



Estrategia para Reducir la Huella de Carbono en la Empresa PLANETA S.A.S E.S.P

Aníbal José Perna González

Yohan Roberto Gaviria Montañez

Universidad EAN

Facultad de Ingeniería

Maestría en Gerencia de Proyectos

Bogotá D.C, Colombia

17/Septiembre/2025

Estrategia para Reducir la Huella de Carbono en la Empresa PLANETA S.A.S E.S.P

Aníbal José Perna González

Yohan Roberto Gaviria Montañez

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de:

Magister en Gerencia de Proyectos

Directora:

Elizabeth León Velásquez, PhD

Modalidad:

Trabajo Dirigido

Universidad EAN

Facultad de Ingeniería

Maestría en Gerencia de Proyectos

Bogotá D.C, Colombia

17/Septiembre/2025

Nota de aceptación:

Firma del jurado

Firma del jurado

Firma del director del trabajo de grado

Ciudad, día/mes/año

“Encontraré un camino, o lo haré.”

Aníbal Barca,

Estratega militar y general de Cartago.

Agradecimientos

A Dios, mi guía y fortaleza en cada etapa de mi vida. A mi mamá, Yolanda, por su amor sin límites y su apoyo incondicional; eres la razón de cada uno de mis éxitos. A mi papá, José Manuel, por ser mi ejemplo a seguir y por cada una de sus enseñanzas. A mis hermanos, por ser mi refugio y mi apoyo incondicional, a la empresa PLANETA S.A.S E.S.P, y a la familia EAN por abrirme sus puertas y acompañarme en este proceso.

Aníbal José Perna González

A Dios por el don de la vida; a mi esposa por su apoyo constante; a la compañía PLANETA S.A.S E.S.P, por la oportunidad brindada; y a mi compañero de tesis por el compromiso y dedicación para la culminación exitosa de este proyecto.

Yohan Roberto Gaviria Montañez

Resumen

Este trabajo diseña una estrategia para reducir la huella de carbono del proceso de tratamiento de aguas residuales en PLANETA S.A.S E.S.P, en el marco de la gerencia de proyectos sostenibles y bajo los lineamientos del GHG Protocol [enfoque de control operacional]. El diagnóstico de referencia para 2024, calculado con base en la información procesada en Dcycle, estima ≈ 586 tCO₂eq, de los cuales el consumo de diésel en 19 vehículos representa cerca del 92% de las emisiones. La metodología combina el análisis técnico de los Alcances 1 y 2; un índice multicriterio para priorización de la flota; la construcción de una curva de costo marginal de abatimiento [MACC] para ordenar inversiones; un diagnóstico organizacional basado en el modelo EFQM; el diseño de un protocolo de seguimiento con indicadores clave y semaforización; y la validación por juicio experto mediante el coeficiente V de Aiken.

La estrategia se estructura en dos pilares: A1, recambio escalonado de vehículos en el top-5 de criticidad; y A2, autogeneración fotovoltaica on-grid. Los resultados proyectan una reducción acumulada de aproximadamente $-10,8\%$ respecto a 2024 hacia 2030 con el portafolio A1+A2, además de una recuperación de la inversión en $\approx 2,4$ años para el proyecto fotovoltaico. En conclusión, la intervención es técnica y financieramente viable, focaliza las fuentes materiales de emisión y ofrece una ruta escalable de mitigación con seguimiento institucionalizado.

Palabras clave: Huella de carbono; Planta de tratamiento de aguas residuales [PTAR]; Gestión de proyectos sostenibles; GHG Protocol; Curva de costo marginal de abatimiento [MACC]; Energía fotovoltaica; Índice compuesto de eficiencia relativa [ICEr].

Abstract

This work designs a strategy to reduce the carbon footprint of the wastewater treatment process at PLANETA S.A.S E.S.P, within the framework of sustainable project management and under the guidelines of the GHG Protocol [operational control approach]. The baseline diagnosis for 2024, calculated based on information processed in Dcycle, estimates ≈ 586 tCO₂eq, of which diesel consumption from 19 vehicles accounts for nearly 92% of total emissions. The methodology combines the technical analysis of Scopes 1 and 2; a multicriteria index for fleet prioritization; the construction of a Marginal Abatement Cost Curve [MACC] to order investments; an organizational diagnosis based on the EFQM model; the design of a monitoring protocol with key performance indicators and traffic-light coding; and expert judgment validation through Aiken's V coefficient.

The strategy is structured around two pillars: A1, the phased replacement of the top five critical vehicles; and A2, on-grid photovoltaic self-generation. Projected results include an accumulated reduction of approximately -10.8% compared to 2024 by 2030 through the A1+A2 portfolio, along with an estimated payback period of ≈ 2.4 years for the photovoltaic project. In conclusion, the intervention is both technically and financially feasible, focuses on the material sources of emissions, and provides a scalable mitigation pathway with institutionalized monitoring.

Keywords: Carbon footprint; Wastewater Treatment Plant [WWTP]; Sustainable project management; GHG Protocol; Marginal Abatement Cost Curve [MACC]; Solar photovoltaics; Composite Relative Efficiency Index [ICE^r].

Tabla de contenido

Lista de Figuras.....	13
Lista de Tablas.....	14
1. Introducción.....	16
2. Objetivos.....	19
2.1 Objetivo general	19
2.2 Objetivos específicos	19
3. Justificación	20
4. Alcance de la Investigación	22
5. Marco institucional.	24
5.1. Presentación de la empresa.	24
5.2. Referentes estratégicos	24
5.3. Estructura organizacional.	25
5.4. Servicios ofertados	27
5.5. Análisis del sector	29
5.5.1. Tratamiento de aguas residuales.....	29
5.5.2. Tratamiento de residuos orgánicos y valoración de lodos.....	31
6. Marco de Referencia	34
6.1 Contexto del cambio climático y compromisos para la reducción de emisiones de carbono	34
6.2 Emisiones de gases de efecto invernadero [GEI].....	37
6.3 Impacto de las plantas de tratamiento de aguas residuales en las emisiones de GEI.....	39

6.4 Enfoques globales para la medición de la huella de carbono.....	41
6.5 Factores que influyen en la huella de carbono de las PTARs.....	43
6.5.1 Variables Criticas	43
6.5.2 Factores adicionales	44
6.6 Estrategias de mitigación: Buenas prácticas para reducir la huella de carbono en las PTAR	44
6.7 Mecanismos de compensación de emisiones.	46
6.8 El rol dual de las PTAR y las tipologías de emisiones de GEI asociadas	46
6.9 Metodologías de medición de la huella de carbono en PTAR con afluentes orgánicos	47
6.10 Gestión de Proyectos Sostenibles para la Reducción de la Huella de Carbono.....	50
6.11 Factores organizacionales que impulsan estrategias sostenibles basadas en proyectos	51
6.12 Selección y Priorización de Proyectos en Función de Objetivos de Reducción de Emisiones	53
7. Diseño Metodológico	55
7.1. Tipo de Investigación	56
7.2. Análisis externo	58
7.3. Análisis interno	58
7.4. Población, muestra y ficha técnica	61
7.5. Identificación de las variables del diagnóstico organizacional	62
7.6. Instrumento de diagnóstico organizacional	64
7.7. Validación del instrumento de diagnóstico organizacional	66
7.8. Variables e instrumento para el análisis de emisiones.....	66
8. Diagnóstico Organizacional	70

8.1. Análisis externo	70
8.2. Análisis interno: Huella de carbono	72
8.2.1. Contraste de la huella de carbono corporativa [2022 vs. 2024]	72
8.2.2. Transparencia del inventario: Exclusiones y medidas de mitigación	77
8.2.3. Emisiones de alcance 1 por consumo de combustible	79
8.2.3. Concentración de emisiones por vehículo según el principio de Pareto	80
8.2.4. Propósito del Índice Compuesto de Eficiencia Relativa [ICE ^r]	82
8.2.5. Segmentación operativa de la flota	82
8.2.6. Indicadores que componen el ICE ^r	83
8.2.7. Normalización estadística: Z-score y transformación de Blom	87
8.2.8. Índice compuesto de eficiencia relativa: Diseño y criterios de priorización	91
8.2.9. Costo marginal de las emisiones de alcance 1	95
8.2.10. Emisiones de alcance 2 por consumo de energía eléctrica	96
8.2.11. Análisis descriptivo y medidas de variabilidad	97
8.2.12. Análisis estadístico y detección de valores atípicos	99
8.2.13. Indicadores de intensidad operativa de la línea base 2024	102
8.2.14. Análisis de la relación costo-emisiones	103
8.2.15. Estimación del ahorro potencial por tonelada de CO ₂ eq evitada	103
8.3 Análisis interno: Nivel disposición y preparación organizacional	105
8.3.1. Resultados de la validación del instrumento de diagnóstico	106
8.3.2. Fiabilidad del instrumento [α de Cronbach]	108
8.3.3. Resultados por dimensión	109
8.3.4. Síntesis global del nivel de preparación organizacional	113
9. Plan de Intervención: Estrategia y despliegue operacional	114
9.1. Marco estratégico de intervención	114

