacto Potencial

Potencial de acidificación, AP: Una categoría de impacto ambiental (lluvia ácida). Las emisiones (por ejemplo, óxidos de azufre, óxidos nitrógeno, amoníaco) del transporte, la energía generación, los procesos de combustión, y la agricultura causa acidez del agua de lluvia y por lo tanto el daño a los bosques, lagos y edificios. Sustancia de referencia: el dióxido de azufre. Esta categoría proviene del efecto de la deposición de sustancias inorgánicas como sulfatos, nitratos y fosfatos en el suelo (Los factores de caracterización se dan únicamente por las emisiones al aire; la acidificación y nitrificación terrestre se toma directamente del Eco-indicador 99; las categorías de punto medio (kgeqSO₂ al aire/kg emitido) se obtienen por la división del factor de la sustancia considerada por el factor de daño de la sustancia de referencia (SO₂ al aire)).

Potencial de Agotamiento de energía no renovable: El petróleo tiene un contenido energético implícito debido a la cantidad de energía no renovable que es extraída de la tierra y que como su nombre lo dice no se puede recuperar de ninguna forma posible. Esta categoría cuantifica esa energía de los combustibles fósiles como un daño directo a la naturaleza. Los factores de caracterización para el consumo de energía no renovable, en términos de la energía total primaria extraída, son calculados por el valor superior de calentamiento. La energía no renovable (MJ de energía total primaria no renovable /kg usado) para las versiones 2.0 y 2.1 han sido tomados de Ecoinvent.

Potencial de Agotamiento del ozono, ODP: Una categoría de impacto ambiental (agujero de ozono). El índice ODP se calcula como la contribución a la ruptura de la capa de ozono que resultaría de la emisión de 1 kg de la sustancia en cuestión en relación con la emisión de 1 kg de CFC-11 como una referencia de la sustancia.

Potencial de Calentamiento Global (Global Warming Potential): Factor que describe el impacto de la fuerza de radiación de una actividad con base en la masa de un GEI determinado, con relación a la unidad equivalente de dióxido de carbono en un período determinado. El calentamiento global está asociado a un cambio climático que puede tener causa antropogénica o no. El principal efecto que causa el calentamiento global es el efecto invernadero, fenómeno que se refiere a la absorción, por ciertos gases atmosféricos; principalmente CO₂ de parte de la energía que el suelo emite, como consecuencia de haber sido calentado por la radiación solar.

Potencial de creación de ozono fotoquímico, POCP: Una categoría de impacto ambiental (smog de verano). El índice utilizado para traducir el nivel de emisiones de diversos gases en una medida común para comparar sus contribuciones a la cambio de la concentración de ozono a nivel del suelo. El índice PCOF se calcula como la contribución a la formación de ozono cerca del suelo debido la sustancia en cuestión en relación a la emisión de 1 kg de eteno como referencia sub- postura.

Potencial de Eutrofización Acuática: Sustancias acuáticas que contienen nitrógeno y fósforo pueden promover la eutrofización en el agua. Para el impacto en la vida acuática, el aumento de nutrientes en el área contribuye a la generación de fitoplancton. La generación de una gran cantidad de fitoplancton en un tiempo corto puede aumentar el riesgo del surgimiento de una marea roja y causar también un aumento en el consumo de oxígeno por descomposición de cuerpo de fitoplancton (sustancias orgánicas). Estos fenómenos pueden causar serios daños a los peces y a la biodiversidad.

Potencial de Nutricación, NP: Una categoría de impacto ambiental ("sobre-fertilización"). Emisiones tales como fosfatos, nitratos, óxidos de nitrógeno y amoníaco del transporte, la energía generación, la agricultura (fertilizantes) y las aguas residuales aumento el crecimiento de las plantas acuáticas y puede producir

la proliferación de algas que consumen el oxígeno del agua, afectando severamente el ecosistema acuático. Esto se conoce como eutrofización. La sustancia de referencia es el fosfato.

