



# **Universidad Nacional Mayor de San Marcos**

**Universidad del Perú. Decana de América**

**Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica**

**Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental**

## **Análisis de ciclo de vida en minería: propuesta de reducción de gases de efecto invernadero en el tratamiento de aguas residuales industriales**

### **TESIS**

**Para optar el Título Profesional de Ingeniero Ambiental**

### **AUTORES**

**Karen Annette CRUZ RAMIREZ**

**Anggiela Cátelin PARCCO MORALES**

### **ASESOR**

**Dra. Giuliana Patricia BECERRA CELIS**

**Lima, Perú**

**2024**



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

## Referencia bibliográfica

---

Cruz, K. & Parcco, A. (2024). *Análisis de ciclo de vida en minería: propuesta de reducción de gases de efecto invernadero en el tratamiento de aguas residuales industriales*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.

---

### Metadatos complementarios

|                                  |                                                                                           |
|----------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Datos de autor 1</b>          |                                                                                           |
| Nombres y apellidos              | Karen Annette Cruz Ramirez                                                                |
| Tipo de documento de identidad   | DNI                                                                                       |
| Número de documento de identidad | 76809311                                                                                  |
| URL de ORCID                     | <a href="https://orcid.org/0009-0009-5830-3630">https://orcid.org/0009-0009-5830-3630</a> |
| <b>Datos de autor 2</b>          |                                                                                           |
| Nombres y apellidos              | Anggiela Cátelin Parcco Morales                                                           |
| Tipo de documento de identidad   | DNI                                                                                       |
| Número de documento de identidad | 74282894                                                                                  |
| URL de ORCID                     | <a href="https://orcid.org/0009-0000-6178-9904">https://orcid.org/0009-0000-6178-9904</a> |
| <b>Datos de asesor</b>           |                                                                                           |
| Nombres y apellidos              | Giuliana Patricia Becerra Celis                                                           |
| Tipo de documento de identidad   | DNI                                                                                       |
| Número de documento de identidad | 40745335                                                                                  |
| URL de ORCID                     | <a href="https://orcid.org/0000-0002-3646-083X">https://orcid.org/0000-0002-3646-083X</a> |
| <b>Datos del jurado</b>          |                                                                                           |
| <b>Presidente del jurado</b>     |                                                                                           |
| Nombres y apellidos              | Carlos Del Valle Jurado                                                                   |
| Tipo de documento                | DNI                                                                                       |
| Número de documento de identidad | 10266187                                                                                  |
| <b>Miembro del jurado 1</b>      |                                                                                           |

|                     |                                |
|---------------------|--------------------------------|
| Nombres y apellidos | Eduardo Ronald Espinoza Farfán |
|---------------------|--------------------------------|

|                                                        |                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|--------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Tipo de documento                                      | DNI                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| Número de documento de identidad                       | 40231227                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| <b>Miembro del jurado 2</b>                            |                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| Nombres y apellidos                                    | Alberto Huiman Cruz                                                                                                                                                                                                                                                           |
| Tipo de documento                                      | DNI                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| Número de documento de identidad                       | 41459167                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| <b>Datos de investigación</b>                          |                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| Línea de investigación                                 | C.0.2.8. Ingeniería y tecnologías del Medio Ambiente                                                                                                                                                                                                                          |
| Grupo de investigación                                 | No aplica.                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| Agencia de financiamiento                              | Sin financiamiento.                                                                                                                                                                                                                                                           |
| Ubicación geográfica de la investigación               | País: Perú<br>Departamento: La Libertad<br>Provincia: Sánchez Carrión<br>Distrito: Huamachuco<br>Latitud: -7.830942<br>Longitud: -78.017114                                                                                                                                   |
| Año o rango de años en que se realizó la investigación | 2022 - 2024                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| URL de disciplinas OCDE                                | Ingeniería ambiental y geológica<br><a href="https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.07.01">https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.07.01</a><br>Ciencias del medio ambiente<br><a href="https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#1.05.08">https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#1.05.08</a> |



## Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Universidad del Perú. Decana de América

FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA Y GEOGRÁFICA  
Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental

### **ACTA DE SUSTENTACION DE TESIS PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE INGENIERO AMBIENTAL**

En el Salón de Grados y Títulos de la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos; el día 30 de Octubre del año 2024, siendo las 9:00 am, en presencia de los señores docentes designados como miembros del Jurado Calificador:

**Dr. CARLOS DEL VALLE JURADO**

**(Presidente del Jurado)**

**Dr. EDUARDO RONALD ESPINOZA FARFAN**

**(Miembro del Jurado)**

**Dr. ALBERTO HUIMAN CRUZ**

**(Miembro del Jurado)**

Reunidos para el acto académico público de colación de las Tesis de Bachilleres ANGGIELA CÁTELIN PARCCO MORALES Y KAREN ANNETTE CRUZ RAMIREZ quienes sustentaran la Tesis Titulada:

**"ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA EN MINERÍA: PROPUESTA DE REDUCCIÓN DE GASES DE EFECTO INVERNADERO EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES"** para la obtención del Título Profesional de Ingeniero Ambiental.

Los miembros del Jurado, escuchada la sustentación respectiva, plantearon al graduando las observaciones pertinentes, que fueron absueltas:

A..... *satisfacción* .....

El Jurado procedió a la calificación, cuyo resultado fue:

..... *Dieciocho (18) con mención honrosa* .....

Habiendo sido aprobada la Sustentación de Tesis por el Jurado Calificador, el presidente recomienda que la Facultad de Ingeniería



## Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Universidad del Perú. Decana de América  
FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA Y GEOGRÁFICA  
Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental

Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, proponga se le otorgue el  
TITULO PROFESIONAL DE INGENIERO AMBIENTAL a las  
Bach. ANGGIELA CÁTELIN PARCCO MORALES  
Bach. KAREN ANNETTE CRUZ RAMIREZ

Siendo las 9:45 horas se dio por concluido el acto académico,  
expidiéndose dos (02) Actas Originales de la Sustentación de la Tesis.

  
Dr. CARLOS DEL VALLE JURADO  
**PRESIDENTE DEL JURADO**

  
Dr. ALBERTO HUIMAN CRUZ  
**MIEMBRO DE JURADO**

  
Dr. EDUARDO RONALD ESPINOZA FARFÁN  
**MIEMBRO DE JURADO**

  
Dra. GIULIANA PATRICIA BECERRA CELIS  
**ASESOR**



**Universidad Nacional Mayor de San Marcos**

Universidad del Perú. Decana de América

**Vicerrectorado de Investigación y Posgrado**



## **CERTIFICADO DE SIMILITUD**

Yo **Giuliana Patricia Becerra Celis** en mi condición de asesora acreditada con la Resolución Decanal N° 0000056-2024-D-FIGMMG/UNMSM de la tesis, cuyo título es "Análisis de Ciclo de Vida en minería: Propuesta de reducción de gases de efecto invernadero en el tratamiento de aguas residuales industriales", presentado por las **bachilleres Anggiela Cátelin Parcco Morales y Karen Annette Cruz Ramírez** para optar el título de Ingeniero Ambiental, **CERTIFICO** que se ha cumplido con lo establecido en la Directiva de Originalidad y de Similitud de Trabajos Académicos, de Investigación y Producción Intelectual.

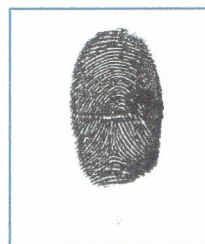
Según la revisión, análisis y evaluación mediante el software de similitud textual, el documento evaluado cuenta con el porcentaje de 15 % de similitud, nivel **PERMITIDO** para continuar con los trámites correspondientes y para su **publicación en el repositorio institucional**.

Se emite el presente certificado en cumplimiento de lo establecido en las normas vigentes, como uno de los requisitos para la obtención del título correspondiente.

Firma del Asesor

DNI: **40745335**

Nombres y apellidos del asesor: **Giuliana Patricia Becerra Celis**



## **DEDICATORIA**

La presente tesis está dedicada a mi madre: Lorena Ramirez Torres, por brindarme su apoyo durante cada etapa de mi vida personal y académica.

*Karen Cruz Ramirez*

Dedico la presente tesis a mis padres, a mi hermana, y a mi abuela, cuyo amor, apoyo, y confianza inquebrantable han sido los pilares que sostuvieron mi esfuerzo en cada etapa de este viaje.

A mi tío Robinson, quién está en el cielo, por sus sabios consejos, su apoyo emocional y el entusiasmo que siempre mostró en cada uno de mis logros.

Con gratitud y cariño.

*Anggiela Parcco Morales*

## **AGRADECIMIENTO**

Expresamos nuestro más sincero agradecimiento a la doctora Giuliana Patricia Becerra Celis por su invaluable motivación y orientación experta en el desarrollo del tema de investigación, y guiarnos en todo el proceso con paciencia y esmero en cada detalle.

Finalmente, extendemos nuestro agradecimiento a SUMMA GOLD por facilitar el acceso a la información esencial para el estudio. Confiamos en que los resultados contribuyan significativamente a la sostenibilidad y optimización de los procesos de la empresa.

## INDICE

|                                                     |     |
|-----------------------------------------------------|-----|
| DEDICATORIA .....                                   | ii  |
| AGRADECIMIENTO.....                                 | iii |
| INDICE .....                                        | iv  |
| RESUMEN.....                                        | 1   |
| ABSTRACT .....                                      | 3   |
| CAPÍTULO I.....                                     | 5   |
| 1. Introducción .....                               | 5   |
| 1.1. Introducción .....                             | 5   |
| 1.2. Planteamiento del problema.....                | 6   |
| 1.2.1. Descripción del problema.....                | 6   |
| 1.2.2. Formulación del problema .....               | 7   |
| 1.3. Objetivo de la investigación.....              | 8   |
| 1.3.1. Objetivo General .....                       | 8   |
| 1.3.2. Objetivos Específicos .....                  | 8   |
| 1.4. Importancia y alcance de la investigación..... | 8   |
| 1.5. Limitaciones de la investigación.....          | 9   |
| CAPÍTULO II .....                                   | 10  |
| 2. Marco teórico .....                              | 10  |
| 2.1. Antecedentes de la investigación .....         | 10  |
| 2.2. Bases teóricas .....                           | 16  |
| 2.3. Definición de términos.....                    | 22  |
| CAPÍTULO III.....                                   | 24  |
| 3. HIPÓTESIS Y VARIABLES.....                       | 24  |
| 3.1 La Hipótesis .....                              | 24  |
| 3.1.1 Hipótesis general .....                       | 24  |
| 3.1.2 Hipótesis específicas .....                   | 24  |
| 3.2. Variables .....                                | 24  |
| 3.2.1. Variable Independiente .....                 | 24  |
| 3.2.2. Variable Dependiente .....                   | 24  |
| 3.3. Operacionalización de las variables .....      | 25  |
| CAPÍTULO IV .....                                   | 26  |
| 4. Materiales y Métodos .....                       | 26  |
| 4.1. Área de estudio.....                           | 26  |
| 4.2. Diseño de investigación .....                  | 27  |

|                                                                                  |    |
|----------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.3. Población y muestra .....                                                   | 39 |
| 4.4. Procedimientos, técnicas e instrumentos de recolección de información ..... | 40 |
| 4.5. Análisis estadístico .....                                                  | 40 |
| CAPÍTULO V .....                                                                 | 43 |
| 5. Resultados y discusiones .....                                                | 43 |
| 5.1 Evaluación del Impacto de Análisis de Ciclo de Vida (EIACV) .....            | 43 |
| 5.1.1 Evaluación del Impacto de Análisis de Ciclo de Vida (EIACV) 2022 .....     | 44 |
| 5.1.2 Evaluación del Impacto de Análisis de Ciclo de Vida (EIACV) 2023 .....     | 53 |
| 5.2. Discusión de resultados .....                                               | 62 |
| 5.2.1 Contribución de los insumos a las categorías de impacto ambiental .....    | 63 |
| 5.2.2 Insumo alternativo .....                                                   | 65 |
| 5.3 Propuesta de mejora .....                                                    | 66 |
| 5.3.1 Presentación de resultados del modelamiento .....                          | 69 |
| 5.4 Beneficios ambientales, económicos y sociales .....                          | 74 |
| CAPÍTULO VI .....                                                                | 75 |
| 6. Conclusiones .....                                                            | 75 |
| CAPÍTULO VII .....                                                               | 77 |
| 7. Recomendaciones .....                                                         | 77 |
| CAPÍTULO VIII .....                                                              | 78 |
| 8. Referencias bibliográficas .....                                              | 78 |
| CAPÍTULO IX .....                                                                | 81 |
| 9. Anexos .....                                                                  | 81 |

## FIGURAS

|                                                                                                                                                                                                            |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1: Categoría de análisis de impacto con el método CML IA baseline .....                                                                                                                             | 18 |
| Figura 2: Categorías de análisis de impacto con el método IPCC GWP 20a .....                                                                                                                               | 19 |
| Figura 3: Fases del análisis de ciclo de vida .....                                                                                                                                                        | 20 |
| Figura 4: Softwares para el análisis de ciclo de vida .....                                                                                                                                                | 21 |
| Figura 5: Mapa de ubicación de la planta de tratamiento de aguas residuales industriales .....                                                                                                             | 26 |
| Figura 6: Diagrama del proceso de Tratamiento de Aguas Residuales Industriales, considerando los siguientes subprocesos o fases: Captación de las aguas, Tratamiento, y Almacenamiento y Disposición ..... | 28 |
| Figura 7: Diagrama de flujo del proceso de tratamiento de aguas residuales industriales, considerando todas las entradas y salidas en cada actividad .....                                                 | 29 |
| Figura 8: Diagrama de flujo del proceso de evaluación de impacto del ciclo de vida .....                                                                                                                   | 40 |
| Figura 9: Diagrama de Simulación de Monte Carlo en el software OpenLCA .....                                                                                                                               | 42 |

|                                                                                                                                                          |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 10: Comparación relativa de las categorías de impacto ambiental para la obtención de 1 013 080 m3 de agua residual tratada en el año 2022.....    | 45 |
| Figura 11: Resultados de la categoría Impacto sobre los recursos abióticos del año 2022.....                                                             | 46 |
| Figura 12: Resultados de la categoría Impacto sobre los recursos abióticos (combustibles fósiles) del año 2022. ....                                     | 46 |
| Figura 13: Resultados de la categoría Agotamiento de la capa de ozono del año 2022.....                                                                  | 47 |
| Figura 14: Resultados de la categoría Ecotoxicidad de agua dulce del año 2022.....                                                                       | 48 |
| Figura 15: Resultados de la categoría Ecotoxicidad acuática marina del año 2022.....                                                                     | 49 |
| Figura 16: Resultados de la categoría Potencial de acidificación del año 2022.....                                                                       | 49 |
| Figura 17: Resultados de la categoría Toxicidad humana del año 2022. ....                                                                                | 50 |
| Figura 18: Resultados de la categoría Calentamiento global (CML 100a) del año 2022.....                                                                  | 51 |
| Figura 19: Resultados de la categoría Calentamiento global (IPCC 100a) del año 2022. ....                                                                | 51 |
| Figura 20: Comparación relativa de las categorías de impacto ambiental para la obtención de 915 376 m3 de agua residual tratada en el periodo 2023. .... | 54 |
| Figura 21: Resultados de la categoría Impacto sobre los recursos abióticos del año 2023.....                                                             | 55 |
| Figura 22: Resultados de la categoría Impacto sobre los recursos abióticos (combustibles fósiles) del año 2023. ....                                     | 56 |
| Figura 23: Resultados de la categoría Agotamiento de la capa de ozono del año 2023.....                                                                  | 56 |
| Figura 24: Resultados de la categoría Ecotoxicidad de agua dulce del año 2023.....                                                                       | 57 |
| Figura 25: Resultados de la categoría Ecotoxicidad acuática marina del año 2023.....                                                                     | 58 |
| Figura 26: Resultados de la categoría Potencial de acidificación del año 2023.....                                                                       | 58 |
| Figura 27: Resultados de la categoría Toxicidad humana del año 2023. ....                                                                                | 59 |
| Figura 28: Resultados de la categoría Calentamiento global (CML 100a) del año 2023.....                                                                  | 60 |
| Figura 29: Resultados de la categoría Calentamiento global (IPCC 100a) del año 2023. ....                                                                | 60 |
| Figura 30: Gráfico comparativo de los valores de las categorías de impacto del año 2022 y 2023. ....                                                     | 64 |
| Figura 31. Diagrama Sankey del Análisis de Ciclo de Vida del Tratamiento de aguas residuales industriales del periodo 2022. ....                         | 70 |
| Figura 32. Diagrama Sankey del Análisis de Ciclo de Vida del Tratamiento de aguas residuales industriales del periodo 2023. ....                         | 71 |
| Figura 33. Diagrama Sankey del Análisis de Ciclo de Vida del Tratamiento de aguas residuales industriales de la propuesta de mejora. ....                | 72 |
| Figura 34. Huella de Carbono total del tratamiento de aguas residuales industriales durante los tres escenarios. ....                                    | 73 |

## CUADROS

|                                                                               |    |
|-------------------------------------------------------------------------------|----|
| Cuadro 1: Métodos de evaluación de impacto (LCIA) .....                       | 17 |
| Cuadro 2: Operacionalización de Variables .....                               | 25 |
| Cuadro 3. Beneficios ambientales, sociales y económicos de la propuesta. .... | 74 |

## TABLAS

|                                                                                                                  |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 1: Volumen de agua residual industrial tratada durante el periodo 2022.....                                | 30 |
| Tabla 2: Consumo de combustible diésel durante el periodo 2022.....                                              | 31 |
| Tabla 3: Consumo de floculante (poliacrilamida) durante el periodo 2022.....                                     | 31 |
| Tabla 4: Consumo de cal durante el periodo 2022.....                                                             | 32 |
| Tabla 5: Lodos generados durante el periodo 2022. ....                                                           | 33 |
| Tabla 6: Residuos generados durante el periodo 2022.....                                                         | 33 |
| Tabla 7: Volumen de agua residual industrial tratada durante el periodo 2023.....                                | 34 |
| Tabla 8: Consumo de combustible diésel durante el periodo 2023.....                                              | 35 |
| Tabla 9: Consumo de energía eléctrica durante el periodo 2023. ....                                              | 36 |
| Tabla 10: Consumo de floculante (poliacrilamida) durante el periodo 2023.....                                    | 37 |
| Tabla 11: Consumo de cal durante el periodo 2023.....                                                            | 37 |
| Tabla 12: Lodos generados durante el periodo 2023. ....                                                          | 38 |
| Tabla 13: Residuos generados durante el periodo 2023.....                                                        | 39 |
| Tabla 14: Categorías de impacto para obtener 1013080 m <sup>3</sup> de agua tratada durante el periodo 2022..... | 44 |
| Tabla 15: Análisis de incertidumbre para las categorías de impacto en el año 2022. ....                          | 52 |
| Tabla 16: Categorías de impacto para obtener 915 376 m <sup>3</sup> de agua tratada durante el periodo 2023..... | 53 |
| Tabla 17: Análisis de incertidumbre para las categorías de impacto en el año 2023. ....                          | 61 |
| Tabla 18: Análisis relativo de la categoría de Cambio climático.....                                             | 62 |
| Tabla 19: Consumo de energía eléctrica estimada para un periodo anual. ....                                      | 67 |
| Tabla 20: Consumo de combustible diésel estimada para un periodo anual.....                                      | 68 |
| Tabla 21. Tabla resumen de la huella de carbono de los tres escenarios anuales. ....                             | 73 |

## RESUMEN

El creciente imperativo de abordar el cambio climático ha intensificado los esfuerzos para promover el diseño de procesos industriales que prioricen la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Esta preocupación ha impulsado una mayor atención hacia la necesidad de implementar prácticas y tecnologías que minimicen el impacto ambiental de las actividades industriales, destacando la importancia de adoptar medidas proactivas para mitigar el cambio climático.

Por consiguiente, el objetivo de esta investigación radica en proponer un diseño ambiental para el tratamiento de aguas residuales industriales de la unidad minera "El Toro", situada en el departamento de La Libertad, con la hipótesis de que es posible que contribuya significativamente a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero. Para ello, el estudio profundiza el análisis con objetivos específicos tales como identificar los insumos del proceso de tratamiento que contribuyen en mayor medida a las categorías de impacto ambiental, además de determinar los insumos alternativos que podrían reducir los impactos ambientales y la huella de carbono, y por último, indicar los beneficios ambientales, económicos y sociales derivados de la implementación de la propuesta.

El estudio se fundamenta en un Análisis de Ciclo de Vida realizado mediante el software OpenLCA 2.0 utilizando la base de datos Agribalyse. Este enfoque facilita la identificación de los impactos ambientales asociados con el tratamiento de aguas residuales industriales, así como el cálculo de la contribución de los insumos al total de emisiones de gases de efecto invernadero. Asimismo, el alcance de la investigación comprende desde la captación de aguas residuales industriales hasta la finalización del tratamiento. El periodo de análisis es dos años (2022 y 2023) y considera como unidad funcional al metro cúbico de agua tratada.

Los resultados de la Evaluación del Impacto del Análisis de Ciclo de Vida (EIACV) para el periodo examinado revelaron que el componente del tratamiento de aguas residuales industriales que genera el mayor impacto ambiental debido a la emisión de gases de efecto invernadero es el consumo de diésel, contribuyendo con más del 99% en varias categorías de impacto, como el uso de recursos abióticos, el impacto sobre los recursos abióticos (combustibles fósiles), el agotamiento de la capa de ozono, la ecotoxicidad de agua dulce,

la ecotoxicidad acuática marina, el potencial de acidificación, la toxicidad humana y el calentamiento global, según las metodologías CML IA Baseline IPCC. Por otro lado, los otros insumos considerados (electricidad, poliacrilamida y cal) representan menos del 1% de los impactos en cada una de las categorías mencionadas anteriormente. Además, la fiabilidad de estos resultados se confirmó mediante una prueba de hipótesis utilizando la simulación de Montecarlo, donde se obtuvo un coeficiente de variación inferior al 25%, garantizando la confiabilidad de los hallazgos.

Por tanto, tras identificar el consumo de diésel como el componente principal del proceso de tratamiento de aguas residuales industriales que contribuye significativamente a las emisiones de gases de efecto invernadero y, en consecuencia, a la huella de carbono, se propone un escenario anual para reducir las emisiones de GEI. Esto implica utilizar energía proveniente de una planta hidroeléctrica y recurrir al diésel solo durante los períodos de alta demanda local.

Basándonos en los resultados de la categoría de calentamiento global, se calcula que la huella de carbono para el año 2022 fue de 4.134E+11 kg CO<sub>2</sub>eq, disminuyendo a 1.994E+11 kg CO<sub>2</sub>eq en 2023. Con la implementación del escenario propuesto en el periodo anual de 2024, se proyecta una huella de carbono de 4.511E+10 kg CO<sub>2</sub>eq, lo que sugiere una reducción del 89% con respecto al año base de estudio (2022).

La propuesta planteada ofrece ventajas en términos ambientales, sociales y económicos. En lo ambiental, se destaca la disminución del uso de recursos naturales no renovables, la considerable reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero en un 89% con respecto al año base, y la disminución de la huella de carbono de la operación minera. En el ámbito social, se espera una reducción en la probabilidad de enfermedades relacionadas con la inhalación de gases de combustión, la creación de empleo y la incentivación de otras empresas a adoptar medidas similares en sus plantas de tratamiento. Desde una perspectiva económica, se prevé una reducción de los costos operativos, la posibilidad de obtener apoyo financiero gracias a la gestión de emisiones y la consolidación de la competitividad de la empresa mediante la aplicación de un enfoque de reducción de gases de efecto invernadero.

## ABSTRACT

The growing imperative to address climate change has intensified efforts to promote the design of industrial processes prioritizing the reduction of greenhouse gas emissions (GHGs). This concern has driven increased attention to the need for implementing practices and technologies that minimize the environmental impact of industrial activities, emphasizing the importance of proactive measures to mitigate climate change.

Therefore, the aim of this research is to propose an environmental design for the treatment of industrial wastewater from the "El Toro" mining unit, located in the department of La Libertad. The hypothesis posits that such a design could significantly contribute to reducing greenhouse gas emissions. To achieve this, the study delves into detailed analysis with specific objectives, including identifying the inputs in the treatment process that have the greatest impact on environmental categories. Additionally, it aims to determine alternative inputs that could mitigate environmental impacts and carbon footprint, and finally, to outline the environmental, economic, and social benefits resulting from the proposal's implementation.

The study is based on a Life Cycle Assessment conducted using OpenLCA 2.0 software with the Agribalyse database. This approach facilitates the identification of environmental impacts associated with industrial wastewater treatment, as well as the calculation of input contributions to total greenhouse gas emissions. Additionally, the scope of the research spans from the collection of industrial wastewater to the completion of treatment. The analysis period covers two years (2022 and 2023), with the functional unit being one cubic meter of treated water.

The results of the Life Cycle Impact Assessment (LCIA) for the examined period revealed that the industrial wastewater treatment component causing the greatest environmental impact due to greenhouse gas emissions is diesel consumption, a component of the studied process, is the primary contributor to environmental impact due to greenhouse gas emissions. It accounts for over 99% in several impact categories, including abiotic resource use, fossil fuel impact on abiotic resources, ozone depletion, freshwater ecotoxicity, marine aquatic ecotoxicity, acidification potential, human toxicity, and global warming, according to the CML IA Baseline and IPCC methodologies. Conversely, other inputs considered (electricity, polyacrylamide, and lime) represent less than 1% of impacts in each of the aforementioned categories. Furthermore, the reliability

of these results was confirmed through hypothesis testing using Monte Carlo simulation, yielding a coefficient of variation below 25%, ensuring the reliability of the findings.

Therefore, after identifying diesel consumption as the primary contributor to greenhouse gas emissions in industrial wastewater treatment, and consequently the carbon footprint, an annual scenario is proposed to reduce GHG emissions. This involves using energy from a hydroelectric plant and relying on diesel only during periods of high local demand.

Based on the results from the Global Warming category, the carbon footprint for 2022 was calculated at  $4.134\text{E}+11$  kg CO<sub>2</sub>eq, decreasing to  $1.994\text{E}+11$  kg CO<sub>2</sub>eq in 2023. With the implementation of the proposed scenario in the annual period of 2024, a carbon footprint of  $4.511\text{E}+10$  kg CO<sub>2</sub>eq is projected, suggesting an 89% reduction compared to the base study year (2022).

The proposed plan would offer environmental, social, and economic benefits. Environmentally, it would reduce the use of non-renewable natural resources, significantly decrease greenhouse gas emissions by 89% compared to the base year, and reduce the mining operation's carbon footprint. Socially, it is expected to lower the likelihood of illnesses related to gas inhalation, create employment opportunities, and encourage other companies to adopt similar measures in their treatment plants. Economically, it would reduce operational costs, potentially secure financial support through emission management, and enhance the company's competitiveness by applying a greenhouse gas reduction approach.

# CAPÍTULO I

## 1. Introducción

### 1.1. Introducción

Se calcula que en el 2019 las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) de origen humano fueron aproximadamente de 59 Gt-CO<sub>2</sub>eq, siendo más del doble de lo emitido en 1990, donde la quema de combustibles fósiles y los procesos industriales son los principales aportantes a las emisiones (IPCC, 2023). Estos resultados generan una importante preocupación sobre las acciones que actualmente se realizan para contrarrestar y desacelerar la velocidad con la que se están generando los GEI, siendo crucial que estas medidas sean eficientes y se ejecuten desde diferentes frentes en las actividades económicas. Es por ello que se promueve a que se apliquen metodologías que conduzcan a la minimización de impactos ambientales y la gestión de gases de efecto invernadero (Perú, Ministerio del Ambiente, 2019).

Minimizar los impactos ambientales utilizando la metodología del Análisis de Ciclo de Vida (ACV) permite realizar el rediseño ambiental de un producto o proceso optimizando recursos energéticos, materia prima, insumos químicos, y reduciendo de esta manera la carga ambiental asociada a una actividad (Vega *et al.*, 2020). Diversas investigaciones en la cuales se aplicó la metodología ACV indican que incluso las actividades que tienen la finalidad de mejorar la calidad del ambiente generan impactos ambientales a lo largo de su ciclo de vida (Bonton *et al.*, 2012).