9.1.1. Propósito general:	115
9.1.2. Meta funcional:	115
9.1.3 Alineación con estrategias de orden superior:	115
9.1.4. Priorización del portafolio mediante Curva de Costo Marginal de Abatimiento [MACC]	116
9.2. Despliegue Operacional de la Estrategia	121
9.2.1. Hoja de ruta estratégica para el recambio progresivo de la flota crítica [A1]	122
9.2.2. Precisiones sobre las unidades móviles con menor criticidad.....	125
9.2.3. Descripción general del proyecto de autogeneración fotovoltaica [A2]	125
9.2.4. Alcances del proyecto	126
9.2.5. Especificaciones técnicas del proyecto.....	126
9.2.6. Línea base de tiempo del proyecto	127
9.2.7. Línea base de costo del proyecto	128
9.2.8. Incorporación de beneficios tributarios y certificaciones técnicas	129
9.2.9. Horizonte e hitos intermedios de reducción	132
9.2.10. Reconocimiento de incertidumbre sobre precios y factores externos.....	132
9.2.11. Análisis de riesgos del portafolio de mitigación	133
9.3. Seguimiento, control y validación de la propuesta estratégica de mitigación	134
9.3.1. Protocolo de seguimiento y evaluación de la estrategia de mitigación	134
9.3.2. Indicadores de seguimiento y método de cálculo	135
9.3.3. Metas anuales y criterio de semaforización	136
9.3.4. Ritmo de seguimiento y entregables	137

9.3.5. Roles y responsabilidades.....	138
9.3.6. Reglas de gestión de desvíos	139
9.3.7. Validación de la viabilidad de la estrategia y del protocolo de seguimiento.....	139
10. Conclusiones	143
11. Recomendaciones	145
12. Referencias	147
13. Anexos	168

Lista de Figuras

Figura 1	26
Figura 2	28
Figura 3	28
Figura 4	35
Figura 5	55
Figura 6	59
Figura 7	74
Figura 8	81
Figura 9	86
Figura 10	90
Figura 11	94
Figura 12	95
Figura 13	99
Figura 14	101
Figura 15	104
Figura 16	110
Figura 17	112
Figura 18	120
Figura 19	123
Figura 20	124
Figura 21	127
Figura 22	128

Lista de Tablas

Tabla 1	27
Tabla 2	55
Tabla 3	62
Tabla 4	62
Tabla 5	64
Tabla 6	65
Tabla 7	67
Tabla 8	71
Tabla 9	73
Tabla 10	73
Tabla 11	75
Tabla 12	80
Tabla 13	83
Tabla 14	84
Tabla 15	85
Tabla 16	89
Tabla 17	92
Tabla 18	97
Tabla 19	98
Tabla 20	98
Tabla 21	102
Tabla 22	108
Tabla 23	109
Tabla 24	113
Tabla 25	119

Tabla 26 122

Tabla 27 132

Tabla 28 134

Tabla 29 135

Tabla 30 141

Tabla 31 168

1. Introducción

La creciente urgencia por reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) a nivel global ha convertido la gestión ambiental empresarial en una prioridad estratégica, alineada con los compromisos internacionales de sostenibilidad. En Colombia, estos compromisos se formalizaron mediante la ratificación del Acuerdo de París a través de la Ley 1844 de 2017, estableciendo como meta nacional limitar las emisiones a 169,44 millones de toneladas de CO₂ equivalente para el año 2030 (Gobierno de Colombia, 2021a, p. 19). En este marco, el sector de saneamiento ambiental —y en particular, las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR)— ha sido identificado como una fuente significativa de emisiones, debido a su elevado consumo energético, la utilización intensiva de productos químicos y la complejidad de los procesos involucrados en la gestión de lodos que involucran logística y alto consumo de combustibles fósiles (Maktabifard et al., 2019, pp. 2–3; Wang et al., 2023, p. 2). Investigaciones recientes evidencian que las PTAR pueden aportar entre el 3 % y el 4 % de las emisiones nacionales de GEI (Gobierno de Colombia, 2022, p. 91), lo cual refuerza la necesidad de formular estrategias de mitigación adaptadas a las realidades operativas de estas instalaciones.

PLANETA S.A.S E.S.P, empresa mediana especializada en la recolección, transporte y tratamiento de aguas residuales y residuos orgánicos no peligrosos, reconoce este desafío como una oportunidad para alinear sus operaciones con un modelo de gestión ambiental más eficiente. En 2022, sus operaciones generaron 792,59 toneladas de CO₂e, cifra que evidencia un impacto ambiental significativo (Progresar ESP, 2023, p. 22). Aunque la alta dirección ha manifestado compromiso con la sostenibilidad, la organización no cuenta aún con una estrategia estructurada para gestionar sus emisiones de carbono. Esta situación abre el camino para una intervención fundamentada en los principios de la gestión de proyectos sostenibles, orientada a identificar las principales fuentes de emisión asociadas al proceso de tratamiento de aguas residuales y formular una estrategia realista de reducción, priorizando aquellas fuentes con mayor impacto y capacidad de gestión directa por parte de la empresa. En este contexto, esta investigación se inscribe en el campo de la Gestión de Proyectos Sostenibles y se articula con la línea de investigación en Desarrollo Sostenible, en concordancia con los ejes temáticos promovidos por la Maestría en Gerencia de Proyectos.

En contextos internacionales, estudios como los de Bao et al. (2016, p. 6) y Wu et al. (2022, p. 5) han evidenciado que la medición de la huella de carbono en PTAR se enfrenta a limitaciones asociadas a la escasez de datos precisos y a la heterogeneidad tecnológica de los sistemas de tratamiento. De manera específica, se ha documentado que el consumo energético

representa una fracción relevante de las emisiones totales de estas instalaciones, pudiendo alcanzar entre el 38 % y el 50 % de su huella de carbono (Bao et al., 2016, p. 6). En consecuencia, la formulación de estrategias de mitigación efectivas requiere de enfoques adaptativos y fundamentados en metodologías reconocidas, como el GHG Protocol o la norma ISO 14064, que permitan cuantificar con rigor las emisiones y generar indicadores trazables y reproducibles (International Dynamic Advisors, 2020; World Resources Institute, 2004). Asimismo, experiencias exitosas en el sector resaltan el potencial de acciones como el aprovechamiento de biogás, la optimización del consumo energético y el uso eficiente de productos químicos, las cuales han demostrado reducir hasta un 30 % de las emisiones operativas en plantas similares (Noyola et al., 2016; SEDAPAL, 2014). Complementariamente, la integración progresiva de energías renovables —como la solar fotovoltaica o la eólica— se proyecta como una alternativa viable para disminuir la dependencia de fuentes convencionales y avanzar hacia una operación más limpia (Muller, 2020).

A la luz de estos antecedentes, la presente investigación plantea la siguiente pregunta: *¿En qué medida la adopción de una estrategia adaptada al contexto operativo de la empresa PLANETA S.A.S E.S.P puede contribuir a reducir la huella de carbono asociada al proceso de tratamiento de aguas residuales?*

Para responder este interrogante, será necesario identificar las fuentes prioritarias de emisión dentro del proceso de tratamiento y analizar las acciones técnicamente factibles para su mitigación bajo condiciones realistas.

En este contexto, el objetivo general de la investigación consiste en diseñar una estrategia para reducir la huella de carbono en el proceso de tratamiento de aguas residuales desarrollado por la empresa PLANETA S.A.S E.S.P, priorizando las fuentes de emisión bajo control operativo con mayor impacto ambiental y factibilidad de intervención.

Desde su enfoque metodológico, el estudio se organiza en una secuencia estructurada por fases interdependientes, que permiten materializar los objetivos específicos en acciones técnicas, analíticas y participativas. La primera fase corresponde al diagnóstico de las emisiones de GEI, a partir del análisis de datos empíricos relacionados con el consumo energético (facturación eléctrica) y de combustibles fósiles utilizados por la flota operativa, conforme a los registros disponibles de la empresa. Este diagnóstico permite identificar los puntos críticos dentro del proceso de tratamiento y establecer una línea base para la intervención. La segunda fase metodológica se enfoca en la formulación de una estrategia de mitigación construida a partir del análisis interno de la organización y del entorno externo bajo

el enfoque PESTEL, lo cual permite adaptar las acciones propuestas a la realidad operativa y estratégica de PLANETA S.A.S E.S.P. En la tercera fase, se diseña un plan de seguimiento que oriente la evaluación de la estrategia formulada, mediante lineamientos básicos de control, indicadores clave y mecanismos de mejora continua. Finalmente, se ejecuta una fase de validación participativa, que involucra el juicio experto y la retroalimentación de actores internos clave para valorar la viabilidad de la estrategia y su potencial de implementación como modelo escalable y alineado con los compromisos institucionales en sostenibilidad.