Anexo E. Normativa sobre el recurso hídrico

Decreto 2811 de 1974, libro II parte III	Artículo 99: Establece la obligatoriedad de tramitar el respectivo permiso de explotación de material de arrastre Art. 77 a 78 Clasificación de aguas. Art. 80 a 85: Dominio de las aguas y cauces. Art. 86 a 89: Derecho a uso del agua. Art.134 a 138: Prevención y control de contaminación. Art. 149: aguas subterráneas. Art.155: Administración de aguas y cauces.
Decreto 1449 de 1977	Disposiciones sobre conservación y protección de aguas, bosques, fauna terrestre y acuática.
Decreto 1541 de 1978	Aguas continentales: Art. 44 a 53 Características de las concesiones, Art. 54 a 66 Procedimientos para otorgar concesiones de agua superficiales y subterráneas, Art. 87 a 97: Explotación de material de arrastre, Art. 104 a 106: Ocupación de cauces y permiso de ocupación de cauces, Art. 211 a 219: Control de vertimientos, Art. 220 a 224: Vertimiento por uso doméstico y municipal, Art. 225: Vertimiento por uso agrícola, Art. 226 a 230: Vertimiento por uso industrial, Art. 231: Reglamentación de vertimientos.
Decreto 1681 de 1978	Sobre recursos hidrobiológicos
Ley 09 de 1979	Código sanitario nacional Art. 51 a 54: Control y prevención de las aguas para consumo humano. Art. 55 aguas superficiales. Art. 69 a 79: potabilización de agua.
Decreto 2857 de 1981	Ordenación y protección de cuencas hidrográficas.

Decreto 2858 de 1981	Modifica el Decreto 1541 de 1978.
Decreto 2105 de 1983	Reglamenta parcialmente la Ley 09 de a 1979 sobre potabilización y suministro de agua para consumo humano.
Decreto 1594 de 1984	Normas de vertimientos de residuos líquidos Art. 1 a 21 Definiciones. Art. 22-23 ordenamiento del recurso agua. Art. 29 Usos del agua. Art. 37 a 50 Criterios de calidad de agua Art. 60 a 71 Vertimiento de residuos líquidos. Art. 72 a 97 Normas de vertimientos. Art. 142 Tasas retributivas. Art. 155 procedimiento para toma y análisis de muestras.
Decreto 2314 de 1986	Concesión de aguas
Decreto 79 de 1986	Conservación y protección del recurso agua.
Decreto 1700 de 1989	Crea Comisión de Agua Potable.
Ley 99 de 1993	Art. 10,11,24,29: Prevención y control de contaminación de las aguas. Tasas retributivas.
Documento CONPES 1750 de 1995	Políticas de manejo de las aguas
Decreto 605 de 1996	Reglamenta los procedimientos de potabilización y suministro de agua para consumo humano

Decreto 901 de 1997	Tasas retributivas por vertimientos líquidos puntuales a cuerpos de agua
Ley 373/1997	Uso eficiente y ahorro del agua
Decreto 3102 de 1998	Instalación de equipos de bajo consumo de agua
Decreto 475 de 1998	Algunas normas técnicas de calidad de agua
Decreto 1311 de 1998	Reglamenta el literal G del artículo 11 de la ley 373 de 1997

Anexo F. Inventario

Tabla 31. Puntuación Única por Proceso (Pt) - Planta FLORIDABLANCA.

Proceso (Pt)	Bombeo	Captación	Coagulación	Floculación	Filtración	Desinfección	Consumo Energía
Energía Mix Colombina	3,06E-06	0,00E+00	0,00E+00	7,35E-06	7,00E-05	0,00E+00	2,75E-05
Lodo Sedimentador FLORIDABLANCA	0,00E+00	0,00E+00	9,19E-05	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Lodo Floculador FLORIDABLANCA	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	6,70E-05	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Lodo Filtro FLORIDABLANCA	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	5,94E-05	0,00E+00	0,00E+00
Sistema Río Frío	0,00E+00	1,00E-05	1,00E-05	1,00E-05	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Sistema Río Frío Tratado	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	4,43E-07	0,00E+00
ACPM	8,49E-08	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Total	3,14E-06	1,00E-05	1,02E-04	8,43E-05	1,29E-04	4,43E-07	2,75E-05

Tabla 32. Puntuación Única por Categoría (Pt) - Planta FLORIDABLANCA.

Categoría de impacto (Pt)	Bombeo	Captación	Coagulación	Floculación	Filtración	Desinfección	Consumo Energía
Toxicidad humana (aire)	2,07E-10	0,00E+00	0,00E+00	4,74E-10	4,51E-09	2,19E-07	1,77E-09
Calentamiento Global	1,33E-07	0,00E+00	0,00E+00	1,93E-07	1,83E-06	0,00E+00	7,21E-07
Acidificación	2,45E-07	0,00E+00	0,00E+00	5,79E-07	5,51E-06	0,00E+00	2,17E-06
Eutrofización terrestre	6,93E-07	0,00E+00	0,00E+00	1,65E-06	1,57E-05	0,00E+00	6,18E-06
Formación Ozono (vegt.)	7,88E-07	0,00E+00	0,00E+00	1,88E-06	1,79E-05	0,00E+00	7,02E-06
Toxicidad humana (agua)	0,00E+00	0,00E+00	9,19E-05	6,70E-05	5,94E-05	1,33E-10	0,00E+00
Total	1,86E-06	0,00E+00	9,19E-05	7,13E-05	1,00E-04	2,19E-07	1,61E-05

Tabla 33. Inventario Planta FLORIDABLANCA.

