



## ARTÍCULO ORIGINAL

## Evaluación del impacto ambiental al emplear CO<sub>2</sub> generado por fuentes fijas en sustitución del H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> para neutralizar aguas residuales textiles

Evaluation of the environmental impact of using CO<sub>2</sub> generated by fixed sources to replace H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> to neutralize textile wastewater

• Mercedes, Arbona <sup>1</sup> • Isabel, Cabrera <sup>2</sup> • José, Fabelo <sup>3</sup> • Elena, Rosa <sup>4</sup> • Zuidery, Macias <sup>5</sup>

<sup>1</sup> Universidad Central Marta Abreu de las Villas, Santa Clara, Cuba

Correo electrónico: [marbona@uclv.cu](mailto:marbona@uclv.cu)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1096-7648>

<sup>2</sup> Universidad Central Marta Abreu de las Villas, Santa Clara, Cuba.

Correo electrónico: [icabrera@uclv.edu.cu](mailto:icabrera@uclv.edu.cu)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5307-1502>

<sup>3</sup> Universidad Central Marta Abreu de las Villas, Santa Clara, Cuba

Correo electrónico: [fabelo@uclv.edu.cu](mailto:fabelo@uclv.edu.cu)

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2144-6701>

<sup>4</sup> Universidad Central Marta Abreu de las Villas, Santa Clara, Cuba.

Correo electrónico: [erosa@uclv.edu.cu](mailto:erosa@uclv.edu.cu)

ORCID: <https://orcid.org/0000E-0002-5371-0976>

<sup>5</sup> Oficina Nacional de Administración Tributaria, Santa Clara, Cuba.

Correo electrónico: [zuidery@nauta.cu](mailto:zuidery@nauta.cu)

ORCID: <http://orcid.org/0009-0003-9167-4325>

**Recibido:** 19 Julio del 2024 / **Revisado:** 26 Julio del 2024 / **Aprobado:** 28 julio del 2024 / **Publicado:** 28 de agosto del 2024

### RESUMEN

El clima a nivel mundial está cambiando debido a las emisiones de gases de efecto invernadero. El CO<sub>2</sub> proveniente de las fuentes fijas en los procesos vinculados a la textilera “Desembarco del Granma” impacta negativamente sobre la industria y su comunidad aledaña. Para mitigar el impacto de este gas se propone su uso en la neutralización de aguas residuales. El objetivo de este trabajo es evaluar el impacto ambiental que provoca el empleo del CO<sub>2</sub> generado por las fuentes fijas en la sustitución del ácido sulfúrico para neutralizar aguas residuales textiles. Se empleó el software Sima Pro 9.0.0.49. La unidad funcional fue el tratamiento de 60 m<sup>3</sup>/h de agua residual. Los límites del sistema fueron los que enmarcan las dos fuentes fijas de emisiones de gases (generador de vapor y calentador de aceite) y la primera sección de la planta de tratamiento de residuales líquidos que comprende hasta la neutralización. Para cuantificar las cantidades de CO<sub>2</sub> y ácido sulfúrico se usaron balances de masa. La huella del carbono es 5113,96 kg de CO<sub>2</sub> equivalente para el proceso actual y 1112,82 kg de CO<sub>2</sub> equivalente cuando el CO<sub>2</sub> se usa para sustituir el H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> en el proceso de neutralización, lo que representa una disminución del 78,24 %. Se demuestra la factibilidad ambiental de la sustitución del ácido sulfúrico por el CO<sub>2</sub> ya que habrá una disminución de 69,1 puntos para el proceso total en cuanto a las categorías de daño y de 4001,14 kg de CO<sub>2</sub> equivalente.

**Palabras claves:** Cambio climático; dióxido de carbono; neutralización.

### ABSTRACT

The global climate is changing due to greenhouse gas emissions. The CO<sub>2</sub> from fixed sources in the processes linked to the “Desembarco del Granma” textile factory negatively impacts the industry and its surrounding community. To mitigate the impact of this gas, its use in the neutralization of wastewater is proposed. The objective of this work is to evaluate the environmental impact caused by the use of CO<sub>2</sub> generated by fixed sources in the replacement of sulfuric acid to neutralize textile wastewater. Sima Pro 9.0.0.49 software was implemented. The functional unit was the treatment of 60 m<sup>3</sup>/h of wastewater. The limits of the system were those that frame the two fixed sources of gas emissions (steam generator and oil heater) and the first section of the waste liquid treatment plant that includes

neutralization. To quantify the amounts of CO<sub>2</sub> and sulfuric acid, mass balances were used. The carbon footprint is 5,113.96 kg CO<sub>2</sub> equivalent for the current process and 1,112.82 kg CO<sub>2</sub> equivalent when CO<sub>2</sub> is used to replace H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> in the neutralization process, representing a 78,24 % decrease. The environmental feasibility of replacing sulfuric acid with CO<sub>2</sub> is demonstrated since there will be a decrease of 69,1 points for the total process in terms of damage categories and 4001,14 kg of CO<sub>2</sub> equivalent.

