

**Análisis de ciclo de vida aplicado a la construcción e implementación de un sistema de potabilización de agua individual en comunidades rurales**

Hugo Alfonso Diaz Theran

Trabajo de grado presentado como requisito para obtener el título de Magíster en  
Ingeniería Civil

Asesoras

PhD. Gloria Isabel Carvajal Peláez

PhD. Margarita María Hincapié Pérez



Universidad de Medellín

Facultad de Ingenierías

Maestría en Ingeniería Civil

2023

## Tabla de contenido

<b>1</b>	<b>Introducción .....</b>	<b>12</b>
	<b>1.1 Descripción del problema.....</b>	<b>15</b>
	<b>1.2 Justificación.....</b>	<b>20</b>
<b>2</b>	<b>Objetivos .....</b>	<b>21</b>
<b>3</b>	<b>Marco Teórico y Estado del Arte .....</b>	<b>22</b>
	<b>3.1 Análisis de Ciclo de Vida (ACV).....</b>	<b>22</b>
	<b>3.2 Comunidades Rurales.....</b>	<b>26</b>
	<b>3.3 Agua potable.....</b>	<b>29</b>
	3.3.1 Sistemas de Tratamiento de Agua Potable.....	31
	3.3.2 Análisis de Ciclo de Vida en Sistemas de Tratamiento de Agua Potable.	33
	<b>3.4 Costos .....</b>	<b>36</b>
	3.4.1 Análisis de Costos del Ciclo de Vida (ACCV).....	36
	3.4.2 Costeo Basado en Actividades (CBA).....	37
	3.4.3 Análisis de Precios Unitarios (APU) .....	40
<b>4</b>	<b>Metodología .....</b>	<b>41</b>
	<b>4.1 Análisis de Inventario a través de la Metodología de ACV .....</b>	<b>42</b>
	<b>4.2 Determinación de Impactos Ambientales .....</b>	<b>44</b>
	<b>4.3 Estimación del Costo del Ciclo de Vida de la Construcción e Implementación del Sistema Individual de Tratamiento de Agua Potable en Comunidades Rurales.</b>	<b>46</b>
<b>5</b>	<b>Generalidades.....</b>	<b>46</b>
	<b>5.1 Zonas de Estudio.....</b>	<b>47</b>
	<b>5.2 Sistema de Tratamiento de Agua Potable (Mark) .....</b>	<b>49</b>

<b>6</b>	<b>Resultados y Análisis .....</b>	<b>51</b>
<b>6.1</b>	<b>Análisis de Ciclo de Vida del Sistema de Potabilización Mark en Comunidades Rurales.....</b>	<b>52</b>
6.1.1	Definición de Objetivos y Alcance .....	52
6.1.2	Análisis de Inventario .....	58
6.1.3	Evaluación de Impactos Ambientales.....	64
<b>7</b>	<b>Evaluación Económica del Sistema de Potabilización Mark .....</b>	<b>79</b>
<b>7.1</b>	<b>Metodología .....</b>	<b>79</b>
7.1.1	Losa de Soporte.....	80
7.1.2	Compra, Transporte y Ensamblaje de los Sistemas Individuales de Tratamiento de Agua Potable.....	84
<b>8</b>	<b>Análisis de Resultados Económicos.....</b>	<b>92</b>
<b>9</b>	<b>Conclusiones .....</b>	<b>95</b>
<b>10</b>	<b>Referencias.....</b>	<b>98</b>

## Lista de Figuras

<b>Figura 1</b> <i>Número de Municipios (Zona Urbana) por Niveles De Riesgo de la Calidad del Agua, Vigencias 2019 a 2021</i> .....	16
<b>Figura 2</b> <i>Número de Municipios (Zona Rural) por Niveles De Riesgo de la Calidad del Agua, Vigencias 2019 a 2021</i> .....	17
<b>Figura 3</b> <i>Mapa Social, Población 2019 Antioquia</i> .....	18
<b>Figura 4</b> <i>Fases del ACV</i> .....	24
<b>Figura 5</b> <i>Alcance de un ACV</i> .....	25
<b>Figura 6</b> <i>Porcentaje de Población Urbano/Rural con IRCA sin Riesgo, 2017</i> .....	29
<b>Figura 7.</b> <i>Proceso de Potabilización del Agua</i> .....	31
<b>Figura 8</b> <i>Proceso Básico de la Metodología ABC</i> .....	40
<b>Figura 9</b> <i>Ubicación de la Vereda Curití Liborina en el Mapa de Antioquia y Distribución de los Sistemas de Potabilización Mark en la Vereda Representados con una Chincheta Amarilla</i> .....	48
<b>Figura 10</b> <i>Ubicación de Vereda El Carmelo El Peñol en el Mapa de Antioquia y Distribución de los Sistemas de Potabilización Mark III en la Vereda Representados con un Punto Verde</i> ...	49
<b>Figura 11</b> <i>Sistema de Potabilización Mark</i> .....	51
<b>Figura 12</b> <i>Diagrama de Flujo del Ciclo de Vida de la Producción de Agua Potable a Través del Sistema de Potabilización Mark (Sistema de estudio)</i> .....	56
<b>Figura 13</b> <i>Proceso de Ensamblaje del Sistema de Potabilización Mark en la Zona Rural</i> .....	57
<b>Figura 14</b> <i>Gráfico de Barras de Impactos Ambientales en Porcentajes en Curití</i> .....	67
<b>Figura 15</b> <i>Gráfico de red del ACV del STAP de Curití para la Categoría de Agotamiento del Agua</i> .....	68
<b>Figura 16</b> <i>Gráfica de Sectores de la Categoría de Cambio Climático en Curití</i> .....	69

<b>Figura 17</b> <i>Gráfico de red del ACV del STAP de Curití para la Categoría de Cambio Climático</i> .....	70
<b>Figura 18</b> <i>Gráfica de Sectores de la Categoría de Cambio Climático en Curití.....</i>	71
<b>Figura 19</b> <i>Gráfico de red del ACV del STAP de Curití para la Categoría de Agotamiento de los Fósiles.....</i>	72
<b>Figura 20</b> <i>Gráfica de Sectores de la Categoría de Agotamiento de los Fósiles en Curití.....</i>	73
<b>Figura 21</b> <i>Gráfico de red del ACV del STAP de Curití para la Categoría de Agotamiento de los Fósiles .....</i>	74
<b>Figura 22</b> <i>Gráfica de Sectores de la Categoría de Agotamiento de los Fósiles en Curití.....</i>	75
<b>Figura 23</b> <i>Gráfico Barras de Impactos Ambientales en Porcentajes El Carmelo.....</i>	76
<b>Figura 24</b> <i>Gráfica de Barras de Impactos Ambientales en Porcentajes de la Comparación entre Curití y El Carmelo.....</i>	78
<b>Figura 25</b> <i>Detalle de Acero de refuerzo, Formaleta y Concreto de Losa de soporte .....</i>	81
<b>Figura 26</b> <i>Análisis de Precio Auxiliar Para la Fabricación de 1 m3 de Concreto de 21 Mpa ..</i>	83
<b>Figura 27</b> <i>Análisis de Precio Unitario Para la elaboración de 1 m2 de Losa de Soporte en Concreto de 21 Mpa.....</i>	84

### Lista de Tablas

<b>Tabla 1</b> <i>Peso y Distancia Recorrida para Transportar los Componentes del Sistema de Potabilización a la Zona Rural</i> .....	59
<b>Tabla 2</b> <i>Consumo de Agua Natural del Sistema para Producir 1 m<sup>3</sup> de Agua Potable</i> .....	60
<b>Tabla 3</b> <i>Consumo de Energía de los Equipos que Conforman el Sistema de Tratamiento de Agua Potable</i> .....	61
<b>Tabla 4</b> <i>Matriz de Generación Eléctrica Colombiana</i> .....	62
<b>Tabla 5</b> <i>Peso y Distancia Recorrida para Transportar los Residuos de Cartucho PP al Relleno Sanitario Correspondiente</i> .....	64
<b>Tabla 6</b> <i>Matriz de Impactos Ambientales Para Cada Una de las Etapas Analizadas en Curití</i> .	66
<b>Tabla 7</b> <i>Matriz de Impactos Ambientales en Porcentaje para cada una de las Etapas Analizadas en Curití</i> .....	66
<b>Tabla 8</b> <i>Matriz de Impactos Ambientales para cada una de las Etapas Analizadas en El Carmelo</i> .....	75
<b>Tabla 9</b> <i>Matriz de Impactos Ambientales en Porcentaje para cada una de las Etapas Analizadas El Carmelo</i> .....	76
<b>Tabla 10</b> <i>Matriz de Impactos Ambientales de la Comparación entre Curití y El Carmelo</i> .....	77
<b>Tabla 11</b> <i>Matriz de Impactos Ambientales en Porcentaje de la Comparación entre Curití y El Carmelo</i> .....	78
<b>Tabla 12</b> <i>Insumos para 1 m<sup>3</sup> de Concreto de resistencia de 21 Mpa</i> .....	82
<b>Tabla 13</b> <i>Costos del Ensamblaje del Sistema de Potabilización Mark</i> .....	86
<b>Tabla 14</b> <i>Costos Totales del Sistema de Potabilización Mark</i> .....	92

## Resumen

El derecho a agua apta para consumo humano trasciende como una necesidad básica e indispensable para poder garantizar el desarrollo de cualquier comunidad, los gobiernos con sus dependencias y las Organizaciones No Gubernamentales (ONG) entienden que apostar a cambiar esta problemática en algunas zonas críticas del país es primordial, en un estado de derecho e igualdad social que busca garantizar calidad de vida a todos sus habitantes.

La producción de agua potable requiere de procesos que pueden generar impactos ambientales significativos debido, por ejemplo, al transporte de algunos insumos, el agotamiento de los recursos abióticos y los altos consumos de energía a la hora de purificar el agua. Si bien es importante priorizar la solución de problemas de acceso a agua segura en comunidades vulnerables, es necesario garantizar que la implementación de estas soluciones no cause un alto deterioro ambiental. De lo contrario, se podrían incumplir parámetros de sostenibilidad que pudiesen impedir la ecoeficiencia de la solución. Por lo tanto, es de vital importancia encontrar un equilibrio entre la satisfacción de las necesidades de la población y la protección del medio ambiente, para asegurar un futuro sostenible y justo para todos.

El objeto de estudio presentado en esta investigación es evaluar la sostenibilidad ambiental y estimar el valor económico de un sistema de tratamiento agua potable individual para comunidades rurales, mediante el enfoque de análisis de ciclo de vida (ACV) siguiendo los lineamientos estipulados por las normas ISO 14040 (principios y marco de referencia) (ISO, 2006a), e ISO 14044 (requisitos y directrices) (ISO, 2006b), abarcando solo las etapas de ensamblaje y uso.

El sistema de estudio se encuentra ubicado en la vereda Curití en el municipio de Liborina y en la vereda el Carmelo en el municipio El Peñol. Se utilizó el software SimaPro con

el método de evaluación de impacto ReCiPe de punto medio. La unidad funcional se definió como 1 m<sup>3</sup> de agua potable producida ya que, podría servir como referencia comparativa para otros estudios similares.

Los resultados encontrados mostraron que los impactos ambientales más significativos se encuentran en la etapa de transporte debido a la quema de combustibles fósiles que genera la emisión de gases de efecto invernadero (GEI), a la hora de mover a la zona rural los componentes del sistema para ser ensamblados, posteriormente se tiene el impacto generado por la etapa de uso, conformada por el consumo de energía de los equipos que componen el sistema de tratamiento, en el caso de la bomba de succión se presenta el mayor consumo por ende, tiene el mayor impacto, seguido de la lampara UV encargada de la desinfección del agua y el agotamiento del recurso hídrico debido a la extracción del agua natural para su posterior tratamiento, por último, se tienen impactos por la utilización y disposición final de los residuos de filtros cartucho de polipropileno termofusionado, en donde la mayor afectación ambiental se da por el uso de este tipo de material de filtro.

En cuanto al componente económico se encontraron los costos del sistema de tratamiento individual de agua potable tanto para un sistema como para la totalidad de estos en cada vereda, esto sin tener en cuenta los costos de mantenimiento ya que, este análisis no hace parte del alcance del estudio.

**Palabras clave:** Agua potable; Comunidades rurales; Sistemas de tratamiento de agua potable; Análisis de ciclo de vida; Análisis de precios unitarios; Sostenibilidad.

### **Abstract**

The right to have potable water for human consumption transcends as a basic and essential need to guarantee the development of any community. Governments, their agencies and Non-Governmental Organizations (NGOs) understand that betting on changing this problem in some critical areas of the country is essential, in a state of law and social equality that seeks to guarantee quality of life for all its inhabitants.

The production of potable water requires processes that can generate significant environmental impacts due, for example, to the transportation of some supplies, the shortage of abiotic resources and high energy consumption while purifying water. It is important to prioritize the solution to the problems of access to safe water in vulnerable communities, it is necessary to guarantee that the implementation of these solutions does not cause high environmental deterioration. Otherwise, sustainability parameters could be breached that could impede the eco-efficiency of the solution. Therefore, it is of vital importance to find a balance between satisfying the needs of the population and protecting the environment, in order to ensure a sustainable and fair future for all.

The object of the study presented in this research is to evaluate the environmental sustainability and estimate the economic value of an individual potable water treatment system for rural communities, using the life cycle analysis (LCA) approach following the guidelines stipulated by ISO 14040 (principles and framework) (ISO, 2006a) and ISO 14044 (requirements and guidelines) (ISO, 2006b), covering only the assembly and use stages.

The study system is located in the Curití trail in the municipality of Liborina and in the El Carmelo trail in the municipality of El Peñol. The SimaPro software was used with the ReCiPe

midpoint impact assessment method. The functional unit was defined as 1 m<sup>3</sup> of potable water produced since it could serve as a comparative reference for other similar studies.

The results found showed that the most significant environmental impacts are found in the transportation stage due to the burning of fossil fuels that generates the emission of greenhouse gases (GHG) when moving the system components to the rural area to be assembled, followed by the impact generated by the use stage, made up of the energy consumption of the equipment that make up the treatment system, In the case of the suction pump, it has the highest consumption and therefore has the greatest impact, followed by the UV lamp responsible for water disinfection and the depletion of water resources due to the extraction of natural water for subsequent treatment, and finally, there are impacts from the use and final disposal of waste thermofused polypropylene cartridge filters, where the greatest environmental impact is caused by the use of this type of filter material.

Regarding the economic component, the costs of the individual potable water treatment system were found, both for one system and for the totality of these in each village, without taking into account the maintenance costs, since this analysis is not part of the scope of the study.

**Key words:** Potable water; Rural communities; Potable water treatment systems; Life cycle analysis; Unit price analysis; Sustainability.

### **Agradecimientos**

En primera instancia agradezco a Dios por escucharme y acompañarme en cada momento de angustia y así brindarme la fuerza necesaria para seguir.

Agradecer infinitamente a mi familia por apoyarme en cada decisión que tome, por confiar y creer en mí, cuando incluso yo no lo hacía, ya que, fue importante sentir su mensaje de aliento que sin duda alguna me impulsaba a no defraudarlos.

Especialmente dar las gracias a la profesora Gloria Isabel Carvajal Peláez por confiar en mí y darme la oportunidad de hacer felices a mis seres queridos y poder cumplir un anhelado sueño más. También quiero agradecer a la profesora Alejandra Balaguera Quintero y Margarita María Hincapié Pérez por brindarme un espacio de su tiempo para explicarme muchas veces conceptos importantes en el desarrollo de esta investigación y a todo el equipo Safewater que en su momento también me brindaron algo de su tiempo para resolver dudas.

A todos, Muchas Gracias...

## 1 Introducción

Colombia se destaca como una potencia mundial en términos de recursos hídricos, debido a su ubicación geográfica, su topografía diversa y una amplia variedad de climas, sumado a esto su ubicación estratégica al estar bordeada por dos océanos el pacífico y el atlántico (MAVDT, 2010). Por lo cual, Colombia se encuentra entre los países con mayor oferta hídrica en el planeta, los datos de escorrentía indican que el país cuenta con una disponibilidad de 1963 km<sup>3</sup> de agua al año, lo cual se traduce en un rendimiento aproximado de 56.2 litros por segundo por kilómetro cuadrado (l/s/km<sup>2</sup>). Estos valores superan el rendimiento promedio mundial de 10 l/s/km<sup>2</sup> y latinoamericano de 21 l/s/km<sup>2</sup> (IDEAM, 2022).

El agua es un pilar fundamental para la supervivencia de los seres vivos que habitan el planeta, siendo su calidad de vital importancia, como es el caso del agua que se considera inocua para su consumo (agua potable), razón por la cual puede ser consumida por las personas en toda su vida sin problema alguno (Organización Mundial de la Salud, 2018). Ya que, de acuerdo con Morató et al., (2006), esta cumple con normativas que garantizan una serie de propiedades físicas, químicas, microbiológicas entre otras, que permiten su consumo de forma segura en seres humanos.

Es importante resaltar que, según el informe de Progresos en materia de agua potable, saneamiento e higiene en los hogares, todavía hay demasiadas familias o personas que no tienen acceso a servicios de agua tratada gestionada de una forma adecuada y cumpliendo altos estándares de calidad, sobre todo en las zonas rurales (Organización Mundial de la Salud & Fondo de las Naciones Unidas para la Infancia, 2021).

Las organizaciones internacionales han desplegado su voz hacia el poder cambiar estas condiciones de vida y ampliar las oportunidades aplicando soluciones sostenibles de forma

mancomunada para hacer frente a la crisis medioambiental, social y económica que enfrentan muchos países hoy en día.

Una muestra clara de esto fueron los 8 objetivos de desarrollo del milenio (ODM) de las naciones unidas que se ejecutaron entre el año 2000 y 2015 donde hubo una transición mediante una nueva agenda hacia los 17 objetivos de desarrollo sostenible (ODS) establecidos por la Organización de las Naciones Unidas (ONU) con un periodo de ejecución que va desde el año 2015 hasta el 2030, los cuales, hacen una invitación mundial a la mejora de la calidad de vida de las personas ayudando a subsanar los niveles de pobreza, donde cada individuo pueda expresarse libremente sin disputas sociales que obstaculicen su progreso, esto bajo un marco de protección al ambiente, donde específicamente en materia de agua limpia y saneamiento se tiene el objetivo 6 que expone la necesidad de llevar agua potable y saneamiento a la zonas rurales ya que, son las más afectadas en cuanto a carencia de esta, considerando que se tienen datos que indican que en el mundo 1 de cada 3 personas no tiene acceso a agua potable de calidad (Organización de las naciones unidas, 2015).

Adicionalmente, con sistemas de potabilización adecuados también se contribuye al ODS 11 que trata de ciudades y comunidades sostenibles, que enmarca entre otros aspectos la necesidad de tener asentamientos humanos sostenibles y esto básicamente considera la implementación de productos o servicios en estas zonas que tengan en cuenta dentro de sus políticas primordiales ocasionar el mínimo impacto negativo al medio ambiente.

De acuerdo con el estudio sectorial de los servicios públicos domiciliarios de acueducto y alcantarillado de 2019 elaborado por la superintendencia de servicios públicos domiciliarios; Colombia mantiene el acceso a agua potable o clasificada como “sin riesgo” en zonas urbanas en alrededor de un 90%, no obstante, esto no se replica en la zonas rurales, por lo cual, hay que

invertir esfuerzos en cerrar esta brecha entre la zona rural y urbana implementado sistemas de potabilización alternativos y sostenibles (Superintendencia de servicios públicos domiciliarios, 2019).

Con base en esto, considerando la situación local, en Colombia aún se tiene un gran desabastecimiento de servicios básicos como lo son el acceso a agua potable, donde una de las comunidades más afectadas por esta problemática es la rural, por lo que cualquier iniciativa que busque mejorar o solucionar esta condición será un gran avance hacia la mejora de la calidad de vida de estas personas.

Una propuesta interesante consiste en implementar sistemas de potabilización individual como una alternativa de bajo costo para abordar la problemática del suministro de agua potable. Estos sistemas tienen la capacidad de purificar las aguas presentes en la comunidad, ya sea provenientes del acueducto veredal o de nacimientos naturales cercanos. Sin embargo, en vista de los problemas surgidos recientemente debido a servicios o productos poco integrales, es esencial considerar los posibles impactos negativos en el medio ambiente.

Por tanto, la construcción e implementación de estos sistemas deben ir acompañada de una adecuada gestión ambiental. Es necesario realizar una exhaustiva evaluación de cada etapa del proyecto para identificar todas las posibles cargas ambientales significativas y abordarlas de manera preventiva para lograr su mejora.

Con esto en mente, se aseguraría que la solución ofrecida no solo aborde el problema específico, sino que también se garantice la preservación del medio ambiente y se minimicen los posibles riesgos asociados. Así, se establecerá una base sólida para el éxito a largo plazo de estos sistemas de potabilización individual en beneficio de la comunidad y su entorno.

Adicionalmente, un papel crucial lo desempeña el análisis de costos, ya que este respalda la viabilidad económica del proyecto y proporciona una visión detallada de los gastos involucrados en cada una de sus etapas. Esta información es esencial para una gestión adecuada de los recursos y garantizar también el éxito del proyecto en términos financieros.

### **1.1 Descripción del problema**

El acceso a agua y saneamiento ha sido una de las principales problemáticas del mundo, los organismos internacionales han reconocido la importancia de suplir el recurso agua para el desarrollo integral del ser.

Las comunidades rurales deben ser ejemplo del desarrollo de un país, ya que, proveen los recursos básicos necesarios para la subsistencia de la gran mayoría de la población; por ello, estas deben contar con acceso a todos los servicios básicos que garanticen su calidad de vida y auspicien su productividad, pero principalmente el acceso a agua potable como un derecho humano fundamental.

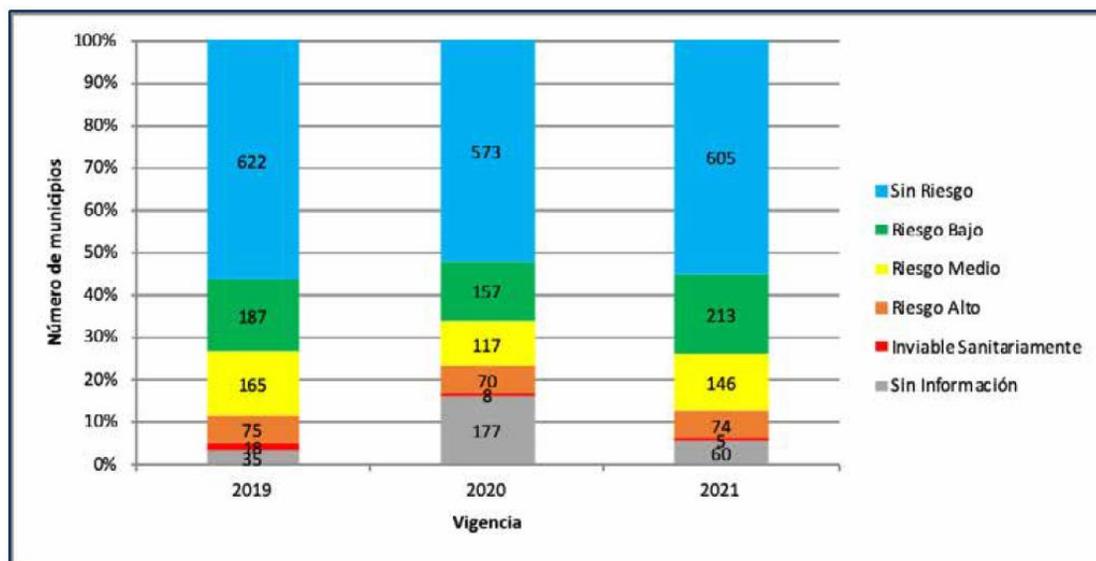
En Colombia, existe un preocupante déficit en el acceso al agua potable para el consumo humano, afectando a aproximadamente 3.2 millones de personas. Esta situación se agrava aún más en las zonas rurales del país (La república, 2023). Por esto, se propone la construcción e implementación de un sistema de potabilización individual, donde se busque no solo dar solución a un problema de acceso a agua segura sino también conocer los impactos ambientales potenciales desatados al ejecutar cada una de las etapas de implementación del mismo, utilizando para ello alguna metodología de evaluación de impacto ambiental como herramienta clave para conocer dichas incidencias; complementando dicho análisis con una valoración económica que dé claridad sobre los gastos asociados al proceso.

La sostenibilidad de los sistemas de tratamiento de agua potable es muy compleja y requiere pensar más allá del ciclo de vida del proyecto, para así desarrollar estrategias como la participación de la comunidad, el desarrollo de sistemas convencionales o no convencionales de bajo costo, alianzas estratégicas, gestión financiera y gestión ambiental.