2. Objetivos

2.1 Objetivo general

Diseñar una estrategia para reducir la huella de carbono en el proceso de tratamiento de aguas residuales desarrollado en la empresa PLANETA S.A.S E.S.P.

2.2 Objetivos específicos

Diagnosticar las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas al proceso de tratamiento de aguas residuales de PLANETA S.A.S E.S.P, a partir del análisis de la información técnica disponible.

Proponer una estrategia para la reducción de la huella de carbono asociada al tratamiento de aguas residuales, considerando las particularidades operativas de la planta.

Diseñar un protocolo de seguimiento que facilite la evaluación periódica del grado de efectividad de la estrategia propuesta.

Validar la viabilidad de la estrategia y del protocolo de seguimiento propuestos para su aplicación en el contexto de la empresa.

3. Justificación

La relevancia del proyecto de investigación propuesto en el contexto de la intervención a la empresa PLANETA S.A.S E.S.P surge, en primera instancia, de la necesidad urgente de que las empresas del sector saneamiento contribuyan de manera decidida a la mitigación del cambio climático, a través de estrategias concretas que permitan reducir su huella de carbono. Este desafío cobra mayor importancia cuando se consideran las emisiones generadas por el sector de gestión de residuos en Colombia, que solo en el año 2020 alcanzaron 8,26 millones de toneladas de CO₂ equivalente, con una proyección de incremento a 12,6 millones de toneladas para el año 2030 (Ministerio de Vivienda, 2021, p. 87).

En este escenario, los compromisos internacionales adoptados por Colombia, tales como la Contribución Determinada a Nivel Nacional (NDC), que establece la meta de reducir en un 51% las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) para el año 2030 (Gobierno de Colombia, 2020a, p. 60), y la Estrategia Climática de Largo Plazo E2050, orientan las acciones del país hacia la transición a un desarrollo bajo en carbono y resiliente al clima, promoviendo la participación activa de todos los actores, incluidos el sector empresarial y las organizaciones privadas, como aliados estratégicos en la construcción de este propósito nacional (Gobierno de Colombia, 2021a, pp. 16–19). En particular, la estrategia aquí propuesta busca alinearse con las Apuestas 7 y 8 de la E2050, orientadas respectivamente a la transformación hacia una matriz energética diversificada mediante la adopción de energías renovables y a la consolidación de infraestructuras y movilidad sostenibles y resilientes, elementos clave para la transición hacia una economía baja en carbono (Gobierno de Colombia, 2021a, pp. 175–179).

El planteamiento de esta investigación se orienta bajo los lineamientos de estándares internacionales como el GHG Protocol y la norma ISO 14064, ampliamente reconocidos para la medición, reporte y verificación de emisiones de GEI, los cuales servirán como referencia metodológica para el diagnóstico y la futura gestión de la huella de carbono en la empresa (Ihobe S.A, 2019).

La propuesta considera de manera prioritaria tanto las emisiones directas de alcance 1, asociadas al consumo de combustible por la flota de transporte de lodos, como las emisiones indirectas de alcance 2, relacionadas con el consumo eléctrico en el proceso de tratamiento de aguas residuales. Este enfoque responde a un principio de materialidad, al centrarse en las

fuentes de mayor impacto y aquellas que resultan potencialmente factibles de abordar de forma progresiva dentro de las capacidades actuales de la empresa.

Resulta pertinente señalar que este tipo de estrategias podrían facilitar, en el mediano y largo plazo, la atracción de aliados estratégicos y el acceso a potenciales fuentes de financiamiento nacionales e internacionales, particularmente cuando incorporan tecnologías o procesos que contribuyen a la mitigación de la huella de carbono. En el ámbito nacional, la Ley 1715 de 2014 contempla beneficios tributarios y mecanismos de apoyo para proyectos de energías renovables y eficiencia energética, cuya adopción puede generar impactos positivos en la reducción de emisiones (Estudio Legal Hernández, 2021, pp. 3–4). A nivel internacional, existen instrumentos financieros como las subvenciones y préstamos en condiciones favorables del Fondo Verde para el Clima (Green Climate Fund, 2020, pp. 8–9), así como líneas de cooperación del Banco Interamericano de Desarrollo, que respaldan la implementación de acciones climáticas orientadas a la transición hacia modelos de economía circular y bajo carbono (Arguello et al., 2022, p. 15). Este panorama refleja el creciente interés global por apoyar proyectos que generen beneficios ambientales y contribuyan a la mitigación del cambio climático, lo que no solo puede permitir a la compañía iniciar un proceso de mejora en su contribución a la sostenibilidad ambiental del país, sino que también puede traducirse en ventajas competitivas, especialmente en la mejora de la imagen de marca y el acceso a incentivos fiscales o financieros, lo que a su vez refuerza la sostenibilidad de la empresa en un contexto empresarial cada vez más enfocado en la responsabilidad ambiental y la gestión eficiente de recursos.

4. Alcance de la Investigación

La presente investigación delimita su alcance al diagnóstico y formulación de una estrategia de reducción de la huella de carbono generada en el proceso de tratamiento de aguas residuales desarrollado por la empresa PLANETA S.A.S E.S.P. Para ello, se toma como base la estimación de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) correspondiente al año 2024, realizada a través de la plataforma digital Dcycle, herramienta certificada que permite la medición estructurada de las emisiones conforme a los lineamientos metodológicos del Protocolo GHG, considerando los tres alcances [1, 2 y 3] establecidos por este estándar, siendo la inclusión del Alcance 3 en la medición incorporado a título informativo y complementario dentro del espectro del presente trabajo, conforme a la naturaleza opcional que este tipo de emisiones presenta en el marco metodológico del protocolo.

No obstante, el análisis técnico y diagnóstico detallado de la presente investigación se concentrará exclusivamente en aquellas emisiones en las que la empresa ejerce control operacional, conforme a los principios de delimitación organizacional [Organizational Boundaries] definidos por el GHG Protocol (World Resources Institute, 2004, pp. 14–16) y atendiendo además a los criterios de delimitación operacional [Operational Boundaries] señalados en el referido estándar (World Resources Institute, 2004, pp. 20–23), en este sentido, el presente estudio se enfoca específicamente en:

- Las emisiones de Alcance 1, asociadas al consumo de combustibles fósiles por parte de los vehículos operativos de la empresa utilizados para el transporte de aguas residuales y lodos desde los puntos de generación hasta la planta de tratamiento ubicada en el municipio de Mosquera, Cundinamarca; y
- Las emisiones de Alcance 2, derivadas del consumo de energía eléctrica adquirida de la red y utilizada directamente en el proceso de tratamiento de aguas residuales en dicha planta.

Se excluyen expresamente del análisis técnico y diagnóstico las emisiones de otras líneas de negocio desarrolladas por la empresa, como el proceso de compostaje, así como las asociadas a otras sedes o instalaciones ubicadas fuera del perímetro operativo de la planta de tratamiento, como la sede administrativa de Madrid [Cundinamarca], la bodega de Bogotá y el lavado de tanques en otras plantas distintas a la evaluada. Asimismo, no se incluyen en el diagnóstico las emisiones fugitivas [Alcance 1] derivadas de procesos industriales puntuales como recarga de gases refrigerantes o presurizados [CO₂, N₂O], debido a su baja incidencia cuantitativa y a la ausencia de información operativa confiable para el periodo evaluado.

De igual forma, las emisiones biogénicas de CO₂, propias del tratamiento de materia orgánica como lodos o aguas residuales (GHG Protocol, 2017, p. 39), no se incorporan en el análisis cuantitativo, dado que, conforme al enfoque del GHG Protocol, estas emisiones forman parte de un ciclo cerrado del carbono y se reportan por separado de las emisiones fósiles que sí contribuyen al inventario total de CO₂e (IDEAM et al., 2022, p. 490; World Resources Institute, 2015, p. 61). Por otra parte, las emisiones biogénicas de CH₄ y N₂O no fueron incluidas en la medición, ni en el análisis cuantitativo debido a limitaciones técnicas y de información, que impidieron su estimación conforme a los requerimientos metodológicos del protocolo, en coherencia con el principio de transparencia y disponibilidad de datos (World Resources Institute, 2004, pp. 9–10).

Tampoco se consideran dentro del diagnóstico las emisiones del Alcance 3 asociadas a actividades indirectas fuera del control operacional de la empresa, como la cadena de suministro o actividades subcontratadas, en la medida en que actualmente no se cuenta con trazabilidad suficiente ni con datos confiables que permitan su incorporación metodológicamente válida, y su materialidad relativa resulta limitada frente a los objetivos definidos en esta investigación. Así mismo, y conforme al *GHG Protocol Corporate Value Chain [Scope 3] Accounting and Reporting Standard*, el reporte de las emisiones de Alcance 3 es de carácter voluntario, siendo requerido solo cuando la organización decide aplicarlo como marco de referencia integral para el análisis de emisiones indirectas (World Resources Institute, 2015, pp. 5–6); así las cosas en este estudio, las emisiones del Alcance 3 se estimaron únicamente a título informativo, considerando su posible valor referencial y potencial utilidad para decisiones futuras en sostenibilidad.