**Keywords:** Climate change; carbon dioxide; neutralization.

## 1. INTRODUCCIÓN

Los principales mecanismos de contaminación atmosférica son los procesos industriales que implican la combustión, tanto en industrias como en automóviles y calefacciones residenciales, que generan dióxido y monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno y azufre, entre otros contaminantes. La contaminación atmosférica puede tener carácter local, cuando los efectos ligados al foco se sufren en las inmediaciones del mismo, o planetario, cuando por las características del contaminante, se ve afectado el equilibrio del planeta y zonas alejadas a las que contienen los focos emisores. Los gases de escape generados en los procesos de combustión se denominan gases de combustión. Su composición depende del tipo de combustible y de las condiciones de combustión. Muchos de los componentes de los gases de combustión son contaminantes del aire.

El mundo industrializado ha conseguido que la concentración de los gases de efecto invernadero haya aumentado desde el siglo pasado, (López, 2013). Un mecanismo clave para mitigar dicho impacto es reducir considerablemente las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera, (Liu, 2021). El cambio climático global genera un gran interés en las tecnologías relevantes para la captura de CO<sub>2</sub>. Este gas es incoloro e insípido y se genera en todos los procesos de combustión y durante la respiración. Debido a su propiedad de filtrar el calor radiante, es una contribución importante al efecto invernadero. En Cuba existe un Plan del Estado para el enfrentamiento al cambio climático, conocido como Tarea Vida.

En la textilera “Desembarco del Granma” existe una planta de tratamiento de residuales líquidos que consta de etapas físicas, químicas y biológicas. En la etapa química se neutralizan las aguas alcalinas provenientes de los procesos tecnológicos principales. En estos momentos se emplea como agente neutralizante el ácido sulfúrico, pero el mismo es corrosivo y puede producir graves quemaduras en los ojos, la piel e irritar las mucosas. En contacto con productos orgánicos los deshidrata y carboniza, llegando en ocasiones a incinerarlos. Es considerado un agente tóxico para la vida acuática. En el suelo puede disolver algunos minerales, deteriorando las características de este, (Uibu y col., 2014). Teniendo en cuenta las características del H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> se valora su sustitución por CO<sub>2</sub> para neutralizar las aguas residuales alcalinas de la textilera. Al

emplear el CO<sub>2</sub>, emitido por los procesos de combustión del generador de vapor y el calentador de aceite (fuentes fijas) de la textilera “Desembarco del Granma”, en la neutralización de las aguas residuales se mejorará la calidad de las mismas y a su vez estas aguas tratadas podrán retornar a los procesos tecnológicos principales, dando muestras de la economía circular en la industria considerada en esta investigación.

Dentro de las necesidades de ajuste del pH, es posible encontrarse con aguas con pH muy elevados. Por ejemplo, aguas residuales con valores entre 9 y 13, debido a un alto contenido en iones (OH<sup>-</sup>). El CO<sub>2</sub> reúne los requisitos necesarios para justificar su empleo en la neutralización de las aguas residuales. En la neutralización con CO<sub>2</sub> es una forma sostenible de reducir el pH del agua, ya que no solamente evita la formación de sales residuales como cloruros o sulfatos, sino que contribuye a que el CO<sub>2</sub> quede fijado en el agua en forma de bicarbonatos, evitando así su emisión a la atmósfera, (Pallé, 2018, Schulz y col., 2006). En la mayoría de los casos, los causantes de estos niveles son los hidróxidos de sodio y de calcio. Cuando esto sucede, al usar CO<sub>2</sub> en lugar de otros ácidos minerales, este reacciona directamente con el hidróxido correspondiente formando primero carbonatos y a continuación bicarbonatos, logrando reducciones de pH, (Pichler y col., 2020).

