

NOTA TÉCNICA N° IDB-TN-03072

Avanzando hacia un modelo de economía circular en la prestación de los servicios públicos de agua y saneamiento: un caso de estudio

Juana Camacho Otero, Ph.D.
Luis Felipe Vásquez Correa, Ph.D.

Banco Interamericano de Desarrollo
División de Agua y Saneamiento

Marzo 2024



Avanzando hacia un modelo de economía circular en la prestación de los servicios públicos de agua y saneamiento: un caso de estudio

Juana Camacho Otero, Ph.D.
Luis Felipe Vásquez Correa, Ph.D.

Banco Interamericano de Desarrollo
División de Agua y Saneamiento

Marzo 2024



**Catalogación en la fuente proporcionada por la
Biblioteca Felipe Herrera del
Banco Interamericano de Desarrollo**

Camacho Otero, Juana.

Avanzando hacia un modelo de economía circular en la prestación de los servicios públicos de agua y saneamiento: un caso de estudio / Juana Camacho Otero, Luis Felipe Vásquez Correa; editores, Manuel José Navarrete, Magda Correal, María Eugenia De la Peña.

p. cm. — (Nota técnica del BID; 3072)

Incluye referencias bibliográficas.

1. Circular economy-Colombia. 2. Water-supply-Colombia. 3. Water utilities-Colombia. 4. Sanitation-Colombia. 5. Quality of life-Colombia. 6. Environmental health-Colombia. I. Vásquez Correa, Luis Felipe. II. Navarrete, Manuel José, editor. III. Correal, Magda, editora. IV. De la Peña, María Eugenia, editora. V. Banco Interamericano de Desarrollo. División de Agua y Saneamiento. VI. Título. VII. Serie.

IDB-TN-03072

Codigos JEL: Q25,Q51, Q53, Q56

Palabras clave: Economía circular, Servicios de Agua Potable y Residual, Generación de Valor, Modelo Circular y Regenerativo, Casos de Negocio, Salud Ambiental, Bienestar Humano.

<http://www.iadb.org>

Copyright © 2024 Banco Interamericano de Desarrollo (BID). Esta obra se encuentra sujeta a una licencia Creative Commons CC BY 3.0 IGO (<https://creativecommons.org/licenses/by/3.0/igo/legalcode>). Se deberá cumplir los términos y condiciones señalados en el enlace URL y otorgar el respectivo reconocimiento al BID.

En alcance a la sección 8 de la licencia indicada, cualquier mediación relacionada con disputas que surjan bajo esta licencia será llevada a cabo de conformidad con el Reglamento de Mediación de la OMPI. Cualquier disputa relacionada con el uso de las obras del BID que no pueda resolverse amistosamente se someterá a arbitraje de conformidad con las reglas de la Comisión de las Naciones Unidas para el Derecho Mercantil (CNUDMI). El uso del nombre del BID para cualquier fin distinto al reconocimiento respectivo y el uso del logotipo del BID, no están autorizados por esta licencia y requieren de un acuerdo de licencia adicional.

Note que el enlace URL incluye términos y condiciones que forman parte integral de esta licencia.

Las opiniones expresadas en esta obra son exclusivamente de los autores y no necesariamente reflejan el punto de vista del BID, de su Directorio Ejecutivo ni de los países que representa.



Contacto: vps-mig@iadb.org

UN CASO DE ESTUDIO

AVANZANDO HACIA UN MODELO DE ECONOMÍA CIRCULAR EN LA PRESTACIÓN DE LOS SERVICIOS PÚBLICOS DE AGUA Y SANEAMIENTO



ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ

Alcalde Mayor de Bogotá

Carlos Fernando Galán

EMPRESA DE ACUEDUCTO Y ALCANTARILLADO DE BOGOTÁ – ESP (EAAB ESP).

Gerente General

Natasha Avendaño García

Gerente Corporativo Ambiental

Octavio Augusto Reyes Ávila

Equipo de trabajo

Álvaro Enrique Parrado

Ángela María Gaitán

Constanza Zamudio

Diana Maritza Millán

Laura Juliette García

María Alejandra Cuevas

Natasha Eugenia Forero

Especialista Financiera y de Adquisiciones

Ángela María Gaitán Chaparro

Autores:

Juana Camacho Otero, Ph.D.

Luis Felipe Vásquez Correa, Ph.D.

Revisión de textos:

EAAB ESP

Octavio Augusto Reyes Ávila

BID

Manuel José Navarrete

Magda Carolina Correal

María Eugenia de la Peña

Carlos Eduardo Garavito

Revisión imagen institucional

Oficina Asesora Imagen Corporativa y Comunicaciones

EAAB - ESP

Diseño, diagramación y edición:

.Puntoaparte Editores

Fotografías:

Archivo EAAB ESP

UN CASO DE ESTUDIO

AVANZANDO HACIA UN MODELO DE ECONOMÍA CIRCULAR EN LA PRESTACIÓN DE LOS SERVICIOS PÚBLICOS DE AGUA Y SANEAMIENTO



Contenido

Introducción

Pág 7

1

ANTECEDENTES

Pág 10

2

ENFOQUE METODOLÓGICO

Pág 20

3

RESULTADOS

Pág 40

4

RECOMENDACIONES

Pág 78

5

REFERENCIAS

Pág 82

6

ANEXOS

Pág 88

Acrónimos

ACV: análisis de ciclo de vida

ANLA: Autoridad Nacional de Licencias Ambientales

AOM: administración, operación y mantenimiento

ART: agua residual tratada

B/C: beneficio/costo

BID: Banco Interamericano de Desarrollo

CAPEX: costos de inversión

CAR: Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca

CONPES: Consejo Nacional de Política Económica y Social

CTI: Circular Transition Indicators

DOFA: debilidades, oportunidades, fortalezas y amenazas

EAAB ESP: Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá ESP

ENEC: Estrategia Nacional de Economía Circular de Colombia

EPC: Engineering Procurement and Construction

EPP: equipo de protección personal

IPC: índice de precios al consumidor

IPP: índice de precios al productor

IWA: International Water Association

KPI: Key Performance Indicator

MW: Megavatio

OPEX: costos de operación

OR: operador de red

PCH: pequeñas centrales hidroeléctricas

PGE: Plan General Estratégico

PMIS: Project Management Information System

PTAP: planta de tratamiento de agua potable

PTAR: planta de tratamiento de aguas residuales

PVC: policloruro de vinilo

RAEE: residuos de aparatos eléctricos y electrónicos

RCD: residuos de construcción y demolición

RETIE: Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas

RFI: Request for Information

SAI: Sistema de Avalúo de Infraestructura

SSPP: servicios públicos

SST: salud y seguridad en el trabajo

TIR: tasa interna de retorno

UPME: Unidad de Planeación Minero-Energética

VPN: valor presente neto

WICER: Water in the Circular Economy and Resilience

Introducción

En años recientes, el concepto de economía circular ha ganado fuerza como alternativa sostenible a la economía lineal tradicional, particularmente en sectores que impactan de forma directa en la salud ambiental y el bienestar humano. Este concepto se basa en tres principios, todos impulsados por el diseño: 1) eliminar los residuos y la contaminación, 2) hacer circular los productos y materiales (en su valor más alto) y 3) regenerar la naturaleza. Por otro lado, en una economía lineal, opuesta al modelo circular, la generación de valor está directamente relacionada con la demanda de recursos naturales vírgenes y la generación de residuos, creando presiones significativas sobre los ecosistemas y aumentando la polución, el calentamiento global y la pérdida de biodiversidad.

El sector de agua y saneamiento en Colombia, caracterizado por su papel vital en la salud pública y el equilibrio de los ecosistemas, se encuentra en un momento crítico en el que los principios de una economía circular pueden traer beneficios transformadores, sobre todo si se considera que las presiones que el modelo lineal ejerce sobre el recurso hídrico son significativas. Por un lado, el cambio climático profundiza el aumento

y la reducción significativa de la precipitación, alterando los ciclos sobre los cuales se desarrollaron los sistemas de abastecimiento o manejo de aguas. Por otro lado, la contaminación implica mayores esfuerzos en la identificación y el tratamiento de fuentes de agua. Finalmente, la pérdida de biodiversidad altera la capacidad de los ecosistemas de prestar servicios ecosistémicos de regulación y provisión, lo que obliga a las empresas de servicios públicos a invertir recursos para reemplazarlos, cuando es posible. Un modelo de gestión circular en el sector de agua y saneamiento puede crear oportunidades para generar ingresos adicionales y evitar costos con miras a enfrentar con más capacidades estos cambios.

Respondiendo a estos retos, Colombia viene avanzando en el desarrollo de un marco de política que habilite la transición hacia un modelo circular y regenerativo. Desde el 2012, con la formulación de la Estrategia Nacional de Desarrollo en Bajo en Carbono, el país ha construido diferentes instrumentos como la Política Nacional de Cambio Climático, la Política de Crecimiento Verde y la Estrategia Nacional de Economía Circular. Concretamente para el sector de agua y alcantarillado, se



cuenta con el documento CONPES 4004, que insta a las empresas de dicho segmento a desarrollar estrategias de transición hacia modelos de gestión circular. Entretanto, a nivel local, la Política de Servicios Públicos de Bogotá Distrito Capital tiene un enfoque de economía circular, apoyando modelos de aprovechamiento de subproductos de los procesos de tratamiento de agua potable y residual, eficiencia energética y uso eficiente del agua. Esta serie de medidas crean las oportunidades para que las empresas le apuesten a gestionar el cambio hacia dichos modelos de gestión.

Esta nota técnica tiene como propósito presentar la experiencia de Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá ESP (EAAB ESP) en la integración de un enfoque de circularidad en su planeación y operación. De esta manera, esta entidad busca aprovechar las oportunidades que presenta la aplicación de los principios de la economía circular en su gestión y servir de referente para otras organizaciones interesadas en recorrer dicho camino. Puntualmente, el contenido del documento se basa en resultados del proyecto «Ha-

cia un modelo circular en la prestación de los servicios públicos de agua y saneamiento de la EAAB ESP, frente a los desafíos del cambio climático», financiado mediante cooperación técnica N.º ATN/OC-18752-CO entre el Banco Interamericano de Desarrollo (BID) y la EAAB ESP. Esta publicación se enfoca en la experiencia de la entidad en la identificación de oportunidades para aplicar la economía circular en su operación y en la construcción de casos de negocio para aprovechar flujos de materiales de la compañía.

Al compartir estos resultados, se busca fomentar la replicabilidad de esta metodología, impulsando así la adopción generalizada de enfoques circulares en la gestión de los servicios de agua potable y residual en América Latina. El documento se divide en cinco secciones además de esta introducción. En la segunda sección se presentan los antecedentes del proyecto, y luego el enfoque metodológico aplicado por el proyecto. Enseguida, en la tercera sección, se incluyen los resultados de esta iniciativa, seguidos de la discusión y las recomendaciones en torno a ellos.





ANTECEDENTES

La economía circular como modelo de desarrollo

La economía circular surgió como un enfoque sistémico que trasciende el modelo tradicional de extracción-producción-consumo-descarte y propone

sistemas de producción y consumo que promueven la eficiencia en el uso de materiales, agua y la energía, teniendo en cuenta la capacidad de recuperación de los ecosistemas, el uso circular de los flujos de materiales y la extensión de la vida útil a través de la implementación de la innovación tecnológica, alianzas y colaboraciones entre actores y el impulso de modelos de negocio que responden a los fundamentos del desarrollo sostenible [1].

De acuerdo con esta definición, la economía circular [2]:



Devela y diseña a partir de los impactos negativos de la actividad económica que causan daño a la salud humana y los sistemas naturales, incluyendo la emisión de gases de efecto invernadero (GEI) y sustancias peligrosas al medio ambiente, la contaminación atmosférica, del agua y del suelo, así como la estructural, y la congestión del tráfico.



Favorece las actividades que conservan el valor —en forma— de la energía, el trabajo y la materia. Esto implica diseñar para la durabilidad, el reúso, la remanufactura y el reciclaje para mantener los productos, componentes y materiales circulando en la economía.



Hace uso eficiente de los biomateriales promoviendo diferentes usos para estos mientras circulan entre el sistema económico (antroposfera) y los sistemas naturales (biosfera, hidrosfera y atmosfera).



Evita el uso de recursos no renovables y preserva o mejora los recursos renovables; por ejemplo, mediante el retorno de nutrientes al suelo para su regeneración, o el aprovechamiento de



energía renovable en lugar de fuentes fósiles.

Principio

1

Diseñar sin residuos y sin contaminación:

Establece que, para evitar fallas tales como la generación de residuos y la contaminación, es necesario integrar estrategias de circularidad desde la etapa de conceptualización y diseño de productos, servicios y modelos de negocio. Esta premisa implica innovar en materiales e incorporar estrategias tales como diseño para modularidad y desensamble, y seguir principios como los promulgados por el diseño *Cradle to Cradle®* y la biomímesis.

Principio

2

Mantener productos y materiales en uso:

Propone mantener productos y materiales circulando en la economía para que puedan ser reutilizados, reparados y remanufacturados. En general, se deben crear sistemas efectivos para recuperar los materiales y reincorporarlos en las cadenas de valor. Además, un concepto importante en este principio es el «poder del ciclo interior», es decir, que es más rentable prolongar la vida útil de un producto que reciclar los materiales que se incorporarán en la cadena de valor después de su uso [4].

Principio

3

Regenerar los sistemas naturales:

Además de proteger el ambiente, la economía circular propone mejorarlo activamente. En palabras de la Fundación Ellen MacArthur, «en lugar de tratar de hacer menos daño al medio ambiente, deberíamos tener el objetivo claro de hacer el bien al medio ambiente. Al retornar nutrientes valiosos al suelo y otros ecosistemas, podemos mejorar nuestros recursos naturales» [5].

La economía circular en Colombia

Desde el año 2016, Colombia viene desarrollando un marco institucional para avanzar hacia un modelo de desarrollo basado en el crecimiento verde que incorpora los principios de la economía circular. Este marco incluye varios instrumentos como la Política de Cambio Climático, la Política de Crecimiento Verde y la Estrategia Nacional de Economía Circular (ENEC), entre otros. La ENEC, en particular, planteó como objetivo:

promover la transformación productiva para maximizar el valor agregado de los sistemas industriales y agropecuarios y las ciudades sostenibles en términos económicos, ambientales y sociales, a partir de la circularidad, la innovación tecnológica, y la colaboración en nuevos modelos de negocios [1].

La ENEC contempla el agua como uno de los flujos de materiales prioritarios dados los bajos niveles de productividad y eficiencia que exhibe el país en el tema. En septiembre de 2020, el Gobierno nacional expidió el documento de política económica y sectorial CONPES 4004: Economía circular en la gestión de los servicios de agua potable y manejo de aguas residuales, con el objetivo de garantizar la disponibilidad de recurso hídrico en el largo plazo, y la prestación de los servicios de agua potable y manejo de aguas residuales en condiciones de calidad y continuidad [6].

Para alcanzar su objetivo, el CONPES 4004 propuso como estrategias: i) fortalecer la gobernanza y la capacidad institucional del sector para promover la economía circular en la prestación de los servicios de acueducto y alcantarillado; ii) desarrollar estrategias para promover la economía circular en los servicios de agua potable y el manejo de aguas residuales con el fin de asegurar la oferta de agua en el largo plazo; y iii) mejorar la calidad y la confiabilidad de la información sectorial para la toma de decisiones en relación con la economía circular en los servicios de agua potable y manejo de aguas residuales.



La economía circular y el sector de agua y saneamiento

La ENEC propone las siguientes acciones para aplicar los principios de economía circular en los flujos de agua:

1. El reúso y la recirculación de agua.
2. La recuperación de materiales (fosfatos).

Según Tahir *et al.* [7], la aplicación de los principios de la economía circular en el sector de agua y saneamiento básico resultaría en las iniciativas presentadas en la figura 1.

Figura 1. Iniciativas circulares para el sector de agua y saneamiento básico

Fuente: adaptado de [7].

1. Eliminar desde el diseño el concepto de residuos

1. Optimizar la cantidad de energía, minerales y químicos usados en la operación.
2. Optimizar el consumo de agua a nivel de subcuenca.
3. Utilizar soluciones que no requieran el uso de agua y tengan el mismo resultado.

2. Mantener los recursos en uso prolongado

1. Optimizar el rendimiento de los recursos utilizados.
2. Optimizar la extracción de recursos de los sistemas de acueducto y maximizar su reúso.
3. Optimizar la generación de valor en la interfaz entre el sistema de acueducto y otros sistemas.

3. Regenerar el capital natural

1. Maximizar el caudal ecológico a través de la reducción del uso para consumo que no retorna a la cuenca.
2. Preservar y mejorar el capital natural (restauración, prevención de contaminación y calidad del vertimientos).
3. Asegurar interrupción mínima de sistemas hídricos naturales por uso.

Otras entidades que han explorado cómo la economía circular se aplica en el sector de agua potable y saneamiento son la Asociación Internacional del Agua (IWA en inglés) con su *white paper Water Utilities Pathways in a Circular Economy* [8] y el marco Economía Circular y Resiliencia en el sector Agua (WICER) [9] del Banco Mundial. IWA explora cómo los principios de este modelo orientan la operación de las empresas de servi-

cios públicos en este ámbito a través de tres rutas, tal como se puede observar en la figura 2: i) la ruta de los materiales, ii) la ruta del agua y iii) la ruta de la energía.

Figura 2. Rutas para lograr la implementación de la economía circular en empresas de agua y saneamiento **Fuente:** basado en [7].



- 1 Eficiencia en el uso de recursos ajustando operaciones
- 2 Uso de biosólidos para agricultura
- 3 Uso de residuos orgánicos y biosólidos
- 4 Uso de lodos de potabilización en agricultura o industria
- 5 Bioplásticos
- 6 Fertilizantes para usos no agrícolas
- 7 Materiales de construcción
- 8 Proteínas y alimentos
- 9 Minerales y metales
- 10 Productos para la salud humana
- 11 Biogás



- 1 Conservación del recurso y control de la contaminación aguas arriba con soluciones basadas en la naturaleza e infraestructura verde
- 2 Recolección de aguas lluvias a nivel de hogares y comunidades
- 3 Reciclaje de aguas residuales (grises) para usos no potables
- 4 Uso de aguas residuales (grises) en agricultura y acuicultura
- 5 Reúso de agua en agricultura y acuicultura
- 6 Reúso de agua para industria
- 7 Reúso de agua para consumo
- 8 Gestión de pérdidas
- 9 Reducción del consumo



- 1 Ahorro de energía en plantas y en la distribución
- 2 Reducción y recuperación de energía en los hogares
- 3 Producción de energía en sistemas de distribución
- 4 Producción de calor en sistemas de distribución
- 5 Aprovechamiento de biosólidos para energía
- 6 Energía renovable

La EAAB ESP y la economía circular

Con la influencia de diferentes escuelas de pensamiento, la Fundación Ellen MacArthur propuso los siguientes tres principios de la economía circular [3]:

La EAAB ESP, empresa industrial y comercial del Estado, presta los servicios de acueducto y alcantarillado en la ciudad de Bogotá a más de dos millones de suscriptores y en los municipios vecinos de Soacha y Gachancipá en forma directa, y mediante esquema de venta de agua en bloque a once municipios vecinos de la región: aproximadamente 11 millones de personas. Dentro de las funciones de la empresa están: i) captar, almacenar, tratar, conducir y distribuir agua potable; ii) recibir, conducir, tratar y disponer las aguas servidas, en los términos y condiciones fijadas por las normas para estos servicios; y iii) recoger, conducir, regular y manejar las aguas lluvias y aguas superficiales que conforman el drenaje pluvial y el sistema hídrico dentro de su área de actividad, entre otras.

En el 2020 la empresa formuló su nuevo Plan General Estratégico (PGE) 2020-2024, que le apuntó a una mo-

dernización sostenible. Este instrumento planteó varias apuestas estratégicas en torno al saneamiento del río Bogotá, la sostenibilidad ambiental, la modernización empresarial, la gestión integral del agua y los nuevos negocios. Estos compromisos están apalancados en varios pilares que contribuyen a un cambio cultural, la innovación, la sostenibilidad, la integridad, la transparencia y el gobierno corporativo [10]. El PGE tiene tres objetivos principales: 1) eficiencia operacional, 2) territorio sensible al agua y 3) reputación y liderazgo.

También en 2020, la empresa inició la implementación de su Sistema de Gestión Ambiental bajo la norma ISO14001 y del Sistema de Gestión Basura Cero como instrumentos para coordinar la gestión ambiental de la organización. Dentro de las actividades de este proceso quedó consignado el diseño de una estrategia de economía circular que contribuya al cumplimiento de los requisitos del estándar mencionado. Así, en 2021 se partió del diagnóstico de la entidad, en el cual se identificaron diferentes brechas que previenen el avance hacia un modelo circular.

El análisis de brechas mostró que la EAAB ESP, a pesar de tener un programa de gestión integral de residuos, no cuenta con una estrategia con objetivos, metas, indicadores, acciones y responsables para avanzar hacia un modelo de reducción, reutilización y aprovechamiento de estos materiales. Por lo tanto, para que la EAAB ESP logre avanzar en el camino hacia un modelo de gestión circular del agua que le ayude a reducir su vulnerabilidad al cambio climático y aprovechar las oportunidades del uso eficiente de los recursos, en alineación con la política nacional y distrital orientada al crecimiento verde y el uso eficiente de los recursos en el sector de agua y saneamiento básico (ENEC y CONPES 4004), es necesaria la formulación de una estrategia de economía circular.

Sin embargo, la empresa ya contaba con varias iniciativas que le apuntaban a modelos de gestión circular de sus operaciones. Por ejemplo, en 2020 la EAAB ESP fue recertificada como empresa carbono neutro bajo el estándar nacional por cuantificar, reducir y compensar sus emisiones. Dentro de las estrategias en este frente se encuentran las pequeñas centrales hidroeléctricas Santa Ana, Suba y Usaquén, construidas en los sistemas de distribución de la red matriz, que aprovechan la energía potencial de la caída para generar energía hidroeléctrica que la entidad le vende a la red nacional. Igualmente, el biogás producido en la gestión de los biosólidos en la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) Salitre Fase I venía siendo aprovechado para el autoconsumo.

Por otro lado, también como parte del proyecto con el BID, la EAAB ESP elaboró y formuló con recursos propios el Plan Maestro de Gestión de Lodos [11], donde se identificaron las alternativas de corto, mediano y largo plazo para el manejo de los lodos subproducto de la potabilización y del mantenimiento de redes, así como de los biosólidos resultantes del tratamiento de aguas residuales. Todos estos esfuerzos fueron considerados en el análisis que aquí se presenta.

Atendiendo estas recomendaciones, la EAAB ESP solicitó el apoyo técnico del BID para avanzar en sus esfuerzos hacia la gestión circular de agua potable y aguas residuales. El proyecto «Hacia un modelo circular en la prestación de los servicios públicos de agua y saneamiento de la EAAB ESP, frente a los desafíos del cambio climático», con aportes del BID y la empresa, arrancó en 2021 y concluirá en 2024. Este esfuerzo tuvo como propósito apoyar a la empresa en la formulación de su hoja de ruta, la construcción de casos de negocio para aprovechar oportunidades de economía circular y el desarrollo de capacidades institucionales.







ENFOQUE METODOLÓGICO

En esta sección se describe la metodología aplicada para la identificación y formulación de oportunidades para la EAAB ESP bajo un modelo de gestión circular.

Diagnóstico de circularidad

La construcción de la hoja de ruta partió de la elaboración de un diagnóstico de circularidad [12]. Este ejercicio es un mecanismo para establecer no solo la medición de la línea base y el monitoreo continuo de aspectos de circularidad de la empresa, sino también para detectar brechas y oportunidades de circularidad desde una perspectiva de ciclo de vida. Con esta información, se buscó identificar dónde se pueden cerrar ciclos y retener al máximo el valor de los materiales, el agua y la energía, así como disminuir la vulnerabilidad (ej., suministro de productos con materiales críticos) y el impacto ambiental de

las entradas y salidas de la empresa. En últimas, un diagnóstico de circularidad permite contar con información para generar estrategias de crecimiento económico desacopladas del uso de materiales y recursos lineales; por ejemplo, con compras circulares mediante el uso documentado de declaraciones ambientales de productos y estándares de sostenibilidad medibles para proveedores.

La metodología para elaborar el diagnóstico se seleccionó a través de una evaluación sistemática que tuvo en cuenta los siguientes criterios:



Permitir una medición de línea base para conocer el estado actual de la empresa.



Generar indicadores enfocados en medir los aspectos físicos de la circularidad.



Tener un enfoque de cadena de valor.



Facilitar la identificación de oportunidades o brechas de circularidad.



Generar indicadores que midan el desempeño global de la empresa.



Ser implementada de manera independiente.

En total se analizaron y compararon 12 metodologías para evaluar la circularidad (figura 3). Esta evaluación tuvo en cuenta el alcance de aplicación de cada una (a nivel de productos, empresas, ciudades, países, etc.), las herramientas disponibles para su implementación, sus ventajas y desventajas, y la aplicabilidad

para la empresa de acuerdo con los criterios predefinidos (los detalles de esta revisión se amplían en el anexo 1). Como resultado, se optó por la implementación de la metodología *Circular Transition Indicators (CTI) V 3.0 y 4.0*, desarrollada por el Consejo Empresarial Mundial para el Desarrollo Sostenible [13] [14].

Figura 3. Proceso de evaluación y selección de la metodología para el diagnóstico de circularidad

Fuente: basado en [12][14].

1
Metodología
seleccionada

Aquella que cumple con un enfoque decadena de valor, permite identificar brechas y oportunidades de circularidad y realizar una medición de línea base, teniendo en cuenta aspectos físicos en el desempeño global de la organización.

7
Metodologías
aplicables
a nivel
empresarial

Se identificaron dos grupos de metodologías: (1) Aquellas que miden cualitativamente el nivel de preparación organizacional para realizar una transición hacia economía circular y (2) aquellas que establecen indicadores para medir flujos de materiales, agua y energía e impactos ambientales.

12
Metodologías
evaluadas

Se evaluó su alcance, ventajas y desventajas y aplicabilidad para la EAAB ESP.

La metodología CTI se basa en una evaluación de los flujos de materiales, agua y energía dentro de los límites de la empresa, combinada con indicadores adicionales sobre la eficiencia y la eficacia de los recursos físicos. Igualmente, contempla el valor económico y ambiental agregado por un modelo de circularidad. Su aplicación siguió una serie de pasos para recopilar y analizar los datos requeridos para la cuantificación de los indicadores de circularidad. A continuación, se detalla cada paso.

Definición del modelo analítico

El cálculo de los indicadores de circularidad se fundamenta en el estudio de los flujos de materiales, agua y energía que entran, fluyen dentro y salen de la empresa. Asimismo, se basa en el análisis del impacto ambiental asociado a estos flujos, para lo cual se estructuró un modelo analítico de tres partes:

1. Un sistema metabólico (preliminar) para el análisis de flujos.
2. Los límites del sistema, los cuales establecen los flujos y procesos metabólicos que serán considerados para el cálculo de los indicadores de circularidad.
3. Los principios de modelación, donde se introducen dos metodologías por utilizar: el análisis de flujo de materiales y el análisis de ciclo de vida.

La aplicación del modelo analítico y el cálculo de los indicadores constó de los siguientes seis pasos:

1. Generación del sistema metabólico de la empresa.
2. Definición de los límites del sistema.
3. Análisis (cuantificación) de los flujos de materiales, agua y energía.
4. Definición del alcance (unidad funcional) de la cuantificación de impactos ambientales.

5. Estimación de los impactos ambientales (análisis de ciclo de vida).
6. Medición de los indicadores de circularidad.

Paso 1: Generación del sistema metabólico de la empresa

Se definió un sistema metabólico base para el estudio, validado con la empresa, donde se describen los

flujos de los materiales, agua y energía más representativos de la EAAB ESP por sus características de relevancia ambiental, magnitud prevista, importancia para la cadena de valor de la entidad, o valor económico. El desarrollo de este sistema constó de varias etapas y fuentes de retroalimentación o insumos, tal como se describe en la figura 4.

En esta etapa se desarrollaron talleres con las áreas operativas y administrativas de la empresa para identi-

Figura 4. Etapas para la construcción del sistema metabólico base del modelo analítico

Fuente: [12].



Identificación, en talleres y visita de campo, de entradas y salidas de materiales, agua y energía de los procesos de la cadena de valor de la empresa



Consolidación de los resultados de los talleres: construcción de un sistema metabólico integrado de flujos y procesos de la cadena de valor de la empresa y otros procesos metabólicos para la modelación.



Construcción de diagramas de flujo individuales y detallados por proceso.



Generación del primer sistema metabólico digital.



Refinación de procesos de modelación con fases de su ciclo de vida.



Reclasificación de procesos de modelación con enfoque de cadena de valor.

ficar los procesos o actividades que se debían considerar dentro del sistema metabólico con base en la cadena de valor. Igualmente, se hicieron visitas de campo a sedes de la EAAB ESP donde se almacenan bienes y materiales. Esta información se consolidó mediante la construcción de un sistema metabólico integrado con los procesos de la cadena de valor (acueducto y alcantarillado) de la compañía como eje central y otros complementarios alrededor. Entre estos últimos se incluyen:



Otras actividades misionales de la empresa (ej., operación de ecosistemas abastecedores o gestión del sistema hídrico urbano).



Actividades administrativas o facilitadoras a la misionalidad de la empresa ejecutadas por la entidad (ej., gestión de bienes y personal, gestión de obras civiles internas, gestión interna de residuos sólidos).



Actividades de apoyo a la misionalidad ejecutadas por terceros (ej., gestión de obras civiles por proveedores externos, gestión de alimentos en restaurantes, gestión de residuos de operaciones de terceros).



Fuentes de materiales, agua y energía (ej., ecosistemas abastecedores, suministros de bienes).



Receptores de materiales, agua y energía (ej., relleno sanitario, reciclaje de residuos, ecosistemas receptores de aguas servidas).

A partir del sistema integrado identificado, se procedió a construir diagramas individuales para cada uno de los procesos metabólicos establecidos con el objeto de mejorar su entendimiento e incluir flujos de entrada y salida previamente no detectados. Esta tarea terminó en una primera versión digital del sistema metabólico utilizando el software eSankey. En esta primera aproximación se diferenciaron, para cada proceso de la cadena de valor de la empresa (acueducto y alcantarillado), las cuatro fases de su ciclo de vida: construcción, operación, mantenimiento y demolición. Entretanto, para los procesos facilitadores de la misionalidad, se tuvieron en cuenta aquellos subprocesos que se consideraron relevantes.

Finalmente, los procesos metabólicos para el análisis fueron redistribuidos y clasificados en seis grupos con el objeto de acoplar la cadena de valor de la EAAB ESP (acueducto y alcantarillado) con su cadena de valor ampliada, esto es, incluyendo procesos internos de apoyo a la misionalidad o ejecutados por proveedores y la provisión de recursos a la empresa y a terceros. Estos grupos son: i) suministro de recursos naturales y bienes de consumo, ii) procesos de apoyo a la misionalidad de la empresa, iii) abastecimiento y acueducto, iv) gestión de vertimiento, v) gestión de residuos sólidos, vi) destino final de residuos, aguas y emisiones. Los resultados de la definición del sistema metabólico son detallados en el capítulo 4.

Paso 2: Límites del sistema

Los límites del sistema para la cuantificación de flujos e indicadores incorporan las actividades o procesos ejecutados directamente por la empresa conforme a lo propuesto en la metodología CTI v. 3.0 [15]. La única excepción fue el transporte de personal en vehículos alquilados, cuyo consumo de combustible es de relevancia para la organización por sus emisiones directas. Los flujos de recursos generados dentro de la EAAB ESP también se consideran una entrada a estos límites si son consumidos o aprovechados internamente. Este es el caso, por ejemplo, del biogás generado en la PTAR. Los resultados son detallados en el capítulo 4.



Paso 3: Análisis de flujo de materiales

La metodología seleccionada para el diagnóstico parte del análisis de flujos de materiales de la empresa. Este es un método analítico para la cuantificación de flujos e inventarios de materiales o sustancias en un sistema definido en el espacio y tiempo. Se basa en los principios físicos de conservación de la materia y la energía, conectando las fuentes, caminos y receptores o depósitos intermedios y finales de recursos [16].

El modelo analítico hace uso de dos elementos fundamentales: procesos y flujos. Los primeros son puntos del sistema donde se lleva a cabo alguna actividad, entendida como el procesamiento, la transformación o el almacenamiento de materiales, agua o energía. Es decir, tres situaciones pueden ocurrir en un proceso:

1. Entran materiales.
2. Se almacenan materiales (puede o no tener un *stock* o inventario).
3. Salen materiales.

Por otro lado, existen tres tipos de flujos por diferenciar, representados gráficamente como flechas en un gráfico de flujo de materiales: entradas, salidas y cambios en el *stock* (en caso de contar con este) de materiales en un proceso. Por lo tanto, en un periodo de tiempo determinado «t», cuatro tipos de variables matemáticas son de interés en los modelos de análisis de flujo de materiales:

1. **St:** *stock* de materiales.
2. **ΔSt :** cambio en el *stock* materiales.
3. **It:** entrada de materiales.
4. **Ot:** salida de materiales.



Cada variable puede ser conocida o desconocida para el periodo de estudio analizado. En el primer caso, la empresa tiene mediciones directas o estimaciones. En el segundo caso, se pueden hacer estimaciones de dos maneras: i) mediante balances de masas (ecuaciones de balance) cuando todos los demás flujos de un proceso son conocidos, incluyendo el cambio en el *stock*, y ii) a través de ecuaciones de aproximación del modelo. Estas estrategias permiten calcular las variables del modelo con parámetros que describen variables externas. Por ejemplo, el consumo total de agua al día puede determinarse a partir de dos datos: el número de habitantes, multiplicado por el consumo promedio per cápita al día.

El modelo matemático debe construirse a partir una ecuación de balance para cada proceso del sistema de estudio. La cantidad de ecuaciones de aproximación se estima a partir del número total de variables del modelo menos el número de variables conocidas, menos el número de ecuaciones de balance.

Paso 4: Análisis de ciclo de vida

El análisis de ciclo de vida (ACV) consta de cuatro fases, de conformidad con el estándar ISO 14040:2006 [17]:

1. Objetivos y alcance del estudio.
2. Análisis (construcción) del inventario.
3. Análisis (cuantificación) del impacto.
4. Interpretación.

Para el alcance del estudio se definió como unidad funcional «la evaluación de impactos de ciclo de vida del consumo (entradas) de materiales, agua y energía para la operación de la EAAB ESP en un año, desde una perspectiva *cradle-to-gate* o "de la cuna a la puerta"». Esta unidad está alineada con lo propuesto en la metodología CTI v. 3.0 [15], la cual considera exclusivamente la evaluación de impactos de los flujos de entrada (cuadro 1).

Cuadro 1. Alcances en el análisis de ciclo de vida

Los análisis de ciclo de vida de un producto o servicio se pueden realizar con tres alcances o enfoques diferentes [18]:



Cradle-to-grave (de la cuna a la tumba): Estudia las etapas del ciclo de vida del producto desde la obtención de materias primas para su producción hasta la gestión de los residuos sólidos al final de su vida útil. Incluye todas las etapas del *cradle-to-gate*, más las fases de transporte y comercialización al usuario, uso y gestión de los residuos.



Cradle-to-cradle (de la cuna a la cuna): Analiza todas las fases del producto (*cradle-to-grave*) y además incluye la reutilización de residuos como materia prima secundaria para un nuevo producto (ciclo).



Cradle-to-gate (de la cuna a puerta): Estudia las fases de extracción de materias primas, transporte a fábrica y producción.

El inventario se construyó con el software SimaPro utilizando los flujos de entrada a los límites de la empresa estimados en el análisis de flujo de materiales. Ahora bien, cabe precisar que el consumo de biogás generado en PTAR se excluyó de este insumo al tratarse de un subproducto generado como consecuencia del tratamiento del agua. Esta es, de hecho, una simplificación donde se considera al biogás libre de impactos ya que estos se cargan al ciclo de vida de la PTAR.