En ese contexto, el tratamiento de las aguas residuales no se excluye de ser un proceso libre de generación de efectos negativos (Alfárez y Nieves, 2019), por tanto, es importante que se planteen alternativas que aseguren su eficacia considerando la máxima reducción de los impactos ambientales asociados.

Por lo tanto, el propósito de este estudio es llevar a cabo un Análisis de Ciclo de Vida del proceso de tratamiento de aguas residuales industriales en la Unidad Minera El Toro utilizando el software OpenLCA. Esto implica identificar las categorías de impacto ambiental que reciben la mayor contribución y los subprocesos que generan los mayores impactos negativos en el ambiente. Además se busca proponer

alternativas a través del modelamiento que reduzcan la carga ambiental de las aguas usadas en el proceso minero.

## **1.2. Planteamiento del problema**

### **1.2.1. Descripción del problema**

A nivel mundial, se generan gases de efecto invernadero de manera natural y durante el desarrollo de actividades antropogénicas, siendo estas últimas las que contribuyen fundamentalmente con la liberación de estos gases a la atmósfera terrestre, que conducen al calentamiento global y al cambio climático (IPCC, 2013).

Según la Organización de las Naciones Unidas, en el informe especial del IPCC elaborado en el año 2018 que trata sobre los impactos del calentamiento global, se indica que es probable que la Tierra alcance un incremento de la temperatura en 1.5°C entre los años 2030 y 2052, ocasionando grandes efectos y cambios sobre nuestro planeta.

Ante ese contexto, diferentes países están estableciendo políticas con el objetivo de sumar fuerzas para frenar el cambio climático, buscando que sean capaces de promover acciones que contribuyan a la reducción de la emisión desmedida de gases de efecto invernadero.

Sin embargo, los diferentes esfuerzos realizados a nivel mundial aún no son suficientes para compensar las emisiones de gases de efecto invernadero que son generadas en gran magnitud, incluso durante el desarrollo de actividades que tienen el objetivo de mejorar la calidad del ambiente, como el tratamiento de aguas residuales domésticas e industriales.

En efecto, durante el tratamiento de las aguas residuales domésticas e industriales se realizan procesos físicos, químicos o biológicos, con el objetivo de asegurar que la calidad de agua cuente con características que permita su vertimiento a los cuerpos de agua o el reuso, sin generar daños a la salud humana y al ambiente.

A pesar de que el tratamiento de aguas tiene como objetivo principal garantizar la calidad adecuada del ambiente, no está exento de contribuir a la emisión de gases de efecto invernadero y al cambio climático, tanto durante la etapa de operación, como en la obtención de los materiales e insumos necesarios. Diversos estudios demuestran que la mayoría de las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) no tienen establecidos Programas de Monitoreo de Agua ni de parámetros de operación establecidos (Superintendencia Nacional de Servicios de Saneamiento [SUNASS], 2022, p.262), lo que dificulta la verificación adecuada del cumplimiento de los estándares ambientales.

Tomando en cuenta lo mencionado, surge la necesidad de realizar un análisis exhaustivo del ciclo de vida del proceso de tratamiento de aguas residuales industriales, para identificar los subprocessos que contribuyen en mayor medida a la generación de gases de efecto invernadero, y de esta forma, diseñar una propuesta que reduzca la cantidad de emisiones generadas y que finalmente conduzca a obtener una eficiencia ambiental y económica.

### **1.2.2. Formulación del problema**

#### **Problema General**

¿Cuáles son las modificaciones en el proceso de tratamiento de aguas residuales industriales mineras que contribuyen a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero?

#### **Problemas Específicos**

- ¿Cuáles son los insumos del proceso de tratamiento de aguas residuales que contribuyen en mayor medida a las categorías de impacto ambiental seleccionadas?
- ¿Qué insumos alternativos podrían reducir los impactos ambientales y la huella de carbono en el tratamiento de aguas residuales industriales?

- ¿Cuáles son los beneficios ambientales, económicos y sociales derivados de la implementación de una propuesta para la reducción de gases de efecto invernadero?

### **1.3. Objetivo de la investigación**

#### **1.3.1. Objetivo General**

Proponer un diseño ambiental para el tratamiento de aguas residuales industriales mineras que contribuya a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero.

#### **1.3.2. Objetivos Específicos**

- Identificar los insumos del proceso de tratamiento de aguas residuales industriales que contribuyen en mayor medida a las categorías de impacto ambiental.
- Determinar los insumos alternativos que podrían reducir los impactos ambientales y la huella de carbono en el tratamiento de aguas residuales industriales.
- Indicar los beneficios ambientales, económicos y sociales derivados de la implementación de una propuesta para la reducción de gases de efecto invernadero.

### **1.4. Importancia y alcance de la investigación**

La propuesta planteada servirá como insumo y será un elemento importante para respaldar la toma de decisiones basada en evidencia y en criterios técnicos. De esta manera, la alta dirección podrá evaluar la posibilidad de realizar un cambio en el diseño de su proceso de tratamiento de aguas residuales industriales con la finalidad de reducir los impactos ambientales, disminuir costos, y generar un impacto social positivo a nivel sectorial y nacional, con una repercusión global a nivel empresarial.

Asimismo, este estudio pretende impulsar la realización de investigaciones adicionales para mejorar los procesos que se han estado diseñando de manera

tradicional sin considerar la optimización de recursos y la identificación de impactos mediante la metodología de análisis de ciclo de vida. Esta técnica ofrece la oportunidad de generar una mayor eficiencia en todos los niveles.

Finalmente, y de mayor importancia desde la perspectiva de sostenibilidad, realizar esta investigación contribuirá a determinar un diseño ambiental óptimo que impulse a la acción empresarial para reducir la generación de gases de efecto invernadero. Esta decisión es necesaria, imperativa y con alto grado de urgencia, ya que sumarían a las acciones necesarias a nivel nacional y mundial para contribuir a que la humanidad viva en un ambiente saludable y con las condiciones ambientales adecuadas para el desarrollo de las generaciones futuras.

El alcance de la investigación abarcará el análisis del proceso de tratamiento de aguas residuales industriales, desde la etapa de captación de aguas residuales industriales hasta la finalización del tratamiento, considerando como unidad funcional al metro cúbico de agua tratada.

## **1.5. Limitaciones de la investigación**

Las limitaciones de este estudio provienen principalmente de la base de datos Agribalyse, utilizada en el software OpenLCA. Esta base de datos, desarrollada principalmente para el contexto europeo, presenta insumos y fuentes de energía que difieren en cierta medida de las tecnologías y condiciones operativas empleadas en Perú.

Sin embargo, Agribalyse es la base de datos más similar y completa disponible para realizar evaluaciones del ciclo de vida en el contexto de esta investigación. Para mitigar estas limitaciones, se ha realizado un esfuerzo significativo para complementar Agribalyse con datos específicos del proceso minero objeto de estudio, incluyendo insumos locales y prácticas operativas. Este enfoque permite ajustar y validar los datos de Agribalyse, aumentando la relevancia y precisión de los resultados en el contexto peruano.

Adicionalmente, se han consultado literatura específica del sector minero en Perú para afinar aún más los datos y supuestos utilizados en el estudio. Aunque existen limitaciones inherentes al uso de una base de datos desarrollada para otro contexto

geográfico, Agribalyse combinada con datos locales específicos permite extrapolar los resultados de manera más precisa y representativa al caso específico estudiado, proporcionando solidez a las conclusiones del estudio.

## **CAPÍTULO II**

### **2. Marco teórico**

#### **2.1. Antecedentes de la investigación**

En el mundo y en el Perú existen estudios sobre Análisis de Ciclo de Vida (ACV) dirigidos a diversos procesos y actividades ligadas al tratamiento de aguas residuales industriales y domésticas y al sector minero. A continuación, se citarán brevemente algunas investigaciones que fueron tomadas como guía para el desarrollo del presente estudio:

- Montoya Flores, Mayra Lucía (2021) “Análisis de Ciclo de Vida de la potabilizadora de La Atarjea, ubicada en la ciudad de Lima”. Investigación, Pontificia Universidad Católica del Perú.

La tesis planteó la identificación de las potenciales cargas ambientales asociadas al sistema de potabilización de agua de La Atarjea en la ciudad de Lima, mediante la metodología de Análisis de Ciclo de Vida, definiendo un alcance que comprendía desde la captación hasta la distribución a la ciudad, y señalando que la unidad funcional fue 1 m<sup>3</sup> de agua potabilizada. Para el respectivo modelamiento se utilizó el software SimaPro juntamente con la base de datos Ecoinvent v3. Como resultado del análisis, se evidenció que los mayores impactos ambientales se generaban como consecuencia del uso de insumos químicos durante la ejecución del proceso.

Como derivación del modelamiento, la autora recomienda que se reemplacen los insumos químicos usados, de tal manera que las nuevas alternativas tecnológicas respondan a la demanda del proceso y

contribuyan a la disminución de la generación de gases de efecto invernadero.

- Torre García, André. (2018) “Diseño y Análisis ambiental de una planta de tratamiento de aguas residuales en la ciudad de Huaraz”. Investigación, Pontificia Universidad Católica del Perú.

El estudio se enfocó en desarrollar el diseño de una instalación de tratamiento de aguas residuales. Para esto, se utilizó BioWin 5 para simular los diferentes métodos de tratamiento y SimaPro para llevar a cabo un análisis del ciclo de vida del proceso. Este análisis permitió identificar y comparar los efectos ambientales relacionados con la implementación del proceso.

Los resultados sobre el análisis ambiental indicaron que reemplazar un sistema aerobio por un sistema anaerobio permite la reducción de impactos ambientales a nivel de los indicadores de calentamiento global y eutrofización.

Finalmente, el autor afirma que la metodología de análisis de ciclo de vida es una metodología complementaria que permitió cuantificar los impactos ambientales asociados a la ejecución del proceso.

- Neira Orosco, Matías Felipe. (2019) “Proyección de impactos ambientales de nuevas plantas de tratamiento de agua para la región metropolitana: Formulación de un modelo a partir de un análisis de ciclo de vida”. Investigación, Universidad de Chile.

La investigación planteó la estimación de un modelo que cuantifique las emisiones generadas por la operación de las nuevas plantas de tratamiento de agua potable y la evaluación a nivel ambiental de dos propuestas de tratamiento, mediante el Análisis de Ciclo de Vida.

Los resultados del modelo evidenciaron que los procesos que más aportaron en la generación de gases de efecto invernadero fueron el tratamiento primario, secundario y emisiones directas, tratamiento terciario y uso de insumos. Asimismo, al evaluar los dos escenarios propuestos, se concluyó que el principal contribuyente de emisiones de gases de efecto invernadero fue el uso de energía eléctrica.

Basándose en el análisis del contexto actual y la evaluación de diversas propuestas, el autor recomienda que se trabaje en un inventario nacional para el Análisis de Ciclo de Vida. Esta medida permitiría obtener resultados más precisos en comparación con el uso de inventarios internacionales, los cuales pueden reflejar realidades distintas a la del país en cuestión.

- Rincón Restrepo, D., Sanabria Guerrero, J. (2020) “Estudio comparativo de evaluación del ciclo de vida de procesos tratamiento de aguas residuales de una industria textil en Medellín”. Trabajo de Investigación, Universidad Católica de Colombia.

En la investigación se realizó el Análisis de Ciclo de Vida del tratamiento de aguas residuales de una industria textil utilizando dos softwares, GPS-X y GABI, el primero para obtener un flujo másico, y el segundo, para determinar los impactos ambientales asociados.

Como resultado del Análisis de Ciclo de Vida del tratamiento, se determinó que la categoría de impacto que recibió mayor contribución por la ejecución del proceso de oxidación fue el cambio climático y el de menor impacto fue la categoría de toxicidad humana.

A pesar de los resultados obtenidos con el modelamiento del proceso de tratamiento, en donde se indica que la categoría de toxicidad humana no es el mayor impacto ambiental, el autor recomienda que se debe de realizar

un adecuado uso de los insumos químicos usados en el proceso en mención y realizar un control de los remanentes que son vertidos.

- Gallego Maya, Rocío. (2021) “Análisis de ciclo de vida aplicado a sistemas de ablandamiento del agua”. Investigación, Universidad de Sevilla, España.

La investigación se centra en el Análisis de Ciclo de Vida de dos alternativas de ablandamiento de agua para determinar el impacto ambiental asociado a los sistemas analizados. La primera propuesta consiste en un sistema de ablandamiento con intercambio iónico utilizando insumos químicos, mientras que la segunda propuesta emplea un sistema electroquímico que no requiere de productos químicos. El software empleado en el estudio fue SimaPro que utiliza la metodología ReCiPe 2016 Midpoint.

Según los resultados del modelado y análisis, se encontró que el método de ablandamiento por intercambio iónico tiene un impacto ambiental más significativo en comparación con el sistema electroquímico, el cual no utiliza insumos químicos durante el proceso. Indicando que el origen de los impactos de cada sistema radica en la salmuera generada en el proceso de intercambio iónico, mientras que, en el sistema electroquímico, es el uso de electricidad el contribuyente principal de los impactos ambientales asociados.

Sin embargo, el autor recomienda que a pesar de que el sistema electroquímico haya mostrado un menor impacto, se debe de mantener una especial atención al consumo energético, ya que aumentar su consumo ocasiona un incremento del impacto ambiental. Asimismo, se evidencia que el insertar energías renovables al sistema energético español, conduce a una disminución del impacto en distintas categorías de impacto ambiental.

- Camelo Abril, Laura María. (2020) “Análisis de ciclo de vida de una planta de tratamiento de agua residual construida por la empresa Prodeing LTDA” Investigación, Universidad Santo Tomas, Colombia.

La tesis tuvo como objetivo desarrollar un Análisis de ciclo de vida basada en la norma ISO 14040 del 2007, y aplicado a la construcción de una planta de tratamiento de agua residual, utilizando el software SimaPro y la metodología Conesa para identificar los impactos ambientales asociados.

Los resultados mediante la metodología Conesa indicaron que existe principalmente un incremento de emisiones atmosféricas por la ejecución del subproceso de soldadura y aplicación, y reducción de recursos no renovables por el transporte de instrumentos. Mientras que los resultados del análisis de ciclo de vida determinaron que los aparatos eléctricos y electrónicos son los tipos de materiales que generan mayor aporte en la categoría de impactos ambientales durante la etapa de construcción.

- Grajeda, C., Pocosangre, A., (2018) “Determinación de impactos ambientales en planta de tratamiento de aguas residuales mediante análisis de ciclo de vida ambiental-ACV” Artículo científico, ERIS-USAC, Guatemala.

El artículo se centra en identificar los impactos ambientales relacionados con el tratamiento de aguas residuales domésticas, utilizando la metodología ACV, bajo los lineamientos de la ISO 14040:2006, y considerando las siguientes categorías: agotamiento de recursos, cambio climático, potencial de eutrofización, y carga contaminante.

Los resultados señalaron principalmente que la contribución a la categoría de impacto de cambio climático era mínima, y que la capacidad de reducción de la eutrofización disminuyó en función del tipo de tratamiento aplicado.

El autor concluye que, aunque el tratamiento de aguas residuales esté destinado a mejorar las condiciones ambientales, no está exento de generar impactos ambientales. Por lo tanto, considera que es necesario realizar este análisis para mejorar la eficiencia teniendo en cuenta los aspectos ambientales involucrados.

- Chavez Parra, Omar Fernando (2021) “Análisis de ciclo de vida del proyecto de construcción de un taller de camiones en una unidad minera del departamento de Ica”. Investigación, Pontificia Universidad Católica del Perú.

La investigación tiene como principal objetivo realizar el análisis de ciclo de vida de la fase de construcción de un taller de camiones, considerando la metodología ReCiPe 2016, y estableciendo como unidad funcional al m<sup>2</sup> de construcción.

Los resultados revelan que el consumo de energía eléctrica durante los procesos fue el factor principal en la generación de impacto ambiental en varias categorías durante la fase de uso de la infraestructura. Además, se destaca la etapa de pre-uso como otra contribuyente significativa en los resultados obtenidos. Esto sugiere que la cadena de suministro y los insumos utilizados en la construcción tienen un peso considerable en el impacto ambiental derivado de la ejecución de proyectos de construcción.

Finalmente, el autor recomienda a partir de las conclusiones obtenidas, que debería de plantearse alternativas que optimicen el uso de energía eléctrica durante la fase de construcción, así como se determine los materiales e insumos óptimos que contribuyan a la disminución del impacto ambiental relacionado a la ejecución de cualquier proyecto constructivo.

Es fundamental señalar que la literatura y la revisión de antecedentes revelan que, hasta la fecha, se han llevado a cabo estudios en Perú sobre el análisis de ciclo de vida en el tratamiento de aguas para potabilización. Sin embargo, no se ha

realizado ninguna investigación en el país sobre el análisis de ciclo de vida del tratamiento de aguas residuales industriales derivadas de la actividad minera. Esto demuestra la importancia del presente estudio, ya que sus resultados establecerán un precedente para analizar a fondo los impactos ambientales asociados con este tipo de procesos y proponer mejoras en su diseño ambiental.

## **2.2. Bases teóricas**

- **Análisis de ciclo de vida**

### **Definición:**

Según la Norma ISO 14040, el Análisis de Ciclo de Vida es una metodología para identificar los aspectos ambientales e impactos potenciales de un producto. Esto implica recopilar un inventario de las entradas y salidas relevantes del sistema, evaluar los posibles impactos ambientales relacionados con esas entradas y salidas, y analizar los resultados del inventario e impacto en función de los objetivos del estudio.

Sin embargo, el análisis de ciclo de vida no está limitado solo a productos, sino también al análisis en procesos, con el objetivo de identificar y evaluar las medidas necesarias para minimizar los impactos ambientales más importantes.

### **Tipos de impactos ambientales del análisis de ciclo de vida:**

Según lo establecido por la Norma internacional ISO 14040: Análisis de ciclo de vida. Principios y marco de referencia, existen distintos tipos de impactos ambientales que se consideran durante el análisis de ciclo de vida, y los cuales son:

- Impacto sobre recursos naturales
- Impacto sobre recursos no renovables
- Potencial de calentamiento global
- Potencial disminución de la capa de ozono
- Potencial acidificación de los océanos
- Potencial reacción fotoquímica de ozono

- Uso de energía
- Uso de agua
- Toxicidad humana
- Toxicidad terrestre
- Toxicidad acuática

Asimismo, estos impactos ambientales son denominados “Categorías de impacto” en el software OpenLCA.

### **Métodos de evaluación de impacto ambiental (Métodos LCIA):**

Según el Manual de OpenLCA 2., es fundamental determinar los métodos de Evaluación de Impacto Ambiental de Ciclo de Vida (LCIA), ya que permite cuantificar los impactos asociados a un producto, proceso o sistema. Para realizar esta cuantificación se analizan los datos (inputs y outputs) del Inventario de Ciclo de Vida (LCI) y son traducidos en indicadores.

Seguidamente, se resumen los diversos métodos LCIA que utiliza el software OpenLCA.

**Cuadro 1: Métodos de evaluación de impacto (LCIA)**

| <b>Metodología</b> | <b>Creador</b>                        | <b>Impactos</b>                                                                      | <b>Descripción</b>                                                                          |
|--------------------|---------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|
| Eco-indicador 99   | Pré Consultants                       | Salud humana, ecosistema, recursos                                                   | Evalúa impactos agrupados en daños a la salud humana, calidad del ecosistema y recursos.    |
| ReCiPe             | Pré Consultants                       | Amplia gama incluyendo ozono, toxicidad, cambio climático, uso del suelo y recursos. | Combina robustez científica con facilidad de interpretación, mejorando modelos ambientales. |
| CML 2001           | Centre of Environmental Science (CML) | Acidificación, cambio climático, ecotoxicidad, recursos.                             | Basado en el CML 1992, proporciona valores de referencia para la evaluación de impactos.    |

|              |                                                          |                                                                                                                        |                                                                                                         |
|--------------|----------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| IPCC         | Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)         | Cambio climático                                                                                                       | Identifica los elementos que contribuyen al calentamiento global a causa de las emisiones atmosféricas. |
| TRACI        | Environmental Protection Agency (EPA US)                 | Incluye ozono, cambio climático, salud humana, ecotoxicidad, recursos.                                                 | Herramienta informática para evaluar múltiples categorías de impacto ambiental.                         |
| IMPACT 2002+ | Instituto de tecnología federal suizo de Lausanne (EPFL) | Diversos como toxicidad, salud humana, acidificación, ozono, cambio climático, recursos, radiación y smog fotoquímico. | Integración de metodologías previas para evaluar impactos ambientales complejos.                        |

**Fuente:** Adaptado de IHOBE S.A. - Sociedad Pública de Gestión Ambiental, 2009.

Cada metodología se selecciona según la necesidad de evaluar impactos específicos en proyectos ambientales.

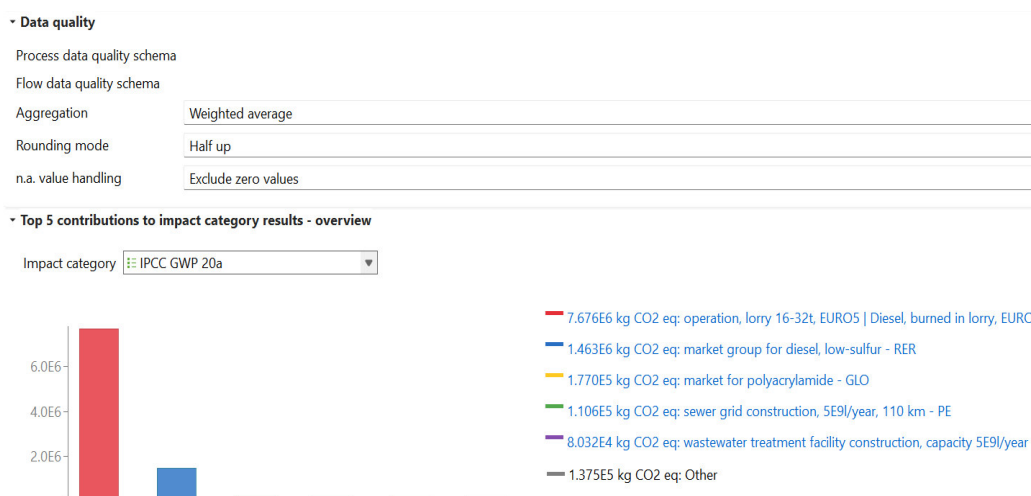
Es preciso dejar en claro que, si bien los métodos que son utilizados en el software OpenLCA son diversos; para el presente estudio se realizará el análisis con el método IPCC (IPCC GWP 20a) y el método CML IA con la finalidad de analizar las categorías de impacto asociadas a los objetivos de la investigación. Estas categorías de impacto se presentan en las dos siguientes ilustraciones:

**Figura 1: Categoría de análisis de impacto con el método CML IA baseline.**

| Impact analysis: CML-IA baseline                                                                        |                 |                  |                         |                          |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|------------------|-------------------------|--------------------------|
| Sub-group by: <input checked="" type="radio"/> Flows <input type="radio"/> Processes   Don't show < 1 % |                 |                  |                         |                          |
| Name                                                                                                    | Category        | Inventory result | Characterization factor | Impact assessment res... |
| > <input checked="" type="checkbox"/> Abiotic depletion                                                 | CML-IA baseline |                  |                         | 2.57543 kg Sb eq         |
| > <input checked="" type="checkbox"/> Abiotic depletion (fossil fuels)                                  | CML-IA baseline |                  |                         | 1.29187E8 MJ             |
| > <input checked="" type="checkbox"/> Acidification                                                     | CML-IA baseline |                  |                         | 2.90971E4 kg SO2 eq      |
| > <input checked="" type="checkbox"/> Eutrophication                                                    | CML-IA baseline |                  |                         | 5950.56266 kg PO4--- ... |
| > <input checked="" type="checkbox"/> Fresh water aquatic ecotox.                                       | CML-IA baseline |                  |                         | 4.04675E5 kg 1,4-DB eq   |
| > <input checked="" type="checkbox"/> Global warming (GWP100a)                                          | CML-IA baseline |                  |                         | 9.29336E6 kg CO2 eq      |
| > <input checked="" type="checkbox"/> Human toxicity                                                    | CML-IA baseline |                  |                         | 1.03434E6 kg 1,4-DB eq   |
| > <input checked="" type="checkbox"/> Marine aquatic ecotoxicity                                        | CML-IA baseline |                  |                         | 9.86255E8 kg 1,4-DB eq   |
| > <input checked="" type="checkbox"/> Ozone layer depletion (ODP)                                       | CML-IA baseline |                  |                         | 1.64544 kg CFC-11 eq     |
| > <input checked="" type="checkbox"/> Photochemical oxidation                                           | CML-IA baseline |                  |                         | 945.51189 kg C2H4 eq     |
| > <input checked="" type="checkbox"/> Terrestrial ecotoxicity                                           | CML-IA baseline |                  |                         | 8817.21762 kg 1,4-DB ... |

**Fuente:** Elaboración propia a partir del modelamiento en el Software OpenLCA 2.0.0.

**Figura 2: Categorías de análisis de impacto con el método IPCC GWP 20a.**



**Fuente:** Elaboración propia a partir del Software OpenLCA 2.0.0.

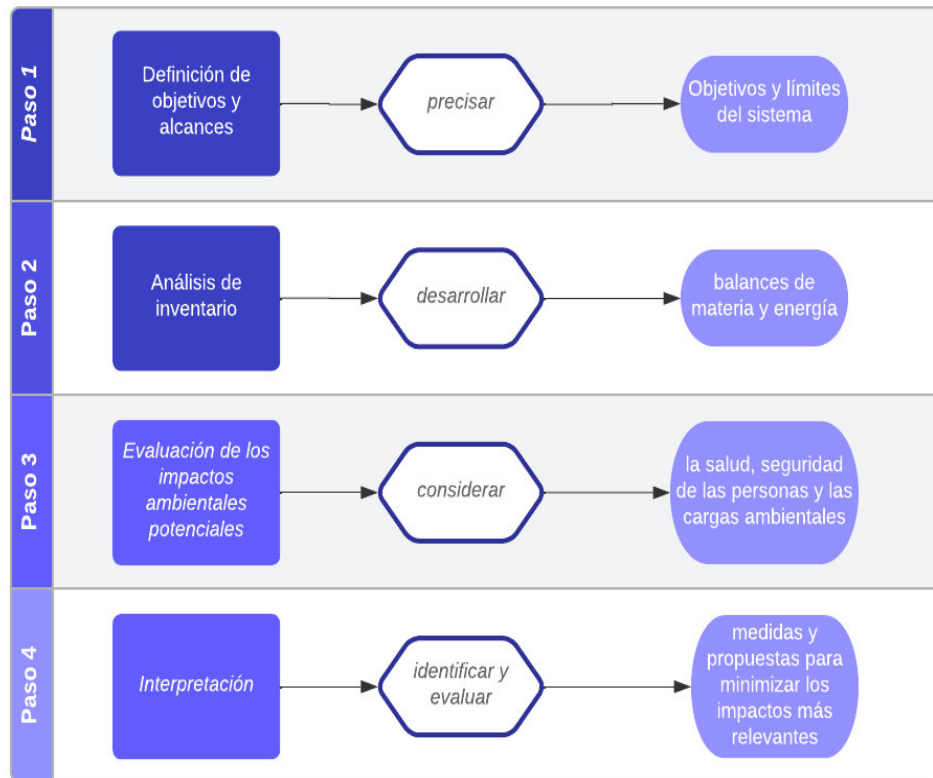
En la ilustración 1 se visualizan las categorías de impacto ambiental que se examinan en el análisis de ciclo de vida mediante el método CML IA, mientras que en la ilustración 2 se visualiza la categoría de impacto utilizando el método IPCC GWP 20a.