Sustancia	Compartimento	Unidad	Total	Bombeo	Captación	Coagulación	Floculación	Filtración	Desinfección	Consumo Energía
Calcite, in ground	Crudo	mg	1E+02	0E+00	0E+00	1E+02	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00
Coal, 29.3 MJ per kg, in ground	Crudo	mg	3E+02	1E+01	0E+00	0E+00	2E+01	2E+02	0E+00	9E+01

Energy, from hydro power	Crudo	kJ	1E+02	4E+00	0E+00	0E+00	9E+00	8E+01	0E+00	3E+01
Energy, kinetic (in wind), converted	Crudo	J	2E+02	5E+00	0E+00	0E+00	1E+01	1E+02	0E+00	5E+01
Gas, natural, 30.3 MJ per kg, in ground	Crudo	g	2E+00	5E-02	0E+00	0E+00	1E-01	1E+00	0E+00	4E-01
Occupation, water bodies, artificial	Crudo	cm2a	1E+01	3E-01	0E+00	0E+00	8E-01	8E+00	0E+00	3E+00
Transformation, to unknown	Crudo	mm2	8E+00	2E-01	0E+00	0E+00	5E-01	5E+00	0E+00	2E+00
Transformation, to water bodies, artificial	Crudo	mm2	8E+00	2E-01	0E+00	0E+00	5E-01	5E+00	0E+00	2E+00
Water, river	Crudo	m3	4E+00	0E+00	1E+00	1E+00	1E+00	0E+00	1E+00	0E+00
Aluminum phosphide	Aire	g	3E+01	0E+00	0E+00	3E+01	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00
Carbon dioxide	Aire	g	6E+00	6E-01	0E+00	0E+00	4E-01	3E+00	0E+00	1E+00
Carbon dioxide, land transformation	Aire	g	4E+00	1E-01	0E+00	0E+00	2E-01	2E+00	0E+00	9E-01
Carbon monoxide	Aire	mg	2E+01	6E-01	0E+00	0E+00	2E+00	1E+01	0E+00	6E+00
Dinitrogen monoxide	Aire	µg	3E+02	7E+00	0E+00	0E+00	2E+01	2E+02	0E+00	7E+01
Heat, waste	Aire	J	2E+02	2E+02	0E+00	0E+00	5E+00	5E+01	0E+00	2E+01
Hydrocarbons, unspecified	Aire	mg	6E+00	2E-01	0E+00	0E+00	4E-01	4E+00	0E+00	1E+00
Methane, biogenic	Aire	mg	6E+02	2E+01	0E+00	0E+00	4E+01	4E+02	0E+00	1E+02
Methane, fossil	Aire	µg	1E+02	1E+02	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00
Nitrogen oxides	Aire	g	2E+00	5E-02	0E+00	0E+00	1E-01	1E+00	0E+00	4E-01
Particulates, < 2.5 µm	Aire	µg	3E+01	3E+01	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00
Particulates, SPM	Aire	mg	4E+02	1E+01	0E+00	0E+00	3E+01	3E+02	0E+00	1E+02
Soot	Aire	mg	3E+02	8E+00	0E+00	0E+00	2E+01	2E+02	0E+00	8E+01
Sulfur dioxide	Aire	µg	2E+02	2E+02	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00
Sulfur oxides	Aire	mg	6E+02	2E+01	0E+00	0E+00	4E+01	4E+02	0E+00	1E+02
Aluminum	Agua	mg	1E+01	0E+00	0E+00	3E+00	1E+01	1E+00	7E-02	0E+00