Cada tipo de flujo se correlacionó con uno de los procesos de Ecoinvent, los cuales representan actividades realizadas (o productos consumidos) por los seres humanos y sus intercambios (de materiales, agua y energía) con el ambiente y otras actividades humanas. Al respecto conviene anotar que, en el mercado, Ecoinvent es la base de datos con la mayor representatividad geográfica en los procesos que describe, con más de 18 000 conjuntos de datos para su modelación.

Por otro lado, los impactos se cuantificaron con SimaPro utilizando el método ReCiPe [20] bajo la perspectiva *Hierarchist*, un escenario que recoge el consenso científico sobre el tiempo y la plausibilidad de los mecanismos de modelación de impactos. La interpretación de los resultados se presenta en la sección de resultados.

Paso 5: Evaluación de los indicadores de circularidad

La metodología CTI v. 4.0 propone cuatro grupos de indicadores que se presentan en la figura 5. Para el caso de este estudio, se adoptaron todos estos y los métodos de cálculo de los primeros tres grupos (cierre, optimización y valorización del ciclo). Para los indicadores de impacto se tomaron los del método ReCiPe [20], calculados a través de la herramienta del análisis de ciclo de vida, con el objetivo de estudiar el impacto de la empresa de una manera más holística, más allá de la huella de carbono y de uso de suelo incluidas en CTI.

Figura 5. Grupos de indicadores propuestos por CTI v. 4.0

Fuente: [12] [14].



1

CIERRE DEL CICLO

para medir la circularidad de materiales, agua y energía



2

OPTIMIZACIÓN DEL CICLO

para evaluar la distribución y avance de las medidas de recuperación y recirculación de los residuos o salidas, el contenido de materiales críticos en las entradas, y la vida útil de los activos



3

VALORACION DEL CICLO

donde se relaciona la circularidad material con la generación de ingresos financieros para evaluar desacoplamiento (de los ingresos lineales) y productividad de los ingresos circulares



4

IMPACTO DEL CICLO

con el objetivo de medir la huella ambiental de las entradas de la empresa.

Estos indicadores se definieron para cada grupo en tres bloques distintos, así:

- 1. **Indicadores KPI (endpoint):** Buscan dar un diagnóstico final sobre el desempeño general de la empresa en diferentes áreas de la circularidad.
- 2. **Indicadores intermedios (midpoint):** Describen una situación específica respecto a los flujos de la empresa o una afectación al ambiente. Son la base para el cálculo de los indicadores KPI.
- 3. **Indicadores base:** Describen o expresan una condición, fracción o componente del indicador intermedio. Son la base para estimar los indicadores intermedios.

Tabla 1. Batería de indicadores de circularidad para la EAAB ESP

Fuente: [12].

Grupo	Indicador KPI (endpoint)	Indicador intermedio (midpoint)	Indicador base
Cierre de ciclo	% de circularidad material	% de circularidad de las entradas	% material no virgen
			% material renovable
	% de circularidad de agua	% de circularidad de las salidas	% potencial de recuperación
			% real de recuperación
		% de agua circular de entrada	
		% de agua circular de salida	
	% energía renovable		
Optimización del ciclo	% de materiales críticos		
	% de recuperación (por tipo)	% extensión de vida útil	% Reúso
			% Restauración
			% Remanufactura
		% reciclaje	
		% consumo (alimentos)	
		% consumo alternativo (alimentos)	
		% biodegradación (absorción de nutrientes)	
	% valorización energética (biogás/biomasa)		
	% vida útil		
Recirculación de agua en sitio			

Grupo	Indicador KPI (<i>endpoint</i>)	Indicador intermedio (<i>midpoint</i>)	Indicador base
Valoración del ciclo	Productividad material circular		
	Ingresos circulares		
Impacto del ciclo	Daño a la salud humana Daño a los ecosistemas Daño a la disponibilidad de recursos	Cambio climático	
		Uso del agua	
		Agotamiento de ozono (estratosférico)	
		Radiación ionizante	
		Formación de partículas finas	
		Formación fotoquímica de oxidantes (ozono troposférico): salud humana	
		Formación fotoquímica de oxidantes (ozono troposférico): calidad de los ecosistemas	
		Acidificación terrestre	
		Eutrofización de agua dulce	
		Eutrofización marina	
		Toxicidad humana: cancerígena	
		Toxicidad humana: no cancerígena	
		Ecotoxicidad terrestre	
		Ecotoxicidad en agua dulce	
		Ecotoxicidad marina	
		Transformación del uso del suelo	
		Escasez de recursos minerales	
		Escasez de recursos fósiles	
	Huella de carbono	Cambio climático	
	Huella hídrica	Uso del agua	

Nota: ver anexo 2.

Casos de negocios circulares

Una vez se desarrolló el diagnóstico de circularidad, se obtuvo una visión global del estado de la empresa en términos de circularidad y fue posible identificar y priorizar subflujos de materiales, agua y energía con mayores oportunidades para su aprovechamiento. Esta información complementa el trabajo realizado por la EAAB ESP por detectar alternativas de gestión para el

aprovechamiento de lodos y biosólidos entre el 2021 y 2022 [11]. La priorización se desarrolló siguiendo el esquema de trabajo representado en la figura 6.

Figura 6. Esquema de trabajo para la priorización de subflujos por intervenir

Fuente: basado en [21].

Construcción de herramientas de priorización de flujos

- 1 Definición de criterios habilitantes
- 2 Definición de criterios evaluables
- 3 Elementos estratégicos

Criterios para la priorización

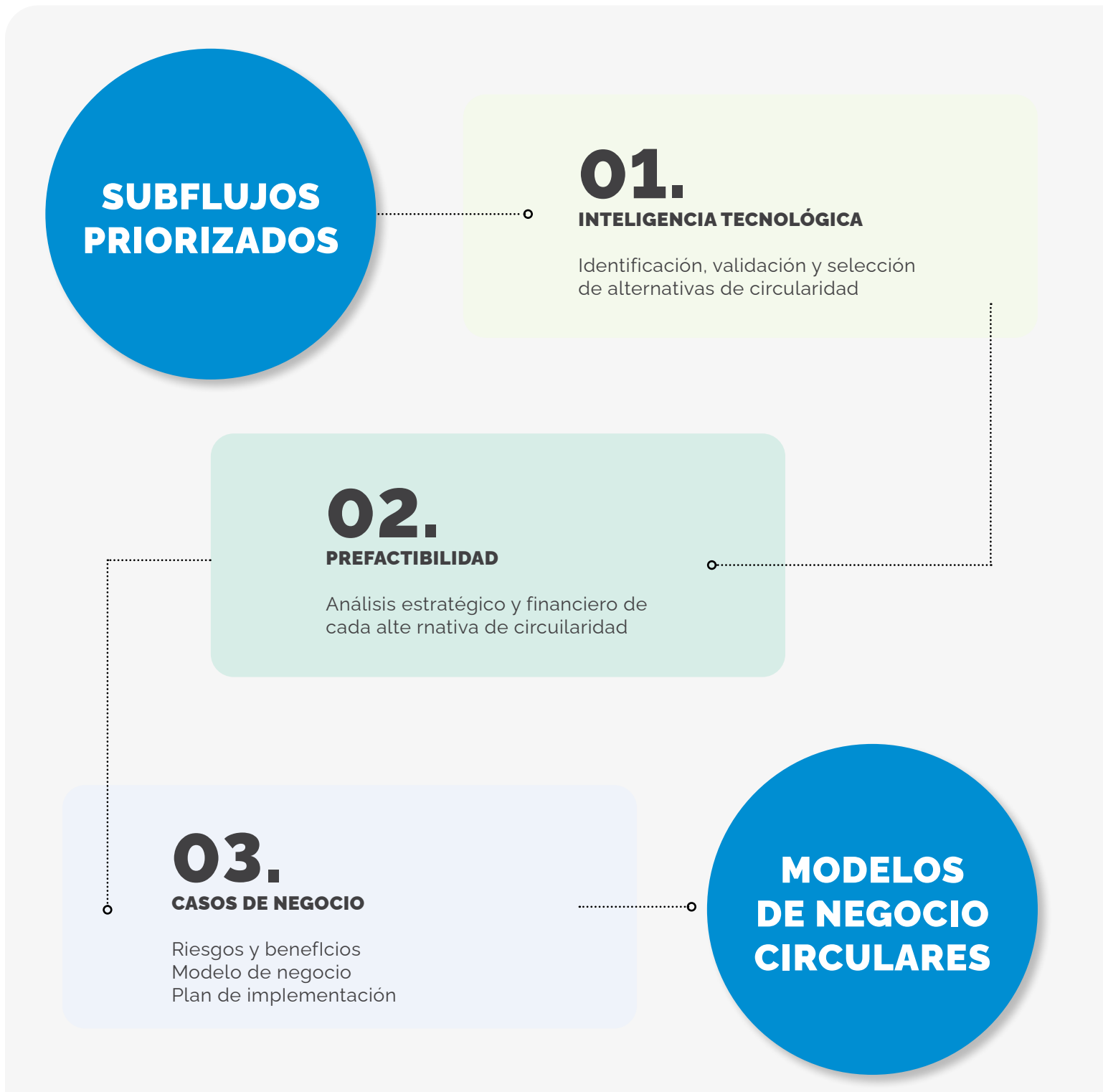
- 1 Oportunidades de aprovechamiento o manejo
- 2 Contribución a metas de política
- 3 Condiciones de mercado

Seis subflujos priorizados

Una vez determinados los flujos por priorizar, se aplicó la metodología descrita en la figura 7 para construir los modelos de negocio circulares más relevantes para la empresa. Cada uno de los pasos definidos en el esquema son desarrollados continuación.

Figura 7. Esquema de trabajo para construcción de modelos de negocio circulares

Fuente: basado en [11] [21].



Paso 1: inteligencia tecnológica

Con base en los insumos derivados de la priorización de subflujos, se procedió a realizar un ejercicio sistemático de inteligencia tecnológica con el propósito de identificar alternativas que posibilitaran el cierre eficaz de los flujos de materiales. Este ejercicio se complementó con una exhaustiva revisión bibliográfica, del marco regulatorio y estratégico actual, además de sesiones de trabajo con las partes interesadas internas. Así, a partir de la información recopilada, se llevó a cabo un análisis

detallado de debilidades, oportunidades, fortalezas y amenazas (DOFA) para cada alternativa considerada. El desglose detallado de este esquema de trabajo se presenta de manera secuencial en la figura 8.

Figura 8. Esquema de trabajo para identificar alternativas tecnológicas de circularidad

Fuente: basado en [11] [21].

Componente técnico legal

- 1 Caracterización de procesos para cada subflujo
- 2 Identificación de alternativas de circularidad y opciones tecnológicas
- 3 Revisión del marco regulatorio y estratégico

Cocreación

- 1 Mapeo de actores internos y externos
- 2 Taller de actores internos con enfoque DOFA

Identificación de alternativas de circularidad por subflujo

- 1 Clasificación de actores, funciones, roles, influencia
- 2 Visión frente a cada subflujo
- 3 Identificación de debilidades, oportunidades, fortalezas y amenazas
- 4 Identificación de otras alternativas

Paso 2: análisis de prefactibilidad

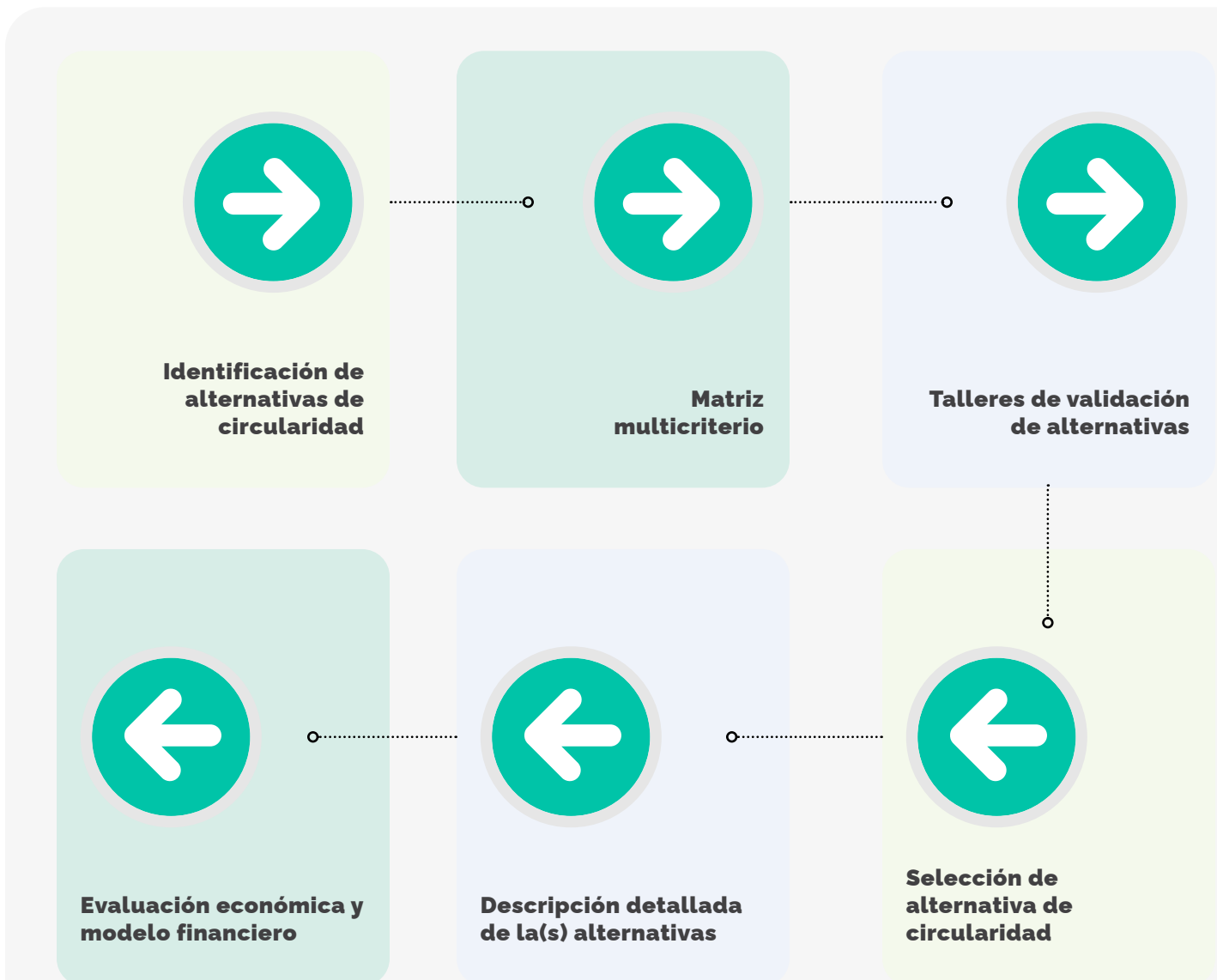
El ejercicio de prefactibilidad inició con la elaboración de una matriz multicriterio mediante la cual, y con el apoyo de expertos de la empresa, se identificaron alternativas por subflujo, las cuales se llevaron a nivel de prefactibilidad técnica y económica. El desglose de las actividades desarrolladas en este paso se presenta en la figura 9.

Figura 9. Esquema de trabajo para construir proyectos de prefactibilidad

Fuente: basado en [11] [21].

Para las diferentes alternativas se señalaron los problemas, se trazaron los objetivos y se analizaron las opciones de implementación. Asimismo, se validó y complementó el mapeo de actores con su respectiva identificación de prioridad, a través de la calificación de interés e influencia de cada actor en el proyecto.

Como paso posterior, a partir de la información ya consolidada y la obtenida en diferentes reuniones con profesionales de áreas técnicas de la empresa, se establecieron las actividades, los productos, los resultados, las barreras, los riesgos y los supuestos de implementación que se podían dar para cada alternativa de circularidad.



Paso 3: evaluación económica – modelo financiero

Los principales criterios de prefactibilidad dentro de la evaluación económica correspondieron a los requisitos mínimos solicitados por la empresa, como el valor presente neto (VPN), la tasa interna de retorno (TIR), la relación beneficio/costo (B/C), el costo de oportunidad (aunque no es un criterio de evaluación, sino un parámetro proporcionado por el inversionista) y las proyecciones de ingresos, costos y gastos en un horizonte de proyecto estimado a 15 años.

Adicionalmente, se estimaron resultados como el *payback period* (periodo de repago de la inversión) y el valor actual del OPEX y el CAPEX para efectos de evaluar las necesidades del cierre financiero. En este punto cabe precisar que, si bien es cierto que en una etapa de prefactibilidad no se requiere el cierre financiero, se consideró importante tomar decisiones en el escenario de financiación previendo que el *equity* no estuviera disponible de inmediato.

En el caso de las alternativas de lodos y biosólidos, se analizaron el costo de la solución y su impacto tarifario como criterios económicos de evaluación. El primero incluye los gastos de transporte, disposición, transformación y mantenimiento, mientras que el segundo corresponde a la variación en tarifas del servicio público domiciliario de alcantarillado que se generaría como consecuencia de la inclusión de costos de operación en el costo medio de operación (CMO) y de activos en el costo medio de inversión (CMI) requeridos en cada una de las alternativas propuestas.

Paso 4: análisis estratégico

La evaluación y análisis estratégico consistió en determinar la viabilidad de la opción seleccionada una vez se analizaron criterios estratégicos de circularidad, misionalidad de la EAAB ESP y fundamento técnico. En la tabla 2 se presentan los criterios de circularidad que se consideraron para determinar la alineación de cada

proyecto con una visión de circularidad, tomados de [22]. Estos principios se pueden aplicar no solo a flujos de materiales, como los materiales de construcción, sino también a los flujos de agua. Es importante reconocer que los criterios tienen una aproximación de «final del tubo» al concentrarse en el aprovechamiento de residuos, y no consideran acciones «aguas arriba» que puedan reducir el consumo de agua, tales como

la gestión de pérdidas. Para cada criterio, y utilizando la información generada en el análisis de prefactibilidad, se hizo una valoración de cada proyecto.

Tabla 2. Alineación de la alternativa con los principios de la economía circular.

Fuente: adaptado de [22].

Principio	Descripción
El residuo puede convertirse en recurso	Radica en que todo material biodegradable debe volver a la naturaleza y los no biodegradables deben reutilizarse.
Segundo uso	Trata de reintroducir en el circuito económico los productos que ya no van de la mano con las principales necesidades de los consumidores.
Reutilización	Es sustancial reutilizar aquellos residuos o partes de estos que aún pueden funcionar para fabricar nuevos productos.
Reparación	Se les debe encontrar una segunda vida útil a los productos dañados.
Reciclaje	Se deben usar los materiales que se hallen en los residuos generados.
Valorización	Los residuos que no puedan ser reciclados deben aprovecharse energéticamente.
Economía de la funcionalidad	Cuando un producto culmine su vida útil habiendo cumplido con su función principal, debe volver a la empresa, la cual lo desmontará para reutilizar sus piezas.
Energía de fuentes renovables	Es necesario eliminar combustibles fósiles para poder producir el producto, reutilizarlo y reciclarlo.
Ecoconcepción	Es muy importante que se considere el impacto medioambiental durante el ciclo de vida del producto para así disminuirlo desde su concepción. El ecodiseño es un buen ejemplo.
Ecología industrial y territorial	Por último, pero no menos importante, se debe establecer un modelo de organización industrial en un mismo territorio, caracterizado por tener una gestión óptima de sus <i>stocks</i> , energía, servicios y flujos materiales.

En el caso de los lodos y biosólidos, el criterio asociado a la economía circular se enfocó en la aplicación de estrategias como compartir, alquilar, reutilizar, reparar, renovar y reciclar materiales y productos existentes todas las veces que sea posible para crear un valor añadido. De esta forma, el ciclo de vida de los productos se extiende. Para cada alternativa se identificó el tipo de modelo circular que la alternativa aplicaba:

1. Modelos de valoración de residuos.
2. Modelos circulares.
3. Modelos para extender la vida útil.
4. Modelos de productos como servicios.
5. Modelos de plataforma.

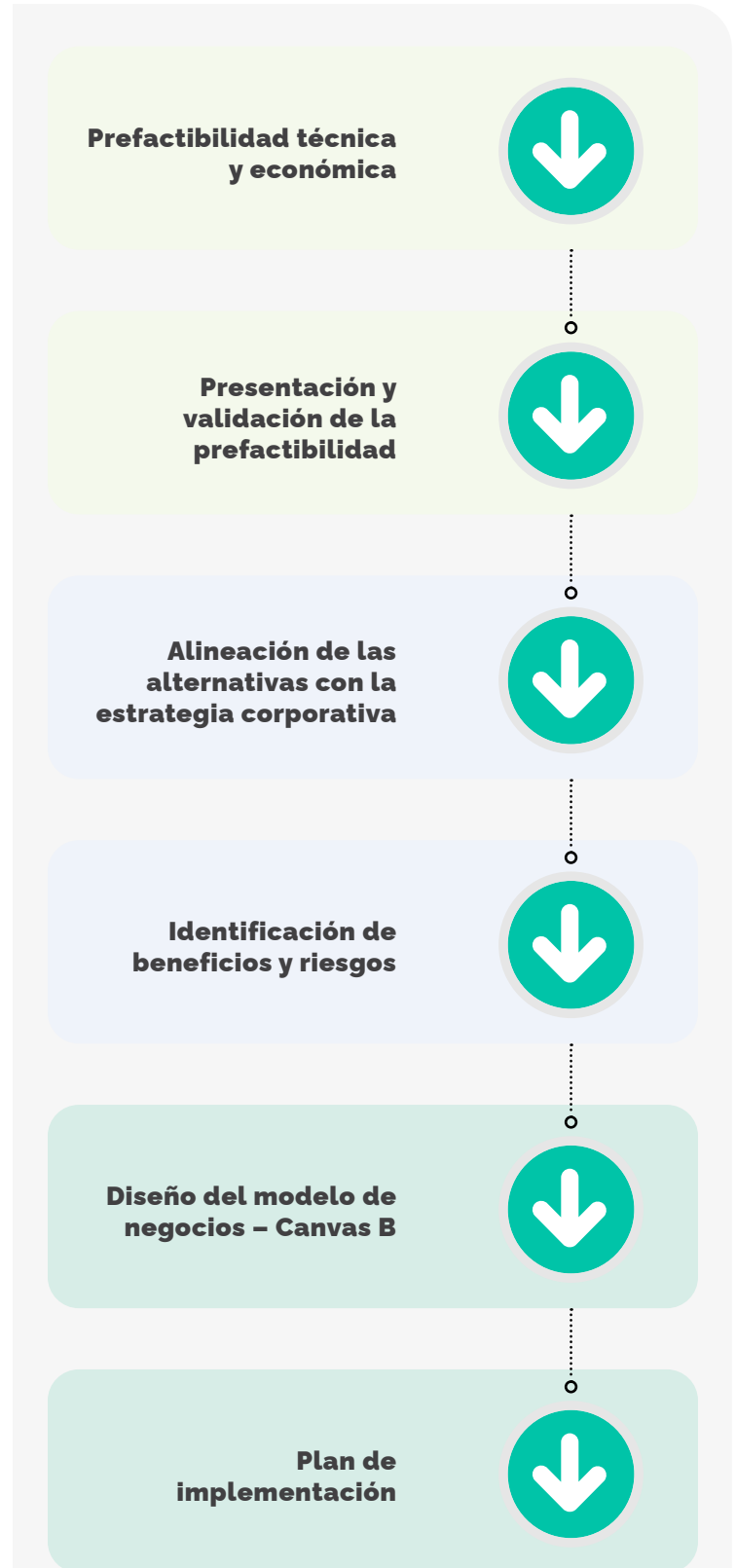
Paso 5: desarrollo de los casos de negocio

En la figura 10 se presenta la ruta de trabajo para la construcción de seis casos de negocio correspondientes a cada flujo. Esta ruta partió de la información generada en la etapa de prefactibilidad, cuyos resultados fueron validados por las diferentes áreas de la EAAB ESP y alineados a la estrategia corporativa de la empresa. Posteriormente, se procedió a identificar los beneficios y los riesgos de cada proyecto, siguiendo la metodología de identificación de riesgos dentro de la entidad. Con ese fin, se diligenció el formato de matriz de riesgos, donde se presentan en detalle la clasificación y la valoración de los riesgos, así como las medidas de tratamiento/control por ser implementadas.

Por otra parte, la construcción del modelo de negocio de los proyectos asociados a los flujos de agua residual tratada (ART), biomasa, textiles y residuos de construcción y demolición (RCD) a nivel de prefactibilidad se centró en el desarrollo de la metodología modelo de negocios para empresas B, utilizando el lienzo *Business Model B – Canvas B*, elaborado por la empresa *3 Vectores B-Corp* [23]. Esta metodología es un desarrollo basado en la creación de modelo de negocios de Alexander Osterwalder [24], donde el marco de referencia es un mapa visual para crear modelos de negocios con propósito, centrándose en el desarrollo de la fuerza del mercado para resolver problemas ambientales y sociales. El plan de implementación de cada caso de negocio se formuló siguiendo los siguientes pasos:

Figura 10. Esquema de trabajo para construir los casos de negocios

Fuente: [20].





Integración de los resultados de la prefactibilidad a la empresa: Siguiendo las políticas y los procedimientos internos de la empresa, se diseñó una ficha que incluye información de la mayoría de los componentes para el *análisis de nuevos negocios* de la empresa, de manera que sea un insumo útil en el momento en que la empresa tome la decisión de implementación del proyecto.

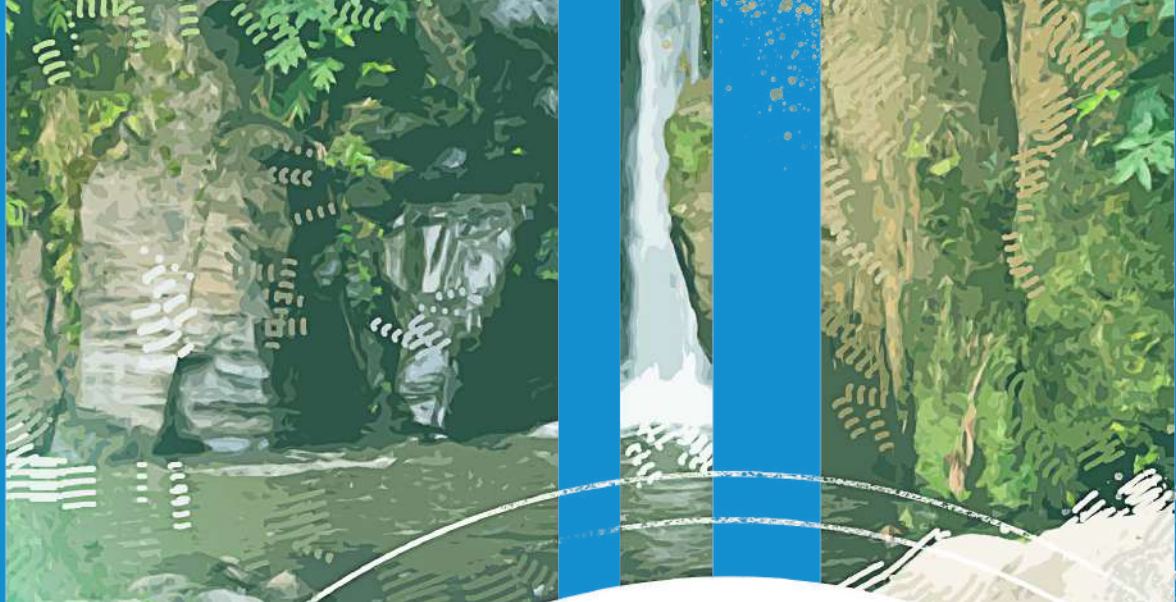


Definición de las actividades del proyecto que conducen a la implementación del caso de negocio: De acuerdo con las mejores prácticas de la gestión de proyectos, estos deben generar durante su ejecución un producto terminado y listo para entregar al área a cargo de su operación durante el horizonte de la prefactibilidad. Igualmente, el equipo de proyecto debe ejecutarlo dentro del alcance, el tiempo y los costos previstos, con el cierre de las adquisiciones, la documentación de las lecciones aprendidas y la medición de la satisfacción del patrocinador con los productos.



Definición de los productos y del arreglo institucional requerido para la implementación del caso de negocio: Para cada caso de negocio, se identificaron aliados potenciales y los productos específicos que se deben construir en cada etapa de implementación, con el fin de establecer hitos de cumplimiento que faciliten el monitoreo y evaluación.

Para el flujo de lodos y biosólidos, se analizaron las alternativas de corto, mediano y largo plazo. En cada caso se construyeron hojas de ruta particulares teniendo en cuenta los análisis realizados.



RESULTADOS

En esta sección se presentan los resultados del diagnóstico de circularidad y del desarrollo de los casos de negocios.

Diagnóstico de circularidad

El diagnóstico de circularidad se realizó para el periodo 2019-2022, pero se dividió en dos partes. Un primer análisis correspondió al periodo 2019-2020, con el objetivo de comparar un año típico, el 2019, frente

a uno como el 2020, con la pandemia de COVID-19. La segunda parte se desarrolló para los años 2021 y 2022. En esta sección se presentan los resultados de ambos casos.

Sistema metabólico de la empresa

Con base en la información recolectada, se construyó el sistema metabólico que integra los procesos misionales y de apoyo de la empresa que se detallan en la figura 11.

Figura 11. Grupos de procesos del sistema metabólico de la EAAB ESP

Nota: Los procesos metabólicos (rectángulos internos) constituyen ejemplos y no son una lista exhaustiva. STARD se refiere a sistemas de tratamiento de aguas residuales domésticos.

Fuente: [12].



Definición de los límites del sistema

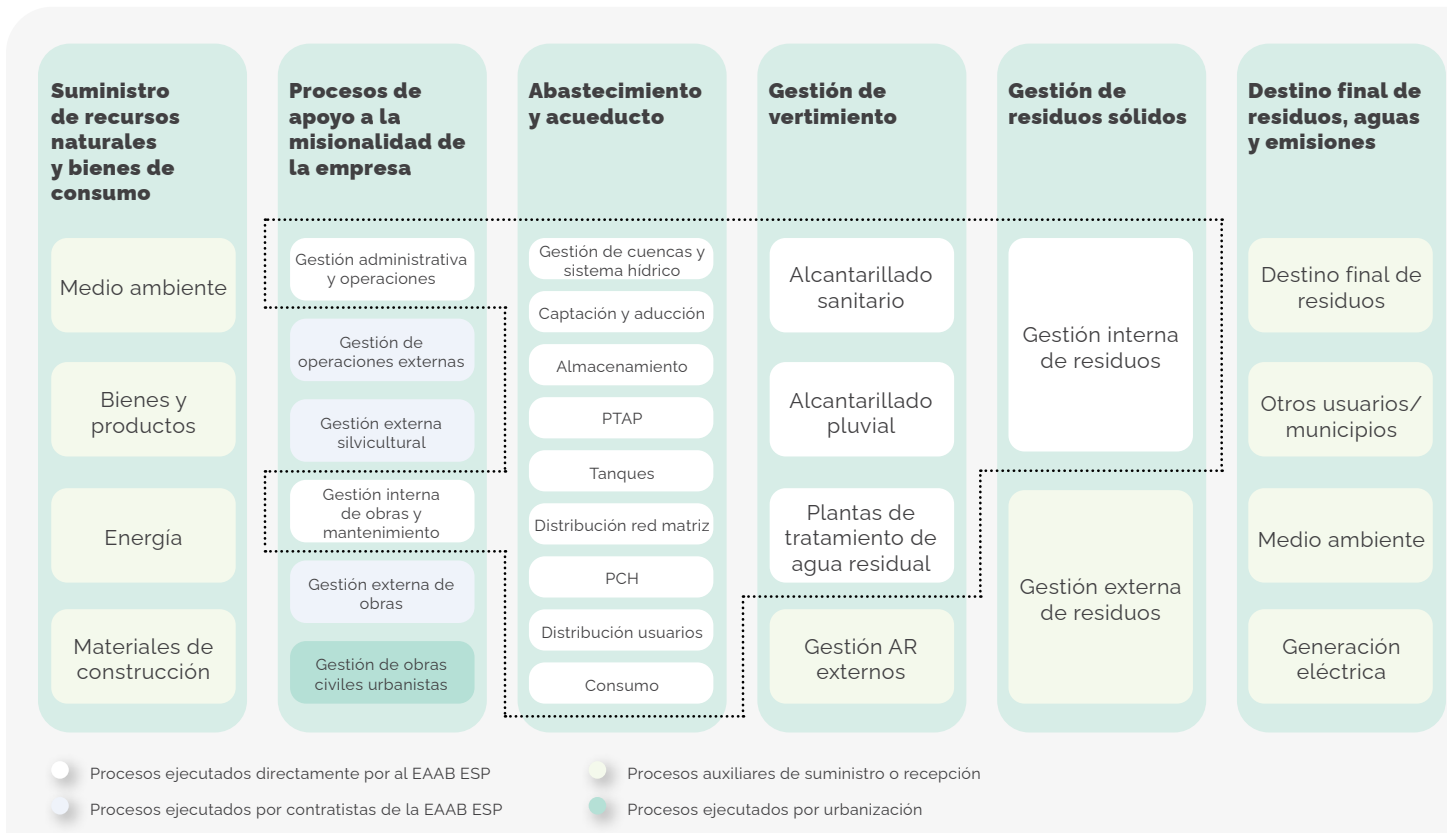


Figura 12. *Procesos del metabolismo empresarial de la EAAB ESP*
Fuente: [12].

Por otro lado, en la figura 12 se presentan los límites del sistema utilizados en el análisis siguiendo lo indicado por la metodología. En este sentido, el análisis de flujo de materiales se aplica a los procesos y subprocesos misionales de abastecimiento y acueducto, gestión de vertimientos y descargas, y la gestión de residuos sólidos de la empresa. Además, se incorporan los procesos de apoyo a la misionalidad asociados a la gestión administrativa y operativa, incluyendo obras de rehabilitación y renovación realizadas por la empresa.

Análisis de flujo de materiales

Los flujos de materiales se calcularon a través de un modelo programado en Excel. La figura 13 presenta los resultados de esta herramienta para el año 2022 utilizando un diagrama tipo Sankey elaborado en el sof-

ware eSankey. Para los periodos 2019-202 y 2021-2022, se cuantificaron un total de 310 (91,2 %) y 344 (93,7 %) flujos, respectivamente, clasificados así:

Flujos conocidos, es decir, que contaban con mediciones o estimaciones por parte de la empresa (ej., el agua potable tratada):

1. 55 para el 2019 y 2020.
2. 58 para el 2021 y 2022.

Flujos estimados a partir de parámetros que permiten describirlos (por ejemplo, los materiales de construcción fueron extrapolados a partir de una muestra de los contratos vigentes para el año de estudio):

1. 238 en 2019 y 2020.
2. 269 para 2021 y 2022.

Flujos estimados mediante balance de masas, es decir, a partir de los flujos conocidos y estimados por parámetros:

1. 17 en ambos periodos de análisis.