Si bien el software OpenLCA permite la visualización de diferentes tipos de impactos ambientales en el análisis de ciclo de vida, en este estudio se considerarán inicialmente todas las categorías de impacto, pero se enfatizará en los tipos de impacto ambiental que estén estrechamente relacionados con el objetivo y alcance, eso quiere decir que, serán las categorías de calentamiento global (GWP20a) asociada a la metodología de evaluación de impacto IPCC, y además las categorías de impacto de agotamiento de la capa de ozono, ecotoxicidad de agua dulce, acidificación de los océanos, impacto sobre recursos abióticos, toxicidad humana, y calentamiento global, asociados a la metodología de evaluación de impacto CML.

## Fases del análisis de ciclo de vida

El proceso de análisis de ciclo de vida está resumido en los siguientes 5 pasos:

**Figura 3: Fases del análisis de ciclo de vida**



**Fuente:** ISO 14040:2006.

## Softwares para el análisis de ciclo de vida:

Actualmente existen un gran número de softwares que permiten realizar el análisis de ciclo de vida posibilitando el acceso a una base de datos nutrida que permite asociar los impactos ambientales al uso de materias primas, insumos, tipo de energía, residuos, etc. de acuerdo con el lugar y modo de producción.

A continuación, se detalla una lista de los principales softwares que permiten el análisis de ciclo de vida:

**Figura 4: Softwares para el análisis de ciclo de vida**

| Softwares de Análisis de ciclo de vida                                                                                                                                        |                         |                                                                                     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                                                                                                                               | Herramientas de cálculo |                                                                                     |
|                                                                                              | SimaPro                 |    |
| Software orientado al análisis de ciclo de vida de productos y servicios, con aplicación en el diseño de productos, informes de sostenibilidad, huella de carbono, etc.       |                         |                                                                                     |
|                                                                                              | Eco-it                  |    |
| Software orientado al análisis de ciclo de vida de los productos, calculando la carga ambiental de cada proceso, con el objetivo de mejorar el desempeño ambiental.           |                         |                                                                                     |
|                                                                                              | Air.eLCA                |    |
| Software con una interfaz que asegura la reducción del tiempo de modelamiento y con una fuente de datos completa, y la obtención de resultados instantaneos.                  |                         |                                                                                     |
|                                                                                             | OpenLCA                 |   |
| Software gratuito para el análisis de ciclo de vida, permitiendo integrar el costo del ciclo de vida y evaluación social.                                                     |                         |                                                                                     |
|                                                                                            | GaBi                    |  |
| Software robusto que permite el análisis de ciclo de vida de un producto o sistema, analizando el impacto sobre el medio ambiente presentando alternativas de sostenibilidad. |                         |                                                                                     |
|                                                                                            | UMBERTO                 |  |
| Software que permite el análisis de ciclo de vida acorde con la ISO 14040 y mide la huella de carbono acorde con la ISO 14067, el GHG Protocol y PAS 2050.                    |                         |                                                                                     |

**Fuente:** Elaboración propia, 2023.

- **El sistema de tratamiento de aguas industriales de mina**

La planta de tratamiento de aguas residuales industriales de mina que se analizará está conformada por una instalación que cuenta con un área de 86,571.5 m<sup>2</sup>, la cual colinda por el este con el Botadero de Desmonte, de donde se captan las aguas

de drenaje ácido de roca o aguas industriales mediante un sistema de subdrenaje y se almacenan en una poza revestida con una capacidad de 1200 m<sup>3</sup>, luego las aguas son bombeadas hacia una poza de colección, y mediante un sistema de bombeo es ingresada al proceso de tratamiento de aguas industriales.

El proceso en mención cuenta con un sistema compuesto por tanques para la preparación de lechada de cal, tanques para oxidación, neutralización y precipitación de Drenaje Ácido de Roca, y dosificación de floculante. Posteriormente, el agua en proceso de tratamiento es derivada a dos pozas de sedimentación, en donde el agua ingresa a la primera poza y sedimenta lodos que contienen metales, después el agua tratada ingresa a la segunda poza de sedimentación mediante reboce, lugar en donde se realiza el último proceso físico de sedimentación para asegurar que la calidad de agua sea óptima y que cumpla con los límites máximos permisibles (LMP) para vertimientos de agua residual industrial proveniente de actividades minero metalúrgicas.

Finalmente, los lodos que son captados de la primera y segunda poza de sedimentación son bombeados y/o succionados con cisternas hacia una poza de lodos, en donde se realiza el secado para que luego sean dispuestos de manera segura.

### **2.3. Definición de términos**

Las siguientes definiciones fueron recopiladas a partir de la Norma Internacional ISO 14040:2006.

#### **2.3.1 Ciclo de vida**

Se refiere a las etapas consecutivas e interconectadas de un sistema de producto, desde la obtención de materias primas o su generación a partir de recursos naturales, hasta su disposición final.

#### **2.3.2 Análisis del ciclo de vida - ACV**

Consiste en recopilar y evaluar las entradas, salidas y los posibles impactos ambientales de un sistema de producto a lo largo de su ciclo de vida.

### **2.3.3 Análisis del inventario del ciclo de vida - ICV**

Es la fase del análisis del ciclo de vida que abarca la recopilación y cuantificación de las entradas y salidas de un sistema de producto a lo largo de su ciclo de vida.

### **2.3.4 Evaluación del impacto del ciclo de vida - EICV**

Es la etapa del análisis del ciclo de vida que se enfoca en identificar y evaluar la magnitud y la relevancia de los impactos ambientales potenciales de un sistema de producto a lo largo de todo su ciclo de vida.

### **2.3.5 Unidad funcional**

Representa el rendimiento cuantificado de un sistema de producto utilizado como unidad de referencia.

### **2.3.6 Límite del sistema**

Es el conjunto de criterios que determinan cuales procesos unitarios forman parte de un sistema del producto.

### **2.3.7 Factor de caracterización**

Se refiere al factor derivado de un modelo de caracterización, utilizado para convertir el resultado del análisis del inventario del ciclo de vida en la unidad común del indicador de categoría.

### **2.3.8 Categoría de impacto**

Se define como la clase que abarca temas ambientales relevantes y a la cual se pueden asignar los resultados del análisis del inventario del ciclo de vida.

### **2.3.9 Indicador de categoría de impacto**

Significa la representación cuantificable de una categoría de impacto.

## **CAPÍTULO III**

### **3. HIPÓTESIS Y VARIABLES**

#### **3.1 La Hipótesis**

##### **3.1.1 Hipótesis general**

Es posible realizar un diseño ambiental en el tratamiento de aguas residuales industriales mineras que contribuya a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero.

##### **3.1.2 Hipótesis específicas**

- El principal insumo del proceso de tratamiento de aguas residuales industriales que contribuye en mayor medida a las categorías de impacto ambientales seleccionadas es el combustible diésel.
- El reemplazo de combustible por energía eléctrica es una alternativa que permite reducir los impactos ambientales y la huella de carbono en el tratamiento de aguas residuales industriales.
- La implementación de la propuesta para la reducción de gases de efecto invernadero deriva en beneficios ambientales, económicos y sociales.

#### **3.2. Variables**

##### **3.2.1. Variable Independiente**

- Análisis de ciclo de vida del tratamiento de aguas residuales industriales (ARI).

##### **3.2.2. Variable Dependiente**

- Emisiones de gases de efecto invernadero (GEI)

### 3.3. Operacionalización de las variables

**Cuadro 2: Operacionalización de Variables**

| Variables            |                                                                             | Dimensiones                                                                  | Indicador                                     | Unidad                                                |
|----------------------|-----------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|-------------------------------------------------------|
| <b>Independiente</b> | Análisis de ciclo de vida del tratamiento de agua residual industrial (ARI) | Tratamiento de las aguas residuales industriales.                            | Cantidad de agua residual industrial tratada. | m <sup>3</sup> de ARI tratada/año                     |
|                      |                                                                             | Uso de insumos químicos.                                                     | Cantidad de insumos químicos.                 | TN/año                                                |
|                      |                                                                             | Uso de combustible.                                                          | Cantidad de combustible.                      | galones/año                                           |
|                      |                                                                             | Uso de energía eléctrica.                                                    | Cantidad de energía eléctrica.                | KWh/año                                               |
| <b>Dependiente</b>   | Emisiones de gases de efecto invernadero (GEI)                              | Huella de carbono del actual proceso operativo                               | Cantidad de GEI generados.                    | Kg CO <sub>2</sub> eq*/m <sup>3</sup> de ARI tratada  |
|                      |                                                                             | Gases de efecto invernadero producido en el uso de insumos químicos.         | Cantidad de GEI generados.                    | Kg CO <sub>2</sub> eq/m <sup>3</sup> de ARI tratada   |
|                      |                                                                             | Gases de efecto invernadero producido en el uso de combustible.              | Cantidad de GEI generados.                    | Kg CO <sub>2</sub> eq/m <sup>3</sup> de ARI tratada   |
|                      |                                                                             | Gases de efecto invernadero producido en el uso de energía eléctrica.        | Cantidad de GEI generados.                    | Kg CO <sub>2</sub> 2 eq/m <sup>3</sup> de ARI tratada |
|                      |                                                                             | Huella de carbono del proceso operativo considerando la propuesta planteada. | Cantidad de GEI generados.                    | Kg CO <sub>2</sub> eq/m <sup>3</sup> de ARI tratada   |

Donde: La unidad “Kg CO<sub>2</sub> eq\*” es utilizada para representar la cantidad de gases de efecto invernadero generados durante un proceso, o actividad.

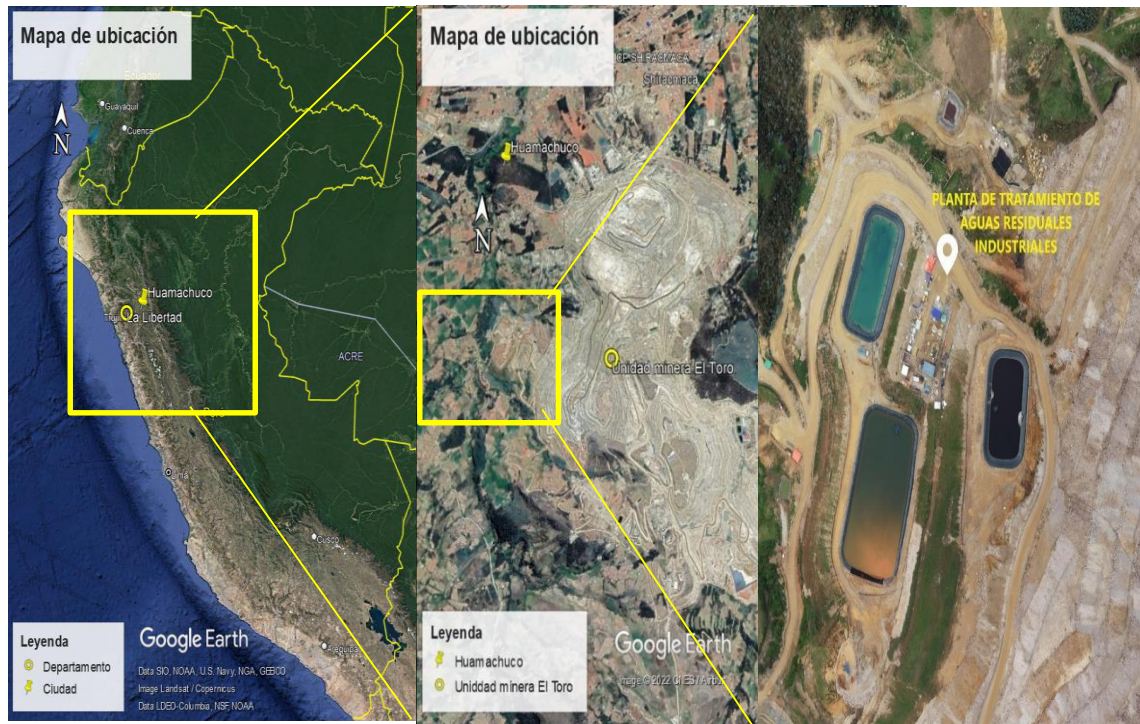
## CAPÍTULO IV

### 4. Materiales y Métodos

#### 4.1. Área de estudio

La investigación se realizará en la planta de tratamiento de aguas residuales industriales de la unidad minera “El Toro”, en Huamachuco, provincia de Sánchez Carrión, departamento de La Libertad, ubicada en las coordenadas UTM WGS 84 E:84 828985.00, N:9133251.00.

**Figura 5: Mapa de ubicación de la planta de tratamiento de aguas residuales industriales.**



**Fuente:** Elaboración propia, a partir de imágenes de Google Earth Pro y una ortofoto de la unidad minera El Toro del año 2022.

## **4.2. Diseño de investigación**

### **Tipo de investigación:**

Cuantitativa: Se basa en análisis de datos y evaluaciones cuantitativas para cuantificar el impacto ambiental.

Aplicada: Su propósito es desarrollar soluciones prácticas para reducir emisiones de gases de efecto invernadero en el contexto minero.

Descriptiva: Se enfoca en la caracterización del proceso de tratamiento de aguas y la cuantificación de gases de efecto invernadero en cada fase operativa.

### **Diseño de investigación:**

No experimental: No hay manipulación de variables, sino observación y análisis de los procesos en su contexto real.

Transversal: La recolección de datos se realiza en un momento o periodo específico, obteniendo un panorama representativo del estado actual del proceso.

- **Condiciones de Frontera**

Los subprocesos que se considerarán en el análisis de ciclo de vida son los siguientes:

- 1. Captación de las aguas**

Consiste en la recepción de las aguas industriales que provienen de las tuberías de subdrenaje y almacenamiento en pozas impermeabilizadas.

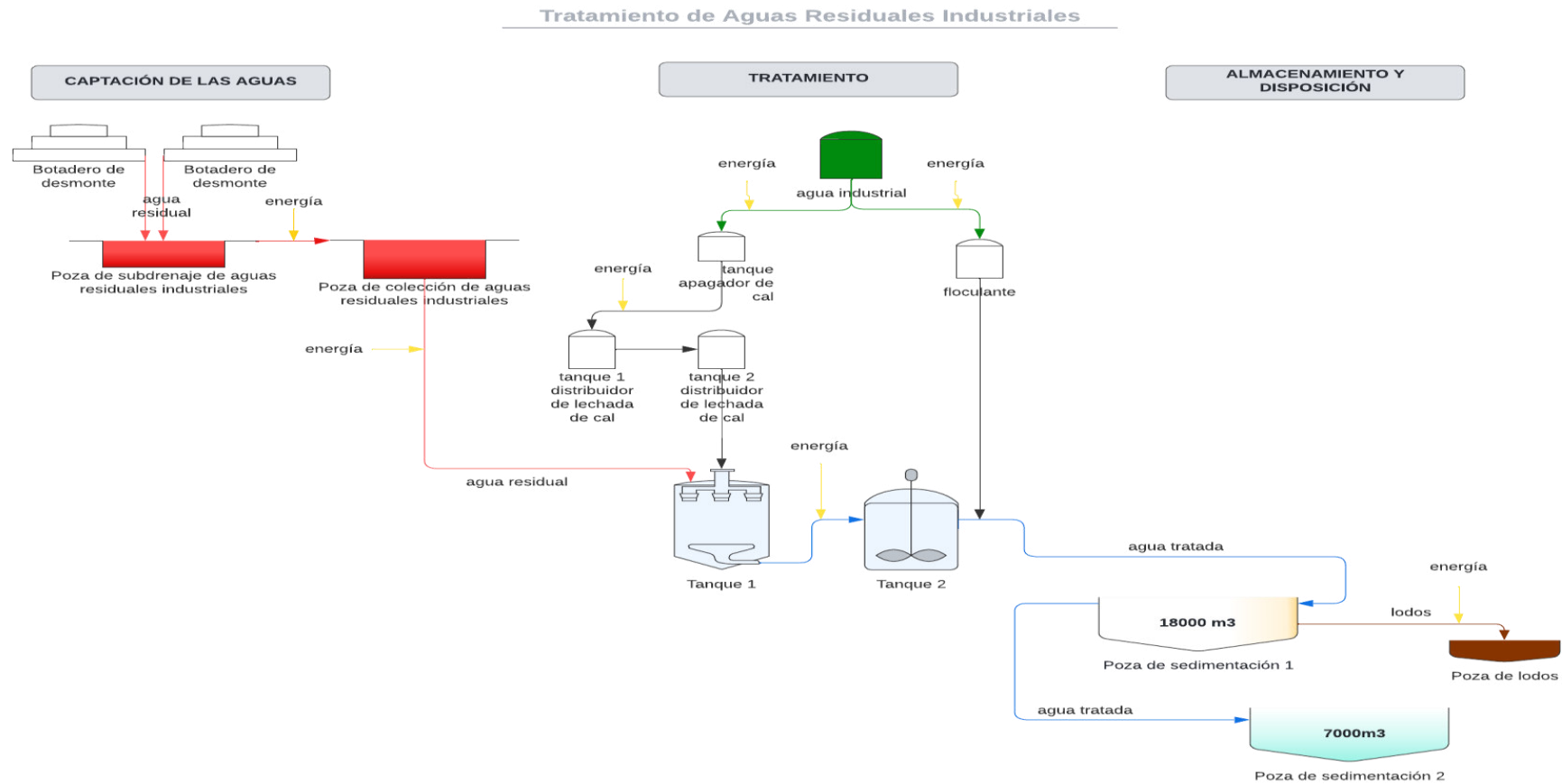
- 2. Tratamiento**

Consiste en realizar el tratamiento de las aguas industriales desde que ingresan a la planta de tratamiento de aguas residuales industriales hasta antes de la etapa de sedimentación de las aguas en las pozas destinadas para tal efecto.

- 3. Almacenamiento y disposición**

Consiste en trasladar las aguas tratadas desde la salida del sistema hacia las pozas de sedimentación para separar los lodos generados, y finalmente concluir la fase con el almacenamiento de las aguas y disposición de lodos generados.

**Figura 6: Diagrama del proceso de Tratamiento de Aguas Residuales Industriales, considerando los siguientes subprocesos o fases: Captación de las aguas, Tratamiento, y Almacenamiento y Disposición.**



**Fuente:** Elaboración propia, 2023.

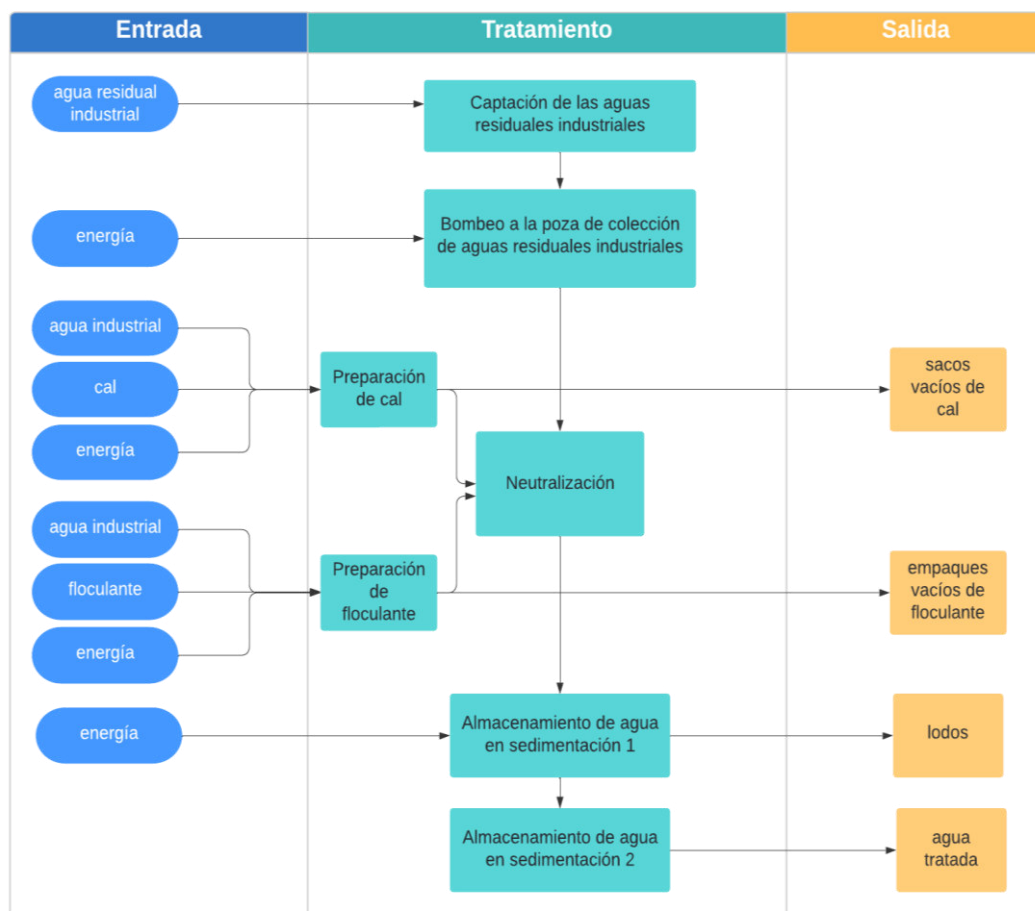
- **Unidad funcional**

Se definió como unidad funcional a: metros cúbicos de agua tratada ( $m^3$  agua tratada).

- **Flujos dentro del ciclo de vida**

El tratamiento de las aguas residuales industriales consta de un proceso operativo que se detalla líneas abajo con sus respectivas entradas y salidas.

**Figura 7: Diagrama de flujo del proceso de tratamiento de aguas residuales industriales, considerando todas las entradas y salidas en cada actividad.**



**Fuente:** Elaboración propia, 2023.

- **Inventario del ciclo de vida**

El estudio se basa en el análisis comparativo del ciclo de vida de dos años. El año 2022 donde solo se usó como fuente energética el diésel y el año 2023, donde a partir del segundo semestre se incluyó la energía eléctrica.

▪ **Inventario del ciclo de vida 2022**

La información utilizada en el inventario del ciclo de vida está determinada por los reportes operativos diarios en donde se indican los flujos del tratamiento de aguas residuales industriales. Asimismo, el combustible consumido mensualmente es utilizado en el funcionamiento de los generadores eléctricos para dotar de energía al proceso de tratamiento.

**Tabla 1: Volumen de agua residual industrial tratada durante el periodo 2022.**

| VOLUMEN TRATADO DE AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL |           |                      |                  |
|---------------------------------------------|-----------|----------------------|------------------|
| Año                                         | Mes       | Unidad               | Volumen tratado  |
| 2022                                        | enero     | m <sup>3</sup>       | 26 502           |
| 2022                                        | febrero   | m <sup>3</sup>       | 46 442           |
| 2022                                        | marzo     | m <sup>3</sup>       | 102 962          |
| 2022                                        | abril     | m <sup>3</sup>       | 97 688           |
| 2022                                        | mayo      | m <sup>3</sup>       | 70 278           |
| 2022                                        | junio     | m <sup>3</sup>       | 93 959           |
| 2022                                        | julio     | m <sup>3</sup>       | 96 301           |
| 2022                                        | agosto    | m <sup>3</sup>       | 110 086          |
| 2022                                        | setiembre | m <sup>3</sup>       | 105 308          |
| 2022                                        | octubre   | m <sup>3</sup>       | 85 127           |
| 2022                                        | noviembre | m <sup>3</sup>       | 90 683           |
| 2022                                        | diciembre | m <sup>3</sup>       | 87 744           |
| <b>TOTAL</b>                                |           | <b>m<sup>3</sup></b> | <b>1 013 080</b> |

**Fuente:** Elaboración propia adaptado de los registros operativos del proceso de tratamiento de aguas residuales industriales en la unidad minera, periodo 2022.

**Tabla 2: Consumo de combustible diésel durante el periodo 2022.**

| CONSUMO DE COMBUSTIBLE |           |        |                        |
|------------------------|-----------|--------|------------------------|
| Año                    | Mes       | Unidad | Consumo de combustible |
| 2022                   | enero     | galón  | 4 369                  |
| 2022                   | febrero   | galón  | 4 675                  |
| 2022                   | marzo     | galón  | 7 325                  |
| 2022                   | abril     | galón  | 7 776                  |
| 2022                   | mayo      | galón  | 5 365                  |
| 2022                   | junio     | galón  | 5 642                  |
| 2022                   | julio     | galón  | 7 147                  |
| 2022                   | agosto    | galón  | 6 852                  |
| 2022                   | setiembre | galón  | 6 713                  |
| 2022                   | octubre   | galón  | 5 027                  |
| 2022                   | noviembre | galón  | 7 789                  |
| 2022                   | diciembre | galón  | 6 387                  |
| TOTAL                  |           | galón  | 75 067                 |

**Fuente:** Elaboración propia adaptado de los registros de consumo de combustible diésel usado en los generadores eléctricos para el funcionamiento de la planta de tratamiento de aguas residuales industriales, periodo 2022.

**Tabla 3: Consumo de floculante (poliacrilamida) durante el periodo 2022.**

| CONSUMO DE FLOCULANTE |         |        |                       |
|-----------------------|---------|--------|-----------------------|
| Año                   | Mes     | Unidad | Consumo de floculante |
| 2022                  | enero   | Kg     | 108                   |
| 2022                  | febrero | Kg     | 149                   |
| 2022                  | marzo   | Kg     | 338                   |
| 2022                  | abril   | Kg     | 340                   |
| 2022                  | mayo    | Kg     | 263                   |

|              |           |           |              |
|--------------|-----------|-----------|--------------|
| 2022         | junio     | Kg        | 342          |
| 2022         | julio     | Kg        | 315          |
| 2022         | agosto    | Kg        | 409          |
| 2022         | setiembre | Kg        | 376          |
| 2022         | octubre   | Kg        | 299          |
| 2022         | noviembre | Kg        | 347          |
| 2022         | diciembre | Kg        | 320          |
| <b>TOTAL</b> |           | <b>Kg</b> | <b>3 606</b> |

**Fuente:** Elaboración propia adaptado de los registros operativos del proceso de tratamiento de aguas residuales industriales en la unidad minera, periodo 2022.

**Tabla 4: Consumo de cal durante el periodo 2022.**

| CONSUMO DE CAL |            |               |                       |
|----------------|------------|---------------|-----------------------|
| <b>Año</b>     | <b>Mes</b> | <b>Unidad</b> | <b>Consumo de Cal</b> |
| 2022           | enero      | TN            | 79                    |
| 2022           | febrero    | TN            | 104                   |
| 2022           | marzo      | TN            | 212                   |
| 2022           | abril      | TN            | 224                   |
| 2022           | mayo       | TN            | 101                   |
| 2022           | junio      | TN            | 189                   |
| 2022           | julio      | TN            | 204                   |
| 2022           | agosto     | TN            | 219                   |
| 2022           | setiembre  | TN            | 204                   |
| 2022           | octubre    | TN            | 161                   |
| 2022           | noviembre  | TN            | 180                   |
| 2022           | diciembre  | TN            | 158                   |
| <b>TOTAL</b>   |            | <b>TN</b>     | <b>2 035</b>          |

**Fuente:** Elaboración propia adaptado de los registros operativos del proceso de tratamiento de aguas residuales industriales en la unidad minera, periodo 2022.

**Tabla 5: Lodos generados durante el periodo 2022.**

| CANTIDAD DE LODO |           |           |                 |
|------------------|-----------|-----------|-----------------|
| Año              | Mes       | Unidad    | Lodos generados |
| 2022             | enero     | TN        | 127             |
| 2022             | febrero   | TN        | 213             |
| 2022             | marzo     | TN        | 471             |
| 2022             | abril     | TN        | 447             |
| 2022             | mayo      | TN        | 322             |
| 2022             | junio     | TN        | 430             |
| 2022             | julio     | TN        | 371             |
| 2022             | agosto    | TN        | 485             |
| 2022             | setiembre | TN        | 477             |
| 2022             | octubre   | TN        | 450             |
| 2022             | noviembre | TN        | 479             |
| 2022             | diciembre | TN        | 519             |
| <b>TOTAL</b>     |           | <b>TN</b> | <b>4 792</b>    |

Fuente: Elaboración propia adaptado de los registros operativos del proceso de tratamiento de aguas residuales industriales en la unidad minera, periodo 2022.