Para dar evidencia de esta problemática y tener una comparativa, a continuación, se muestran el número total de municipios de Colombia clasificados por niveles de riesgo de calidad del agua desde el año 2019 al 2021. En el eje de las abscisas se representan los años de estudio y en el eje de las ordenadas el porcentaje de municipios, los cuales están organizados por colores según el nivel de riesgo en la calidad del agua encontrado, diferenciados entre zona urbana en la **Figura 1** y zona rural en la **Figura 2**.

### Figura 1

*Número de Municipios (Zona Urbana) por Niveles De Riesgo de la Calidad del Agua, Vigencias 2019 a 2021*



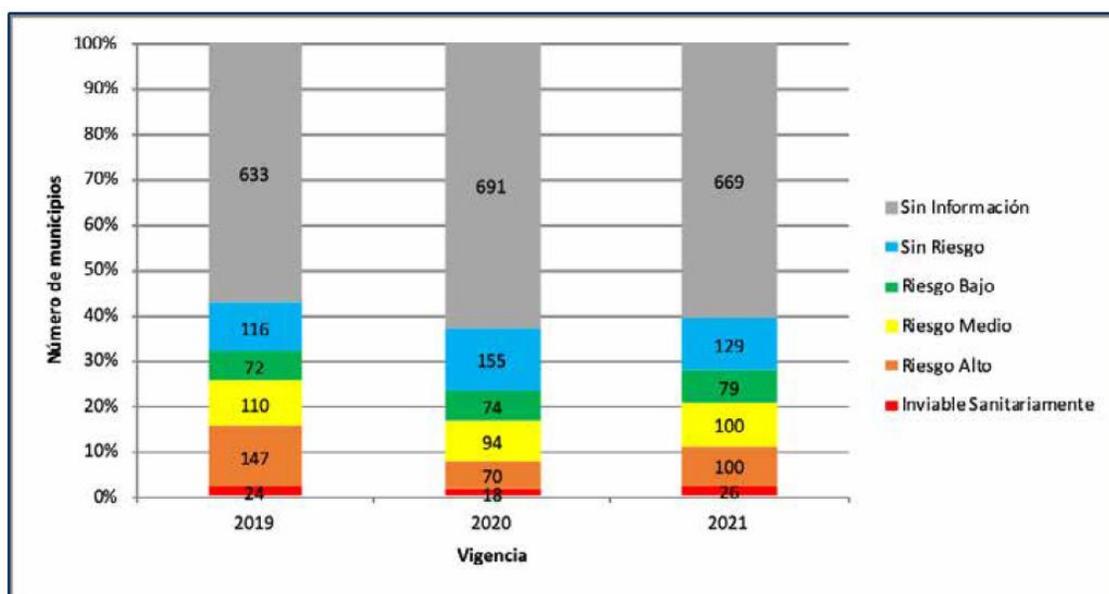
**Fuente:** Cálculos VASB-Minvienda a partir del SIVICAP

*Nota.* Reproducida de Informe Nacional de Calidad del Agua Para Consumo Humano, de Ministerio de Salud y Protección social (p. 131), 2023.

En la **Figura 1** se puede apreciar para la zona urbana que la calidad del agua apta para el consumo humano aumentó en este periodo de tiempo. En el año 2020, se registraron 573 municipios con agua potable adecuada, y esta cifra ascendió a 605 municipios en el 2021. Esto representa una mejora del 5,6 % en el número de municipios que ofrecen suministro de agua potable. Además, se observa una reducción en el número de municipios con un nivel de riesgo "inviabile sanitariamente". En el año 2019, eran 18 municipios en esta situación, pero disminuyó a 8 en el 2020 y posteriormente a 5 en el 2021 (Ministerio de salud y protección social, 2023).

## Figura 2

*Número de Municipios (Zona Rural) por Niveles De Riesgo de la Calidad del Agua, Vigencias 2019 a 2021*



**Fuente:** Cálculos VASB-Minvivienda a partir del SIVICAP

*Nota.* Reproducida de Informe Nacional de Calidad del Agua Para Consumo Humano, de Ministerio de Salud y Protección social (p. 132), 2023.

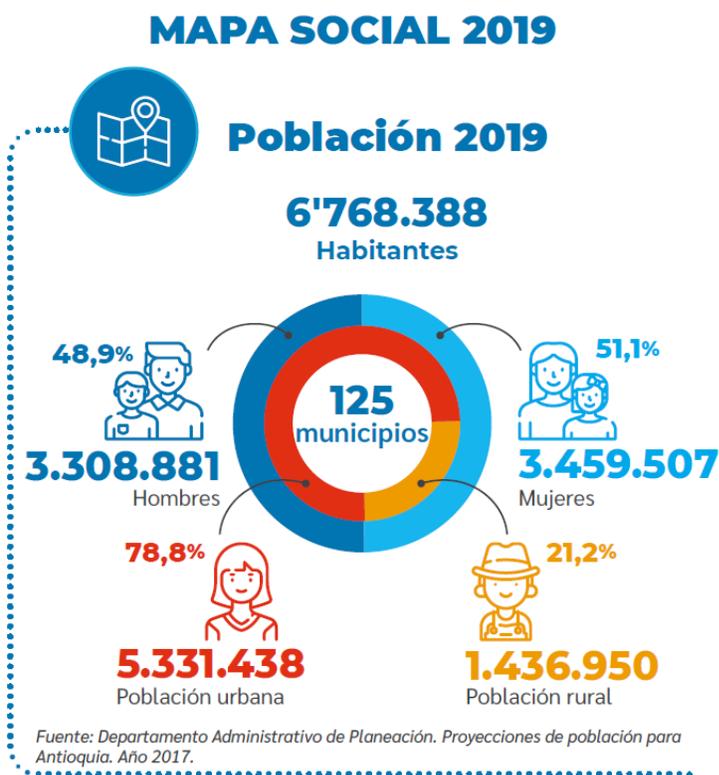
Sin embargo, en la **Figura 2** se observa que para la zona rural se mantiene una tendencia en el número de municipios en los niveles de riesgo "Sin Riesgo", "Riesgo Bajo" y "Riesgo

Medio” del 2019 al 2021, y un incremento en los municipios “Inviablemente Sanitariamente” de 2020 a 2021, esto evidencia las dificultades o limitaciones que enfrentan los municipios y/o proveedores de servicios para asegurar el suministro de agua apta para el consumo humano en ciertas áreas rurales del país. Este escenario pone de manifiesto la persistencia de las disparidades entre las áreas urbanas y rurales en cuanto al acceso al suministro de agua destinado al consumo humano (Ministerio de salud y protección social, 2023).

Según el informe realizado por el programa de las naciones unidas para el desarrollo (2019) sobre los retos y desafíos que debería enfrentar Antioquia para el desarrollo sostenible, se desatacaba, como se muestra en la **Figura 3**, la presencia significativa de una población rural en este departamento.

**Figura 3**

*Mapa Social, Población 2019 Antioquia*



*Nota.* Reproducida de Antioquia Retos y Desafíos para el Desarrollo Sostenible, de Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (p. 2), 2019.

Según la **Figura 3** para 2019 la proyección de población total para los 125 municipios del departamento de Antioquia sería equivalente a 6'768.388 habitantes, de los cuales el 78.8% correspondiente a 5'331.483 habitantes estarían ubicados en la zona urbana y el 21.2 % correspondiente a 1'436.950 habitantes en la zona rural, esta última siendo una cifra muy importante de población rural que atender.

Por otro lado, se tiene que solo el 25% de las casas rurales en el departamento Antioquia no requieren hervir el agua antes de consumirla. El resto, según el departamento de planeación de Antioquia aproximadamente 411.240 viviendas (74.16% del total en áreas rurales), carece de acueductos que potabilicen el agua (El Colombiano, 2019).

Es importante entender que la falta de agua limpia y saneamiento adecuado está asociada con la propagación de enfermedades como el cólera, diferentes tipos de diarrea, disentería, hepatitis A, fiebre tifoidea y poliomielitis. Se estima que alrededor de 829.000 personas mueren anualmente debido a enfermedades diarreicas causadas por el agua contaminada, el saneamiento deficiente y la falta de higiene adecuada de manos. Es importante destacar que la diarrea es una enfermedad ampliamente prevenible, y abordar estos factores de riesgo podría evitar la muerte de aproximadamente 297.000 niños menores de cinco años cada año (Organización mundial de la salud, 2022).

Por ende, este sistema de tratamiento de agua potable individual ofrece grandes posibilidades conociendo estos datos, pero, teniendo claro que este debe ser un proyecto integral que abarque cada temática, especialmente la de los posibles efectos ambientales potenciales y los factores económicos asociados que deberán ser intervenidos. Con base en esto se formula la

siguiente pregunta de investigación; *¿Es viable ambiental y económicamente la construcción e implementación de un sistema individual de tratamiento de agua potable en comunidades rurales del departamento de Antioquia?*

## **1.2 Justificación**

La oportunidad de acceder a agua potable de calidad en las comunidades rurales beneficiará directamente su calidad de vida. Sin embargo, no basta con garantizar un producto o servicio que satisfaga esta necesidad. También es crucial evaluarlo desde la perspectiva técnica, económica, social y ambiental. Para el alcance de esta investigación, el enfoque será únicamente en los aspectos ambientales y económicos.

Esto garantizará que el servicio o producto sea genuinamente beneficioso para la comunidad, siendo también de fácil implementación, rentable, sostenible e individual, ya que, para estas comunidades debido al difícil acceso a su territorio en muchas ocasiones, como consecuencia del atraso en infraestructura vial que presenta el país en estas zonas, se hacen necesarias estrategias y mecanismos individuales que garanticen una buena funcionalidad y calidad, ya que, las soluciones colectivas suelen tener limitaciones debido a estas circunstancias.

Por lo tanto, una de las metodologías propuestas para la evaluación ambiental es el análisis de ciclo de vida (ACV), la cual es una herramienta metodológica utilizada para evaluar el impacto ambiental de un producto, proceso o sistema a lo largo de su ciclo de vida completo, desde la obtención de materias primas hasta su disposición final. Consiste en recopilar y analizar todas las entradas (materias primas, transportes, energía, etc..) y salidas (emisiones y/o residuos al aire, agua y suelo) del sistema, para obtener resultados que reflejen sus posibles impactos al ambiente. Su objetivo es identificar estrategias que permitan reducir dichos impactos y tomar decisiones más sostenibles (Ihobe, 2009).

Este es una herramienta que constituye un apoyo para que las organizaciones puedan tomar decisiones técnicas adecuadas con base en un producto o la mejora de productos existentes y que al tener un carácter holístico dará una visión conjunta de los impactos ambientales asociados a cada etapa del ciclo de vida del sistema de estudio, por lo cual, será la metodología empleada para el desarrollo de esta investigación; la cual pretende evaluar la sostenibilidad de un sistema individual de potabilización en comunidades rurales, que no tienen acceso a agua segura.

A partir de lo anteriormente descrito, evaluar el ciclo de vida de un sistema de tratamiento de agua potable para comunidades rurales; constituye una fase indispensable para minimizar los impactos relacionados con el ambiente y la salud humana. Complementado esto con un análisis económico que exponga los gastos presentes para la construcción e implementación de este, donde se evidencien los costos asociados a cada uno de los procesos desarrollados para su puesta en marcha.

Adicionalmente, estos análisis darán un diagnóstico sobre cuáles son aquellos posibles procesos de mejora dentro del ciclo de vida del sistema que pueden ser intervenidos o que al contrario de fe sobre sus beneficios ambientales y económicos en comparación con otras alternativas convencionales de tratamiento de agua potable en comunidades rurales, para así convertirse en un prototipo idóneo que se pueda replicar y acoplar a otros contextos que presenten la misma carencia de este líquido vital.

## **2      Objetivos**

### **Objetivo general**

Evaluar ambiental y económicamente un sistema individual de tratamiento de agua potable en comunidades rurales del departamento de Antioquia.

### **Objetivos específicos**

- ✓ Realizar el inventario del ciclo de vida de un sistema de potabilización.
- ✓ Determinar los impactos ambientales generados por el sistema de potabilización.
- ✓ Estimar el costo del ciclo de vida del sistema de potabilización.

## **3 Marco Teórico y Estado del Arte**

En este apartado, se presenta una descripción de los temas y las disciplinas consideradas para alcanzar los objetivos planteados. Para el desarrollo de esta investigación, se realizó una recopilación bibliográfica sobre artículos científicos, normas técnicas, tesis de pregrado, maestría y doctorado, entre otros. Para ello, se tuvieron en cuenta las siguientes palabras clave: análisis de ciclo de vida, comunidades rurales, agua potable, sistemas de tratamiento de agua potable, y costos.

### **3.1 Análisis de Ciclo de Vida (ACV)**

Según la norma NTC-ISO 14040 Se define al análisis de ciclo de vida como la “Recopilación y evaluación de las entradas, las salidas y los impactos ambientales potenciales de un sistema o producto a través de su ciclo de vida” (ICONTEC, 2007).

La actualización de su estandarización se da en 2006 por las normas ISO 14040 (principios y marco de referencia) (ISO, 2006a), e ISO 14044 (requisitos y directrices) (ISO, 2006b), donde se dictan los lineamientos necesarios para desarrollar paso a paso un adecuado análisis de ciclo de vida de un producto o servicio.

El análisis de ciclo de vida empieza en el año 1969 donde se realizó un perfil ambiental de recursos para la empresa Coca Cola por el Midwest Research Institute, después de esto está metodología siguió expandiéndose, pero fue hasta el año 1999 que este llega a la academia a nivel nacional como una herramienta de toma de decisiones.

La creciente conciencia ambiental del mundo y su interés por buscar mejoras significativas en conjunto trajo consigo la implementación de una técnica conocida como el análisis de ciclo de vida, que nace de la necesidad de conocer todos aquellos posibles impactos ambientales potenciales asociados a un producto o servicio a lo largo de todo su ciclo de vida desde la adquisición de la materia prima, pasando por la producción, tratamiento final, reciclado, hasta su disposición final (es decir, de la cuna a la tumba) (ICONTEC, 2007). Esto con el fin de estudiar todas las etapas de un sistema de estudio, donde se considera que todas las fases se vinculan entre sí y son importantes.

El ACV se puede aplicar en el pronóstico o diagnóstico ambiental de un producto o servicio teniendo en cuenta que en menor medida se estudian los componentes sociales y económicos (Benítez et al., 2014). Por lo cual se hace necesario un estudio económico y social a fondo, posteriormente, como complemento integral de esta metodología.

Cuando se realiza un análisis de ciclo de vida, es importante considerar el concepto "piensa globalmente y actúa localmente" estipulado en la Carta de Valencia (Unión Europea, 1995). Ya que, para contribuir a la sostenibilidad ambiental de cualquier tipo de sistema, se deben analizar escenarios desde una perspectiva macro, con el fin de adoptar soluciones a problemas regionales desde una perspectiva global que ayude a combatir el cambio climático, con base a procesos de tratamiento de agua potable que tengan una baja emisión de gases de efecto invernadero.

En la **Figura 4** se representan las etapas que componen el análisis de ciclo de vida, en la primera parte se tienen los objetivos y alcances que hacen referencia al motivo que impulsa la investigación, dando una breve descripción del sistema de producto a analizar teniendo en cuenta la unidad funcional escogida y sus limitaciones. La segunda parte trata el análisis de inventario

de ciclo de vida el cual hace referencia a todos los procesos involucrados dentro del sistema de producto estudiado como lo son las entradas (materias primas) consumidas y las salidas (residuos y/o emisiones) generadas. Para la tercera parte se tiene la evaluación del impacto ambiental producido por todos los procesos asociados al ciclo de vida del producto o servicio analizado, haciendo previamente una selección de categorías de impacto de interés. Y por último la interpretación, donde con base a todos los resultados obtenidos se toman decisiones, se dictan conclusiones y recomendaciones para mejorar o cambiar cualquier elemento significativo, teniendo en cuenta siempre los objetivos y alcances establecidos.

#### Figura 4

*Fases del ACV*



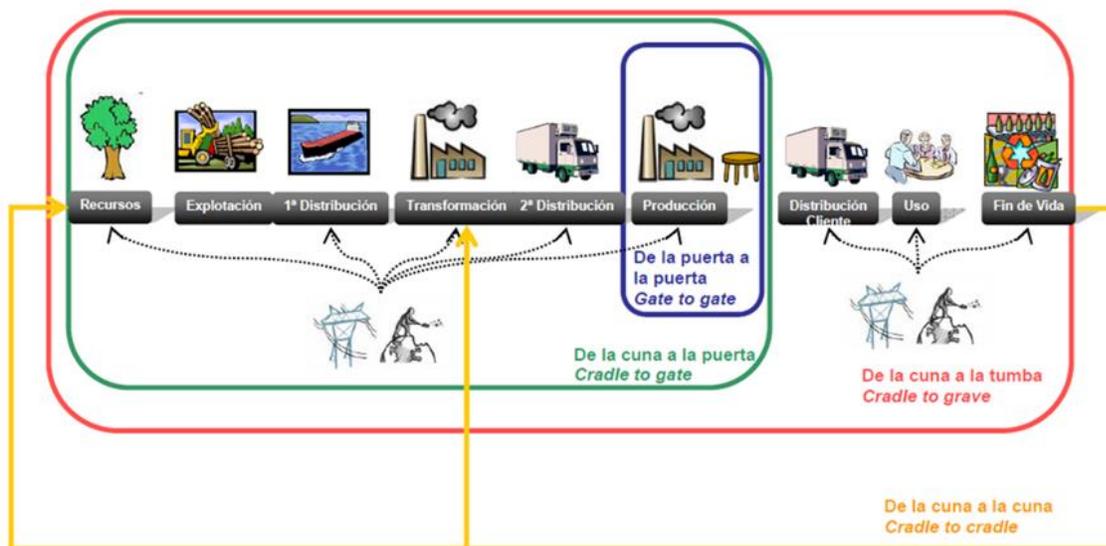
*Nota.* Adaptada de NTC-ISO 14040:2007.

Al realizar un análisis de ciclo de vida como su nombre lo indica se debe tener en cuenta en detalle cada una de las entradas y salidas de los procesos asociados a todo el ciclo vida del producto o servicio, debido al carácter holístico de esta metodología, sin embargo, cuando se ejecuta este tipo de estudio debido a las limitaciones en la obtención de los datos para algunos procesos o el objetivo propio de la investigación, se puede plantear un alcance acotado entre algunos procesos de interés.

En la **Figura 5** se muestran los diferentes alcances de un ACV y se describe cada uno según Ihobe, (2009):

### Figura 5

#### Alcance de un ACV



Terminología relacionada con el alcance de un ACV

*Nota.* Reproducida de Análisis de Ciclo de Vida y Huella de Carbono, de Ihobe (p. 4), 2009.

**De la cuna a la tumba:** Cuando se incluyen todas las entradas y salidas de los procesos que participan a lo largo del ciclo de vida, desde la extracción de materias primas y el

procesado de los materiales necesarios para la manufactura de componentes, el uso del producto y finalmente su reciclaje y/o la gestión final.

**De la cuna a la puerta:** Cuando el alcance del sistema incluye las entradas y salidas desde la obtención de las materias primas hasta que el producto se pone en el mercado (a la salida de la planta de fabricación/montaje).

**De la puerta a la puerta:** Cuando solo se tienen en cuenta las entradas y salidas del sistema productivo (procesos de fabricación).

**De la cuna a la cuna:** Un nuevo enfoque, basado en tener en cuenta que las corrientes de salida del fin de vida del sistema pueden ser valoradas como materias primas y/o entradas al mismo sistema o a otro, está teniendo un importante reconocimiento en los últimos años.

El ACV, estandarizado bajo las normas ISO 14040 (ISO, 2006a), e ISO 14044 (ISO, 2006b), se convierte en un instrumento de carácter holístico para la resolución de problemas, asociados al ciclo de vida de un producto o servicio desde su fase de concepción, diseño, fabricación, distribución, uso y explotación tanto para productos nuevo o existentes, contribuyendo a un desempeño que abarca tanto la parte técnica como la económica, social y ambiental.

Dicha metodología posee ventajas competitivas al proporcionar una gran variedad de elementos de análisis a las empresas o entidades que posteriormente estén interesadas en certificar sus productos bajo esquemas de sellos ambientales o etiquetas ecológicas.

### **3.2 Comunidades Rurales**

Una comunidad rural es un conjunto de individuos que reside en zonas o regiones principalmente agrícolas, ganaderas o naturales. Estas comunidades suelen ubicarse distantes de

áreas urbanas densamente pobladas y se distinguen por su estilo de vida arraigado en actividades relacionadas con la agricultura, la ganadería, entre otras.

En Colombia, la población rural abarca a diversos grupos, como los campesinos de bajos recursos, propietarios de pequeñas, medianas y algunas grandes parcelas. También incluye a pescadores, artesanos y personas involucradas en actividades mineras. Además, los indígenas y una gran parte de las comunidades afrodescendientes forman parte de la población rural (Pérez Correa & Pérez Martínez, 2002).

Las personas que viven en estas zonas por lo general carecen de algunos servicios básicos e indispensables para garantizar calidad de vida. Según la Organización Mundial de la Salud & Fondo de las Naciones Unidas para la Infancia (2021) se encontró que:

En 2020 1 de cada 4 personas carecía de servicios de agua para consumo gestionados de manera segura; de cada 10 personas que aún carecían incluso de servicios básicos, 8 vivían en zonas rurales, la mitad de ellas en países menos adelantados. (pp. 8, 28)

En las áreas rurales de Colombia, la provisión de agua potable no alcanza el 35% de cobertura (Camacho Botero, 2020).

Según el Censo Nacional de Población y Vivienda más reciente realizado por el DANE en el año 2018 en Colombia, la distribución de la población por ubicación se dio de la siguiente forma con un 77.1% en las cabeceras municipales, 7.1% en los centros poblados y un 15.8% en la zona rural o dispersa siendo este último nuestro público objetivo, dando así un total aproximado en el país para ese año de 48'258.494 personas, lo que significa para la zona rural o dispersa un aproximado de 7'624.842 personas (DANE, 2018).

Es importante resaltar que las comunidades rurales a través de los años han sido parte fundamental del desarrollo del país ya que, en muchas ocasiones estas desempeñan labores de

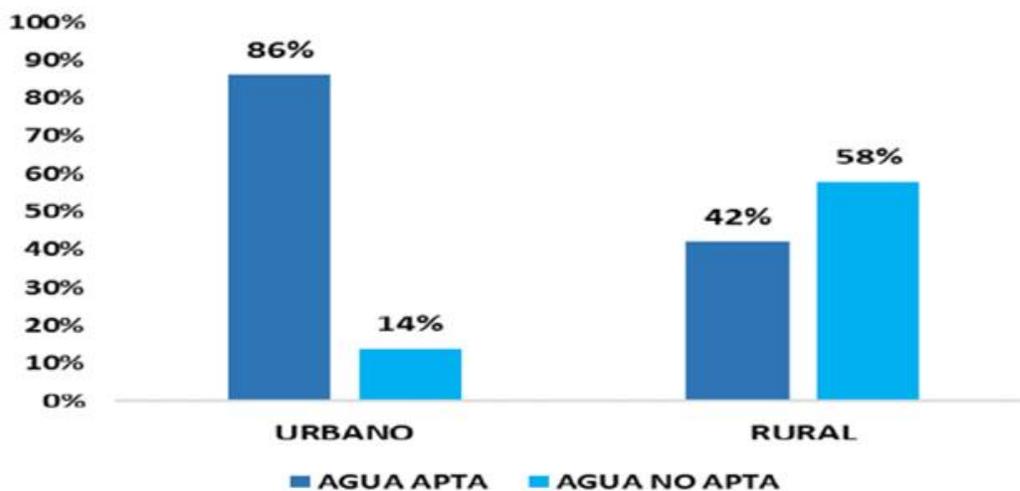
agricultura necesarias para el abastecimiento de las urbes, aunque puede que con los años las comunidades rurales migren a las ciudades en busca de oportunidades, su número aún es significativo y son objeto de propuestas de mejoras a sus condiciones de vida, una de ellas mediante la llegada de servicios básicos de agua potable y saneamiento.

Es por esto que juega un papel importante la articulación entre los ingenieros y las comunidades rurales ya que, esto puede ayudar a hacer frente a la problemática de cambio climático que actualmente afecta al mundo, concentrando esfuerzos en un punto en común y trascendental como es el acceso a agua potable con miras en implementar nuevos sistemas sostenibles de potabilización para así ayudar a mejorar las condiciones de vida y aportar al cuidado del medio ambiente mitigando los daños de cualquier actividad humana (Osorio Marulanda, 2016).