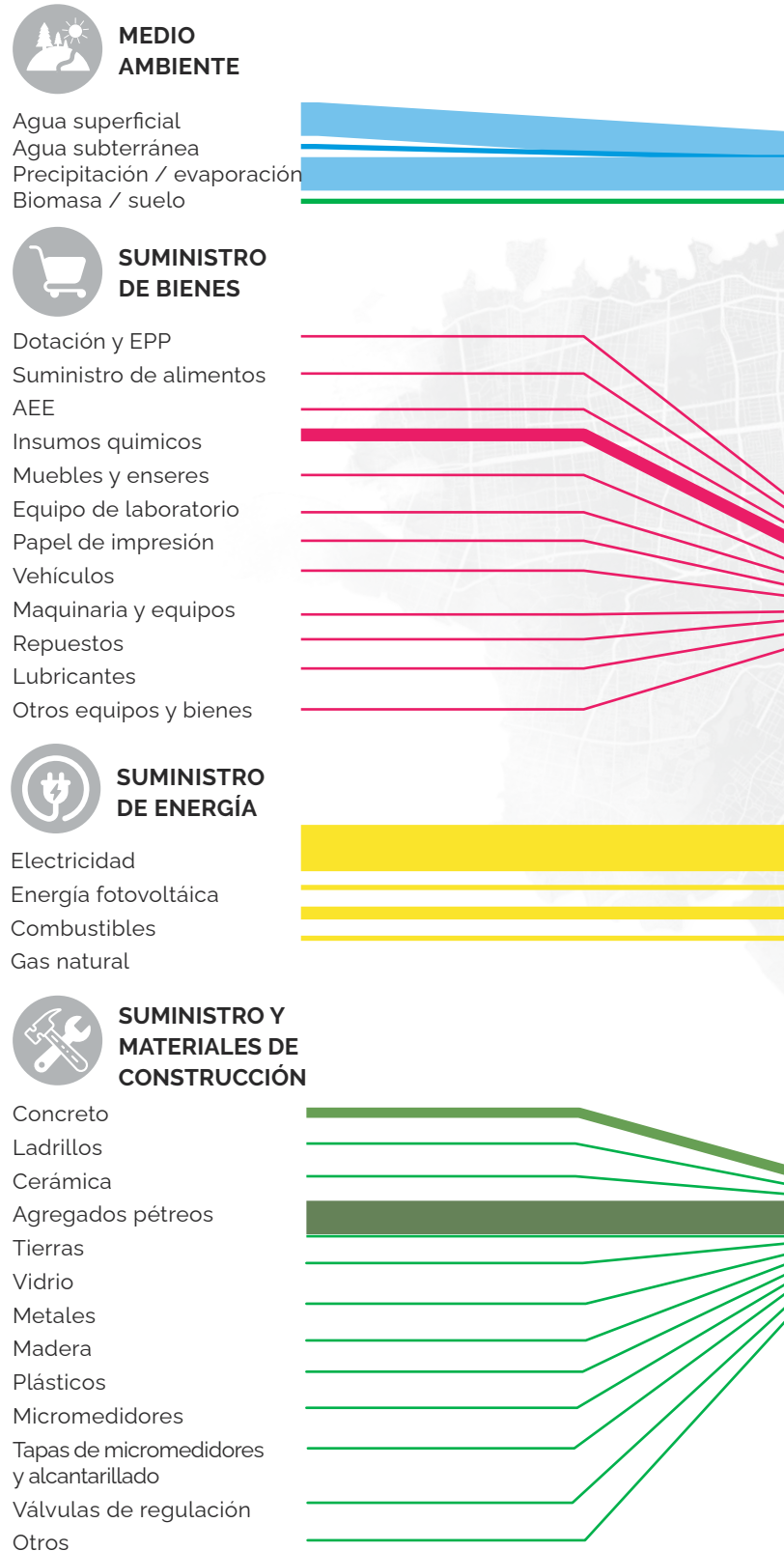
Para los flujos restantes —30 (8,8 %) de 2019 y 2020 y 23 (6,3 %) de 2021 y 2022—, no se contó con fuentes de información, por lo que se reportaron como identificados no cuantificados. El anexo 3 presenta los flujos agrupados por categorías, y el anexo 6 proporciona una descripción detallada de estos.

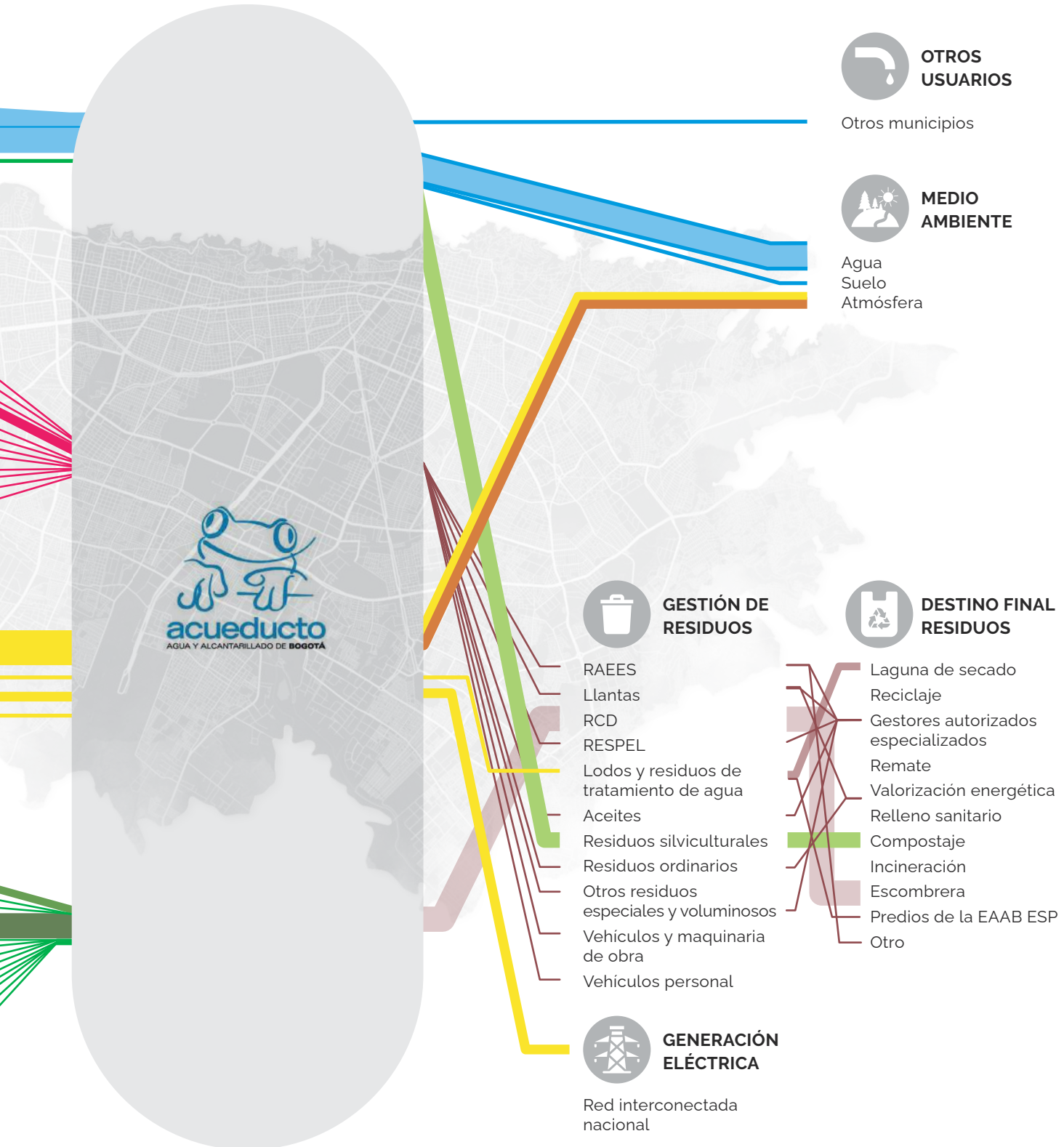
En la figura 13 se presenta la visualización del diagrama de Sankey para el análisis del metabolismo de la EAAB ESP en el año 2022. Esta versión presenta los flujos por categoría tanto de entrada como de salida. De este modo se identificó que la empresa, a pesar de que gestiona agua potable y residual, tiene como principal flujo en términos de peso el de los materiales de construcción, tanto en entrada como en salida. En este sentido, la mayor oportunidad para contribuir a un modelo de gestión circular está en este subgrupo de flujos.

Desde la perspectiva del agua, la empresa capta el recurso de fuentes superficiales como embalses y ríos, entregándola a sus usuarios en Bogotá y a 11 municipios de la región. El agua residual regresa a la cuenca en forma de vertimiento directo (70 %) al río Bogotá y como ART (30 %). En cuanto a los flujos energéticos, las entradas a la EAAB ESP están constituidas por la electricidad de la red, combustibles fósiles y el gas natural. Internamente, la entidad ya implementa actividades de generación de energía hidroeléctrica que entrega a la red y de biogás que utiliza internamente en la PTAR Salitre.

Figura 13. Visualización agregada del metabolismo empresarial de la EAAB ESP en 2022

Fuente: [12].





Indicadores de circularidad

Las tablas 3 y 4 presentan los resultados de la medición de los indicadores KPI (*endpoint*) de circularidad de la EAAB ESP y su variación para el periodo 2019-

2022 con base en la información generada en el análisis de flujo de materiales y el análisis de ciclo de vida. Los indicadores intermedios y de base se presentan y discuten en el siguiente capítulo donde se analizan los resultados KPI por grupo de indicadores.

Cuadro 2. Indicador de circularidad del agua

La metodología CTI incorpora un indicador clave de desempeño denominado circularidad del agua, que hace parte del grupo de indicadores de cierre de ciclo. Este parámetro evalúa la circularidad de las entradas y de las salidas. El porcentaje de circularidad del agua se determina como el promedio ponderado entre el porcentaje de entrada circular de agua

y el de salida circular de agua. Asumiendo que la cantidad de agua de entrada y de salida es la misma, el cálculo se puede simplificar a un promedio aritmético. El porcentaje de circularidad de las entradas de agua se estima con respecto al caudal total captado por la empresa haciendo uso de un árbol de decisiones (figura 14).

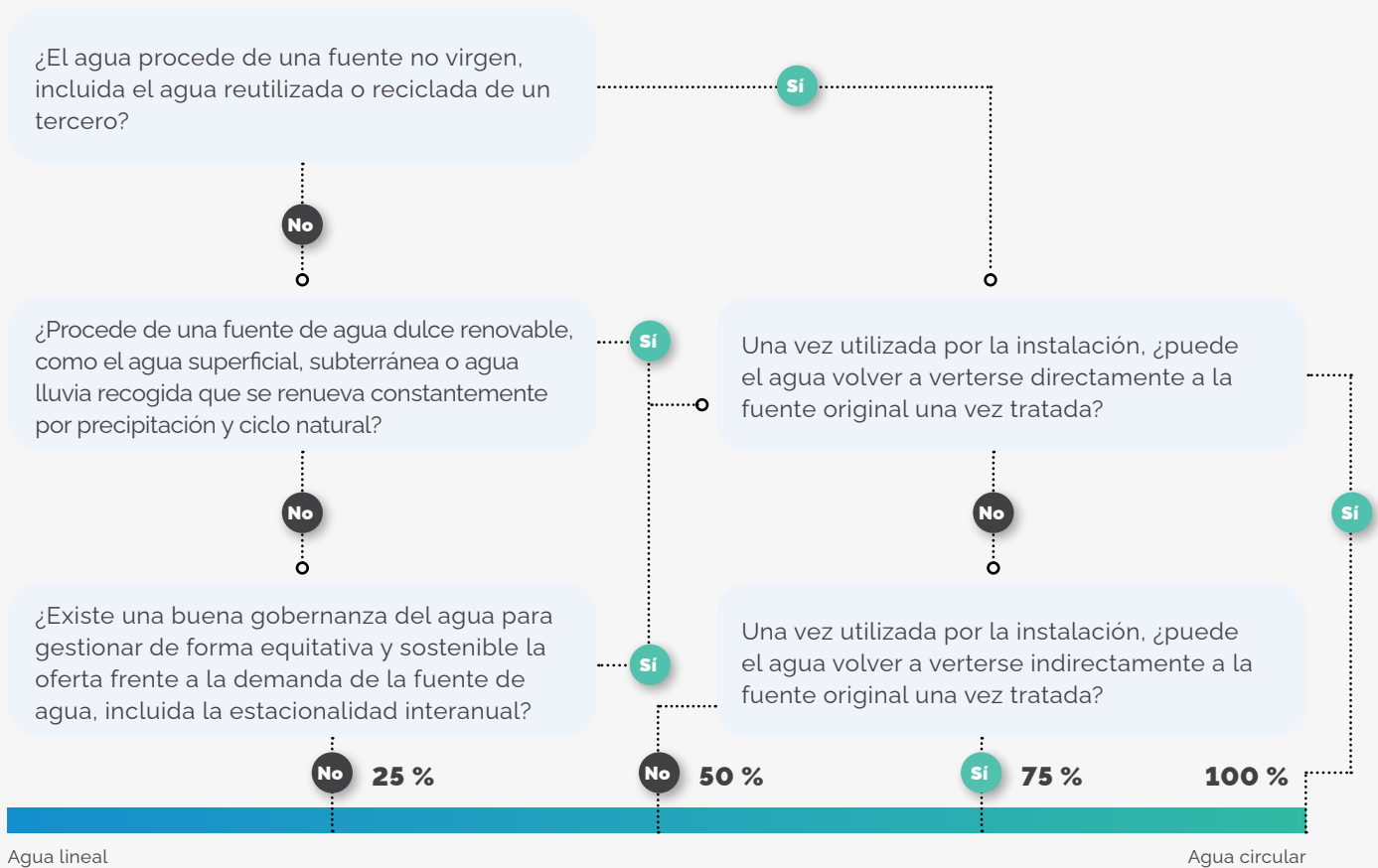


Figura 14. Árbol de decisiones para el indicador de circularidad del agua

Fuente: [12].

El porcentaje de circularidad de las salidas de agua se estima con respecto al caudal total descargado siguiendo los siguientes principios:

1. La salida de agua es circular si esta es reciclada (fuera de los límites del sistema de empresa) por otros, incluyendo el suministro de agua potable a comunidades en la cuenca de estudio.
2. Las descargas de agua y el agua producida son circulares si estas regresan a la cuenca local en una calidad que la hace disponible inmediatamente con fines ambientales, sociales, agrícolas e industriales.

Tabla 3. Resultados de los indicadores endpoint 2019-2022

Fuente:[25].

Grupo	Indicador endpoint	Unidad	2019	2020	2021	2022	Promedio
Cierre de ciclo	% de circularidad material	%	1,50 %	1,99 %	0,54 %	0,68 %	1,18 %
	% de circularidad de agua	%	74,24 %	74,66 %	67,93 %	74,29 %	72,78 %
	% de energía renovable	%	75,50 %	76,91 %	77,17 %	72,43 %	75,50 %
Optimización del ciclo	% de materiales críticos	%	1,02 %	1,40 %	1,13 %	1,15 %	1,18 %
	% de recuperación por tipo	%	0,35 %	0,25 %	6,41 %	9,05 %	4,02 %
	% vida útil	%	111,54 %	109,30 %	100,26 %	101,56 %	105,67 %
	Recirculación de agua en sitio	# usos	1,00	1,00	1,02	1,02	1,01

Grupo	Indicador endpoint	Unidad	2019	2020	2021	2022	Promedio
Valoración del ciclo	Productividad material circular	COP/ton	830 924,71	772 555,35	1 167 326,84	1 329 273,77	1 025 020,17
	Ingresos circulares	Millones COP	20 559,80	20 987,20	73 226,83	124 044,56	59 704,60
Impacto del ciclo	Daños a la salud humana	Año	1320,73	2051,98	840,04	657,55	1217,58
	Daños a los ecosistemas	Especies x año	2,70	3,17	2,06	1,64	2,39
	Daño a la disponibilidad de los recursos	Millones USD (2013)	22,34	27,11	17,38	12,90	19,93
	Cambio climático	ton CO ₂ al aire	288 539,97	361 957,25	220 837,11	168 405,27	259 934,90
	Uso del agua	Millones de m ³ de agua consumida	513,96	514,00	573,15	573,20	543,58

Tabla 4. Variación en las mediciones de los indicadores endpoint 2019-2022

Fuente: [25].

Grupo	Indicador endpoint	Variación 2019-2020	Variación 2020-2021	Variación 2021-2022	Variación 2019-2022
Cierre de ciclo	% de circularidad material	32,33 %	-73,08 %	27,45 %	-54,59 %
	% de circularidad de agua	0,57 %	-9,01 %	9,36 %	0,07 %
	% de energía renovable	1,86 %	0,34 %	-6,14 %	-4,07 %
Optimización del ciclo	% de materiales críticos	36,80 %	-19,29 %	1,55 %	12,13 %
	% de recuperación por tipo	-29,18 %	2451,51 %	41,15 %	2450,73 %
	% vida útil	-2,00 %	-8,27 %	1,30 %	-8,94 %
	Recirculación de agua en sitio	0,00 %	2,00 %	0,09 %	2,09 %

Grupo	Indicador endpoint	Variación 2019-2020	Variación 2020-2021	Variación 2021-2022	Variación 2019-2022
Valoración del ciclo	Productividad material circular	-7,02 %	51,10 %	13,87 %	59,98 %
	Ingresos circulares	2,08 %	248,91 %	69,40 %	503,34 %
Impacto del ciclo	Daños a la salud humana	55,37 %	-59,06 %	-21,72 %	-50,21 %
	Daños a los ecosistemas	17,20 %	-34,99 %	-20,20 %	-39,21 %
	Daño a la disponibilidad de los recursos	21,31 %	-35,90 %	-25,76 %	-42,27 %
	Cambio climático	25,44 %	-38,99 %	-23,74 %	41,64 %
	Uso del agua	0,01 %	11,51 %	0,01 %	11,53 %

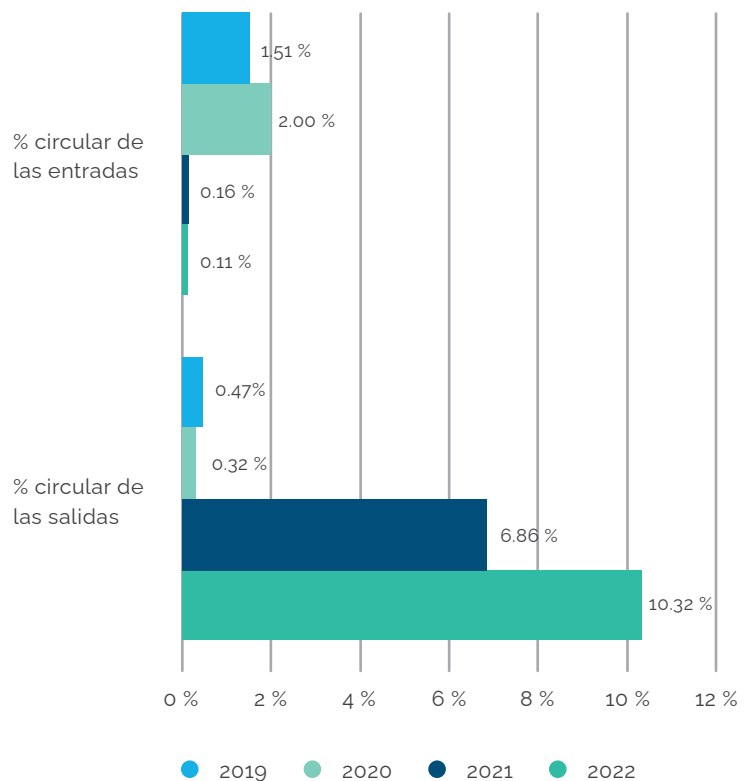
De acuerdo con los resultados obtenidos para los diferentes grupos de indicadores del año 2019 al 2022, se pueden realizar las siguientes observaciones.

Cierre de ciclo

La circularidad promedio de los materiales para el periodo evaluado se mantuvo por debajo del 2 %, mostrando un comportamiento oscilatorio a lo largo de los años (ha subido en algunos, y en otros ha bajado). En las más recientes mediciones (2021 y 2022), la circularidad material se redujo en casi la mitad con respecto a los años anteriores, y se posicionó por debajo del 1 %. Esta situación se debió principalmente a la reducción de la circularidad de las entradas, las cuales constituyen cerca del 95 % de los flujos materiales. El otro 5 % son las salidas. La circularidad de las entradas materiales aumentó entre el 2019 y 2020 gracias al incremento en la siembra de árboles y césped. Sin embargo, a partir de allí ha venido decreciendo (figura 15), de 2 % en 2020 a 0,11 % en 2022. Esta reducción obedece a una disminución en la masa de biogás utilizado para la generación de energía, el material vegetal sembrado y los materiales renovables utilizados en construcción.

Figura 15. Circularidad de las entradas y salidas materiales

Fuente: [25].



Por otro lado, se observa que la circularidad de las salidas materiales ha aumentado, de 0,32 % en 2019 a 10,32 % en 2022. Este súbito crecimiento se explica por la incorporación de nuevos flujos al modelo asociados al material vegetal residual y residuos de poda generados en el mantenimiento de humedales, los cuales son compostados. En general, para el periodo de evaluación, la circularidad media de las salidas materiales (4,49 %) fue mucho mayor que la circularidad media de las entradas materiales (0,94 %).

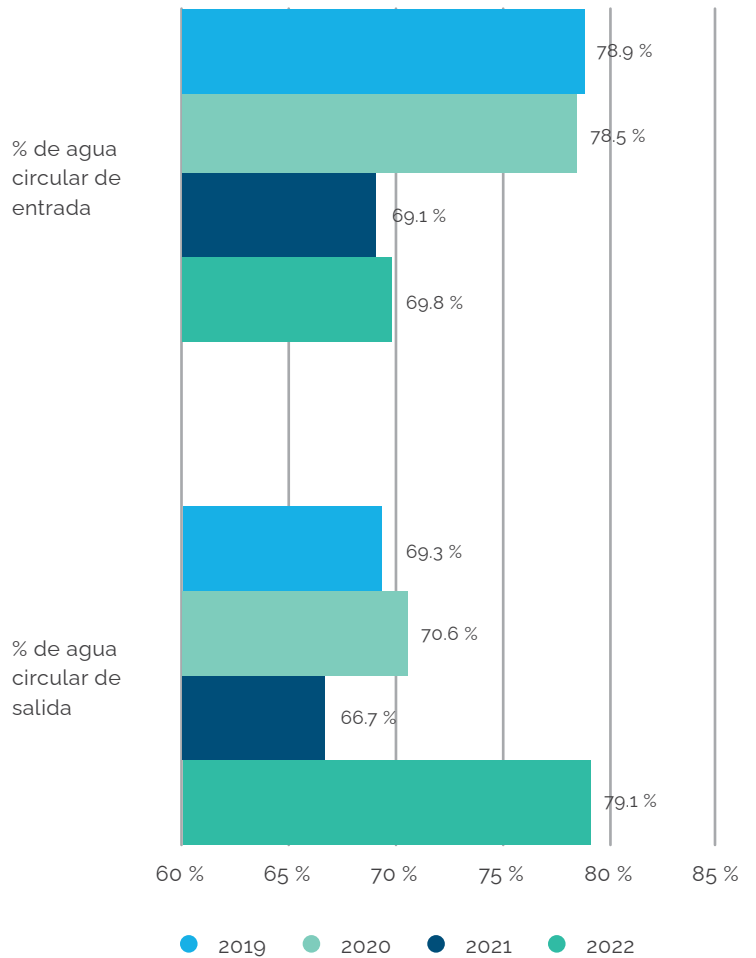
Al ser los materiales de construcción el principal flujo dentro del metabolismo de la empresa, el uso de materiales no vírgenes se constituye en una oportunidad significativa de transformación de las entradas. Sin embargo, a la fecha la EAAB ESP no utiliza ni les exige a sus contratistas el uso de materiales de construcción no vírgenes (reciclados).

La circularidad del agua depende tanto de la circularidad de las entradas de agua como de la circularidad de las salidas. Entre los años 2019 y 2022 la circularidad promedio del agua fue del 73 %, y en el año 2021 se observó una ligera reducción con respecto a los años anteriores debido a la menor circularidad de las salidas asociada a la restricción de caudal de ingreso a la PTAR Salitre por obras de construcción (figura 16).

En general, se aprecia que tanto la circularidad de las entradas de agua como la de las salidas fluctúan año a año. En el caso de las entradas, esta variación ocurre principalmente en función de la distribución de la captación del agua entre las fuentes utilizadas por la empresa (el agua captada del sistema Chingaza tiene un índice de circularidad menor por estar en una divisoria de cuencas). En cuanto a las salidas, cambian principalmente por el caudal de ART en la PTAR Salitre; así, para el año 2022 se observa un incremento significativo en la circularidad de las salidas debido a un aumento considerable en el caudal tratado en la PTAR con respecto a los años anteriores.

Figura 16. Circularidad de las entradas y las salidas de agua

Fuente: [25].



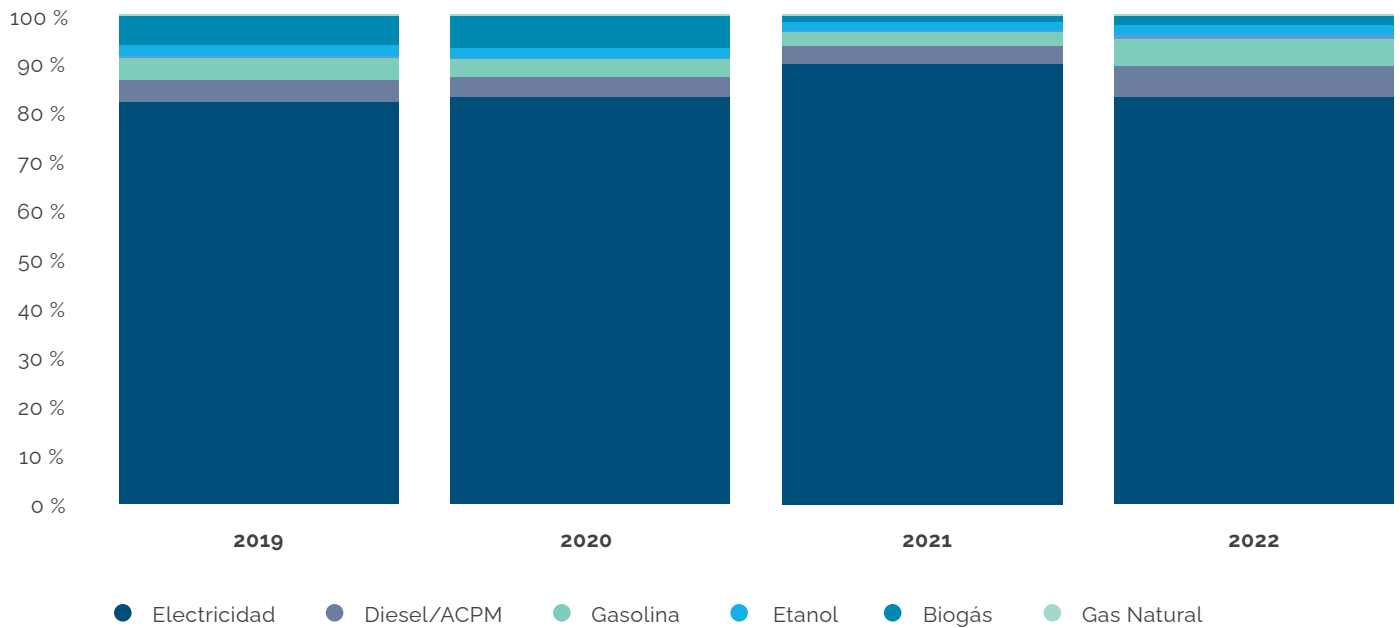
Finalmente, la participación de energía renovable en el total de la energía consumida por la empresa registró un promedio de 76 %. Entre los años 2019 y 2021 se observó un aumento progresivo en el valor de este indicador, que llegó a posicionarse en 77,2 %. Luego, para el año 2022, se reportó una disminución a 72,4 %, asociada a un menor consumo de energía eléctrica (la cual tiene una participación alta de renovables) por la reducción del caudal de entrada a la PTAR Salitre, así como por un mayor uso de combustibles fósiles vinculado a la normalización de las actividades laborales de la empresa por la culminación de la medida sanitaria derivada de la pandemia de COVID-19 (figura 17).

La electricidad representa el mayor consumo energético de la empresa, por lo que esta se beneficia de una matriz eléctrica nacional con alta participación de energía hidroeléctrica. Cabe resaltar que la PTAR Sa-

litr Fase II sufre un porcentaje de su demanda por electricidad a través del aprovechamiento del 100 % biogás generado en el proceso.

Figura 17. Distribución de las fuentes de energía consumidas por la EAAB ESP

Fuente: [25].



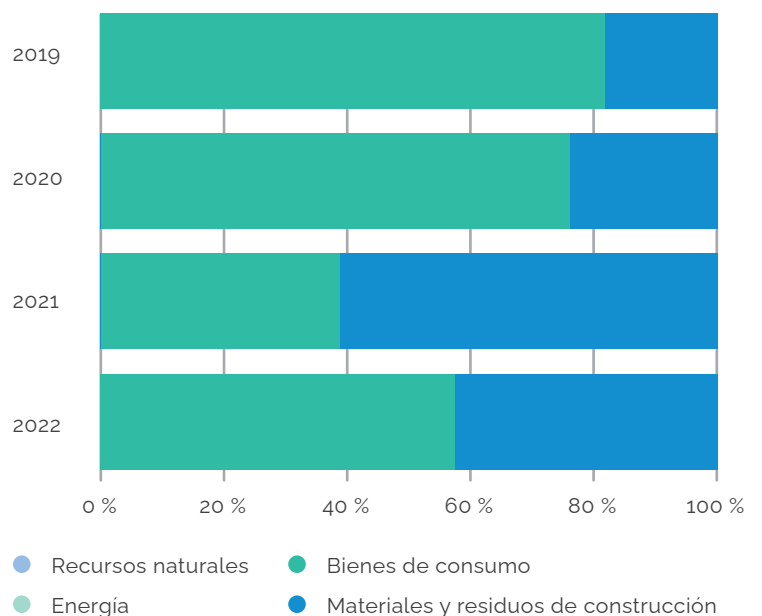
Optimización del ciclo

El contenido de materiales críticos en las entradas promedió 1,18 % para el periodo estudiado. Se observó que el valor de este indicador varía año a año en función de las compras y adquisiciones que realiza la empresa. De manera general, es evidente que los bienes de consumo y los materiales de construcción son los principales responsables de la demanda de materiales críticos (figura 18).

En los años 2021 y 2022, los bienes de consumo han cobrado una mayor relevancia, con los químicos de potabilización como los principales responsables del segmento. Por el lado de los materiales de construcción, la mayor demanda de materiales críticos está asociada a la cadena de valor del acero consumido por la EAAB ESP.

Figura 18. Distribución de los materiales críticos en las entradas

Fuente: [25].



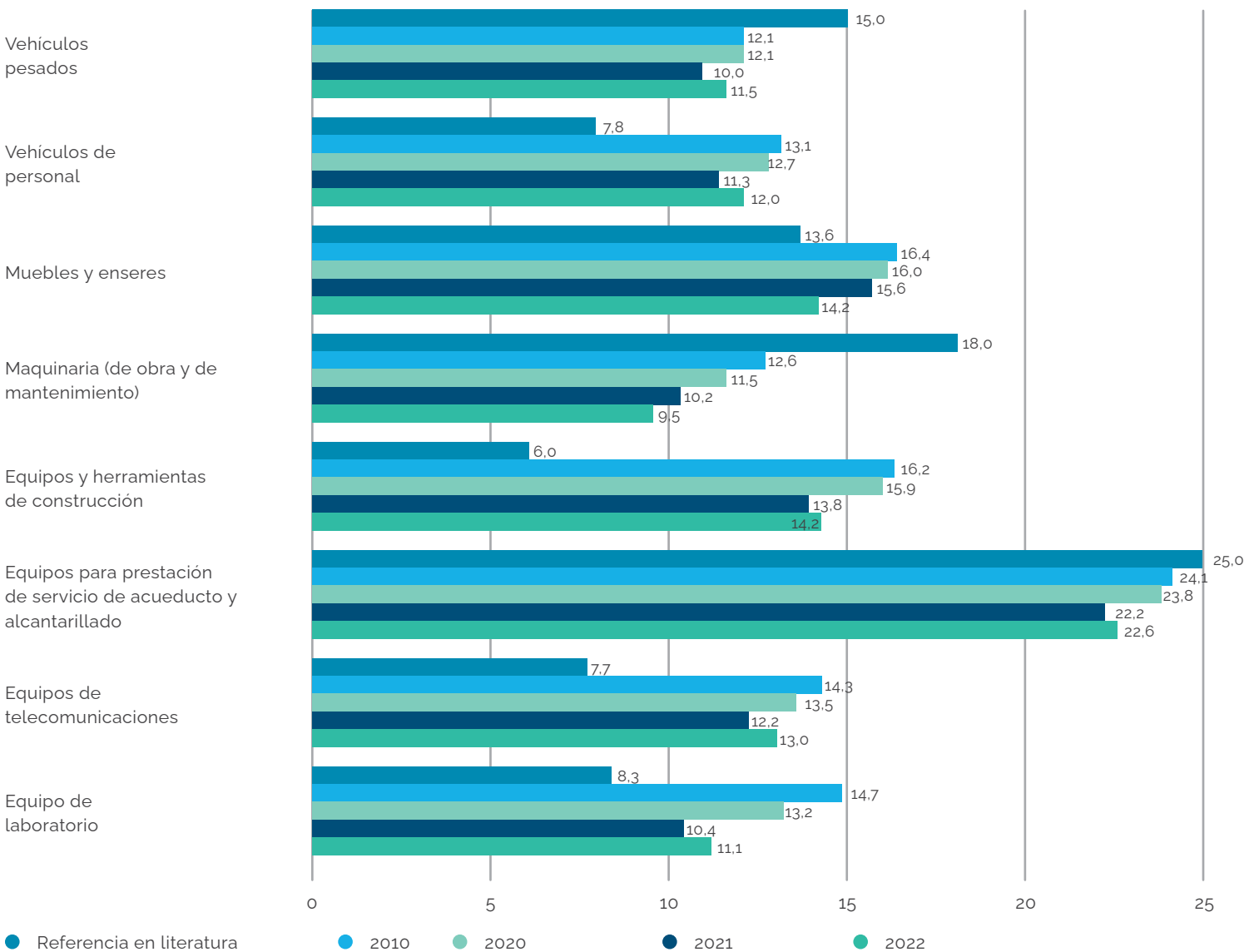
La recuperación de las salidas (ej., residuos o bienes dados de baja) promedió cerca del 4 % entre los años 2019 y 2022. Sin embargo, es de resaltar que en este periodo el indicador creció del 0,35 % en 2019 al 9,05 % en 2022. Este drástico aumento obedeció a la incorporación de nuevos flujos (residuos de podas y mantenimiento de humedales) que se recuperan a través de procesos de biodegradación (compostaje semicontrolado).

La vida útil promedio de los activos durante el periodo estudiado fue de aproximadamente el 106 % con respecto a la vida útil de referencia en la industria. Cabe

precisar que el valor de este indicador varía en función de las compras y las bajas de activos que realiza la empresa cada año. Así, en general, se ha observado una tendencia a la baja en este parámetro, es decir que la vida útil promedio de los activos ha disminuido, lo que indica un proceso de renovación que no afecta significativamente el desempeño de circularidad. La mayoría de los grupos de activos exceden actualmente la vida útil esperada (figura 19), excepto los vehículos pesados y la maquinaria de obra y mantenimiento, en los cuales se han evidenciado recientes procesos de renovación y/o compra que han disminuido su vida promedio.

Figura 19. Vida útil de los activos de la EAAB ESP

Fuente: [25].



Finalmente, el valor promedio de la recirculación de agua *in situ* fue de 1,01 (cada litro de agua consumido por la empresa fue utilizado 1,01 veces). Este proceso en la EAAB ESP se realiza en la PTAP El Dorado, en donde el ART de la sede administrativa, la del lavado de filtros y la agua resultante del tratamiento de los lodos son reintroducidas en el proceso de potabilización, reduciendo la demanda de agua cruda en 850 m³/día. A partir de la implementación de este proyecto en 2021, el indicador pasó de un valor de 1 en 2019 y 2020 a 1,02 en 2021 y 2022.

Valoración del ciclo

La productividad material circular registró un promedio anual cercano a un millón de pesos por cada tonelada material lineal de entrada. Este indicador ha registrado una tendencia al alza en los últimos tres años, pasando de 772 000 pesos en 2020 a 1,3 millones de pesos en 2022, evidenciando un ligero desacoplamiento de la empresa de los materiales lineales en su generación de ingresos. Dos factores han contribuido al comportamiento de este parámetro: un incremento en los ingresos corrientes, seguido de una ligera disminución en la masa de entradas lineales.

Por lo demás, los ingresos circulares de la empresa se calcularon en promedio en 60 millones de pesos anuales. Entre 2019 y 2020 fueron de 21 millones de pesos, y ascendieron a 124 millones de pesos en 2022. A pesar de la disminución en la circularidad material de la empresa, los ingresos circulares aumentaron siguiendo el incremento en los ingresos corrientes de la empresa, cuya tasa de crecimiento fue superior a la tasa de disminución de la circularidad material.