La huella de carbono se puede definir como el conjunto de emisiones de gases de efecto invernadero producidas, directa o indirectamente, por personas, organizaciones, productos, eventos o regiones geográficas, en términos de CO<sub>2</sub> equivalentes. Es una herramienta muy útil de gestión para conocer las conductas o acciones que están contribuyendo a aumentar las emisiones, cómo se pueden mejorar los recursos y hacer un uso más eficiente de ellos. La huella de carbono surge como una medida de cuantificar y generar un indicador del impacto que una actividad o proceso tiene sobre el cambio climático, más allá de los grandes emisores, (Salas y Condorhuaman, 2009, Shahabadi y col., 2010). La huella de carbono es un indicador ambiental que refleja la cantidad de gases de efecto invernadero (GEI), expresada como CO<sub>2</sub> equivalente, que es emitida directa o indirectamente como consecuencia de una actividad determinada. Aunque es habitual

enfocarse en el CO<sub>2</sub>, no debe olvidarse que existen otros gases que también provocan el efecto invernadero, como son el CH<sub>4</sub> o el N<sub>2</sub>O. Para tener en cuenta la contribución de cada gas, existe un parámetro denominado Potencial de Calentamiento Global o GWP, (del inglés, Global Warming Potential) que compara el poder de calentamiento de una masa de ese gas de efecto invernadero con el poder de calentamiento de la misma masa de CO<sub>2</sub>, para así poder

expresar el efecto conjunto de estos gases en la misma base de medida, denominada CO<sub>2</sub> equivalente (CO<sub>2</sub> e), (Espíndola y Valderrama, 2012, Sosa y Bolufé, 2019).

El objetivo de este trabajo es evaluar el impacto ambiental que provoca el empleo del CO<sub>2</sub> generado por las fuentes fijas en la sustitución del ácido sulfúrico para neutralizar aguas residuales textiles.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Para evaluar el impacto de determinados productos en el medio ambiente, el instrumento elegido puede ser el Análisis del Ciclo de Vida (ACV). Esta metodología estandarizada y con fundamentación científica constituye cada vez más la base de los procesos de desarrollo,

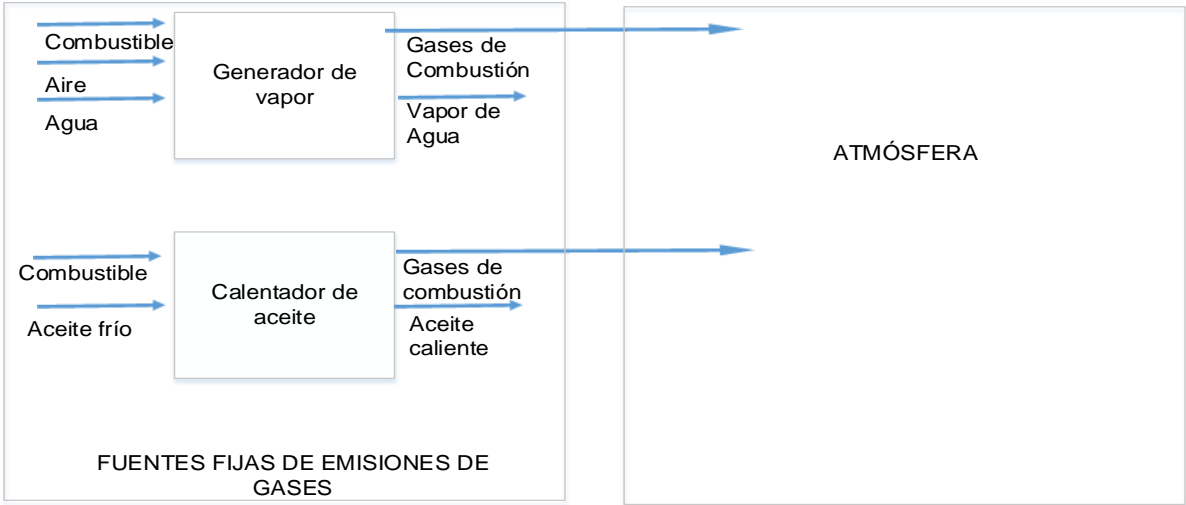
relacionados con el comportamiento medioambiental. Los ACV también desempeñan un papel importante en el contexto normativo. Para esta investigación se usó la metodología del ACV.