En la **Figura 6** se encuentran los porcentajes de población urbano y rural con índices de riesgo de calidad del agua (IRCA) sin riesgo para el año 2017, en donde claramente se evidencio una diferencia importante entre el área urbana y rural, que en conclusión evidenció que las zonas más afectadas al recibir agua con un nivel de riesgo, es decir, no apta para consumo humano es la zona rural, en donde solo el 58% de esta población recibió agua segura, (Ministerio de salud y protección social, 2023; Ministerio de vivienda ciudad y territorio, 2018). Datos que resaltan la necesidad de una intervención adecuada por parte del gobierno que mejore estas condiciones de desigualdad, a través de mecanismos innovadores que puedan llegar a todos estos territorios de Colombia.

**Figura 6**

*Porcentaje de Población Urbano/Rural con IRCA sin Riesgo, 2017*



Fuente: SIVICAP, SSPD, Proyección DANE, Cálculos MVCT.

*Nota.* Reproducida de Plan Director de Agua y Saneamiento Básico, de Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio (p. 16), 2018.

### 3.3 Agua potable

El agua potable es aquella que ha sido tratada y purificada para ser segura y apta para el consumo humano durante toda su vida. Se somete a procesos de filtración y desinfección para eliminar o reducir la presencia de contaminantes, como microorganismos patógenos y sustancias químicas peligrosas.

Las principales características de esta son; que debe ser limpia y segura, incolora, inodora, insípida, carecer de elementos en suspensión, libre de contaminantes, mantener una proporción determinada de gases y sales inorgánicas disueltas y no contener microorganismos patógenos (Fundación Aquae, 2021).

En Colombia según El Decreto 1575 de 2007 se define como agua potable o agua apta para consumo humano:

Aquella que, por cumplir las características físicas, químicas y microbiológicas, en las condiciones señaladas en el presente decreto y demás normas que la reglamenten, es apta para consumo humano. Se utiliza en bebida directa, en la preparación de alimentos o en la higiene personal. (Ministerio de la Protección Social, 2007, p. 1)

Es importante resaltar que uno de los grandes beneficios de tener acceso a agua potable es la mejora sustancial de la salud de las personas, que, a su vez, incentiva el progreso económico y social de los individuos, ya que, al ser este uno de los servicios esenciales permite el despliegue de otras formas de desarrollo. Es por esto por lo que contar con agua apta para consumo humano es primordial en un estado que respeta y acoge todos los derechos humanos fundamentales y vela por hacer una gestión eficiente mediante leyes que garanticen una adecuada protección a la salud de todas las personas, empezando por no ahorrar esfuerzos en poder garantizar un abastecimiento de agua potable satisfactorio (suficiente, seguro y accesible) (Organización Mundial de la Salud, 2018).

Por lo anterior, hay que trabajar en conjunto con todas las organizaciones de Colombia para unir esfuerzos que ayuden de una forma sostenible en el tiempo a poder llevar a todas las comunidades un agua potable de calidad que cubra todas las necesidades de sus habitantes, considerando la implementación de nuevas alternativas de infraestructuras innovadoras, sostenibles y eficientes adoptadas a cada contexto específico (Ministerio de vivienda ciudad y territorio, 2018). Con el fin de cerrar las brechas entre las poblaciones rurales y urbanas, donde se garantice los recursos básicos necesarios para impulsar el avance continuo de todos sus territorios.

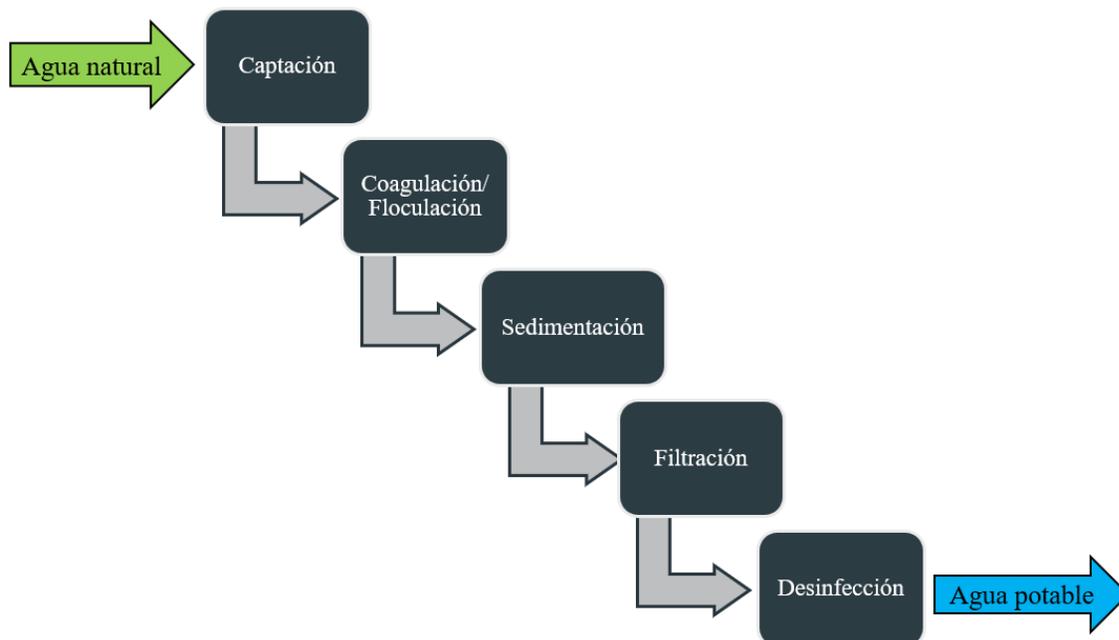
### 3.3.1 *Sistemas de Tratamiento de Agua Potable*

Los sistemas de tratamiento de agua potable son instalaciones y procesos de ingeniería diseñados para purificar y acondicionar el agua con el fin de hacerla segura y apta para el consumo humano. Son la opción más segura para tratar las aguas presentes de todos los posibles contaminantes en una zona determinada y así contar con la disponibilidad necesaria tanto para el consumo directo como para la preparación de alimentos de una población.

En cuanto a los procesos específicos de tratamiento del agua natural, la forma convencional en la que se realiza se basa en instalaciones convencionales conocidas como plantas potabilizadoras que constan de las siguientes etapas mostradas en la **Figura 7** según la Fundación Aquae (2021):

#### **Figura 7.**

##### *Proceso de Potabilización del Agua*



- **Captación del agua desde fuentes de aguas naturales:** Como ríos, lagos o embalses. A través de un conjunto de electrobombas se colecta el agua y durante su

transporte se va filtrando por una serie de rejillas de distintos tamaños que van reteniendo los sólidos.

- **Coagulación/floculación:** Con este tratamiento se eliminan las algas, el plancton y otros tipos de sustancias. Los productos que se usan en esta fase son los que pueden producir, después, olor y sabor al agua.
- **Sedimentación:** Elimina los flóculos mediante la acción de la gravedad.
- **Filtración:** El agua pasa a través de un filtro o un medio poroso con el objetivo de reducir la turbidez del agua y quitar los organismos parásitos.
- **Desinfección:** Consiste en la eliminación de los microorganismos patógenos del agua.

Se estudió un sistema de bajo costo implementado en comunidades rurales que busca mejorar la calidad de vida de estas personas mediante el acceso a agua potable, este será un sistema integrado que ayudará a poner en condiciones adecuadas las aguas provenientes del sistema de acueducto o nacimientos disponibles en la zona para su posterior consumo.

Tener a disposición agua apta para consumo humano garantiza salud para las personas, de aquí la importancia de un tratamiento adecuado acompañado de un control de calidad eficaz, teniendo en cuenta la procedencia de esta, ya sea de origen superficial o subterránea y el método de potabilización al que sea sometida (Rodríguez-Alvarez et al., 2017).

Cabe resaltar que para lograr que se pueda gestionar de manera sostenible y completa el suministro de agua potable a las diferentes poblaciones, se requiere que se implementen tecnologías adecuadas de captación y tratamiento (Morató et al., 2006). Lo que indica que se debe hacer un estudio específico para encontrar el sistema de potabilización adecuado, con base en las características propias del lugar de implementación.

Según la Encuesta de Calidad de vida realizada por el DANE en 2019 se conoce que en los hogares de la zona rural el uso de agua para la preparación de alimentos proviene solo en un 49,6% de acueducto, lo que destaca otras fuentes, como río, quebrada, manantial o nacimiento (20,2%); pozo sin bomba, aljibe, jagüey o barreno (10,6%), y pozo con bomba (8,5%) (DANE, 2019). Esto presume el uso de aguas no aptas para consumo humano que puede desencadenar en enfermedades diarreicas u otras que ponen en riesgo la vida de las personas.

Es necesario brindar una capacitación extensiva a los agricultores y líderes comunitarios para desarrollar sistemas descentralizados de tratamiento de agua potable. Una vez más, se requiere la colaboración coordinada entre la academia, los ministerios y los institutos gubernamentales para lograr este objetivo (Camacho Botero, 2020). Ya que, para que este sea un proyecto sostenible es necesario que haya un acompañamiento multidisciplinar donde participen todas las partes interesadas, con el fin de estudiar todas las variables involucradas.

### ***3.3.2 Análisis de Ciclo de Vida en Sistemas de Tratamiento de Agua Potable***

Cuando se vincula el análisis de ciclo de vida a un sistema de tratamiento de agua potable se logra encontrar un equilibrio entre los beneficios que ofrece dicho producto o servicio y su adecuada adaptación al entorno.

Es por esto, que los sistemas de suministro de agua potable varían en todo el mundo, ya que se adaptan a las condiciones particulares de cada lugar, tales como la topografía, la disponibilidad de fuentes de agua, las tecnologías utilizadas, la demanda poblacional y otros factores relevantes. Por lo tanto, cada sistema de suministro de agua potable es único y diseñado para satisfacer las necesidades específicas de su ubicación (Montoya Flores, 2021).

El análisis de ciclo de vida aplicado a sistemas de tratamiento de agua potable se ha venido desarrollando ampliamente, por ejemplo, en estudios realizados por (Amores et al., 2013;

Barrera Pérez et al., 2020; Barrios et al., 2008; Bonton et al., 2012; Cáceres Huisacayna, 2016; Godskesen et al., 2013; Goga et al., 2019; Igos et al., 2014; Manda et al., 2014; Mohamed-Zine et al., 2013; Montoya Flores, 2021; Ortiz Rodriguez et al., 2016; Prézélus et al., 2021; Raluy et al., 2005; Ribera et al., 2014; Saad et al., 2019; Stokes & Horvath, 2006; Varón-Hoyos et al., 2019; Vince et al., 2008), estos estudios dan muestra de la relevancia que puede tener un ACV como herramienta de toma de decisiones en sistemas de potabilización de agua.

Para el desarrollo del análisis de ciclo de vida en estos sistemas se han utilizado diferentes softwares dentro de los más comunes y mayormente utilizados se encuentra el software SimaPro (Barrera Pérez et al., 2020; Barrios et al., 2008; Bonton et al., 2012; Cáceres Huisacayna, 2016; Goga et al., 2019; Manda et al., 2014; Mohamed-Zine et al., 2013; Montoya Flores, 2021; Raluy et al., 2005; Ribera et al., 2014; Varón-Hoyos et al., 2019) seguido del software GaBi (Godskesen et al., 2013; Saad et al., 2019; Vince et al., 2008).

Con respecto a la evaluación de impacto del ciclo de vida según la bibliografía consultada el método más utilizado fue ReCipe (Barrera Pérez et al., 2020; Cáceres Huisacayna, 2016; Goga et al., 2019; Igos et al., 2014; Manda et al., 2014; Montoya Flores, 2021; Prézélus et al., 2021; Ribera et al., 2014), seguido de Impact 2002+ (Barrera Pérez et al., 2020; Bonton et al., 2012; Igos et al., 2014; Varón-Hoyos et al., 2019; Vince et al., 2008). y CML 2001 (Amores et al., 2013; Ortiz Rodriguez et al., 2016; Raluy et al., 2005; Saad et al., 2019).

Respecto a la unidad funcional, la unidad más empleada en los estudios examinados fue 1 m<sup>3</sup> de agua potable (Amores et al., 2013; Barrera Pérez et al., 2020; Barrios et al., 2008; Bonton et al., 2012; Cáceres Huisacayna, 2016; Godskesen et al., 2013; Igos et al., 2014; Manda et al., 2014; Mohamed-Zine et al., 2013; Montoya Flores, 2021; Ortiz Rodriguez et al., 2016;

Prézélus et al., 2021; Ribera et al., 2014; Saad et al., 2019; Varón-Hoyos et al., 2019; Vince et al., 2008).

En cuanto a los resultados obtenidos la mayoría de estas investigaciones encontraron que los impactos ambientales más significativos estaban en la etapa de funcionamiento, esto debido al consumo de energía asociado al tipo de sistema de tratamiento utilizado para potabilizar el agua (Barrera Pérez et al., 2020; Godskesen et al., 2013; Goga et al., 2019; Igos et al., 2014; Manda et al., 2014; Prézélus et al., 2021; Raluy et al., 2005; Ribera et al., 2014; Saad et al., 2019; Stokes & Horvath, 2006; Vince et al., 2008), sin embargo, otros trabajos encontraron que las mayores cargas ambientales se debían a la utilización y transporte de diferentes productos químicos para el proceso de tratamiento del agua (Amores et al., 2013; Barrios et al., 2008; Bonton et al., 2012; Cáceres Huisacayna, 2016; Mohamed-Zine et al., 2013; Montoya Flores, 2021; Ortiz Rodriguez et al., 2016). Cabe aclarar que algunos de estos estudios no consideraron la etapa constructiva, ya que, en la literatura que si se incluyó esta fase solo representaba entre el 4% y el 12% del total de las cargas ambientales (Cáceres Huisacayna, 2016; Igos et al., 2014; Mohamed-Zine et al., 2013; Vince et al., 2008), esto teniendo en cuenta que la potabilización del agua es una actividad continua que demanda un suministro ininterrumpido de insumos químicos y energía eléctrica, mientras que la construcción de la infraestructura necesaria para llevar a cabo este proceso es un evento puntual que ocurre en un plazo determinado. Por esta razón, los impactos ambientales de la construcción se normalizan a lo largo de la vida útil de la infraestructura, por lo cual, los estudios que incluyen esta variable en su análisis sugieren que los impactos ambientales asociados con la construcción son generalmente menores en comparación con los impactos totales.

Es importante resaltar que los resultados en una evaluación de ciclo de vida dependen de la zona de estudio, es decir, de las características específicas del sitio, por lo cual en muchas ocasiones los datos de un ACV realizado en un país específico no son útiles para otro país en condiciones diferentes (Mohamed-Zine et al., 2013).

Gracias al enfoque holístico esta herramienta se ha vuelto de gran importancia a la hora de tomar decisiones sobre los procesos que más impactos negativos generan al medio ambiente; donde se ha logrado evidenciar su eficacia para tomar decisiones trascendentales. Ya que, Aunque se tenga un alcance general y un nivel de detalle justo, a través de esta metodología de análisis de ciclo de vida se puede llegar a resultados lo suficientemente significativos, como para obtener un escenario valioso sobre la tecnología de producción de agua potable que menos impacta de forma negativa el ambiente (Raluy et al., 2005).

### **3.4 Costos**

En el siguiente apartado se hizo una recopilación general de algunas metodologías de costos que ayudaran a entender los gastos asociados a la fabricación y puesta en marcha del producto de estudio.

Teniendo en cuenta que el costo de un producto, bien o servicio puede definirse en términos económicos como la identificación y agrupación de cada uno de los elementos que interfieren en el proceso productivo de dicho bien (Carvajal Peláez, 2008).

#### ***3.4.1 Análisis de Costos del Ciclo de Vida (ACCV)***

Una de las metodologías relevantes en la actualidad es el análisis de costos en el ciclo de vida, ya que, considera los costos asociados a todo el ciclo de vida del producto o servicio, lo cual garantice un nivel de detalle importante para dicha valoración.

El ACCV, es un apoyo importante a la hora de tomar decisiones en obras civiles donde se implique la viabilidad económica (Balaguera Quintero, 2018).

El costo a lo largo del ciclo de vida denominado por sus siglas en inglés (LCC) que significan Life Cycle Costng, puede definirse de forma amplia como lo afirma Hunkeler et al., (2008) que es la “Consideración sistemática de todos los costos e ingresos asociados con la adquisición, uso y mantenimiento de un activo”.

Según García-Erviti et al., (2015) :

Los elementos claves del análisis de costos del ciclo de vida son cuatro: 1) la determinación de los flujos financieros de cobros y pagos - costes y beneficios, en términos de evaluación de proyectos, 2) el horizonte temporal del proyecto, 3) las tasas de descuento o actualización financiera aplicables y 4) el método de análisis de resultados. El objetivo básico es la obtención del valor actual neto de todos los flujos financieros del proceso de edificación. (p. 5)

### **3.4.2 Costeo Basado en Actividades (CBA)**

Según lo definido por Toro López, (2010):

Esta es una metodología relativamente nueva que surge a principios de la década de los 90 y consiste fundamentalmente en asignar costos a los insumos necesarios para ejecutar todas las actividades de un proceso productivo identificadas como las relevantes para obtener un determinado objeto de costo y luego calcula el costo de estas actividades productivas mediante mecanismos de absorción del costo. Una actividad es un trabajo que consume recursos de una organización, y es generalmente una parte integrante de un proceso compuesto de varias tareas cumpliendo un objetivo; las actividades se expresan mediante verbos o expresiones que signifiquen acción. ABC es llamada así por sus siglas

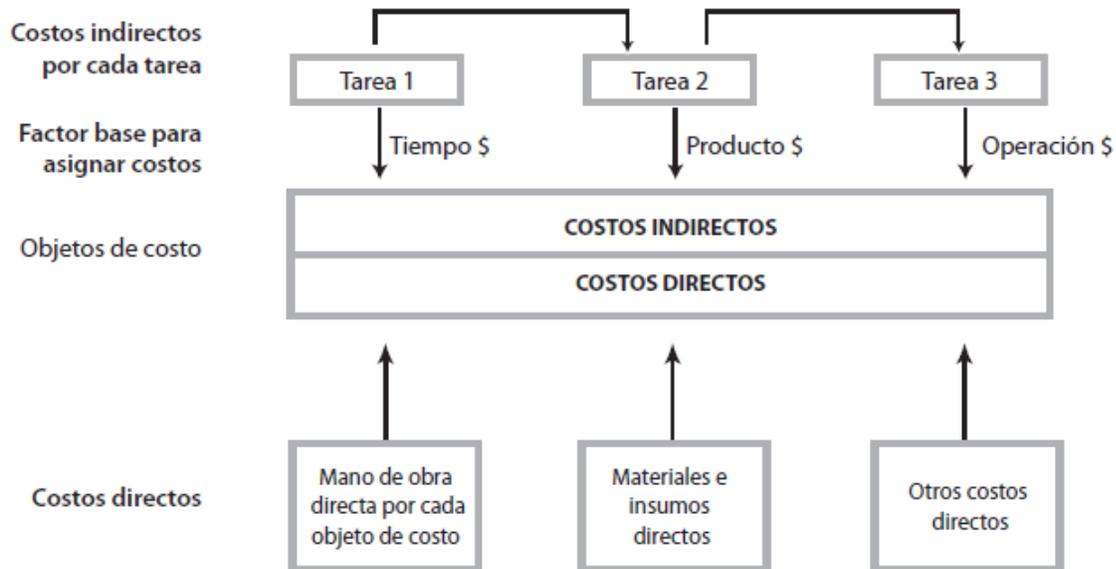
en inglés Activity-Based Costing y ha sido ampliamente divulgada y logrado un rápido empleo en muchas empresas de países tecnológicamente adelantados, reemplazando otros métodos tradicionales empleados en diversos sectores productivos y fabriles debido a sus notorias ventajas en identificar y cuantificar los reales factores generadores de los costos directos e indirectos en forma más acertada que otros mecanismos de costeo. ABC busca realmente las causas que originan los costos indirectos. (pp. 46-47)

A continuación, se presentan los pasos que se deben tener en cuenta en la metodología ABC, definidos por Toro López, (2010) una vez se tiene identificado un objeto de costo:

1. Evaluar los procesos productivos, recomendablemente en el orden en que se ejecutan y se identifican las actividades necesarias para desarrollar cada proceso. Cuando ya se conozcan estas actividades, posteriormente se analizan los costos y los volúmenes de recursos que consumen cada una de ellas, usando la información encontrada o la que se considere necesaria.
2. Se analizan los factores generadores de costo para cada actividad, teniendo en cuenta una relación causa-efecto y se le asigna una base mediante una fórmula de costos, cuyo valor es la base de asignación unitaria y no necesariamente es financiero. Es posible que al analizar una actividad pueda encontrarse más de una base (por ejemplo, una orden de compra puede tener como base la cantidad de órdenes de compra o el número de ítems solicitados), por lo que es necesario ensayar fórmulas de costo por actividad y decidir el comportamiento más apropiado con métodos estadísticos. En este momento se obtiene el costo y una base de asignación de cada actividad que se aplicará al objeto de costo.

3. Se analizan los mecanismos de absorción del costo de cada actividad para el especificado objeto de costo y se determina la fórmula de absorción más apropiada. En este momento se tienen los costos unitarios de cada objeto de costo y los volúmenes de recursos que se consumen al ejecutar sus tareas.
4. Se calculan los costos del objeto de costo, sumando los costos directos y los indirectos. Se emplea el costo así calculado como la base unitaria para asignar costos a otros objetos de costo y que cubran todas las fases de la cadena de valores de producción agregados. Durante el desarrollo de este método de costeo, es recomendable tener siempre presente estos dos conceptos:
  - Costos directos: Mano de obra directa, materia prima y materiales directos, costos directos de producción, etc.
  - Costos indirectos: Mano de obra de soporte general, servicios y facilidades comunes a todo el proceso productivo o proyecto, apoyo administrativo, etc. (pp. 47-48)

En la **Figura 8** se observa el proceso a seguir de esta metodología para llegar a conocer los costos asociados al objeto de costo que está predeterminado por los costos indirectos y directos.

**Figura 8***Proceso Básico de la Metodología ABC*

*Nota.* Reproducida de *Costos ABC y Presupuestos* (p. 49), por Francisco J. Toro López, 2010, Ecoe Ediciones.

### 3.4.3 Análisis de Precios Unitarios (APU)

El Análisis de Precio Unitario (APU) es un instrumento que ayuda a determinar el precio por unidad de medida de cualquier proceso a ejecutar (Arboleda López & Serna Gutiérrez, 2019)

Para la elaboración de un APU se deben tener en cuenta los siguientes ítems definidos por Arboleda López & Serna Gutiérrez, (2019):

1. Identificación del ítem
  - a. Título del proyecto
  - b. Descripción u objeto del ítem
  - c. Unidad de medida
  - d. Cantidad de obra a ejecutar (si es necesario)

2. Costos directos
  - a. Materiales
  - b. Transporte: Se recomienda que los valores del transporte se incluyan con los valores de los materiales puestos en obra
  - c. Mano de obra
  - d. Equipo y herramienta
3. Costos indirectos: Es lo que conocemos como el AIU, Administración, Imprevistos y Utilidades, se debe recordar que cada una de ellas se obtiene de un porcentaje del costo directo previamente establecido según nuestras necesidades y del tamaño de la obra, dicho AIU puede encontrarse entre un 15% y un 25% del costo directo aproximadamente.
4. Costo total: Es el que se obtiene de la sumatoria de los costos directos más los costos indirectos. (pp. 91-92)

#### **4 Metodología**

Para alcanzar los objetivos propuestos en este trabajo se desarrollará una metodología mixta, ya que, aunque se cuenta con una mayor proporción de información cuantitativa proveniente del daño ambiental asociado a cada producto durante su ciclo de vida, será necesario complementar estos análisis con información cualitativa que surge de la línea base donde se hizo una revisión basada en la percepción subjetiva de las personas sobre las condiciones iniciales de calidad de vida en la zona de estudio, para posteriormente poder evidenciar las mejoras en la calidad de vida de esta comunidad al aplicar dicho sistema de potabilización, generando así un mejor soporte sobre los resultados que conlleven a conclusiones acordes con el objetivo principal.

A continuación, se describen las actividades a realizar para alcanzar los objetivos propuestos:

#### **4.1 Análisis de Inventario a través de la Metodología de ACV**

Para desarrollar este objetivo se aplicará una metodología mixta ya que se contará con información cualitativa proveniente de la identificación y selección del sistema, elaboración de diagramas de flujo y descripción de las características de los recursos consumidos, pero a su vez se tendrá información cuantitativa proveniente de la cuantificación de las emisiones y/o residuos generados por esos recursos consumidos y sus características más relevantes.

Para alcanzar este ítem inicialmente se debe definir el sistema de estudio, y en cuanto al alcance debe estar lo suficientemente definido para asegurar que el nivel de detalle logre cumplir con el objetivo propuesto teniendo en cuenta el sistema de producto y sus funciones, la unidad funcional y los límites del sistema. Es importante tener presente que la técnica de ACV es iterativa, y mientras se recopilan los datos e información, pueden tener que modificarse diversos aspectos del alcance para cumplir con el objetivo original del estudio.