En coherencia con lo anterior, el enfoque estratégico de esta investigación se desarrolla sobre las fuentes de emisión bajo control operativo directo de la empresa, priorizando las oportunidades de mejora identificadas en el proceso de tratamiento de aguas residuales en planta, sin perjuicio de que la estrategia resultante sea diseñada con un enfoque escalable y adaptable, de forma tal que pueda ampliarse progresivamente a otras áreas o procesos de la organización, en concordancia con la capacidad técnica, operativa y financiera de la empresa y sus objetivos de sostenibilidad a mediano y largo plazo.

Con este alcance claramente definido, se busca fortalecer la coherencia metodológica del estudio, su aplicabilidad práctica dentro del contexto organizacional de PLANETA S.A.S E.S.P, y su contribución real a la construcción de una estrategia consistente y fundamentada para la reducción efectiva de las emisiones de GEI asociadas al tratamiento de aguas residuales.

5. Marco institucional.

5.1. Presentación de la empresa.

PLANETA S.A.S E.S.P [Planeación Estratégica y Tecnologías Ambientales], constituida en el año 2017, se dedica a la recolección, transporte, tratamiento y disposición final de aguas residuales y lodos orgánicos no peligrosos, tanto industriales como domésticos. La empresa opera con una infraestructura que incluye un sistema integral de tratamiento de aguas residuales, con capacidad para procesar un caudal de 4 litros por segundo (L/s), y plantas de compostaje con una capacidad diaria de tratamiento de aproximadamente 2.200 toneladas. Estas actividades se llevan a cabo bajo estrictos estándares ambientales, asegurando un manejo adecuado de los residuos no peligrosos generados por las distintas actividades atendidas. Actualmente, PLANETA S.A.S E.S.P cuenta con 62 colaboradores, incluyendo personal directo de planta, contratistas ocasionales y permanentes, quienes operan desde las sedes de la organización. La empresa dispone de una flota vehicular de 20 vehículos, y su promedio anual de facturación asciende a \$7.000.000.000 de pesos. Debido a su tamaño y facturación, la compañía es considerada una empresa mediana dentro del sector de servicios; sus actividades operativas se ejecutan en un predio de 10,41 hectáreas ubicado en la vereda Balsillas, en el municipio de Mosquera, dentro de una zona clasificada para uso industrial de alto impacto.

PLANETA S.A.S E.S.P está registrada en la Cámara de Comercio de Mosquera, Cundinamarca, desde el año 2017. La empresa se especializa en la evacuación y tratamiento de aguas residuales, saneamiento ambiental y otros servicios relacionados con la gestión de desechos. Además, se dedica al transporte de carga por carretera y al comercio al por mayor no especializado. Con su enfoque en la sostenibilidad y el desarrollo ambiental, la empresa busca optimizar sus procesos y contribuir al bienestar ambiental de las comunidades donde opera (PLANETA S.A.S E.S.P, 2024).

5.2. Referentes estratégicos

La misión de PLANETA S.A.S E.S.P es ser una empresa rentable, comprometida con el medio ambiente y promotora de un enfoque de economía circular para fomentar el desarrollo sostenible. La empresa busca garantizar el bienestar y la seguridad de sus colaboradores y grupos de interés, destacándose como referente en la implementación de tecnologías eficientes que cumplan con los requerimientos técnicos, legales y ambientales. PLANETA S.A.S E.S.P se esfuerza por generar un impacto positivo en el medio ambiente, manteniendo un equilibrio entre

la rentabilidad y la responsabilidad social, y posicionándose como un actor clave para la protección del entorno natural.

La visión de PLANETA S.A.S E.S.P es consolidarse para el año 2026 como una empresa líder a nivel regional y nacional en la implementación de tecnologías avanzadas para la gestión integral de residuos, lodos y aguas residuales. La empresa se destaca por su alta competitividad empresarial y su compromiso con la generación de impactos socioambientales positivos, promoviendo el desarrollo sostenible. Además, busca contribuir al crecimiento estratégico y económico de la organización y de sus grupos de interés, adhiriéndose rigurosamente a las normas técnicas del sistema de gestión integral y fomentando prácticas que preserven el medio ambiente para las generaciones futuras (PLANETA S.A.S E.S.P, 2024).

En cuanto a los valores corporativos, de PLANETA S.A.S E.S.P, se incluyen la sostenibilidad ambiental y un compromiso firme de minimizar el impacto ambiental mediante la adopción de prácticas sostenibles. Esto implica la reducción del consumo de recursos, la promoción de la eficiencia energética, la gestión responsable de los residuos y la utilización de energías renovables en todas sus operaciones. Además, la empresa valora y apoya a las comunidades locales, contribuyendo a su desarrollo socioeconómico a través de programas de capacitación, salud y desarrollo comunitario, mejorando la calidad de vida de las personas que interactúan con la organización.

PLANETA S.A.S E.S.P se diferencia de otras compañías por su enfoque integral en el ciclo de vida de los servicios que ofrece en el sector. La empresa cuenta con una flota vehicular propia y plantas de tratamiento de aguas y residuos orgánicos, con todos los permisos y licencias ambientales necesarios, lo que le permite ofrecer precios competitivos sin sacrificar la calidad del servicio. Esta infraestructura propia, combinada con su experiencia técnica, y su cumplimiento normativo, le otorga una ventaja competitiva significativa en el mercado (PLANETA S.A.S E.S.P, 2024) .

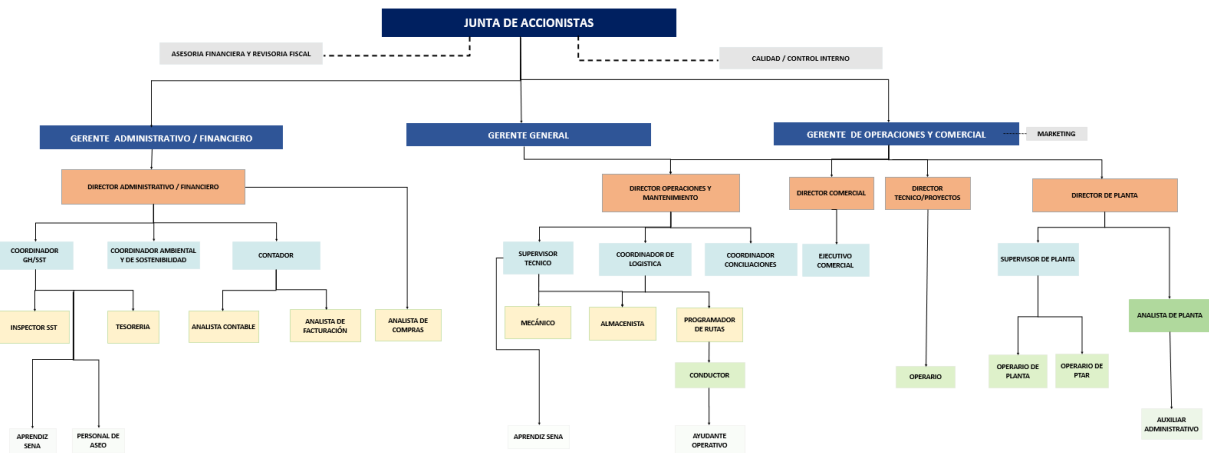
5.3. Estructura organizacional.

La estructura organizacional de PLANETA S.A.S E.S.P es de tipo funcional, lo que significa que la empresa está organizada en diferentes departamentos o áreas que se especializan en funciones específicas. Cada una de las áreas cuenta con un responsable directo que reporta directamente a la alta gerencia, permitiendo una clara separación y asignación de responsabilidades, así como una mayor especialización dentro de cada función asignada en la empresa. Este tipo de estructura facilita la eficiencia en la asignación de tareas y presupuesto,

además de asegurar que cada área cuente con direcciones claras y funcionales. A continuación, se presenta el organigrama que detalla la estructura funcional de PLANETA S.A.S E.S.P.

Figura 1

Organigrama PLANETA S.A.S E.S.P.



Fuente: Adaptado de PLANETA S.A.S E.S.P (2024)

La junta de accionistas se encuentra en la cima de la estructura organizacional, siendo la máxima autoridad en la toma de todas las decisiones estratégicas. Directamente bajo la junta, se encuentran el gerente general, el gerente de operaciones y comercial, y el gerente administrativo y financiero. Estas tres gerencias principales controlan las áreas críticas de la empresa, relacionadas con las operaciones, los aspectos financieros y la gestión comercial.

El gerente de operaciones y comercial se encarga de la dirección de las áreas de operaciones, logística y comercial, además de supervisar el mantenimiento de las instalaciones y los vehículos de la flota propia de la empresa, así como la gestión de todos los proyectos técnicos. Bajo su mando están el director de planta, los supervisores de planta y el equipo técnico, que incluye operadores, mecánicos y ayudantes operativos. Este equipo asegura el funcionamiento continuo y eficiente de las plantas de tratamiento y de la logística de transporte para la prestación de los servicios de la empresa.