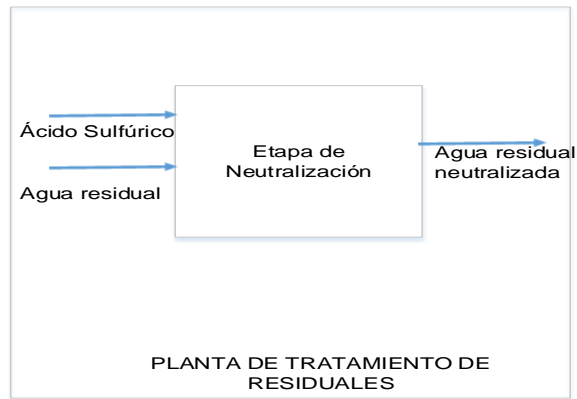
2.1. Definición del objetivo, alcance del estudio y análisis de inventarios

La unidad funcional fue el tratamiento de 60 m<sup>3</sup>/h de agua residual. Los límites del sistema son los que enmarcan las dos fuentes fijas de emisiones de gases (generador de vapor y calentador de aceite) y la primera sección de la planta de tratamiento de residuales líquidos que comprende hasta la neutralización. El escenario 1 se refiere a la situación actual donde todos los gases emitidos por las fuentes fijas son expulsados a la atmósfera y el agua residual se neutraliza con ácido sulfúrico y el escenario 2 considera que el dióxido de carbono es separado de las emisiones gaseosas y se emplea en la neutralización del agua residual en sustitución del ácido sulfúrico.

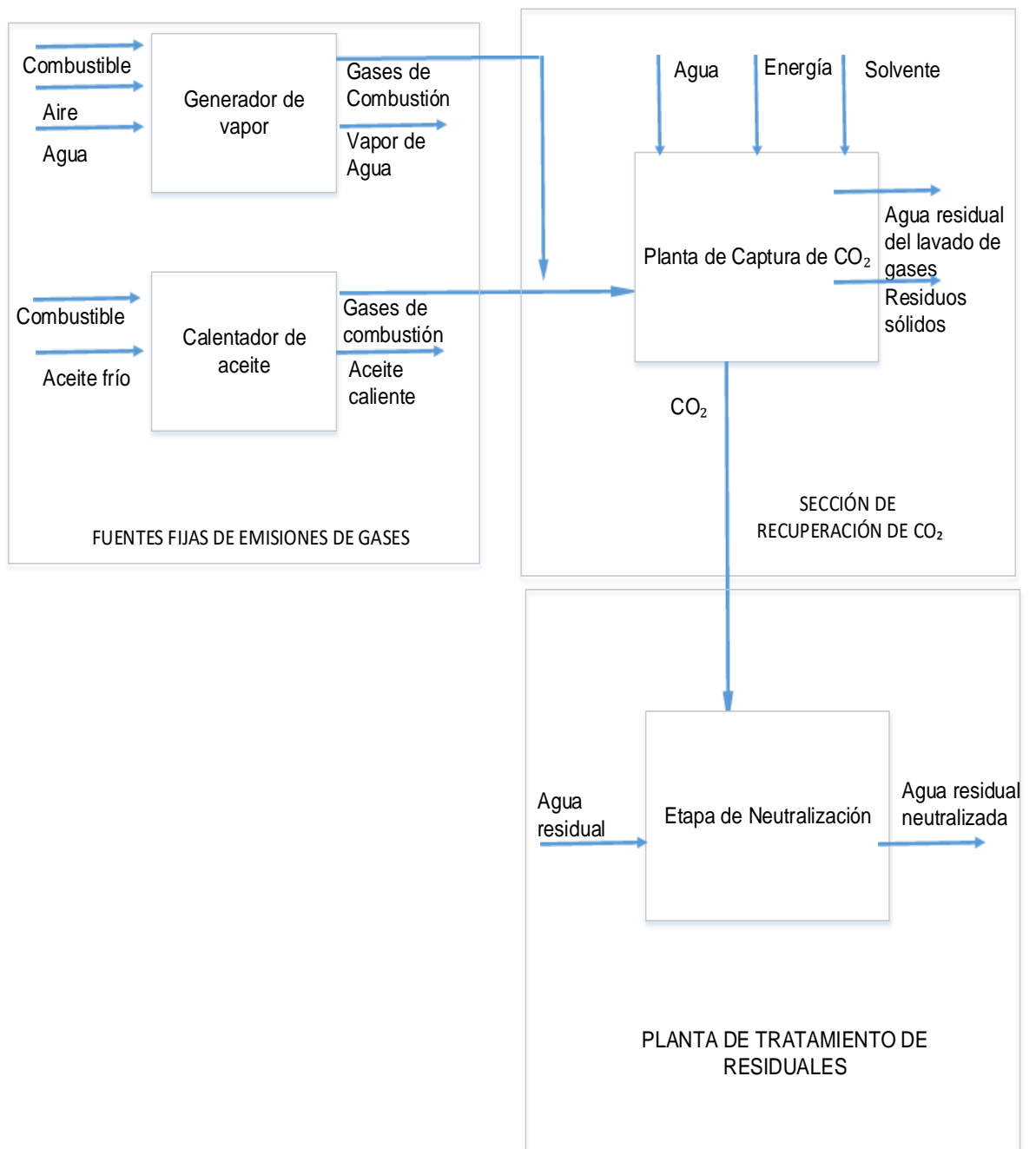
En las figuras 1 y 2 se representan los diagramas de límites del sistema para los escenarios 1 y 2. Para realizar los inventarios se tuvieron en cuenta los balances de masa y energía a partir de los consumos históricos de la textilera y la información aportada por especialistas de la entidad, así como las mediciones experimentales de los gases emitidos por las fuentes fijas, (Arbona, 2020). Dichas mediciones experimentales se realizaron con el equipo GASBOARD-3800P, que es un analizador portátil de gases de combustión. El instrumento puede usarse en variedad de lugares donde existan chimeneas de generadores de vapor, calentadores de aceite y otras fuentes estacionarias de contaminación.