Esta fase implica la recolección de los datos y los procedimientos de cálculo para cuantificar las entradas (recursos) y las salidas (residuos y/o emisiones) pertinentes de un sistema de producto, este es un proceso iterativo ya que, a medida que se recolecta información se aprende más sobre el sistema de estudio, donde se pueden identificar nuevos requisitos o limitaciones que conlleven a ajustes en los procedimientos de recopilación de datos de manera que se pueda alcanzar el objetivo base.

Se proceden a detallar las acciones necesarias para cumplir este inciso:

### **Identificación y selección del sistema**

A partir de vigilancia tecnológica la cual es un proceso sistemático y permanente de búsqueda, captación, recolección, análisis y difusión de información pública estratégica en el entorno de la organización, así como del seguimiento y análisis del entorno de los competidores. Se buscará un sistema de potabilización de agua acorde al marco de estudio, que para este caso inicialmente se tiene el sistema de potabilización Mark el cual será aplicado en comunidades rurales del departamento de Antioquia donde se pretende implementar la metodología de análisis de ciclo de vida (ACV).

### **Elaboración de diagrama de flujo**

Considerando las etapas de construcción e implementación se elaboraron diagramas de flujo que desglosen los pasos a seguir para recorrer el sistema en estudio, así como las relaciones que tienen lugar dentro del mismo, sus etapas y los tiempos empleados.

### **Identificación de recursos consumidos**

En este paso se identificarán y clasificarán las materias primas consumidas, así como la cantidad, distancia, tipo y eficiencia del vehículo, tiempos de recorrido, tipo y cantidad de combustible para así lograr una evaluación detallada de cada recurso demandado en el ciclo de vida del proceso o producto.

### **Determinación de emisiones y/o residuos generados**

Mediante el uso de factores de emisión y ponderación se asignará la significancia o grado de afectación al medio ambiente.

La ponderación consiste en establecer unos factores que otorgan una importancia relativa a las distintas categorías de impacto para después sumarlas y obtener un resultado ponderado en forma de un único índice ambiental global del sistema.

## **4.2 Determinación de Impactos Ambientales**

Para desarrollar este objetivo se aplicará una metodología mixta ya que se contará con información cualitativa proveniente del levantamiento de la línea base y de la selección y asignación de las categorías de impacto, pero a su vez se tendrá información cuantitativa proveniente de la conversión de los datos de dichas categorías para entender las afectaciones potenciales.

En esta fase se evalúan los impactos ambientales potenciales utilizando como base el resultado del inventario de ciclo de vida (ICV). Este proceso implica la asociación de los datos de inventario con las categorías de impactos ambientales seleccionadas y con los indicadores de esas categorías, para así entender estos impactos.

Se proceden a detallar las acciones necesarias para cumplir este inciso:

### **Levantamiento de la línea base**

Se debe conocer y hacer una cuantificación de la zona de estudio inicialmente, es decir, establecer el punto de partida del proyecto o intervención previa a la implementación del sistema para entender y comparar las posibles mejoras o daños causados al momento de implementar el nuevo sistema de potabilización de agua.

### **Selección de categorías de impacto ambiental**

De acuerdo con los recursos consumidos y las emisiones generadas se asignarán las categorías de impacto, indicadores de categoría y modelos teniendo en cuenta que inicialmente se contara con el software SimaPro para la elaboración de este trabajo, el cual es líder mundial en modelización y elaboración de informes de Análisis del Ciclo de Vida (ACV), con recogida de datos intuitiva y análisis de resultados. Permitiendo a los profesionales del ACV influir en las

decisiones empresariales ayudando a ahorrar dinero, reducir el riesgo, comunicar los beneficios del producto y aumentar los ingresos.

### **Asignación de categorías de impacto a las sustancias del inventario**

Con base a las categorías de impacto seleccionadas se asignarán las sustancias del inventario a cada categoría implementada. En esta fase se asignan los datos procedentes del inventario a cada categoría de impacto según el tipo de efecto ambiental esperado. Una categoría de impacto es una clase que representa las consecuencias ambientales generadas por los procesos o sistemas de productos.

### **Conversión de los datos**

En este apartado se representan el grado de contribución de cada categoría de impacto sobre las categorías de daño para así entender las afectaciones potenciales de vital intervención.

### **Nomenclatura de los resultados**

Para una mejor presentación de los resultados las etapas analizadas se clasificaron de la siguiente forma, teniendo en cuenta la zona de estudio que comprende la vereda Curití o El Carmelo:

**ACV del STAP de Vereda:** Análisis de ciclo de vida del sistema de tratamiento de agua potable de vereda.

**A1:** Transporte (UdeM - Vereda): Transporte desde la Universidad de Medellín a Vereda.

**B1:** Uso STAP - Vereda: Uso del sistema de tratamiento de agua potable en Vereda.

**C1:** Sustitución de PP - Vereda: Sustitución de polipropileno en Vereda.

**C2:** Transporte PP relleno sanitario - Vereda: Transporte de polipropileno a relleno sanitario de Vereda.

**C3:** Tratamiento PP relleno sanitario - Vereda: Tratamiento de polipropileno en relleno sanitario de Vereda.

#### **4.3 Estimación del Costo del Ciclo de Vida de la Construcción e Implementación del Sistema Individual de Tratamiento de Agua Potable en Comunidades Rurales.**

Para desarrollar este objetivo se aplicará una metodología cuantitativa ya que se contará con información numérica proveniente de los costos asociados a los recursos consumidos por el sistema a lo largo de su ciclo de vida.

Se proceden a detallar las acciones necesarias para cumplir este inciso:

##### **Costo de materias primas usadas**

Con base en las compras de materiales ejecutadas tanto para la fase de construcción e implementación y su trazabilidad, se organizarán los gastos asociados a cada una de estas materias primas necesarias en una hoja de Excel.

##### **Costo por consumos de combustibles**

En esta fase se analizarán las fuentes de energía que utilizan los vehículos que transportan esas materias primas como es el caso de los combustibles fósiles.

##### **Costo de mano de obra**

En este apartado con base en el rendimiento expresado en horas hombres se calcularán los gastos directos asociados a la mano de obra en las fases de construcción e implementación del sistema de potabilización.

## **5 Generalidades**

El análisis de ciclo de vida conocido por sus siglas como (ACV) es una metodología de carácter holístico que permite evaluar cada etapa del ciclo de vida un producto o servicio a través de la recopilación de datos de entrada y salida de un sistema de estudio predeterminado, donde se

logran identificar los procesos con los impactos ambientales más significativos para posteriormente proponer acciones de mejora, siendo este un instrumento que se considera transversal en el mundo actual que se encuentra sometido a grandes cambios climáticos. Mediante esta herramienta se pueden evaluar las cargas ambientales asociadas a las etapas de ensamblaje y uso de un sistema de potabilización individual (Mark) aplicado a comunidades rurales para así dar conocer su factibilidad ambiental.

El proyecto Safewater “Tecnología de bajo costo para aguas potables en regiones en vía de desarrollo” es un macroproyecto que busca atender la necesidad de agua segura a nivel mundial conformado por diferentes organizaciones internacionales como lo son Ulster University, Universidad de São Paulo, Cántaro Azul y UK Research and Innovation y por parte de Colombia el Centro de Ciencia y Tecnología de Antioquia y la Universidad de Medellín, esta vez centrándose sus enfoque en comunidades rurales del departamento de Antioquia donde se lograron implementar un total 54 sistemas de potabilización, estos ubicados específicamente en la vereda de Curití ubicada en el municipio de Liborina Antioquia y la vereda El Carmelo ubicada en el municipio del Peñol Antioquia, el criterio de selección de las viviendas tuvo en cuenta variables como la carencia de este recurso básico, la cantidad de niños y ancianos en cada vereda y la distancia de estas a la ciudad de Medellín Antioquia y fue realizado previo a esta investigación por otros equipos encargados. A continuación, se describen estas dos veredas seleccionadas.

## **5.1 Zonas de Estudio**

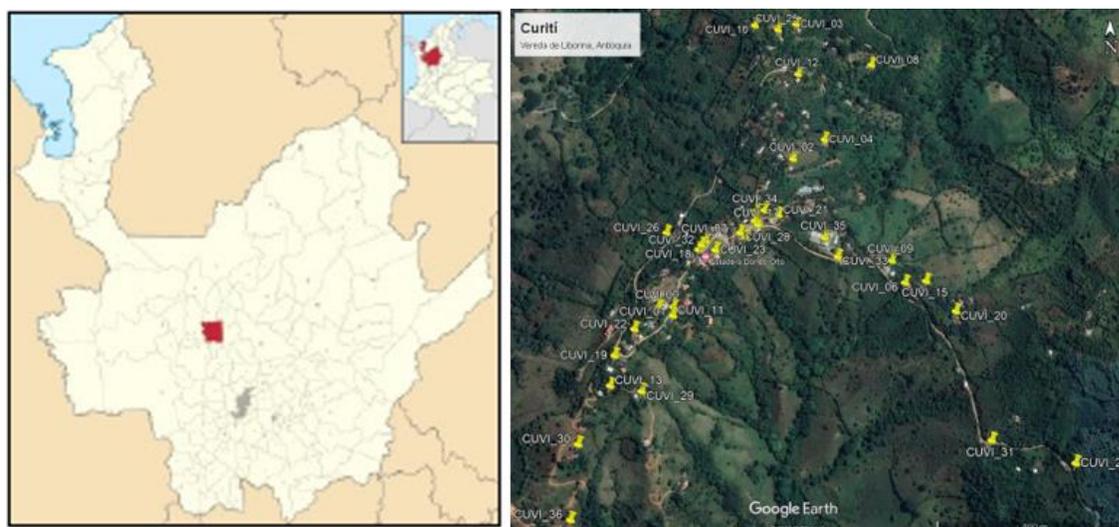
### **Vereda Curití municipio de Liborina Antioquia**

La vereda Curití pertenece al municipio de Liborina el cual se encuentra ubicado en la subregión del occidente antioqueño, en dicha vereda habitan aproximadamente 86 familias que

no cuentan con servicio público de agua potable, sin embargo, cuentan con un acueducto veredal que se abastece de tres nacimientos correspondientes a la microcuenca de Juan Barriga con lo cual se proporciona el agua necesaria al tanque de almacenamiento principal ubicado en la zona, para así proveer a estas familias del preciado líquido. En la **Figura 9** se observa la ubicación de esta vereda en el mapa de Antioquia y la distribución existente de los sistemas de potabilización Mark en su territorio, con su correspondiente código; cabe destacar, que para esta vereda se implementaron un total de 38 sistemas distribuidos en 37 hogares y 1 escuela.

### Figura 9

*Ubicación de la Vereda Curití Liborina en el Mapa de Antioquia y Distribución de los Sistemas de Potabilización Mark en la Vereda Representados con una Chincheta Amarilla*



*Nota. CUVI\_numero: Curití\_vivienda\_número asignado. Reproducida de proyecto Safewater.*

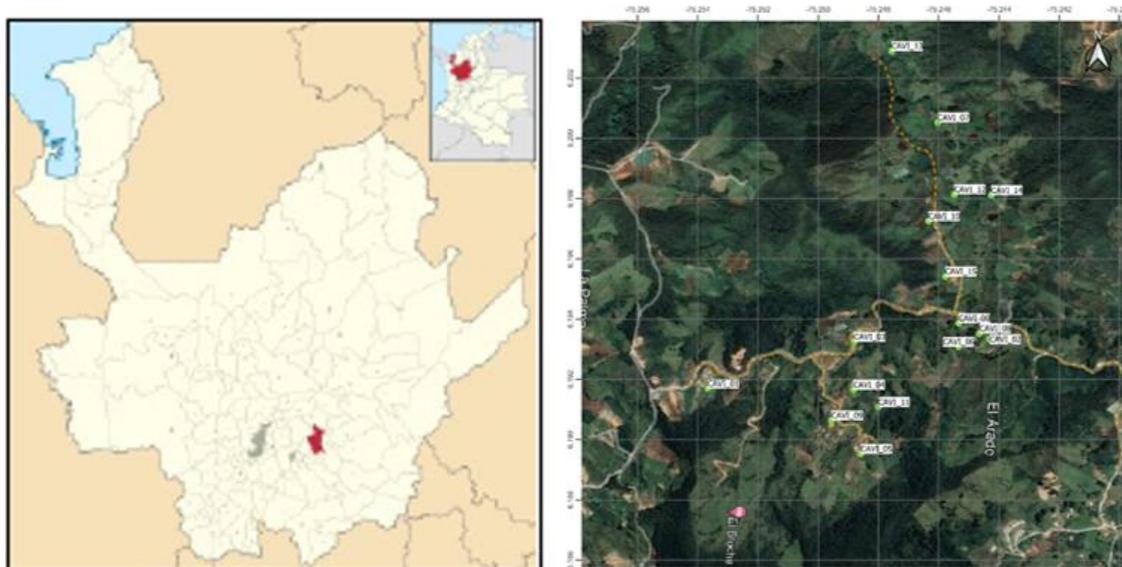
### Vereda El Carmelo municipio El Peñol Antioquia

La vereda El Carmelo pertenece al municipio El Peñol el cual se encuentra ubicado en el Oriente Antioqueño, en dicha vereda habitan aproximadamente 30 familias, quienes no cuentan con servicio público de acueducto y agua potable, a diferencia del Peñol que cuenta con una cobertura de acueducto y de agua potable del 100% en el área urbana, mientras que en el área

rural la cobertura total de acueducto es de 73% y la de agua potable del 63%. El Carmelo está ubicado en el área de influencia de la microcuenca El Pozo, la cual abastece el casco urbano del municipio del Peñol y los habitantes de la vereda El Carmelo a través de captaciones artesanales. Dada esta situación los habitantes se abastecen de pequeños abastos, acequias o mangueras. En la **Figura 10** se observa la ubicación de esta vereda en el mapa de Antioquia y la distribución existente de los sistemas de potabilización Mark en su territorio con su correspondiente código; cabe destacar, que para esta vereda se implementaron un total de 16 sistemas distribuidos en 15 hogares y 1 escuela.

### Figura 10

*Ubicación de Vereda El Carmelo El Peñol en el Mapa de Antioquia y Distribución de los Sistemas de Potabilización Mark III en la Vereda Representados con un Punto Verde*

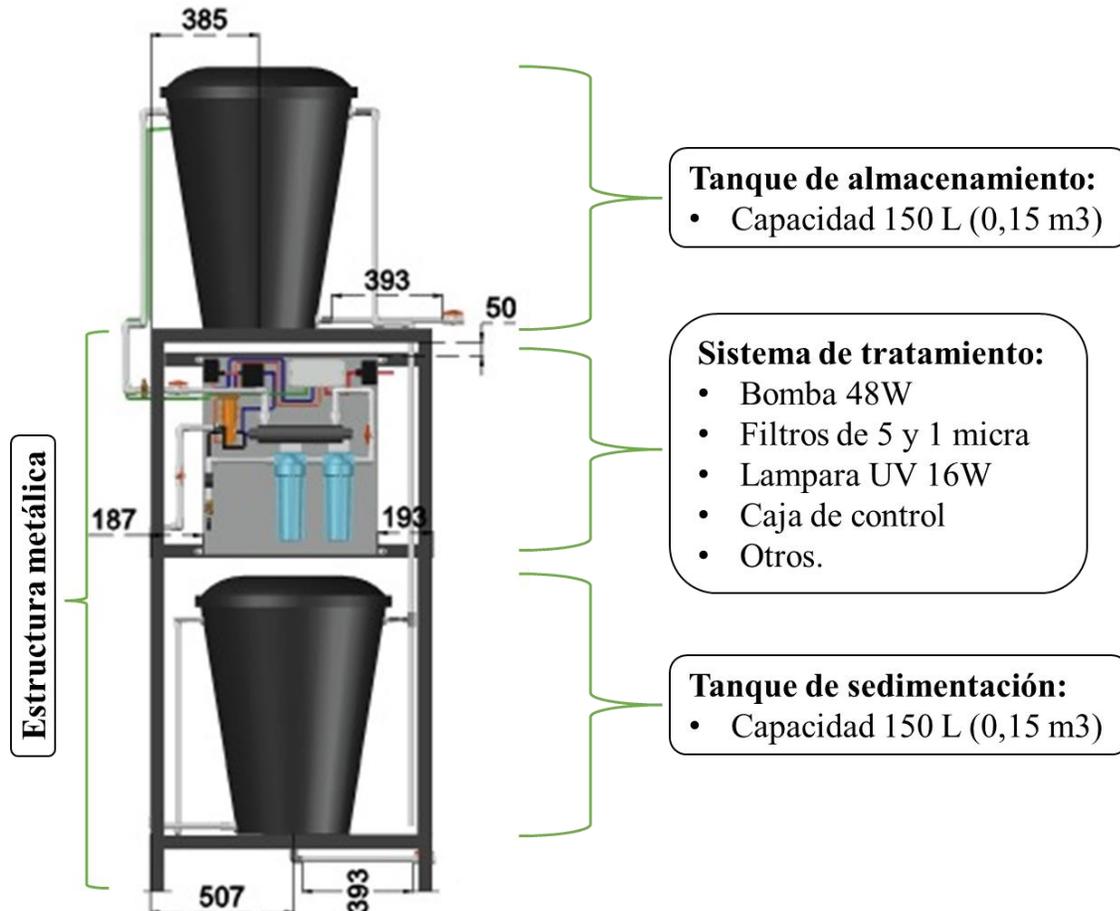


*Nota.* CAVI\_numero: Carmelo-vivienda\_número asignado. Reproducida de proyecto Safewater.

## 5.2 Sistema de Tratamiento de Agua Potable (Mark)

El sistema de potabilización Mark hace parte de un prototipo desarrollado y adaptado al contexto local dentro del macroproyecto Safewater por las organizaciones que lo representan, el

cual es un centro de investigación transdisciplinar que trabaja para suministrar agua potable limpia en zonas subdesarrolladas de todo el mundo. Este sistema será proporcionado a estas comunidades para dar acceso a agua potable cumpliendo con los estándares establecidos por la organización mundial de la salud, siendo este un sistema individual de tratamiento de agua potable compacto como se puede ver en la **Figura 11**, el cual, está conformado por un tanque de sedimentación en la parte inferior y otro tanque de almacenamiento en la parte superior ambos con una capacidad total de 150 litros, soportados bajo una estructura metálica cimentada en una losa de fundación. En la parte central de la estructura se encuentra el sistema de tratamiento de agua cubierto por una caja metálica el cual, contiene dos filtros uno de 5 y 1 micra por donde pasa el agua para ser filtrada para luego pasar al proceso de desinfección a través de una lámpara UV, y posteriormente ser elevada al tanque de almacenamiento mediante un sistema de bombeo apoyado por una bomba de succión que transporta el agua desde el tanque sedimentador hasta el tanque de almacenamiento, para así finalmente ser entregada a las llaves de salida de las respectivas viviendas, cabe destacar que este sistema se encuentra automatizado gracias a una caja de control interna y unos sensores de nivel ubicados en los respectivos tanques. Este sistema cuenta con un rendimiento de producción de agua potable de 150 litros cada 45 minutos.

**Figura 11***Sistema de Potabilización Mark*

*Nota.* Adaptada de proyecto *Safewater*.

## 6 Resultados y Análisis

En los siguientes ítems se aplica la metodología seleccionada al caso de estudio, y se dan detalles de las decisiones tomadas y variables consideradas para llegar a los resultados específicos, los cuales van acompañados de su respectiva interpretación.

## **6.1 Análisis de Ciclo de Vida del Sistema de Potabilización Mark en Comunidades Rurales**

El análisis de impactos ambientales se realizó utilizando la metodología ACV siguiendo los estándares descritos por la norma ISO 14044 que involucra cuatro fases iterativas: 1) definición de objetivos y alcance, 2) análisis de inventario, 3) evaluación de impacto ambiental, y 4) interpretación de resultados (ISO, 2006b). Los análisis se desarrollaron con el software disponible SimaPro versión 8.0.3.14.

La **Figura 4** mencionada anteriormente muestra las cuatro fases desarrolladas bajo esta metodología, donde es importante resaltar que estas no son secuenciales debido a que el ACV es una técnica de enfoque iterativo, que permite aumentar el nivel de detalle a través de sucesivas iteraciones (Balaguera Quintero, 2018).

### **6.1.1 Definición de Objetivos y Alcance**

#### **General**

Evaluar los impactos ambientales de un sistema de potabilización individual que atenderá la demanda de agua potable en viviendas de comunidades rurales del departamento de Antioquia. Casos de estudio: vereda Curití Liborina Antioquia y vereda El Carmelo El Peñol Antioquia.

#### **Específicos**

- Definir las entradas y salidas del sistema de estudio que comprende las etapas de ensamblaje y uso del sistema de potabilización Mark.
- Desarrollar el análisis de inventario del ciclo de vida del sistema de estudio identificando los recursos consumidos, emisiones y/o residuos generados en las etapas de ensamblaje y uso del sistema de potabilización Mark.

- Evaluar los impactos ambientales más significativos de las diferentes etapas del sistema de estudio.
- Proponer acciones de mejora frente a los hallazgos encontrados que ayuden a mitigar los impactos ambientales negativos.

### **Alcance**

Se define de la puerta a la puerta ya que, se realiza el análisis desde el momento en que llegan los componentes del sistema de potabilización a la Universidad de Medellín y se realiza un ensamblaje inicial; Adicionalmente, se incluirán las etapas de transportes de componentes del sistema a la zona rural y su uso.

### **Escenarios considerados**

Etapas de ensamblaje: Ensamblaje del sistema individual de tratamiento de agua (incluyendo el transporte de los componentes desde la Universidad de Medellín (UDEM) a la zona rural, pero excluyendo su manufactura y la herramienta menor para la construcción).

Etapas de uso: Funcionamiento del sistema individual de tratamiento de aguas (incluyendo consumo de energía y residuos de filtros cartucho de polipropileno generados).

### **Límites del sistema**

En la **Figura 12** se presenta el diagrama de flujo del ciclo de vida del sistema de estudio que comprende las fases de ensamblaje y uso para la producción de agua potable. A continuación, se detallan los procesos que están dentro y fuera del análisis.

- ✓ Procesos incluidos

Transporte de componentes del sistema de potabilización: Se incluyó el impacto generado por uso de combustibles fósiles para el transporte de todos los componentes del sistema

desde la Universidad de Medellín (UDEM) a la zona rural seleccionada, el vehículo utilizado será un camión de carga y las distancias están dadas en kilómetros.

Fuente de agua natural: Se consideró su procedencia ya que se genera un agotamiento de recursos abióticos. Las aguas presentes en estas zonas son de origen natural superficial, cabe mencionar que varía un poco su calidad dependiendo de la zona, ya que, se conoce que el agua que llega a la vereda Curití, Liborina, Antioquia pasa por un proceso de sedimentación previo gracias al acueducto veredal, mientras que para la vereda El Carmelo, El peñol, Antioquia el agua es tomada directamente de nacimientos presentes en el sitio sin ningún tratamiento previo, por lo cual se hizo un aproximado para este estudio considerando para todos los casos que se tenía agua de origen natural superficial, ya que no se generan tratamientos previos importantes sobre ella y era el escenario más crítico.

Proceso de tratamiento del agua: Se incluyó el impacto generado por el consumo de energía debido al proceso de tratamiento del agua natural, que consta del proceso de sedimentación el cual, se da por gravedad, adicionalmente, se tiene las etapas de filtración con filtros de polipropileno de 5 y 1 micra y desinfección a través de lámpara UV, para estas dos últimas etapas se tienen consumos directos de energía, que son importantes de analizar ya que según algunos estudios realizados a sistemas de tratamiento de agua potable las mayores cargas ambientales se presentan en la etapa de funcionamiento debido al consumo de energía (Barrera Pérez et al., 2020; Godsken et al., 2013; Goga et al., 2019; Igos et al., 2014; Manda et al., 2014; Prézélus et al., 2021; Raluy et al., 2005; Ribera et al., 2014; Saad et al., 2019; Stokes & Horvath, 2006; Varón-Hoyos et al., 2019; Vince et al., 2008).

Residuos de filtros cartucho de polipropileno (PP) termofusionado: Debido a que, para este insumo se tiene la mayor periodicidad de cambio o sustitución que va desde 1 a 9 meses esto

según la calidad del agua de entrada la cual se podía ver afectada por algunos eventos climáticos, ya que, a mayor turbiedad del agua se disminuirá la vida útil del filtro, por lo que era importante evaluar la incidencia ambiental que tenía la sustitución de este material y su disposición final en el sistema de estudio.