Por otro lado, el gerente administrativo y financiero supervisa las áreas de gestión humana, tesorería, compras y de otros aspectos administrativos. Bajo su liderazgo se encuentran coordinadores y analistas que gestionan las funciones críticas del soporte administrativo y financiero de la empresa, que incluye al personal de facturación, contabilidad y control de calidad interno.

La empresa también cuenta con un coordinador de sostenibilidad, cuya principal responsabilidad es garantizar que las operaciones de la empresa cumplan con todas las normativas ambientales vigentes, además de implementar prácticas sostenibles a lo largo de todos los procesos. Por otra parte, se destaca la coordinación de salud y seguridad en el trabajo, junto con el área de gestión humana, ambas enfocadas en asegurar el bienestar y la seguridad de los colaboradores en sus actividades diarias. Estas áreas, además, supervisan el cumplimiento de la normativa laboral y otros aspectos relacionados con la administración del personal de la organización.

5.4. Servicios ofertados

PLANETA S.A.S E.S.P se dedica a la gestión integral de aguas residuales, abarcando desde su recolección y transporte hasta el tratamiento y descarga de efluentes tratados. A través de un manejo adecuado de las aguas residuales domésticas e industriales no peligrosas, la empresa asegura el cumplimiento de las normativas ambientales, minimizando el impacto negativo sobre el entorno.

Tabla 1

Proyección de agua residual generada, tratada y descargada.

Etapa	Tipo de agua	Cantidad diaria generada	Cantidad diaria generada	Cantidad diaria generada	Cantidad diaria generada	Cantidad mensual generada	Proyección generación	Proyección generación
		(L/s)	(m ³ /s)	(L/día)	(m ³ /día)	(m ³ /mes)	(m ³ /Año)	(m ³ *25 años)
Operación	Agua residual no domestica ARnD proveniente de terceros	2.37	0.00237	204768	204.8	6143.04	73716.48	1842912
	Agua residual domestica personas.	0.02	0.00002	1728	1.7	51.84	622.08	15552
Permanente	Agua proveniente del tratamiento de lodos Domésticos	1.6	0.0016	138240	138.2	4147.2	49766.4	1244160
Caudal total		4	0.004	344736	344.7	10342.08	124104.96	3102624

Fuente: Adaptado de PLANETA S.A.S E.S.P (2024)

Figura 2

Actividades operativas de la organización.



Fuente: Adaptado de PLANETA S.A.S E.S.P (2024)

Otros servicios clave de PLANETA S.A.S E.S.P son la deshidratación y valorización de lodos. Este proceso incluye la recepción y estabilización de lodos, así como su valorización, que permite la entrega del lodo deshidratado para compostaje y recuperación de suelos. Estos servicios contribuyen a la economía circular, transformando residuos en recursos útiles para la agricultura. Asimismo, PLANETA S.A.S E.S.P también se enfoca en el aprovechamiento y valorización de residuos orgánicos. Este proceso involucra la recepción, mezcla y conformación de pilas de valorización, culminando en la producción de abono a través de un proceso de tamizaje y almacenamiento. Además, la empresa implementa programas de capacitación social, fortaleciendo su relación con la comunidad y fomentando la conciencia ambiental.

Figura 3

Pilas de compostaje para abono orgánico.



Fuente: Adaptado de PLANETA S.A.S E.S.P (2024)

5.5. Análisis del sector

El presente apartado ofrece un análisis del contexto sectorial en el que opera la empresa PLANETA S.A.S E.S.P, abarcando las dinámicas, tendencias y proyecciones de los sectores relacionados con el tratamiento de aguas residuales y la valorización de residuos orgánicos. Este análisis permite comprender los factores económicos, tecnológicos, ambientales y regulatorios que inciden en la competitividad y sostenibilidad de la organización.

5.5.1. Tratamiento de aguas residuales

El sector de gestión de aguas residuales es fundamental para la sostenibilidad ambiental y la salud pública. Este sector incluye actividades que van desde la recolección, transporte y tratamiento de las aguas, hasta su descarga, reúso y valorización de subproductos como lodos y residuos orgánicos. En un contexto global de creciente urbanización y cambio climático, presenta desafíos y oportunidades significativas. Este análisis examina las tendencias del sector, su desarrollo tecnológico y el crecimiento económico asociado.

En cuanto a cifras y estadísticas del sector, a nivel global se estima que el mercado de tratamiento de aguas residuales alcanzará aproximadamente \$410 mil millones para el año 2026, con una tasa de crecimiento anual compuesta (CAGR) del 5,5 % (MarketsandMarkets, 2021). En América Latina, el crecimiento es impulsado por la necesidad de mejorar la infraestructura hídrica y cumplir con normativas ambientales más estrictas. Según el (Banco Interamericano de Desarrollo [BID], 2022), el 70% de las aguas residuales en la región se descargan sin tratamiento, lo que representa una oportunidad para empresas como PLANETA S.A.S E.S.P.

Uno de los principales comportamientos del sector de tratamiento de aguas residuales es la creciente conciencia ambiental y la demanda de soluciones sostenibles, impulsadas por las políticas públicas y normativas vigentes. Las ciudades están optando por tecnologías más limpias y eficientes para el tratamiento de aguas residuales. Además, se observa una tendencia hacia la integración de los sistemas de gestión del agua con fuentes de energía renovable, lo que contribuye a la sostenibilidad de los procesos (Organisation for Economic Co-operation and Development [OECD], 2020).

El desarrollo tecnológico en el sector de tratamiento de aguas residuales ha sido notable, con avances en tecnologías de tratamiento biológico y fisicoquímico que aumentan la eficiencia de los procesos de depuración. La implementación de sistemas de tratamiento descentralizados y soluciones de economía circular, como la valorización de lodos para la

producción de biogás y abono, son ejemplos de innovación en el sector (Environmental Protection Agency EPA, 2021).

La automatización de plantas de tratamiento mediante sensores y sistemas de control en tiempo real está optimizando el uso de recursos y reduciendo costos operativos. Asimismo, la investigación en tecnologías de tratamiento de aguas residuales avanzadas, como la filtración por membrana y los procesos de oxidación avanzada, está en aumento, lo que mejora la calidad del agua tratada y su reutilización (Metcalf & Eddy Inc., 1991).

El crecimiento del sector de aguas residuales está estrechamente alineado con el desarrollo económico de las regiones emergentes, donde la inversión en infraestructura hídrica constituye un pilar fundamental para el desarrollo sostenible y la protección de la salud pública. En este contexto, se prevé que el mercado de servicios de tratamiento de aguas residuales en América Latina experimente un crecimiento sostenido en los próximos años, impulsado tanto por políticas gubernamentales orientadas a la sostenibilidad como por la mayor participación del sector privado en la gestión del recurso hídrico (Inter American Development Bank, 1998).

La implementación de programas de sostenibilidad y responsabilidad social empresarial por parte de las compañías del sector de gestión de residuos y aguas residuales ha demostrado ser un factor determinante en el fortalecimiento del crecimiento económico y reputacional. Estos programas no solo mejoran la imagen corporativa, sino que también fomentan la aceptación y confianza de las comunidades locales, además de promover la colaboración en proyectos ambientales orientados al desarrollo sostenible.

El sector de gestión de aguas residuales presenta un panorama de crecimiento sostenido y amplias oportunidades de innovación. La creciente conciencia ambiental, el desarrollo tecnológico y el apoyo gubernamental son factores clave que impulsan la transición del sector hacia modelos más sostenibles. En este contexto, PLANETA S.A.S E.S.P tiene el potencial de contribuir de manera significativa al desarrollo sostenible, mediante la implementación de tecnologías avanzadas y programas de responsabilidad social empresarial. Con el enfoque adecuado, la empresa no solo puede fortalecer su rentabilidad, sino también generar un impacto positivo en la comunidad y en el medio ambiente.

Según el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2022), Colombia genera aproximadamente 10 millones de metros cúbicos (m³) de aguas residuales por día, de los cuales solo el 40 % recibe tratamiento adecuado. Esto implica que más de 6 millones de metros

cúbicos diarios se descargan sin tratamiento, representando un riesgo considerable para los ecosistemas acuáticos, el suelo y la salud pública.

Una tendencia creciente en Colombia es el aumento de la conciencia sobre la importancia de la gestión del agua y el tratamiento de aguas residuales. Las políticas gubernamentales, como la Ley 99 de 1993, han sentado las bases para una regulación más estricta en la gestión del recurso hídrico y el tratamiento de efluentes (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2022). Estas políticas han impulsado a las industrias y a los municipios a invertir en infraestructura y tecnología con el fin de mejorar la eficiencia y cobertura de sus sistemas de tratamiento.