Los residuos que fueron generados durante el proceso de tratamiento de aguas residuales industriales son sacos vacíos de cal y empaques vacíos de floculante.

**Tabla 6: Residuos generados durante el periodo 2022.**

| CANTIDAD DE RESIDUOS |         |        |                    |
|----------------------|---------|--------|--------------------|
| Año                  | Mes     | Unidad | Residuos generados |
| 2022                 | enero   | TN     | 0.10               |
| 2022                 | febrero | TN     | 0.10               |

|              |           |           |             |
|--------------|-----------|-----------|-------------|
| 2022         | marzo     | TN        | 0.19        |
| 2022         | abril     | TN        | 0.17        |
| 2022         | mayo      | TN        | 0.10        |
| 2022         | junio     | TN        | 0.10        |
| 2022         | julio     | TN        | 0.12        |
| 2022         | agosto    | TN        | 0.12        |
| 2022         | setiembre | TN        | 0.11        |
| 2022         | octubre   | TN        | 0.08        |
| 2022         | noviembre | TN        | 0.08        |
| 2022         | diciembre | TN        | 0.09        |
| <b>TOTAL</b> |           | <b>TN</b> | <b>1.37</b> |

**Fuente:** Elaboración propia adaptado de los registros operativos del proceso de tratamiento de aguas residuales industriales en la unidad minera, periodo 2022.

#### ▪ **Inventario del ciclo de vida 2023**

La información utilizada en el inventario del ciclo de vida de la propuesta corresponde a los reportes operativos de la transición energética de energía fósil a energía eléctrica que inició en el segundo semestre del año 2023. En dichos reportes se indica el volumen tratado de aguas residuales industriales, el combustible consumido mensualmente para el funcionamiento de los generadores eléctricos para dotar de energía al proceso, la energía eléctrica consumida, las cantidades usadas de floculante (poliacrilamida) y cal, y los residuos generados durante el tratamiento.

**Tabla 7: Volumen de agua residual industrial tratada durante el periodo 2023.**

| <b>VOLUMEN TRATADO DE AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL</b> |            |                |                        |
|----------------------------------------------------|------------|----------------|------------------------|
| <b>Año</b>                                         | <b>Mes</b> | <b>Unidad</b>  | <b>Volumen tratado</b> |
| 2023                                               | enero      | m <sup>3</sup> | 96818                  |

|              |           |                      |                |
|--------------|-----------|----------------------|----------------|
| 2023         | febrero   | m <sup>3</sup>       | 90793          |
| 2023         | marzo     | m <sup>3</sup>       | 171503         |
| 2023         | abril     | m <sup>3</sup>       | 75737          |
| 2023         | mayo      | m <sup>3</sup>       | 91637          |
| 2023         | junio     | m <sup>3</sup>       | 97678          |
| 2023         | julio     | m <sup>3</sup>       | 90642          |
| 2023         | agosto    | m <sup>3</sup>       | 97514          |
| 2023         | setiembre | m <sup>3</sup>       | 28013          |
| 2023         | octubre   | m <sup>3</sup>       | 22841          |
| 2023         | noviembre | m <sup>3</sup>       | 27092          |
| 2023         | diciembre | m <sup>3</sup>       | 25108          |
| <b>TOTAL</b> |           | <b>m<sup>3</sup></b> | <b>915 376</b> |

**Fuente:** Elaboración propia adaptado de los registros operativos del proceso de tratamiento de aguas residuales industriales en la unidad minera, periodo 2023.

**Tabla 8: Consumo de combustible diésel durante el periodo 2023.**

| CONSUMO DE COMBUSTIBLE |           |        |                        |
|------------------------|-----------|--------|------------------------|
| Año                    | Mes       | Unidad | Consumo de combustible |
| 2023                   | enero     | galón  | 6 103.7                |
| 2023                   | febrero   | galón  | 5 014.5                |
| 2023                   | marzo     | galón  | 7 672.2                |
| 2023                   | abril     | galón  | 8 716.6                |
| 2023                   | mayo      | galón  | 6 626.1                |
| 2023                   | junio     | galón  | 1 775.5                |
| 2023                   | julio     | galón  | 118                    |
| 2023                   | agosto    | galón  | 277.3                  |
| 2023                   | setiembre | galón  | 79.2                   |
| 2023                   | octubre   | galón  | 421.8                  |

|              |           |              |                  |
|--------------|-----------|--------------|------------------|
| 2023         | noviembre | galón        | 1046.4           |
| 2023         | diciembre | galón        | 309              |
| <b>TOTAL</b> |           | <b>galón</b> | <b>38 160.30</b> |

**Fuente:** Elaboración propia adaptado de los registros de consumo de combustible diésel usado en los generados eléctricos para la operación de la planta de tratamiento de aguas residuales industriales, periodo 2023.

**Tabla 9: Consumo de energía eléctrica durante el periodo 2023.**

| CONSUMO DE ENERGÍA ELÉCTRICA |           |            |                              |
|------------------------------|-----------|------------|------------------------------|
| Año                          | Mes       | Unidad     | Consumo de energía eléctrica |
| 2023                         | enero     | KWh        | 0                            |
| 2023                         | febrero   | KWh        | 0                            |
| 2023                         | marzo     | KWh        | 0                            |
| 2023                         | abril     | KWh        | 0                            |
| 2023                         | mayo      | KWh        | 0                            |
| 2023                         | junio     | KWh        | 53571.76                     |
| 2023                         | julio     | KWh        | 64153.87                     |
| 2023                         | agosto    | KWh        | 59270.05                     |
| 2023                         | setiembre | KWh        | 40252.58                     |
| 2023                         | octubre   | KWh        | 53702.84                     |
| 2023                         | noviembre | KWh        | 42591.56                     |
| 2023                         | diciembre | KWh        | 53467.46                     |
| <b>TOTAL</b>                 |           | <b>KWh</b> | <b>313542.66</b>             |

**Fuente:** Elaboración propia adaptado de los registros de consumo de energía eléctrica usada para la operación de la planta de tratamiento de aguas residuales industriales, periodo 2023.

**Tabla 10: Consumo de floculante (poliacrilamida) durante el periodo 2023.**

| CONSUMO DE FLOCULANTE |           |        |                       |
|-----------------------|-----------|--------|-----------------------|
| Año                   | Mes       | Unidad | Consumo de floculante |
| 2023                  | enero     | Kg     | 341.33                |
| 2023                  | febrero   | Kg     | 216.45                |
| 2023                  | marzo     | Kg     | 342.00                |
| 2023                  | abril     | Kg     | 275.45                |
| 2023                  | mayo      | Kg     | 328.40                |
| 2023                  | junio     | Kg     | 345.60                |
| 2023                  | julio     | Kg     | 324.25                |
| 2023                  | agosto    | Kg     | 354.90                |
| 2023                  | setiembre | Kg     | 102.00                |
| 2023                  | octubre   | Kg     | 86.50                 |
| 2023                  | noviembre | Kg     | 105.25                |
| 2023                  | diciembre | Kg     | 93.17                 |
| TOTAL                 |           | Kg     | 2915.30               |

**Fuente:** Elaboración propia adaptado de los registros operativos del proceso de tratamiento de aguas residuales industriales en la unidad minera, periodo 2023.

**Tabla 11: Consumo de cal durante el periodo 2023.**

| CONSUMO DE CAL |         |        |                |
|----------------|---------|--------|----------------|
| Año            | Mes     | Unidad | Consumo de Cal |
| 2023           | enero   | TN     | 155.00         |
| 2023           | febrero | TN     | 149.00         |
| 2023           | marzo   | TN     | 314.00         |
| 2023           | abril   | TN     | 99.00          |
| 2023           | mayo    | TN     | 137.50         |
| 2023           | junio   | TN     | 163.00         |

|              |           |           |                |
|--------------|-----------|-----------|----------------|
| 2023         | julio     | TN        | 184.50         |
| 2023         | agosto    | TN        | 194.00         |
| 2023         | setiembre | TN        | 146.80         |
| 2023         | octubre   | TN        | 85.30          |
| 2023         | noviembre | TN        | 97.00          |
| 2023         | diciembre | TN        | 49.50          |
| <b>TOTAL</b> |           | <b>TN</b> | <b>1774.60</b> |

**Fuente:** Elaboración propia adaptado de los registros operativos del proceso de tratamiento de aguas residuales industriales en la unidad minera, periodo 2023.

**Tabla 12: Lodos generados durante el periodo 2023.**

| CANTIDAD DE LODO |            |               |                        |
|------------------|------------|---------------|------------------------|
| <b>Año</b>       | <b>Mes</b> | <b>Unidad</b> | <b>Lodos generados</b> |
| 2023             | enero      | TN            | 148.6                  |
| 2023             | febrero    | TN            | 160.5                  |
| 2023             | marzo      | TN            | 339.0                  |
| 2023             | abril      | TN            | 138.0                  |
| 2023             | mayo       | TN            | 163.9                  |
| 2023             | junio      | TN            | 140.5                  |
| 2023             | julio      | TN            | 212.8                  |
| 2023             | agosto     | TN            | 268.5                  |
| 2023             | setiembre  | TN            | 62.7                   |
| 2023             | octubre    | TN            | 26.6                   |
| 2023             | noviembre  | TN            | 31.6                   |
| 2023             | diciembre  | TN            | 29.3                   |
| <b>TOTAL</b>     |            | <b>TN</b>     | <b>1722.0</b>          |

**Fuente:** Elaboración propia adaptado de los registros operativos del proceso de tratamiento de aguas residuales industriales en la unidad minera, periodo 2023.

Los residuos que fueron generados durante el proceso de tratamiento de aguas residuales industriales son sacos vacíos de cal y empaques vacíos de floculante.

**Tabla 13: Residuos generados durante el periodo 2023.**

| CANTIDAD DE RESIDUOS |           |           |                    |
|----------------------|-----------|-----------|--------------------|
| Año                  | Mes       | Unidad    | Residuos generados |
| 2023                 | enero     | TN        | 0.09               |
| 2023                 | febrero   | TN        | 0.17               |
| 2023                 | marzo     | TN        | 0.12               |
| 2023                 | abril     | TN        | 0.10               |
| 2023                 | mayo      | TN        | 0.09               |
| 2023                 | junio     | TN        | 0.17               |
| 2023                 | julio     | TN        | 0.11               |
| 2023                 | agosto    | TN        | 0.23               |
| 2023                 | setiembre | TN        | 0.14               |
| 2023                 | octubre   | TN        | 0.13               |
| 2023                 | noviembre | TN        | 0.21               |
| 2023                 | diciembre | TN        | 0.08               |
| <b>TOTAL</b>         |           | <b>TN</b> | <b>1.64</b>        |

**Fuente:** Elaboración propia adaptado de los registros operativos del proceso de tratamiento de aguas residuales industriales en la unidad minera, periodo 2022.

#### 4.3. Población y muestra

Los datos examinados en este estudio se obtienen de la base de datos del tratamiento de aguas residuales industriales correspondientes a los años 2022 y 2023. Esta selección se fundamenta en su actualidad, abarcando los periodos de enero a diciembre. Durante este lapso, se implementó un riguroso control de calidad por parte del área operativa, lo que garantiza la fiabilidad y representatividad de los datos analizados.

#### 4.4. Procedimientos, técnicas e instrumentos de recolección de información

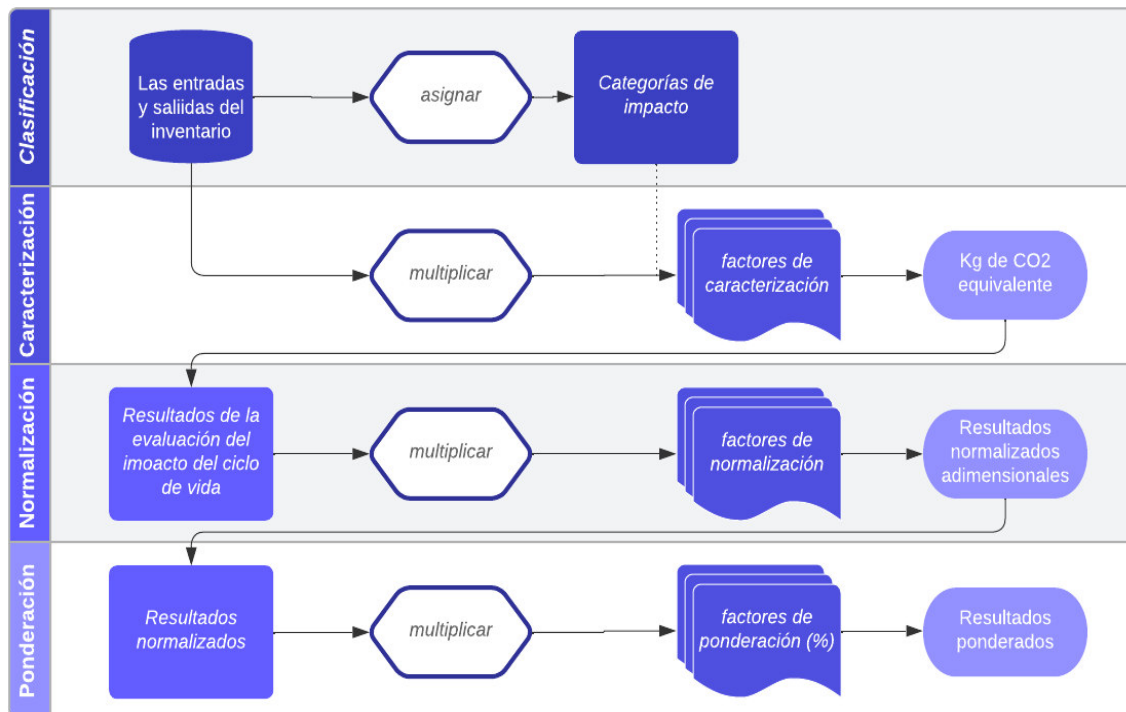
Se realizó la recopilación de datos a partir de la base de datos y los informes diarios correspondientes a los años 2022 y 2023 sobre el tratamiento de aguas residuales industriales en la unidad minera. Estos datos fueron seleccionados y validados por el departamento encargado del proceso operativo para garantizar su confiabilidad. Posteriormente, se utilizaron para crear el respectivo inventario de ciclo de vida y, finalmente, fueron procesados en el software OpenLCA.

#### 4.5. Análisis estadístico

Durante la evaluación de impacto ambiental del ciclo de vida de un proceso o producto se ejecuta un procedimiento que consiste en analizar el inventario hasta obtener como producto los resultados que permitan interpretarse con mayor certeza y entendimiento.

A continuación, se presenta un diagrama de flujo que explica el proceso de evaluación de impacto del ciclo de vida en 4 pasos.

**Figura 8: Diagrama de flujo del proceso de evaluación de impacto del ciclo de vida**



**Fuente:** Elaboración a partir de la información de la Comisión Europea. (s.f ).

- **Análisis de Incertidumbre**

Existe una incertidumbre respecto al método de análisis de ciclo de vida, que está intrínsecamente ligada a la calidad de los datos utilizados en el inventario, la idoneidad del software empleado y la asignación de impactos, lo cual puede conducir a la obtención de resultados divergentes.

Por ende, es imperativo llevar a cabo un análisis de incertidumbre con el fin de garantizar la fiabilidad de los resultados obtenidos y facilitar una interpretación precisa de los mismos. Este enfoque contribuirá significativamente a fortalecer la validez y la utilidad de las conclusiones derivadas del estudio. Para ello se utilizará la siguiente herramienta:

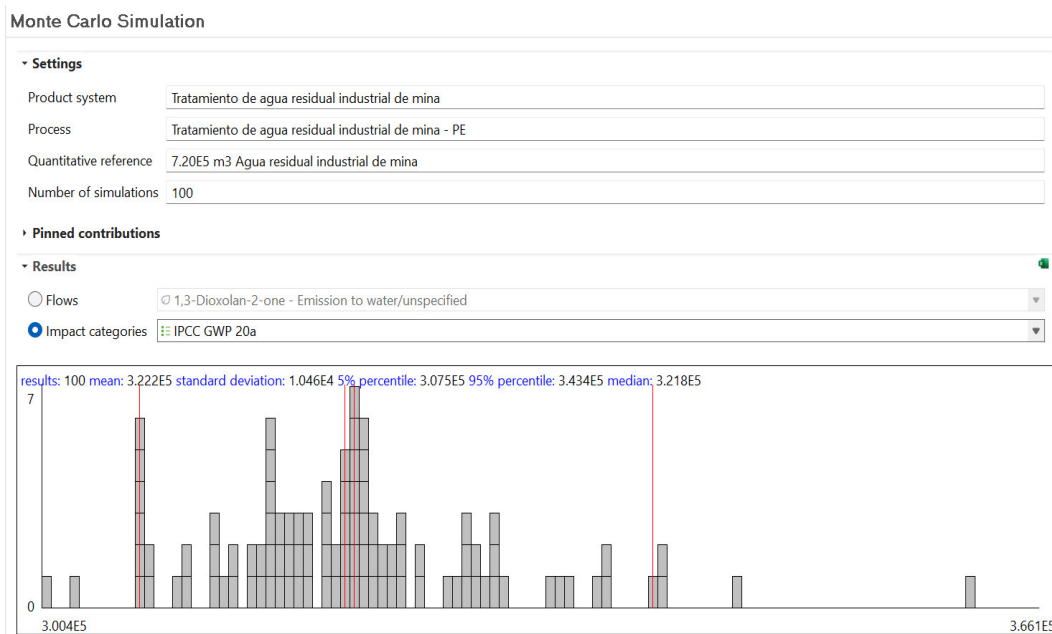
***Simulación de Monte Carlo***

Esta metodología realiza un muestreo experimental para estimar las distribuciones de las variables de salida que depende de las variables de entrada probabilísticas (Azofeifa, 2004).

El software de análisis de ciclo de vida OpenLCA, tiene integrado la simulación de Monte Carlo considerando las distribuciones de incertidumbre definidas en los parámetros, flujos y factores de caracterización (OpenLCA, 2016). Asimismo muestra los valores del coeficiente de variación de las categorías de impacto ambiental, indicando una precisión aceptable si es menor al 25% (Amado, 2016).

A continuación, se presenta el Diagrama de Simulación de Montecarlo de un producto sistema y que fue desarrollado en el software OpenLCA y utilizando la categoría de impacto IPCC GWP 20a.

**Figura 9: Diagrama de Simulación de Monte Carlo en el software OpenLCA.**



**Fuente:** Elaboración propia utilizando OpenLCA 2.0.0.

En la figura 9 se observa que al realizar la simulación con el software OpenLCA se presenta información relevante sobre el producto sistema, proceso asociado, unidad funcional y el número de simulaciones realizadas con la metodología de MonteCarlo.

## **CAPÍTULO V**

### **5. Resultados y discusiones**

En esta sección se exponen y se discuten los hallazgos obtenidos a lo largo del estudio, que se ha dividido en las siguientes fases:

1. Se lleva a cabo la Evaluación del Impacto del Análisis de Ciclo de Vida (EIACV) de ambos años con el objetivo de identificar los insumos del proceso de tratamiento de aguas residuales industriales que tienen un mayor impacto ambiental debido a la emisión de gases de efecto invernadero.
2. Una vez identificados los insumos que generan un mayor impacto ambiental, se proponen insumos alternativos como medida de mejora para reducir la huella de carbono asociada al tratamiento de aguas residuales industriales.
3. A partir del diseño ambiental propuesto para el tratamiento de aguas residuales industriales mineras, se determinan los beneficios ambientales, económicos y sociales derivados de la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero.

#### **5.1 Evaluación del Impacto de Análisis de Ciclo de Vida (EIACV)**

La incorporación del inventario en el software permite la evaluación del impacto ambiental potencial del tratamiento de aguas residuales industriales de la mina durante los años 2022 y 2023. Este análisis abarca diversas categorías que contemplan la emisión de contaminantes, el consumo de recursos, el deterioro de componentes naturales, y otros aspectos relevantes.

### 5.1.1 Evaluación del Impacto de Análisis de Ciclo de Vida (EIACV) 2022

En la tabla 14 se presenta la evaluación de las categorías seleccionadas a partir de las metodologías IPCC y CML.

**Tabla 14: Categorías de impacto para obtener 1013080 m<sup>3</sup> de agua tratada durante el periodo 2022.**

| Categorías de impacto                                       | Metodología     | Unidad                 | Cantidad    |
|-------------------------------------------------------------|-----------------|------------------------|-------------|
| Impacto sobre los recursos abióticos                        | CML IA baseline | Kg Sb-Eq               | 34870.35461 |
| Impacto sobre los recursos abióticos (combustibles fósiles) | CML IA baseline | MJ                     | 5.80556E+12 |
| Agotamiento de la capa de ozono                             | CML IA baseline | Kg CFC-11-Eq           | 75495.26701 |
| Ecotoxicidad de agua dulce                                  | CML IA baseline | Kg 1,4-DB-Eq           | 9114855467  |
| Ecotoxicidad acuática marina                                | CML IA baseline | Kg 1,4-DB-Eq           | 2.9114E+13  |
| Potencial de acidificación                                  | CML IA baseline | Kg SOO <sub>2</sub> eq | 1222031382  |
| Toxicidad humana                                            | CML IA baseline | Kg 1,4-DB-Eq           | 24766934473 |
| Calentamiento global (GWP100a)                              | CML IA baseline | Kg CO <sub>2</sub> eq  | 4.13422E+11 |
| Calentamiento global (IPCC GWP 100a)                        | IPCC            | Kg CO <sub>2</sub> eq  | 4.13851E+11 |

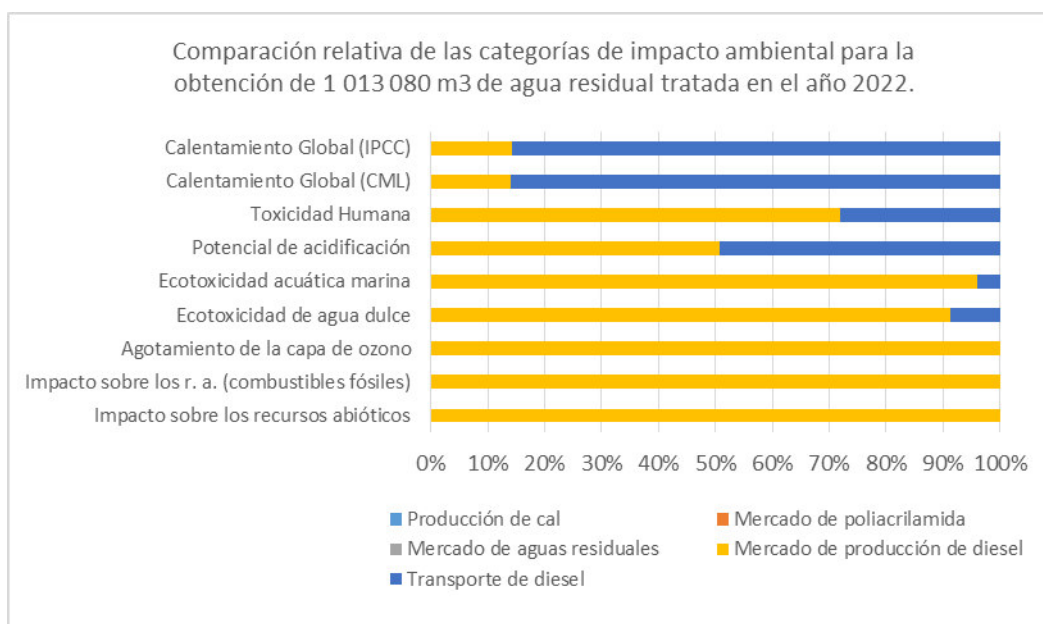
**Fuente:** Elaboración propia a partir del modelamiento en el Software OpenLCA 2.0.0.

Según los resultados obtenidos el insumo diésel (mercado de producción de diésel y transporte de diésel) tuvo un significativo impacto ambiental en todas las categorías

ambientales estudiadas, como se muestra en la Figura 10. De lo observado en la figura y los resultados mostrados en el software se puede indicar lo siguiente:

- El uso de diésel representa más del 99% de los impactos de cada categoría.
- El uso de la poliacrilamida y cal representa menos del 1% de los impactos en cada categoría estudiada.

**Figura 10: Comparación relativa de las categorías de impacto ambiental para la obtención de 1 013 080 m3 de agua residual tratada en el año 2022.**



**Fuente:** Elaboración propia utilizando OpenLCA 2.0.0.

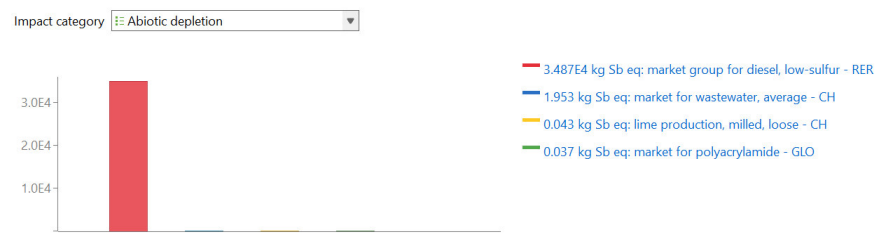
A continuación presentaremos el análisis de las categorías de impacto para la obtención de agua tratada que servirá para identificar cuál es el elemento del inventario que tiene un impacto ambiental significativo.

#### a) Impacto sobre los recursos abióticos

La figura 11 presenta los resultados correspondientes a la categoría de Impacto sobre los recursos abióticos. Se observa que el impacto potencial para el año 2022 fue de 34870.355 kg Sb eq. Del total, el 99.994% está asociado al mercado de producción de diésel, mientras que menos del 1% está relacionado con la producción de cal, el mercado de poliacrilamida y el mercado de aguas residuales.

Es relevante destacar que la metodología del Ciclo de Vida considera al antimonio (Sb) como la sustancia de referencia ya que es un recurso limitado debido a su escasa disponibilidad. Por lo tanto, su agotamiento se interpreta como un impacto significativo en los recursos abióticos.

**Figura 11: Resultados de la categoría Impacto sobre los recursos abióticos del año 2022.**



**Fuente:** Elaboración propia a partir del modelamiento en el Software OpenLCA 2.0.0.

b) Impacto sobre los recursos abióticos (combustibles fósiles)

La figura 12 presenta los resultados correspondientes a la categoría de Impacto sobre los recursos abióticos, en específico de combustibles fósiles. Se observa que, el impacto potencial para el año 2022 fue de 5.80556E+12 MJ. Del total, el 99.999% está asociado al mercado de producción de diésel, mientras que menos del 1% está relacionado con la producción de cal, el mercado de poliacrilamida y el mercado de aguas residuales.

**Figura 12: Resultados de la categoría Impacto sobre los recursos abióticos (combustibles fósiles) del año 2022.**



**Fuente:** Elaboración propia a partir del modelamiento en el Software OpenLCA 2.0.0.

La metodología del Ciclo de vida para esta categoría interpreta al milijoule (MJ) como disponibilidad de energía, por lo que su consumo se considera como un impacto en los recursos abióticos.

#### c) Agotamiento de la capa de ozono

La figura 13 presenta los resultados correspondientes a la categoría de Agotamiento de la capa de ozono. Se observa que, el impacto potencial para el año 2022 fue de 75495.267 kg CFC-11 eq. Del total, el 99.999% está asociado al mercado de producción de diésel, mientras que menos del 1% está relacionado con la producción de cal, el mercado de poliacrilamida y el mercado de aguas residuales.

**Figura 13: Resultados de la categoría Agotamiento de la capa de ozono del año 2022.**



**Fuente:** Elaboración propia a partir del modelamiento en el Software OpenLCA 2.0.0.

La metodología del Ciclo de Vida aborda el potencial de agotamiento de la capa de ozono ocasionado por los clorofluorocarbonos (CFC-11), lo cual resulta en una reducción de la capacidad de la atmósfera para retener los rayos ultravioleta. Este fenómeno tiene implicaciones significativas en términos de protección ambiental y salud pública, ya que el debilitamiento de la capa de ozono incrementa la exposición a la radiación ultravioleta dañina, con posibles consecuencias negativas para los ecosistemas y la salud humana.