Impacto del ciclo

En general, los impactos ambientales del ciclo de vida de las entradas a la empresa han disminuido a lo largo del periodo estudiado, salvo por el año 2020, cuando se registró un incremento con respecto al año 2019. Entre los años 2019 y 2022 se observaron reducciones de entre el 40 % y el 50 % en los impactos, excepto por



la huella hídrica, que tuvo un aumento del 11 %. Además, la huella de carbono de las entradas bajó en un 41,6 %. Estas reducciones se explican principalmente por un menor consumo de materiales de construcción para los años 2021 y 2022.

Con respecto al 2019, en el 2022 se registró una reducción cercana al 29 % en el consumo de materiales de construcción y del 38 % en el consumo de bienes, lo que destaca la significancia de bajar el consumo de estos materiales, o su sustitución por alternativas más sostenibles, por razones de impacto ambiental más allá de su relevancia en la circularidad material. De manera general, en el 2022 se consumieron casi 30 % menos materiales que en el 2019, aunque la hue-

lla ambiental, como ya se mencionó, disminuyó más allá del 40 %. Las contribuciones a los impactos ambientales de la empresa generados por sus consumos provienen principalmente de los materiales de construcción, seguidos de los bienes de consumo y en tercer lugar por la demanda de energía (figuras 20, 21 y 22). En los materiales de construcción, los principales aportes vienen por el consumo de cemento y acero. Por su parte, los impactos por el consumo de bienes son dominados ampliamente por los químicos de potabilización; principalmente, sulfato y cloruro de aluminio. Finalmente, los impactos por consumo de energía provienen sobre todo del consumo de electricidad de la red nacional para los sistemas de bombeo de agua, seguido del uso de combustibles para la operación de vehículos.

Figura 20. Contribución por grupo de entrada a los impactos a la salud

Fuente: [25].

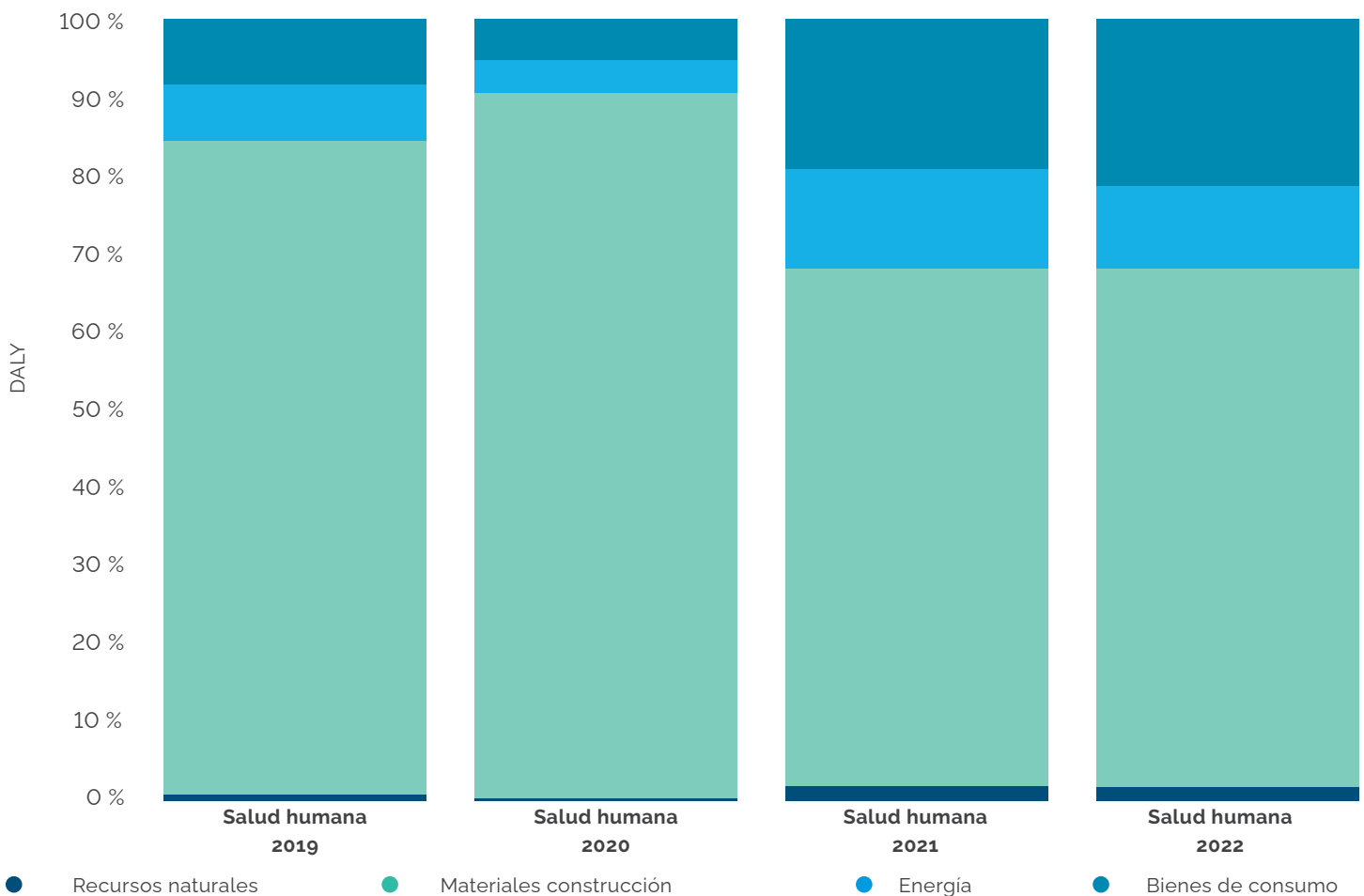


Figura 21. Contribución por grupo de entrada a los impactos a los ecosistemas

Fuente: [25].

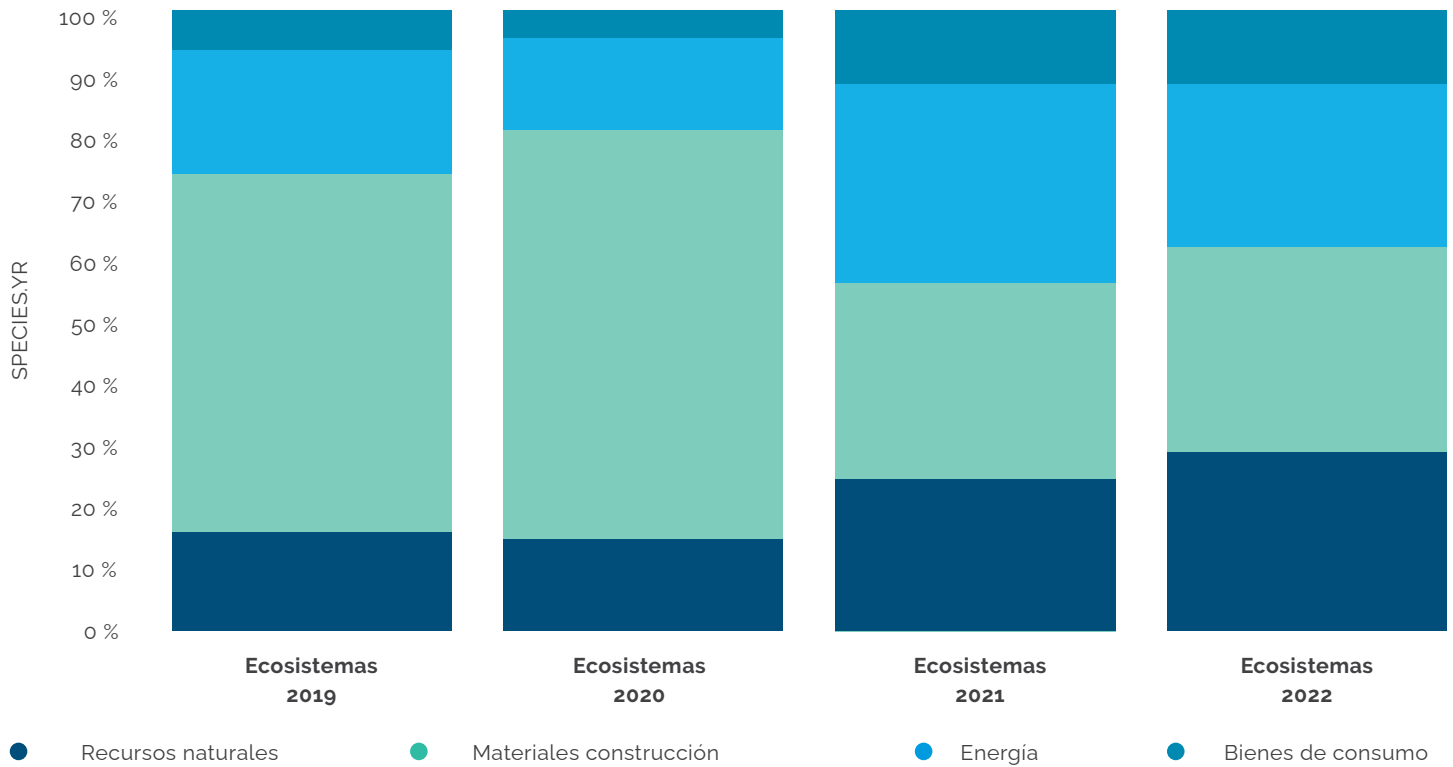
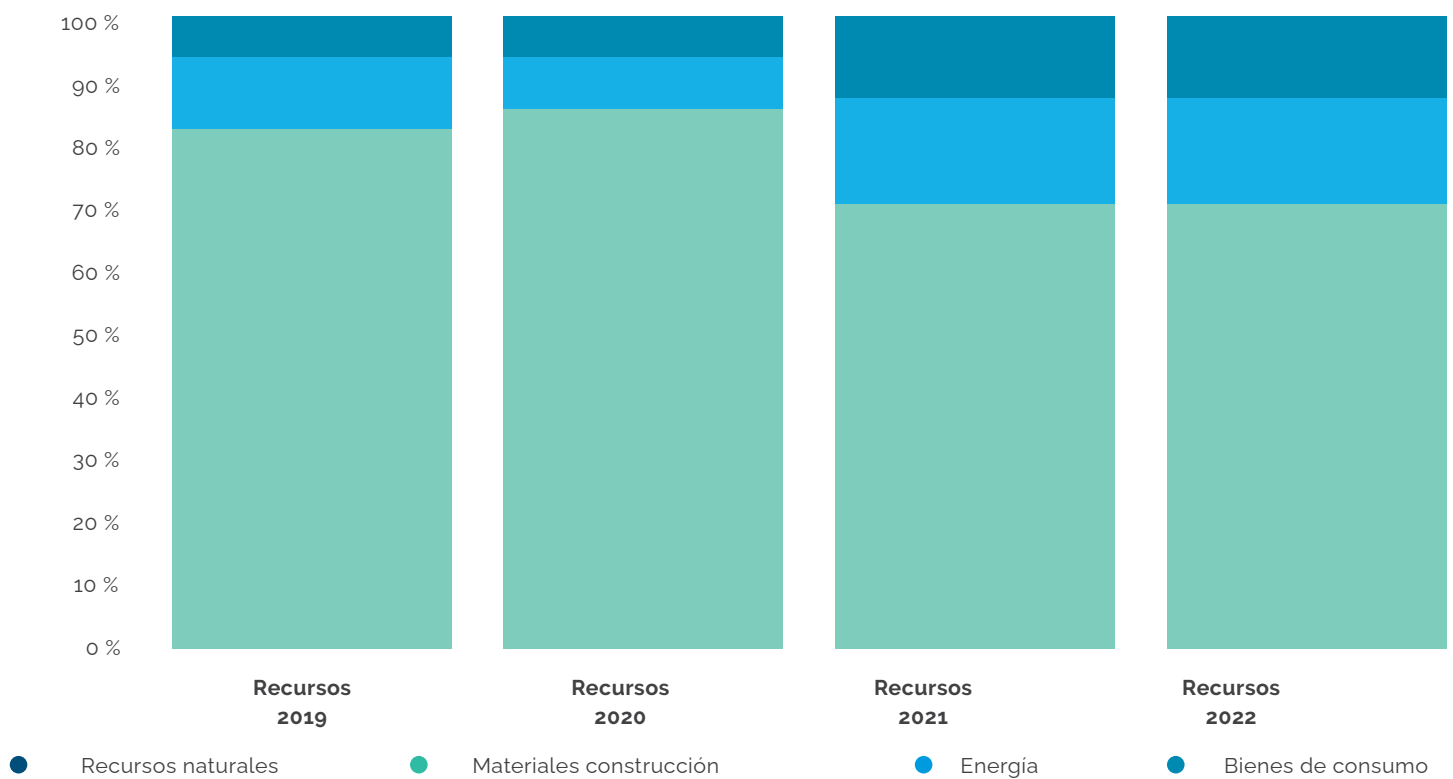


Figura 22. Contribución por grupo de entrada a los impactos a los recursos naturales

Fuente: [25].



Potencial de circularidad

En esta sección se analizan en detalle las oportunidades que se identificaron con el diagnóstico de circularidad, las cuales se formulan como recomendaciones para la EAAB ESP.

Materiales

La mayor brecha de circularidad de la EAAB ESP se encuentra en los materiales, tanto en la gestión de las entradas como en la de las salidas. La mayor cantidad de materiales entrantes son materiales de construcción, principalmente agregados pétreos (79,7 %) y concreto (18 %). La EAAB ESP puede dar grandes pasos en este frente mediante estrategias orientadas a priorizar el uso de cementos que garanticen la menor huella de carbono en el mercado y a través del uso de agregados pétreos reciclados.

La mayor cantidad de material saliente, cerca del 75 %, corresponde a RCD; principalmente, de las obras ejecutadas por externos. En la actualidad no se realiza

ningún tipo de recuperación de estos residuos, por lo que es aquí donde se evidencia la mayor brecha de circularidad material y a su vez la de mayores oportunidades de impacto si se priorizan estrategias enfocadas a garantizar un adecuado aprovechamiento de los RCD en los contratos de obra.

La segunda oportunidad relevante para cerrar la brecha de circularidad de las salidas materiales de la empresa es garantizar un adecuado aprovechamiento de los residuos orgánicos generados en las actividades de poda de árboles, corte de césped y mantenimiento del sistema hídrico urbano de la ciudad.

A su vez, si bien algunas estrategias orientadas a mejorar la circularidad en otros grupos de materiales consumidos (ej., químicos de potabilización, muebles y enseres) y otros grupos de materiales de salida (ej., residuos ordinarios o especiales) tendrán un efecto marginal en la mejora de este indicador en la empresa, también pueden contribuir a mejorar otros índices de optimización y/o impacto del ciclo.

Agua

El potencial de circularidad del agua es alto dado que la empresa capta el recurso de fuentes renovables y a su vez lo regresa nuevamente a fuentes superficiales naturales o lo comercializa como agua potable a otros municipios. Las oportunidades para mejorar el índice de circularidad de las entradas de agua se deben centrar en el corto plazo en la priorización de la captación de las fuentes hídricas que pertenecen a la cuenca del río Bogotá, y en el largo plazo en buscar reemplazar gradualmente la demanda del sistema Chingaza por fuentes alternativas como aguas lluvias o ART recirculada.

La empresa, como usuario o consumidor de agua para el lavado de filtros en PTAP, así como por sus funciones administrativas, tiene el reto de escalar y normalizar la recirculación de agua *in situ* como una estrategia de circularidad. En este sentido se destaca que la entrada



en operación del sistema de recirculación de agua de filtros en la PTAP El Dorado en el año 2021 representó una recirculación del 2 % del agua utilizada por la EAAB ESP durante ese año.

Energía

En términos de energía renovable, la empresa se ve beneficiada de la alta participación de energía hidroeléctrica en la red nacional eléctrica. La brecha de circularidad existe por el uso de combustibles fósiles, principalmente para el transporte de personal. En este sentido, las principales oportunidades de la EAAB ESP residen en desarrollar estrategias que le permitan priorizar el uso de biocombustibles por encima de combustibles convencionales para su flota vehicular actual, así como optar por la compra de vehículos eléctricos en procesos de renovación o adquisición de nueva flota.

En el mediano-largo plazo, la empresa podría acercarse a un 100 % de consumo de energías renovables complementando las estrategias anteriores con medidas de autoabastecimiento a través de la expansión de sistemas PC, el uso total y eficiente del biogás generado en PTAR, así como el despliegue de la energía fotovoltaica.

Materiales críticos

La demanda de materiales críticos de la empresa está asociada principalmente a las cadenas de valor de los químicos de potabilización y el acero utilizados. Por esta razón, desarrollar acciones para garantizar la provisión de estos insumos por fuentes con altos estándares de producción sostenible genera los mayores efectos para el cierre de brecha de circularidad material crítica.

Adicionalmente, buscar sustitutos o fuentes de producción limpia para el aluminio también puede contribuir a disminuir esta demanda por tratarse de un metal cuya producción es altamente exigente en elementos críticos.

Vida útil de activos

Si bien se evidencia una buena gestión de la vida útil de los activos de la empresa, excediendo en muchos casos (vehículos de personal, muebles y enseres, equipos y herramientas de construcción, y equipos de telecomunicaciones y laboratorio) la vida promedio registrada por la industria en la literatura, aún existen oportunidades de mejora. Principalmente, se debe garantizar que los vehículos pesados y la maquinaria de obra logren cumplir con la vida útil esperada ya que en la actualidad se encuentran por debajo de este parámetro y su vida media ha venido disminuyendo a lo largo de los años.

Impactos ambientales

La disminución en el consumo de materiales de construcción y bienes de consumo se considera como la práctica más efectiva para disminuir la huella ambiental de la empresa. En este sentido, las oportunidades de circularidad residen en la optimización de los diseños de las obras, orientada a la minimización en el consumo de materiales, así como del uso y compra de los activos de la compañía. La transición a fuentes de energía viene en tercer lugar dentro de las estrategias que se pueden utilizar para reducir los impactos.

Adicionalmente, la empresa debe promover estrategias orientadas a garantizar compras sostenibles, en especial de insumos con baja huella ambiental. Esta práctica redundará además en los indicadores de circularidad material y optimización del ciclo de la empresa.

Impacto del COVID-19

La pandemia del 2020 en primera instancia se vio reflejada en la disminución de los consumos internos (en sedes) de agua y energía, alrededor de 55 % y 45 % respectivamente. También se redujo el consumo de combustibles en un 23 % y se registró un menor consumo de materiales de construcción a pesar de tener una mayor contratación activa durante este año.

Casos de negocios circulares

Los casos de negocios se definieron a partir de la priorización los subflujos de materiales; particularmente, los flujos de salida. Esta selección tuvo en cuenta los resultados de la matriz de criterios de priorización y otros criterios estratégicos y de circularidad, así como

el análisis del interés de la EAAB ESP sobre diferentes flujos que ya tuvieran algún tipo de visualización dentro de un posible ciclo económico. La conjunción de todos estos elementos dio como resultado que los flujos por ser trabajados para cada caso de negocio serían:

1. Lodos de PTAP y biosólidos.
2. Agua residual tratada.
3. RCD – agregados pétreos.
4. RCD – PVC.
5. Residuos de biomasa – material vegetal de poda.
6. Material textil de dotación y equipo de protección personal (EPP) descartado.

El detalle del desarrollo de la priorización se presenta en el anexo 8 (matriz de priorización de subflujos).

Inteligencia tecnológica

A partir del análisis descrito en la sección de metodología, en la tabla 5 se presenta el consolidado de las alternativas de circularidad para cada uno de los subflujos priorizados.



Tabla 5. Consolidado de alternativas de circularidad por subflujo

Subflujo	Propuesta de transformación	Descripción general	Requerimientos tecnológicos	Requerimientos institucionales preliminares
Lodos PTAP y biosólidos PTAR¹	Recuperación de suelos	Cobertura diaria en relleno sanitario.	Estabilización alcalina del biosólido.	No se presenta una restricción para el uso previsto en el Plan de Ordenamiento Territorial (POT) vigente de la ciudad de Bogotá. Se restringe el uso de biosólidos en el cierre de taludes.
		Recuperación de canteras.	Estabilización alcalina del biosólido.	Se requiere de un biosólido tipo B para esta actividad.
		Disposición en predio Tequendama.	Disposición de biosólidos bajo el esquema de monorelleno usando celdas impermeabilizadas con un diseño tipo relleno sanitario.	Modificación a las condiciones de la licencia ambiental existente.
			Secado solar para la minimización de lodos.	

1. El análisis de alternativas para lodos y biosólidos se desarrolló con recursos propios de la EAAB ESP, como contrapartida a los recursos entregados por el BID. Aunque la metodología de análisis es diferente frente a los demás flujos, las conclusiones son complementarias.

Subflujo	Propuesta de transformación	Descripción general	Requerimientos tecnológicos	Requerimientos institucionales preliminares
		Recuperación de suelos degradados.		Límites de metales que se podrán introducir en el suelo por el uso de biosólidos de categorías A o B.
		Mejorador de suelo para cultivos con contacto directo mediante compostaje.		
	Coprocesamiento	Coprocesamiento – incineración + secado solar 50 %.	Secado solar del material.	Las actividades planteadas para esta alternativa representan una modificación a las condiciones de la licencia ambiental existente.
				Es necesario contar con la autorización de uso o adquisición del predio.
		Coprocesamiento (incineración en planta) – incineración + cogeneración.	Sistema de recuperación de calor generado en la incineración de los biosólidos con una turbina de vapor y un generador asociado.	Modificación a las condiciones de la licencia ambiental existente.
Agua residual tratada	Uso industrial	Distribuir agua en tubería desde la PTAR El Salitre hasta zonas y parques industriales en Fontibón y Puente Aranda (zona de servicio 2) o a usuarios industriales individuales en la zona industrial de la calle 80.	Sistema de conducción con tuberías a presión.	Acuerdos con los usuarios potenciales.

Subflujo	Propuesta de transformación	Descripción general	Requerimientos tecnológicos	Requerimientos institucionales preliminares
			Sistemas para generación de energía renovable para sistemas de bombeo.	Generación de nueva área de servicio de la EAAB ESP en Cota.
				Acuerdo con el municipio de Cota para la construcción de las redes y distribución de ART a la zona industrial de este municipio.
	Uso en frentes de obra	Distribuir ART a urbanizadores y constructores para su uso en fase de obra en carrotanques, en lugar de las conexiones temporales de obra que se usan actualmente para provisión de agua potable.	Vehículos para transporte de agua, preferiblemente eléctricos o con alta eficiencia en el uso de combustible	Acuerdos con los usuarios potenciales.
				Convenios comerciales con empresas distribuidoras de agua en vehículos.

Subflujo	Propuesta de transformación	Descripción general	Requerimientos tecnológicos	Requerimientos institucionales preliminares
	Generación de energía hidroeléctrica mediante el flujo de ART en la PTAR Salitre para autoconsumo.		Turbinas que funcionen en canales con baja caída y caudal medio (aprox. 6 m ³ /s).	Acuerdos con el Distrito, la autoridad ambiental y el operador de la PTAR para cooperar en el desarrollo del proyecto.
			Estructura superficial en el canal de descarga.	Solicitud de modificación de la licencia ambiental de la PTAR Salitre ante la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA).
			Obra civil para instalación de turbinas y equipos eléctricos.	Renegociar el contrato de compra de energía con Enel-EMGESA S. A. ESP
Material de construcción – PVC	Elaboración de tubería PVC reciclada	Consiste en triturar las tuberías y luego procesar el material resultante en nuevos productos de PVC, como nuevas tuberías o materiales para la construcción. Esta tarea en general es mecánica, pues se deben recuperar las tuberías de PVC desinstaladas o los retales de la instalación, la trituración, el lavado y la elaboración de nuevas tuberías. La EAAB ESP tendría ahorros en la disposición del residuo y eventualmente en la compra de tubería PVC reciclada a un menor costo.	Estimación de generación de residuos de tuberías de PVC por cada frente de obra.	Acuerdos comerciales con los posibles solucionadores.

Subflujo	Propuesta de transformación	Descripción general	Requerimientos tecnológicos	Requerimientos institucionales preliminares
	Reciclaje químico de PVC	<p>Consiste en descomponer las moléculas de PVC en sus componentes básicos: monómeros de cloruro de vinilo. Estos pueden luego ser utilizados para producir nuevos materiales de PVC, o para fabricar otros productos químicos y plásticos. Es un proceso poco común en la región, pero también representaría ahorros para la EAAB ESP.</p>	<p>Sitios de acopio, preferiblemente en contenedores que después puedan ser levantados por cualquier sistema tipo ampliroll o multicontenedor, los cuales emplean un brazo hidráulico para llevar el contenedor hacia el chasis del vehículo que lo transportará hasta el sitio de tratamiento.</p>	<p>Acuerdos comerciales con los posibles solucionadores.</p>
Material de construcción – agregados pétreos	Reincorporación de los RCD pétreos para la elaboración de agregados pétreos	<p>Acopio temporal y envío de los RCD pétreos a centros de tratamiento y aprovechamiento de RCD autorizados por autoridades ambientales para que transformen estos residuos en nuevos materiales de construcción. La empresa puede tener ahorros en la disposición final de estos RCD y en la compra a menor costo de estos materiales de construcción reciclados.</p>	<p>Lugar de almacenamiento en obra de los RCD pétreos producto del concreto de manera diferenciada al resto de los residuos y materiales de construcción.</p>	<p>Acuerdos comerciales con los posibles solucionadores.</p>

Subflujo	Propuesta de transformación	Descripción general	Requerimientos tecnológicos	Requerimientos institucionales preliminares
	Trituración <i>in situ</i> de los RCD pétreos	Destinar los RCD pétreos generados en obra para que el proveedor triture el material en obra. Para las obras internas de la EAAB ESP, se propone el acopio temporal en un predio de la empresa para que un proveedor, o mediante inversión propia de la compañía, triture los residuos de este tipo generados en los frentes de obra.		
Biomasa – material vegetal de poda	Biocombustible a partir de los residuos de poda	Utilizar los residuos de biomasa para generar biocombustible en procesos de aprovechamiento energético o transformación a altas temperaturas.	Infraestructura de almacenamiento y alistamiento.	Mecanismos de cuantificación de los residuos orgánicos en los predios manejados por la EAAB ESP.
			Maquinaria de trituración de material vegetal de alto volumen (chipeadoras).	Definir convenios con externos para asegurar el aprovechamiento del material de conformidad con la normatividad aplicable.
			Transporte del material.	

Subflujo	Propuesta de transformación	Descripción general	Requerimientos tecnológicos	Requerimientos institucionales preliminares
	Compostaje	Aprovechamiento de residuos orgánicos para producir abono de alta calidad.	Maquinaria de trituración de material vegetal de alto volumen.	Mecanismos de cuantificación de los residuos orgánicos en los predios manejados por la EAAB ESP.
				Requerimientos en el manual de contratación enfocados en el aprovechamiento de los residuos de poda.
Material textil de dotación y EPP	Aprovechamiento de caucho de calzado de seguridad	Procesamiento del calzado de caucho para utilizar el granulado en pisos para parques o para reincorporar los materiales en producción de calzado nuevo.	Almacenamiento de la dotación textil una vez sea retornada a la EAAB ESP.	Modificar con el equipo de seguridad y salud en el trabajo (SST) los lineamientos de definición de los EPP y dotación, cambiando el calzado que no entre en contacto con sustancias peligrosas a dotación y no EPP.
			Espacio de clasificación de los elementos textiles según el material.	Procedimientos de devolución de dotación y cambio de cultura dentro de la EAAB ESP.
	Recuperación de textiles a través de <i>upcycling</i>	Implementar ecodiseño para permitir la rehabilitación y el reacondicionamiento de los materiales para su reincorporación en ciclos productivos.	Almacenamiento de la dotación textil una vez sea retornada a la EAAB ESP.	Definir políticas de contratación que establezcan el ecodiseño como un requisito.

Subflujo	Propuesta de transformación	Descripción general	Requerimientos tecnológicos	Requerimientos institucionales preliminares
			Espacio de clasificación de los elementos textiles según el material.	Modificar el manual de marca para permitir el ecodiseño de las prendas al incluir los logos como elementos retirables y reutilizables para otros contratos.
				Modificar con el equipo de SST los lineamientos de definición de los EPP y dotación, cambiando a los textiles que no entren en contacto con sustancias peligrosas a dotación y no EPP.

Fuente: elaboración propia con base en [21] [26].



Mapeo de actores

El mapeo de actores, para esta etapa del proyecto, consistió en la identificación preliminar de actores internos y externos para cada subflujo, analizando a cada uno en términos de su rol frente al flujo, interés e influencia. Con base en esta evaluación se definió el nivel de cada actor en términos de prioridad para involucrarlos en el proceso de construcción de los casos de negocios.

Análisis de prefactibilidad

A continuación, se detallan los resultados del análisis de prefactibilidad de los proyectos de cada subflujo. Este proceso incluyó una descripción técnica de las alternativas tecnológicas y una evaluación multicriterio que consideró criterios técnicos, normativos, ambientales y de mercado. Con base en esta evaluación, se priorizaron las alternativas para los diferentes flujos que se detallan en la tabla 6. Luego, a partir de esta información, se realizó una evaluación financiera contemplando los criterios definidos por la EAAB ESP. Igualmente, se llevó a cabo una evaluación estratégica para cada flujo.

Alternativas de circularidad priorizadas por subflujo **Descripción de las alternativas seleccionadas**

Para cada alternativa seleccionada, se desarrollaron ejercicios de planeación con el fin de identificar las actividades que requerían, los recursos necesarios, los resultados esperados y los cambios que se espera generen en la gestión de residuos y subproductos de la empresa. A modo de ejemplo, en la figura 23 se presenta el árbol de problemas correspondiente al subflujo de ART, mientras que la figura 24 muestra el árbol de objetivos para ese mismo caso. Por otra parte, la tabla 7 contiene la matriz de marco lógico correspondiente, y la figura 25 ilustra la teoría del cambio para el subflujo de biomasa.



Tabla 6. Alternativas de circularidad priorizadas por subflujo

Sub-flujo	Descripción general
Lodos de PTAP y biosólidos	Alternativas de corto plazo (cobertura diaria en relleno sanitario y recuperación de canteras, monorrelleno Tequendama), mediano plazo (recuperación de suelos degradados, coprocesamiento industria de cemento + secado solar 50 %) y largo plazo (incineración en planta) y complementarias (mejorador de suelos mediante compostaje, fabricación de ladrillos).
ART	Generación de energía hidroeléctrica mediante el flujo de ART en la PTAR Salitre para autoconsumo.
Agregados pétreos	Punto limpio de RCD: tercerización, mediante un gestor externo, de las actividades de recolección, transporte, acopio temporal, separación, aprovechamiento y disposición final de RCD generados por las obras internas de la EAAB ESP en las zonas 1 y 2.
PVC	Solución circular para el PVC: estrategia de acopio y entrega a un gestor externo de los residuos de PVC en las obras externas de la EAAB ESP.
Material vegetal de poda	Aprovechamiento energético y compostaje de biomasa, incluido el retamo espinoso.
Material textil – EPP	Aprovechamiento de calzado de seguridad para la elaboración de materiales para la construcción como tapas de alcantarillado, paneles acústicos, bloques y aditivos de PVC.

Fuente: elaboración propia con base en [21] [26].

Figura 23. Árbol de problemas del subflujo de ART

Fuente: [21].

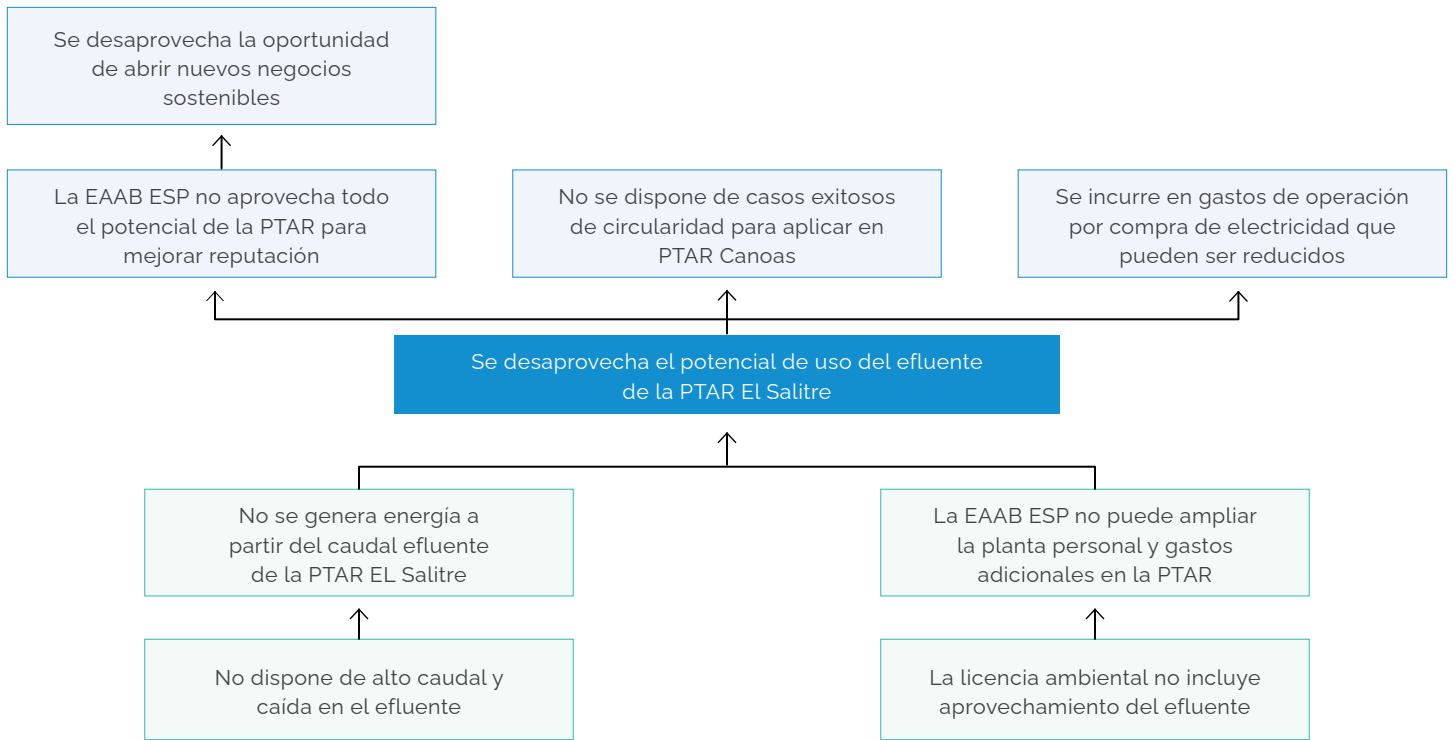


Figura 24. Árbol de objetivos del subflujo de ART

Fuente: [21].