El sector de tratamiento de aguas residuales en Colombia enfrenta desafíos significativos, pero también presenta oportunidades de crecimiento y desarrollo. La creciente conciencia sobre la gestión responsable del agua, el apoyo gubernamental y el avance tecnológico están impulsando el tratamiento de aguas domésticas e industriales hacia una mayor sostenibilidad. En este contexto, PLANETA S.A.S E.S.P tiene la oportunidad de fortalecer su posicionamiento en este mercado emergente, contribuyendo tanto al desarrollo económico como a la sostenibilidad ambiental del país.

5.5.2. Tratamiento de residuos orgánicos y valoración de lodos

En cuanto al sector de residuos orgánicos y lodos para compostaje, este es fundamental en la transición hacia economías circulares y sostenibles. Según el Banco Mundial (2022), se estima que aproximadamente entre el 30 % y el 50 % de los residuos sólidos urbanos generados a nivel mundial son de origen orgánico. En América Latina, esta cifra asciende a más del 40 %, lo que representa una gran oportunidad para el compostaje como método de tratamiento y valorización. El mercado global del compostaje se proyecta que alcance los 8,4 mil millones de dólares para el año 2027, con una tasa de crecimiento anual compuesta (CAGR) del 5,5 % (MarketsandMarkets, 2021). Estas cifras reflejan una creciente demanda por prácticas de gestión de residuos más sostenibles.

Una de las principales tendencias en el sector es el aumento de la conciencia ambiental entre los consumidores y las empresas. La presión social por reducir la generación de residuos y minimizar el impacto ambiental está llevando a un número creciente de organizaciones a implementar programas de compostaje (Organisation for Economic Co-operation and Development [OECD], 2020)

Adicionalmente, las políticas gubernamentales están favoreciendo la separación en la fuente y el compostaje, mediante normativas que incentivan la reducción de residuos enviados a vertederos. Por ejemplo, varios países han implementado restricciones a la disposición de residuos orgánicos, promoviendo así el compostaje como una alternativa viable (Banco Interamericano de Desarrollo [BID], 2022)

El desarrollo tecnológico en el sector del compostaje ha avanzado significativamente. Nuevas tecnologías, como los sistemas de compostaje en línea y los digestores anaerobios, han mejorado la eficiencia de los procesos, permitiendo una descomposición más rápida de los residuos y la producción de compost de alta calidad (Environmental Protection Agency EPA, 2021).

La digitalización también está transformando el sector del tratamiento de residuos orgánicos y las plantas de compostaje, mediante el uso de sensores y plataformas de monitoreo que optimizan los procesos de compostaje. La implementación de software para la gestión de residuos permite a las empresas monitorear las características y el estado de las pilas de abono, así como su eficiencia operativa, mejorando la trazabilidad de los productos resultantes. Estos sistemas permiten medir variables clave como la humedad, la temperatura y otras condiciones necesarias para su adecuado aprovechamiento.

El sector de residuos orgánicos y lodos para compostaje está alineado con un modelo de crecimiento económico sostenible. Se estima que la industria del compostaje genera miles de empleos en las etapas de recolección, tratamiento y distribución del compost, contribuyendo así al desarrollo económico local (World Bank Group, 2022).

La creciente inversión en infraestructura para el tratamiento de residuos orgánicos también es notable. Los gobiernos y las empresas privadas están destinando recursos significativos al desarrollo de instalaciones de compostaje, lo que impulsa la innovación y mejora la eficiencia en el manejo de residuos (Organization for Economic Co-operation and Development [OECD], 2019)

En Colombia, se estima que se generan alrededor de 12 millones de toneladas de residuos sólidos al año, de los cuales cerca del 40% corresponde a residuos orgánicos (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible [MADS], 2022). A pesar de este alto potencial de aprovechamiento, solo el 17% de los residuos generados son reciclados, lo que evidencia una

oportunidad significativa para fortalecer las estrategias de compostaje y valorización de lodos en el país.

El mercado del compostaje en Colombia ha mostrado un crecimiento sostenido en los últimos años, con proyecciones que estiman que alcanzará un valor cercano a los 50 millones de dólares para 2025, impulsado por políticas gubernamentales favorables, el fortalecimiento de la economía circular y una creciente conciencia ambiental en la población (MADS, 2022)

Una de las tendencias más destacadas en Colombia es el aumento en la implementación de políticas de gestión de residuos que promueven la separación en la fuente y el compostaje. Asimismo, la participación comunitaria en programas de compostaje ha crecido significativamente, impulsada por iniciativas educativas que buscan sensibilizar a la población sobre la importancia de reducir y aprovechar los residuos orgánicos. Estas acciones no solo benefician al medio ambiente, sino que también fortalecen el sentido de responsabilidad colectiva y la cultura de sostenibilidad en las comunidades.

El sector de residuos orgánicos y valorización de lodos para compostaje en Colombia presenta un alto potencial de crecimiento económico y ambiental. Se estima que la creación de nueva infraestructura para el manejo y aprovechamiento de residuos podría generar más de 20.000 empleos directos e indirectos en los próximos años, contribuyendo al desarrollo de una economía circular mejorada y baja en carbono (Cámara de Comercio de Bogotá, 2021).

6. Marco de Referencia

6.1 Contexto del cambio climático y compromisos para la reducción de emisiones de carbono

La evidencia científica sobre el cambio climático es cada vez más contundente (Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático [IPCC], 2007, p. 67). Según lo expuesto en el informe del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente ***Emissions Gap Report 2023***, con el aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero, los récords de temperatura se superan de manera alarmante y los efectos del cambio climático se vuelven cada vez más severos, lo que ha llevado a que muchos de los principales científicos climáticos del mundo adviertan de manera determinante que, sin un mayor compromiso por parte de los países, que involucre una rápida descarbonización de la industria, el transporte, la calefacción y los sistemas de energía, el planeta corre el riesgo de permanecer anclado a un modelo de desarrollo con elevadas emisiones de carbono, lo que podría provocar incrementos de temperatura que superarían el límite establecido para garantizar la seguridad climática, poniendo en peligro la vida y el bienestar de las futuras generaciones. (United Nations Environment Programme [UNEP], 2023, Cap. 7).





Ahora bien, se entiende por cambio climático la alteración significativa y prolongada de los patrones climáticos globales, causada por factores naturales y, principalmente, por actividades antropogénicas que intensifican la acumulación de gases de efecto invernadero en la atmósfera y en consecuencia una mayor retención del calor del sol (Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático [IPCC], 2013). Este fenómeno representa uno de los desafíos más apremiantes del siglo XXI, debido a sus causas y efectos globales, así como a la magnitud de los esfuerzos necesarios y simultáneos para paliar sus impactos negativos y adaptarse a las nuevas condiciones climáticas (Bárcena et al., 2018, p. 9). En consonancia, y de acuerdo con información compilada por Planton et al. (2013, p. 5) en el Glosario del Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, se pueden distinguir dos formas de este fenómeno. La primera es el cambio climático asegurado, que ocurre debido a la inercia térmica de los océanos y a procesos lentos en la criosfera, lo que significa que continuará mientras persista el desequilibrio radiativo; y el segundo, es el cambio climático abrupto, caracterizado por cambios de gran magnitud en el sistema climático que se desarrollan rápidamente, generando perturbaciones significativas en los sistemas naturales y humanos (Ministerio de Educación Nacional, 2022, p. 3). Es precisamente este último el que ha suscitado una creciente preocupación, pues se ha acelerado a causa de las actividades humanas que generan GEI; razón por la cual puede ser entendido desde una perspectiva económica, como el

resultado de una externalidad negativa global inherente al modelo actual de desarrollo, que amenaza un bien público global tan crucial como lo es el clima, toda vez que el efecto perjudicial causado por muchas actividades económicas afecta a personas en todo el mundo, sin que los responsables de esas actividades y sus emisiones asuman directamente los costos asociados a ese impacto (Bárcena et al., 2018, p. 11). Estas emisiones han desencadenado diversas manifestaciones del cambio climático, incluyendo fenómenos meteorológicos extremos como tormentas y precipitaciones intensas, y las proyecciones indican que existe el riesgo latente de inundaciones interiores y costeras, deslizamientos de tierra, contaminación del aire, sequías, escasez de agua, el aumento del nivel del mar y marejadas ciclónicas, que en definitiva tendrían un impacto significativo en las personas, los recursos, las economías y los ecosistemas (Pachauri et al., 2015, p. 16).



La evidencia científica de este fenómeno de calentamiento del sistema climático es inequívoca, y respaldada por estudios compilados por la Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio NASA, en los que se señalan los efectos de las crecientes emisiones antropogénicas (NASA, 2023, pp. 5–6).