#### d) Ecotoxicidad de agua dulce

La figura 14 presenta los resultados correspondientes a la categoría de Ecotoxicidad de agua dulce. Se observa que el impacto potencial para el año 2022 fue de 9114855467 kg 1,4-DB eq. Del total, el 91.281% está asociado al mercado de producción de diésel,

8.716% al transporte de diésel, mientras que menos del 1% está relacionado con la producción de cal, el mercado de poliacrilamida y el mercado de aguas residuales.

**Figura 14: Resultados de la categoría Ecotoxicidad de agua dulce del año 2022.**



**Fuente:** Elaboración propia a partir del modelamiento en el Software OpenLCA 2.0.0.

La metodología del Ciclo de Vida analiza la exposición del 1,4-diclorobenceno a los organismos vivos a través del consumo de agua dulce. Este enfoque permite comprender cómo esta sustancia puede afectar a los ecosistemas acuáticos y, por extensión, a la biodiversidad y a la salud humana.

#### e) Ecotoxicidad acuática marina

La figura 15 presenta los resultados correspondientes a la categoría de Ecotoxicidad acuática marina. Se observa que el impacto potencial para el año 2022 fue de 2.9114E13 kg 1,4-DB eq. Del total, el 95,959% está asociado al mercado de producción de diésel, 4,039% al transporte de diésel, mientras que menos del 1% está relacionado con la producción de cal, el mercado de poliacrilamida y el mercado de aguas residuales.

**Figura 15: Resultados de la categoría Ecotoxicidad acuática marina del año 2022.**



**Fuente:** Elaboración propia a partir del modelamiento en el Software OpenLCA 2.0.0.

La metodología del Ciclo de vida para esta categoría interpreta la exposición del 1,4-diclorobenceno a los seres vivos mediante el consumo de especies marinas.

#### f) Potencial de acidificación

La figura 16 presenta los resultados correspondientes a la categoría de Potencial de acidificación. Se observa que el impacto potencial para el año 2022 fue de 1222031382 kg SO<sub>2</sub>eq. Del total obtenido, el 50,811% está asociado al mercado de producción de diésel, 49,189% al transporte de diésel, mientras que menos del 1% está relacionado con la producción de cal, el mercado de poliacrilamida y el mercado de aguas residuales.

**Figura 16: Resultados de la categoría Potencial de acidificación del año 2022.**



**Fuente:** Elaboración propia a partir del modelamiento en el Software OpenLCA 2.0.0.

La metodología del Ciclo de vida para esta categoría aborda la liberación del dióxido de azufre a los componentes ambientales, lo que puede tener un impacto significativo en sus propiedades y, en última instancia, en los organismos que dependen de ellos.

#### g) Toxicidad humana

La figura 17 presenta los resultados correspondientes a la categoría de Toxicidad humana. Se observa que el impacto potencial para el año 2022 fue de 24766934473 kg 1,4-DB eq. Del total, el 71,980% está asociado al mercado de producción de diésel, 28.017% al transporte de diésel, mientras que menos del 1% está relacionado con la producción de cal, el mercado de poliacrilamida y el mercado de aguas residuales.

**Figura 17: Resultados de la categoría Toxicidad humana del año 2022.**



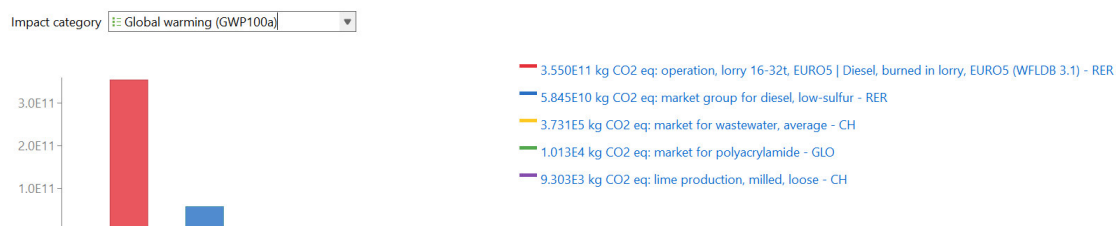
**Fuente:** Elaboración propia a partir del modelamiento en el Software OpenLCA 2.0.0.

La metodología del Ciclo de vida para esta categoría interpreta al 1,4-diclorobenceno como el conjunto de metales pesados, plaguicidas, entre otros contaminantes que, al ser ingeridas, inhaladas o entrar en contacto con la piel por los seres humanos, impactan en la salud humana. Estos contaminantes tienen la capacidad de acumularse en la cadena alimenticia, lo que puede acarrear consecuencias para la salud humana.

#### h) Calentamiento global (GWP100a)

La figura 18 presenta los resultados correspondientes a la categoría de Calentamiento global, por la metodología CML Baseline. Se observa que el impacto potencial para el año 2022 fue de 4.13422E+11 kg CO<sub>2</sub>eq. Del total obtenido, el 85.862% está asociado al transporte de diésel, 14,138% al mercado de producción de diésel, mientras que menos del 1% está relacionado con la producción de cal, el mercado de poliacrilamida y el mercado de aguas residuales.

**Figura 18: Resultados de la categoría Calentamiento global (CML 100a) del año 2022.**



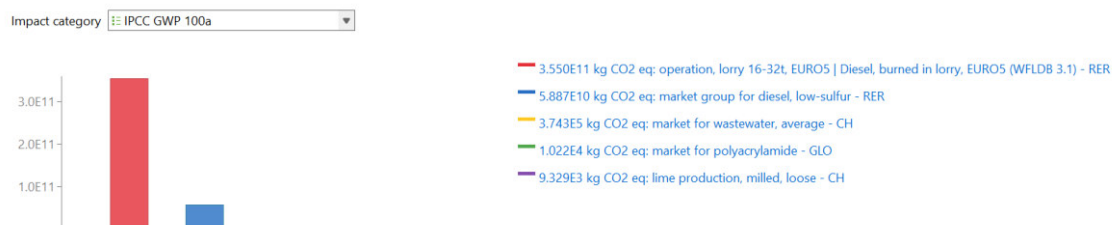
**Fuente:** Elaboración propia a partir del modelamiento en el Software OpenLCA 2.0.0.

La metodología del Ciclo de vida para esta categoría interpreta a los gases de efecto invernadero como equivalencia a dióxido de carbono, por lo que su emisión se considera como una contribución al calentamiento global.

#### i) Calentamiento global (IPCC GWP100a)

El gráfico siguiente presenta los resultados correspondientes a la categoría de Calentamiento global, por la metodología IPCC. Se observa que el impacto potencial para el año 2022 fue de 4.13851E+11 kg CO<sub>2</sub>eq. Del total obtenido, el 85,775% está asociado al transporte de diésel, 14,225% al mercado de producción de diésel, mientras que menos del 1% está relacionado con la producción de cal, el mercado de poliacrilamida y el mercado de aguas residuales.

**Figura 19: Resultados de la categoría Calentamiento global (IPCC 100a) del año 2022.**



**Fuente:** Elaboración propia a partir del modelamiento en el Software OpenLCA 2.0.0.

El método IPCC emplea esta categoría para los efectos de los gases de efecto invernadero en equivalencia al dióxido de carbono.

### 5.1.1.1 Pruebas de hipótesis de la Evaluación del Impacto de Análisis de Ciclo de Vida (EIACV) 2022

La prueba de hipótesis se realizó en el software OpenLCA mediante la técnica de simulación de Monte Carlo. A través de un análisis con 100 ejecuciones, se determina que el coeficiente de variación de todas las categorías estudiadas no excede el 25%. Este resultado confiere una precisión aceptable al estudio, como se detalla en la Tabla 15.

**Tabla 15: Análisis de incertidumbre para las categorías de impacto en el año 2022.**

| Categoría de impacto                                        | Promedio | Desviación estándar | Límite inferior (5%) | Límite superior (95%) | Mediana  | Coeficiente de variación |
|-------------------------------------------------------------|----------|---------------------|----------------------|-----------------------|----------|--------------------------|
| Impacto sobre los recursos abióticos                        | 209.4    | 4.951               | 202                  | 218                   | 209.7    | 2.364%                   |
| Impacto sobre los recursos abióticos (combustibles fósiles) | 3.37E+10 | 8.24E+08            | 3.24E+10             | 3.51E+10              | 3.37E+10 | 2.447%                   |
| Potencial de acidificación                                  | 7.12E+06 | 6.21E+05            | 6.26E+06             | 8.38E+06              | 7.07E+06 | 8.729%                   |
| Ecotoxicidad de agua dulce                                  | 5.52E+07 | 3.29E+06            | 5.14E+07             | 6.16E+07              | 5.44E+07 | 5.960%                   |
| Calentamiento Global (CML)                                  | 2.42E+09 | 7.45E+07            | 2.30E+09             | 2.54E+09              | 2.43E+09 | 3.075%                   |
| Toxicidad Humana                                            | 1.62E+08 | 3.94E+07            | 1.24E+08             | 2.13E+08              | 1.53E+08 | 24.291%                  |
| Agotamiento de la capa de ozono                             | 4.38E+02 | 1.07E+01            | 4.22E+02             | 4.56E+02              | 4.38E+02 | 2.449%                   |
| Ecotoxicidad acuática marina                                | 1.74E+11 | 8.67E+09            | 1.63E+11             | 1.89E+11              | 1.72E+11 | 4.993%                   |
| Calentamiento Global (IPCC)                                 | 2.42E+09 | 7.14E+07            | 2.31E+09             | 2.54E+09              | 2.42E+09 | 2.949%                   |

**Fuente:** Elaboración propia a partir del modelamiento en el Software OpenLCA 2.0.0.

En el Anexo 1 se presentan los gráficos del análisis de la incertidumbre por la simulación de Monte Carlo para cada categoría.

### 5.1.2 Evaluación del Impacto de Análisis de Ciclo de Vida (EIACV) 2023

En la tabla 16 se presenta la evaluación de las categorías seleccionadas a partir de las metodologías IPCC y CML.

**Tabla 16: Categorías de impacto para obtener 915 376 m<sup>3</sup> de agua tratada durante el periodo 2023.**

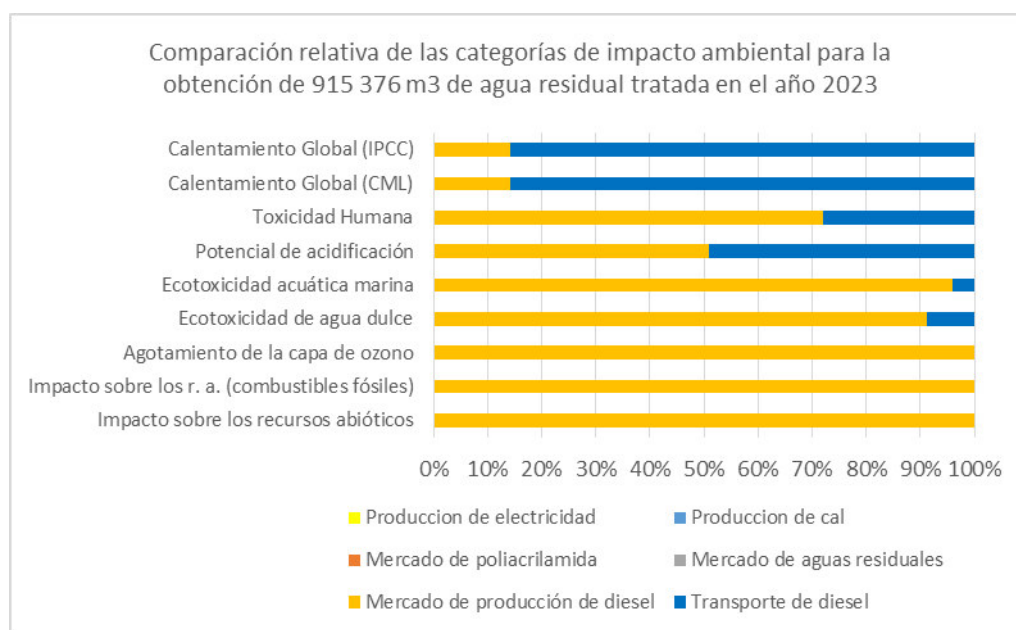
| Categorías de impacto                                       | Metodología     | Unidad                | Cantidad    |
|-------------------------------------------------------------|-----------------|-----------------------|-------------|
| Impacto sobre los recursos abióticos                        | CML IA baseline | Kg Sb-Eq              | 16798.09443 |
| Impacto sobre los recursos abióticos (combustibles fósiles) | CML IA baseline | MJ                    | 2.79658E+12 |
| Agotamiento de la capa de ozono                             | CML IA baseline | Kg CFC-11-Eq          | 36366.61175 |
| Ecotoxicidad de agua dulce                                  | CML IA baseline | Kg 1,4-DB-Eq          | 4390829850  |
| Ecotoxicidad acuática marina                                | CML IA baseline | Kg 1,4-DB-Eq          | 1.40246E+13 |
| Potencial de acidificación                                  | CML IA baseline | Kg SO <sub>2</sub> Eq | 588662473.2 |
| Toxicidad humana                                            | CML IA baseline | Kg 1,4-DB-Eq          | 11930686325 |
| Calentamiento global (CML)                                  | CML IA baseline | Kg CO <sub>2</sub> eq | 1.99148E+11 |
| Calentamiento global (IPCC)                                 | IPCC            | Kg CO <sub>2</sub> eq | 1.99355E+11 |

**Fuente:** Elaboración propia a partir del modelamiento en el Software OpenLCA 2.0.0.

Según los resultados obtenidos, el insumo diésel (mercado de producción de diésel y transporte de diésel) tuvo un significativo impacto ambiental en todas las categorías ambientales analizadas, como se presenta en la Figura 20. De lo observado en la figura y los resultados en el software, se puede indicar lo siguiente:

- El uso de diésel representa más del 99% de los impactos de cada categoría.
- El uso de la electricidad, poliacrilamida y cal representa menos del 1% de los impactos en cada categoría estudiada.
- El insumo del proceso de tratamiento de aguas residuales industriales que más contribuye a las categorías de impacto ambiental es el diésel.

**Figura 20: Comparación relativa de las categorías de impacto ambiental para la obtención de 915 376 m3 de agua residual tratada en el periodo 2023.**



**Fuente:** Elaboración propia a partir del modelamiento en el Software OpenLCA 2.0.0.

A continuación presentaremos el análisis de las categorías de impacto para la obtención de agua tratada que servirá para identificar cuál es el elemento del inventario que tiene un impacto ambiental significativo.

a) Impacto sobre los recursos abióticos

La figura 21 presenta los resultados correspondientes a la categoría de Impacto sobre los recursos abióticos. Se observa que, el impacto potencial para el año 2023 fue de 16798.09 kg Sb eq. Del total, el 99.989% está asociado al mercado de producción de diésel, mientras que menos del 1% está relacionado con la producción electricidad, la producción de cal, el mercado de poliacrilamida y el mercado de aguas residuales.

**Figura 21: Resultados de la categoría Impacto sobre los recursos abióticos del año 2023.**



**Fuente:** Elaboración propia a partir del modelamiento en el Software OpenLCA 2.0.0.

La metodología del Ciclo de vida para esta categoría interpreta al antimonio como reserva de recurso al tener poca disponibilidad de este, por lo que su agotamiento se considera como un impacto en los recursos abióticos.

b) Impacto sobre los recursos abióticos (combustibles fósiles)

La figura 22 presenta los resultados correspondientes a la categoría de Impacto sobre los recursos abióticos, en específico de combustibles fósiles. Se observa que el impacto potencial para el año 2023 fue de 2.797E+12 MJ. Del total, el 99.999% está asociado al mercado de producción de diésel, mientras que menos del 1% está relacionado con la producción de electricidad, la producción de cal, el mercado de poliacrilamida y el mercado de aguas residuales.

**Figura 22: Resultados de la categoría Impacto sobre los recursos abióticos (combustibles fósiles) del año 2023.**



**Fuente:** Elaboración propia a partir del modelamiento en el Software OpenLCA 2.0.0.

La metodología del Ciclo de vida para esta categoría interpreta al milijoule (MJ) como disponibilidad de energía, por lo que su consumo se considera como un impacto en los recursos abióticos.

#### c) Agotamiento de la capa de ozono

La figura 23 presenta los resultados correspondientes a la categoría de Agotamiento de la capa de ozono. Se observa que el impacto potencial para el año 2023 fue de 36366.612 kg CFC-11 eq. Del total, el 99.999% está asociado al mercado de producción de diésel, mientras que menos del 1% está relacionado con la producción de electricidad, la producción de cal, el mercado de poliacrilamida y el mercado de aguas residuales.

**Figura 23: Resultados de la categoría Agotamiento de la capa de ozono del año 2023.**



**Fuente:** Elaboración propia a partir del modelamiento en el Software OpenLCA 2.0.0.

La metodología del Ciclo de vida para esta categoría interpreta el potencial de agotar la capa de ozono por parte del clorofluorocarbono (CFC-11), lo que se vería reflejado en una menor retención de rayos ultravioleta.

#### d) Ecotoxicidad de agua dulce

La figura 24 presenta los resultados correspondientes a la categoría de Ecotoxicidad de agua dulce. Se observa que el impacto potencial para el año 2023 fue de 4390829850.120 kg 1,4-DB eq. Del total, el 91.278% está asociado al mercado de producción de diésel, 8.715% al transporte de diésel, mientras que menos del 1% está relacionado con la producción de electricidad, la producción de cal, el mercado de poliacrilamida y el mercado de aguas residuales.

**Figura 24: Resultados de la categoría Ecotoxicidad de agua dulce del año 2023.**



**Fuente:** Elaboración propia a partir del modelamiento en el Software OpenLCA 2.0.0.

La metodología del Ciclo de vida para esta categoría interpreta la exposición del 1,4-diclorobenceno a los seres vivos mediante el consumo de agua dulce.

#### e) Ecotoxicidad acuática marina

La figura 25 presenta los resultados correspondientes a la categoría de Ecotoxicidad acuática marina. Se observa que el impacto potencial para el año 2023 fue de 1.402E+13 kg 1,4-DB eq. Del total, el 95.958% está asociado al mercado de producción de diésel, 4.039% al transporte de diésel, mientras que menos del 1% está relacionado con la producción de electricidad, la producción de cal, el mercado de poliacrilamida y el mercado de aguas residuales.

**Figura 25: Resultados de la categoría Ecotoxicidad acuática marina del año 2023.**



**Fuente:** Elaboración propia a partir del modelamiento en el Software OpenLCA 2.0.0.

La metodología del Ciclo de vida para esta categoría interpreta la exposición del 1,4-diclorobenceno a los seres vivos mediante el consumo de especies marinas.

#### f) Potencial de acidificación

La figura 26 presenta los resultados correspondientes a la categoría de Potencial de acidificación. Se observa que el impacto potencial para el año 2023 fue de 588662473.2 kg SO<sub>2</sub> eq. Del total, el 50.811% está asociado al mercado de producción de diésel, el 49.189% al transporte de diésel, mientras que menos del 1% está relacionado con la producción de electricidad, la producción de cal, el mercado de poliacrilamida y el mercado de aguas residuales.

**Figura 26: Resultados de la categoría Potencial de acidificación del año 2023.**



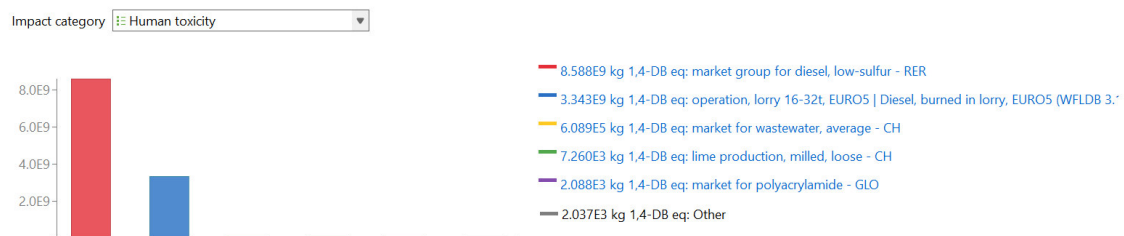
**Fuente:** Elaboración propia a partir del modelamiento en el Software OpenLCA 2.0.0.

La metodología para esta categoría interpreta la liberación del dióxido de azufre a los componentes ambientales afectando sus propiedades impactando en los seres vivos que los habitan.

#### g) Toxicidad humana

La figura 27 presenta los resultados correspondientes a la categoría de Toxicidad humana. Se observa que el impacto potencial para el año 2023 fue de 11930686325.088 kg 1,4-DB eq. Del total, el 71.978% está asociado al mercado de producción de diésel, el 28.016% al transporte de diésel, mientras que menos del 1% está relacionado con la producción de electricidad, la producción de cal, el mercado de poliacrilamida y el mercado de aguas residuales.

**Figura 27: Resultados de la categoría Toxicidad humana del año 2023.**



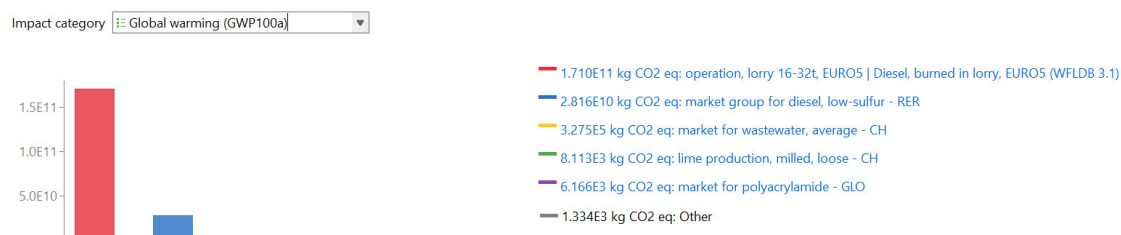
**Fuente:** Elaboración propia a partir del modelamiento en el Software OpenLCA 2.0.0.

La metodología del Ciclo de vida para esta categoría interpreta al 1,4-diclorobenceno como conjunto de metales pesados, plaguicidas, entre otros contaminantes, que al estar expuestos a los seres humanos mediante el consumo, respiración o contacto con la piel, impactan en la salud humana mediante la acumulación en su cadena alimenticia y las consecuencias a su salud.

#### h) Calentamiento global (GWP100a)

La figura 28 presenta los resultados correspondientes a la categoría de Calentamiento global, por la metodología CML Baseline. Se observa que el impacto potencial para el año 2023 fue de 1.99148E+11 kg CO<sub>2</sub>eq. Del total el 85.862% está asociado al transporte de diésel, el 14.138% al mercado de producción de diésel, mientras que menos del 1% está relacionado con la producción de electricidad, la producción de cal, el mercado de poliacrilamida y el mercado de aguas residuales.

**Figura 28: Resultados de la categoría Calentamiento global (CML 100a) del año 2023.**



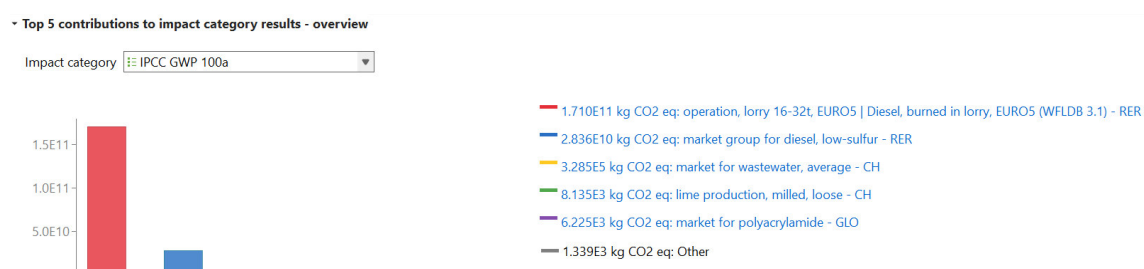
**Fuente:** Elaboración propia a partir del modelamiento en el Software OpenLCA 2.0.0.

La metodología del Ciclo de vida para esta categoría interpreta a los gases de efecto invernadero como equivalencia a dióxido de carbono, por lo que su emisión se considera como una contribución al calentamiento global.

#### i) Calentamiento global (IPCC GWP100a)

La figura 29 presenta los resultados correspondientes a la categoría de Calentamiento global, por la metodología IPCC. Se observa que el impacto potencial para el año 2023 fue de 1.99355E+11 kg CO<sub>2</sub>eq. Del total, el 85.775% está asociado al transporte de diésel, el 14.225% al mercado de producción de diésel, mientras que menos del 1% está relacionado con la producción de electricidad, la producción de cal, el mercado de poliacrilamida y el mercado de aguas residuales.

**Figura 29: Resultados de la categoría Calentamiento global (IPCC 100a) del año 2023.**



**Fuente:** Elaboración propia a partir del modelamiento en el Software OpenLCA 2.0.0.

### 5.1.2.1 Pruebas de hipótesis de la Evaluación del Impacto de Análisis de Ciclo de Vida (EIACV) 2023

La prueba de hipótesis se realizó en el software OpenLCA mediante la técnica de simulación de Monte Carlo, donde con un análisis de 100 ejecuciones se determinó que el coeficiente de variación de todas las categorías estudiadas no supera el 25%, otorgándole precisión aceptable al estudio (ver Tabla 17).

**Tabla 17: Análisis de incertidumbre para las categorías de impacto en el año 2023.**

| Categoría de impacto                                        | Promedio | Desviación estándar | Límite inferior (5%) | Límite superior (95%) | Mediana  | Coeficiente de variación |
|-------------------------------------------------------------|----------|---------------------|----------------------|-----------------------|----------|--------------------------|
| Impacto sobre los recursos abióticos                        | 190.2    | 4.016               | 184.1                | 196.7                 | 190.4    | 2.111%                   |
| Impacto sobre los recursos abióticos (combustibles fósiles) | 3.06E+10 | 6.69E+08            | 2.96E+10             | 3.17E+10              | 3.06E+10 | 2.186%                   |
| Potencial de acidificación                                  | 6.51E+06 | 5.85E+05            | 5.63E+06             | 7.80E+06              | 6.45E+06 | 8.984%                   |
| Ecotoxicidad de agua dulce                                  | 5.01E+07 | 2.66E+06            | 4.66E+07             | 5.61E+07              | 4.97E+07 | 5.315%                   |
| Calentamiento Global (CML)                                  | 2.18E+09 | 6.69E+07            | 2.08E+09             | 2.31E+09              | 2.19E+09 | 3.061%                   |
| Toxicidad Humana                                            | 1.49E+08 | 3.59E+07            | 1.12E+08             | 2.28E+08              | 1.40E+08 | 24.149%                  |
| Agotamiento de la capa de ozono                             | 3.98E+02 | 8.70E+00            | 3.84E+02             | 4.12E+02              | 3.98E+02 | 2.187%                   |
| Ecotoxicidad acuática marina                                | 1.58E+11 | 8.17E+09            | 1.49E+11             | 1.76E+11              | 1.56E+11 | 5.180%                   |
| Calentamiento Global (IPCC)                                 | 2.20E+09 | 6.64E+07            | 2.10E+09             | 2.32E+09              | 2.20E+09 | 3.02%                    |

**Fuente:** Elaboración propia a partir del modelamiento en el Software OpenLCA 2.0.0.

En el Anexo 2 se presentan los gráficos del análisis de la incertidumbre por la simulación de Monte Carlo para cada categoría de impacto, que garantizan la veracidad de los resultados presentados en las tablas del periodo 2022 y 2023.

### 5.2. Discusión de resultados

- Antes de realizar la evaluación del impacto del análisis de ciclo de vida (EIACV) se consideró usar dos métodos para la categoría de Cambio climático, el método CML IA Baseline y el IPCC, a fin de analizar si esto generase resultados similares o en su defecto, diferentes valores. Como consecuencia de la evaluación, se determinó que ambos resultados difieren entre sí en menos del 0.1%, como se observa en la siguiente tabla; por lo tanto, se podría indicar que el resultado del análisis del impacto de la categoría Cambio climático es aún más confiable.