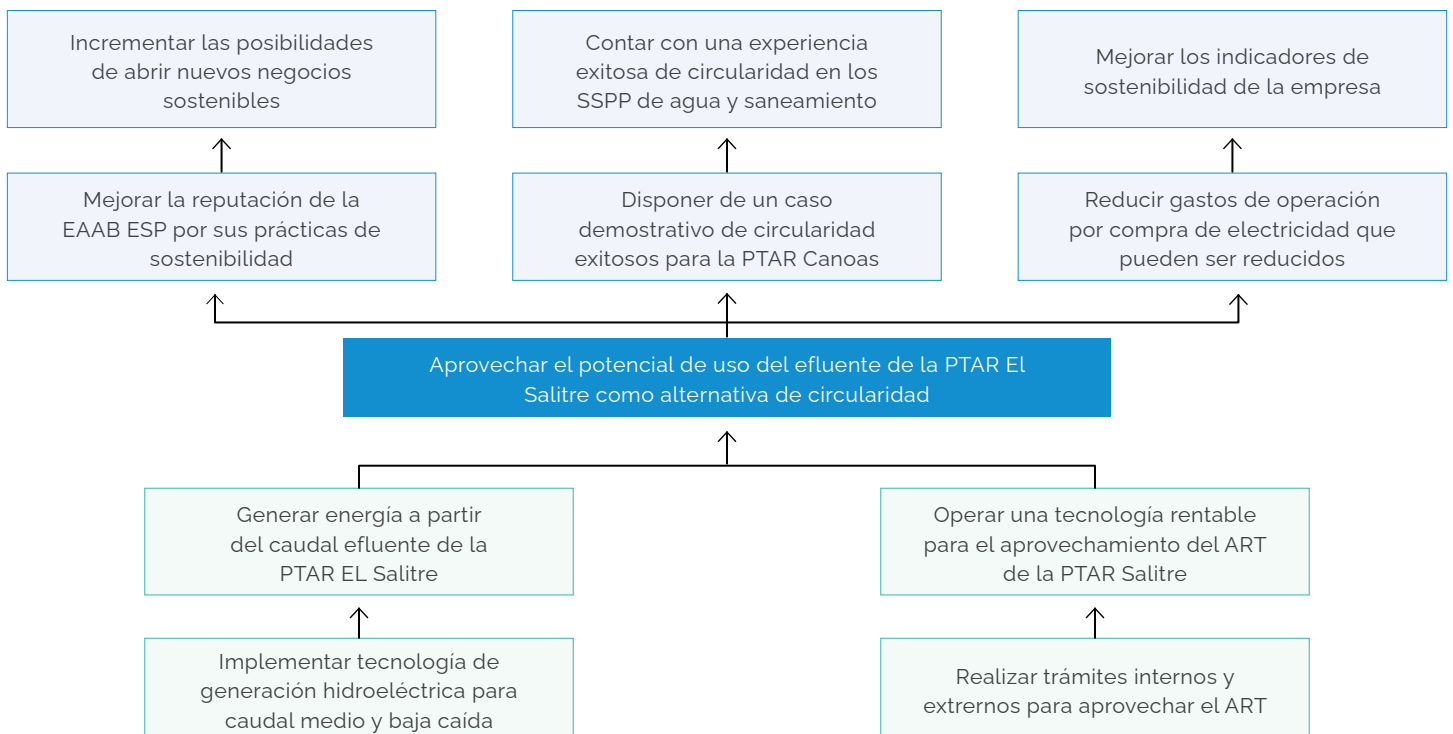


Tabla 7. Matriz de marco lógico del proyecto de ART

Resumen narrativo de los objetivos	Indicadores y metas	Medios de verificación	Supuestos
Fin			
F.1 Avanzar hacia un modelo circular en la prestación de los servicios públicos de agua y saneamiento frente a los desafíos del cambio climático.	100 % del caudal aprovechado del efluente de la PTAR Salitre en generación de hidroenergía.	Informe de documentación de la experiencia de economía circular con indicadores de rentabilidad positivos para público externo.	Los indicadores financieros del proyecto sustentan un caso de negocio sostenible.
F.2 Construir un caso demostrativo de éxito en economía circular para el desarrollo de futuros proyectos de la EAAB ESP.	Un caso demostrativo de éxito en autogeneración de energía con el ART del canal efluente de una PTAR puesto en marcha.	Protocolo de pruebas del proyecto tipo <i>Engineering Procurement and Construction</i> (EPC). Sistema de Información de la Dirección del Proyecto (PMIS por sus siglas en inglés).	La tecnología de generación de energía para autoconsumo con ART en el canal efluente de PTAR Salitre funciona según las especificaciones técnicas de diseño.
Propósito			
P.1 Aprovechar el ART de la PTAR Salitre en autogeneración de energía hidráulica.	Al menos 2 % de la demanda anual de la PTAR es cubierta con autogeneración hidráulica.	Protocolo de pruebas del EPC.	La morfología del canal efluente permite la utilización de la tecnología disponible.
Componentes			
C.1 Mecanismo de coordinación entre los inversionistas y los operadores de la planta para el desarrollo del proyecto establecido.	Un acta firmada de conformación de un comité directivo con participantes de los <i>sponsors</i> (EAAB ESP, BID, CAR, operador) como parte de la estructura de gobierno del proyecto.	PMIS.	Los indicadores financieros del proyecto sustentan un caso de negocio sostenible.
C.2 Trámites institucionales aprobados para permitir el aprovechamiento del ART en la PTAR.	Un informe de resultado de los trámites de modificación de la licencia ambiental y de asignación de beneficios por innovación y no causación del impuesto al carbono.	PMIS.	Se presenta solicitud de modificación de la licencia ambiental ante la ANLA.

Resumen narrativo de los objetivos	Indicadores y metas	Medios de verificación	Supuestos
<p>C.3 Tecnología para la generación de energía hidráulica para autoconsumo en el efluente de la PTAR Salitre instalada y en operación.</p>	<p>Una solución de autogeneración hidráulica instalada en la PTAR Salitre de al menos 1,0 MW de capacidad sobre el 80 % de disponibilidad.</p>	<p>Protocolo de pruebas del EPC.</p>	<p>Las restricciones contractuales de la etapa de garantía de la PTAR permiten la intervención del canal.</p>
Actividades			
<p>C.1.A.1 Conseguir acuerdos con el Distrito, la CAR y el operador de la PTAR para cooperar en el desarrollo del proyecto.</p>	<p>Un acta de reglamento operativo del comité directivo.</p>	<p>PMIS.</p>	<p>Las instituciones patrocinadoras están de acuerdo en llevar adelante el proyecto.</p>
<p>C.1.A.2 Emitir el acta de constitución del proyecto (<i>Project Charter</i>).</p>	<p>Un acta de constitución del proyecto.</p>	<p>PMIS.</p>	<p>Las instituciones patrocinadoras están de acuerdo en llevar adelante el proyecto.</p>
<p>C.2.A.1 Realizar la solicitud de modificación de la licencia ambiental de la PTAR Salitre ante la ANLA.</p>	<p>Un conjunto de documentos justificativos de la modificación de la licencia ambiental radicado ante la ANLA.</p>	<p>Solicitud de modificaciones, resolución de la ANLA.</p>	<p>Se obtuvo la modificación de la licencia ambiental.</p>
<p>C.2.A.2 Renegociar el contrato de compra de energía con EMGESA.</p>	<p>Un acta de renegociación de compra de energía con EMGESA y acuerdo de las condiciones de respaldo de la red a la autogeneración.</p>	<p>PMIS.</p>	<p>Se obtiene el permiso de conexión del operador de red (OR).</p>
<p>C.2.A.3 Documentar el proyecto como innovación para remitirlo al BID.</p>	<p>Un documento de presentación del modelo de innovación del proyecto al BID para solicitar su cooperación y servir de modelo a otras soluciones regionales.</p>	<p>Documento para el BID.</p>	<p>Se obtiene un proyecto rentable en el análisis de factibilidad.</p>

Resumen narrativo de los objetivos	Indicadores y metas	Medios de verificación	Supuestos
<p>C.2.A.4 Realizar los trámites para aprovechar los incentivos a la innovación, la no causación del impuesto al carbono o la inversión en fuentes no convencionales de energía renovable (FNCER).</p>	<p>Un conjunto de informes que documenten los trámites para acceder a los incentivos tributarios establecidos para los proyectos de innovación (Ministerio de Ciencia Tecnología e Innovación), Unidad de Planeamiento Minero-Energética (UPME) y ANLA.</p>	<p>Solicitudes de certificación de incentivos tributarios, actos administrativos de reconocimiento.</p>	<p>Se obtiene el reconocimiento de beneficios tributarios.</p>
<p>C.3.A.1 Desarrollar la ingeniería de detalle de la solución seleccionada.</p>	<p>Un conjunto de planos de ingeniería de detalle de las turbinas seleccionadas para proporcionar al menos 1,0 MW de capacidad nominal de generación con 80 % de disponibilidad.</p>	<p>PMIS.</p>	<p>Se han contratado los servicios especializados de un EPC para realizar la ingeniería de detalle y el estudio de conexión.</p>
<p>C.3.A.2 Realizar el estudio de conexión particularmente complejo para solicitar permiso de conexión al OR Codensa.</p>	<p>Un estudio de conexión particularmente complejo presentado al OR Codensa.</p>	<p>Validación de la disponibilidad del servicio, diseño eléctrico, diseño de protecciones, auditoría reglamento técnico de instalaciones eléctricas (RETIE).</p>	<p>Se han contratado los servicios especializados de un EPC para realizar la ingeniería de detalle y el estudio de conexión.</p>
<p>C.3.A.3 Adquirir los servicios técnicos del EPC.</p>	<p>Un contrato de vinculación del EPC para la construcción del proyecto.</p>	<p>Minuta del contrato de EPC.</p>	<p>Se realiza un proceso de convocatoria abierta en la que primen los criterios de mejor diseño; el precio no es el principal determinante, siempre que se mantenga bajo un techo.</p>

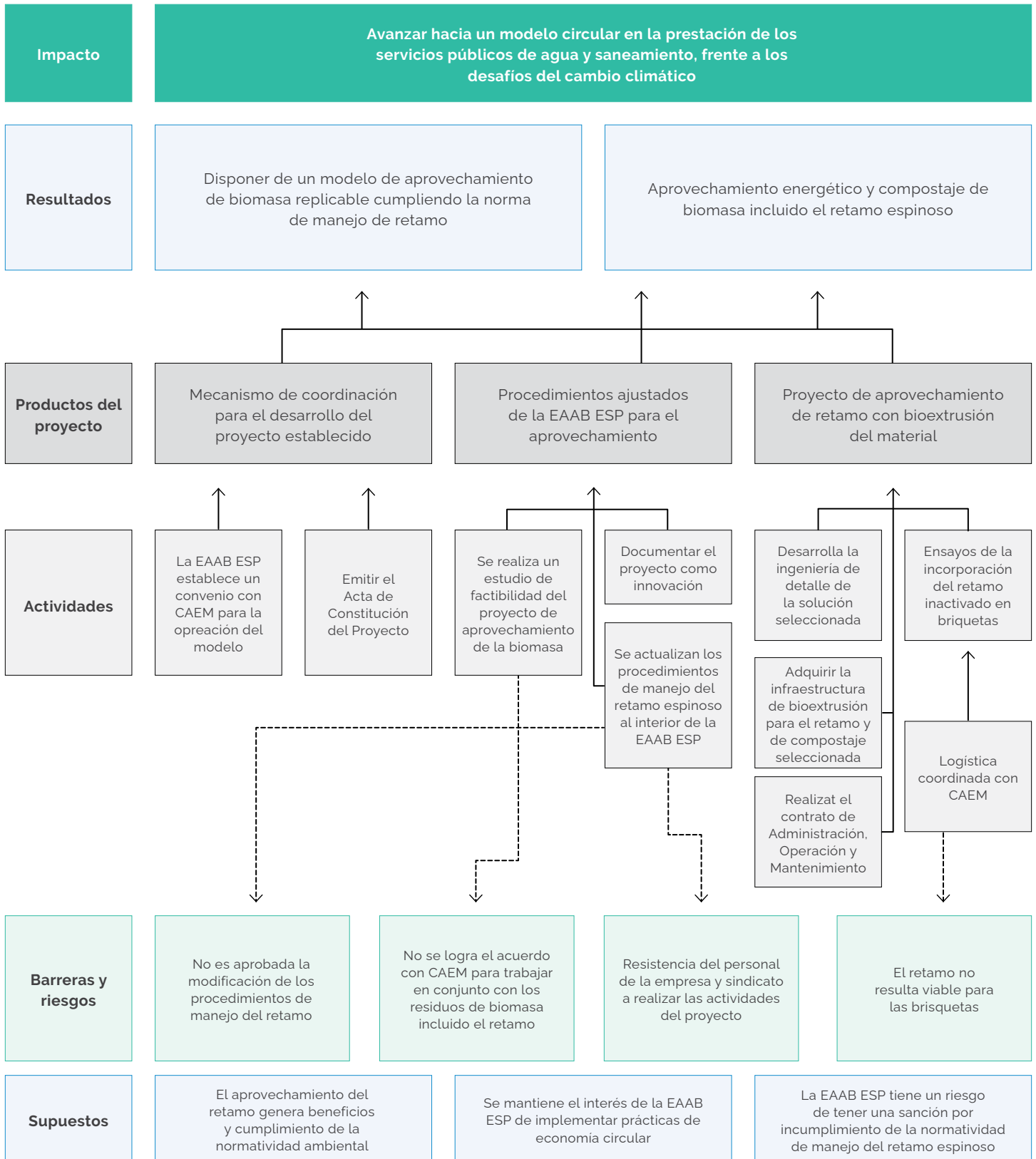
Resumen narrativo de los objetivos	Indicadores y metas	Medios de verificación	Supuestos
C.3.A.4 Recibir el proyecto del EPC tras la puesta en marcha y pruebas de generación.	Un informe de las pruebas de operación y puesta en marcha por parte del EPC.	Registro de pruebas y cumplimiento de estándares de operación, entrega de planos <i>As-Built</i> .	Se cumplen los estándares de calidad definidos para las pruebas.
	Un acta de recibo de la planta en operación por parte de la unidad ejecutora con validación contra el alcance por los interesados.	PMIS.	Se cumplen los estándares de calidad definidos para las pruebas.
C.3.A.5 Realizar contrato de administración, operación y mantenimiento.	Un contrato de administración, operación y mantenimiento (AOM) con plazo de uno a dos años con transferencia de capacidades al operador de la PTAR.	Contrato de AOM, registro digital de las capacitaciones.	Se cumplen los estándares de calidad definidos para las pruebas.

Fuente: [21].



Figura 25. Diagrama de teoría del cambio del proyecto de biomasa

Fuente: [21].



Evaluación estratégica y financiera

En la tabla 8 se presenta el consolidado de información de la evaluación estratégica y financiera, teniendo en consideración que, bajo los criterios estratégicos de circularidad, misionalidad y fundamento, los proyectos para los seis flujos son viables. Estos datos correspon-

den a los principios de circularidad a los que apunta cada proyecto por subflujo, el tiempo de ejecución (corto, mediano o largo plazo), así como el consolidado de los indicadores financieros.

Tabla 8. Consolidado de evaluación estratégica y financiera de los proyectos de circularidad

Subflujo	Circularidad	Ejecución	Información financiera
Lodos PTAP y biosólidos	El residuo puede convertirse en recurso. Valorización.	Corto, mediano y largo plazo	Costos de implementación para seis alternativas. Impacto tarifario de cada alternativa.
Lodos PTAP y biosólidos	El residuo puede convertirse en recurso. Valorización.	Corto, mediano y largo plazo	Costos de implementación para seis alternativas. Impacto tarifario de cada alternativa.
Lodos PTAP y biosólidos	El residuo puede convertirse en recurso. Valorización.	Corto, mediano y largo plazo	Costos de implementación para seis alternativas. Impacto tarifario de cada alternativa.
ART	El residuo puede convertirse en recurso. Reutilización. Valorización. Energía de fuentes renovables. Ecología industrial y territorial.	Mediano o largo plazo	Estimación del VPN: <i>745 466 766 COP.</i> Estimación de la TIR: <i>12 %, 4 % EA.</i> Estimación del <i>payback period: 14,93 años.</i> Estimación del B/C: <i>1,22 veces.</i> VP CAPEX: <i>1 306 560 000 COP.</i> VP OPEX: <i>1 239 243 798 COP.</i>

Subflujo	Circularidad	Ejecución	Información financiera
Agregados pétreos	El residuo puede convertirse en recurso. Reutilización. Reciclaje. Ecología industrial y territorial.	Corto plazo	Estimación del VPN: 2 615 510 746 COP. Estimación de la TIR: 12 %, 48 % EA. Estimación del <i>payback period</i> : 3,0 años. Estimación del B/C: 2,0 veces. VP CAPEX: 500 000 000 COP. VP OPEX: 1 811 395 000 COP.
PVC	El residuo puede convertirse en recurso. Reutilización. Reciclaje. Ecología industrial y territorial.	Corto plazo	Estimación del VPN: 146 649 520 COP. Estimación de la TIR: 12 %, 16 % EA. Estimación del <i>payback period</i> : 5,99 años. Estimación del B/C: 1,13 veces. VP CAPEX: 100 000 000 COP. VP OPEX: 974 749 626 COP.
Material vegetal de poda	El residuo puede convertirse en recurso. Valorización. Energía de fuentes renovables. Ecología industrial y territorial.	Mediano plazo	Estimación del VPN: 17 481 669 966 COP. Estimación de la TIR: 12 %, 45 % EA. Estimación del <i>payback period</i> : 2,86 años. Estimación del B/C: 1,28 veces. VP CAPEX: 3 891 040 000 COP. VP OPEX: 52 352 938 466 COP.
Material textil – EPP	El residuo puede convertirse en recurso. Reutilización. Reciclaje. Ecología industrial y territorial.	Corto plazo	Estimación del VPN: 1 414 632 223 COP. Estimación de la TIR: 12 %, 33 % EA. Estimación del <i>payback period</i> : 5,02 años. Estimación del B/C: 1,56 veces. VP OPEX: 303 604 640 COP. VP CAPEX: 2 099 143 292 COP.

Fuente: [11] [21].

Construcción de los casos de negocios

A continuación, se presentan los resultados puntuales de la metodología desarrollada para la construcción de los casos de negocios por subflujo. Con base en la información generada, para cada flujo se definió el modelo de negocio – Canvas B. A modo de ejemplo, en la figura 26 se presenta el Canvas del caso de negocio de agua residual a energía. En cada caso se realizó una revisión estratégica de alineación del modelo de negocio frente a la estrategia corporativa actual de la EAAB ESP y su pertinencia con la misión de circularidad de la empresa, en busca de adoptar un enfoque circular en la prestación

de los servicios públicos de agua y saneamiento frente a los desafíos del cambio climático. Para este análisis se tuvieron en cuenta la alineación de la circularidad del caso de negocio y los criterios de evaluación de impacto con la visión circular, la misionalidad y fundamentos tales como viabilidad, capacidad técnica e impacto en los indicadores de circularidad de la EAAB ESP. Como resultado importante dentro del proceso de cocreación, se logró afinar la identificación de actores internos y externos para cada caso de negocio, incluidos sus roles, su nivel de posición y grado de poder.

Figura 26. Modelo de negocio Canvas B – proyecto subflujo agua residual tratada

Fuente: [21].

Cadena de valor <ul style="list-style-type: none"> • Proveedor Tecnología • Contratista / ejecutor • BID-sponsor • Banca Comercial • Banca Desarrollo • Ministerio de Ambiente y desarrollo Sostenible - Programa de Circularidad 	Actividades claves <ul style="list-style-type: none"> • Finalizar situación jurídica de la PTAR Salitre. • Contratación de consultoría especializada para la estructuración de la tecnología moderna 	Problema identificado Aprovechar el agua residual tratada de la PTAR Salitre	Relaciones <ul style="list-style-type: none"> • Socialización Mesa Río Bogotá Impacto • Cliente interno 	Segmentos <ul style="list-style-type: none"> • PTAR Salitre • División de generación de energía • Bogotá-región
	Recursos claves <ul style="list-style-type: none"> • Adquisición de maquinaria y equipos. • Contratación de diseño y construcción de obra civil. • Contratación y/o capacitación de personal 	Propósito Incluir en un modelo de circularidad el flujo del agua residual tratada de la PTAR Salitre de la EAAB ESP		
		Propuesta de valor Generación energética de bajo costo e impacto ambiental para autoconsumo		
Cadena de valor <ul style="list-style-type: none"> • Personal • Mantenimiento • Operación • Diseño / Construcción • Adquisición 		Métricas de impacto <ul style="list-style-type: none"> • Energía autogenerada • Ahorro monetario en facturación energética 		Fuentes de ingreso <ul style="list-style-type: none"> • Ahorro en la factura energía



RECOMENDACIONES



Frente al diagnóstico de circularidad

La gestión de empresas de servicios públicos de agua y saneamiento implica una estructura operativa compleja, con numerosos procesos. Para facilitar la realización del diagnóstico de circularidad, optimizando la eficiencia en el levantamiento y sistematización de la información, se realizan las siguientes recomendaciones:

- 1 **Análisis preliminar detallado:** Antes de emprender el diagnóstico de circularidad, es importante realizar un análisis preliminar detallado para comprender la amplitud y la calidad de la información disponible. Esto permitirá una planificación más precisa y eficiente en la definición de indicadores y sus fuentes de información.
- 2 **Evaluación de procesos:** En una fase inicial, es también importante identificar y evaluar los procesos clave dentro de la empresa, con el objetivo de priorizar áreas de intervención para mejorar la circularidad.
- 3 **Monitoreo continuo:** De igual forma, establecer un sistema de monitoreo continuo para evaluar los indicadores de circularidad a lo largo del tiempo facilitará la realización de ajustes y mejoras constantes en función de los resultados.

Frente a la aplicación de la metodología CTI

La aplicación de la metodología CTI presentó algunos desafíos en el contexto específico de la EAAB ESP debido a la naturaleza particular de su misión y operaciones. Por tanto, a continuación, se sugieren algunas recomendaciones para abordar estas limitaciones y mejorar la aplicabilidad de la metodología:

1. **Adaptación de la metodología:** Proponer ajustes o extensiones a la metodología CTI que tengan en cuenta las peculiaridades de las empresas de servicios públicos de agua y saneamiento. Esto podría incluir la incorporación de indicadores específicos relacionados con la gestión de infraestructuras extensas y el manejo del agua.
2. **Consideración de la infraestructura:** Asegurarse de que la metodología tome en cuenta la complejidad de la infraestructura de redes de conducción de agua, reconociendo su papel dominante en la circularidad material. Esto implica evaluar no solo los materiales de construcción, sino también los flujos de residuos generados durante la operación y el mantenimiento de estas infraestructuras.
3. **Ampliación de indicadores de circularidad:** Incluir indicadores que aborden no solo la circularidad material, sino también la gestión y retorno del agua. Puede ser beneficioso desarrollar métricas específicas para evaluar la eficiencia en el uso del agua, considerando tanto el trasvase de cuencas como el caudal no retornado al alcantarillado sanitario.
4. **Evaluación integral de recursos:** Ampliar el enfoque de la metodología para evaluar otros recursos consumidos (como bienes de consumo y recursos naturales) y los diferentes tipos de residuos generados por la empresa. Esto proporcionaría una visión más completa de las oportunidades y las brechas en términos de circularidad.

Frente a la construcción de casos de negocios circulares

De acuerdo con las lecciones aprendidas en la construcción de casos de negocios circulares, se realizan las siguientes recomendaciones:

1. **Integración de los principios de economía circular en la evaluación de alternativas tecnológicas:** Es importante, como primer paso en el proceso de

evaluación de las alternativas de economía circular para la empresa, definir criterios específicos de economía circular, asegurándose de integrar aspectos técnicos, ambientales, legales y de mercado. Con este propósito, se pueden incluir principios y estrategias no convencionales de circularidad, tales como la remanufactura de equipos y la prolongación de la vida útil de tecnologías.

2. **Adquisición estratégica de tecnologías circulares:** En línea con la primera recomendación, se sugiere adoptar un enfoque estratégico en la adquisición de tecnologías, dando prioridad a equipos remanufacturados o aquellos que cumplan con normas técnicas de economía circular. Se sugiere identificar y establecer alianzas con proveedores que ofrezcan soluciones circulares y que estén alineados con la visión de economía circular de la empresa.
3. **Análisis detallado de costos y escenarios de proyección:** Es importante realizar un análisis detallado de los costos de capital (CAPEX) y operativos (OPEX) de las alternativas tecnológicas priorizadas mediante investigación específica y consulta con proveedores. Además, se sugiere considerar escenarios macroeconómicos realistas a largo plazo para evaluar la viabilidad de los proyectos. Esto ayudará a obtener proyecciones más precisas y a identificar posibles riesgos asociados con cambios en variables macroeconómicas.
4. **Incentivar la cooperación interinstitucional y participación interna:** Todos los esfuerzos para desarrollar una hoja de ruta de economía circular e implementarla requiere colaboración multiactor. En este sentido, se recomienda fomentar la cooperación interinstitucional, trabajando estrechamente con actores clave, autoridades ambientales y proveedores. Además, es vital promover la participación interna dentro de la empresa para facilitar la implementación de proyectos circulares. Esto puede implicar el establecimiento de alianzas estratégicas con actores externos y la promoción de una cultura interna que respalde la visión circular de la empresa.



A large, light blue, stylized number '5' is centered in the background of the page. The number is composed of several overlapping geometric shapes: a vertical bar on the left, a horizontal bar at the top, a horizontal bar in the middle, and a large curved shape at the bottom that forms the base of the '5'.

REFERENCIAS

- [1] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2019). *Estrategia Nacional de Economía Circular*. <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/06/Estrategia-Nacional-de-Economia-Circular-2019-Final.pdf>
- [2] Ellen MacArthur Foundation. (s. f.). *The Circular Economy in Detail*.
- [3] Ellen MacArthur Foundation. (2019). *Circular Economy Learning Hub. What is the Circular Economy?* <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/circular-economy/what-is-the-circular-economy>
- [4] Ellen MacArthur Foundation. (2013). *Towards the Circular Economy Vol. 1*. 10.1162/108819806775545321
- [5] Ellen MacArthur Foundation. (2013). *Towards the circular economy 1: economic and business rationale for an accelerated transition*. <http://www.ellenmacarthurfoundation.org/business/reports>
- [6] Departamento Nacional de Planeación. (2020). *CONPES 4004 Economía circular en la gestión de los servicios de agua potable y manejo de aguas residuales*. Available: <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Econ%C3%B3micos/4004.pdf>
- [7] Tahir, S., Steichen, T. y Shuoler, M. (2018). *Water and Circular Economy: A white paper*. https://www.arup.com/-/media/arup/files/publications/w/water_and_circular_economy_whitepaper.pdf
- [8] International Water Association. (2016). *Water Utilities Pathways in a Circular Economy*.
- [9] Delgado, A., Rodríguez, D. J. Amadei, C. A. y Makino, M. (2021). *Water in Circular Economy and resilience (WICER)*. www.worldbank.org
- [10] EAAB ESP. (2020). *Plan General Estratégico 2020-2024*.
- [11] MAV Ingeniería Integral. (2022). *Elaboración y formulación del Plan Maestro de Gestión de Lodos (PGL) de la EAAB ESP: Producto 2 Estudio de Alternativas de corto, mediano y largo plazo*.
- [12] Vásquez, L. F. (2022). *Nota de sistematización del proceso – Diagnóstico de la circularidad o potencial de la circularidad para la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá*.
- [13] World Business Council for Sustainable Development. (2022). *Circular Transition Indicators V3.0 Metrics for business, by business*.
- [14] World Business Council for Sustainable Development. (2023). *Circular Transition Indicators V4.0 Metrics for business, by business*.

- [15] World Business Council for Sustainable Development. (2022). *Circular Transition Indicators V3.0 Metrics for business, by business*. <https://www.wbcSD.org/content/wbc/download/14172/204337/1>
- [16] Brunner, P. H. y Rechberger, H. (2005). *Practical Handbook of Material Flow Analysis*. Taylor & Francis.
- [17] Icontec. (2007). *Norma Técnica Colombiana NTC-ISO 14040 Gestión ambiental. Análisis de ciclo de vida. Principios y marco de referencia*.
- [18] TECPA. (s. f.). *Qué es el análisis de ciclo de vida (ACV)*.
- [19] Stiftelsen Svensk Industridesign. (s. f.). *Circular Business Models – Sustainability Guide*. <https://sustainabilityguide.eu/methods/circular-business-models/>
- [20] Huijbregts, M. A. J., Steinmann, Z. J. N., Elshout, P. M. F., Stam, G., Verones, F., Vieira, M. D. M., Hollander, A. y Van Zelm, R. (2017). ReCiPe 2016: a harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level Report I: Characterization. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 22, 138-147.
- [21] CAEM. (2022). *Nota técnica de sistematización del proceso*.
- [22] Responsabilidad Social Empresarial y Sustentabilidad. (s. f.). *Economía Circular: qué es, principios, objetivos, beneficios y ejemplos*. <https://responsabilidadsocial.net/economia-circular-que-es-principios-objetivos-beneficios-y-ejemplos/>
- [23] Innodriver. (s. f.). *Descargas. Business Model B- Canvas B*.
- [24] Osterwalder, A. y Pigneur, Y. (2010). *Business Model Generation: A Handbook for Visionaries, Game Changers, and Challengers*. 10.1523/JNEUROSCI.0307-10.2010
- [25] Vásquez, L. F. (2024). *Nota de sistematización del proceso – Formulación de la hoja de ruta hacia un modelo de gestión circular para la empresa*.
- [26] MAV Ingeniería Integral. (2022). *Elaboración y formulación del Plan Maestro de Gestión de Lodos de la EAAB ESP. Producto N.º 5: Resumen ejecutivo Plan de Gestión de Lodos*.
- [27] Kakwani, N. S. y Kalbar, P. P. (2022). Measuring urban water circularity: Development and implementation of a Water Circularity Indicator. *Sustain Prod. Consum.*, 31, 723-735. 10.1016/j.spc.2022.03.029
- [28] World Business Council for Sustainable Development. (2020). *Circular Transition Indicators*.

- [29] World Business Council for Sustainable Development. (2023). *Circular Transition Indicators V4.0 Metrics for business, by business*. <https://www.wbcsd.org/contentwbc/download/16345/233646/1>
- [30] ecoRae. (2013). *Informe de resultados del ACV del proceso - Anexo técnico del reporte final del proyecto LIFE11 ENV/ES 574*.
- [31] Comisión Europea. (2020). *Resiliencia de las materias primas fundamentales: trazando el camino hacia un mayor grado de seguridad y sostenibilidad*.
- [32] U. S. G. Survey. (s. f.). *U. S. Geological Survey Releases 2022 List of Critical Minerals*.
- [33] U. S. G. S. y Department of the Interior. (2022). *Department of the Interior*.
- [34] Statista. (s. f.). *Average service life of trucks in Japan from 2013 to 2022*.
- [35] Montalvo, C., Peck, D. y Rietveld, E. (2016). *A Longer Lifetime for Products: Benefits for Consumers and Companies – Study for the IMCO Committee*. European Parliament.
- [36] EAAB ESP. (2018). *Proyectos de reducción de emisiones de GEI de la Empresa de Acueducto, Alcantarillado y Aseo de Bogotá (EAAB ESP)*.
- [37] DANE. (s. f.). *Proyecciones de población*. <https://www.dane.gov.co/index.php/estadis-ticas-por-tema/demografia-y-poblacion/proyecciones-de-poblacion>
- [38] EAAB ESP. (2017). *Programa de Uso Eficiente y Ahorro del Agua – PUEAA 2017-2021*.
- [39] Díaz Álvarez, C. J. (s. f.). *Metabolismo de la Ciudad de Bogotá D.C.: Una Herramienta para el Análisis de la Sostenibilidad Ambiental Urbana*. Universidad Nacional de Colombia. <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/8385/08905064.2011.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [40] EPM. (s. f.). *Guía para el diseño hidráulico de redes de alcantarillado*. https://www.epm.com.co/site/Portals/0/centro_de_documentos/GuiaDisenoHidraulicoRedesAlcantarillado.pdf
- [41] MIIS Colombia. (2021). *Elaboración y formulación del Plan Maestro de Gestión de Lodos (PGL) de la EAAB ESP*.
- [42] Gutiérrez, A. M. R. y Sevilla, G. (2010). *La densidad aparente en suelos forestales del Parque Natural Los Alcornocales*. Universidad de Sevilla.
- [43] Forti, V., Baldé, C. P. y Kuehr, R. (2018). *E-Waste Statistics: Guidelines on Classification, Reporting and Indicators*.
- [44] *Informe de gases de efecto invernadero (GEI) de la EAAB ESP: año comparativo n.o 1: 2020 con año base 2019*. (2020).

- [45] EAAB ESP. (s. f.). *Portafolio de Productos y Servicios 2020*. https://www.acueducto.com.co/wps/wcm/connect/EAB2/ce6033d8-0ce6-40e4-9066-222d18fe7b47/PORTAFOLIODE+SERVICIOS+Y+PRODUCTOS+EAAB-ESP.pdf?MOD=AJPERES&CACHEID=ROOTWORKSPACE.Z18_K862HG82NOTF70QEKDBLFL3000-ce6033d8-0ce6-40e4-9066-222d18fe7b47-m.ZuCnb
- [46] EAAB ESP. (s. f.). *Gestión eficiente de la energía*. https://www.acueducto.com.co/wps/portal/EAB2/gestores-ambientales/gestion-ambiental/gestion-eficiente-de-la-energia/!ut/p/z0/04_SjgCPykssyoxPLMnMzovMAfIjo8zizQKdDQwtDlz8DEyMnAoCgwOcg-vxDnT3MvAz1C7ldFQFihxgW/
- [47] Unidad Administrativa Especial de Servicios Públicos. (s. f.). *Documento Técnico Soporte del Plan Integral de Residuos Sólidos*. https://www.uaesp.gov.co/sites/default/files/planeacion/DTS_PGIRS_345_2020.pdf
- [48] Zohar, K. (2023). *Ulex Europaeus, Fire Effects Information System*. <https://www.fs.usda.gov/database/feis/plants/shrub/uleeur/all.htm>
- [49] Núñez-Moreno, A., Barbieri, G. y Gordillo, G. (2020). Analysis of the Feasibility of Generating Solid Biofuel from Ulex Europaeus Plants. *Revista Facultad de Ingeniería*, 29(54). 10.19053/01211129.v29.n54.2020.10454
- [50] EAAB ESP. (2023). *Informes de actividades PTAR Salitre*. <https://www.acueducto.com.co/wps/portal/EAB2/Home/ambiente/saneamiento/rio-bogota/ptar-salitre/informes-de-actividades-ptar-salitre>





A large, stylized, light blue letter 'A' is centered on a solid blue background. The letter has a thick, rounded stroke. The word 'ANEXOS' is written in white, bold, uppercase letters across the middle of the 'A'.

ANEXOS

Anexo 1. Evaluación de las doce metodologías posibles para el diagnóstico de circularidad

Metodología y fuente	Aplicación/ límites del sistema	Herramientas/ software	Marco teórico/ conceptual	Ventajas	Desventajas y limitantes	Evaluación de aplicabilidad para la EAAB ESP
<i>Circulytics</i> Fundación Ellen MacArthur [14]	Empresas	Cuestionario en línea propiedad de la fundación.	Conjunto de indicadores en dos categorías: facilitadores (20) y resultados (17), que abarcan 11 temas: estrategia y planificación, personas y competencias, innovación, operaciones, compromiso externo, productos y materiales, servicios, activos de propiedad, planta y equipo, agua, energía, finanzas.	Asistencia técnica en la evaluación y respaldo de una institución reconocida.	Análisis realizado directamente por la fundación. Limitado a empresas de la red de la fundación y organizaciones con ingresos anuales superiores a USD 1000 millones.	Se recomienda para una instancia posterior, cuando se tenga un primer diagnóstico o información base de circularidad.
		Análisis realizado por la fundación.	Promedio ponderado (de acuerdo al tipo de industria) para generar un puntaje general.	Indicadores alineados con otras metodologías como GRI, CDP o WBCSD.		No es posible aplicarla de manera independiente ni controlar las variables de análisis.
			Incluye análisis de flujo de materiales.			
<i>Material Circularity Indicator (MCI)</i> Fundación Ellen MacArthur y Granta Design [22]	Empresas	<i>Circularity Indicators' web tool & MI: Product Intelligence Package – Granta Design</i>	Volatilidad de precios en los materiales y suministro de materiales.	Enfoque de cadena valor.	Software pago y/o por membresía de CE100.	No es posible aplicarse de manera independiente ni controlar las variables de análisis.
	Productos		Riesgos ambientales, normativos y de la cadena de suministro.	Especializada para industrias que utilizan materiales o minerales escasos y/o recursos no renovables.		Se debe pagar por el software.