✓ Procesos excluidos

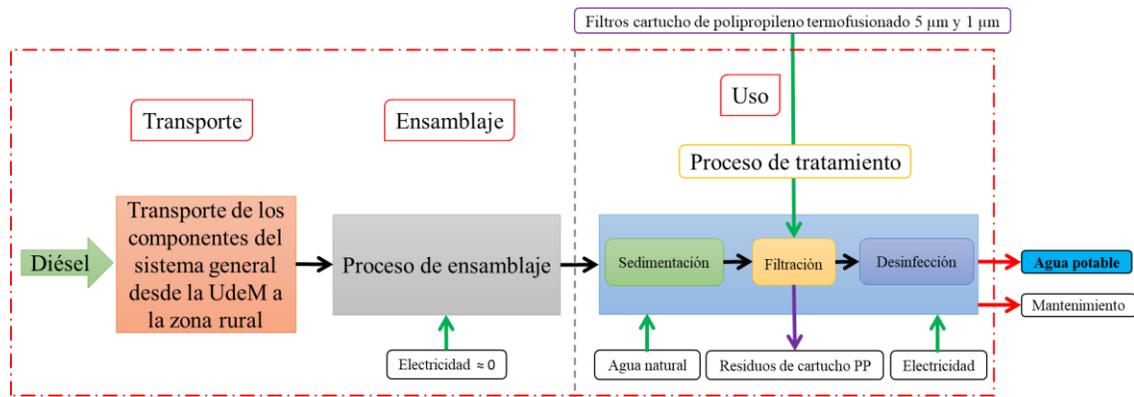
Manufactura de la materia prima del sistema de potabilización: No se consideró la manufactura de las materias primas del sistema ya que, no hace parte del alcance del estudio.

Etapas de mantenimiento: No se consideró debido a que el mantenimiento de este sistema es relativamente sencillo y tampoco produce impactos considerables para tener en cuenta a corto plazo, más que la limpieza de los lodos que se van acumulando en el tanque de sedimentación y almacenamiento.

Consumo energético de la caja de control: No se incluye dentro del análisis ya que, su consumo es mínimo, debido a que, solo se encarga de encender y apagar los equipos que tratan el agua con la ayuda de algunos sensores de nivel ubicados en los tanques de sedimentación y almacenamiento para así, automatizar el sistema y tener disponibilidad de agua potable cuando se necesite.

**Figura 12**

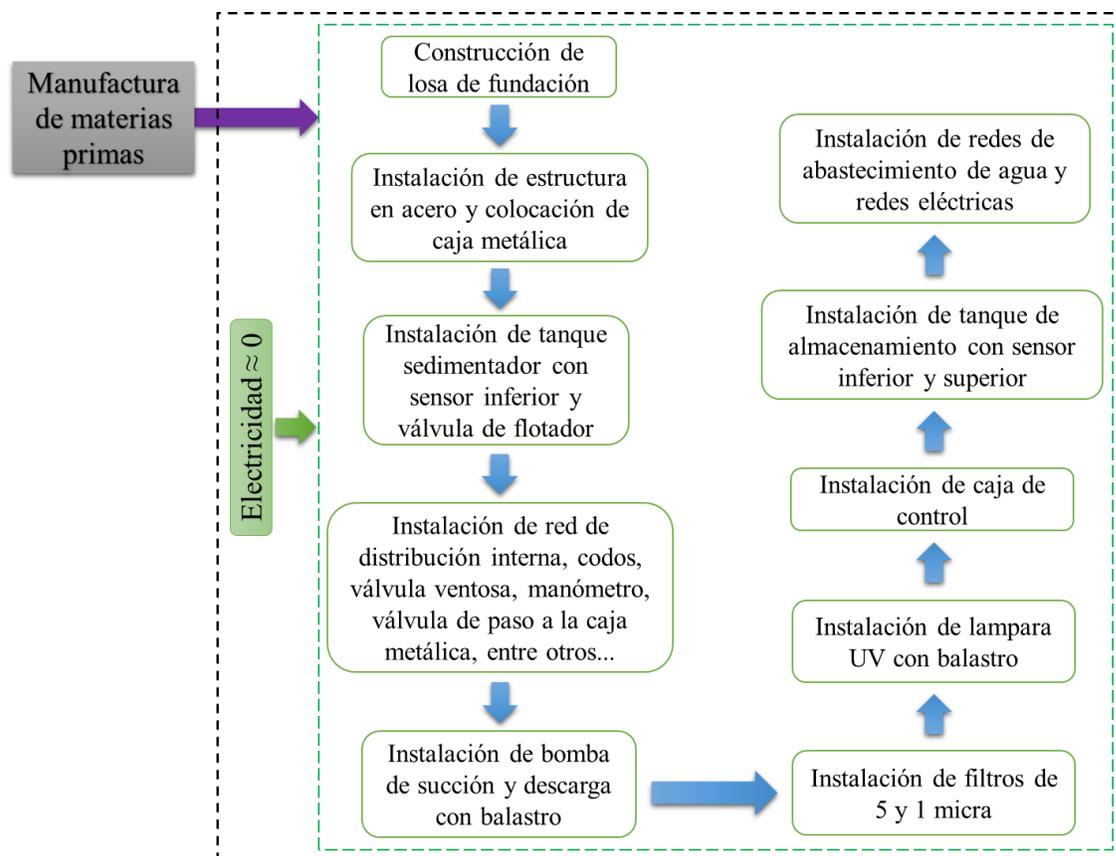
*Diagrama de Flujo del Ciclo de Vida de la Producción de Agua Potable a Través del Sistema de Potabilización Mark (Sistema de estudio)*



A continuación, en la **Figura 13** se esquematiza de una forma más clara las etapas correspondientes al proceso de ensamblaje del sistema de tratamiento de agua potable Mark.

**Figura 13**

*Proceso de Ensamblaje del Sistema de Potabilización Mark en la Zona Rural*



### Unidad funcional

La unidad funcional analizada se eligió como:

“1 m<sup>3</sup> de agua potable tratada en un sistema de potabilización individual (Mark)”.

Esta unidad funcional o de referencia se eligió con el fin de facilitar la interpretación de resultados y a su vez, poder generar algunas comparaciones con estudios similares sobre sistemas de tratamientos de agua potable que también eligieron esta misma unidad funcional, como los elaborados por: (Amores et al., 2013; Barrera Pérez et al., 2020; Barrios et al., 2008; Bonton et al., 2012; Cáceres Huisacayna, 2016; Godskesen et al., 2013; Igos et al., 2014; Manda et al.,

2014; Montoya Flores, 2021; Ortiz Rodriguez et al., 2016; Prézélus et al., 2021; Ribera et al., 2014; Saad et al., 2019; Varón-Hoyos et al., 2019; Vince et al., 2008).

### **6.1.2 Análisis de Inventario**

En esta etapa, se definió el consumo de recursos atribuibles a cada una de las etapas que conforman el ciclo de vida del sistema de estudio establecido en la **Figura 12**, teniendo como herramienta principal la información recopilada durante el proceso potabilización de 1 m<sup>3</sup> de agua en comunidades rurales.

#### **A) Transporte de todos los componentes del sistema de potabilización desde la Universidad de Medellín (UdeM) a la zona rural**

Para el cálculo de los impactos asociados a esta etapa se utilizaron los siguientes datos en el modelo, los cuales se encuentran organizados en la **Tabla 1**.

- El peso total del sistema de potabilización es de aproximadamente 40 kilogramos, esto sin considerar los materiales para la fabricación de la losa de fundación ya que, esta se elaboró por separado con materiales comprados en la zona.
- las distancias de cada vereda a la Universidad de Medellín como punto de partida están dadas en kilómetros y se calcularon según Google Maps.
- El camión de carga utilizado para transportar los componentes del sistema de potabilización a la zona rural fue el mismo para ambas veredas, el cual, se escogió de la base de datos Ecoinvent versión 3.0.2.1 que incluía el software SimaPro, ya que, este cuenta con la capacidad de carga necesaria para transportar estos insumos a la zona: (Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO5 {GLO}| market for | Alloc Def, U).

**Tabla 1**

*Peso y Distancia Recorrida para Transportar los Componentes del Sistema de Potabilización a la Zona Rural*

<b>Vereda</b>	<b>Material</b>	<b>Peso (Ton)</b>	<b>Distancia (Km)</b>	<b>Datos de entrada SimaPro (Ton*Km)</b>
Curití	Componentes del sistema de potabilización	0,04	83,8	3,352
El Carmelo			72,7	2,908

### **Ensamblaje del sistema de potabilización Mark**

Teniendo en cuenta que, en esta etapa el consumo de energía fue despreciable ya que, los equipos utilizados eran en su mayoría manuales a excepción del taladro atornillador, cabe destacar que, este último se utilizó muy poco por lo cual se despreció por completo el impacto por consumo de energía en esta fase.

### **B) Uso del sistema de potabilización Mark**

- ✓ Agua natural

Para el cálculo de los impactos asociados a esta etapa se utilizaron los siguientes datos en el modelo, los cuales, se encuentran organizados en la **Tabla 2**.

- Se tuvo en cuenta el consumo de agua natural con base a la unidad funcional de 1m<sup>3</sup> de agua potable, ya que, esto genera un agotamiento de recursos abióticos y este es un recurso vital en la actualidad, por lo cual, se escogió como materia prima de la base de datos del software SimaPro agua de origen natural no especificado de Colombia, ya que, no se cuenta con datos de agua de origen natural superficial: (Water, unspecified natural origin, CO).

**Tabla 2**

*Consumo de Agua Natural del Sistema para Producir 1 m<sup>3</sup> de Agua Potable*

<b>Tipo de agua</b>	<b>Consumo (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Consumo (Kg)</b>
Origen natural no especificado de Colombia	1	1000

✓ Energía

La **Tabla 3** y **Tabla 4** presentan los datos utilizados en el cálculo del consumo de energía de cada equipo del sistema de tratamiento.

- Se realizó el cálculo del consumo de energía (KWH) de cada equipo (Bomba diafragma Seaflo serie 21 y Lámpara UV Marca Evans o Phillips) de forma independiente, este proceso se llevó a cabo multiplicando la tensión (Voltios) por la intensidad de la corriente eléctrica (Amperios) que da como resultado la potencia (Watt o Vatio), luego esa potencia se pasa a kilowatt dividiéndola por mil, y así por último esta se multiplica por el tiempo de uso en (Horas) que se necesita para producir 1 m<sup>3</sup> de agua potable como se muestra en la **Tabla 3**.
- El rendimiento del sistema para producir agua potable es de 150 litros cada 45 minutos, por lo cual el tiempo de uso de la bomba es de 45 minutos sin embargo el de lámpara uv es de aproximadamente 50 minutos ya que, esta se prende antes de iniciar el bombeo para purgar el conducto y poder calentarse, debido a la automatización de este, como se muestra en la **Tabla 3**.
- Para el caso de la producción energética mixta del país, ya que no se cuenta con la matriz de generación eléctrica de Colombia en el software SimaPro, se hizo una búsqueda de países latinoamericanos que tuvieran una matriz energética similar que

contara con las mismas variables de generación de energía, en los cuales se encontró a Brasil (BR) y Perú (PE) sin embargo se optó por este último ya que en cuanto a nivel de población hay más similitud con Colombia, por lo cual se adaptó la matriz energética del Perú de tensión media con los datos de producción energética propios de Colombia en el 2018, presentados en un informe publicado en la paginada web del Banco Interamericano de Desarrollo (BID) como se muestra en la **Tabla 4** (Planas Marti & Cárdenas, 2019).

**Tabla 3**

*Consumo de Energía de los Equipos que Conforman el Sistema de Tratamiento de Agua Potable*

<b>Equipos</b>	<b>Tensión o voltaje (V)</b>	<b>Intensidad de la corriente eléctrica (A)</b>	<b>Potencia (KW)</b>	<b>Tiempo de uso (H)</b>	<b>Consumo de energía (KWH) para 150L</b>	<b>Consumo de energía (KWH) para 1m3</b>
Bomba diafragma Seaflo serie 21	12	4	0,05	0,75	0,036	0,24
Lámpara UV Marca Evans o Phillips	-	-	0,02	0,83	0,01	0,09

*Nota.* Consumos de energía equivalentes a la producción de 150 L (0.15 m3) de agua potable como capacidad máxima del sistema y de 1 m3 de agua potable como unidad funcional.

**Tabla 4***Matriz de Generación Eléctrica Colombiana*

Fuente de energía	Porcentaje de producción (%)	Producción (Mega-Watts)
Hidráulica	68,4	1184140,8
Gas natural	13,3	230249,6
Combustibles líquidos	7,8	135033,6
Carbón	9,5	164464,0
Fuentes no convencionales de energía renovable (eólica, solar y biomasa)	1,0	17312,0
<b>Total</b>	<b>100</b>	<b>17312</b>

*Nota.* Adaptada de Energía para el futuro, por Maria Alexandra Planas Marti y Juan Cárdenas, 2019, (<https://blogs.iadb.org/energia/es/la-matriz-energetica-de-colombia-se-renueva/>).

### **C) Disposición de residuos de filtros cartucho de polipropileno (PP) termofusionado**

Para el cálculo de los impactos asociados a la sustitución de los filtros cartucho de polipropileno termofusionado, el transporte de estos residuos al relleno sanitario y su posterior tratamiento, se utilizaron los siguientes datos en el modelo, los cuales, se encuentran organizados en la **Tabla 5**.

- El material utilizado más similar para representar los filtros se tomó de la base de datos Ecoinvent versión 3.0.2.1 que incluía el software SimaPro: (Polypropylene, granulate {GLO}| market for | Alloc Def, U).
- El peso total de los filtros de 1 y 5 micras es de 235 gramos.

- Para el cálculo del peso de filtros necesarios para producir 1 m<sup>3</sup> de agua potable se consideró un periodo de análisis de un año, donde se tuvo en cuenta el escenario más crítico en el cual, se cambiaban los filtros cada mes, adicionalmente, se tiene como dato que se consumen 0,15 m<sup>3</sup> agua potable cada día, como se muestra en la **Tabla 5**.
- las distancias de cada vereda a los distintos rellenos sanitarios correspondientes están dadas en kilómetros y se calcularon según Google Maps.
- El camión de carga que se utilizó para transportar estos residuos de filtros fue el mismo para ambas veredas, el cual, se escogió de la base de datos Ecoinvent versión 3.0.2.1 que incluía el software SimaPro: (Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO5 {GLO}| market for | Alloc Def, U).
- El proceso de tratamiento de los residuos de filtros en el relleno sanitario se escogió de la base de datos Ecoinvent versión 3.0.3.0 que incluía el software SimaPro: (Municipal solid waste (waste treatment) {GLO}| market for municipal solid waste | Alloc Def, U).

**Tabla 5**

*Peso y Distancia Recorrida para Transportar los Residuos de Cartucho PP al Relleno Sanitario*

*Correspondiente*

<b>Residuos solidos</b>	<b>Peso total (Kg)</b>	<b>Peso total para 1 m3 (Kg)</b>	<b>Recolección</b>	<b>Disposición final</b>	<b>Distancia (Km)</b>	<b>Datos de entrada SimaPro (Ton*Km)</b>
Filtros cartucho de PP de 1 y 5 micras	0,235	0,052	Curití, Liborina, Antioquia	Relleno sanitario Miraflores	71,8	0,004
			El Carmelo, El Peñol, Antioquia	Relleno sanitario Las Hoyeras	20,1	0,001

*Nota.* Consumo de filtros cartucho de PP equivalentes a la producción de 1 m3 de agua potable.

### **6.1.3 Evaluación de Impactos Ambientales**

Se utilizó el software disponible SimaPro versión 8.0.3.14, con el método de evaluación de impacto ReCiPe (H) versión Jerarquista de punto medio, con normalización del mundo, versión 1.10, actualizado a mayo de 2014, utilizando la base de datos Ecoinvent versión 3.01, para así identificar cuáles eran los impactos ambientales potenciales.

#### **Categorías de impacto analizadas**

De acuerdo con la norma ISO 14044, uno de los elementos obligatorios en toda evaluación del ciclo de vida de un producto o servicio es “la selección de las categorías de impacto y de los modelos de caracterización” (ISO, 2006b), por lo cual de las 18 categorías de impacto del método ReCiPe (H) analizadas se seleccionaron 4 de interés para este estudio, las cuales fueron:

- Agotamiento del agua
- Cambio climático
- Agotamiento de los fósiles
- Agotamiento de la capa de ozono

Esta selección se hizo con base en el concepto de límites planetarios creado en 2009 por un grupo de científicos del Centro de Resiliencia de Estocolmo, donde se establecieron 9 parámetros determinantes para la estabilidad del planeta como lo son: cambio climático, acidificación oceánica, agotamiento del ozono estratosférico, interferencia con los ciclos globales del fósforo y el nitrógeno, tasa de pérdida de biodiversidad, uso global del agua dulce, cambio de los sistemas terrestres, carga de aerosoles atmosféricos y contaminación química. Se cree que comprender y respetar estos límites es esencial para garantizar un futuro sostenible y justo para la humanidad (Rockström et al., 2009). Por lo cual, se seleccionaron las 4 categorías previamente mencionadas, ya que, son las que se ajustan a estos 9 parámetros de importancia para esta investigación. Cabe destacar que las primeras tres categorías seleccionadas fueron las de mayor significancia en comparación con las 15 restantes.

Una vez procesada la información en el software, se obtuvieron los resultados para cada una de las categorías de impacto anteriormente mencionadas y en función de las etapas que comprenden el sistema de estudio, para las dos zonas de estudio, la vereda Curití en el municipio de Liborina Antioquia y El Carmelo en el municipio del Peñol Antioquia.

En la **Tabla 6**, **Tabla 7** y **Figura 14** se muestran los correspondientes resultados de la caracterización de los datos del inventario por unidad, porcentaje y gráfica de barras respectivamente para la vereda Curití, Liborina, Antioquia.

**ACV del STAP de Curití:****Tabla 6***Matriz de Impactos Ambientales Para Cada Una de las Etapas Analizadas en Curití*

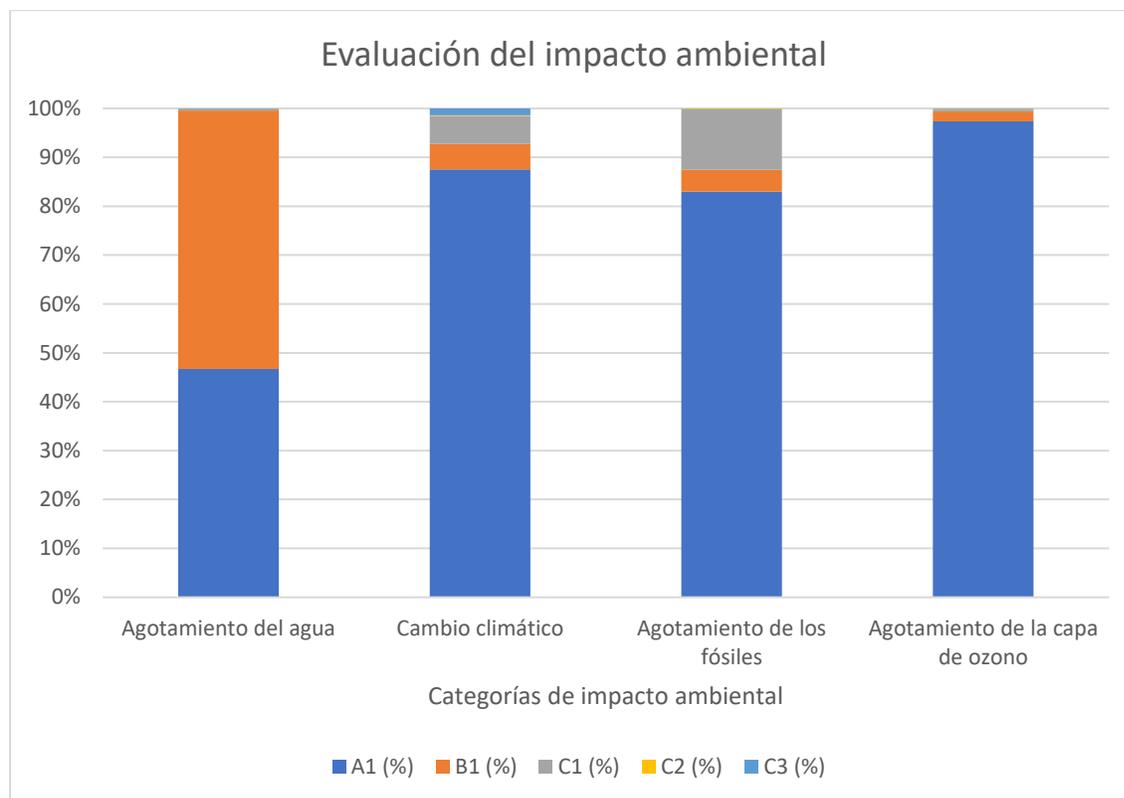
<b>Categoría de impacto</b>	<b>Unidad</b>	<b>A1</b>	<b>B1</b>	<b>C1</b>	<b>C2</b>	<b>C3</b>	<b>Total</b>
Agotamiento del agua	m3	1,06E+00	1,20E+00	6,07E-03	1,27E-03	2,91E-03	2,28E+00
Cambio climático	kg CO2 eq	1,65E+00	9,87E-02	1,08E-01	1,97E-03	2,66E-02	1,88E+00
Agotamiento de los fósiles	kg oil eq	5,59E-01	3,02E-02	8,36E-02	6,67E-04	4,56E-04	6,74E-01
Agotamiento de la capa de ozono	kg CFC-11 eq	1,10E-07	2,31E-09	4,03E-10	1,32E-10	1,50E-10	1,13E-07

**Tabla 7***Matriz de Impactos Ambientales en Porcentaje para cada una de las Etapas Analizadas en Curití*

<b>Categoría de impacto</b>	<b>A1 (%)</b>	<b>B1 (%)</b>	<b>C1 (%)</b>	<b>C2 (%)</b>	<b>C3 (%)</b>	<b>Total (%)</b>
Agotamiento del agua	46,74	52,81	0,27	0,06	0,13	100
Cambio climático	87,51	5,24	5,74	0,10	1,41	100
Agotamiento de los fósiles	82,95	4,49	12,39	0,10	0,07	100
Agotamiento de la capa de ozono	97,36	2,04	0,36	0,12	0,13	100

**Figura 14**

*Gráfico de Barras de Impactos Ambientales en Porcentajes en Curití*



Como se muestra en la **Tabla 7** y **Figura 14** los impactos ambientales mas significativos se producen debido al transporte de los componentes del sistema desde la Universidad de Medellín a la zona rural Curití por la quema de combustibles fósiles, seguido de la etapa de uso que comprende tanto el consumo de agua natural como el uso de energía por los equipos que componen el sistema de tratamiento, seguido de la etapa de sustitución de filtros cartucho de polipropileno termofusionado, seguido y con un impacto casi nulo por la etapa de transporte y tratamiento de los filtros en el relleno sanitario.

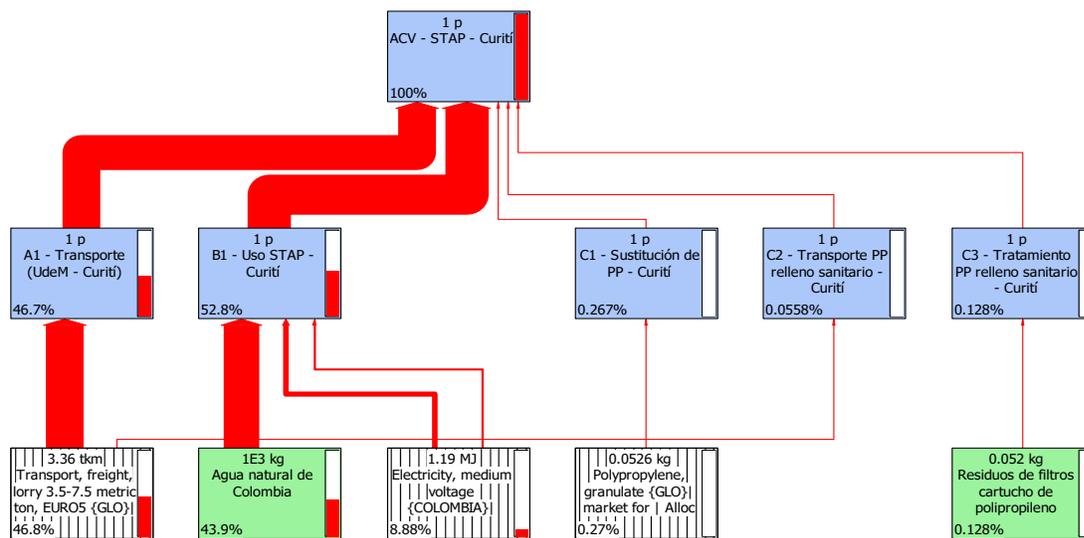
A continuación se analizará cada categoría de impacto de forma individual.