Figura 1  
Diagrama de límites del sistema para el escenario1 (actual)





**Figura 2**  
*Diagrama de límites del sistema para el escenario 2 (propuesto)*



## 2.2. Método usado para la evaluación del impacto Ambiental

Se empleó el software Sima Pro 9.0.0.49 para evaluar el impacto ambiental que provoca la sustitución del ácido sulfúrico por el dióxido de carbono en el proceso de neutralización de las aguas residuales de la textilera que se evidencia a través de la

reacción:  $CO_2 + 2NaOH \rightarrow Na_2CO_3 + H_2O$ , teniendo en cuenta que el agua residual contiene NaOH debido a los procesos de blanqueo y mercerizado. Como metodología utilizada se consideró la referida por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.

## 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la tabla 1 se muestra el inventario necesario para el cálculo de la huella del carbono a través del Sima Pr

**Tabla 1**

*Inventario utilizado para la evaluación del impacto ambiental del empleo del CO<sub>2</sub> para la neutralización de las aguas residuales de la textilera “Desembarco del Granma”*

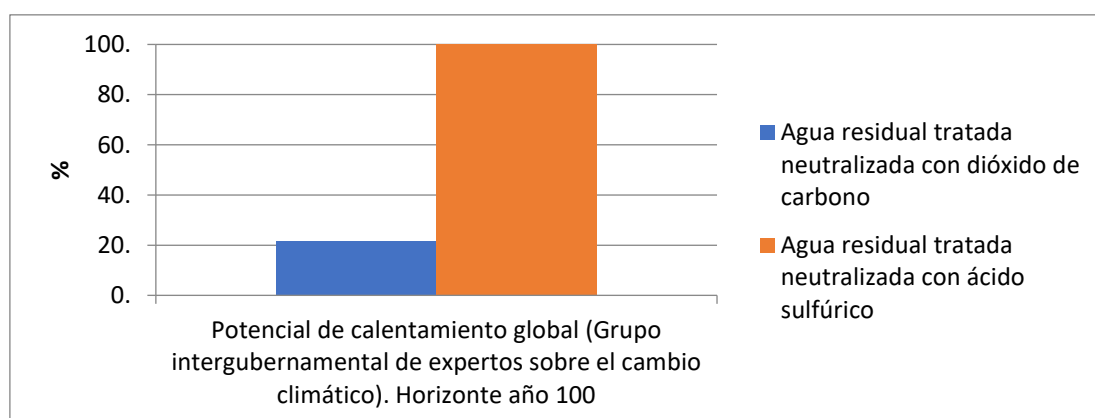
Escenario 1		Escenario 2	
Entradas		Entradas	
masa de combustible (kg/h)	1 680	masa de combustible (kg/h)	1 680
aire (m <sup>3</sup> /h)	270	aire (m <sup>3</sup> /h)	270
agua de alimentación a la caldera (kg/h)	23 000	agua de alimentación a la caldera (kg/h)	23 000
ácido sulfúrico (kg/h)	1,11	CO <sub>2</sub> (kg/h)	3 630,64
agua residual (m <sup>3</sup> /h)	60	agua residual (m <sup>3</sup> /h)	60
Salidas		Salidas	
vapor (kg/h)	20 700	vapor (kg/h)	20 700
C (kg/h)	94,12	C (kg/h)	94,12
O <sub>2</sub> (kg/h)	2 256,73	O <sub>2</sub> (kg/h)	2 256,73
N <sub>2</sub> (kg/h)	16 902,87	N <sub>2</sub> (kg/h)	16 902,87
CO <sub>2</sub> (kg/h)	4 483,28	CO <sub>2</sub> (kg/h)	852,64