Metodología y fuente	Aplicación/ límites del sistema	Herramientas/ software	Marco teórico/ conceptual	Ventajas	Desventajas y limitantes	Evaluación de aplicabilidad para la EAAB ESP
Circularity Gap Reporting Initiative (CGRI) Circle Economy [13][12]	Global	No hay software específico.	Tablas híbridas multirregionales de oferta-uso e insumo-producto (<i>Multiregional Hybrid Supply-Use and Input-Output Tables mr-HSUTs/mr-HIOTs</i>). Análisis de flujo de materiales a nivel país (<i>Economy-wide Material Flow Analysis EW-MFA</i>).	Permite evaluar la circularidad a nivel macro siguiendo un enfoque de cadena valor.	Alta complejidad de modelación/ programación.	No es aplicable a empresas.
	Nacional					
	Cadena de valor de materiales					
Circularity Check Ecopreneur, MVO Nederland y WeSustain [8]	Producto	Circularity Check en línea	60 preguntas, ponderación de puntajes.	Gratis, herramienta en línea.	Diseñada para evaluar la circularidad de un producto o servicio.	No es aplicable a empresas.
	Servicios			Autoevaluación con verificación externa.		
The Circularity Assessment Protocol (CAP) University of Georgia Jambeck Research Group [11] [27] [28]	Ciudad-plásticos	No hay software específico.	Modelo hablado (<i>spoke model</i>).	Resultados fáciles de comunicar a tomadores de decisiones y público en general.	Enfoque limitado a ciudades y un solo tipo de material (plásticos).	No es aplicable a empresas.
			Análisis de flujo de materiales (<i>Material Flow Analysis MFA</i>).			
Circular Transition Indicators v4.0: Metrics for business, by business World Business Council for Sustainable Development [19]	Empresas	CTI Tool: https://ctitool.com	Análisis de flujo de materiales (<i>Material Flow Analysis MFA</i>).	Metodología transparente.	Requiere un alto nivel de experticia en modelación de flujos.	Se recomienda para la EAAB ESP al disponer de buena información sobre sus procesos (y flujos).
			Análisis de ciclo de vida (<i>Life Cycle Assessment LCA</i>).	No necesariamente se debe usar el software CTI Tool.	Requiere de un gran volumen de datos para la modelación.	Se ajusta a las necesidades identificadas de realizar un diagnóstico con enfoque de cadena de valor.

Metodología y fuente	Aplicación/ límites del sistema	Herramientas/ software	Marco teórico/ conceptual	Ventajas	Desventajas y limitantes	Evaluación de aplicabilidad para la EAAB ESP
<p><i>Circularity Assessment Score CAS2.0</i> Circular Business Academy (CBA) [15]</p>	Empresas	Revisión y cuestionario (en línea) de la empresa. Análisis realizado por CBA.	Evaluación de competencias, relaciones, y prácticas organizacionales y gerenciales con enfoque de cadena de valor. Asigna puntajes para llegar a una ponderación única.	Enfocada en revisar y buscar mejoras en el modelo de negocio.	Marca registrada/ propiedad intelectual de Gm. Análisis realizado por CBA.	No es posible aplicarse de manera independiente ni controlar las variables de análisis ya que debe contratar la evaluación directamente con CBA.
<p><i>Circle Assessment</i> Circle Economy [16]</p>	Empresas	<i>Circle Assessment Tool</i>	Herramienta de autoevaluación en línea para ayudar a las empresas a comprender los diferentes aspectos operativos y organizativos de la economía circular.	Asistencia técnica en la evaluación y respaldo de una institución reconocida.	Marca registrada. Análisis realizado directamente por Circle Economy.	No es posible aplicarse de manera independiente ni controlar las variables de análisis ya que debe contratar la evaluación directamente con Circle Economy.
<p><i>CIRCelligence</i> Boston Consulting Group (BCG) [20]</p>	Empresas	<i>CIRCelligence</i>	Análisis de flujo de materiales (<i>Material Flow Analysis</i> [MFA]): en masa y económico.	Enfoque de cadena valor.	Marca registrada. Análisis realizado directamente por BCG.	No es posible aplicarse de manera independiente ni controlar las variables de análisis ya que debe contratar la evaluación directamente con BCG.
				Genera indicadores de proceso, desempeño y <i>headline</i> .		
<p><i>GRI 306: Waste Standard</i> Global Reporting Initiative [21]</p>	Empresas	No hay software específico.	Estimación de impactos económicos, ambientales y sociales en la gestión de residuos.	Metodología transparente.	Enfoque en residuos.	No se recomienda para la EAAB ESP por enfocarse exclusivamente en el final de la cadena de valor y/o residuos.

Metodología y fuente	Aplicación/ límites del sistema	Herramientas/ software	Marco teórico/ conceptual	Ventajas	Desventajas y limitantes	Evaluación de aplicabilidad para la EAAB ESP
<i>Cradle to Cradle Certified</i> [9]	Producto	No hay software específico.	Enfoque de ciclo de vida.	No requiere software.	Enfoque en productos o procesos.	No se recomienda para la EAAB ESP como método exclusivo al enfocarse en la estimación de impactos de productos y/o procesos, mas no en el rendimiento general de la empresa.
		Es un estándar certificable soportado en guías que abarca diferentes metodologías de evaluación por áreas.	Los productos se evalúan en función de su comportamiento medioambiental y social en cinco categorías: salud de los materiales, reutilización de los materiales, gestión de las energías renovables y del carbono, gestión del agua y justicia social.	Metodología estandarizada a nivel mundial.	Requiere un alto nivel de experticia para la modelación, así como software especializado.	
				Permite comparación con otros productos similares y la evaluación de escenarios.		
<i>Circular Economy Toolkit</i> Cambridge University e Institute for Manufacturing [10]	Producto	<i>The Circular Economy Toolkit – Assessment Tool</i>	Identificación de oportunidades de mejora a lo largo de la cadena de valor basadas en el diseño del producto y operaciones del negocio, a partir de casos de estudio y literatura.	Enfoque de cadena valor.	No está diseñada para realizar diagnósticos de línea base.	No se recomienda para la EAAB ESP al no estar diseñada para realizar diagnóstico de línea base y estar enfocada fundamentalmente en productos.
	Servicios			Autoevaluación.		

Anexo 2. Descripción de la batería de indicadores propuestos para evaluar la circularidad

A continuación, se describen los indicadores propuestos, utilizando como fuente la documentación técnica de cada método, CTI [28] [29] y ReCiPe [20], así como fuentes complementarias para algunas definiciones [30]. Ciertos indicadores intermedios o de base son abordados de manera explícita o implícita junto con el indicador KPI en el que influyen.

1 Cierre de ciclo

Este grupo se conforma por tres indicadores que expresan la eficiencia de la empresa en el cierre del ciclo de sus flujos de materiales, agua y energía.

1.1 Porcentaje de circularidad material

Se estima a partir de los porcentajes de circularidad de las entradas y de las salidas. El primero está determinado por los contenidos de material no virgen (materiales secundarios) y material renovable (fuentes de base biológica cultivadas de forma sostenible) de las entradas de la empresa. El segundo está dado por la recuperación real (con respecto a la recuperación potencial) de los productos, subproductos y flujos de residuos que salen de la empresa.

El porcentaje de circularidad de las salidas refleja la eficacia combinada de las empresas para:

1. Diseñar o tratar su flujo de salida para que sea recuperable. Por ejemplo, el flujo de salida debe ser reusable, reparable, remanufacturable o reciclable para el ciclo técnico y biodegradable para el ciclo biológico. Esto hace referencia al porcentaje de recuperación potencial (presentado como indicador base en la tabla 1).

2. Demostrar la efectiva recuperación de los productos, subproductos y flujos de residuos que salen de la empresa. Esto hace referencia al porcentaje real de recuperación (presentado como indicador base en la tabla 1).

1.2 Porcentaje de circularidad del agua

Similar a la circularidad material, el porcentaje de circularidad de agua se determina a través de la circularidad de las entradas y salidas de este elemento, que a su vez depende de las condiciones locales del recurso hídrico. El principal propósito de evaluar la circularidad del agua es reducir su demanda y así garantizar la disponibilidad de este líquido para los usuarios y para el ambiente.

El porcentaje de circularidad de las entradas de agua es determinado por la capacidad de reabastecimiento de los ecosistemas locales. Por su parte, el de las salidas se calcula el contexto del impacto a los ecosistemas locales de agua.

Para establecer la circularidad de las entradas, la metodología CTI propone utilizar un árbol de decisiones basado en la naturaleza de la procedencia del agua captada (ej., fuentes renovables) y el potencial de reúso del agua una vez vertida. La circularidad de las salidas de agua considera si el recurso es reciclado (fuera de los límites del sistema de empresa) por otros, incluyendo el suministro de agua potable a comunidades en la cuenca de estudio, o si regresa a la cuenca local en una calidad que lo hace disponible inmediatamente con fines ambientales, sociales, agrícolas e industriales.

1.3 Porcentaje de energía renovable

Las fuentes de energía consideradas como renovables incluyen energía solar, energía eólica, energía hidroeléctrica, energía geotermal, energía oceánica (mareas) y bioenergía.

2 Optimización del ciclo

Este grupo se conforma por cuatro indicadores que describen la criticalidad de los materiales que entran a la empresa, la eficiencia en el uso de los recursos y las estrategias de recuperación de materiales.

2.1 Porcentaje de materiales críticos

Este indicador proporciona una primera impresión del porcentaje de entradas de materiales en riesgo al hacer una primera distinción entre materiales críticos y no críticos. Los primeros son propensos a escasear en un futuro relativamente cercano y son difíciles de sustituir sin obstaculizar la funcionalidad que prestan. De tal forma, varias instituciones han identificado minerales críticos, y la Unión Europea (UE) en especial cataloga 41 minerales en esta categoría [31]. Además, Estados Unidos ha elaborado una lista de 50 minerales considerados críticos para la seguridad nacional y la economía del país [32] [33]. En total, ambas listas (*anexo 7*) presentan un total de 59 minerales críticos, los cuales son usados para evaluar este indicador en la EAAB ESP.

2.2 Porcentaje de recuperación por tipo

El indicador base «porcentaje de recuperación real», del grupo de indicadores de cierre de ciclo, expresa la cantidad de flujos de salida que son recuperados, pero no refleja los mecanismos a través de los cuales son recuperados los materiales. Esta limitante es abordada a través del porcentaje de recuperación por tipo que aquí se presenta, el cual diferencia entre la recuperación por ciclos técnico y biológico y los diversos mecanismos que estos incluyen.

En el ciclo técnico se diferencia entre la recuperación por medio de la extensión de la vida útil de los productos/materiales (reúso, reparación y remanufactura) y el reciclaje (el cual requiere procesos de transformación). En un modelo circular, la forma más eficaz de conservar el valor de los recursos es mantener los productos,

componentes y materiales en uso durante el mayor tiempo posible antes de su reciclaje.

En el ciclo biológico se distingue entre diferentes formas de valorización de los materiales de origen renovable, incluyendo absorción de nutrientes por biodegradación y la recuperación de energía de biogás y biomasa. Para el caso particular de los alimentos, también se consideran formas de recuperación el consumo y el uso para un consumo alternativo (ej., alimentación animal). Puesto que el cultivo y la producción de alimentos tienen como único objetivo el consumo, el consumo como un modelo de recuperación es igualmente circular.

2.3 Porcentaje de vida útil

El indicador compara la vida útil actual de los productos duraderos en la empresa respecto a la vida útil actual promedio en la industria. El indicador busca medir el desempeño de productos y no de sus componentes o materiales, y además no aplica para medir el desempeño de productos no duraderos o de rápido movimiento. La vida útil media en la industria se obtuvo promediando valores referenciados en diferentes fuentes bibliográficas ([34] [35]) y se detalla en el *anexo 6*.

2.4 Recirculación de agua en sitio

Este indicador se centra en la circulación dentro de las instalaciones de la empresa mediante la reutilización y el reciclaje. Este indicador expresa el número de veces que una compañía utiliza una «gota media» de agua *in situ* antes de que salga de sus instalaciones.

3 Valoración del ciclo

Este grupo de dos indicadores expresa el valor agregado o la generación de ingresos de la compañía a partir de sus flujos circulares.

3.1 Productividad del material circular

Expresa la efectividad de la empresa para desasociar su crecimiento financiero de la dependencia de los recursos (lineales). La productividad material circular expresa el valor (económico) que una organización genera por unidad de entrada (material) lineal. A medida que las entradas lineales disminuyen, el valor del indicador aumenta, reflejando un desacoplamiento entre ingresos económicos y uso de recursos.

3.2 Ingresos circulares

Este indicador expresa los ingresos de la empresa ajustados por el porcentaje de circularidad material. Un valor más alto indica una mayor generación de ingresos a partir de los productos o modelos de negocio circulares de la entidad. Esta métrica también refleja desacoplamiento a medida que los ingresos aumentan a partir de flujos circulares.





Anexo 3. Diagramas de flujo 2021 y 2022

Metabolismo de la EAAB ESP 2021 – Flujos de materiales, agua y energía



MEDIO AMBIENTE

Agua superficial
Agua subterránea
Precipitación / evaporación
Biomasa / suelo



SUMINISTRO DE BIENES

Dotación y EPP
Suministro de alimentos
AEE
Insumos químicos
Muebles y enseres
Equipo de laboratorio
Papel de impresión
Vehículos
Maquinaria y equipos
Repuestos
Lubricantes
Otros equipos y bienes



SUMINISTRO DE ENERGÍA

Electricidad
Energía fotovoltaica
Combustibles
Gas natural



SUMINISTRO DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

Concreto
Ladrillos
Cerámica
Agregados pétreos
Tierras
Vidrio
Metales
Madera
Plásticos
Micromedidores
Tapas de micromedidores y alcantarillado
Válvulas de regulación
Otros





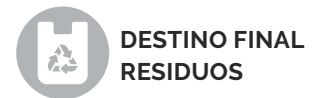
Otros municipios



Agua
Suelo
Atmósfera



- RAEES
- Llantas
- RCD
- RESPEL
- Lodos y residuos de tratamiento de agua
- Aceites
- Residuos silviculturales
- Residuos ordinarios
- Otros residuos especiales y voluminosos
- Vehículos y maquinaria de obra
- Vehículos personal



- Laguna de secado
- Reciclaje
- Gestores autorizados especializados
- Remate
- Valorización energética
- Relleno sanitario
- Compostaje
- Incineración
- Escombrera
- Predios de la EAAB ESP
- Otro



Red interconectada nacional

Metabolismo de la EAAB ESP 2022 – Flujos de materiales, agua y energía



RECURSOS NATURALES

Sustrato:
589,85 t

Agua:
1 123 941 019 m³



BIENES DE CONSUMO

29 940 t



ENERGÍA

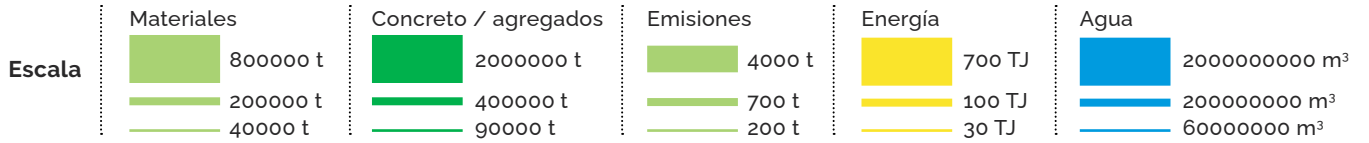
618 TJ



MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

1 762 141 t





OTROS USUARIOS

59 256 974 m³



MEDIO AMBIENTE

Descargas:
1 006 561 687 m³



ATMÓSFERA

CO₂eq: 3556 t

Energía: 72 TJ



GESTIÓN DE RESIDUOS

Residuos sólidos:
254 901 t

RCD mezclados:
767 793 t



GENERACIÓN ELÉCTRICA

Red interconectada nacional:
45 TJ

Metabolismo de la EAAB ESP 2021 – Flujos de materiales, agua y energía



MEDIO AMBIENTE

- Agua superficial
- Agua subterránea
- Biomasa
- Suelo



SUMINISTRO DE BIENES

- Dotación y EPP
- Suministro de alimentos
- AEE
- Insumos químicos
- Muebles y enseres
- Equipo de laboratorio
- Papel de impresión
- Vehículos
- Maquinaria y equipos
- Repuestos
- Lubricantes
- Otros equipos y bienes



SUMINISTRO DE ENERGÍA

- Electricidad
- Energía fotovoltaica
- Combustibles
- Gas natural



SUMINISTRO DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

- Concreto
- Ladrillos
- Cerámica
- Agregados pétreos
- Tierras
- Vidrio
- Metales
- Madera
- Plásticos
- Micromedidores
- Tapas de micromedidores y alcantarillado
- Válvulas de regulación
- Otros

Gestión externa silvicultural

- Siembra y fertilización
- Siembra y fertilización obras civiles

Gestión administrativa y de operaciones

- Equipo IT
- Muebles y enseres
- Papelería (facturación)
- Equipos, EPP y uniformes
- Casinos (alimentación)
- Laboratorios de agua
- Sedes e infraestructura
- Vehículos de pasajeros

Gestión de operaciones externas

- Vehículos de personal (alquilados)

Gestión interna de obras civiles y mantenimientos

- Materiales de construcción
- Maquinaria y equipos (de obra y mantenimiento)

Gestión externa de obras civiles

- Materiales de construcción

Gestión de obras civiles – urbanismo

- Materiales de construcción

- Precipitación/ evaporación

Gestión del sistema hídrico urbano y ecosistemas abastecedores

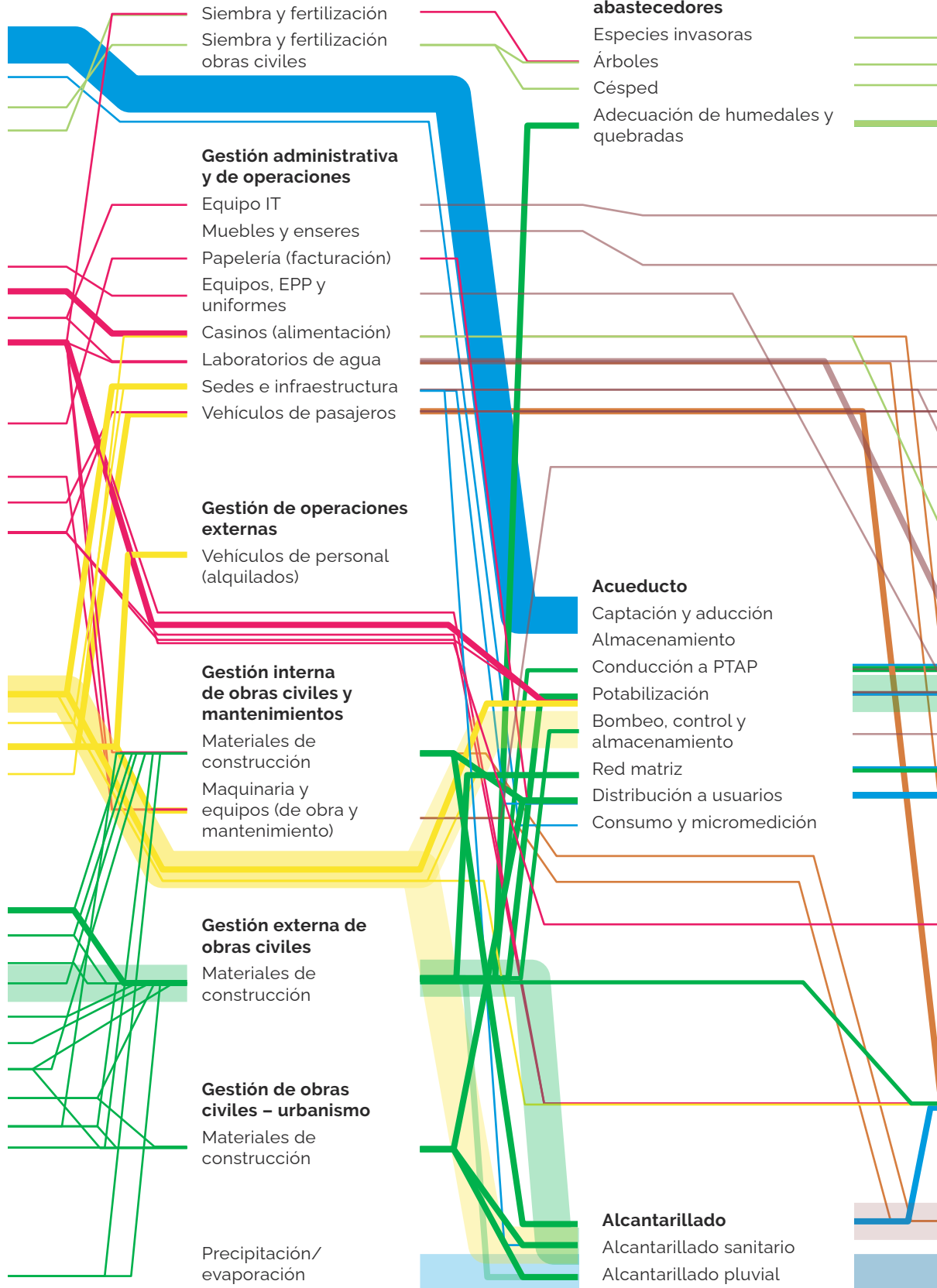
- Especies invasoras
- Árboles
- Césped
- Adecuación de humedales y quebradas

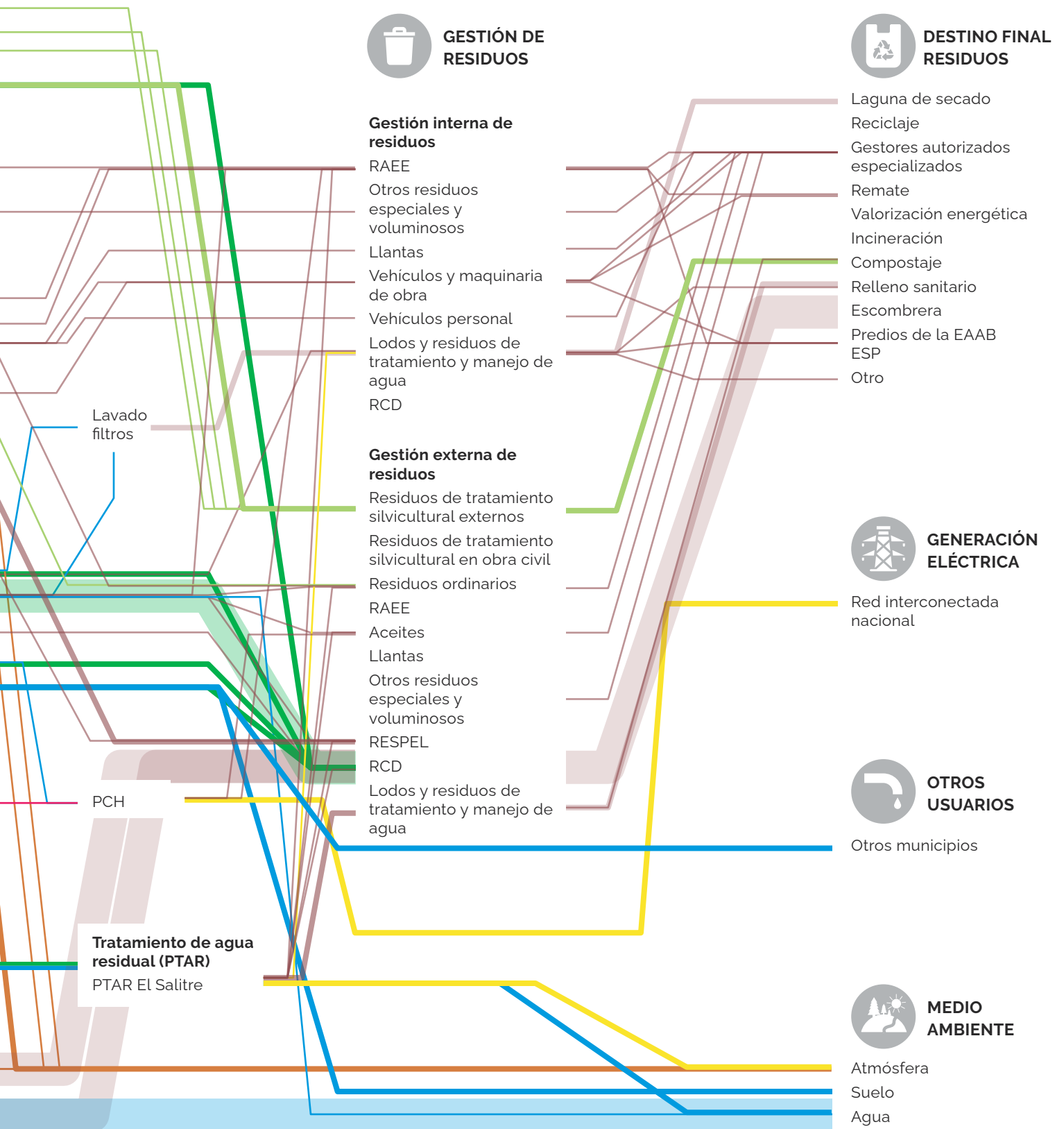
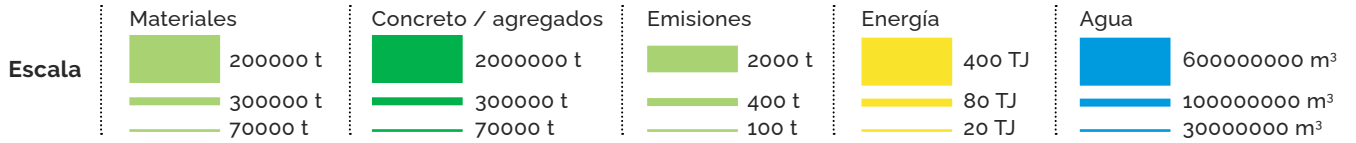
Acueducto

- Captación y aducción
- Almacenamiento
- Conducción a PTAP
- Potabilización
- Bombeo, control y almacenamiento
- Red matriz
- Distribución a usuarios
- Consumo y micromedición

Alcantarillado

- Alcantarillado sanitario
- Alcantarillado pluvial





Metabolismo de la EAAB ESP 2021 – Flujos de materiales, agua y energía



MEDIO AMBIENTE

- Agua superficial
- Agua subterránea
- Precipitación/evaporación
- Biomasa suelo



SUMINISTRO DE BIENES

- Dotación y EPP
- Suministro de alimentos
- AEE
- Insumos químicos
- Muebles y enseres
- Equipo de laboratorio
- Papel de impresión
- Vehículos
- Maquinaria y equipos
- Repuestos
- Lubricantes
- Otros equipos y bienes



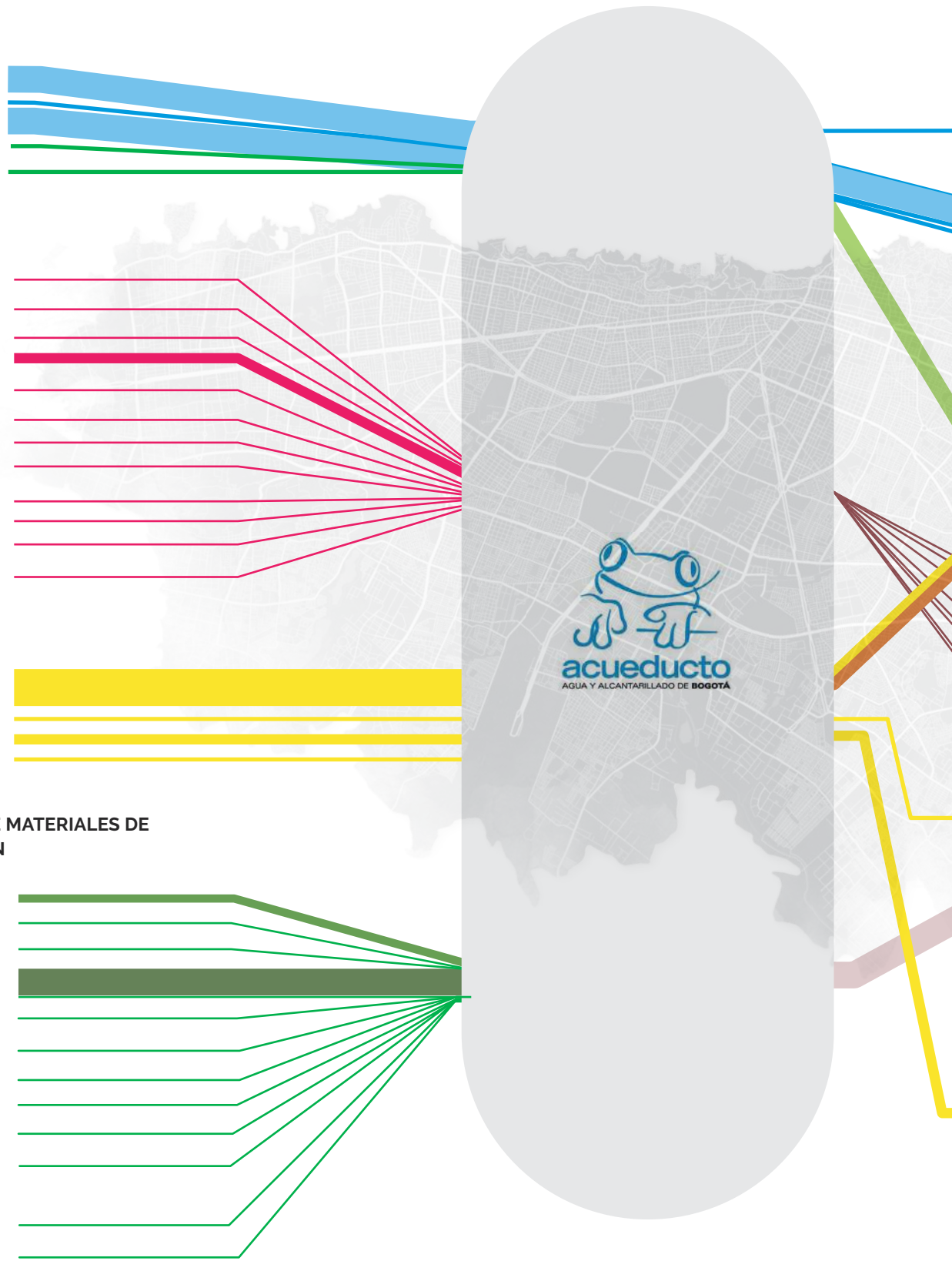
SUMINISTRO DE ENERGÍA

- Electricidad
- Energía fotovoltaica
- Combustibles
- Gas natural



SUMINISTRO DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

- Concreto
- Ladrillos
- Cerámica
- Agregados pétreos
- Tierras
- Vidrio
- Metales
- Madera
- Plásticos
- Micromedidores
- Tapas de micromedidores y alcantarillado
- Válvulas de regulación
- Otros





Otros municipios



Agua
Suelo
Atmósfera



GESTIÓN DE RESIDUOS

- RAEE
- Llantas
- RCD
- RESPEL
- Lodos y residuos de tratamiento de agua
- Aceites
- Residuos silviculturales
- Residuos ordinarios
- Otros residuos especiales y voluminosos
- Vehículos y maquinaria de obra
- Vehículos personal



DESTINO FINAL RESIDUOS

- Laguna de secado
- Reciclaje
- Gestores autorizados especializados
- Remate
- Valorización energética
- Relleno sanitario
- Compostaje
- Incineración
- Escombrera
- Predios de la EAAB ESP
- Otro



GENERACIÓN ELÉCTRICA

Red interconectada nacional

Metabolismo de la EAAB ESP 2021 – Flujos de materiales, agua y energía



RECURSOS NATURALES

Sustrato:
2404 t

Agua:
1 098 986 546 m³



BIENES DE CONSUMO

24 929 t



ENERGÍA

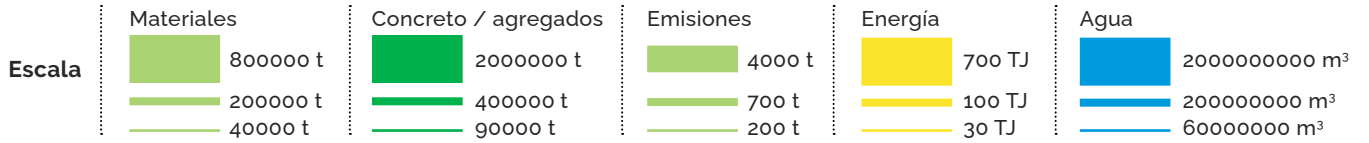
916 TJ



MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

1 760 883 t





OTROS USUARIOS

56 682 332 m³



MEDIO AMBIENTE

Descargas:
989 541 463 m³



ATMÓSFERA

CO₂eq: 3049 t
Energía: 33 TJ



GESTIÓN DE RESIDUOS

Residuos sólidos:
213 671 t
RCD mezclados:
1 337 585 t



GENERACIÓN ELÉCTRICA

Red interconectada nacional:
35 TJ

Anexo 4. Descripción de los datos y consideraciones de cálculo

A continuación, se resumen las fuentes de datos y consideraciones tomadas en cuenta en el procesamiento de la información y el cálculo de los indicadores. Las fuentes de datos detalladas se relacionan en las hojas de cálculo de Excel que acompañan la modelación.

Flujos de materiales

Medio ambiente (recursos naturales)

Agua

Los cálculos específicos de los flujos de agua se encuentran en la hoja «Agua» del Excel anexo «Modelo_metabólico.xlsx».

Captación, almacenamiento, conducción y potabilización

El volumen de agua captado de fuentes naturales para los años 2019 y 2020 se asumió igual a los caudales tratados en las PTAP, para los cuales la empresa dispone de mediciones. En los casos de los años 2021 y 2022, se tomó el dato del caudal medido a la entrada de cada una de las PTAP.

Se asumió que no existen pérdidas en el sistema captación-almacenamiento-conducción-potabilización. Las pérdidas de agua en el sistema fueron asignadas a la distribución de agua potable, como se expone en el apartado *Distribución a usuarios y pérdidas*.

El agua consumida para el lavado de filtros en plantas también es medida por la empresa. Este líquido es incorporado en los lodos de lavada y por ende condu-

cido a las lagunas de secado o descargado al medio ambiente después de procesos de deshidratación. Estas descargas finales no son conocidas. En la PTAP El Dorado, se cuenta con un sistema que permite que el recurso hídrico usado para lavado de filtros sea tratado en una planta de tratamiento de aguas residuales domésticas y a su vez sea devuelto al proceso de potabilización por medio de un sistema de bombeo.

Red matriz y PCH

El agua de potabilización (una vez descontada la de lavado de filtros y sumada el agua que se recircula en la PTAP El Dorado) es enviada al sistema matriz de distribución, donde se asume que no existen pérdidas, por lo que en su totalidad es conducida al sistema de redes menores de distribución a usuarios.

Para los años 2019 y 2020, la cantidad de agua promedio que pasó a través de las PCH para generación de energía fue tomada de documentos de la EAAB ESP en línea [36]. En cuanto a los años 2021 y 2022, se tomaron los registros del sistema Scada EAAB ESP y de *Fluid Indicator Transmission (FIT)*.

Distribución a usuarios y pérdidas

La empresa no cuenta con mediciones o estimaciones sobre las pérdidas físicas de agua a lo largo de los diferentes puntos de la cadena de valor del servicio de acueducto. A partir del balance hídrico preliminar de la EAAB ESP para el año 2021, el cual tiene un enfoque comercial, se estimó que el 27 % del agua tratada se pierde. Para efectos prácticos de modelación, se asumió que estas pérdidas ocurren en las redes de distribución menor a usuarios. Esta simplificación de la realidad no afecta el balance final de agua de la empresa ni los indicadores de circularidad.

Consumo de agua potable y agua subterránea

El 83 % del agua tratada es efectivamente consumida por usuarios en Bogotá y por otros municipios. La distribución del consumo entre estos usuarios se realizó a partir del número de habitantes según las proyecciones poblacionales del DANE para los años 2019 y 2020 [37]. El agua potable consumida por usuarios para los años 2021 y 2022 fue tomada de los caudales facturados por la Gerencia Corporativa de Servicio al Cliente tanto para Bogotá como para otros municipios.

El consumo de agua en sedes se proyectó a partir del consumo del año 2016 registrado en el Programa de Uso Eficiente y Ahorro del Agua (PUEAA) [38], con una tasa de crecimiento anual de 1,76 % derivada de los consumos anuales entre el 2006 y el 2016 reportados en el mismo programa.

La información de captación de agua subterránea por los usuarios se tomó de Díaz Álvarez [39], quien proyectó un caudal constante de 0,033 m³/s entre 2010 y 2025.

Alcantarillado sanitario

Utilizando las recomendaciones de diseño de EPM [40], se estimó que el 85 % del agua consumida por los usuarios retorna al sistema de alcantarillado sanitario. Este factor también determina el porcentaje de circularidad del agua de entrada ya que teóricamente solo el 85 % de agua captada puede retornarse a las fuentes hídricas naturales, mientras que el 15 % restante se pierde por infiltración.

Los flujos de agua entre los sistemas de alcantarillado sanitario y pluvial asociados a conexiones erradas no fueron estimados ya que no se cuenta con información al respecto.