**Tabla 18: Análisis relativo de la categoría de Cambio climático.**

| Categorías                              | Unidad                | 2022        | 2023        |
|-----------------------------------------|-----------------------|-------------|-------------|
| Calentamiento Global (metodología CML)  | kg CO <sub>2</sub> eq | 4.13422E+11 | 1.99148E+11 |
| Calentamiento Global (metodología IPCC) | kg CO <sub>2</sub> eq | 4.13851E+11 | 1.99355E+11 |
| Porcentaje de diferencia                | %                     | 0.104       | 0.104       |

**Fuente:** Elaboración propia

- Las demás categorías de impacto ambiental (ecotoxicidad de agua dulce, ecotoxicidad acuática marina, toxicidad humana, impacto sobre los recursos abióticos, y potencial de acidificación) analizadas en la EIACV indicaron los efectos ambientales que generan los insumos asociados directamente al proceso de tratamiento de aguas residuales industriales.

- Como resultado de realizar el análisis de incertidumbre mediante la Simulación de MonteCarlo con 100 iteraciones en el software OpenLCA 2.0, considerando ambos escenarios anuales (2022 y 2003), se obtuvieron coeficientes de variación menores a 25% para cada categoría de impacto lo que indica que la precisión es aceptable (Amado, 2016).

### **5.2.1 Contribución de los insumos a las categorías de impacto ambiental**

- Como resultado de haber realizado el análisis de ciclo de vida del proceso de tratamiento de agua residual industrial de mina para el escenario del periodo 2022, se determinaron dos desenlaces importantes:

El insumo que genera una exorbitante contribución (cercana al 100%) a la categoría de Cambio climático es el consumo de combustible, asociado directamente a la generación de gases de efecto invernadero y huella de carbono. Como afirma también Tsangas *et al.* (2023) que el consumo energético para una planta de tratamiento de aguas residuales representa el 80% de las emisiones totales generadas de gases de efecto invernadero.

El segundo aspecto importante fue que el consumo de combustible diésel genera la mayor contribución también a las otras categorías de impacto ambiental. Evidenciando de esta manera, que el efecto que generan las cantidades usadas de los insumos químicos como la poliacrilamida (floculante) y la cal, a nivel comparativo es mínimo (representa menos del 1%) en todas las categorías de impacto.

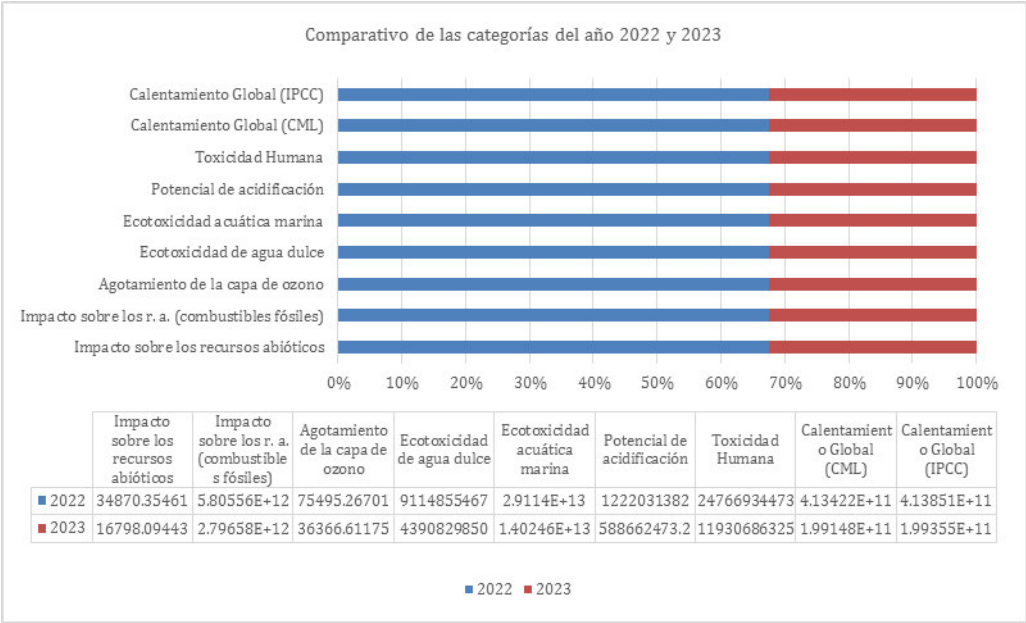
- Como resultado de haber realizado el ACV del periodo 2023, escenario en el cual se instaló una línea de transmisión para el uso de energía eléctrica en el segundo semestre, ocasionando la reducción del consumo anual de combustible en 49%, se determinaron dos desenlaces importantes:

La reducción del uso de diésel en el año 2023 contribuyó a que los valores de todas las categorías de impacto analizadas disminuyeran en 51.8% respecto al

año 2022, evidenciando la relevancia de este insumo no únicamente en la emisión de los gases de efecto invernadero en la planta de tratamiento de aguas residuales, como se observa en la figura 30.

Sin una EIACV se hubiese esperado que el porcentaje de emisiones que dejaron de generarse por el consumo de energía diésel se compensen porcentualmente con las emisiones GEI generadas por el uso de energía eléctrica; sin embargo, los resultados revelan que su porcentaje de aportación a la categoría de Cambio climático es menor al 0.1%.

**Figura 30: Gráfico comparativo de los valores de las categorías de impacto del año 2022 y 2023.**



**Fuente:** Elaboración propia

### **5.2.2 Insumo alternativo**

- Después de haber realizado el análisis de ciclo de vida del proceso de tratamiento de aguas residuales industriales, se identificó que el consumo del combustible diésel generó una suprema contribución en la huella de carbono (relacionado a la categoría de impacto Cambio Climático) a diferencia de los otros insumos; por tanto, los esfuerzos para lograr un diseño ambiental que reduzca la generación de GEI deben de estar orientados a usar una alternativa de este insumo en particular.

Se propone como insumo alternativo el uso de energía eléctrica proveniente de una planta hidroeléctrica para todo el proceso de tratamiento de aguas residuales industriales, y se determinó, considerando ciertos aspectos: la ubicación del proyecto minero, la accesibilidad al insumo alternativo, la demanda energética del proceso, el impacto ambiental de la obtención del nuevo insumo, el efecto social por su uso, y el factor económico.

Y para determinar si realmente esta alternativa produciría la disminución de la huella de carbono se deberá de realizar el modelamiento del análisis de ciclo de vida del proceso de tratamiento de aguas residuales industriales integrando este nuevo insumo.

### **5.3 Propuesta de mejora**

A partir de los resultados obtenidos en los periodos 2022 y 2023 presentados líneas arriba, se desprende que el principal insumo que contribuye superlativamente al aumento de la huella de carbono y a las categorías de impacto ambiental analizadas está asociado a la energía generada a partir de la quema de combustible diésel. Es por esa razón que la propuesta de mejora está orientada a presentar una alternativa que reemplace parcialmente al uso de combustible diésel.

La propuesta para el funcionamiento de la planta de tratamiento de aguas residuales industriales (PTARI) durante el periodo de un año completo consiste en utilizar energía eléctrica a partir de su producción en una planta hidroeléctrica, y energía mediante la quema de combustible fósil como un respaldo para su uso en el horario de mayor demanda local.

En efecto, la elección de emplear diésel como respaldo para periodos de alta demanda de energía en el funcionamiento de la planta de tratamiento de aguas residuales industriales se sustenta en la necesidad de garantizar la continuidad operativa que es de vital importancia dentro de la actividad minera.

Así, el diésel ofrece una fuente de energía de rápida activación, asegurando que la PTARI pueda mantener sus operaciones incluso durante picos imprevistos de demanda o en casos de emergencia, donde otras fuentes de energía podrían no estar disponibles de manera inmediata. Esta capacidad de respuesta inmediata es esencial para evitar interrupciones en el proceso de tratamiento de aguas residuales y prevenir riesgos para la salud pública y el entorno natural.

En la línea de lo mencionado, a continuación se presenta un inventario que ha considerado dos insumos: el combustible diésel y la energía eléctrica producida en una planta hidroeléctrica. La cantidad de estos dos insumos fue estimada mediante un pronóstico anual a partir de los datos del inventario del periodo 2023, escenario en el cual se introdujo el uso de energía eléctrica desde el mes de junio.

**Tabla 19: Consumo de energía eléctrica estimada para un periodo anual.**

| CONSUMO DE ENERGÍA ELÉCTRICA |           |        |                              |
|------------------------------|-----------|--------|------------------------------|
| Año                          | Mes       | Unidad | Consumo de energía eléctrica |
| Periodo anual propuesto      | enero     | KWh    | 66 431.37                    |
|                              | febrero   | KWh    | 66 011.38                    |
|                              | marzo     | KWh    | 62 901.82                    |
|                              | abril     | KWh    | 60 419.93                    |
|                              | mayo      | KWh    | 59 810.99                    |
|                              | junio     | KWh    | 57 817.11                    |
|                              | julio     | KWh    | 58 219.32                    |
|                              | agosto    | KWh    | 55 356.63                    |
|                              | setiembre | KWh    | 53 800.73                    |
|                              | octubre   | KWh    | 52 757.86                    |
|                              | noviembre | KWh    | 51 530.77                    |
|                              | diciembre | KWh    | 49 987.95                    |
| TOTAL                        |           | KWh    | 695 045.84                   |

**Fuente:** Elaboración propia a partir del pronóstico realizado con los registros de consumo de energía eléctrica usada para la operación de la planta de tratamiento de aguas residuales industriales en el periodo 2023.

El modelo de regresión lineal utilizado en los datos estimados tuvo un coeficiente de determinación de 0.98 ( $R^2=0.98$ ).

**Tabla 20: Consumo de combustible diésel estimada para un periodo anual.**

| CONSUMO DE COMBUSTIBLE  |           |              |                        |
|-------------------------|-----------|--------------|------------------------|
| Año                     | Mes       | Unidad       | Consumo de combustible |
| Periodo anual propuesto | enero     | galón        | 1 260.51               |
|                         | febrero   | galón        | 869.50                 |
|                         | marzo     | galón        | 887.10                 |
|                         | abril     | galón        | 862.34                 |
|                         | mayo      | galón        | 862.26                 |
|                         | junio     | galón        | 848.61                 |
|                         | julio     | galón        | 681.90                 |
|                         | agosto    | galón        | 638.53                 |
|                         | setiembre | galón        | 647.60                 |
|                         | octubre   | galón        | 583.12                 |
|                         | noviembre | galón        | 521.05                 |
|                         | diciembre | galón        | 456.31                 |
| <b>TOTAL</b>            |           | <b>galón</b> | <b>9 118.84</b>        |

**Fuente:** Elaboración propia a partir del pronóstico realizado con los registros de consumo de combustible diésel usado en los generadores eléctricos para la operación de la planta de tratamiento de aguas residuales industriales en el periodo 2023.

El modelo de regresión lineal utilizado en los datos estimados tuvo un coeficiente de determinación de 0.86 ( $R^2=0.86$ ).

Es importante aclarar que la propuesta ha sido diseñada para un periodo anual, considerando la misma cantidad de insumos del periodo 2023 (excepto el combustible y energía eléctrica) y residuos para el tratamiento de 915 376 m<sup>3</sup> de agua residual industrial. Además debemos mencionar que se decidió no realizar la estimación de los demás insumos debido a que los resultados del análisis de ciclo de vida evidenciaron que su aporte a la huella de carbono y a las diferentes categorías de impacto era ínfimo a

comparación del efecto que se generaba a consecuencia del consumo de combustible diésel.

Es así como, con las condiciones claramente descritas, se presenta en el siguiente subcapítulo, el análisis comparativo de la propuesta de mejora con respecto a los periodos 2022 y 2023.

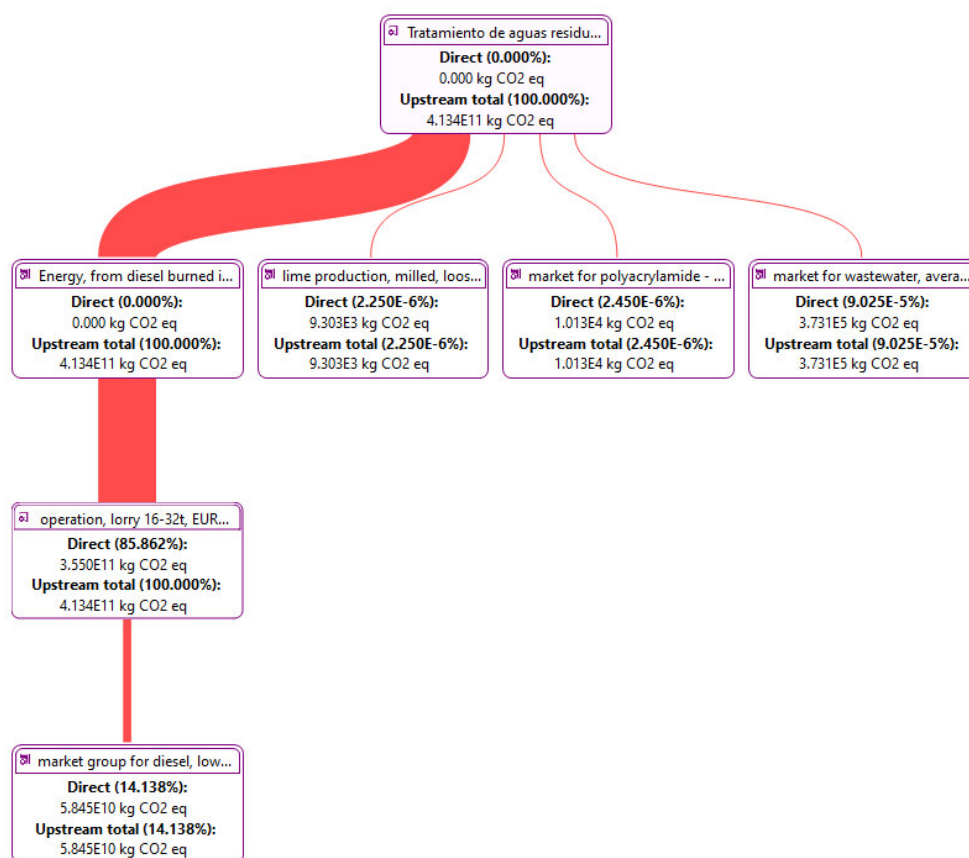
### **5.3.1 Presentación de resultados del modelamiento**

A continuación mostramos los alcances del Análisis de Ciclo de Vida obtenidos mediante el Diagrama de Sankey, el cual según el Manual de OpenLCA 2 nos permite visualizar los impactos de los procesos dentro del sistema del producto en flujos y categorías de impacto específicos. Asimismo, el diagrama muestra tanto la contribución directa como la contribución total aguas arriba del proceso.

De esta manera se distinguirá la contribución directa y aguas arriba de los subprocesos del tratamiento de aguas residuales industriales que se ejerce sobre una determinada categoría de impacto, en este caso, la categoría de Calentamiento Global (100a), asociada directamente con el calentamiento global y elegida en concordancia con los objetivos determinados en el presente estudio.

A continuación, se presentarán los diagramas del Análisis de Ciclo de Vida del tratamiento de aguas residuales industriales en tres escenarios: durante el periodo del año 2022, del 2023, y de la alternativa propuesta diseñada para un periodo anual.

**Figura 31. Diagrama Sankey del Análisis de Ciclo de Vida del Tratamiento de aguas residuales industriales del periodo 2022.**

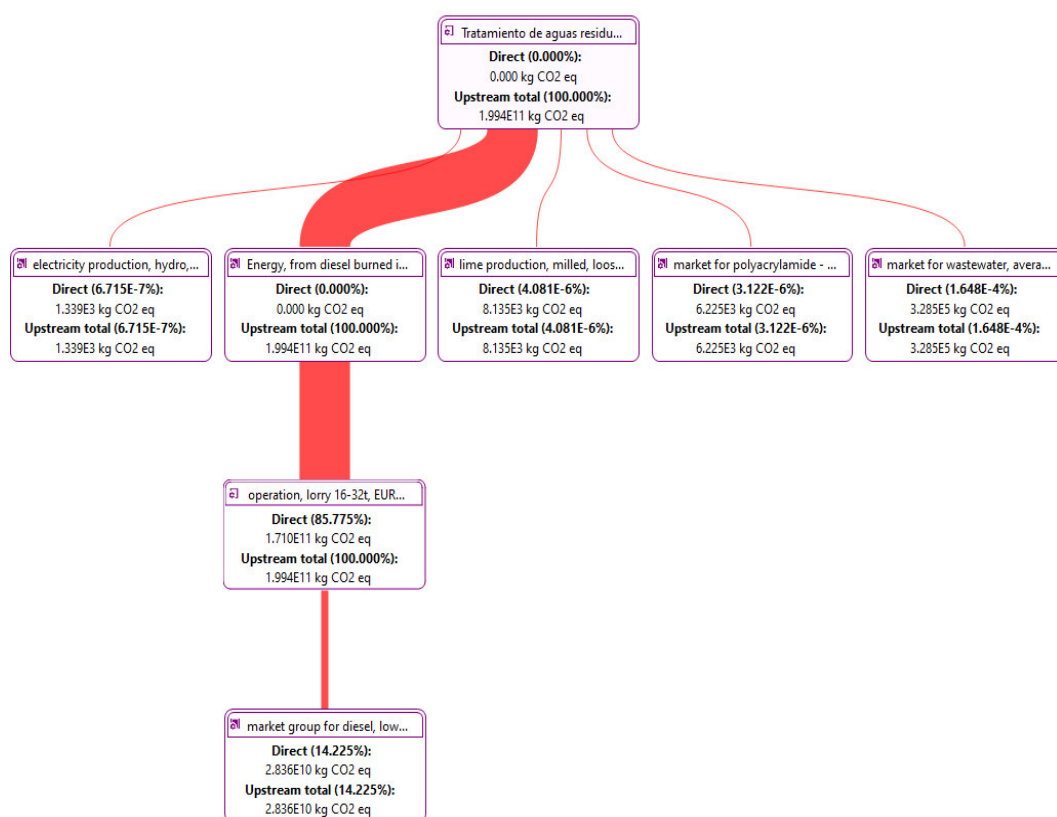


**Fuente:** Elaboración propia a partir del modelamiento en el Software OpenLCA 2.0.0.

Donde: El “upstream total” traducido como “total aguas arriba” indica el porcentaje de aporte del insumo con respecto a la categoría de impacto ambiental analizada.

El diagrama del periodo 2022 señala que se genera en total 4.134 E11 Kg de CO<sub>2</sub> eq por la ejecución del tratamiento de aguas residuales industriales y que el uso de energía a partir de la quema de combustible diésel es superlativamente el principal insumo que contribuye a la categoría de impacto ambiental Calentamiento Global (100 a) asociada al cambio climático, con un porcentaje de aporte cercano al 100% . Mientras que menos de 0,1% está relacionado con la producción de cal, mercado de poliacrilamida y mercado de aguas residuales.

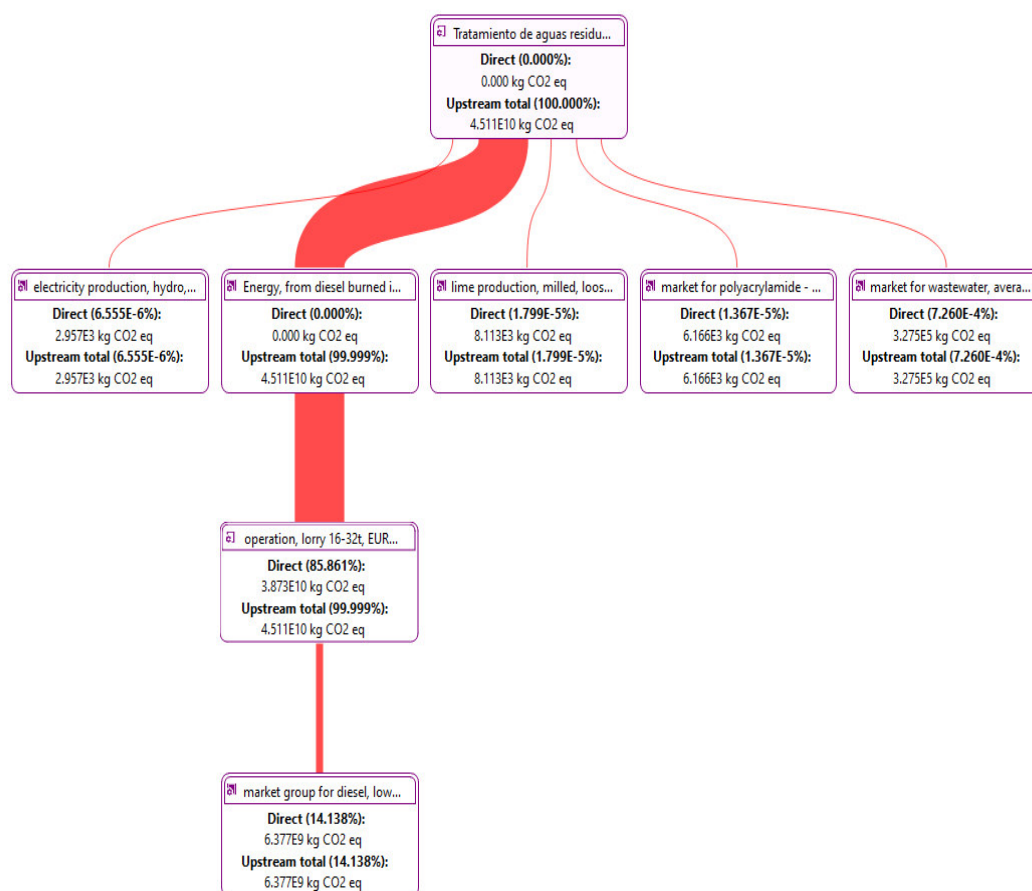
**Figura 32. Diagrama Sankey del Análisis de Ciclo de Vida del Tratamiento de aguas residuales industriales del periodo 2023.**



**Fuente:** Elaboración propia a partir del modelamiento en el Software OpenLCA 2.0.0.

El diagrama del periodo 2023 señala que se genera en total 1.994 E11 Kg de CO<sub>2</sub> eq por la ejecución del tratamiento de aguas residuales industriales y que el uso de energía a partir de la quema de combustible diésel continúa siendo el principal insumo que contribuye a la categoría de impacto ambiental Calentamiento Global (100 a), con un porcentaje de aporte cercano al 100%, mientras que la producción de energía eléctrica mediante una planta hidroeléctrica contribuye de manera ínfima con un porcentaje de aporte inferior al 0,1%.

**Figura 33. Diagrama Sankey del Análisis de Ciclo de Vida del Tratamiento de aguas residuales industriales de la propuesta de mejora.**



**Fuente:** Elaboración propia a partir del modelamiento en el Software OpenLCA 2.0.0.

El diagrama de la propuesta de mejora diseñada para el periodo de un año señala que se genera en total 4.511 E10 Kg de CO<sub>2</sub> eq por la ejecución del tratamiento de aguas residuales industriales y que el uso de energía a partir de la quema de combustible diésel continúa siendo aún el principal insumo que contribuye a la categoría de impacto ambiental Calentamiento Global (100 a), con un porcentaje de aporte del 99.99%, mientras que la producción de energía eléctrica mediante una planta hidroeléctrica continúa contribuyendo de manera ínfima con un porcentaje de aporte inferior al 0,1% .

A partir de los diagramas presentados se puede extraer la huella de carbono (cantidad de Kg de CO<sub>2</sub>eq) del proceso de tratamiento de aguas residuales industriales de los tres escenarios anuales y mediante la siguiente tabla se visualizará el resumen de resultados para continuar con el desarrollo del análisis comparativo.

**Tabla 21. Tabla resumen de la huella de carbono de los tres escenarios anuales.**

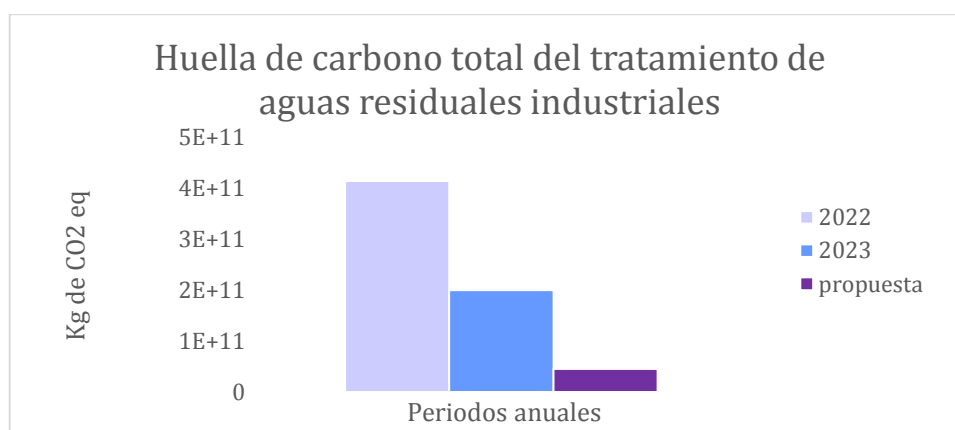
| Huella de carbono (Kg CO <sub>2</sub> eq) del tratamiento de aguas residuales industriales |           |           |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|-----------|
| 2022                                                                                       | 2023      | Propuesta |
| 4.134E+11                                                                                  | 1.994E+11 | 4.511E+10 |
| Reducción porcentual                                                                       |           |           |
| No aplica por ser el año base*                                                             | 52%       | 89%       |

**Fuente:** Elaboración propia.

\*Año base 2022: corresponde al periodo inicial en el que se realiza la medición de la huella de carbono y permite hacer un análisis comparativo con periodos posteriores.

Asimismo, vinculada a la tabla se presenta la siguiente figura con el objetivo de distinguir la variación de los resultados durante los tres periodos.

**Figura 34. Huella de Carbono total del tratamiento de aguas residuales industriales durante los tres escenarios.**



**Fuente:** Elaboración propia

Recapitulando se obtiene:

Periodo 2022: Se generó un total de 4.134E+11 Kg CO<sub>2</sub>eq.

Periodo 2023: Se generó un total de 1.994E+11 Kg CO<sub>2</sub>eq, y se redujo la huella de carbono en 52% respecto al periodo 2022.

Propuesta anual de mejora: Se generaría un total de 4.511E+11 Kg CO<sub>2</sub>eq, y se reduciría la huella de carbono en 89% respecto al periodo 2022.

## 5.4 Beneficios ambientales, económicos y sociales

La propuesta para reducir la generación de emisiones de gases de efecto invernadero en el tratamiento de aguas residuales industriales mineras contempla beneficios que contribuirían como una acción concreta al Objetivo de Desarrollo Sostenible 13: Acción climática.

En esa línea, a continuación se detallan los beneficios ambientales, sociales y económicos que se generarían a consecuencia de ejecutar la propuesta.