Figura 4

Manifestaciones del Acelerado Cambio Climático según la NASA¹

1	Aumentos en la Temperatura Global	~ Aumento: +2°F (+1°C) desde finales del siglo XIX.	
2	Aumentos en la Temperatura Oceánica	~ Aumento: 0.6°F (0.33°C) de aumento en los 100 metros superiores desde 1969. Efecto: El 90% del calor adicional se almacena en el océano.	
3	Decrecimiento de los Volúmenes de Hielo y Nieve	Groenlandia: Perdió 279.000 millones de toneladas de hielo al año (1993-2019). Antártida: Perdió 148.000 millones de toneladas de hielo al año.	
4	Incremento del Nivel del Mar	Cambio: Subió 8 pulgadas (20 cm) en el último siglo.	

¹ Principales manifestaciones del cambio climático que reflejan la acumulación de gases de efecto invernadero en la atmósfera. Fuente: NASA, *Evidencia del cambio climático*. Disponible en: <https://ciencia.nasa.gov/cambio-climatico/evidencia/>

5	Modificaciones en los Patrones de eventos Climáticos Extremos	Incremento de tormentas, precipitaciones, extremas, e inundaciones continentales y costeras.	
6	Aumento de la Acidificación de los Océanos	Aumento de la acidez de las aguas superficiales del océano en un 30% desde la Revolución Industrial a causa de la absorción de CO ₂ de entre el 20% y el 30% de las emisiones antropogénicas.	

Fuente: Elaboración propia basada en datos de la National Aeronautics and Space Administration [NASA] sobre las evidencias del cambio climático (NASA, 2023).

En consonancia, y de acuerdo con lo dispuesto por expertos del Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, p. (2023, p. 57), para enfrentar este contexto de cambios climáticos drásticos es indispensable que tanto gobiernos, empresas y personas trabajen de manera mancomunada para desarrollar y adoptar nuevos modelos de producción y consumo; lo que implica una transición hacia fuentes de energía renovable, la adopción de patrones de consumo más eficientes, y la elección de opciones de movilidad con bajo o nulo impacto en carbono, promoviendo así un cambio estructural hacia un desarrollo más sostenible que preserve los activos económicos y sociales a la vez que es responsable con el medio ambiente (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo - PNUD, 2024, p. 3).

En este contexto, el Acuerdo de París, adoptado el 12 de diciembre de 2015 y firmado el 22 de abril de 2016, durante la COP21 de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) (United Nations Framework Convention on Climate Change, 2015, p. 24), se erige como un pilar fundamental en los esfuerzos globales para la reducción de emisiones de carbono, estableciendo un marco universal para limitar el aumento de la temperatura global a menos de 2°C, y preferiblemente a 1.5°C, en comparación con los niveles preindustriales, además de fortalecer la capacidad de adaptación y la resiliencia frente al cambio climático (Cognuck González & Numer, 2020, p. 11). Este Acuerdo, intrínsecamente alineado con la Agenda 2030 adoptada en el 2015 por la Asamblea General de las Naciones Unidas (OCDE, 2020, p. 3), superó la tradicional distinción entre países desarrollados y en desarrollo, presente en la Convención Marco de Cambio Climático y el Protocolo de Kioto, estableciendo que todos los países, sin excepción, deben contribuir al esfuerzo global para enfrentar el cambio climático y fijarse objetivos de reducción de emisiones (García Arbeláez et al., 2016, p. 11). Para alcanzar estas metas, tanto los gobiernos como las empresas deben avanzar hacia la descarbonización para 2030, definiendo estrategias y objetivos claros para reducir las emisiones. Esto requiere reestructurar los modelos económicos centrados en el crecimiento a cualquier costo, realizar inversiones significativas en tecnologías de bajas emisiones, y promover tanto el

uso de fuentes de energía renovable como la eficiencia en el uso de recursos, entre otras medidas (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, 2023, p. 29).

En el caso de Colombia, estos compromisos se enmarcan en la Ley 1844 de 2017, instrumento jurídico mediante el cual Colombia **ratificó el Acuerdo de París** (Ministerio de Vivienda, 2020, p. 1). El cual propició que el país iniciara el trabajo para actualizar sus Contribuciones Determinadas a Nivel Nacional [NDC, por sus siglas en inglés], adquiriendo el compromiso de emitir como máximo 169,44 Mt CO₂eq en 2030, es decir, reducir en un 51% de las emisiones de GEI frente a las emisiones proyectadas para el 2030; lo que equivale a una reducción de 174,4 Mt CO₂eq respecto al escenario de referencia (Gobierno de Colombia, 2022, p. 134). Esta ratificación estableció un marco legal que impulsó al país a desarrollar políticas y estrategias para **cumplir con sus compromisos adquiridos** (Gobierno de Colombia, 2020b, p. 60).

Es así, como en el 2019, con la dirección y liderazgo del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MinAmbiente) y el Departamento Nacional de Planeación (DNP), se desarrolló la Estrategia Climática de Largo Plazo de Colombia para Cumplir con el Acuerdo de París [E2050], en coherencia con los objetivos climáticos globales. Esta estrategia, concebida como una hoja de ruta para orientar al país hacia la carbono-neutralidad y la resiliencia climática para el 2050, fue aprobada por la Comisión Intersectorial del Cambio Climático (CICC) el 13 de septiembre de ese año. La E2050 incluye propuestas de medidas que abarcan sectores clave de la economía, como la energía, el transporte, el uso del suelo y el saneamiento en el que se integra el subsector de tratamiento y gestión de aguas residuales y residuos sólidos (Gobierno de Colombia, 2021, p. 8), del cual se estima que representa más del 3% de las emisiones globales totales de gases de efecto invernadero (GEI) (X. Xu & Eng, 2011, p. 13).

6.2 Emisiones de gases de efecto invernadero [GEI]

El concepto del efecto invernadero tiene su origen en el siglo XIX, cuando Joseph Fourier, en 1824, planteó que la Tierra sería mucho más fría sin una atmósfera que retuviera el calor. Más tarde, en 1896, Svante Arrhenius estableció un vínculo entre el aumento de las emisiones de dióxido de carbono (CO₂), resultante de la quema de combustibles fósiles, y el calentamiento global; posteriormente ya para el siglo XX, James E. Hansen subrayó la gravedad de este fenómeno al destacar el hecho de que ya se estaba alterando el clima terrestre (National Geographic, 2023).

En términos conceptuales, y conforme con lo dispuesto por Planton et al. (2014, p. 193), las emisiones de efecto invernadero son sustancias compuestas en estado gaseoso, como el vapor

de agua, el dióxido de carbono (CO₂), el metano (CH₄) y el óxido nitroso (N₂O). Estos gases tienen la capacidad de absorber la radiación infrarroja solar, provocando un incremento en la temperatura global y contribuyendo al efecto de retención del calor en la atmósfera terrestre, lo cual se constituye como un fenómeno crítico en la dinámica del cambio climático (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2024).

Las emisiones de gases de efecto invernadero pueden clasificarse en dos categorías principales: directas e indirectas. Las emisiones directas son aquellas que se originan en fuentes que pertenecen o están bajo el control de una organización, como por ejemplo equipos industriales o vehículos, mientras que las emisiones indirectas son el resultado de actividades relacionadas con la organización, pero que se generan en fuentes externas a su propiedad o control, como lo son la generación de electricidad adquirida que se consume en las corridas productivas de una planta industrial (Gencat, 2013).

Ahora bien, para mejorar la transparencia y la comparabilidad en la gestión de estas emisiones, se han definido tres categorías o alcances que facilitan su identificación y reporte: **El Alcance 1** que comprende las emisiones directas generadas por fuentes que son propiedad de la organización o están bajo su control, como la combustión en calderas, hornos o vehículos, así como los procesos industriales específicos de la entidad (Generalitat de Catalunya, 2011, p. 6). **El Alcance 2** que abarca las emisiones indirectas derivadas de la generación de electricidad consumida y facturada por la organización, lo cual se considera hoy día como un componente significativo de la huella de carbono en muchas empresas (Ranganathan et al., 2020, p. 29). Por último, el **Alcance 3** el cual incluye otras emisiones indirectas asociadas a actividades relacionadas con la organización, pero que ocurren en fuentes fuera de su control, como la producción de materiales adquiridos, el transporte de productos, los viajes de trabajo realizados por terceros y la gestión de los residuos generados por sus operaciones (Oficina Española del Cambio Climático OECC, 2024, p. 1).

Para abordar el desafío que impone la presencia de estas emisiones y limitar el aumento de la temperatura global a 1,5 °C, que es el principal objetivo del Acuerdo de París, es necesario implementar acciones de mitigación tendientes a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en un 45 % antes de 2030, y alcanzar la neutralidad de carbono hacia 2050 (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, 2023, p. 57). Ahora bien, frente al caso de Colombia, aunque el país solo representa el 0,6 % de las emisiones globales de CO₂, su postura es clara: es crucial fortalecer las acciones para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y aumentar la capacidad de adaptación del país frente al cambio climático desde todas las vertientes y sectores económicos (Gobierno de Colombia, 2021, p. 10).