Tratamiento de agua residual

El volumen de agua tratada en la PTAR fue tomado de los reportes mensuales de la PTAR El Salitre publica-

dos en la página de la EAAB ESP a partir del año 2020. Para el año 2019 se aplicó un factor de tratamiento del 38,4 %, el cual corresponde al porcentaje de agua tratada en la PTAR con respecto al flujo de entrada de agua residual al alcantarillado sanitario en el año 2020.

Alcantarillado pluvial

El volumen de agua gestionado en el sistema de alcantarillado pluvial se calculó a partir de estimaciones de vertimientos en la ciudad de Bogotá realizados por Díaz Álvarez [39] en el año 2011 y con proyecciones al año 2025. Este estudio realiza un balance de masas que tiene en cuenta la precipitación, evaporación y otras descargas que afectan este flujo.

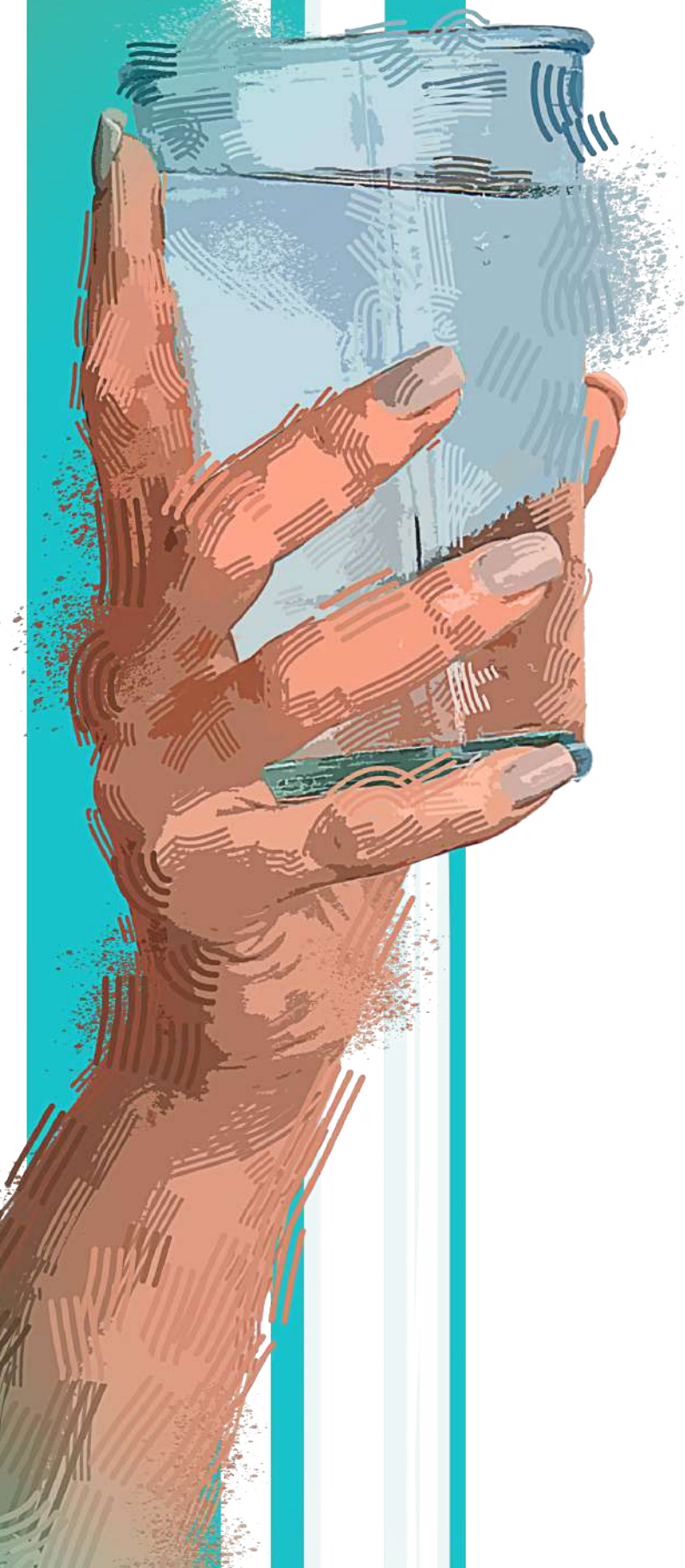
Este flujo de agua se considera 100 % circular ya que no es captado para su utilización. La función principal de la EAAB ESP es conducir estas aguas sin alterar sus características físicas y químicas.

Recirculación de agua en sitio

Para el 2019 la empresa no contaba con sistemas de recirculación de agua. Sin embargo, desde el año 2021 se empezó a operar un sistema de recirculación de agua de lavado de filtros en la PTAP El Dorado [41], donde los lodos producidos son conducidos a través de tornillos de prensa, lo que permite la deshidratación de estos. Además, se instaló un sistema de bombeo que permite devolver el agua tratada de esta forma al proceso de potabilización y otro para devolver al inicio de tratamiento del lodo el agua residual no apta para el proceso de potabilización que se produce en los tornillos y lavado de los equipos.

Biomasa y suelo

No se registraron siembras de material vegetal en contratos de silvicultura ejecutados por externos. En los contratos de obra civil desarrollados por terceros se registraron siembras de árboles y empradizaciones cuyas cantidades se estimaron con la misma metodología usada para la cuantificación de materiales de construcción (ver apartado *Obras civiles externas*). La



acumulación de biomasa en el sistema por el crecimiento natural de césped, árboles y especies invasoras no fue considerada.

El suministro de sustrato usado en actividades de silvicultura se estimó a partir de los informes de los contratos ejecutados por externos y una densidad del suelo de 1100 kg/m^3 tomada de Rubio Gutiérrez [42]. Los cálculos de los flujos de biomasa y sustrato se encuentran en las hojas «Biomasa» y «Suelo», respectivamente, del Excel «Modelo_metabólico.xlsx».

Bienes de consumo

Dotación y EPP

Para las entradas, se utilizaron las cantidades (en número de unidades) del reporte de adquisiciones de la empresa en combinación con factores de peso unitarios obtenidos de fichas técnicas genéricas de productos y otras fuentes disponibles en línea. Los cálculos específicos se encuentran en las hojas «CALC_Dotación EPP» y «Dotación y EPP» del Excel «Modelo_metabólico».

Alimentos

El consumo de alimentos se estimó exclusivamente para los casinos (central de operaciones y plantas) a partir de la cantidad de servicios realizados y los menús definidos en la contratación del servicio de alimentación. A partir de los menús, se establecieron las fracciones de alimentos de origen animal y de origen vegetal. Los cálculos específicos se encuentran en las hojas «CALC_Alimentos» y «Alimentos» del Excel «Modelo_metabólico.xlsx».

AEE

Las cantidades de AEE se estimaron a partir de los reportes de adquisiciones de activos de la empresa y los pesos promedio recomendados por la Universidad de las Naciones Unidas [43] para este tipo de modelación. Los cálculos específicos se encuentran en la hoja «CALC_AEE» del Excel anexo «Modelo_metabólico».

Insumos químicos

Las cantidades de insumos de potabilización y tratamiento de agua residual son reportadas por la empresa. Los reactivos de laboratorio fueron estimados a partir de la información de adquisiciones usando factores de caracterización de pesos unitarios obtenidos de las fichas técnicas de los productos disponibles en internet.

La cantidad de fertilizantes utilizada fue obtenida de los contratos de silvicultura, mientras que los refrigerantes, el acetileno y los extintores se tomaron del informe de GEI [44]. Estas cantidades son reportadas en la hoja «Insumo químicos» del Excel anexo «Modelo_metabólico.xlsx». No se contó con información de insumos de aseo.

Muebles y enseres

La empresa solo reporto entradas de muebles y enseres para el año 2022. Esta información se obtuvo a partir de los datos de adquisiciones usando factores de caracterización de pesos unitarios con base en las características de los fabricantes disponibles en internet.

Equipo de laboratorio

Se estimaron a partir de los reportes de adquisiciones y pesos unitarios tomados de fichas técnicas de los productos disponibles en internet. Los cálculos específicos se encuentran en la hoja «EQUIPO_LAB» del Excel anexo «Otros_flujos.xlsx». Para los años 2021 y 2022 no se registraron compras o adquisiciones de equipos de laboratorio.

Papel

Se obtuvo directamente del informe de GEI [44] de la empresa.

Vehículos y maquinaria

Se estimaron a partir de los reportes de adquisiciones y pesos unitarios tomados de fichas técnicas de los artí-

culos disponibles en internet. Los cálculos específicos se encuentran en la hoja «CLAC_Vehículos» del Excel anexo «Modelo_metabólico».

Repuestos – llantas y baterías

Para los años 2019 y 2020, se estimó el reemplazo de llantas y baterías de vehículos de pasajeros y transporte de carga de la empresa a partir de los inventarios de activos en uso y tasas de consumo de repuestos anuales derivadas de Ecoinvent. Los cálculos específicos son reportados en la hoja «Repuestos» del Excel anexo «Modelo_metabólico.xlsx». Para los años 2021 y 2022 se obtuvo la información de los reportes de mantenimientos en talleres de la EAAB ESP, donde se registran la cantidad y el tipo de llantas reemplazadas en los vehículos y maquinaria de la empresa.

El consumo de baterías de plomo ácido para los años 2019 y 2020 se estimó a partir del número de vehículos y maquinaria y considerando una tasa de reemplazo de las baterías extraída de la base de datos Ecoinvent.

Para los años 2021 y 2022, se obtuvo la información a partir de los reportes de mantenimientos realizados en los talleres de la EAAB ESP. El consumo de repuestos por otro tipo de vehículos y maquinaria fueron omitidos debido a la disponibilidad de información en Ecoinvent.

Energía

Electricidad, combustibles y gas natural

Los consumos energéticos de la empresa son conocidos y reportados en su informe de GEI [44]. El detalle de estos consumos se presenta en la hoja «HUELLA CARBONO» del Excel anexo «Otros_flujos.xlsx».

Generación eléctrica – PCH y fotovoltaica

La generación eléctrica de las PCH para los años 2019 y 2020 se estimó a partir de una generación anual promedio por PCH tomada del portafolio de servicios de la empresa

[45]. En el caso de los años 2021 y 2022 se tomaron los datos medidos por el sistema Scada EAAB ESP y de FIT.

La generación de energía fotovoltaica en el colegio Ramón B. Jimeno se proyectó a partir de datos del 2018 disponibles en la página web de la empresa [46]. Los cálculos específicos son reportados en la hoja «Electricidad» del Excel anexo «Modelo_metabólico.xlsx».

Biogás

La generación y el consumo de biogás se tomaron del informe de GEI, donde se diferencia entre el gas consumido en TEA y en calderas. Los datos son reportados en la hoja «Combustible» del Excel anexo «Modelo_metabólico.xlsx».

Materiales y residuos de construcción

Obras civiles ejecutadas internamente

Para estimar los materiales de construcción consumidos en obras internas, se usó información de una muestra de los avisos generados en el sistema interno de reporte SAP, en el cual se distinguen procesos de obra de acueducto y alcantarillado. La muestra estuvo determinada por los avisos con información disponible sobre las cantidades de materiales de construcción utilizados (tabla 9). Los cálculos para 2019 y 2020 se presentan en los archivos Excel anexos «Avisos_Acueducto.xlsx» y «Avisos_Alcantarillado.xlsx».

Tabla 9. Relación de avisos en obras internas

Tipo de aviso	2019		2022	
	Acueducto	Alcantarillado	Acueducto	Alcantarillado
Avisos totales	6893	1539	52 358	53 713
Avisos de recolección sobrantes	233	165	19	1516
Avisos de obra	6660	1374	52 339	52 197
Avisos de obra con información de materiales	1874	15	17 454	3901

Obras civiles externas

Para estimar los materiales de construcción consumidos y los residuos de construcción generados en obras ejecutadas por terceros, se usaron las cantidades reportadas en los documentos de los contratos perfeccionados y/o actas de pago parcial. Una muestra de 55 contratos fue seleccionada por ley de Pareto (80 %) a partir de los valores contratados. De estos 55 contratos, se contó con información de 44, los cuales finalmente representaron el 48,6 % del valor contratado en 2019.

Para el año 2019 la empresa contaba con 139 contratos activos. La tabla 10 resume la muestra.

El documento Excel «Materiales_construcción.xlsx» presenta la tabulación de la información por cada uno de los contratos analizados y los factores de conversión asignados a cada uno de los materiales reportados.

Tabla 10. Relación de valores ejecutados y analizados en contratos de obra externos

Parámetro	2019				2022			
	Valor	% Valor	# Contratos	% Contratos	Valor	% Valor	# Contratos	% Contratos
Valor teórico ejecutado	576 277 133 831	100,00 %	139	100,00 %	757 860 453 314,29	100 %	123	100,00 %
Valor teórico ejecutado en contratos solicitados	473 948 692 364	82,00 %	55	39,57 %	626 123 409 178,65	82,61 %	48	39,02 %
Valor contratos con cantidades de obra	280 158 820 428	48,62 %	32	23,02 %	337 964 071 743,66	44,6 %	34	27,64 %

Obras civiles por urbanizadores

Para este tipo de obras, en los años 2019 y 2020 solo se estimaron los micromedidores instalados en nuevas acometidas. En esta cuantificación se tomó en cuenta el reporte de cuentas nuevas realizado por la Dirección de Apoyo Comercial – Catastro Usuarios. Para los años 2021 y 2022, además de la cuantificación de los micromedidores, se incluyó la información de tuberías y accesorios usados para la construcción de los sistemas

Residuos

Residuos silviculturales

Para este tipo de residuos se utilizaron los informes de actividades de corte de césped, mantenimiento de árboles y control de especies invasoras (retamo) ejecutadas por contratistas externos. Los cálculos se presentan en la hoja «Residuos Silviculturales» del Excel anexo «Modelo_metabólico.xlsx».

En el caso del césped, se contó con información de área cortada y se tomó la producción de césped por

área del Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos (PGIRS) de Bogotá [47] de 0,75 kg/m². Para árboles se contó con información de volumen y se asumió una densidad promedio de 500 kg/m³.

Para el retamo se contó el área controlada. Utilizando información de estudios de aprovechamiento de retamo [48] [49], se determinó un peso promedio por planta de 3,52 kg y una densidad de dispersión de seis individuos por unidad de área (6 un/m²).

Residuos ordinarios

El modelo metabólico tiene en cuenta tres corrientes de residuos ordinarios (orgánicos, aprovechables y no aprovechables). Para los residuos generados en las actividades diarias de las diferentes sedes se utilizaron los datos de producción y composición reportados en la caracterización de residuos ordinarios realizada en el año 2022 por la empresa. De este mismo informe se tomó la tasa de crecimiento anual en la generación de 2,5 % para extrapolar la generación del año 2019. Los cálculos específicos se muestran en la hoja «Caracterización» del Excel anexo «Residuos.xlsx».

Para los residuos orgánicos generados en los casinos de alimentación, se tomó en cuenta un factor de desperdicio del 30 % respecto a la entrada de alimentos de origen vegetal y animal.

RAEES, RESPEL, lubricantes, llantas usadas y residuos especiales y voluminosos

Los residuos de baterías y llantas usadas de vehículos de pasajeros y transporte de carga se estimaron por balance de masas a partir de las cuantificaciones de consumo de este tipo de repuestos, descritas en el apartado *Repuestos – llantas y baterías*.

Las demás baterías, RAEE, RESPEL (incluyendo EPP contaminados y reactivos químicos) y lubricantes usados generados en sedes y operaciones se estimaron a partir de la bitácora de registro de RESPEL de la empresa y utilizando, de manera retroactiva, la misma tasa de crecimiento en la generación del 2,5 % de los residuos ordinarios. Estas estimaciones se presentan en la hoja «CALC_RESPEL» del anexo de Excel «Modelo_metabólico».

Lodos y residuos de tratamiento de agua

La cantidad total de los generados en PTAP producto de la limpieza de filtros y otras estructuras se estimó a partir de un factor de generación de lodos (en base húmeda) respecto al caudal de agua tratada. Este factor fue derivado de la información contenida en el Plan Maestro de Gestión de Lodos [40].

Los lodos generados en las PTAP El Dorado, Vitelma, Yomasa y Laguna sufren un proceso de secado antes de ser dispuestos. Esta masa deshidratada se calculó a partir de los factores de base seca de lodo reportados en el plan de lodos ya mencionado. Por otra parte, los lodos de pretratamiento generados aguas arriba de las PTAP se tomaron de información consolidada de las plantas suministrada por la EAAB ESP. La gestión de estos lodos se desconoce, por lo que se asume que su destino final es el proceso «otro».

Los residuos generados en el pretratamiento de aguas residuales fueron estimados a partir de una tasa de generación de residuos por metro cúbico de agua que entra a la PTAR, derivada de los datos reportados para 2020, 2021 y 2022 en los informes de actividades de la PTAR Salitre [50]. Además, para los biosólidos generados en el tratamiento del agua residual, se tomó la tasa de producción reportada en el Plan Maestro de Gestión de Lodos [41]. El procesamiento de la información de lodos se presenta en la hoja «Lodos y res. Tratamiento» del Excel anexo «Modelo_metabólico.xlsx».

Emisiones

Para cuantificar las emisiones generadas por la empresa, se tomó la información contenida en el informe de GEI [44], donde se describe la cantidad de toneladas de CO₂eq generadas por los diferentes insumos consumidos por la empresa, principalmente combustibles. El detalle de estas emisiones se presenta en la hoja «HUELLA CARBONO» del Excel anexo «Otros_flujos.xlsx».



Flujos identificados no cuantificados

De los 30 flujos no cuantificados, cinco corresponden al ciclo del agua, así:

1. Consumo de agua lluvia por usuarios.
2. Aguas residuales domésticas tratadas por los usuarios.
3. Agua residual del secado de lodos de potabilización.
4. Agua residual doméstica del alcantarillado sanitario al alcantarillado pluvial (conexiones erradas).
5. Agua de escorrentía del alcantarillado pluvial al alcantarillado sanitario (conexiones erradas).

Tres flujos son material vegetal correspondiente al crecimiento natural de la biomasa del césped, árboles y retamo, y cuatro flujos son de bienes de consumo:

1. Consumo de AEE asociado a obras civiles ejecutadas por externos.
2. Consumo de AEE por urbanistas.
3. Consumo de repuestos de vehículos internamente.
4. Consumo de insumos de aseo internamente.

Los 18 flujos restantes (2019 y 2020) corresponden al consumo de materiales de construcción por urbanistas, que se incorporan en el sistema de acueducto y alcantarillado a cargo de la EAAB ESP.

Materiales renovables y no vírgenes en flujos de entrada

No se dispone de información respecto a la composición de las entradas materiales a la empresa. La participación de materiales renovables o reciclados (no vírgenes) en estas entradas se estimó por criterio técnico del consultor y/o utilizando información extrapolada de la base de datos Ecoinvent. En el caso de los electrónicos, químicos, dotaciones y EPP, equipo de laboratorio y materiales de construcción, se asumió que estos provienen de fuentes 100 % no renovables.

Para los vehículos y maquinaria se estableció un porcentaje de contenido no virgen del 5,3 % a partir de datos composición del motor y chasis de un vehículo de pasajeros en Ecoinvent. Para la electricidad y el etanol se contempló un contenido renovable del 82,9 % y 36,1 %, respectivamente, con base en información de Ecoinvent. Asimismo, todas las entradas de material vegetal, incluyendo el papel, se consideran 100 % renovables.

Vida útil de activos

El porcentaje de vida útil de los productos o bienes duraderos de la empresa se estima a partir de la vida útil real de los activos de la empresa y la vida útil media de referencia de los productos en la industria. Para determinar la vida útil real, se utilizaron las fechas de capitalización y de baja disponibles en la base de activos de la empresa, mientras que la vida útil media de referencia se obtuvo al promediar valores referenciados en diferentes fuentes bibliográficas [34]-[35] (tabla 11). Este estudio se realizó por grupos de activos conforme a la clasificación de bienes realizada por la empresa, donde se distinguen ocho categorías (tabla 11).

Tabla 11. Porcentaje de vida útil por grupo de activos en la EAAB ESP

Grupo de activos	2019			2022		
	Activos en uso	Activos dados de baja	Total, activos	Activos en uso	Activos dados de baja	Total, activos
Equipo de laboratorio	177 %	9 %	177 %	133 %	0 %	133 %
Equipos de telecomunicaciones (radios, equipos de monitoreo, equipo de cómputo, impresoras)	186 %	102 %	186 %	170 %	0 %	170 %
Equipos para la captación, aducción, tratamiento, conducción y distribución del agua	96 %	102 %	96 %	90 %	47 %	90 %
Equipos y herramientas de construcción	270 %	0 %	270 %	236 %	0 %	236 %
Maquinaria (de obra y de mantenimiento)	70 %	0 %	70 %	53 %	0 %	53 %
Muebles y enseres	120 %	0 %	120 %	104 %	0 %	104 %
Vehículos	167 %	8 %	167 %	154 %	0 %	154 %
Vehículos – equipo terrestre/pesado	81 %	0 %	81 %	115 %	0 %	115 %
Media	112 %	97 %	112 %	102 %	47 %	102 %



La correspondencia entre esta clasificación y los flujos utilizados para el estudio del metabolismo de la empresa se presenta en la tabla 12. Por otra parte, las tablas 13 y 14 presentan la vida útil media en años de los activos de la empresa, acompañada del número de activos tomados en cuenta para el cálculo.

Es importante resaltar que no se dispone de fecha de todos los activos dados de baja. La empresa reportó 62 bajas en el año 2019, de las cuales 36 cuentan con información para estimar la edad en el momento de la baja. Las bajas realizadas en el año 2019 correspondientes a vehículos, maquinaria y equipos del servicio de aseo que la empresa prestó de manera excepcional en años anteriores no fueron tomadas en cuenta dada esa condición de excepcionalidad.

Tabla 12. Correspondencia entre la clasificación de activos en la EAAB ESP y los tipos de flujos de del sistema metabólico

Grupo de activos	Tipos de flujos en el sistema metabólico
Equipo de laboratorio	Equipo de laboratorio
Equipos de telecomunicaciones (radios, equipos de monitoreo, equipo de cómputo, impresoras)	AEE
Equipos para la captación, aducción, tratamiento, conducción y distribución del agua potable y residual	Válvulas de regulación, otros materiales de construcción
Equipos y herramientas de construcción	Maquinaria y equipo (de obra y mantenimiento)
Maquinaria (de obra y de mantenimiento)	Maquinaria y equipo (de obra y mantenimiento)
Muebles y enseres	Muebles y enseres
Vehículos	Vehículos
Vehículos – equipo terrestre/pesado	Maquinaria y equipo (de obra y mantenimiento)

Tabla 13. Vida útil media de los activos de la EAAB ESP, 2019

Grupo de activos	Activos en uso		Activos dados de baja		Total activos	
	Vida promedio (años)	# Activos	Vida promedio (años)	# Activos	Vida promedio (años)	# Activos
Equipo de laboratorio	14,75	805	0,71	1	14,73	806
Equipos de telecomunicaciones (radios, equipos de monitoreo, equipo de cómputo, impresoras)	14,29	4738	7,83	4	14,28	4742
Equipos para la captación, aducción, tratamiento, conducción y distribución del agua	24,10	47 589	25,49	30	24,10	47 619
Equipos y herramientas de construcción	16,22	1576	-	-	16,22	1576
Maquinaria (de obra y de mantenimiento)	12,63	477	-	-	12,63	477

	Vida promedio (años)	# Activos	Vida promedio (años)	# Activos	Vida promedio (años)	# Activos
Muebles y enseres	16,37	6819	-	-	16,37	6819
Vehículos	13,07	528	0,62	1	13,04	529
Vehículos – equipo terrestre/ pesado	12,07	233	-	-	12,07	233
Promedio / Total	21,98	62765	22,15	36	21,98	62 801

Tabla 14. Vida útil media de los activos de la EAAB ESP, 2022

Grupo de activos	Activos en uso		Activos dados de baja		Total activos	
	Vida promedio (años)	# Activos	Vida promedio (años)	# Activos	Vida promedio (años)	# Activos
Equipo de laboratorio	11,11	903	-	-	11,11	903
Equipos de telecomunicaciones (radios, equipos de monitoreo, equipo de cómputo, impresoras)	13,02	4583	-	-	13,02	4583
Equipos para la captación, aducción, tratamiento, conducción y distribución del agua	22,59	50 118	11,73	31	22,58	50 149
Equipos y herramientas de construcción	14,19	1655	-	-	14,19	1655
Maquinaria (de obra y de mantenimiento)	9,48	612	-	-	9,48	612
Muebles y enseres	14,15	2870	-	-	14,15	2870
Vehículos	12,03	503	-	-	12,03	503
Vehículos – equipo terrestre/ pesado	11,52	240	-	-	11,52	240
Promedio/total	20,83	61 484	11,73	31	20,82	61 515

Tabla 15. Vida útil promedio de bienes en la literatura

Grupo de activos	Referencias vida útil (años)											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Equipo de laboratorio					7	10	8					8,33
Equipos de telecomunicaciones (radios, equipos de monitoreo, equipo de cómputo, impresoras)	4,00		10								9	7,67
Equipos para la captación, aducción, tratamiento, conducción y distribución del agua potable y residual								25				25,00
Equipos y herramientas de construcción	6,00											6,00
Maquinaria (de obra y de mantenimiento)				10							26	18,00
Muebles y enseres	10,00	10,8	20									13,60
Vehículos	10,00	7,5									6	7,83
Vehículos – equipo terrestre/pesado									14,1	15,84		14,97

- 1 European Union (2016) 2 Hübner *et al.* (2015) 3 EPA (2016) 4 Thompson CAT (2022) 5 Lab Manager (2023)
 6 The University of Chicago (NA) 7 University of Maryland (NA) 8 Statista (2020) 9 Statista - EU (2022)
 10 Statista - Japan (2022) 11 Erumban (2008) 12 Promedio

Materiales críticos e inventario del análisis de ciclo de vida

Los materiales críticos se identificaron y cuantificaron a partir de la información disponible en la base de datos Ecoinvent 3.9.1 desde una perspectiva *cradle-to-gate* o «de la cuna a la puerta». Es decir que se tomaron en cuenta los impactos, así como los materiales críticos, involucrados en el ciclo de vida de los productos (mate-

riales, agua y energía) utilizados por la empresa desde la extracción de las materias primas hasta la fabricación, el empaclado y la puesta del producto en el mercado. De esta manera se representaron el 99,99 % de los flujos de materiales consumidos por la empresa y el 100 % de los flujos de agua y energía. La tabla 16 presenta los flujos de entrada por tipo, los detalla cuando es por producto específico, y los relaciona con los procesos de Ecoinvent que se utilizaron para su modelación.

Tabla 16. Procesos de Ecoinvent utilizados en la modelación de impactos

Tipo de flujo	Flujo específico	Proceso de Ecoinvent	% Materiales críticos
Agua subterránea	Agua subterránea	<i>Water, groundwater consumption</i>	NA
Agua superficial	Agua superficial	<i>Water, unespecified natural origin, CO</i>	NA
Aceite vegetal	Aceite vegetal	<i>Soybean oil, refined [GLO] market for Cut-off, U</i>	13,26 %
Acero	Acero	<i>Steel, chromium steel 18/8 [RoW] steel production, electric, chromium steel 18/8 Cut-off, U</i>	54,47 %
Acetileno	Acetileno	<i>Acetylene [GLO] market for Cut-off, U</i>	1,77 %
AEE	Computador	<i>Computer, desktop, without screen [GLO] market for Cut-off, U</i>	102,62 %
	Monitor	<i>Display, liquid crystal, 17 inches [GLO] production Cut-off, U</i>	256,74 %
	Equipo acceso internet	<i>Internet access equipment [GLO] market for Cut-off, U</i>	4,22 %
	Impresora	<i>Printer, laser, colour [GLO] market for Cut-off, U</i>	61,31 %
	Tablet	<i>Consumer electronics, mobile device, tablet [GLO] market for consumer electronics, mobile device, tablet Cut-off, U</i>	427,43 %
Agregados pétreos	Grava	<i>Gravel, crushed [RoW] market for gravel, crushed Cut-off, U</i>	0,02 %
	Arena	<i>Sand [RoW] market for sand Cut-off, U</i>	0,01 %

Tipo de flujo	Flujo específico	Proceso de Ecoinvent	% Materiales críticos
Aluminio	Aluminio	Aluminium alloy, ALLi [GLO] market for Cut-off, U	804.73 %
Baterías de plomo ácido	Baterías de plomo ácido	Battery, lead acid, rechargeable, stationary [RoW] battery production, lead acid, rechargeable, stationary Cut-off, U	29.76 %
Bebidas	Bebidas	Tap water [CO] Market for tap water Cut-off, U	0.01 %
Cerámica	Cerámica	Ceramic tile [GLO] market for Cut-off, U	5.08 %
Cobre	Cobre	Copper, anode [GLO] market for copper, anode Cut-off, U	47.51 %
Concreto	Concreto	Concrete, 20 Mpa[CO] market concrete, 20 Mpa Cut-off, U	0.05 %
Equipos de laboratorio	Equipos de laboratorio	Glass tube, borosilicate [RoW] production Cut-off, U	25.08 %
Extintores	Solkaflam (Dichlorotrifluoroethane)	Dichloromethane [RoW] production Cut-off, U	0.01 %
	Acetato de potasio	Acetic acid, without water, in 98% solution state [GLO] market for Cut-off, U	1.20 %
	Bicarbonato sódico	Sodium bicarbonate [GLO] market for sodium bicarbonate Cut-off, U	2.79 %
	Dióxido de carbono	Carbon dioxide, in chemical industry [GLO] market for carbon dioxide, in chemical industry Cut-off, U	6.54 %
	Agua	Water, cooling, unspecified natural origin, CO	
Fertilizantes	Fertilizante nitrógeno	Inorganic nitrogen fertiliser, as N [CO] market for inorganic nitrogen fertiliser, as N Cut-off, U	45.06 %
	Fertilizante potasio	Inorganic potassium fertiliser, as K ₂ O [CN] market for inorganic potassium fertiliser, as K ₂ O Cut-off, U	13.14 %
	Fertilizante fósforo	Inorganic phosphorus fertiliser, as P ₂ O ₅ [CO] market for inorganic phosphorus fertiliser, as P ₂ O ₅ Cut-off, U	30.73 %
Ladrillos	Ladrillos	UClay brick [GLO] market for Cut-off, U	0.14 %
Llantas	Polibutadieno	Polybutadiene [GLO] market for Cut-off, U	0.01 %
	Estireno	Styrene-acrylonitrile copolymer [GLO] market for Cut-off, U	0.11 %

Tipo de flujo	Flujo específico	Proceso de Ecoinvent	% Materiales críticos
Lubricantes	Lubricantes	<i>Lubricating oil [RoW] market for lubricating oil Cut-off, U</i>	1,71 %
Madera	Madera	<i>Sawnwood, hardwood, raw [GLO] market for Cut-off, U</i>	0,13 %
Maquinaria y equipo (de obra y mantenimiento)	Maquinaria y equipo (de obra y mantenimiento)	<i>Agricultural machinery, unespecified [GLO] market for Cut-off, U</i>	6,61 %
Material vegetal	Césped	<i>Grass, organic [GLO] market for Cut-off, U</i>	0,06 %
	Árboles	<i>Planting tree [GLO] market for planting tree Cut-off, U</i>	8,11 %
Micromedidores	Micromedidores – acero	<i>Cast iron [GLO] market for Cut-off, U</i>	0,51 %
Muebles y enseres	Muebles y enseres	<i>Furniture, wooden [GLO] market for furniture, wooden Cut-off,S</i>	28,4 %
Origen animal	Leche	<i>Cow milk [GLO] market for Cut-off, U</i>	1,29 %
	Carne roja	<i>Red meat, live weight [GLO] market for Cut-off, U</i>	5,75 %
	Pollo	<i>Chicken for slaughtering, live weight [GLO] market for Cut-off, U</i>	2,02 %
	Trucha	<i>Trout [GLO] market for trout Cut-off, U</i>	1,59 %
	Pescado marino	<i>Marine fish [GLO] market for marine fish Cut-off, U</i>	0,49 %
	Cerdo	<i>Swine for slaughtering, live weight [GLO] market for Cut-off, U</i>	7,16 %

Tipo de flujo	Flujo específico	Proceso de Ecoinvent	% Materiales críticos
Origen vegetal	Azúcar	<i>Sugar, from sugarcane [GLO] market for Cut-off, U</i>	1,42 %
	Harina de trigo	<i>Wheat flour mix [GLO] market for wheat flour mix Cut-off, U</i>	1,85 %
	Arroz	<i>Rice, non-basmati [GLO] market for rice, non-basmati Cut-off, U</i>	0,61 %
	Lechuga	<i>Lettuce [GLO] market for Cut-off, U</i>	0,37 %
	Banana	<i>Banana [GLO] market for Cut-off, U</i>	0,29 %
	Lentejas	<i>Lentil [GLO] market for lentil Cut-off, U</i>	0,96 %
	Papa	<i>Potato, organic [GLO] market for Cut-off, U</i>	0,22 %
Otros plásticos	Otros plásticos	<i>Polyethylene pipe, DN 200, SDR 41 [GLO] market for polyethylene pipe, DN 200, SDR 41 Cut-off, U</i>	4,23 %
Papel de impresión	Papel de impresión	<i>Paper, newsprint [RoW] market for Cut-off, U</i>	1,00 %
PVC	PVC	<i>Polyvinylchloride, bulk polymerised [GLO] market for Cut-off, S</i>	2,30 %

Tipo de flujo	Flujo específico	Proceso de Ecoinvent	% Materiales críticos
Químicos potabilización	Sulfato de aluminio	<i>Aluminium sulfate, powder [GLO] market for Cut-off, U</i>	115,20 %
	Cloro	<i>Chlorine, liquid [GLO] market for Cut-off, U</i>	1,17 %
	Sal de mina	<i>Salt [GLO] market for salt Cut-off, U</i>	0,02 %
	Cal viva	<i>Lime, packed [GLO] market for Cut-off, U</i>	0,22 %
	Policloruro de aluminio (incluye polímeros, catiónico, líquido y sólido)	<i>Aluminium chloride [GLO] market for aluminium chloride Cut-off, U</i>	290,53 %
	Dióxido de cloro	<i>Chlorine dioxide [RoW] market for chlorine dioxide Cut-off, U</i>	6,54 %
	Hipoclorito de sodio	<i>Sodium hypochlorite, without water, in 15% solution state [RoW] market for sodium hypochlorite, without water, in 15% solution state Cut-off, U</i>	2,57 %
	Soda cáustica	<i>Sodium hydroxide, without water, in 50% solution state [GLO] market for Cut-off, U</i>	1,04 %
	Permanganato de potasio	<i>Potassium permanganate [GLO] market for Cut-off, U</i>	39,53 %

Tipo de flujo	Flujo específico	Proceso de Ecoinvent	% Materiales críticos
Químicos PTAR	Ácido acético	<i>Acetic acid, without water, in 98% solution state [GLO] market for Cut-off, U</i>	0,76 %
	Ácido clorhídrico	<i>Hydrochloric acid, without water, in 30% solution state [RoW] market for Cut-off, U</i>	1,26 %
	Ácido nítrico	<i>Nitric acid, without water, in 50% solution state [RoW] market for nitric acid, without water, in 50% solution state Cut-off, U</i>	0,92 %
	Ácido sulfúrico	<i>Sulfuric acid [RoW] market for sulfuric acid Cut-off, U</i>	1,12 %
	Amonio cloruro	<i>Ammonium chloride [GLO] market for Cut-off, U</i>	1,65 %
	Calcio carbonato	<i>Calcium carbonate, precipitated [RoW] market for calcium carbonate, precipitated Cut-off, U</i>	0,97 %
	Calcio cloruro anhidro	<i>Calcium chloride [RoW] market for calcium chloride Cut-off, U</i>	1,50 %
	Cloruro férrico	<i>Iron(II) chloride [GLO] market for Cut-off, U</i>	0,71 %
	Potasio cloruro	<i>Potassium chloride [RoW] market for potassium chloride Cut-off, U</i>	1,26 %
	Sal de mina	<i>Salt [GLO] market for salt Cut-off, U</i>	0,02 %
Policloruro de aluminio (incluye polímeros, catiónico, líquido y sólido)	<i>Aluminium chloride [GLO] market for aluminium chloride Cut-off, U</i>	290,53 %	
Refrigerantes	Refrigerantes	<i>Refrigerant R134a [GLO] market for Cut-off, U</i>	154,67 %

Tipo de flujo	Flujo específico	Proceso de Ecoinvent	% Materiales críticos
Sustrato	Sustrato	Soil	NA
Tapas de micromedidores y alcantarillado	Tapas de micromedidores y alcantarillado	Concrete, 20 Mpa[CO] market concrete, 20 Mpa Cut-off, U	0,05 %
Textiles	Textiles	Textile, woven cotton [GLO] market for Cut-off, U	8,16 %
Válvulas de regulación	Válvulas de regulación	Cast iron [GLO] market for Cut-off, U	0,51 %
Vehículos	Vehículos gasolina	Passenger car, petrol/natural gas [GLO] production Cut-off, U	67,96 %
	Vehículos diésel	Passenger car, diesel [GLO] production Cut-off, U	77,76 %
Vidrio	Vidrio	Flat glass, uncoated [RoW] market for flat glass, uncoated Cut-off, U	0,56 %
Biodiésel	Biodiésel	Ethanol, without water, in 95% solution state, from fermentation [CO] sugarcane processing, traditional annexed plant Cut-off, U	1,90 %
Biogás	Biogás	Biogas [RoW] market for biogas Cut-off, U	NA
Diésel/ACPM	Diésel/ACPM	Diesel [CO] market for diesel Cut-off, U	0,14 %
Electricidad	Electricidad	Electricity, low voltage [CO] market for electricity, low voltage Cut-off, U	NA
Energía fotovoltaica	Energía fotovoltaica	Electricity, low voltage [RoW] electricity production, photovoltaic, 570Wp open ground installation, multi-Si Cut-off, U	NA
Etanol	Etanol	Ethanol, without water, in 95% solution state, from fermentation [CO] sugarcane processing, traditional annexed plant Cut-off, U	1,90 %
Gas natural	Gas natural	Natural gas, low pressure [RoW] market for Cut-off, S	0,11 %
Gasolina	Gasolina	Petrol, unleaded [CO] market for petrol, unleaded Cut-off, U	0,21 %

Anexo 5. Minerales críticos en la Unión Europea y Estados Unidos

Mineral	USGS	Comisión Europea	Usos
Antimonio	X	X	Materiales piroretardantes. Aplicaciones de defensa. Baterías de plomo.
Aluminio	X		Utilizado en casi todos los sectores de la economía.
Arsénico	X		Semiconductores.
Barita	X	X	Aplicaciones médicas. Protección contra las radiaciones. Aplicaciones químicas. Producción de hidrocarburos.
Bauxita		X	Producción de aluminio.
Berilio	X	X	Equipos electrónicos y de comunicaciones. Componentes de automoción, industria aeroespacial y defensa.
Bismuto	X	X	Industria farmacéutica y de fabricación de concentrados para alimento animal. Aplicaciones médicas. Aleaciones con bajo punto de fusión. Investigación médica y atómica.
Borato		X	Vidrio de alto rendimiento. Abonos. Imanes permanentes.
Carbón de coque		X	Coque para acero. Fibras de carbono. Electrodos para baterías.
Caucho natural		X	Neumáticos. Componentes de caucho para maquinaria y artículos del hogar.
Cerio*	X	X	Convertidores catalíticos, cerámica, vidrio, metalurgia y compuestos de pulido.
Cesio	X		Investigación y desarrollo.
Circonio	X		Cerámica de alta temperatura y aleaciones resistentes de corrosión.
Cobalto	X	X	Baterías. Superaleaciones. Catalizadores. Imanes.
Cromo	X		Acero inoxidable y otras aleaciones.
Disproseo**	X	X	Imanes permanentes. Dispositivos de almacenamiento de datos y láseres.