En la figura 3 se realiza una comparación del impacto de ambos escenarios en el calentamiento global. La huella del carbono es 5 113,96 kg de CO<sub>2</sub> equivalente para el proceso actual donde el CO<sub>2</sub> generado en las fuentes fijas es expulsado a

la atmósfera y 1 112,82 kg de CO<sub>2</sub> equivalente cuando el CO<sub>2</sub> se usa para sustituir el ácido sulfúrico en el proceso de neutralización, lo que representa una disminución del 78,24 %.

**Figura 3**

*Comparación de la cantidad de CO<sub>2</sub> equivalente antes y después de la sustitución del ácido sulfúrico*

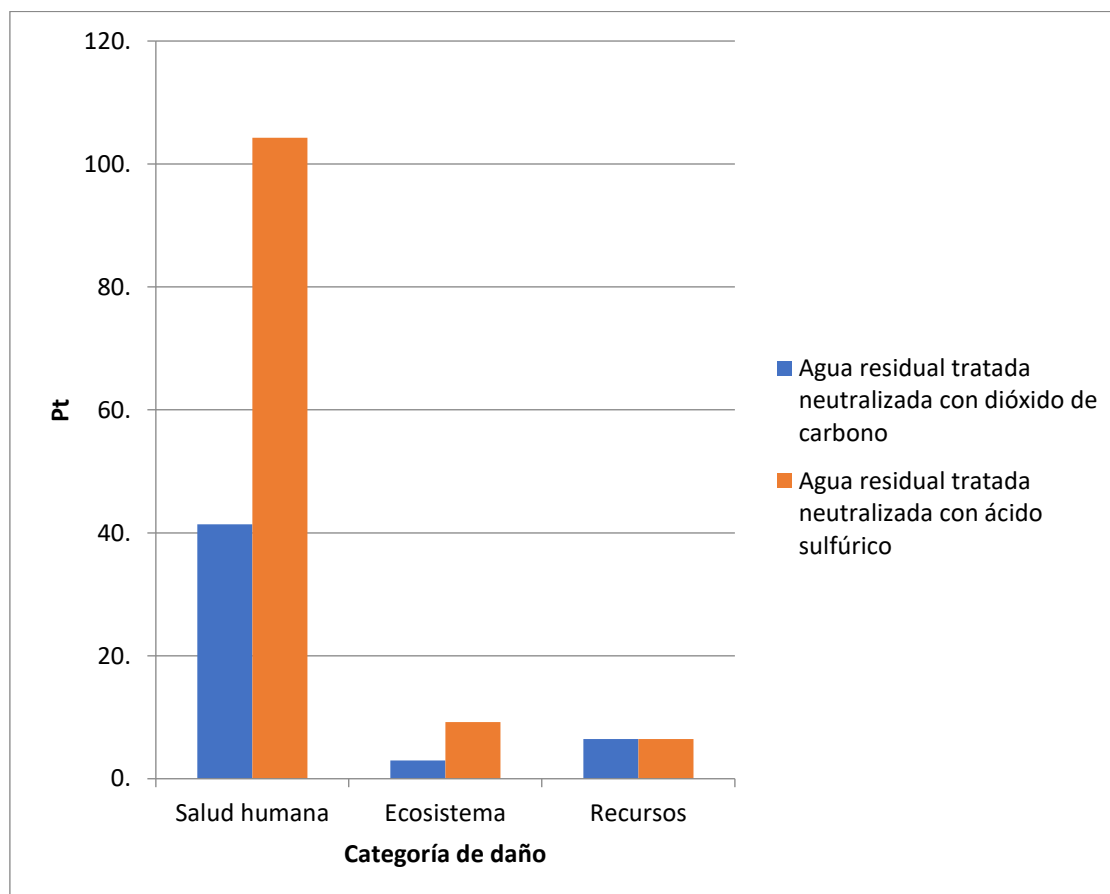


En la figura 4 se relacionan los puntos y las categorías de daño. El punto representa la centésima parte de la carga ambiental anual de un ciudadano europeo. Si se comparan las tres categorías de daños, la salud humana resulta la más beneficiada (cuando se pongan en práctica los resultados de esta investigación) ya que se logra una mejora ambiental que repercute en una