**Cuadro 3. Beneficios ambientales, sociales y económicos de la propuesta.**

| Beneficios ambientales                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | Beneficios sociales                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | Beneficios económicos                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"><li>• Se reducirían las emisiones de gases de efecto invernadero en un 89% con respecto al año base durante el funcionamiento del sistema de tratamiento de aguas residuales industriales, planteándose como una acción necesaria para frenar el cambio climático.</li><li>• Se contribuiría con la reducción de la huella de carbono organizacional de la operación minera.</li><li>• Se reduciría el consumo de recursos naturales no renovables.</li></ul> | <ul style="list-style-type: none"><li>• El reemplazo de la matriz energética permitiría que la población circundante a las operaciones disminuya la probabilidad de contraer enfermedades relacionadas a la inhalación de gases de combustión.</li><li>• Se generaría empleo para ejecutar el servicio de mantenimiento de la infraestructura de línea de media tensión.</li><li>• Se fomentaría el uso de energías más limpias, motivando a que empresas conexas y empresas externas que operan en el área de influencia realicen acciones para reducir el consumo de combustibles fósiles.</li></ul> | <ul style="list-style-type: none"><li>• Se reducirían los costos operativos del tratamiento de aguas residuales industriales, ya que el uso de electricidad tiene un costo menor con respecto al uso de combustible fósil.</li><li>• Se convertiría la empresa en una candidata para la obtención de préstamos bancarios nacionales e internacionales que exijan la gestión de reducción de sus emisiones GEI.</li><li>• Se formaría parte del grupo reducido de empresas mineras que gestionan sus emisiones de gases de efecto invernadero, convirtiendo a la empresa en un proveedor responsable y competitivo.</li></ul> |

**Fuente:** Elaboración propia.

## CAPÍTULO VI

### 6. Conclusiones

- La Evaluación del Impacto de Análisis de Ciclo de Vida (ACV) de los años 2022 y 2023, realizada con el software OpenLCA, reveló que el insumo que genera el mayor impacto ambiental en el proceso de tratamiento de aguas residuales industriales de la unidad minera “El Toro” es el diésel, debido a sus emisiones de gases de efecto invernadero. Este insumo contribuye con más del 99% en varias categorías de impacto ambiental, como el agotamiento de recursos abióticos (incluyendo combustibles fósiles), el agotamiento de la capa de ozono, la ecotoxicidad en agua dulce y marina, el potencial de acidificación, la toxicidad humana y el calentamiento global, tanto según la metodología CML IA Baseline como la del IPCC. En contraste, otros insumos, como la electricidad, la poliacrilamida y la cal, representan menos del 1% de los impactos en las categorías mencionadas.
- Dado que más del 99% del impacto ambiental proviene del uso del diésel, el estudio se enfoca en buscar alternativas para este insumo proponiendo un nuevo diseño ambiental. La energía eléctrica proveniente de centrales hidroeléctricas se presenta como la opción preferida, ya que su implementación en 2023 permitió una reducción del 49% en el consumo anual de diésel en comparación con el año anterior. Esta transición resultó en una disminución del 51.8% en las categorías de impacto ambiental. Además, según el modelamiento anual de la propuesta planteada, se estima que la huella de carbono podría reducirse en un 89% con respecto al año base, de acuerdo con los resultados de la categoría de Calentamiento Global utilizando metodologías CML IA Baseline e IPCC. Se concluye que la disminución del uso de diésel en la planta de tratamiento de aguas residuales industriales contribuye a operar con una energía más limpia y a reducir significativamente las emisiones de gases de efecto invernadero.

- Finalmente, la implementación de esta propuesta proporciona una base sólida para promover un enfoque más sostenible y equilibrado en la gestión de los recursos naturales y el desarrollo económico del país. En un contexto donde la disponibilidad y el costo del diésel son volátiles, la adopción de energía eléctrica proveniente de centrales hidroeléctricas se presenta como una alternativa altamente beneficiosa desde los ámbitos económico, social y ambiental. Esta medida no solo reduciría significativamente la dependencia de los combustibles fósiles, sino que también impulsaría la sostenibilidad en las operaciones mineras, generando un impacto positivo tanto a nivel local como global.

## CAPÍTULO VII

### 7. Recomendaciones

- Presentar los hallazgos del Análisis de Ciclo de Vida y la propuesta de mejora ambiental a la alta dirección de la unidad minera El Toro, con el objetivo de proporcionar una base técnica para la toma de decisiones estratégicas.
- Los resultados resaltan el impacto importante del diésel en la huella de carbono de la planta de tratamiento de aguas residuales industriales. Por ello, se sugiere realizar un diagnóstico energético para obtener información detallada sobre el consumo de energía y desarrollar estrategias efectivas para mejorar la eficiencia energética y reducir los costos asociados.
- Los datos obtenidos resaltan la necesidad de implementar medidas concretas para reducir el impacto ambiental de las actividades mineras. Como parte de un tema de estudio a futuro, se sugiere llevar a cabo pruebas piloto para explorar la viabilidad y eficacia de la transición hacia el uso de insumos alternativos en el proceso de tratamiento.
- Sería recomendable aplicar la metodología del Análisis de Ciclo de Vida (ACV) en otras etapas como el minado (explotación y extracción de mineral y desmonte) debido al uso de explosivos y consumo de combustible; y procesamiento, por el empleo de insumos químicos y diésel, con el objetivo de buscar una alternativa para el reemplazo de estos suministros o implementación de nueva tecnología que reduzca los impactos ambientales.

## CAPÍTULO VIII

### 8. Referencias bibliográficas

- Alférez Rivas, L. E & Nieves Pimiento, N. (2019). *Plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR): impacto ambiental esperado e impacto ambiental provocado*. Revista Caribeña de Ciencias Sociales. Recuperado de: <https://www.eumed.net/rev/caribe/2019/06/tratamiento-aguas-residuales.html>.
- Azofeifa, C. E. (2004). *Aplicación de la Simulación Monte Carlo en el cálculo del riesgo usando Excel*. *Tecnología en marcha*, 17(1), 97-109.
- Bonton, A., Bouchard, C., Barbeau, B. & Jedrzejak, S. (2012). Evaluación comparativa del ciclo de vida de plantas de tratamiento de agua. *Desalinización*, 284, 42-54. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2011.08.035>
- Camelo Abril, L. M. (2020). *Análisis de ciclo de vida de una planta de tratamiento de agua residual construida por la empresa Prodeing Ltda*. Repositorio institucional de la Universidad Santo Tomas. <https://repository.usta.edu.co/handle/11634/21457>.
- Chávez Parra, O. F. (2021) *Análisis de ciclo de vida del proyecto de construcción de un taller de camiones en una unidad minera del Departamento de Ica*. Repositorio académico de la Universidad Pontificia Católica del Perú. <http://hdl.handle.net/20.500.12404/21135>.
- Comisión Europea. (s.f). *Life Cycle Assessment*. <https://eplca.jrc.ec.europa.eu/lifecycleassessment.html>.
- Perú. Ministerio del Ambiente. (2019). Reglamento de la Ley N° 30754, Ley Marco sobre Cambio Climático [Decreto Supremo N° 013-2019-MINAM]. Recuperado de: <https://sinia.minam.gob.pe/normas/decreto-supremo-que-aprueba-reglamento-ley-no-30754-ley-marco-cambio>.
- Figueroa, C. M. G., & Collazos, A. P. (2019). *Determinación de impactos ambientales en planta de tratamiento de aguas residuales mediante análisis de ciclo de vida ambiental-ACV*. *Agua, Saneamiento & Ambiente*, 14(1), 85-94. Recuperado a partir de <https://revistas.usac.edu.gt/index.php/asa/article/view/1187>.
- Gallego Maya, R. (2021). *Análisis de ciclo de vida aplicado a sistemas de ablandamiento del agua*. Depósito de investigación Universidad de Sevilla. <https://hdl.handle.net/11441/126545>.
- IPCC, 2013: Cambio climático 2013: The Physical Science Basis. Contribución del Grupo de Trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático [Stocker, TF, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, SK Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex y PM Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY, EE.UU.
- IPCC, 2018: Anexo I: Glosario [Matthews J.B.R. (ed.)]. En: Calentamiento global de 1,5 °C, Informe especial del IPCC sobre los impactos del calentamiento global de 1,5 °C con respecto a los niveles preindustriales y las trayectorias correspondientes que

deberían seguir las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero.[Masson-Delmotte V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor y T. Waterfield (eds.)].

- IPCC, 2018: Resumen para responsables de políticas. En: Calentamiento global de 1,5 °C, Informe especial del IPCC sobre los impactos del calentamiento global de 1,5 °C con respecto a los niveles preindustriales y las trayectorias correspondientes que deberían seguir las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero. [Masson-Delmotte V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor y T. Waterfield (eds.)].
- IPCC, 2023: Resumen para responsables de políticas. En: Cambio Climático 2023: Informe de Síntesis. Contribución de los Grupos de Trabajo I, II y III al Sexto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático [Equipo principal de redacción, H. Lee y J. Romero (eds.)] IPCC, Ginebra, Suiza, págs. 1 a 34, doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001
- IHOBE S.A. (Sociedad Pública de Gestión Ambiental). (2009). *Análisis de ciclo de vida y huella de carbono*. Ihobe, 1–53.
- MINAM (27 de noviembre de 2015) *COP23: Gobierno peruano comprometido con la acción climática*. Recuperado de: <https://www.minam.gob.pe/cambioclimatico/2017/11/15/cop23-gobierno-peruano-comprometido-con-la-accion-climatica/#:~:text=Asimismo%2C%20sostuvo%20que%20al%20ratificar,un%2010%25%20adicional%20condicionado%20a.>
- Montoya, M (2021). *Análisis de Ciclo de Vida de la potabilizadora de La Atarjea, ubicada en la ciudad de Lima*. [Tesis para obtener el título de ingeniero civil]. Repositorio institucional de la Pontificia Universidad Católica del Perú. <http://hdl.handle.net/20.500.12404/18712>.
- Neira Orosco, M. F. (2019). *Proyección de los impactos ambientales de nuevas plantas de tratamiento de agua para la Región Metropolitana: formulación de un modelo a partir de un análisis de ciclo de vida*. [Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Químico]. Repositorio académico de la Universidad de Chile. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/173460>.
- OpenLCA. (06 de setiembre de 2016). *Simulación de Monte Carlo*. OpenLCA. Recuperado el 20 de noviembre del 2023 de <https://www.openlca.org/?s=MONT+CARLO>.
- OpenLCA. *Manual de OpenLCA 2* (2023). Recuperado el 22 de noviembre del 2023 de: [https://manuals.openlca.org/openlca/lcia\\_methods/index.html](https://manuals.openlca.org/openlca/lcia_methods/index.html).
- Organización Internacional de Normalización (2006). *Gestión ambiental – Análisis del ciclo de vida – Principios y marco de referencia (ISO 14040)*. <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/37456/0e3ee22afc7540488f66804b504580a4/ISO-14040-2006.pdf>.

- Rincón-Restrepo, D., & Sanabria-Guerrero, J. (2021). *Estudio comparativo de evaluación del ciclo de vida de procesos tratamiento de aguas residuales de una industria textil en Medellín*. Repositorio académico de la Universidad Católica de Colombia. <https://hdl.handle.net/10983/25928>.
- Tsangas, M., Papamichael, I., Banti, D., Samaras, P., & Zorpas, A. A. (2023). *LCA of municipal wastewater treatment*. Chemosphere, 341, 139952. ScienceDirect. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S004565352302221X?via%3Dihub>.
- Torre García, A. (2018). *Diseño y análisis ambiental de una planta de tratamiento de aguas residuales en la ciudad de Huaraz*. [Tesis para obtener el título de ingeniero civil]. Repositorio institucional de la Pontificia Universidad Católica del Perú. <https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/13033>.
- SPDA Actualidad Ambiental (13 de diciembre del 2019) *COP25: empresas B peruanas se comprometen alcanzar neutralidad en carbono para el 2030*. Recuperado de: <https://www.actualidadambiental.pe/cop25-empresas-b-peruanas-se-comprometen-alcanzar-neutralidad-en-carbono-para-el-2030/>.
- Superintendencia Nacional de Servicios de Saneamiento (2022). Diagnóstico de las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) en el ámbito de las Empresas Prestadoras 2022. [https://www.sunass.gob.pe/wp-content/uploads/2022/06/Informe-de-diagnostico-de-las-Plantas-de-Tratamiento-de-Aguas-Residuales-PTAR\\_VdigitalConcomentario.pdf](https://www.sunass.gob.pe/wp-content/uploads/2022/06/Informe-de-diagnostico-de-las-Plantas-de-Tratamiento-de-Aguas-Residuales-PTAR_VdigitalConcomentario.pdf).
- Vega, T., Franco, C., Gil, E., Rodríguez, A. (2020). Ecodiseño. Material didáctico. Curso avanzado. Recuperado el 22 de noviembre del 2023 de: [http://www.degren.eu/wpcontent/uploads/2021/04/Manual\\_avanzado\\_de\\_Ecodisen\\_o\\_Material%20docente.pdf](http://www.degren.eu/wpcontent/uploads/2021/04/Manual_avanzado_de_Ecodisen_o_Material%20docente.pdf).

## CAPÍTULO IX

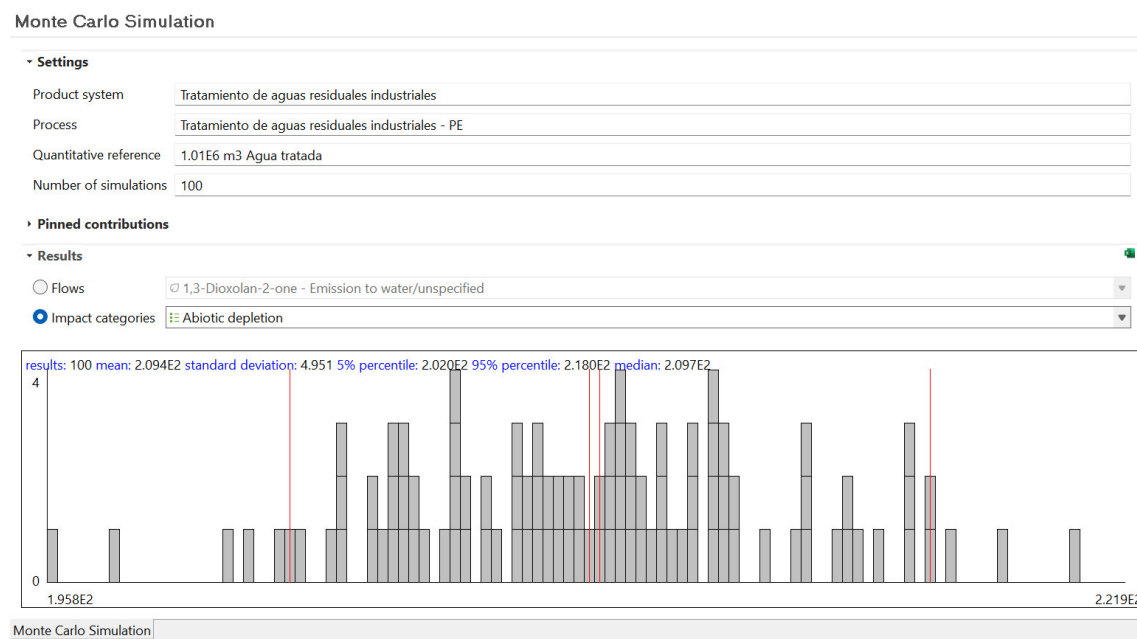
### 9. Anexos

#### ANEXO 1: Análisis de incertidumbre 2022

Los siguientes gráficos presentan el análisis de la incertidumbre por la simulación de Monte Carlo para cada categoría del año 2022.

##### a) Impacto sobre los recursos abióticos

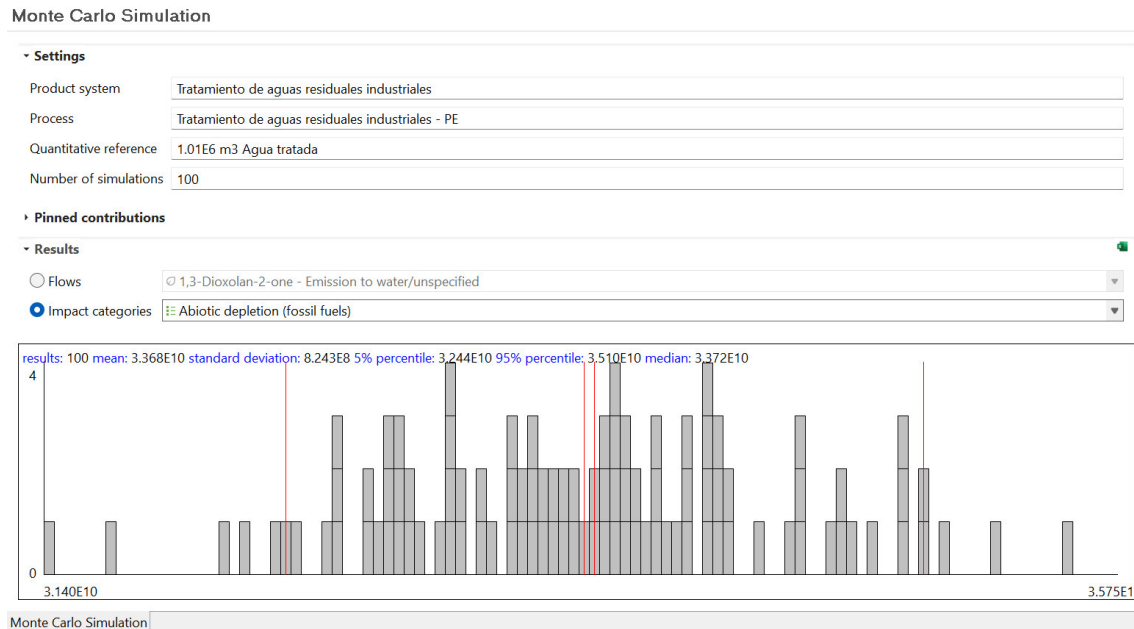
#### Resultados de la simulación de Montecarlo de la categoría Impacto sobre los recursos abióticos



**Fuente:** Elaboración propia a partir del modelamiento en el Software OpenLCA 2.0.0.

b) Impacto sobre los recursos abióticos (combustibles fósiles)

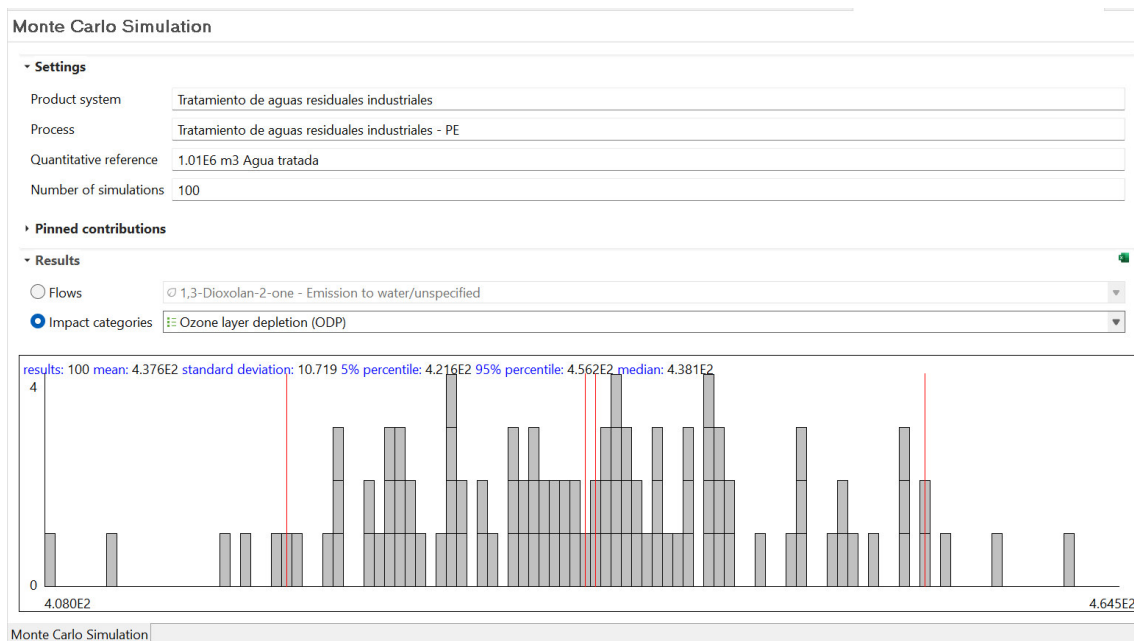
**Resultados de la simulación de Montecarlo de la categoría Impacto sobre los recursos abióticos (combustibles fósiles)**



**Fuente:** Elaboración propia a partir del modelamiento en el Software OpenLCA 2.0.0.

c) Agotamiento de la capa de ozono

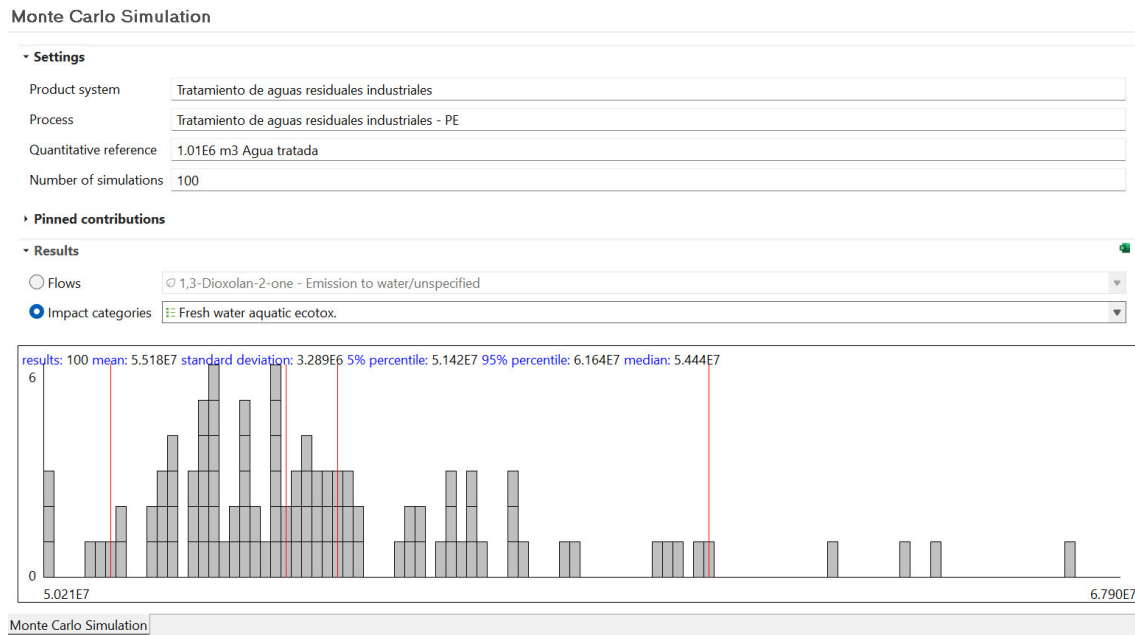
**Resultados de la simulación de Montecarlo de la categoría Agotamiento de la capa de ozono**



**Fuente:** Elaboración propia a partir del modelamiento en el Software OpenLCA 2.0.0.

#### d) Ecotoxicidad de agua dulce

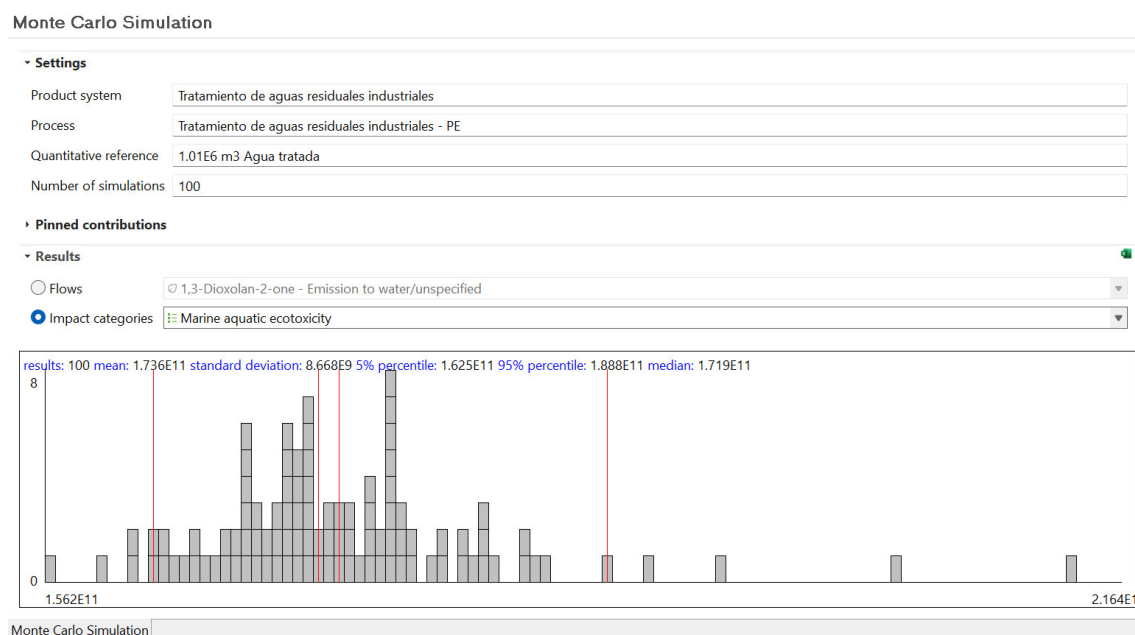
### Resultados de la simulación de Montecarlo de la categoría Ecotoxicidad de agua dulce



Fuente: Elaboración propia a partir del modelamiento en el Software OpenLCA 2.0.0.

#### e) Ecotoxicidad marina

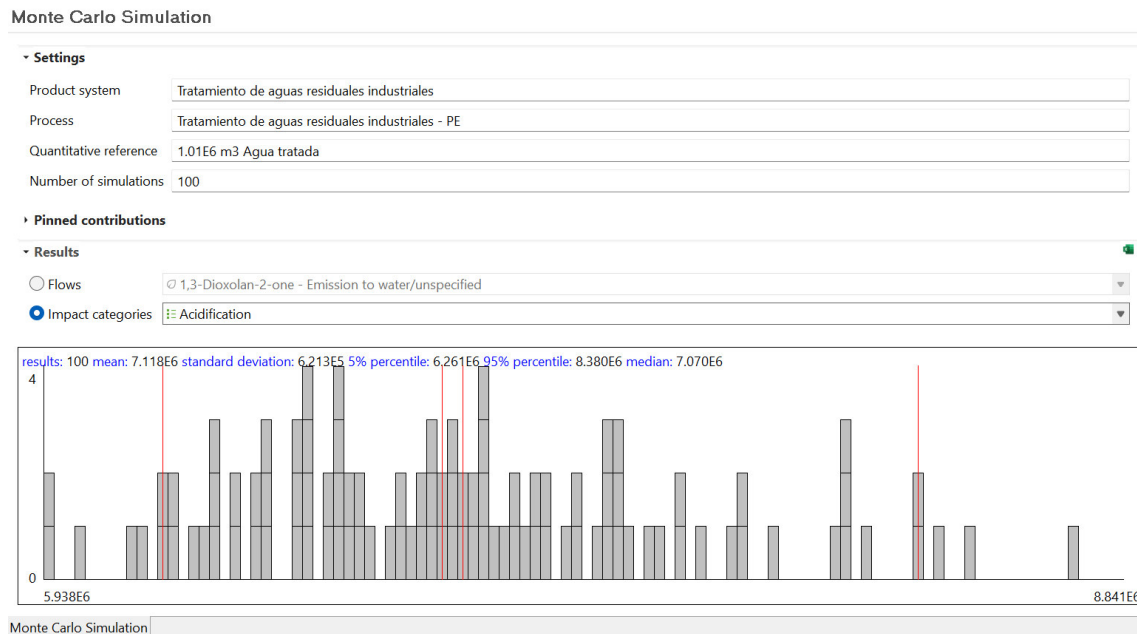
### Resultados de la simulación de Montecarlo de la categoría Ecotoxicidad marina



Fuente: Elaboración propia a partir del modelamiento en el Software OpenLCA 2.0.0.