Como se puede observar **Figura 15** los aportes mas predominantes en la categoría de agotamiento del agua se deben principalmente a la etapa de uso con un porcentaje de

participación de 52.8% debido a la extracción del agua para su potabilización y en segundo lugar la etapa de transporte con un porcentaje de participación de 46.7% debido a todos los procesos vinculados a la etapa de transporte que incluye el software como son, el consumo de diésel, el mantenimiento del vehículo, la construcción de carreteras y la producción del vehículo.

**Figura 15**

*Gráfico de red del ACV del STAP de Curití para la Categoría de Agotamiento del Agua*

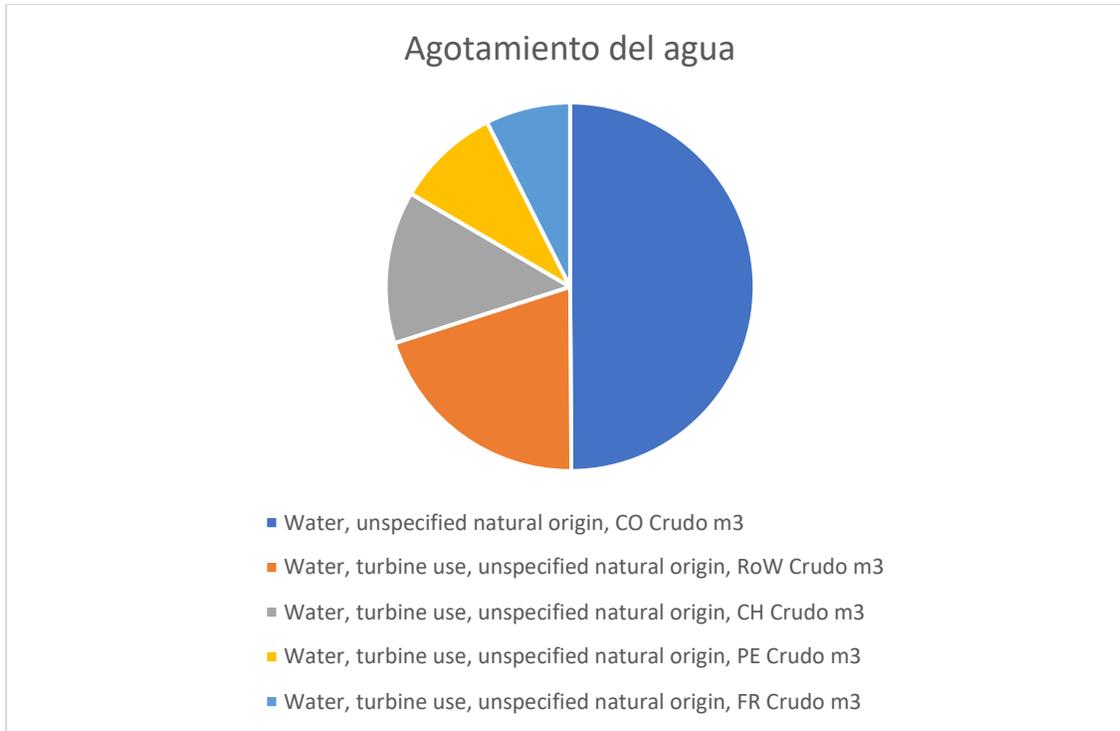


*Nota.* Reproducida de Resultados de Evaluación de Impactos en el Software SimaPro.

También se analizó la sustancia que más impacta al ambiente dentro de esta categoría como se observa en la **Figura 16**. Siendo el consumo de agua de origen natural para potabilizarla el más demandado, y el restante las aguas captadas en los procesos de generación de energía eléctrica como es el caso de las hidroeléctricas que están dentro de la matriz energética Colombiana.

**Figura 16**

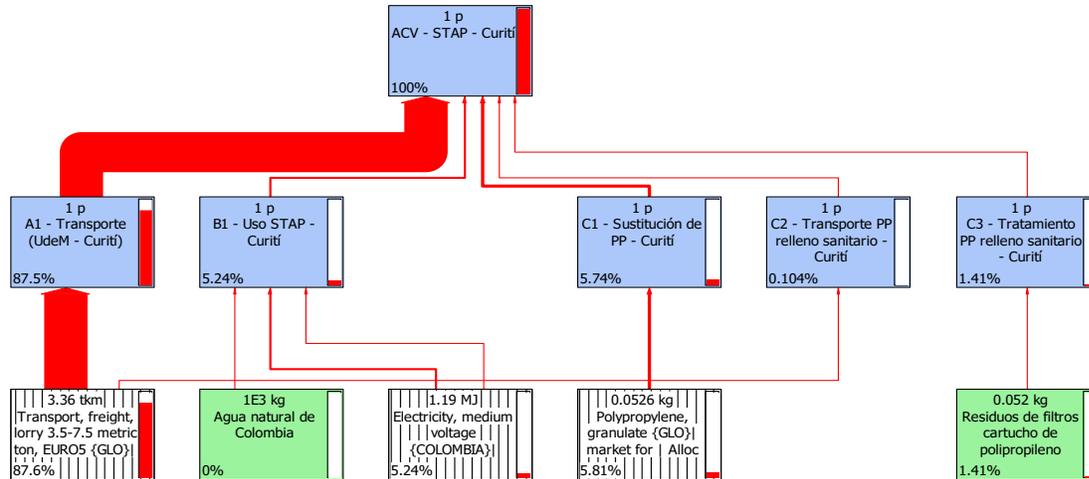
Gráfica de Sectores de la Categoría de Cambio Climático en Curití



Como se puede observar **Figura 17** los aportes mas predominantes en la categoría de cambio climático se deben principalmente a la etapa de transporte con un porcentaje de participacion de 87.5% debido a que, esta etapa genera quema de combustibles fósiles que a su vez, liberan gases de efecto invernadero a la atmosfera aumentando el calentamiento global.

**Figura 17**

*Gráfico de red del ACV del STAP de Curití para la Categoría de Cambio Climático*

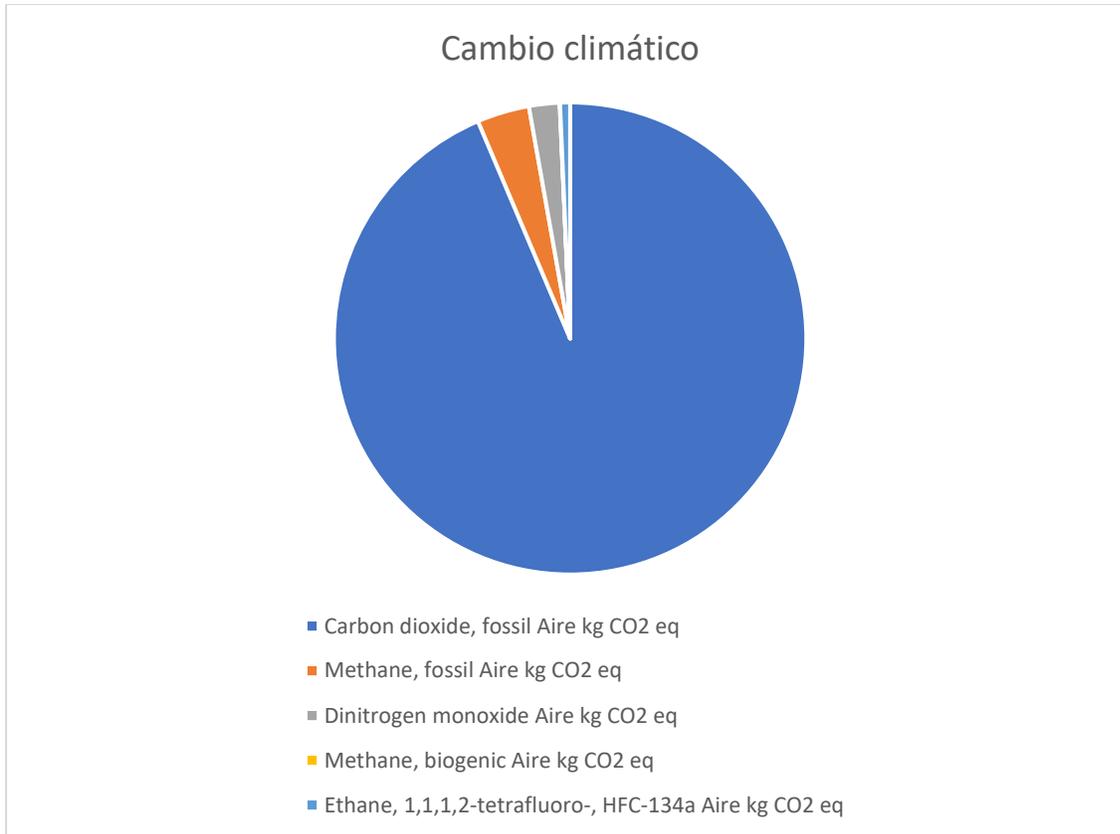


*Nota.* Reproducida de Resultados de Evaluación de Impactos en el Software SimaPro.

La sustancia que mas impacta al ambiente dentro de esta categoria como se observa en la **Figura 18** es el dióxido de carbono producido por la combustión del combustible fósil diésel en la etapa de transporte.

**Figura 18**

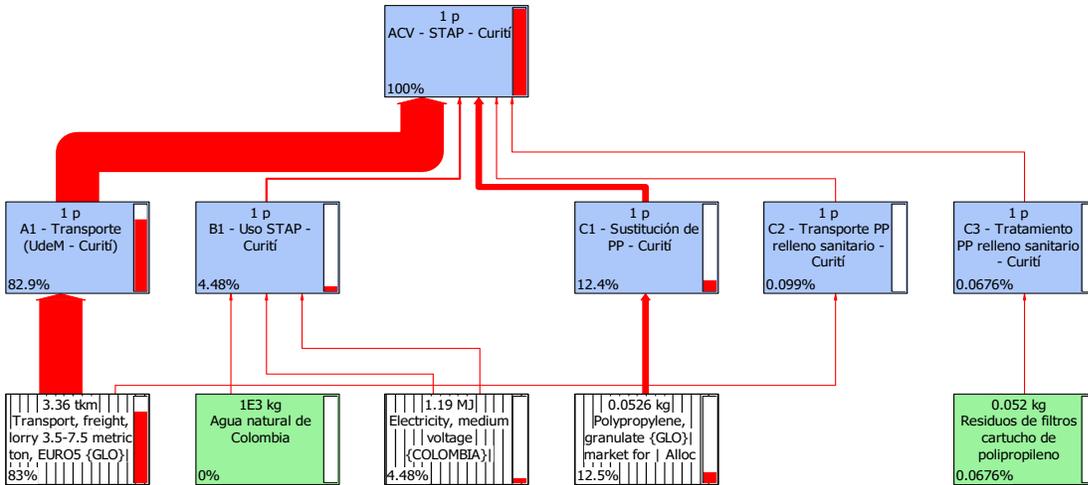
*Gráfica de Sectores de la Categoría de Cambio Climático en Curití*



Como se puede observar **Figura 19** los aportes mas predominantes en la categoría de agotamiento de los fósiles se deben principalmente a la etapa de transporte con un porcentaje de participación de 82.9% debido a que, esta etapa genera quema de combustibles fósiles que a su vez, liberan gases de efecto invernadero a la atmosfera aumentando el calentamiento global.

**Figura 19**

*Gráfico de red del ACV del STAP de Curití para la Categoría de Agotamiento de los Fósiles*

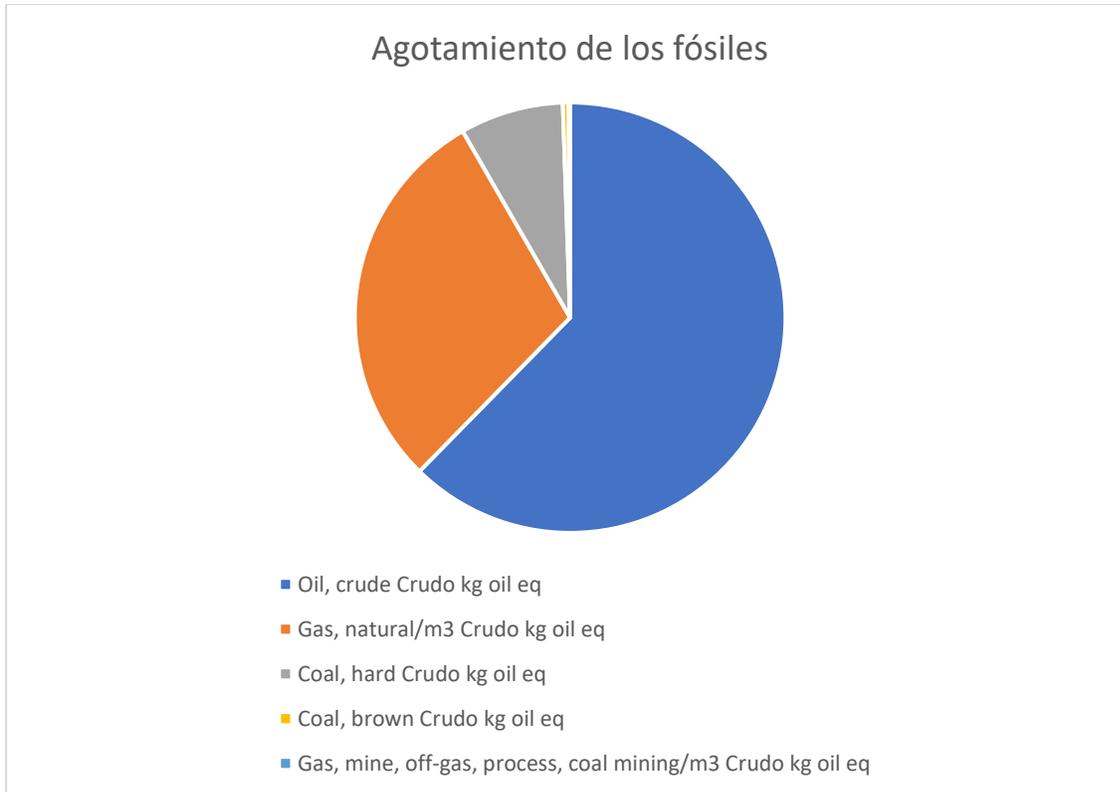


*Nota.* Reproducida de Resultados de Evaluación de Impactos en el Software SimaPro.

La sustancia que mas impacta al ambiente dentro de esta categoría como se observa en la **Figura 20**, es el petróleo, el gas natural y el carbón, esto debido a la extracción de estos recursos naturales fósiles no renovables para la fabricación de combustibles, generación de energía, entre otros.

**Figura 20**

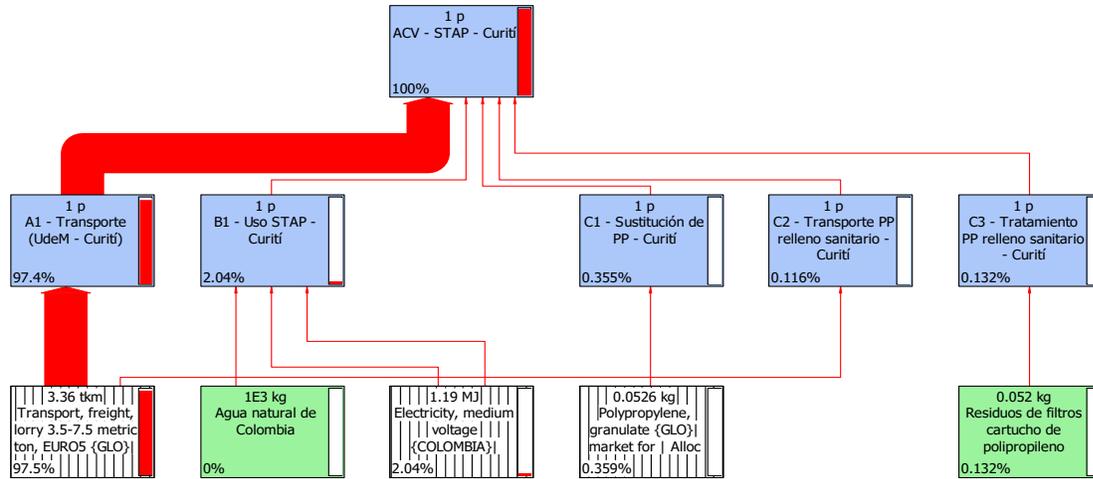
*Gráfica de Sectores de la Categoría de Agotamiento de los Fósiles en Curití*



Como se puede apreciar en la **Figura 21** los aportes más predominantes en la categoría de agotamiento del ozono se deben principalmente a la etapa de transporte con un porcentaje de participación de 97.4% debido a que, en esta etapa se necesitan combustibles fósiles, teniendo en cuenta que el metano (CH<sub>4</sub>) se genera en una variedad de procesos naturales y antropogénicos. Dentro de los cuales están los procesos de fabricación de combustibles, por ejemplo, durante la extracción, transporte y procesamiento de petróleo y gas natural.

**Figura 21**

Gráfico de red del ACV del STAP de Curití para la Categoría de Agotamiento de los Fósiles

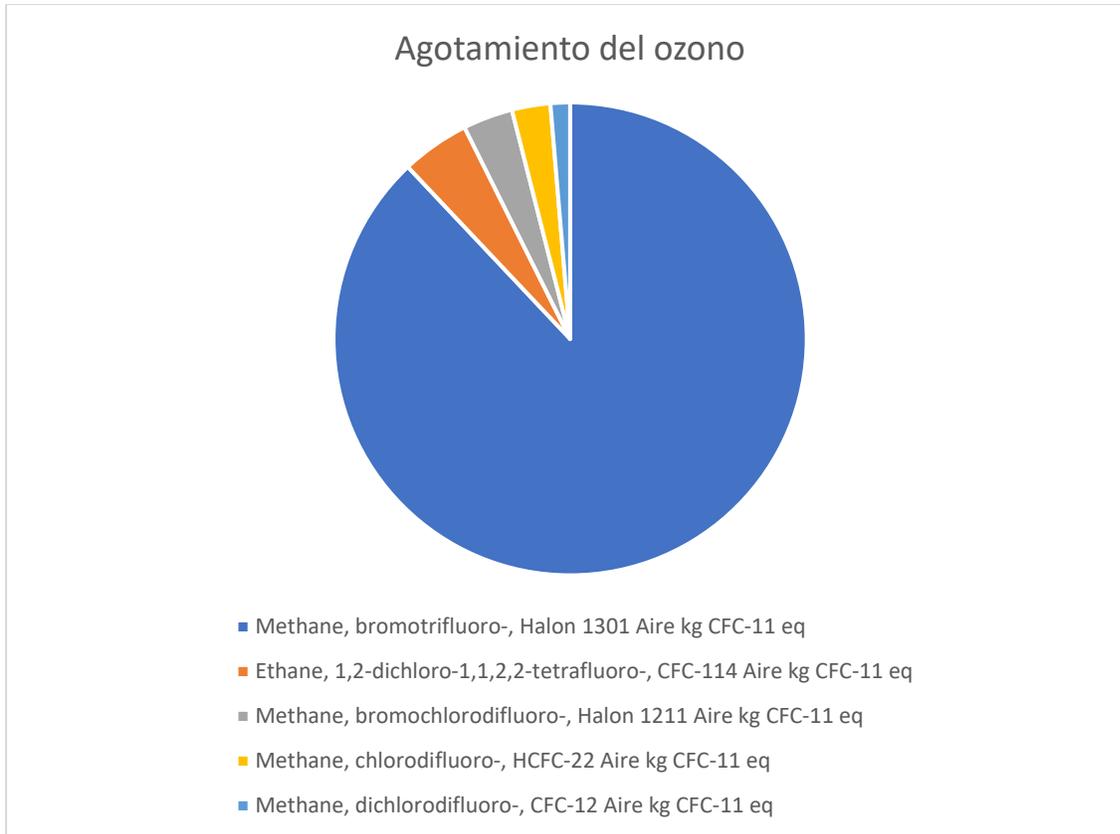


*Nota.* Reproducida de Resultados de Evaluación de Impactos en el Software SimaPro.

La sustancia que mas impacta al ambiente dentro de esta categoría como se observa en la **Figura 22**, es el metano como consecuencia de la etapa de transporte, los procesos asociados y los insumos requeridos.

**Figura 22**

Gráfica de Sectores de la Categoría de Agotamiento de los Fósiles en Curití

**ACV del STAP de El Carmelo:**

En la **Tabla 8**, **Tabla 9** y **Figura 23** se muestran los correspondientes resultados de la caracterización de los datos del inventario por unidad, porcentaje y gráfica de barras respectivamente de la vereda El Camelo, El Peñol, Antioquia.

**Tabla 8***Matriz de Impactos Ambientales para cada una de las Etapas Analizadas en El Carmelo*

Categoría de impacto	Unidad	A1	B1	C1	C2	C3	Total
Agotamiento del agua	m3	9,23E-01	1,20E+00	6,07E-03	3,17E-04	2,91E-03	2,13E+00
Cambio climático	kg CO2 eq	1,43E+00	9,87E-02	1,08E-01	4,92E-04	2,66E-02	1,66E+00
Agotamiento de los fósiles	kg oil eq	4,85E-01	3,02E-02	8,36E-02	1,67E-04	4,56E-04	6,00E-01
Agotamiento de la capa de ozono	kg CFC-11 eq	9,58E-08	2,31E-09	4,03E-10	3,29E-11	1,50E-10	9,87E-08

**Tabla 9**

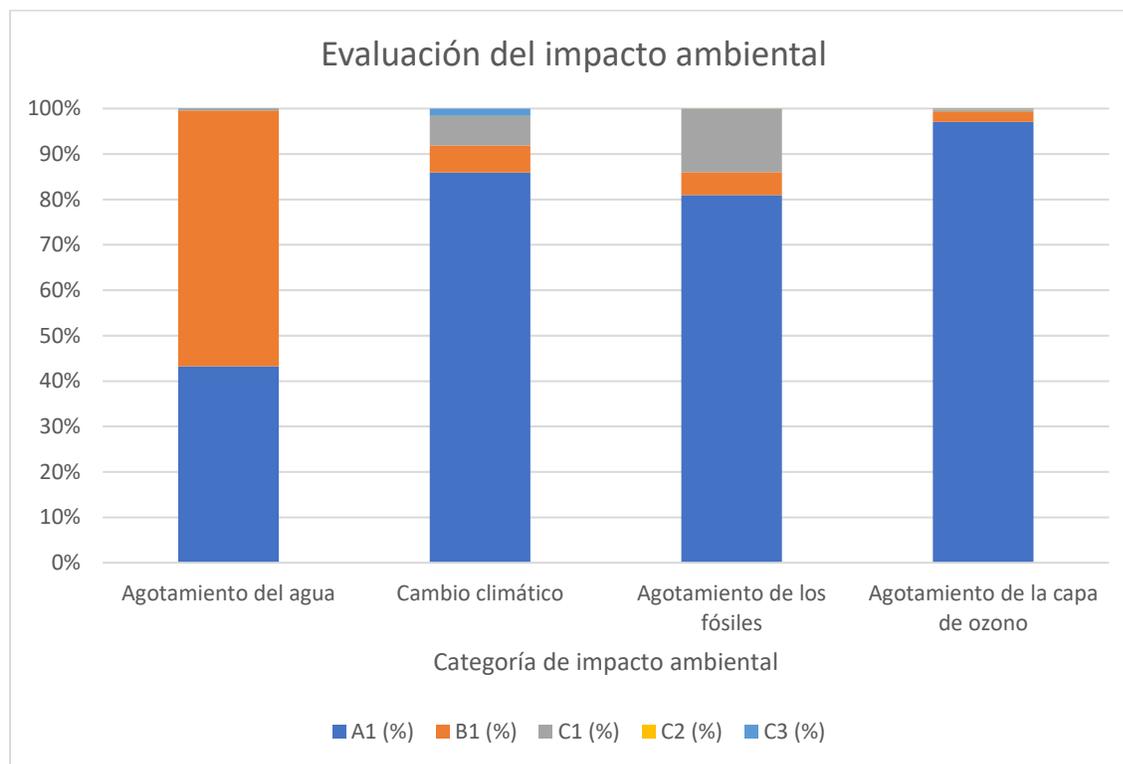
*Matriz de Impactos Ambientales en Porcentaje para cada una de las Etapas Analizadas El*

*Carmelo*

<b>Categoría de impacto</b>	<b>A1 (%)</b>	<b>B1 (%)</b>	<b>C1 (%)</b>	<b>C2 (%)</b>	<b>C3 (%)</b>	<b>Total (%)</b>
Agotamiento del agua	43,24	56,32	0,28	0,01	0,14	100
Cambio climático	85,95	5,93	6,50	0,03	1,60	100
Agotamiento de los fósiles	80,92	5,04	13,94	0,03	0,08	100
Agotamiento de la capa de ozono	97,07	2,34	0,41	0,03	0,15	100

**Figura 23**

*Gráfico Barras de Impactos Ambientales en Porcentajes El Carmelo*



Como se muestra en la **Tabla 9** y **Figura 23** los impactos ambientales más significativos se producen debido al transporte de los componentes del sistema desde la Universidad de Medellín a la zona rural El Carmelo por la quema de combustibles fósiles, seguido de la etapa de

uso que comprende tanto el consumo de agua natural como el uso de energía por los equipos que componen el sistema de tratamiento, seguido de la etapa de sustitución de filtros cartucho de polipropileno termofusionado, seguido y con un impacto casi nulo por la etapa de transporte y tratamiento de los filtros en el relleno sanitario.