disminución de 62,8 puntos de la afectación a esta categoría. También los daños al ecosistema se mitigarán en 6,27 puntos. Sin embargo, el impacto sobre los recursos solo disminuye en 0,005 puntos pues en ambos escenarios ocurren procesos de combustión donde el combustible empleado es fuel.

**Figura 4**

*Comparación en categorías de daños del proceso de neutralización de aguas residuales antes y después de la sustitución del ácido sulfúrico por CO<sub>2</sub> (Método: ReCiPe Endpoint)*

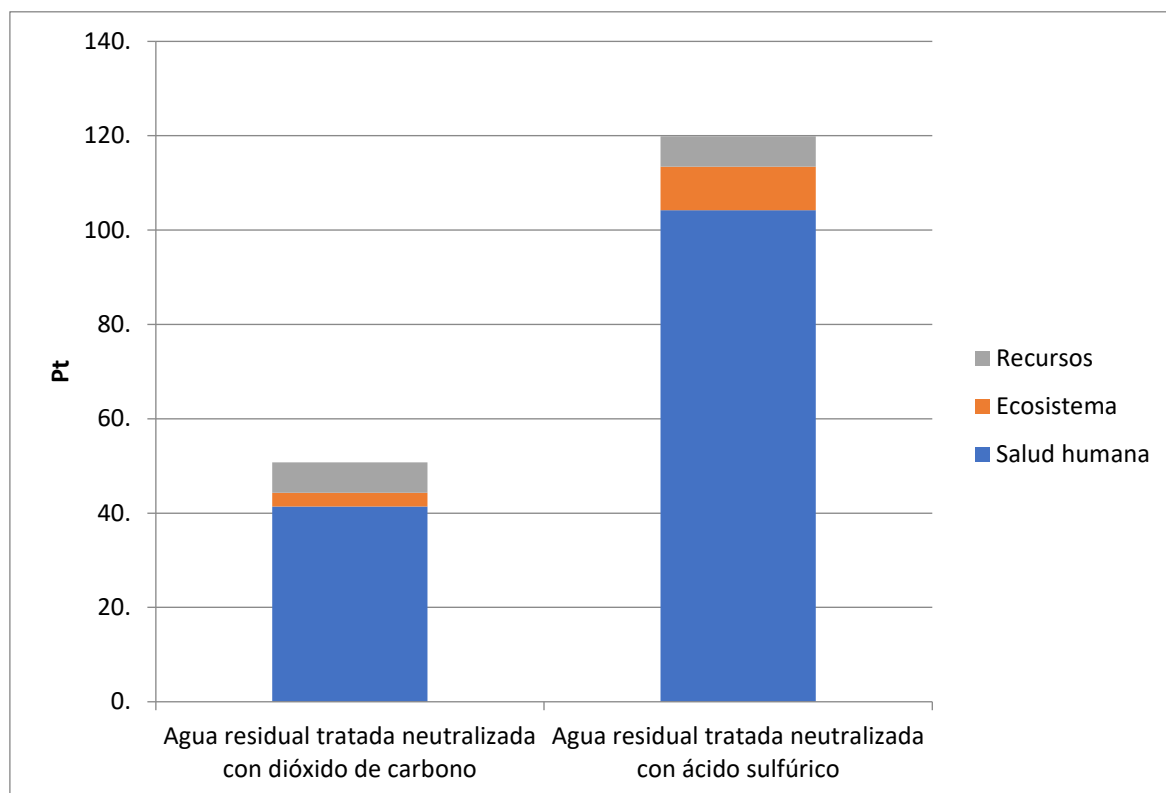


En la figura 5 se representa la contribución total que ejerce el cambio de ácido sulfúrico por dióxido de carbono en el proceso de neutralización. Se observa una disminución de 69,12 Pt, lo cual demuestra la factibilidad ambiental de la sustitución del ácido. En la investigación se corroboró que existe una mayor repercusión beneficiosa en las categorías de impacto: cambio climático y salud humana, además en ecosistema terrestre, motivado por la reducción de la presencia de CO<sub>2</sub> en el entorno de la industria analizada, así como la disminución de la concentración del gas en la atmósfera terrestre.