Mineral	USGS	Comisión Europea	Usos
Erbio**	X	X	Fibra óptica, amplificadores ópticos. Láseres y colorantes de vidrio.
Escandio	X	X	Pilas de combustible de óxido sólido. Aleaciones ligeras.
Estaño	X		Recubrimientos protectores y aleaciones para acero.
Estroncio		X	Imanes cerámicos. Aleaciones de aluminio. Aplicaciones médicas. Artículos pirotécnicos.
Europio**	X	X	Fósforos y barras de control nuclear.
Fluorita	X	X	Fabricación de productos químicos de aluminio, cemento, acero, gasolina y flúor. Refrigeración y aire acondicionado.
Fosforita		X	Fertilizante mineral. Compuestos fosforados.
Fosforo		X	Aplicaciones químicas. Aplicaciones de defensa.
Gadolinio**	X	X	Imágenes médicas. Imanes permanentes. Fabricación de acero.
Galio	X	X	Semiconductores. Células fotovoltaicas. Circuitos integrados y dispositivos ópticos LED.
Germanio	X	X	Fibras ópticas y óptica infrarroja. Células solares para satélites. Catalizadores de polimerización.

Mineral	USGS	Comisión Europea	Usos
Grafito natural	X	X	Baterías. Materiales refractarios para fabricación de acero. Lubricantes.
Hafnio	X	X	Superalaciones. Barras de control nuclear. Cerámica refractaria.
Holmio**	X	X	Imanes permanentes. Barras de control nuclear y láseres.
Indio	X	X	Monitores de pantalla plana. Células fotovoltaicas y fotónicas. Soldaduras.
Iridio	X		Recubrimiento de ánodos para procesos electroquímicos y como catalizador químico.
Iterbio**	X	X	Catalizadores, escintilómetros, láseres y metalurgia.
Itrio	X		Cerámica. Catalizadores, láseres, metalurgia y fósforos.
Lantano*	X	X	Producción de catalizadores. Cerámica y vidrio. Compuestos de pulido, metalurgia y baterías.
Litio	X	X	Baterías. Vidrio y cerámica. Metalurgia del aluminio y el acero.
Lutecio**	X	X	Centelladores para imágenes médicas, electrónica y algunas terapias contra el cáncer.
Magnesio	X	X	Aleaciones ligeras para automoción, electrónica, envases o construcción. Agente desulfurizador en la fabricación de acero.
Manganeso	X		Fabricación de acero y baterías.

Mineral	USGS	Comisión Europea	Usos
Neodimio*	X	X	Imanes permanentes, catalizadores de caucho. Láseres médicos e industriales.
Niobio	X	X	Acero de alta resistencia y superaleaciones para el transporte y las infraestructuras. Aplicaciones de alta tecnología (condensadores, imanes, superconductores, etc.).
Níquel	X		Fabricación de acero inoxidable, superaleaciones y baterías recargables.
Paladio	X		Convertidores catalíticos y como agente catalizador.
Platino / Metales del grupo platino	X	X	Convertidores catalíticos (catalizadores químicos y para la automoción). Pilas de combustible. Aplicaciones electrónicas.
Praseodimio*	X	X	Imanes permanentes y baterías. Aleaciones aeroespaciales. Cerámica y colorantes.
Prometio		X	Televisores a color. Lámparas fluorescentes y cristales.
Rodio	X		Convertidores catalíticos y catalizadores. Componentes electrónicos.
Rubidio	X		Investigación y desarrollo en electrónica.
Rutenio	X		Catalizadores. Contactos eléctricos y resistencias de chip en computadoras.
Samario*	X	X	Imanes permanentes. Absorbente en reactores nucleares. Tratamientos contra el cáncer.
Silicio metálico		X	Semiconductores. Energía fotovoltaica. Componentes electrónicos. Siliconas.

Mineral	USGS	Comisión Europea	Usos
Tantalio*	X	X	Condensadores para dispositivos electrónicos. Superaleaciones.
Telurio	X		Células solares y dispositivos termoeléctricos. Aditivo de aleación.
Terbio**	X	X	Imanes permanentes. Fibra óptica, láseres y dispositivos de estado sólido.
Titanio	X	X	Aleaciones ligeras de alta resistencia para aplicaciones aeronáuticas, espaciales y de defensa, entre otras. Aplicaciones médicas. Pigmento blanco.
Tulio**	X	X	Diversas aleaciones metálicas y en láseres.
Tungsteno	X	X	Fabricación de metales resistentes al desgaste. Aleaciones para aplicaciones aeronáuticas, espaciales, de defensa o de tecnología eléctrica, entre otras. Maquinaria, herramientas de corte y de minería.
Vanadio	X	X	Aleaciones bajas de alta resistencia para aplicaciones aeronáuticas, espaciales o para reactores nucleares, entre otras. Catalizadores químicos.
Zinc	X		Metalurgia para producir acero galvanizado.

* Tierras raras ligeras.

** Tierras raras pesadas.

Anexo 6. Matriz de priorización de subflujos

El resultado de la priorización de los subflujos se realizó en Excel y está disponible en este enlace: https://acueducto-my.sharepoint.com/:x:/r/personal/jcamachoo_acueducto_com_co/_layouts/15/Doc.aspx?source-doc=%7B7C5064F0-C376-427C-90CD-E2B4AFA589EA%7D&file=Anexo_1_Matriz_prioriz_subflujos.xlsx&action=default&mobileredirect=true

Anexo 7. Mapeo de actores por flujo de material

Subflujo	Actores	Actor/organización	Roles/interés en el uso del material	
AGUA RESIDUAL	INTERNOS	Dirección Saneamiento Ambiental, Gerencia Corporativa Ambiental		
		Dirección de Planeamiento	Consultas sobre si el marco normativo tarifario permite que la EAAB ESP realice inversiones en infraestructura para distribución de agua residual tratada.	
	EXTERNOS	CEMEX	Compra para proceso industrial de mezcla de concreto.	
		Monserate Pisos y Mármoles – Planta Calle 80	En proceso de definición.	
		Jardín Parque Cementerio Los Olivos – Calle 80	Compra para proceso industrial de enfriamiento de hornos.	
			La empresa puede estar interesada en usar agua residual tratada si el precio de venta es inferior al del agua potable. Consideran también la opción de recibirla mediante carrotanques, ya que así se abastecen de GLP.	
		Parque Cementerio El Paraiso	En proceso de definición.	
		Parque Industrial La Florida	En proceso de definición.	
		Patio Taller San Andrés – Emasivo (SITP)	En proceso de definición.	
		Planta Argos Calle 80	En proceso de definición.	
		Granulados Reciclados de Colombia – Greco	En proceso de definición.	
		Aeropuerto El Dorado	No reporta interés por contar con agua residual tratada de su PTAR.	
Parque Industrial Terrapuerto	En proceso de definición.			
PVC	INTERNOS	División de Planeación y Operaciones Red Troncal		
	EXTERNOS	PAVCO	Transformación de los residuos de PVC en nuevas tuberías.	
		Gerfor	Transformación de los residuos de PVC en nuevas tuberías.	
		Celta	En proceso de definición.	
		Protucol PVC SAS	En proceso de definición.	
		Indexcol DW	En proceso de definición.	

Interés				Influencia o poder			Prioridad
1	2	3	4	5	6	7	
X				X			MEDIA
X				X			MEDIA
X				X			MEDIA
	X			X			MEDIA
X			X				MEDIA
X			X				MEDIA
	X			X			MEDIA
	X			X			MEDIA
	X			X			MEDIA
	X			X			MEDIA
		X				X	ALTA
	X			X			MEDIA
X				X			MEDIA
X			X				MEDIA
X				X			MEDIA
	X			X			MEDIA
	X			X			MEDIA
	X			X			MEDIA

- 1 A favor
- 2 Indeciso/ indiferente
- 3 En contra
- 4 Alto
- 5 Medio
- 6 Bajo
- 7 Ninguno

Subflujo	Actores	Actor/organización	Roles/interés en el uso del material
AGREGADOS PÉTREOS	INTERNOS	Gerencia Corporativa Ambiental	
	EXTERNOS	MAAT Soluciones Ambientales	Interés por gestionar de manera integral todos los RCD generados por las obras internas del acueducto.
		CEMEX	Interés en la transformación de los RCD pétreos para convertirlos en nuevos materiales de construcción y realizar la venta de dichos materiales a la EAAB ESP.
		Reciclados Industriales de Colombia	En proceso de definición.
		Granulados Reciclados de Colombia – Greco	En proceso de definición.
		San José Green Group S. A. S.	En proceso de definición.
MATERIAL VEGETAL – PODA	INTERNOS	Gerencia Corporativa Ambiental	
	EXTERNOS	BioD	La empresa se encuentra en el desarrollo de un proyecto de generación de biocombustible a partir de biomasa. Para esto requieren 300 000 t/año en base húmeda o 130 000 t/año en base seca. La planta se ubicará en Facatativá, lo que implicaría transporte del material a la planta y en pretratamiento.
		Mesa Técnica de Biomasa	Red de generadores de residuos de biomasa que busca opciones de manejo integral de residuos de poda y retamo espinoso.
		CAEM	Proyecto de sustitución de combustibles con el uso de briquetas fabricadas con biomasa.
		CEMEX	Proceso de coprocesamiento de residuos de poda en hornos de fabricación de clínker.
TEXTILES	INTERNOS	Gerencia Corporativa Ambiental	
	EXTERNOS	Croydon	Reciclaje de las botas de caucho de la dotación posconsumo.
		Taller del Reúso	<i>Upcycling</i> de textiles con conceptos de ecodiseño.
		Mónica Fonnegra	Uso de residuos textiles para otras prendas y procesos.
		R3co Moda Sostenible	Rehabilitación de dotación textil para la empresa.
		Ele de Colombia	Reciclaje de los textiles.
		Red de Moda Circular – SDA	Conexión con actores y empresas del ecosistema de la recuperación y <i>upcycling</i> de textiles.
		CEMEX	Coprocesamiento. Se descarta por no representar una opción de circularidad.

Interés		Influencia o poder					Prioridad
1	2	3	4	5	6	7	
X				X			MEDIA
X				X			MEDIA
X			X				MEDIA
	X			X			MEDIA
	X			X			MEDIA
	X			X			MEDIA
X				X			MEDIA
	X			X			MEDIA
X			X				ALTO
X			X				ALTO
		X	X				ALTO
X				X			MEDIA
X				X			MEDIA
X				X			MEDIA
X				X			MEDIA
X				X			MEDIA
X			X				MEDIA
		X				X	ALTA

- 1 A favor
- 2 Indeciso/ indiferente
- 3 En contra
- 4 Alto
- 5 Medio
- 6 Bajo
- 7 Ninguno

Anexo 8. Árboles de problemas para los diferentes subflujos de materiales priorizados

Figura 27. Árbol de problemas del subflujo de material textil

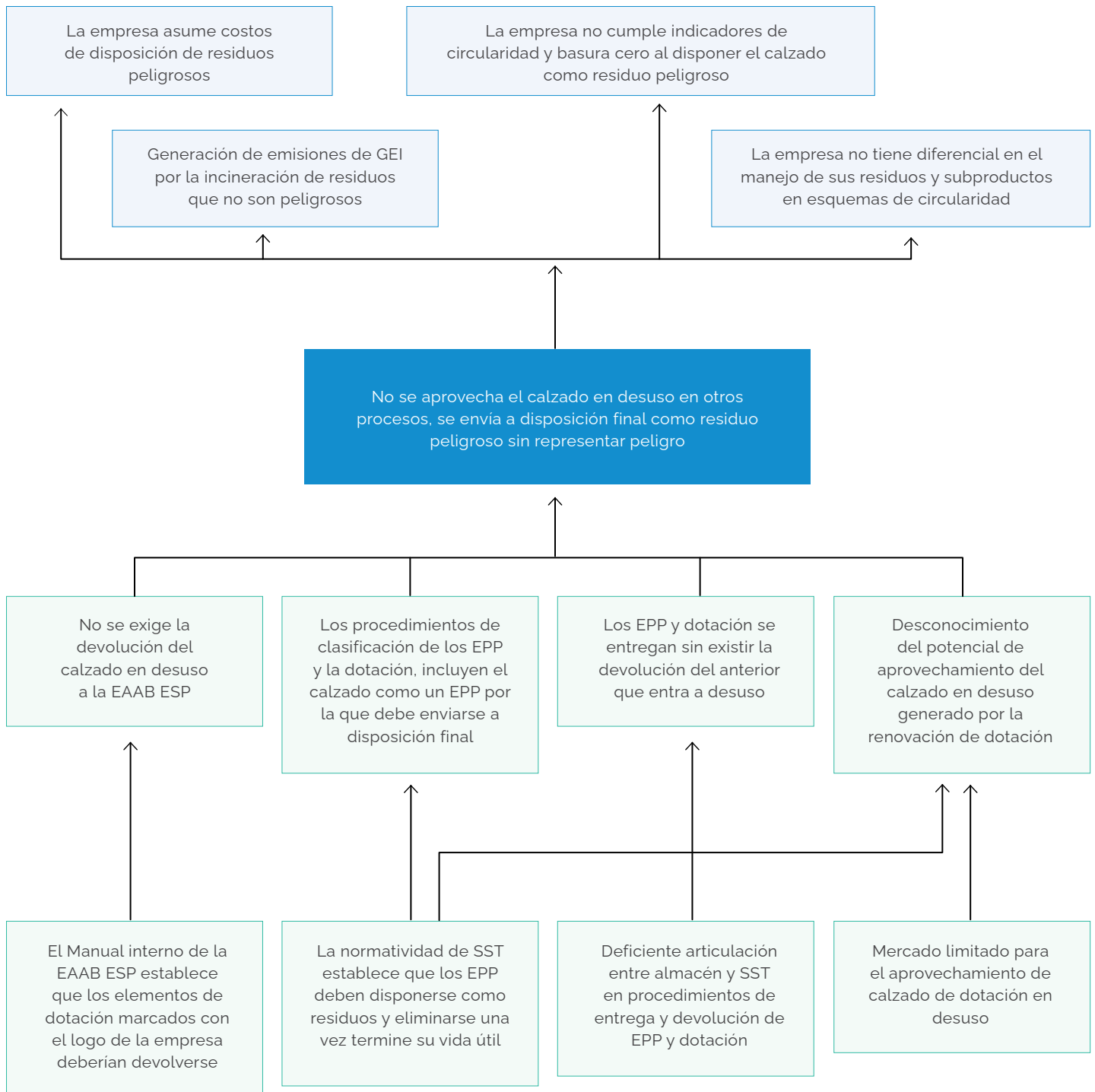


Figura 28. Árbol de problemas del subflujo de PVC

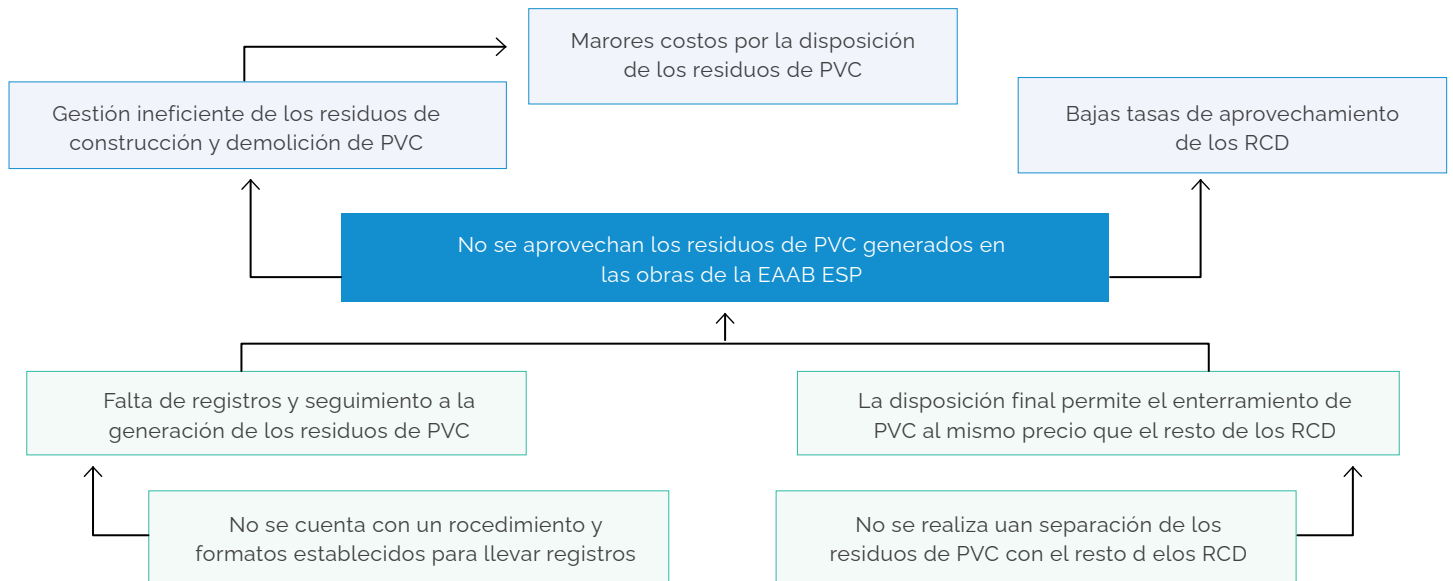


Figura 29. Árbol de problemas del subflujo de material vegetal de poda

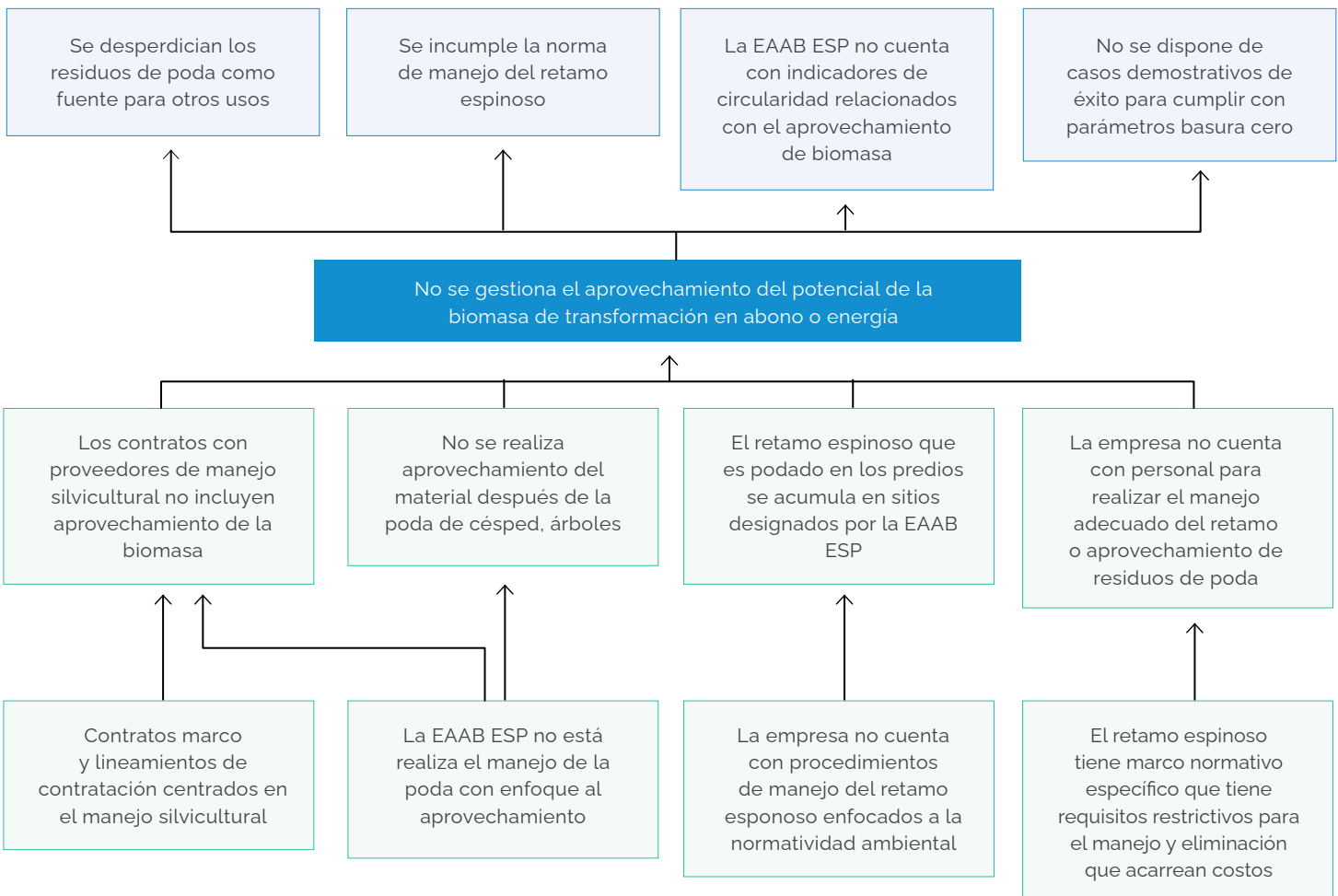
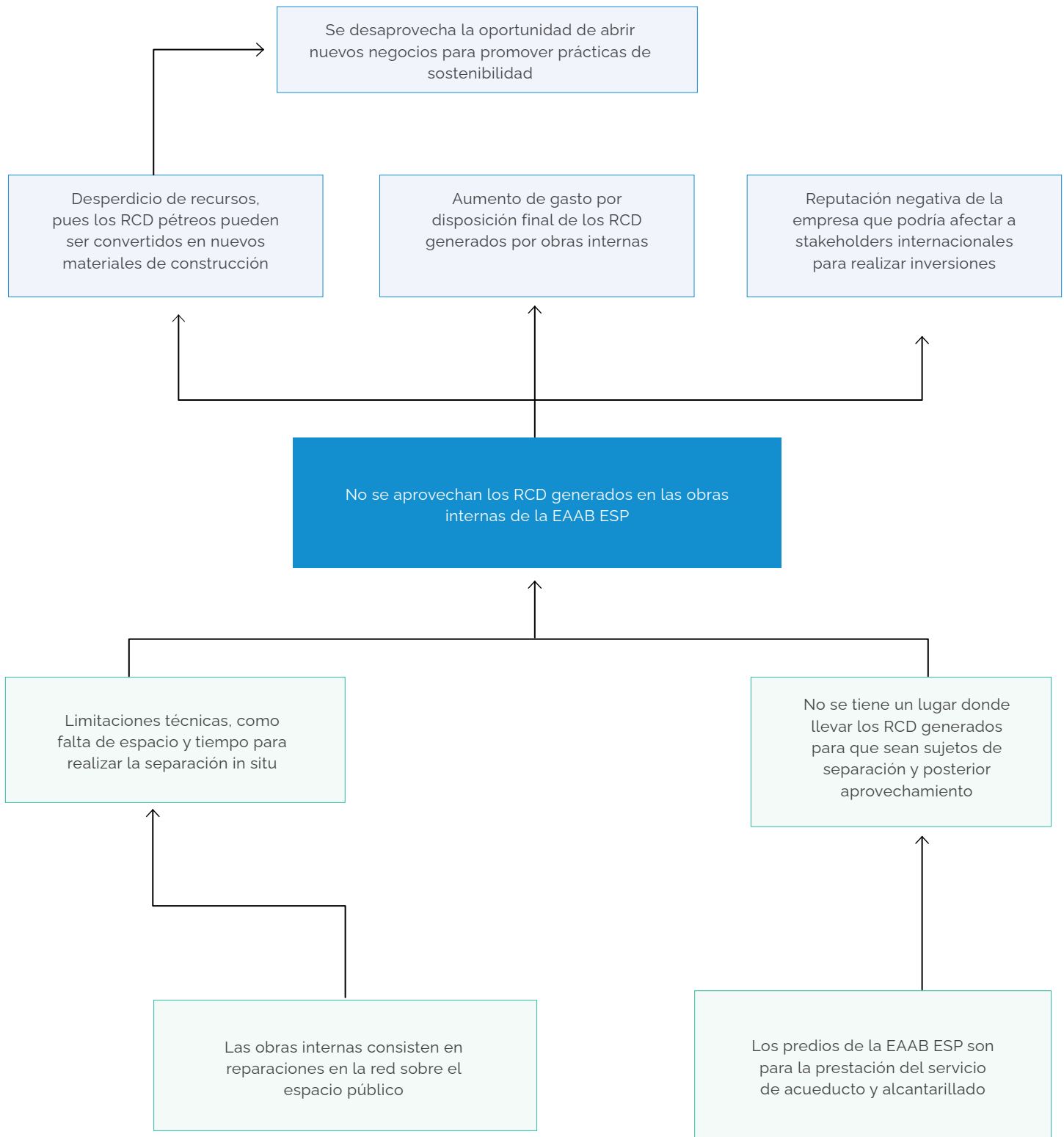


Figura 30. Árbol de problemas del subflujo de agregados pétreos



Anexo 9. Modelos de negocio para los diferentes subproyectos

Figura 31. Modelo de negocio – Canvas B – Subflujo de material textil

Cadena de valor <ul style="list-style-type: none"> • GESCOL • LAB creación tapas u otro operador • Alcaldía de Bogotá • Programa de innovación soluciones circulares • BID • Autoridades ambientales • Minambiente – Programa de circularidad 	Actividades claves <ul style="list-style-type: none"> • Modelo de contratación con EAAB ESP • Proveedor-cocreador tapas • Desarrollo de subproducto(s) (tapas de alcantarillas y/u otros) 	Problema identificado <p>Dar un adecuado manejo a la dotación en desuso; particularmente, calzado de seguridad</p>		Segmentos <ul style="list-style-type: none"> • Gerencia Corporativa de Servicio al Cliente • Gerencia Corporativa Ambiental • Bogotá-región • Basura cero 	
	Recursos claves <ul style="list-style-type: none"> • Logística de acopio (operación e infraestructura) • Capacitación de personal • Sistema de socialización continua 	Propósito <ul style="list-style-type: none"> • Incluir en un modelo de circularidad para la gestión de dotación de seguridad (calzado) en desuso de la EAAB ESP • Diseño de tapas para alcantarillas y/u otros subproductos para la EAAB ESP 			
Estructura de costos <ul style="list-style-type: none"> • Personal • transporte 	Métricas de impacto <ul style="list-style-type: none"> • Toneladas de botas recuperadas • Número de tapas producidas (u otros) • Número de entidades adicionadas al programa (por año) 		Propuesta de valor <p>Aprovechamiento de la dotación en desuso bajo cumplimiento de la normativa ambiental y de salud ocupacional</p>	Relaciones <ul style="list-style-type: none"> • Programa Red Moda Circular • Cliente interno 	Canales <ul style="list-style-type: none"> • Logística de acopio y entrega de calzado a GESCOL • Logística de entrega GESCOL-EAAB ESP de tapas para alcantarillas y/u otros subproductos
			Fuentes de ingreso <ul style="list-style-type: none"> • Ahorro menor costo en disposición final de elementos de seguridad 		

Figura 32. Modelo de negocio – Canvas B – Subflujo de PVC

Cadena de valor <ul style="list-style-type: none"> • Aliado-solucionador • BID • Autoridades ambientales • Minambiente – Programa de circularidad 	Actividades claves <ul style="list-style-type: none"> • Modelo de contratación con EAAB ESP y el aliado • Recursos clave • Aliado-solucionador con maquinaria, equipos de recolección, transporte y separación de los PVC • Tecnología y software para la gestión y seguimiento 	Problema identificado <p>Dar un adecuado manejo a los residuos de PVC de las obras de la EAAB ESP</p>		Segmentos <ul style="list-style-type: none"> • Aliado-solucionador que realice la recolección, el transporte, el acopio y el aprovechamiento de PVC • Gerencia Corporativa Ambiental • Bogotá-región • Basura cero • Sector de la construcción
	Recursos claves <ul style="list-style-type: none"> • Logística de acopio (operación e infraestructura) • Capacitación de personal • Sistema de socialización continua 	Propósito <ul style="list-style-type: none"> • Incluir en un modelo de circularidad el PVC generado por las obras internas de la EAAB ESP 		
			Propuesta de valor <ul style="list-style-type: none"> • Reducción de costos y recursos internos requeridos para el manejo de los PVC • Modelo de aprovechamiento adecuado de los materiales de PVC bajo cumplimiento de la normativa ambiental 	Relaciones <ul style="list-style-type: none"> • Contratistas de la EAAB ESP
Estructura de costos <ul style="list-style-type: none"> • Personal • Operación • transporte 	Métricas de impacto <ul style="list-style-type: none"> • Número de toneladas transformadas • Reducción de costo de manejo • Certificado de manejo de residuos 		Fuentes de ingreso <ul style="list-style-type: none"> • Ahorro menor costo en transporte y disposición final de PVC 	

Figura 33. Modelo de negocio – Canvas B – Subflujo de material vegetal

Cadena de valor <ul style="list-style-type: none"> • Alianza CAEM • Mesa distrital de retorno • BID • Minambiente – Programa de circularidad • Banca comercial • Banca de desarrollo 	Actividades claves <ul style="list-style-type: none"> • Modelo de alianza con EAAB ESP-CAEM • Modelo de contratación operador de compostaje 	Problema identificado <p>Dar un adecuado manejo a los residuos de poda bajo la normatividad ambiental vigente (disminuir el riesgo que representa el retamo espinoso para la ciudad)</p>		Segmentos <ul style="list-style-type: none"> • Alianza CAEM • Operador del compostaje • Dirección de Saneamiento Ambiental (EAAB ESP) • Botoá-región • Autoridad ambiental • Programa Páramos • Área de manejo silvicultural
	Recursos claves <ul style="list-style-type: none"> • Adquisición de maquinaria • Contratación y/o capacitación de personal 	Propósito <ul style="list-style-type: none"> • Incluir en un modelo de circularidad el PVC generado por las obras internas de la EAAB ESP 	Propuesta de valor <ul style="list-style-type: none"> • Insumo energético con altas propiedades (reducción de GEI) • Abono de alta calidad para la restauración y protección de áreas de EAAB ESP y el proyecto Páramos 	Relaciones <ul style="list-style-type: none"> • Mesa distrital de retamo • Jardín Botánico de Bogotá • Consejo – Programa Páramos
Estructura de costos <ul style="list-style-type: none"> • Personal • Mantenimiento • transporte 	Métricas de impacto <ul style="list-style-type: none"> • Número de hectáreas de disminución de retamo • Número de hectáreas restauradas o potenciadas • Certificado de manejo de poda • Modelo sostenible y replicable 		Fuentes de ingreso <ul style="list-style-type: none"> • Disminución del riesgo de pago de multa por mal manejo de retamo • Ahorro en gastos asociados a restauración en predios de la EAAB ESP 	

Figura 34. Modelo de negocio – Canvas B – Subflujo de agregados pétreos

Cadena de valor <ul style="list-style-type: none"> • Aliado-solucionador • BID • Autoridades ambientales • Minambiente – Programa de circularidad 	Actividades claves <ul style="list-style-type: none"> • Modelo de contratación entre EAAB ESP y el aliado-solucionador 	Problema identificado <p>Dar un adecuado manejo a los RCD de las obras de la EAAB ESP</p>		Segmentos <ul style="list-style-type: none"> • Aliados-solucionadores integrales que realicen la recolección, el transporte, el acopio y el aprovechamiento de RCD • Gerencia Corporativa Ambiental • Bogotá-región • Basura cero • Sector de la construcción
	Recursos claves <ul style="list-style-type: none"> • Adquisición de maquinaria • Aliado-solucionador con instalaciones, maquinaria, equipo y transporte adecuados • Tecnología y software para la gestión y el seguimiento 	Propósito <ul style="list-style-type: none"> • Incluir en un modelo de circularidad los RCD generados por las obras internas de la EAAB ESP 		
		Propuesta de valor <ul style="list-style-type: none"> • Reducción de costos y recursos internos requeridos para el manejo de los RCD • Modelo de aprovechamiento adecuado de los materiales contenidos en los RCD bajo cumplimiento de la normativa ambiental 	Relaciones <ul style="list-style-type: none"> • Contratistas de la EAAB ESP • Aliado-solucionador Punto Limpio 	Canales <ul style="list-style-type: none"> • Logística de entrega de RCD obra a Punto Limpio y de Punto Limpio a obra • Plataforma online para la gestión y seguimiento de las actividades de manejo de RCD • Comunicación directa con la EAAB ESP y las obras internas
Estructura de costos <ul style="list-style-type: none"> • Personal • Operación • transporte 	Métricas de impacto <ul style="list-style-type: none"> • Número de toneladas recuperadas • Reducción de costo de manejo de RCD • Certificado de manejo de residuos 		Fuentes de ingreso <ul style="list-style-type: none"> • Ahorro menor costo en transporte y disposición final de los RCD 	