En este análisis, no se evaluarán en detalle cada categoría de impacto asociada ya que, implicaría una interpretación similar a la que se hizo en el ACV del STAP de Curití, esto aclarando, que la única diferencia entre la vereda Curití y la vereda El Carmelo fue la distancia desde la universidad de Medellín, siendo un poco menor para El Carmelo. Lo que resultó en una disminución no muy significativa de los impactos, que se distribuyeron de manera similar en ambos casos.

### Comparación:

- ACV - STAP – Curití
- ACV - STAP - El Carmelo

Posteriormente, en la **Tabla 10**, **Tabla 11** y **Figura 24** se muestran los correspondientes resultados de la caracterización de la comparación de los datos del inventario por unidad, porcentaje y gráfica de barras respectivamente entre la vereda Curití, Liborina, Antioquia y la vereda El Carmelo, El Peñol, Antioquia.

**Tabla 10**

*Matriz de Impactos Ambientales de la Comparación entre Curití y El Carmelo*

Categoría de impacto	Unidad	ACV - STAP - Curití	ACV - STAP - El Carmelo	Total
Agotamiento del agua	m <sup>3</sup>	2,28E+00	2,13E+00	4,41E+00
Cambio climático	kg CO <sub>2</sub> eq	1,88E+00	1,66E+00	3,55E+00
Agotamiento de los fósiles	kg oil eq	6,74E-01	6,00E-01	1,27E+00
Agotamiento de la capa de ozono	kg CFC-11 eq	1,13E-07	9,87E-08	2,12E-07

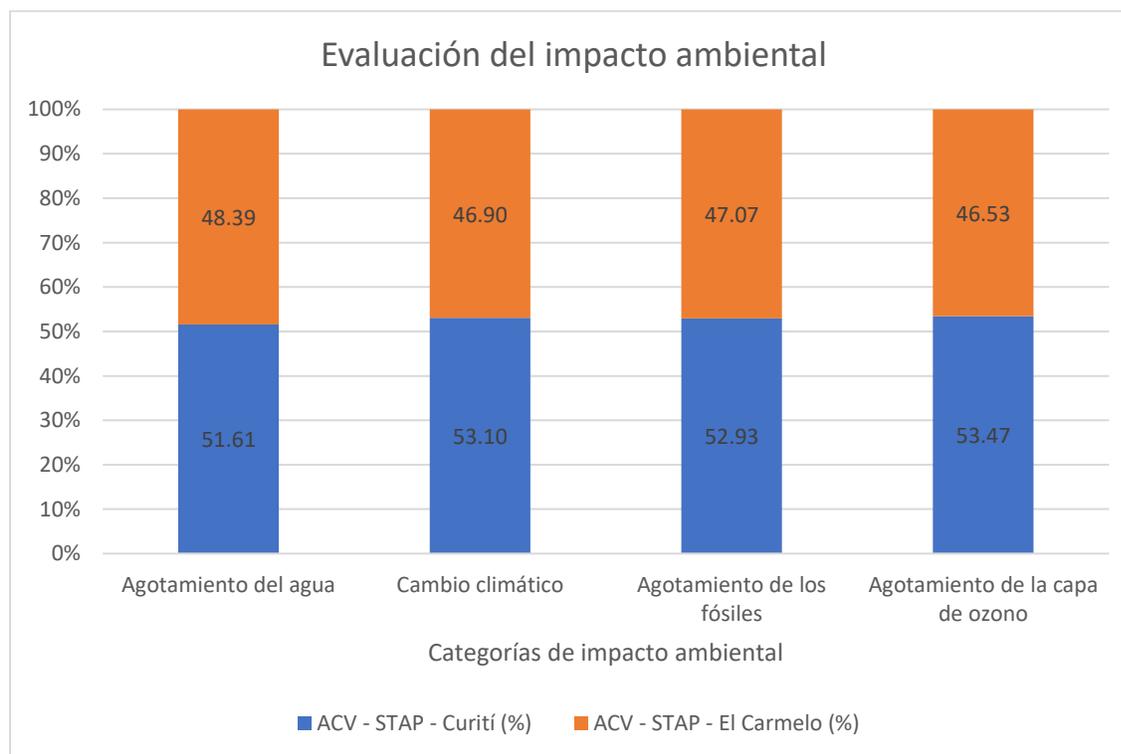
**Tabla 11**

*Matriz de Impactos Ambientales en Porcentaje de la Comparación entre Curití y El Carmelo*

Categoría de impacto	ACV - STAP - Curití (%)	ACV - STAP - El Carmelo (%)	Total (%)
Agotamiento del agua	51,61	48,39	100
Cambio climático	53,10	46,90	100
Agotamiento de los fósiles	52,93	47,07	100
Agotamiento de la capa de ozono	53,47	46,53	100

**Figura 24**

*Gráfica de Barras de Impactos Ambientales en Porcentajes de la Comparación entre Curití y El Carmelo*



A la luz de los resultados expuestos anteriormente en la **Tabla 11** y **Figura 24**, se puede afirmar que la distancia recorrida para transportar los componentes del sistema de potabilización es la principal diferencia entre estas veredas. Teniendo en cuenta que solo se realiza un viaje para llevar los insumos y que el vehículo es un camión de carga con capacidad de 3.5 a 7.5 toneladas

que cumple la normativa Euro 5 de emisión de gases contaminantes, Por lo tanto, se requiere un esfuerzo adicional para controlar no solo el número de viajes a la zona, sino también el tipo de vehículo que se utiliza, y buscar materiales más cercanos que reduzcan la distancia de transporte a las veredas.

## **7 Evaluación Económica del Sistema de Potabilización Mark**

Un análisis de costos de productos o servicios permite comprender el verdadero valor de un proyecto y los recursos necesarios relacionados con los materiales, mano de obra, equipos y herramientas necesarias, etc., para así, administrar adecuadamente ese proyecto, y poder aumentar el nivel de ganancias y satisfacción de las partes interesadas en el desarrollo de este.

Este análisis se realiza con el fin de estimar el valor del ensamblaje del sistema de potabilización Mark en las diferentes veredas que abarca el estudio, con el fin de conocer a detalle cada uno de los gastos asociados.

En el presente informe se presentan los resultados obtenidos de la evaluación económica realizada para la construcción y puesta en marcha del sistema de potabilización Mark en comunidades rurales del departamento de Antioquia.

### **7.1 Metodología**

Para esta evaluación económica se adopta la metodología de Análisis de Precios Unitarios (APU), que se basa en desglosar para cada una de las partidas o actividades del proyecto los costos asociados a materiales, mano de obra, herramientas y equipos, para estos últimos suele estimarse su costo como un 5% de la mano de obra, este grupo de costos se les conoce como costos directos y a los relacionados con la administración, imprevistos y utilidades como costos indirectos conocidos en el medio comúnmente como AIU los cuales, se calculan

como un porcentaje de los costos directos, la suma de estos dos costos multiplicada por las cantidades totales dará como resultado el presupuesto final del proyecto (Jaller Vanegas, 2016).

Dicha metodología fue adaptada a las características del presente proyecto, dado que el producto resultante (sistema de potabilización Mark) no cuenta con un precio de venta ya que, hace parte de un proyecto de investigación que busca cumplir con el objetivo 6 de los ODS. Que busca garantizar la disponibilidad, sostenibilidad y saneamiento del agua potable para todas las personas, así como también con el objetivo 11 que enmarca ciudades y comunidades sostenibles, Adicionalmente, no es posible obtener un dato histórico de unidades vendidas y/o producidas previamente ya que, es un producto nuevo y no se tienen costos asociados.

Por consiguiente, se presentan las variables y procedimientos que fueron considerados para la obtención de los costos directos del APU, los cuales se dividieron en dos etapas la primera la construcción de la losa de soporte del sistema de potabilización y el ensamblaje de este.

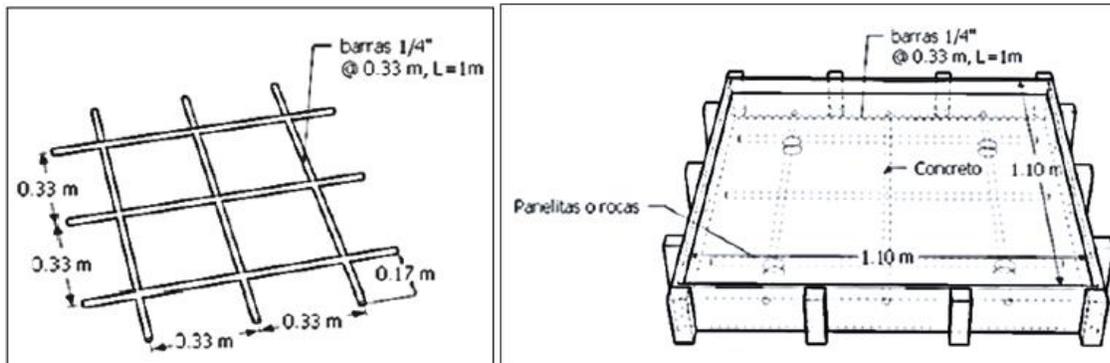
### ***7.1.1 Losa de Soporte***

El objetivo de esta losa fue brindar un apoyo nivelado y con la capacidad portante necesaria para el buen funcionamiento del sistema, es importante aclarar que, esta losa de soporte fue elaborada por la misma comunidad rural por lo cual, su costo no fue asumido por la Universidad de Medellín en el marco del proyecto Safewater, sin embargo, es importante encontrar un valor aproximado de esta para entender en detalle todos los costos asociados al sistema de potabilización.

En la **Figura 25** se observan el detalle de la losa de soporte en concreto de 21 Mpa del sistema de potabilización para su construcción, la cual, tiene 1.10 metros por cada lado y 0.1 metros de espesor y cuenta con 6 barras de diámetro de 1/4 de pulgada y longitud de 1 metro.

**Figura 25**

*Detalle de Acero de refuerzo, Formaleta y Concreto de Losa de soporte*



*Nota.* Reproducida de proyecto Safewater.

### **Materiales**

Para la selección de los materiales es importante tener un diseño de mezclas de acuerdo con la resistencia del concreto, ya que, no se cuenta con esta información se asumió un concreto para la losa de soporte con una resistencia de 21 Mpa. Los datos de cantidad y precios unitarios de los materiales necesarios para la producción 1 m<sup>3</sup> de concreto se obtuvieron de DataCauca el cual, “es un sistema de base de costos de infraestructura que sirve de soporte y referencia a la actividad de la ingeniería civil en el departamento del Cauca” (Gobernación del Cauca, 2016), como se muestra en la **Tabla 12**.

**Tabla 12***Insumos para 1 m<sup>3</sup> de Concreto de resistencia de 21 Mpa*

	<b>Und</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Valor</b>	<b>Total</b>
Agua	lts	180	\$ 20	\$ 3.600
Arena	m <sup>3</sup>	0,56	\$ 70.000	\$ 39.200
Cemento gris	Kg	350	\$ 598	\$ 209.300
Triturado	m <sup>3</sup>	0,84	\$ 100.000	\$ 84.000
				\$ 336.100

Nota. Reproducida de DataCauca, 2016, (<http://datacauca.gov.co/apu/apu/apu/query/78/6>)

Cabe aclarar que, materiales como la madera para la formaleta de la losa de soporte en este análisis no se tuvieron en cuenta debido a que, esta se conseguía de forma gratuita en la zona, adicionalmente, se consideró un desperdicio del 5% del concreto en la elaboración de la losa de soporte.

### **Mano de obra**

En este ítem debido al poco conocimiento sobre fabricación de concreto de las comunidades rurales, se sabe que, contrataban a un oficial por día experto en el tema entre varias personas, para que les fabricara la losas de soporte de forma adecuada, por lo cual, se adaptaron algunos datos de precios y rendimientos de un oficial de la base datos de DataCauca, donde se tiene para la fabricación de concreto un jornal por hora de 10.053 \$/h y un rendimiento de 0.81 h/m<sup>3</sup> y para la elaboración de la losa un jornal por hora de 10.053 \$/h y un rendimiento de 0.18 h/m<sup>3</sup>.

### **Herramienta y equipos**

Para este ítem dado que la comunidad contrató un oficial para la elaboración de la losa de soporte, el precio por hora de este incluía todos los gastos asociados a la herramienta menor

necesaria para su construcción, ya que, equipos de gran envergadura no se utilizaron, por lo cual, no se hizo un análisis individual de este segmento.

Se presenta el análisis de precio auxiliar (APA) de la fabricación de concreto de 21 Mpa por m<sup>3</sup> en la **Figura 26**, como insumo para el análisis de precio unitario (APU) para la elaboración de la losa de soporte por m<sup>2</sup> en la **Figura 27**.

Es importante resaltar que, para estos análisis no se tiene un costo indirecto asociado debido a que, se contrata una sola persona y se le paga por día de forma directa, sin ningún vínculo legal laboral.

### Figura 26

#### *Análisis de Precio Auxiliar Para la Fabricación de 1 m<sup>3</sup> de Concreto de 21 Mpa*

ANÁLISIS DE PRECIO AUXILIAR (APA)						
Objeto:		Proyecto Safewater				
Ítem	fabricación de concreto de 21 Mpa para losa de soporte del sistema de potabilización Mark.		Código	Identificación determinada en estructura del presupuesto	Unidad	m <sup>3</sup>
<b>MATERIALES (incluye transporte)</b>						
Descripción	Unidad	Cantidad	% Desperdicio	Valor unitario	Valor total	
Cemento gris	kg	350		\$ 598	\$ 209,300	
Arena	m <sup>3</sup>	0.56		\$ 70,000	\$ 39,200	
Triturado	m <sup>3</sup>	0.84		\$ 100,000	\$ 84,000	
Agua	Lt	180		\$ 20	\$ 3,600	
				<b>Subtotal</b>	\$ 336,100	
<b>MANO DE OBRA</b>						
Trabajador	Jornal hora	% Prestaciones	Jornal total hora	Rendimiento	Cantidad	Valor total
Oficial	\$ 10,053		\$ 10,053	0.81	1	\$ 8,143
					<b>Subtotal</b>	\$ 8,143
<b>HERRAMIENTAS Y EQUIPOS</b>						
Descripción	Tipo	Valor unitario	Rendimiento		Unidad	Valor total
Herramienta						\$ -
					<b>Subtotal</b>	\$ -
					<b>Total costo directo</b>	\$ 344,243
					Administración	\$ -
					Imprevistos	\$ -
					Utilidades	\$ -
					<b>Total costo indirecto</b>	\$ -
					<b>Total A.P.U.</b>	\$ 344,243

**Figura 27**

*Análisis de Precio Unitario Para la elaboración de 1 m2 de Losa de Soporte en Concreto de 21 Mpa*

ANÁLISIS DE PRECIO UNITARIO (APU)						
Objeto:		Proyecto Safewater				
Ítem	Elaboración de losa de 0,1 m de espesor de concreto de 21 Mpa para soporte del sistema de potabilización Mark.	Código	Identificación determinada en estructura del presupuesto	Unidad	m2	
<b>MATERIALES (incluye transporte)</b>						
Descripción	Unidad	Cantidad	% Desperdicio	Valor unitario	Valor total	
Concreto de 21 Mpa para losa de soporte	m3	0.121	5%	\$ 344,243	\$ 43,736	
Acero de refuerzo: 6 barras de Ø=1/4" de L=1m	kg	1.240		\$ 5,000	\$ 6,200	
				<b>Subtotal</b>	\$ 49,936	
<b>MANO DE OBRA</b>						
Trabajador	Jornal hora	% Prestaciones	Jornal total hora	Rendimiento	Cantidad	Valor total
Oficial	\$ 10,053		\$ 10,053	0.18	1	\$ 1,810
				<b>Subtotal</b>	\$ 1,810	
<b>HERRAMIENTA Y EQUIPO</b>						
Descripción	Tipo	Valor unitario	Rendimiento		Unidad	Valor total
Herramienta						\$ -
				<b>Subtotal</b>	\$ -	
				<b>Total costo directo</b>	\$ 51,746	
				Administración 10 %	\$ -	
				Imprevistos 5 %	\$ -	
				Utilidades 5 %	\$ -	
				<b>Total costo indirecto</b>	\$ -	
				<b>Total A.P.U.</b>	\$ 51,746	
				m2 para 1 sistema	1.21	
				<b>Total costo para 1 sistema</b>	\$ 62,612	

Por lo anterior, como se muestra en la **Figura 27**, el precio para la fabricación de la losa de soporte de un sistema de potabilización es de \$ 62.612 pesos colombianos.

### **7.1.2 Compra, Transporte y Ensamblaje de los Sistemas Individuales de Tratamiento de Agua Potable.**

Se presenta el precio de cada uno de los componentes del sistema de potabilización, teniendo en cuenta el costo de los insumos, transporte e instalación tanto para un sistema como para la totalidad de los mismos ya que, son 38 en la vereda Curití y 16 en la vereda El Carmelo

para un total de 54 sistemas, estos precios son de marzo del 2020 por lo cual, se proyectaron hasta el año actual 2023 con la ayuda de los índices de precios del consumidor durante cada año, para así comprender el valor de los mismos en la actualidad como se muestra en la **Tabla 13**.



FORMATO PROPUESTA ECONÓMICA (2020)						Índices de Precios al Consumidor (IPC)					
						2021		2022		2023	
						1,51%		8,53%		13,34%	
ITEM	DESCRIPCION	UND.	CANT.	VALOR UNITARIO	VALOR TOTAL	VALOR UNITARIO	VALOR TOTAL	VALOR UNITARIO	VALOR TOTAL	VALOR UNITARIO	VALOR TOTAL
0121	i. Caja metálica en acero al carbón de lámina negra o gris calibre 20 con pintura electrostática y anticorrosiva, con medidas 0,7 m x 0,6 m x 0,25 m de profundidad. ii. Cuatro marcos (pestañas) con dos huecos para soportar la caja en la estructura metálica. iii. Dos perforaciones laterales de Ø 1/2" para paso de tuberías PVC de Ø 1/2". Una perforación a 0.125 m de la parte superior y otra a 0.120 m de la parte inferior. iv. Ventilación tipo rejilla en la parte inferior a un costado, ancho total de la rejilla de 150 mm, espesor de cada ventilación de 5 mm y largo de 18 mm. v. Lámina para soporte de lámpara (30 cm). vi. Perforaciones para instalar soportes de filtros e instalación de bomba. Entre la lámina de soporte de lámpara UV y los filtros hay un espacio de 9 cm. vii. Puerta con pestañas para colocar candado de seguridad.	Und	54	476.000	25.704.000	483.188	26.092.130	524.404	28.317.789	594.359	32.095.382
<b>TOTAL COMPONENTES METÁLICOS</b>				<b>1.581.000</b>	<b>85.374.000</b>	<b>1.604.873</b>	<b>86.663.147</b>	<b>1.741.769</b>	<b>94.055.514</b>	<b>1.974.121</b>	<b>106.602.519</b>
<b>02</b>	<b>TANQUES</b>										
<b>021</b>	<b>TANQUE SEDIMENTADOR</b>										
02111	i. Tanque de polietileno lineal con una capacidad de 150 Litros y tapa, para almacenamiento de agua potable con un diámetro no mayor a 0.65 m y altura 0.90 m	Und	54	121.429	6.557.143	123.262	6.656.156	133.776	7.223.926	151.622	8.187.597
0212	ii. Empaque de entrada y salida de 1/2".	Und	153	10.000	1.530.000	10.151	1.553.103	11.017	1.685.583	12.487	1.910.439
0213	iii. Válvula Flotador de Ø 1/2" instalada en la parte superior del tanque.	Und	54	36.000	1.944.000	36.544	1.973.354	39.661	2.141.682	44.952	2.427.382

FORMATO PROPUESTA ECONÓMICA (2020)						Índices de Precios al Consumidor (IPC)					
						2021		2022		2023	
						1,51%		8,53%		13,34%	
ITEM	DESCRIPCION	UND.	CANT.	VALOR UNITARIO	VALOR TOTAL	VALOR UNITARIO	VALOR TOTAL	VALOR UNITARIO	VALOR TOTAL	VALOR UNITARIO	VALOR TOTAL
0214	iv. Conexión de salida del tanque (tubería Ø 1/2"- largo 10 cm y codo de 90° 1/2") para evitar la conducción de sólidos sedimentables	Und	54	1.300	70.200	1.320	71.260	1.432	77.338	1.623	87.655
0215	v. Sistema de desagüe, válvula de bola Ø 1/2" en el fondo	Und	54	13.000	702.000	13.196	712.600	14.322	773.385	16.232	876.555
0216	vi. Sistema de vertedero en la parte superior salida de 1/2".	Und	54	14.000	756.000	14.211	767.416	15.424	832.876	17.481	943.982
<b>022</b>	<b>TANQUE ALMACENAMIENTO</b>										
0221	i. Tanque de polietileno lineal con una capacidad de 150 Litros y tapa, para almacenamiento de agua potable con un diámetro no mayor a 0.65 m y altura 0.90 m	Und	54	121.429	6.557.143	123.262	6.656.156	133.776	7.223.926	151.622	8.187.597
0222	ii. Empaque de entrada y salida de 1/2".	Und	204	10.000	2.040.000	10.151	2.070.804	11.017	2.247.444	12.487	2.547.253
0223	iii. Sensor Flotador con conexión a la caja control, instalado en la parte superior del tanque	Und	54	37.400	2.019.600	37.965	2.050.096	41.203	2.224.969	46.700	2.521.780
0224	iv. Conexión de salida del tanque (tubería Ø 1/2" (media pulgada)- largo 10 cm y codo de 90° 1/2") para evitar la conducción de sólidos sedimentables	Und	54	1.300	70.200	1.320	71.260	1.432	77.338	1.623	87.655
0225	v. Sistema de vertedero en la parte superior salida de 1/2"	Und	54	14.000	756.000	14.211	767.416	15.424	832.876	17.481	943.982
	<b>TOTAL TANQUES</b>			<b>379.857</b>	<b>23.002.286</b>	<b>385.593</b>	<b>23.349.620</b>	<b>418.484</b>	<b>25.341.343</b>	<b>474.310</b>	<b>28.721.878</b>
<b>03</b>	<b>SISTEMA DE TRATAMIENTO</b>										
031	i. Válvula check de Ø 1/2".	Und	54	40.000	2.160.000	40.604	2.192.616	44.068	2.379.646	49.946	2.697.091
032	ii. 60 cm de manguera de 3/8" con adaptadores de 3/8" a 1/2" y dos amarraderas para sujetar la manguera a la bomba.	Und	54	27.000	1.458.000	27.408	1.480.016	29.746	1.606.261	33.714	1.820.536

FORMATO PROPUESTA ECONÓMICA (2020)						Índices de Precios al Consumidor (IPC)					
						2021		2022		2023	
						1,51%		8,53%		13,34%	
ITEM	DESCRIPCION	UND.	CANT.	VALOR UNITARIO	VALOR TOTAL	VALOR UNITARIO	VALOR TOTAL	VALOR UNITARIO	VALOR TOTAL	VALOR UNITARIO	VALOR TOTAL
033	iii. Bomba diafragma SEAFLO serie 21, modelo SFDPI-010-040-21 de 12 voltios y 4 A, flujo de 3.8 LPM, presión de cierre de 40 PSI, succión y descarga de 3/8".	Und	54	298.571	16.122.857	303.080	16.366.312	328.933	17.762.359	372.812	20.131.857
034	iv. Dos Filtros Marca PURIKOR, material Polipropileno termofusionado, Porosidad: 5 µm y 1 µm. de medidas de 2.5" x 10".	Unds	54	42.840	2.313.360	43.487	2.348.292	47.196	2.548.601	53.492	2.888.584
035	v. Carcasa plástica para cartuchos de filtración entrada y salida de 1/2" (media pulgada), de 2.5" x 10". Con conexiones macho 1/2".	Und	102	57.120	5.826.240	57.983	5.914.216	62.928	6.418.699	71.323	7.274.953
036	vi. Llave para abrir carcasa de filtros.	Und	54	8.330	449.820	8.456	456.612	9.177	495.561	10.401	561.669
034	vii. Lámpara UV Marca Evans modelo: UV- 16W, Flujo Máx 3.5 LPM, diámetro de 2.5 ", potencia: 16 W y presión 1/125 PSI. Con conexiones hembras de 1/2".	Und	54	383.000	20.682.000	388.783	20.994.298	421.947	22.785.112	478.234	25.824.646
035	viii. cuatro uniones universales lisa de 1/2" en PVC, entre la bomba y los filtros, entre los filtros y, antes y después de la lámpara UV.	Unds	54	10.000	540.000	10.151	548.154	11.017	594.912	12.487	674.273
036	ix. 5 válvulas de bola lisa de 1/2" en PVC repartidas, 2 para colocar entre la bomba y los filtros, entre los filtros y la lámpara; Y 3 para un sistema bypass afuera de la caja.	Unds	54	45.000	2.430.000	45.680	2.466.693	49.576	2.677.102	56.189	3.034.227
037	Pega, limpiador, estopas, teflon	Und	54	19.500	1.053.000	19.794	1.068.900	21.483	1.160.077	24.349	1.314.832
	<b>TOTAL ESTRUCTURA</b>			<b>931.361</b>	<b>53.035.277</b>	<b>945.425</b>	<b>53.836.110</b>	<b>1.026.070</b>	<b>58.428.330</b>	<b>1.162.947</b>	<b>66.222.669</b>
<b>04</b>	<b>CAJA DE CONTROL Y CONEXIONES ELÉCTRICAS</b>										
041	Cable doble encauchetado calibre 18 conexión de la bomba, lámpara UV y sensor flotador a la caja de control (30 metros aprox. por casa).	Und	54	60.000	3.240.000	60.906	3.288.924	66.101	3.569.469	74.919	4.045.636
042	Conexión del sistema a la caja de control.	Und	54	17.000	918.000	17.257	931.862	18.729	1.011.350	21.227	1.146.264