Los daños a la salud humana, debidos al cambio climático, el aumento en el riesgo de enfermedades (desnutrición, malaria y diarrea) y el aumento del riesgo de inundaciones provocará daños adicionales a la salud humana en Años de Vida Ajustados por Discapacidad (AVAD). No todas las regiones del mundo son afectadas en igual medida por todos estos efectos. Para el ecosistema la influencia del aumento de la temperatura global en los ríos trae aparejado la desaparición de especies como los peces y otros animales acuáticos.

**Figura 5**

*Comparación en puntuación única del proceso de neutralización de aguas residuales antes y después de la sustitución del ácido sulfúrico por CO<sub>2</sub> (Método: ReCiPe Endpoint)*



#### 4. CONCLUSIÓN

Se demostró la factibilidad ambiental de la sustitución del ácido sulfúrico por el CO<sub>2</sub>. La huella del carbono resultó de 5 113,96 kg para el proceso actual y 1 112,82 kg de CO<sub>2</sub> equivalente para el propuesto lo que significa que la emisión total de gases de efecto invernadero es menor en 78,24 % en el proceso propuesto. Hubo una

disminución de 69,1 puntos para el proceso total en cuanto a las categorías de daño, resultando a la salud humana la más beneficiada ya que se logró una mejora ambiental que repercute en una disminución de 62,8 puntos de la afectación a esta categoría.

#### 5. REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

- Arbona, M., Cabrera, I., Morales, M., y García, M. (2020). Determinación de propuesta tecnológica para reducir el impacto del material particulado generado en la textilera “Desembarco del Granma”. Centro Azúcar, 47(3), (pp. 58-69), <http://scielo.sld.cu/pdf/caz/v47n3/2223-4861-caz-47-03-58.pdf>
- Espíndola, C. y Valderrama, J. (2012). Huella del Carbono. Parte 1: Conceptos, Métodos de Estimación y Complejidades Metodológicas. Información Tecnológica, 23(1), (pp. 163-176).
- Liu, Q., Wu, L., Jackstell, R., y Beller, M. (2015). Using carbon dioxide as a building block in organic synthesis. Nature Communications, 6, (pp. 1-15), <https://www.nature.com/articles/ncomms6933>
- López, A. (2013). Absorción de dióxido de carbono, a elevadas presiones parciales, por disoluciones acuosas de mezclas binarias de alcanolaminas. (Tesis doctoral), Universidad de Jaén, <https://ruja.ujaen.es/bitstream/10953/545/1/9788484398424.pdf>
- Pallé, C. (2018). El dióxido de carbono como forma sostenible de reducir el pH del agua. Tecnoagua, 34, (pp 84-88).

- Pichler, T., Stoppacher, B., Kaufmann, A., Siebenhofer, M. y Kienberger, M. (2020). Continuous Neutralization of NaOH Solution with CO<sub>2</sub> in an Internal-Loop Airlift Reactor. *Chemical Engineering Technology*, 44(1), (pp. 38-47).
- Salas, G. y Condorhuaman, C. (2009). Huella de Carbono en la Industria Textil. *Revista Peruana de Química e Ingeniería Química*, 12(2), (pp. 25-28).
- Schulz, K., Riebesell, U., Rost, B., Thoms, S. y Zeebe, R. (2006). Determination of the rate constants for the carbon dioxide to bicarbonate inter-conversion in pH-buffered seawater systems. *Marine Chemistry*, 100, (pp. 53-65).
- Sosa, C. y Bolufé, J. (2019). Inventario Nacional de Gases de Efecto de Invernadero. Serie Entendiendo el Cambio Climático.
- Shahabadi, M., Yerushalmi, L. y Haghighat, F. (2010). Estimation of greenhouse gas generation in wastewater treatment plants – Model development and application. *Chemosphere*, 78, (pp. 1085–1092).
- Uibu, M., Velts, O., Trikkel, A. y Kuusik, R. (2014). Reduction of CO<sub>2</sub> emissions by carbonation of alkaline wastewater. *Air Pollution*, XVI, (pp. 311-320)..