## f) Potencial de acidificación

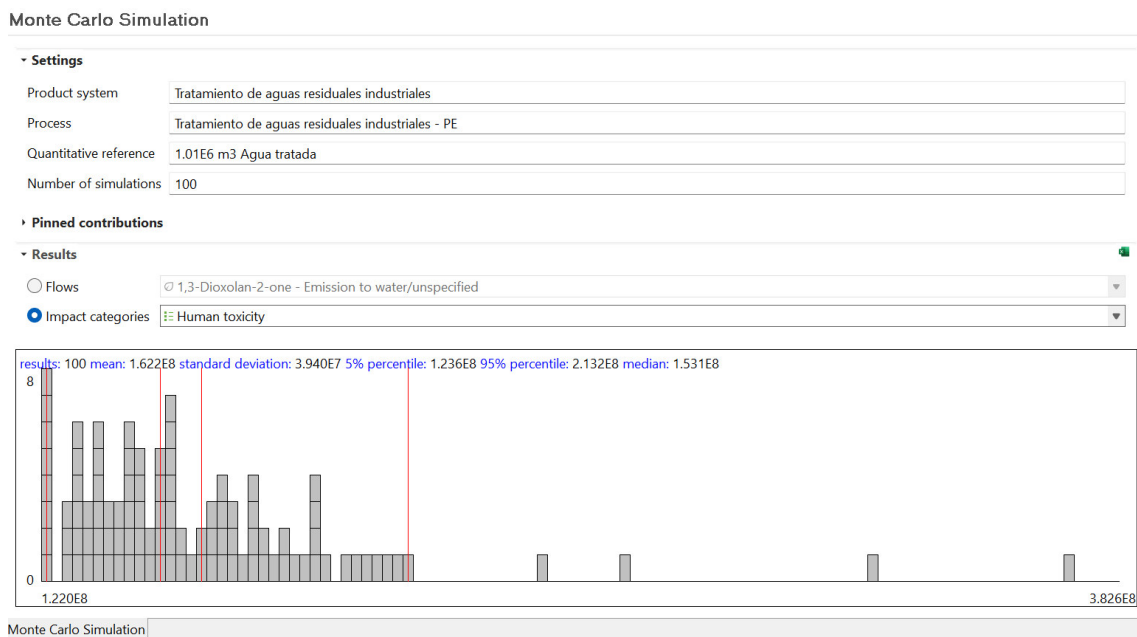
### Resultados de la simulación de Montecarlo de la categoría Potencial de acidificación



**Fuente:** Elaboración propia a partir del modelamiento en el Software OpenLCA 2.0.0.

## g) Toxicidad humana

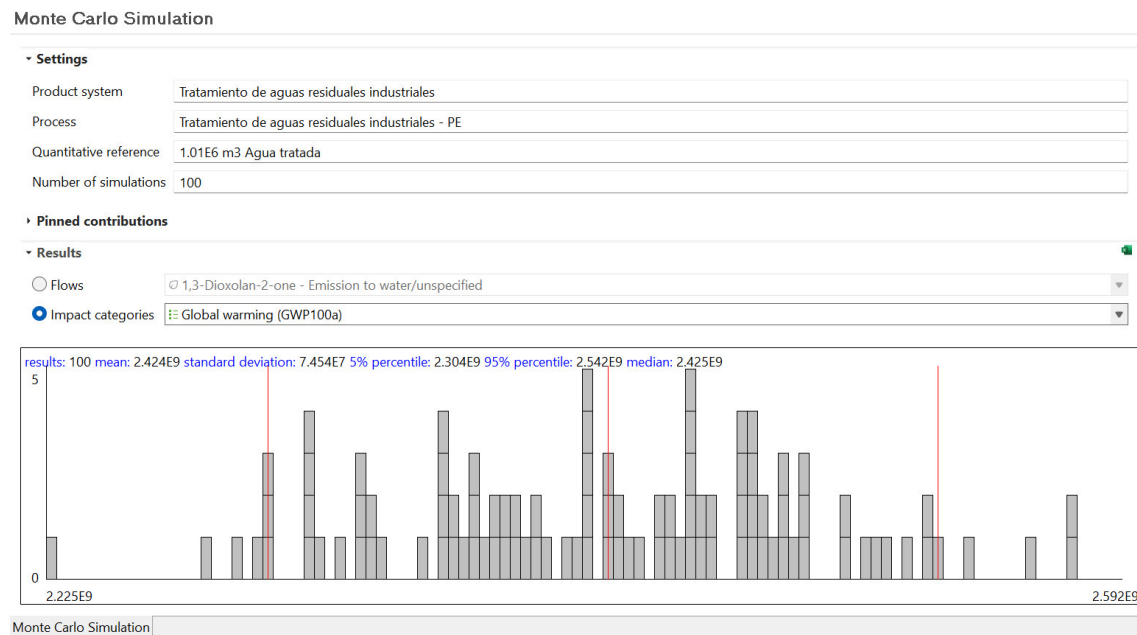
### Resultados de la simulación de Montecarlo de la categoría Toxicidad Humana



**Fuente:** Elaboración propia a partir del modelamiento en el Software OpenLCA 2.0.0.

## h) Calentamiento global (método CML IA Baseline)

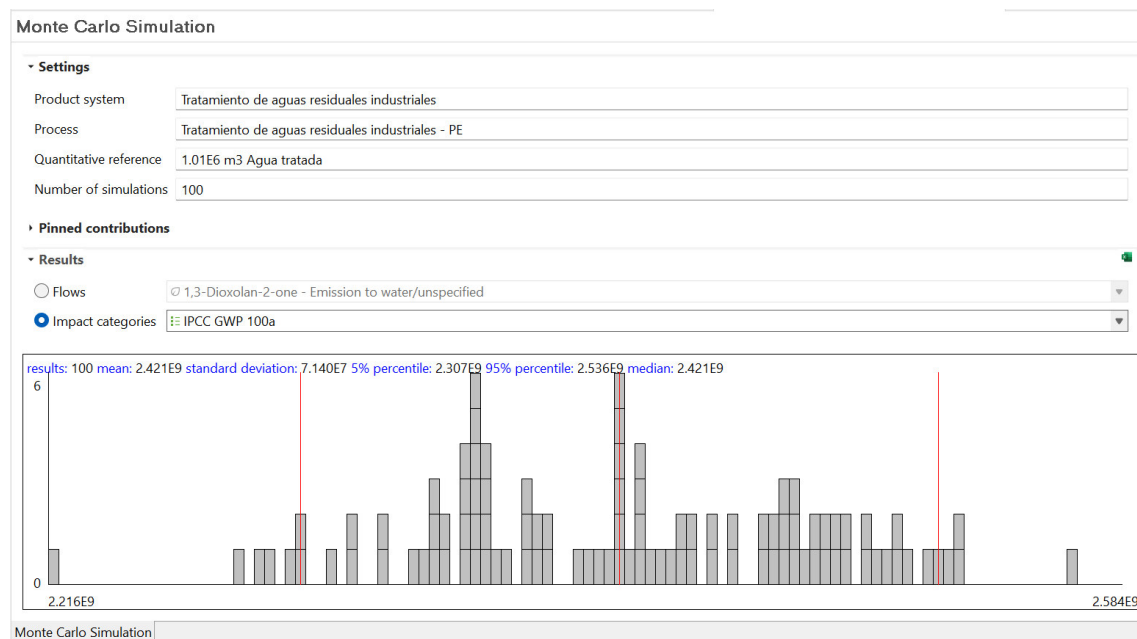
### Resultados de la simulación de Montecarlo de la categoría Toxicidad Humana



**Fuente:** Elaboración propia a partir del modelamiento en el Software OpenLCA 2.0.0.

## i) Calentamiento global (método IPCC)

### Resultados de la simulación de Montecarlo de la categoría Calentamiento global (IPCC)



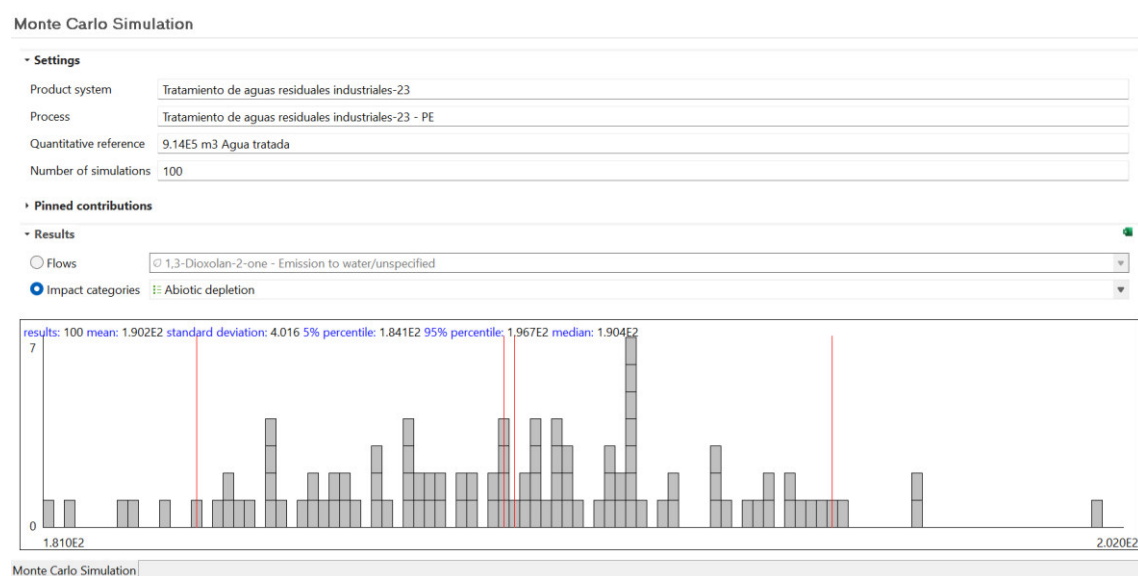
**Fuente:** Elaboración propia a partir del modelamiento en el Software OpenLCA 2.0.0.

## ANEXO 2: Análisis de incertidumbre 2023

Los siguientes gráficos presentan el análisis de la incertidumbre por la simulación de Monte Carlo para cada categoría del año 2023.

### a) Impacto sobre los recursos abióticos

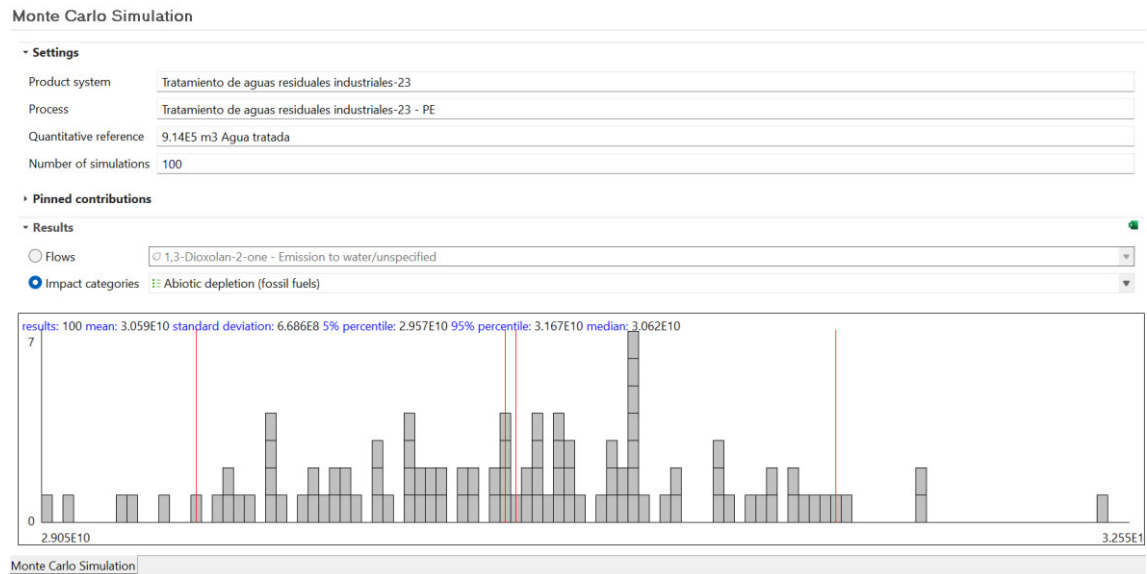
#### Resultados de la simulación de Montecarlo de la categoría Impacto sobre los recursos abióticos



**Fuente:** Elaboración propia a partir del modelamiento en el Software OpenLCA 2.0.0.

b) Impacto sobre los recursos abióticos (combustibles fósiles)

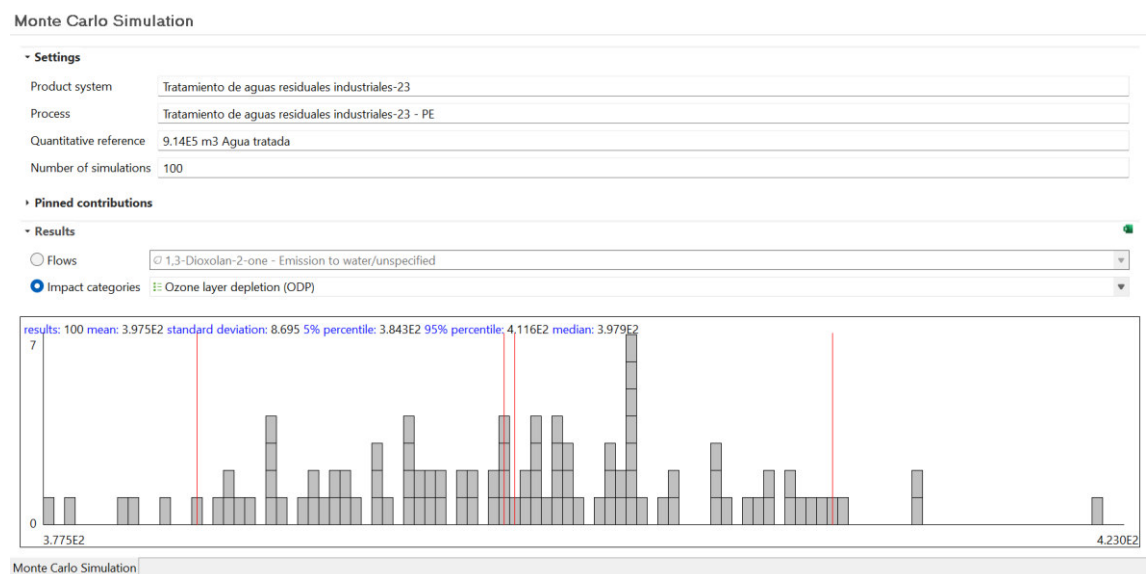
**Resultados de la simulación de Montecarlo de la categoría Impacto sobre los recursos abióticos (combustibles fósiles)**



**Fuente:** Elaboración propia a partir del modelamiento en el Software OpenLCA 2.0.0.

c) Agotamiento de la capa de ozono

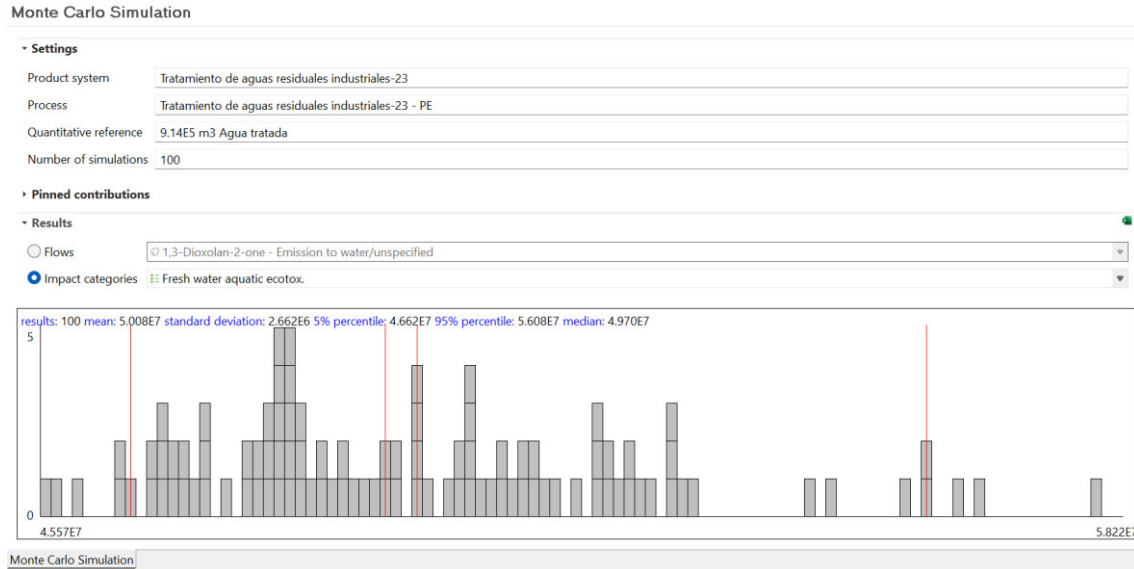
**Resultados de la simulación de Montecarlo de la categoría Impacto sobre los recursos abióticos (combustibles fósiles)**



**Fuente:** Elaboración propia a partir del modelamiento en el Software OpenLCA 2.0.0.

d) Ecotoxicidad de agua dulce

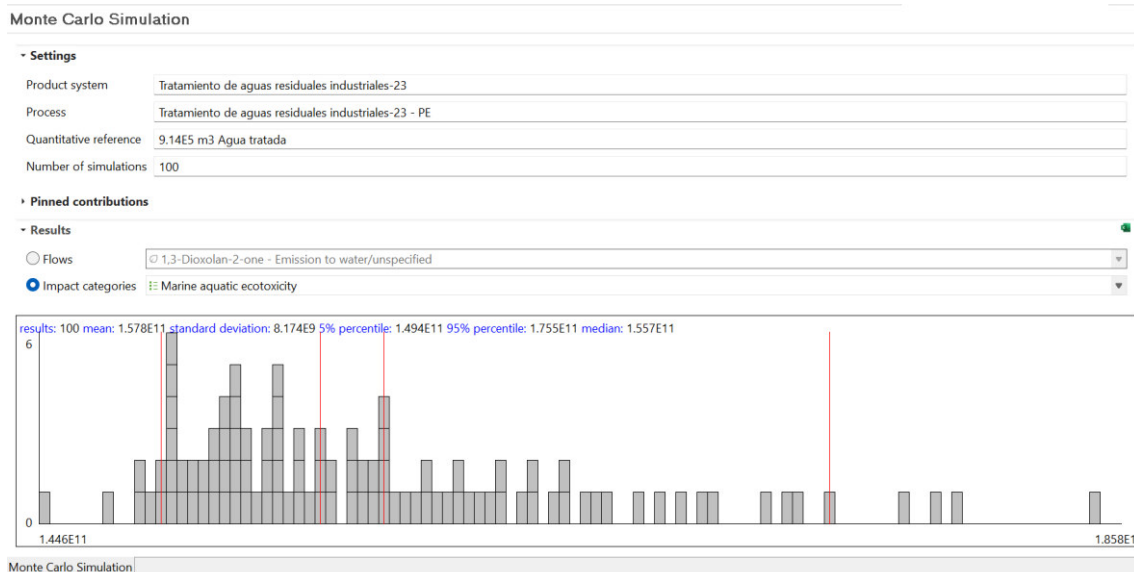
**Resultados de la simulación de Montecarlo de la categoría Impacto sobre los recursos abióticos (combustibles fósiles)**



**Fuente:** Elaboración propia a partir del modelamiento en el Software OpenLCA 2.0.0.

e) Ecotoxicidad marina

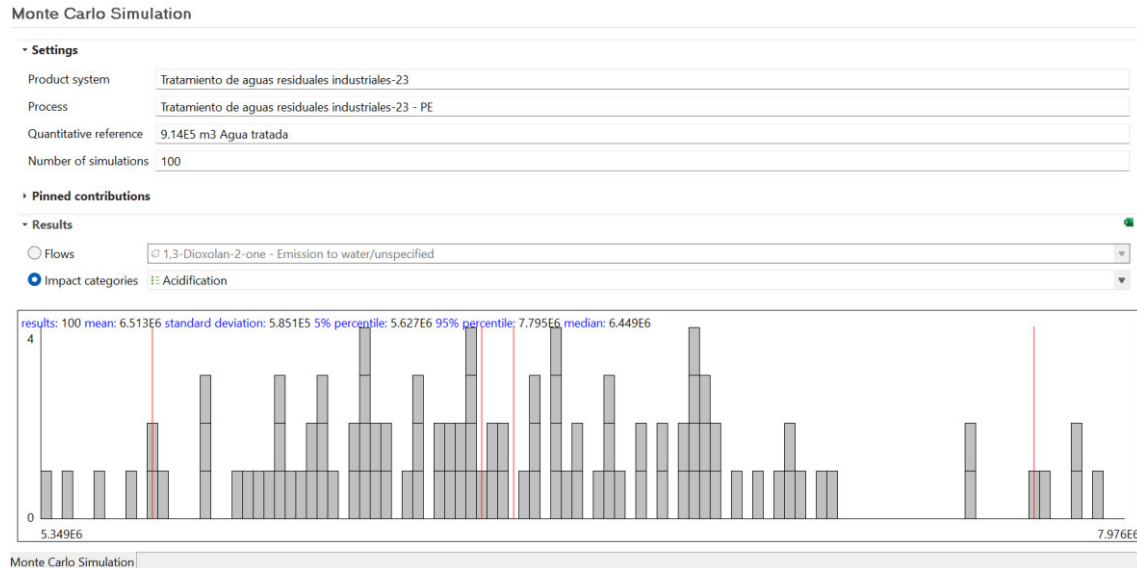
**Resultados de la simulación de Montecarlo de la categoría Impacto sobre los recursos abióticos (combustibles fósiles)**



**Fuente:** Elaboración propia a partir del modelamiento en el Software OpenLCA 2.0.0.

## f) Potencial de acidificación

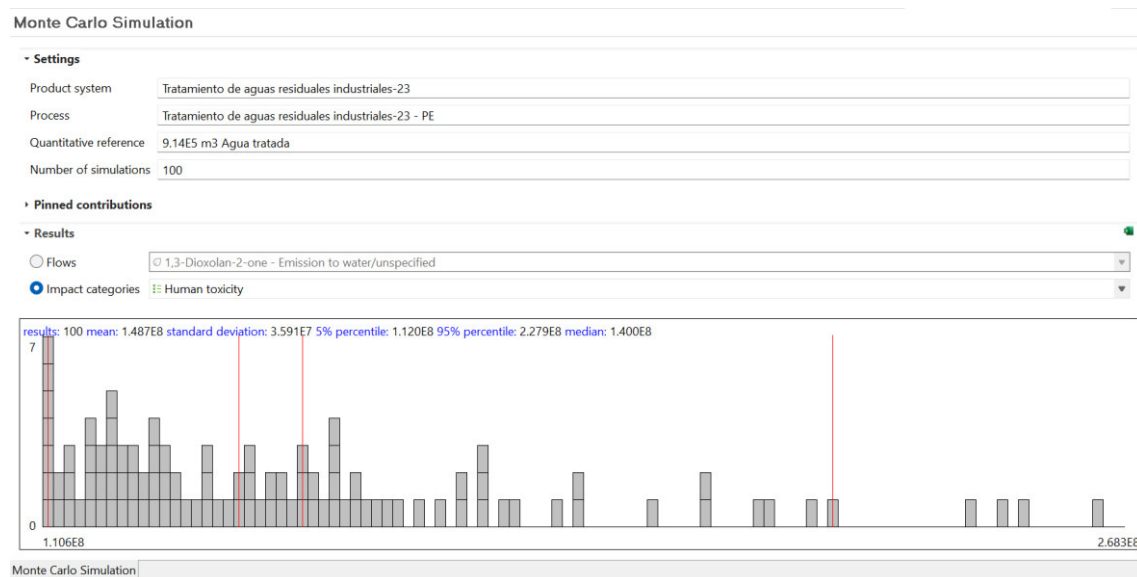
### Resultados de la simulación de Montecarlo de la categoría Impacto sobre los recursos abióticos (combustibles fósiles)



Fuente: Elaboración propia a partir del modelamiento en el Software OpenLCA 2.0.0.

## g) Toxicidad humana

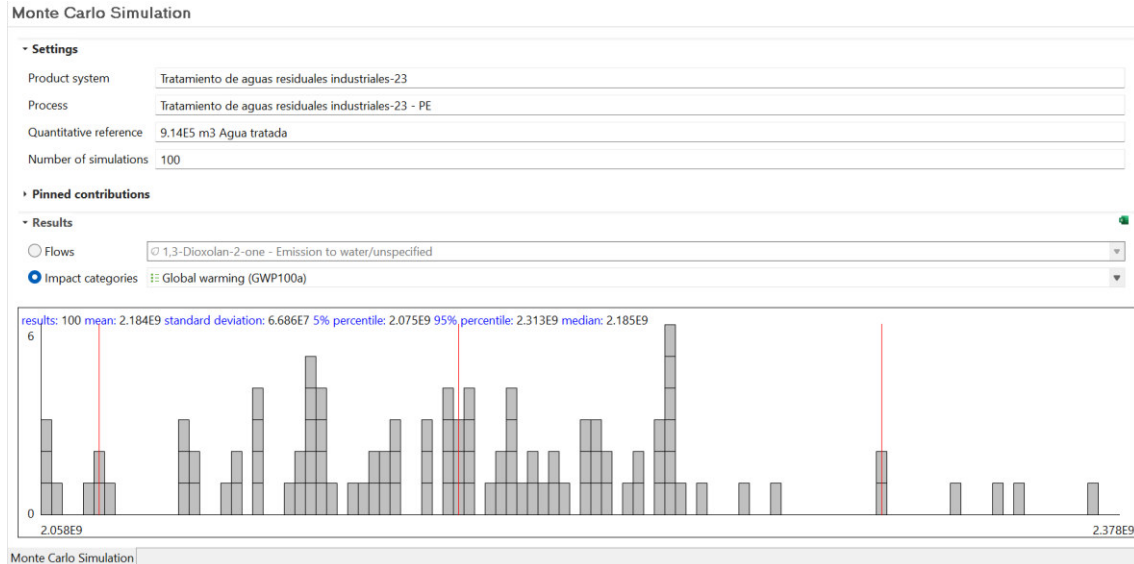
### Resultados de la simulación de Montecarlo de la categoría Impacto sobre los recursos abióticos (combustibles fósiles)



Fuente: Elaboración propia a partir del modelamiento en el Software OpenLCA 2.0.0.

## h) Calentamiento global (método CML IA Baseline)

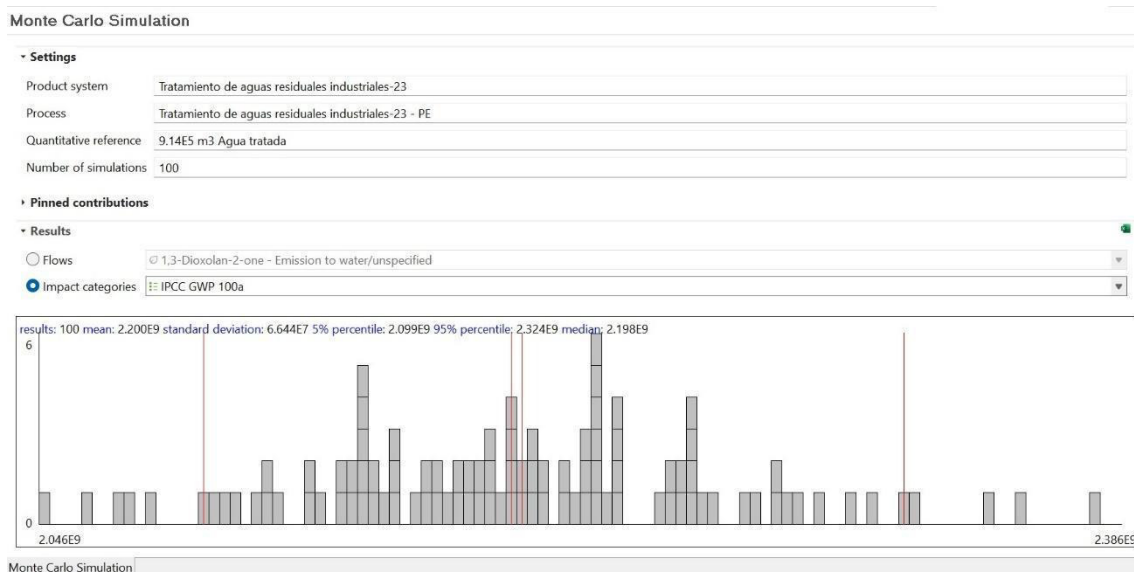
### Resultados de la simulación de Montecarlo de la categoría Impacto sobre los recursos abióticos (combustibles fósiles)



Fuente: Elaboración propia a partir del modelamiento en el Software OpenLCA 2.0.0.

## i) Calentamiento global (método IPCC)

### Resultados de la simulación de Montecarlo de la categoría Calentamiento global 2023 (IPCC)



Fuente: Elaboración propia a partir del modelamiento en el Software OpenLCA 2.0.0.