FORMATO PROPUESTA ECONÓMICA (2020)						Índices de Precios al Consumidor (IPC)					
						2021		2022		2023	
						1,51%		8,53%		13,34%	
ITEM	DESCRIPCION	UND.	CANT.	VALOR UNITARIO	VALOR TOTAL	VALOR UNITARIO	VALOR TOTAL	VALOR UNITARIO	VALOR TOTAL	VALOR UNITARIO	VALOR TOTAL
	VEREDA CURITÍ MUNICIPIO DE LIBORINA										
			38	170.000	6.460.000	172.567	6.557.546	187.287	7.116.905	212.271	8.066.300
	VEREDA EL CARMELO MUNICIPIO DEL PEÑOL										
			16	170.000	2.720.000	172.567	2.761.072	187.287	2.996.591	212.271	3.396.337
	<b>TOTAL TRANSPORTE</b>			<b>170.000</b>	<b>9.180.000</b>	<b>172.567</b>	<b>9.318.618</b>	<b>187.287</b>	<b>10.113.496</b>	<b>212.271</b>	<b>11.462.636</b>
<b>A</b>	<b>TOTAL COSTOS DIRECTOS</b>			<b>3.877.238</b>	<b>214.602.613</b>	<b>3.935.784</b>	<b>217.843.113</b>	<b>4.271.507</b>	<b>236.425.130</b>	<b>4.841.326</b>	<b>267.964.242</b>
<b>B</b>	<b>TOTAL COSTOS INDIRECTOS (ADMINISTRACIÓN, IMPREVISTOS Y UTILIDADES) (AIU)</b>	<b>20%</b>	<b>%</b>	<b>775.448</b>	<b>42.920.523</b>	<b>787.157</b>	<b>43.568.623</b>	<b>854.301</b>	<b>47.285.026</b>	<b>968.265</b>	<b>53.592.848</b>
	<b>IVA SOBRE UTILIDAD</b>	<b>10%</b>	<b>19%</b>	<b>73.668</b>	<b>4.077.450</b>	<b>74.780</b>	<b>4.139.019</b>	<b>81.159</b>	<b>4.492.077</b>	<b>91.985</b>	<b>5.091.321</b>
	<b>TOTAL</b>			<b>4.726.353</b>	<b>261.600.585</b>	<b>4.797.721</b>	<b>265.550.754</b>	<b>5.206.967</b>	<b>288.202.234</b>	<b>5.901.576</b>	<b>326.648.411</b>

Nota. Reproducida de proyecto Safewater.

Posteriormente, en la **Tabla 14** se muestran los costos totales para un sistema considerando la losa de soporte y los costos de ensamblaje del sistema individual con un precio de \$ 5.964.188 pesos colombianos y para el total de sistemas del proyecto que suman 54 con un valor de \$ 322.066.162 pesos colombianos.

**Tabla 14**

*Costos Totales del Sistema de Potabilización Mark*

	Costo	Cantidad de Sistemas Curití	Cantidad de Sistemas El Carmelo	Costo total del proyecto
<b>Losa de soporte</b>	\$ 62.612			
<b>Ensamblaje del sistema</b>	\$ 5.901.576	38	16	\$ 322.066.162
<b>Costo total</b>	\$ 5.964.188	\$ 226.639.151	\$ 95.427.011	

De la **Tabla 14** se puede deducir que, el sistema por sí solo podría ser más económico que cualquier planta de tratamiento de agua municipal y este cubre la demanda agua potable de las viviendas de las comunidades rurales presentes por lo que se vuelve una opción atractiva para suplir esta necesidad de agua segura, sobre todo en zonas de difícil acceso.

## 8 Análisis de Resultados Económicos

El daño ambiental de un sistema de potabilización puede tener un impacto significativo en los costos del proceso, ya que las tecnologías y métodos utilizados en el tratamiento del agua pueden generar residuos, consumir grandes cantidades de energía y recursos naturales, y emitir gases de efecto invernadero. Si un sistema de potabilización utiliza tecnologías y métodos que generan grandes cantidades de residuos, se requerirá un mayor esfuerzo y gasto para su

eliminación y disposición. Además, si el sistema consume grandes cantidades de energía y recursos naturales, los costos operativos y de mantenimiento serán más altos.

Por otro lado, si se utilizan tecnologías y métodos más sostenibles y respetuosos con el medio ambiente, como las energías renovables, los costos operativos y de mantenimiento pueden ser más bajos. Esto se debe a que se requerirá menos energía y recursos para el tratamiento del agua, lo que a su vez reducirá los costos del proceso.

En resumen, la elección de tecnologías y métodos de tratamiento sostenibles puede ayudar a reducir el impacto ambiental y, al mismo tiempo, los costos a largo plazo.

Con base en esto, el sistema de potabilización Mark ofrece un beneficio costo ambiental interesante ya que, aunque en un principio se tengan impactos significativos por la etapa de transporte, esta solo se da en un tiempo determinado, lo que le da la capacidad al planeta de asimilarlo, ahora bien, si analizamos los consumos de energía del sistema como segunda fuente de impacto este gasta un total de 0.33 kwh/m<sup>3</sup> para tratar 1 m<sup>3</sup> de agua, los cuales son bajos en comparación con el consumo energético de una planta de tratamiento de agua convencional. No obstante, es importante aclarar que este valor no es fijo y depende de diversos factores, tales como la fuente y el tipo de sistema, pero puede oscilar entre 0.37 kwh/m<sup>3</sup> y 8.5 kwh/m<sup>3</sup> (Iagua, 2014).

Además, es importante destacar que el costo del suministro de agua potable a través de un sistema convencional de tratamiento, proporcionado por una empresa pública como Aguas Regionales EPM, que abastece la demanda de agua potable en algunos municipios de Urabá y el Occidente Antioqueño, tiene un promedio de costo por metro cúbico de \$10.538 pesos colombianos en zonas rurales (Aguas Regionales EPM, 2023). Sin embargo, este valor puede variar según diversos factores, como la ubicación geográfica y los subsidios gubernamentales. Es

relevante mencionar que este costo es superior al costo de energía consumida por el sistema Mark para purificar la misma cantidad de agua, ya que este sistema utiliza solamente 0.33 kwh por metro cúbico, y el precio promedio en 2023 de 1 kwh es de 283.49 pesos colombianos (XM, 2023). Aunque inicialmente estas familias rurales se beneficiaron de un programa de instalación gratuito de un sistema de tratamiento de agua potable individual, en el que solo debían cubrir los gastos de consumo de energía y mantenimiento, en un escenario diferente en el que compren el sistema, podrían obtener un retorno de la inversión.

En Colombia, por lo general, el costo del agua potable es más alto en las zonas rurales en comparación con las zonas urbanas. Esto se debe a varios factores, como la infraestructura limitada en áreas rurales, la dificultad de acceso y la menor densidad poblacional, lo que hace que el suministro de agua sea más costoso de implementar y mantener.

En conclusión, se tiene un sistema con bajos costos e impactos negativos al ambiente, lo que puede garantizar su sostenibilidad en el tiempo.

## 9 Conclusiones

- Finalmente se logra concluir que el transporte es el principal contaminante debido a, la utilización de combustibles fósiles que en su proceso de combustión liberan gases de efecto invernadero como el CO<sub>2</sub> (Johnson et al., 2017), seguido del consumo de agua natural y el consumo de energía procedente del uso de equipos como la bomba de succión y la lampara UV.
- Se deben considerar a la hora de implementar los sistemas de potabilización en zonas rurales la distancia total recorrida para así, optimizar los viajes a la zona, sin embargo, estos impactos se presentan de forma puntual en un periodo corto de tiempo ya que, solo se generan mientras se ensambla el sistema y se ejecuten algunos ajustes, por lo que, logran ser disipados de forma gradual por el medio ambiente versus la vida útil del mismo, aunque puede ser otra opción la búsqueda de materiales alternativos que se produzcan o generen cerca de la zona de ensamblaje, para evitar el uso de transportes que incrementan las emisiones al ambiente.
- Más allá del uso eficiente del transporte, debido a los ítems evaluados; se recomienda considerar en análisis posteriores las etapas de producción de materias primas y transportes del sitio de origen de los insumos, para así tener una visión más detallada y amplia de las cargas ambientales vinculadas en cada una de las etapas.
- Finalmente, es importante recalcar que, el ACV es una herramienta que apoya la toma de decisiones, no es una herramienta que automáticamente toma las decisiones, por lo cual, se debe integrar todo tipo de evaluaciones ambientales, técnicas y económicas, complementarias de tal forma que, se contribuya a tomar la mejor decisión posible con base en los recursos propios del proyecto y los intereses de los involucrados.

- Es importante resaltar que, según estudios realizados por (Amores et al., 2013; Barrera Pérez et al., 2020; Bonton et al., 2012; Igos et al., 2014; Ortiz Rodriguez et al., 2016; Saad et al., 2019; Stokes & Horvath, 2006; Vince et al., 2008) sobre sistemas de agua potable la mayor carga ambiental estuvo atribuida a los consumos de energía procedentes de los procesos de tratamiento del agua, teniendo en cuenta esto, el sistema de potabilización en estudio destaca por su notable cualidad de ahorro energético debido a su bajo consumo de tan solo 0.33 kwh para higienizar 1m<sup>3</sup> de agua. Esta cifra contrasta significativamente con el rango de consumo de energía necesario para potabilizar 1 m<sup>3</sup> de agua, el cual oscila entre 0.37 kwh/m<sup>3</sup> y 8.5 kwh/m<sup>3</sup> dependiendo de la fuente (Iagua, 2014). Estos importantes resultados son posibles gracias a la eficiente automatización del sistema.
- Con la implementación de este sistema, se logra una reducción significativa de las emisiones de CO<sub>2</sub> en comparación con los métodos tradicionales de purificación de agua que implicaban la quema de leña. Considerando que la combustión de 1 kilogramo de madera producirá alrededor de 1,65 a 1,80 kilogramos de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) (Forestal maderero, 2022), con lo cual no se alcanzaría a hervir 1 m<sup>3</sup> de agua ni mucho menos a dejarla en condiciones óptimas. En contraste, el sistema actual utiliza tecnología automatizada y eficiente, con un consumo mínimo de energía eléctrica 0.33 kwh, lo que resulta en la emisión máxima de 0.099 kilogramos de dióxido de carbono equivalentes (CO<sub>2</sub> eq) durante el proceso de potabilización de 1 metro cúbico de agua, garantizando la disminución de emisión de gases de efecto invernadero.

- Se recomienda implementar medidas de transporte alternativos para reducir los efectos contaminantes, como el uso de vehículos con combustión a biodiesel o eléctricos.
- El sistema logra sustentar las familias brindando acceso a agua segura ayudando así a cerrar la brecha entre comunidades urbanas y rurales. Este enfoque aporta al cumplimiento de los objetivos de desarrollo sostenible 6 y 11, que abordan la importancia del agua potable como un servicio básico y la creación de asentamientos humanos sostenibles.
- El sistema de potabilización podría ser aún más viable económicamente, si en estudios futuros se comparara con la implementación de una planta convencional de tratamiento de agua potable veredal.

## 10 Referencias

- Aguas Regionales EPM. (2023). *RESOLUCION No. 20230910000689 - 06*.  
[https://www.grupo-epm.com/site/Portals/aguas\\_regionales/tarifas/interes-2022/resolucion-20230910000689.pdf](https://www.grupo-epm.com/site/Portals/aguas_regionales/tarifas/interes-2022/resolucion-20230910000689.pdf)
- Amores, M. J., Meneses, M., Pasqualino, J., Antón, A., & Castells, F. (2013). Environmental assessment of urban water cycle on Mediterranean conditions by LCA approach. *Journal of Cleaner Production*, 43, 84–92.  
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.12.033>
- Arboleda López, S. A., & Serna Gutiérrez, E. (2019). *Presupuesto y programación de obras: conceptos básicos* (S. A. Arboleda López & E. Serna Gutiérrez, Eds.).  
<https://elibro-net.bbibliograficas.ucc.edu.co/es/ereader/ucc/106582>
- Balaguera Quintero, A. (2018). *Uso de materiales de alternativos como estabilizantes en vías con bajo volumen de tránsito: un enfoque de ciclo de vida*.
- Barrera Pérez, M. L., Ávila, O. A., & Beleño Montagut, L. (2020). Estimación del potencial de calentamiento global en un sistema de potabilización de un acueducto municipal en Colombia. *BISTUA Rev. FCB*, 18(1), 11–16.
- Barrios, R., Siebel, M., van der Helm, A., Bosklopper, K., & Gijzen, H. (2008). Environmental and financial life cycle impact assessment of drinking water production at Waternet. *Journal of Cleaner Production*, 16(4), 471–476.  
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2006.07.052>
- Benítez, M. G., Ferró, R. G., Iglesias, R. C., & Villar, S. G. (2014). *El análisis de ciclo de vida como herramienta de sostenibilidad en los proyectos de tratamiento de aguas*.

- Bonton, A., Bouchard, C., Barbeau, B., & Jedrzejak, S. (2012). Comparative life cycle assessment of water treatment plants. *Desalination*, 284, 42–54.  
<https://doi.org/10.1016/j.desal.2011.08.035>
- Cáceres Huisacayna, K. N. (2016). *Beneficios ambientales del control de pérdidas en un sistema convencional de tratamiento de agua potable*.
- Camacho Botero, L. A. (2020). La paradoja de la disponibilidad de agua de mala calidad en el sector rural colombiano. *Revista de Ingeniería*, 38–50.
- Carvajal Peláez, G. I. (2008). *Modelo de cuantificación de riesgos laborales en la construcción: RIES-CO*. Universidad Politécnica de Valencia.
- DANE. (2018). *Censo nacional de población y vivienda*.
- DANE. (2019). *Boletín Técnico Encuesta Nacional De Calidad de Vida (ECV)*.
- Forestal maderero. (2022). *¿Cuánto CO2 se almacena en 1 kg de madera?*  
<https://www.forestalmaderero.com/articulos/item/cuanto-co2-se-almacena-en-1-kg-de-madera.html>
- Fundación Aequae. (2021). *Características del agua potable*.  
<https://www.fundacionaqua.org/wiki/caracteristicas-agua-potable/>
- García-Erviti, F., Armengot-Paradinas, J., & Ramírez-Pacheco, G. (2015). El análisis del coste del ciclo de vida como herramienta para la evaluación económica de la edificación sostenible. Estado de la cuestión. *Informes de La Construcción*, 67(537).  
<https://doi.org/10.3989/ic.12.119>
- Gobernación del Cauca. (2016). *DataCauca - Análisis de precios unitarios*.  
<http://datacauca.gov.co/apu/apu/apu/query>

- Godskesen, B., Hauschild, M., Rygaard, M., Zambrano, K., & Albrechtsen, H. J. (2013). Life-cycle and freshwater withdrawal impact assessment of water supply technologies. *Water Research*, 47(7), 2363–2374. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2013.02.005>
- Goga, T., Friedrich, E., & Buckley, C. A. (2019). Environmental life cycle assessment for potable water production – A case study of seawater desalination and mine-water reclamation in South Africa. *Water SA*, 45(4), 700–709. <https://doi.org/10.17159/wsa/2019.v45.i4.7552>
- Hunkeler, D., Lichtenvort, K., & Rebitzer, G. (2008). *Environmental Life Cycle Costing*. <https://doi.org/10.1201/9781420054736>
- Iagua. (2014). *¿Cuánta energía se necesita para producir 1 metro cúbico de agua?* <https://www.iagua.es/blogs/facts-and-figures/cuanta-energia-se-necesita-producir-1-metro-cubico-agua>
- ICONTEC. (2007). *Norma técnica colombiana NTC - ISO:14040. Gestión ambiental. Análisis de ciclo de vida. Principios y marco de referencia*.
- IDEAM. (2022). *Estudio Nacional del Agua*. <http://www.ideam.gov.co/documents/14691/125666586/ESTUDIO+NACIONAL+DE+L+AGUA+2022.zip/b0af8f5a-56f1-46af-ba32-a74beb12c70c>
- Igos, E., Dalle, A., Tiruta-Barna, L., Benetto, E., Baudin, I., & Mery, Y. (2014). Life Cycle Assessment of water treatment: What is the contribution of infrastructure and operation at unit process level? *Journal of Cleaner Production*, 65, 424–431. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.07.061>
- Ihobe. (2009). *Análisis de ciclo de vida y huella de Carbono*.

- ISO. (2006a). *ISO - International Organization for Standardization - 14040:2006 - Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework*.  
<https://www.iso.org/standard/37456.html>
- ISO. (2006b). *ISO - International Organization for Standardization - 14044:2006 - Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines*.  
<https://www.iso.org/standard/38498.html>
- Jaller Vanegas, J. (2016). *Metodología de control de costos de presupuesto en construcciones verticales*.
- Johnson, D. R., Heltzel, R., Nix, A. C., Clark, N., & Darzi, M. (2017). Greenhouse gas emissions and fuel efficiency of in-use high horsepower diesel, dual fuel, and natural gas engines for unconventional well development. *Applied Energy*, 206, 739–750.  
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.08.234>
- La república. (2023). *En el Colombia, 3,2 millones de personas no tienen acceso al servicio de agua potable*.
- Manda, B. M. K., Worrell, E., & Patel, M. K. (2014). Innovative membrane filtration system for micropollutant removal from drinking water - Prospective environmental LCA and its integration in business decisions. *Journal of Cleaner Production*, 72, 153–166. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.02.045>
- MAVDT. (2010). *Política nacional para la gestión integral del recurso hídrico*. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.
- Ministerio de la Protección Social. (2007). *Sistema para la Protección y control de la calidad del agua para consumo humano*.

- Ministerio de salud y protección social. (2023). *Informe nacional de calidad del agua para consumo humano*.
- Ministerio de vivienda ciudad y territorio. (2018). *Plan director de agua y saneamiento básico*. [www.minvivienda.gov.co](http://www.minvivienda.gov.co)
- Mohamed-Zine, M.-B., Hamouche, A., & Krim, L. (2013). The study of potable water treatment process in Algeria (boudouaou station)-by the application of life cycle assessment (LCA). In *Journal of Environmental Health Science & Engineering* (Vol. 11). <http://www.ijehse.com/content/11/1/37>
- Montoya Flores, M. L. (2021). *Análisis de Ciclo de Vida de la potabilizadora de La Atarjea, ubicada en la ciudad de Lima*.
- Morató, J., Subirana, A., Gris, A., Carneiro, A., & Pastor, R. (2006). Tecnologías sostenibles para la potabilización y el tratamiento de aguas residuales. *Revista Lasallista de Investigación*. [www.ingeniabios.com](http://www.ingeniabios.com)
- Organización de las naciones unidas. (2015). *Objetivos y metas de desarrollo sostenible*. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>
- Organización Mundial de la Salud. (2018). *Guías para la calidad del agua de consumo humano*. <http://apps.who.int/>
- Organización Mundial de la Salud, & Fondo de las Naciones Unidas para la Infancia. (2021). *Progresos en materia de agua para consumo, saneamiento e higiene en los hogares*.
- Ortiz Rodriguez, O. O., Villamizar-Gallardo, R. A., & Guillermo García, R. (2016). Life cycle assessment of four potable water treatment plants in northeastern Colombia. *Revista Ambiente e Agua*. <https://doi.org/10.4136/1980-993X>

- Osorio Marulanda, C. (2016). La formación de los ingenieros para participar con las comunidades en temas tecnológicos: consideraciones a partir de la gestión del agua. *Revista CTS, N°*, 33, 161–180.
- Pérez Correa, E., & Pérez Martínez, M. (2002). *El sector rural en Colombia y su crisis actual*.
- Planas Marti, M. A., & Cárdenas, J. (2019). *La matriz energética de Colombia se renueva - Energía para el futuro*. <https://blogs.iadb.org/energia/es/la-matriz-energetica-de-colombia-se-renueva/>
- Prézélus, F., Tiruta-Barna, L., Remigy, J. C., & Guigui, C. (2021). Process-based LCA of ultrafiltration for drinking water production. *Water Research*, 199. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117156>
- Programa de las naciones unidas para el desarrollo. (2019). *Antioquia retos y desafíos para el desarrollo sostenible*.
- Raluy, R. G., Serra, L., Uche, J., & Valero, A. (2005). Life cycle assessment of water production technologies. Part 2: Reverse osmosis desalination versus the Ebro River Water Transfer. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 10(5), 346–354. <https://doi.org/10.1065/lca2004.09.179.2>
- Ribera, G., Clarens, F., Martínez-Lladó, X., Jubany, I., V.Martí, & Rovira, M. (2014). Life cycle and human health risk assessments as tools for decision making in the design and implementation of nanofiltration in drinking water treatment plants. *Science of the Total Environment*, 466–467, 377–386. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.06.085>
- Rockström, J., Steffen, W., Noone, K., Persson, Å., Chapin, F. S., Lambin, E., Lenton, T. M., Scheffer, M., Folke, C., Schellnhuber, H., Nykvist, B., De Wit, C. A., Hughes, T.,

- Van Der Leeuw, S., Rodhe, H., Sörlin, S., Snyder, P. K., Costanza, R., Svedin, U., ... Foley, J. (2009). Planetary Boundaries: Exploring the Safe Operating Space for Humanity. *Ecology & Society*.
- Rodriguez-Alvarez, M. S., Moraña, L. B., Salusso, M. M., & Seghezzo, L. (2017). Caracterización espacial y estacional del agua de consumo proveniente de diversas fuentes en una localidad periurbana de Salta. *Revista Argentina de Microbiología*, 49(4), 366–376. <https://doi.org/10.1016/j.ram.2017.03.006>
- Saad, A., Elginöz, N., Germirli Babuna, F., & Iskender, G. (2019). Life cycle assessment of a large water treatment plant in Turkey. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(15), 14823–14834. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-3826-9>
- Stokes, J., & Horvath, A. (2006). Life cycle energy assessment of alternative water supply systems. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 11(5), 335–343. <https://doi.org/10.1065/lca2005.06.214>
- Superintendencia de servicios públicos domiciliarios. (2019). *Estudio sectorial de los servicios públicos domiciliarios de acueducto y alcantarillado*.
- Toro López, F. J. (2010). *Costos ABC y presupuestos*.
- Unión Europea. (1995). *Carta de las Nacionalidades y Regiones Europeas por el Medio Ambiente*.
- Varón-Hoyos, M., Restrepo-Victoria, Á., & Guerrero-Erazo, J. (2019). Agua potable para uso doméstico: análisis del ciclo de vida y de escenarios hipotéticos de manejo ambiental para la ciudad de Pereira, Colombia. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 18(35), 13–31. <https://doi.org/10.22395/rium.v18n35a2>

Vince, F., Aoustin, E., Bréant, P., & Marechal, F. (2008). LCA tool for the environmental evaluation of potable water production. *Desalination*, 220(1–3), 37–56.

<https://doi.org/10.1016/j.desal.2007.01.021>

XM. (2023). *En enero del 2023 el precio de bolsa de energía aumentó a 374.24 COP/kWh* /

*Portal XM*. [https://www.xm.com.co/noticias/5620-en-enero-del-2023-el-precio-de-](https://www.xm.com.co/noticias/5620-en-enero-del-2023-el-precio-de-bolsa-de-energia-aumento-37424-copkwh)

[bolsa-de-energia-aumento-37424-copkwh](https://www.xm.com.co/noticias/5620-en-enero-del-2023-el-precio-de-bolsa-de-energia-aumento-37424-copkwh)