Aluminum oxide, fibrous forms	Agua	g	5E+00	0E+00	0E+00	5E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00
Ammonia, as N	Agua	mg	4E+02	0E+00	1E+02	1E+02	1E+02	0E+00	0E+00	0E+00
BOD5, Biological Oxygen Demand	Agua	g	3E+00	0E+00	6E-01	1E+00	9E-01	2E-01	0E+00	0E+00
Cadmium	Agua	mg	1E+00	0E+00	0E+00	3E-01	3E-01	3E-01	0E+00	0E+00
Calcium compounds, unspecified	Agua	g	1E+00	0E+00	0E+00	1E+00	0E+00	0E+00	5E-02	0E+00
Carbonate	Agua	g	1E+02	0E+00	3E+01	3E+01	3E+01	0E+00	4E-02	0E+00
Chloride	Agua	g	1E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	1E+00	0E+00
Chlorine	Agua	µg	1E+03	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	1E+03	0E+00
Chromium	Agua	mg	9E+00	0E+00	0E+00	2E+00	5E+00	2E+00	0E+00	0E+00
COD, Chemical Oxygen Demand	Agua	g	2E+02	0E+00	0E+00	1E+02	5E+01	2E+00	0E+00	0E+00
Copper	Agua	mg	7E+00	0E+00	0E+00	9E-01	5E+00	9E-01	0E+00	0E+00
Hydrazine sulfate	Agua	g	6E+01	0E+00	2E+01	2E+01	2E+01	2E-02	1E-03	0E+00
Iron	Agua	mg	4E+01	0E+00	0E+00	3E+01	9E+00	3E-01	1E-01	0E+00
Lead	Agua	mg	2E+01	0E+00	0E+00	6E+00	6E+00	6E+00	0E+00	0E+00
Magnesium	Agua	g	1E+00	0E+00	0E+00	5E-02	1E+00	4E-02	0E+00	0E+00
Nitrate	Agua	g	2E+00	0E+00	6E-01	6E-01	6E-01	0E+00	2E-03	0E+00
Nitrite	Agua	mg	3E+01	0E+00	1E+01	1E+01	1E+01	0E+00	8E-03	0E+00
Nitrogen, organic bound	Agua	g	2E+00	0E+00	8E-01	8E-01	8E-01	0E+00	0E+00	0E+00
Nitrogen, total	Agua	g	3E+00	0E+00	9E-01	9E-01	9E-01	0E+00	0E+00	0E+00
Phosphorus, total	Agua	mg	2E+02	0E+00	6E+01	6E+01	6E+01	0E+00	0E+00	0E+00
Solids, inorganic	Agua	g	3E+02	0E+00	9E+01	9E+01	9E+01	0E+00	0E+00	0E+00
Solved solids	Agua	g	4E+02	0E+00	8E+00	3E+02	1E+02	5E+00	0E+00	0E+00
Sulfate	Agua	mg	2E+01	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	2E+01	0E+00
Suspended solids, inorganic	Agua	kg	3E+00	0E+00	0E+00	2E+00	8E-01	2E-02	0E+00	0E+00
Suspended solids, unspecified	Agua	g	6E+01	0E+00	2E+01	2E+01	2E+01	0E+00	0E+00	0E+00
Zinc	Agua	mg	9E+01	0E+00	0E+00	7E+01	1E+01	2E+00	0E+00	0E+00

Waste, final, inert	Desecho	µg	2E+02	2E+02	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00
Heat, waste	Suelo	MJ	7E+01	0E+00	0E+00	2E+01	2E+01	2E+01	0E+00	0E+00

Tabla 34. Inventario Planta Bosconia

Sustancia	Compar timento	Unid ad	Total	Bombe o B	Captac ión B	Coagula ción B	Flocul ación B	Filtraci ón B	Desinf ección B	Consum o Energía B
Calcite, in ground	Crudo	mg	3E+01	0E+00	0E+00	3E+01	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00
Coal, 29.3 MJ per kg, in ground	Crudo	g	8E+00	8E+00	3E-02	3E-02	4E-02	1E-01	0E+00	3E-01
Energy, from hydro power	Crudo	MJ	3E+00	3E+00	1E-02	1E-02	1E-02	5E-02	0E+00	1E-01
Energy, kinetic (in wind), converted	Crudo	kJ	5E+00	4E+00	1E-02	1E-02	2E-02	8E-02	0E+00	2E-01
Gas, natural, 30.3 MJ per kg, in ground	Crudo	g	4E+01	4E+01	1E-01	1E-01	2E-01	7E-01	0E+00	2E+00
Occupation, water bodies, artificial	Crudo	cm2a	3E+02	3E+02	9E-01	9E-01	1E+00	5E+00	0E+00	1E+01
Transformation, to unknown	Crudo	mm2	2E+02	2E+02	6E-01	6E-01	8E-01	3E+00	0E+00	8E+00
Transformation, to water bodies, artificial	Crudo	mm2	2E+02	2E+02	6E-01	6E-01	8E-01	3E+00	0E+00	8E+00
Water, river	Crudo	m3	4E+00	0E+00	1E+00	1E+00	1E+00	0E+00	1E+00	0E+00
Aluminum phosphide	Aire	g	4E+01	0E+00	0E+00	4E+01	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00
Carbon dioxide	Aire	g	1E+02	1E+02	4E-01	4E-01	6E-01	2E+00	0E+00	5E+00
Carbon dioxide, land transformation	Aire	g	9E+01	8E+01	3E-01	3E-01	4E-01	1E+00	0E+00	4E+00
Carbon monoxide	Aire	mg	5E+02	5E+02	2E+00	2E+00	2E+00	9E+00	0E+00	2E+01
Dinitrogen monoxide	Aire	mg	6E+00	6E+00	2E-02	2E-02	3E-02	1E-01	0E+00	3E-01
Heat, waste	Aire	kJ	3E+00	3E+00	6E-03	6E-03	8E-03	3E-02	0E+00	8E-02
Hydrocarbons, unspecified	Aire	mg	1E+02	1E+02	4E-01	4E-01	6E-01	2E+00	0E+00	6E+00
Methane, biogenic	Aire	g	1E+01	1E+01	4E-02	4E-02	6E-02	2E-01	0E+00	6E-01
Methane, fossil	Aire	µg	6E+02	6E+02	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00
Nitrogen oxides	Aire	g	4E+01	4E+01	1E-01	1E-01	2E-01	7E-01	0E+00	2E+00
Particulates, < 2.5 um	Aire	µg	2E+02	2E+02	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00

Particulates, SPM	Aire	g	1E+01	1E+01	3E-02	3E-02	4E-02	2E-01	0E+00	4E-01
Soot	Aire	g	7E+00	7E+00	2E-02	2E-02	3E-02	1E-01	0E+00	3E-01
Sulfur dioxide	Aire	mg	1E+00	1E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00
Sulfur oxides	Aire	g	1E+01	1E+01	4E-02	4E-02	6E-02	2E-01	0E+00	6E-01
Aluminum	Agua	mg	3E+00	0E+00	1E+00	1E+00	1E-01	0E+00	6E-02	0E+00
Aluminum oxide, fibrous forms	Agua	mg	1E+02	0E+00	0E+00	1E+02	3E+00	0E+00	0E+00	0E+00
Arsenic	Agua	µg	4E+00	0E+00	1E+00	1E+00	1E+00	0E+00	0E+00	0E+00
BOD5, Biological Oxygen Demand	Agua	g	2E+00	0E+00	7E-01	7E-01	3E-01	0E+00	0E+00	0E+00
Calcium compounds, unspecified	Agua	mg	4E+02	0E+00	0E+00	3E+02	0E+00	0E+00	7E+01	0E+00
Carbonate	Agua	mg	5E+01	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	5E+01	0E+00
Chloride	Agua	g	3E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	3E+00	0E+00
Chlorine	Agua	µg	9E+02	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	9E+02	0E+00
COD, Chemical Oxygen Demand	Agua	g	3E+00	0E+00	1E+00	1E+00	1E+00	0E+00	0E+00	0E+00
Copper	Agua	mg	4E+02	0E+00	2E+02	2E+02	1E+02	0E+00	0E+00	0E+00
Cyanide	Agua	ng	4E+01	0E+00	1E+01	1E+01	1E+01	0E+00	0E+00	0E+00
Hydrazine sulfate	Agua	mg	2E+02	0E+00	9E+01	9E+01	5E+00	0E+00	1E+00	0E+00
Iron	Agua	g	1E+01	0E+00	3E+00	3E+00	3E+00	0E+00	1E-04	0E+00
Lead	Agua	mg	2E+02	0E+00	7E+01	7E+01	7E+01	0E+00	0E+00	0E+00
Mercury	Agua	µg	4E+02	0E+00	1E+02	1E+02	7E+01	0E+00	0E+00	0E+00
Nitrate	Agua	µg	7E+02	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	7E+02	0E+00
Nitrite	Agua	µg	8E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	8E+00	0E+00
Organic carbon	Agua	mg	4E+02	0E+00	4E+02	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00
Solids, inorganic	Agua	g	4E+01	0E+00	1E+01	1E+01	9E+00	0E+00	0E+00	0E+00
Sulfate	Agua	mg	2E+01	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	2E+01	0E+00
Suspended solids, inorganic	Agua	g	3E+01	0E+00	1E+01	1E+01	6E+00	0E+00	0E+00	0E+00
Suspended substances, unspecified	Agua	mg	1E+03	0E+00	3E+02	3E+02	3E+02	0E+00	0E+00	0E+00
Zinc	Agua	mg	7E+01	0E+00	3E+01	3E+01	4E+00	0E+00	0E+00	0E+00
Waste, final, inert	Desecho	mg	1E+00	1E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00
Heat, waste	Suelo	MJ	6E+01	0E+00	2E+01	2E+01	2E+01	0E+00	0E+00	0E+00