6.3 Impacto de las plantas de tratamiento de aguas residuales en las emisiones de GEI

Las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) desempeñan un papel crucial en la mitigación de los efectos negativos de los agentes contaminantes sobre los ecosistemas acuáticos, al tratar el agua residual para reducir la carga de materia orgánica antes de su vertido, evitando alteraciones sustanciales en la calidad de las masas de aguas receptoras (Wang et al., 2023, p. 2); por esta razón, estas estaciones de tratamiento deben ser vistas no como entidades independientes, sino como componentes esenciales dentro del ciclo natural del agua (Del Río Gamero, 2018, p. 28).

Sin embargo, estos sistemas de tratamiento no están exento de impactos ambientales, pues generan gases de efecto invernadero (GEI) como el dióxido de carbono (CO_2), el metano (CH_4) y el óxido nitroso (N_2O), a lo largo de las distintas etapas del proceso, ya sea por el consumo de energía, el uso de productos químicos, la eliminación de efluentes no deseados o la gestión de los lodos residuales; estos gases, al ser potentes contribuyentes al calentamiento global, desempeñan un papel significativo en el cambio climático (European Commission - CORDIS, 2019, pp. 1–2). Aunque para efectos de análisis y cuantificación el CO_2 de origen biogénico se considera carbono neutral y por tanto no es incluido en las directrices del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático IPCC, según señala Doorn et al. (2006, p. 6), las emisiones antropogénicas de metano CH_4 y de óxido nitroso N_2O , con potenciales de calentamiento global de 28 y 265 veces mayores que el del CO_2 , representan una preocupación relevante en el contexto del cambio climático (Ren & Pagilla, 2022, p. 38).

El metano (CH_4) por su parte, es un gas que se genera cuando la materia orgánica presente en las aguas residuales y lodos se descompone en condiciones anaeróbicas, es decir, en ausencia de oxígeno. Su emisión está influenciada por factores como la concentración de materia orgánica degradable, el tipo de sistema de tratamiento utilizado y la temperatura del medio; mientras que el óxido nitroso (N_2O) se forma durante la degradación de compuestos nitrogenados, como la urea y las proteínas, presentes en las aguas residuales (M. R. J. Doorn et al., 2006, pp. 6–8).

Conforme con lo expuesto, la operación de estas depuradoras a nivel mundial representa alrededor del 5% del total de las emisiones globales de metano (CH_4) y el 3% de las de óxido nitroso (N_2O), lo que equivale a aproximadamente a 600 millones de toneladas de CO_2 equivalente (CO_2 eq) para el CH_4 y 100 millones de toneladas de CO_2 eq para el N_2O , estimados para el año 2030 tal y como lo confirmó (Abyar & Nowrouzi, 2023, p. 1).

Este elevado impacto de emisiones se debe a que el tratamiento de aguas residuales implica un esquema operacional complejo que combina procesos físicos, químicos y biológicos,

organizados en dos líneas principales: agua y lodos (Bosstech., 2024). En la línea de agua, las etapas iniciales, como el pretratamiento, se encargan de la eliminación de los sólidos grandes y medianos mediante desbaste (rejas de diferentes tamaños), se separan las arenas y partículas no orgánicas con sistemas de desarenado (flujos horizontales, aireados o de vórtice), y se eliminan las grasas y espumas flotantes. En el tratamiento primario, se reducen los sólidos en suspensión y algo de materia orgánica mediante decantación, flotación o tratamientos fisicoquímicos (coagulación y floculación) (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, 2020); estas fases, aunque cruciales para la calidad del efluente, consumen energía de forma significativa, generando emisiones indirectas de CO₂ asociadas al uso de electricidad (Comisión Nacional del Agua - México, 2015, pp. 51–52).

Seguidamente, el tratamiento secundario se enfoca en la eliminación de la contaminación orgánica e inorgánica a través de procesos biológicos, como los fangos activados, lechos bacterianos y estanques de estabilización, donde los microorganismos transforman la materia en sólidos sedimentables. El tratamiento terciario complementa el proceso con la eliminación de nutrientes (nitrógeno y fósforo) para evitar la eutrofización, y mejora la calidad del efluente mediante desnitrificación, nitrificación y filtración, permitiendo su reutilización. Finalmente, el agua tratada se vierte en un medio receptor (río, mar, etc.), tras pasar por una posible desinfección (cloración, UV, ozonización) a fin de eliminar agentes patógenos, o se reutiliza en actividades como riego agrícola o uso industrial (Del Río Gamero, 2018, pp. 30–33).

Actualmente, este proceso de tratamiento de aguas representa alrededor del 3% del consumo eléctrico en los países desarrollados, y en muchos casos el proceso suele tener un bajo desempeño, con una eficiencia energética inferior al 50%, lo que conlleva un alto consumo de energía y genera considerables emisiones de gases de efecto invernadero (European Commission - CORDIS, 2019, p. 1). Anudado lo expuesto, J. Xu et al., p. (2017, p. 2) señalan que las operaciones de bombeo, aireación y tratamiento químico suelen ser las áreas críticas de consumo de la electricidad en estos sistemas de depuración, lo que se traduce en emisiones de carbono derivadas de este consumo, que representan entre el 38% y el 50% del total de las emisiones de gases de efecto invernadero en las PTAR. En países como Estados Unidos, las estaciones de tratamiento consumen aproximadamente el 4 % de la energía eléctrica nacional, mientras que, en China, aunque el consumo es menor debido a estándares de depuración más flexibles, las plantas están en constante expansión y actualización para poder cumplir con regulaciones más estrictas, lo que aumenta su demanda energética.

En consecuencia, es claro el impacto global de las PTAR, el cual se refleja en la considerable proporción de emisiones totales de GEI. Según estimaciones realizadas a través del Greenhouse

Gas Protocol y compiladas por X. Xu & Eng, (2011, p. 13), estas instalaciones representan aproximadamente el 3 % de las emisiones totales de carbono en la sociedad, cifra que también ha sido confirmada con posterioridad por Wang et al., p. (2023, p. 2). Para el caso de Colombia, y conforme con la Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático del país presentada ante la Convención Marco de las Naciones Unidas, el tratamiento de aguas residuales, tanto domésticas como industriales, representa aproximadamente el 4% de las emisiones nacionales de gases de efecto invernadero (Gobierno de Colombia, 2022, p. 91). En este sentido, existe una creciente tendencia a reducir las emisiones, lo que está impulsando un replanteamiento de los procesos operativos en las PTAR y fomentando el desarrollo de tecnologías más sostenibles, como sistemas autosuficientes en energía y el uso de fuentes renovables (J. Xu et al., 2017, p. 6).

Finalmente, aunque las PTAR son esenciales para la protección de los recursos hídricos, también es cierto que su operación contribuye significativamente a las emisiones de GEI. Sin embargo, mediante la implementación de estrategias como la mejora de la eficiencia energética, la captura y reutilización de biogás, o la adopción de energías renovables, es posible mitigar este impacto y avanzar hacia un modelo más sostenible (Gutiérrez Jaber, 2024); en consonancia es procedente precisar que, los sistemas de tratamiento de aguas residuales, tanto domésticas como industriales, tienen el potencial de reducir las emisiones de estos gases nocivos al aumentar la cantidad de agua tratada, lo cual, a su vez, minimiza las emisiones que se producirían si dichas aguas no fueran tratadas adecuadamente antes de su descarga (Gobierno de Colombia, 2022, p. 93).

6.4 Enfoques globales para la medición de la huella de carbono

La huella de carbono se define como la totalidad de gases de efecto invernadero (GEI) emitidos directa o indirectamente por un individuo, organización, evento o producto. El enfoque de su medición es clave para identificar fuentes de emisiones, establecer estrategias de disminución y avanzar hacia el cumplimiento de objetivos de sostenibilidad ambiental. Para lograr mediciones confiables, diversos estándares internacionales y metodologías ofrecen marcos estructurados que garantizan la precisión, comparabilidad y transparencia de los datos (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, 2024, p. 6). A continuación, se exponen algunas de las principales normas y modelos que son actualmente aplicables:

- **GHG Protocol:** El Protocolo de Gases de Efecto Invernadero, creado por el World Business Council for Sustainable Development - WBCSD y el World Resources Institute - WRI, es uno de los estándares más utilizados para la medición y reporte de emisiones

de gases de efecto invernadero. Este protocolo proporciona lineamientos prácticos y herramientas para elaborar inventarios confiables de emisiones, clasificándolas en tres alcances: emisiones directas o de alcance 1, emisiones indirectas por energía adquirida o de alcance 2 y otras emisiones indirectas o de alcance 3. Su compatibilidad con las directrices del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático - IPCC y su capacidad de adaptación a diferentes necesidades regulatorias y de mercado lo posicionan como un referente esencial en la gestión estratégica de emisiones (World Resources Institute, 2004).

- **ISO 14064:** La normativa internacional de cuantificación y gestión de emisiones ISO 14064-1, es desarrollada por la Organización Internacional de Normalización (ISO), la cual es un estándar ampliamente reconocido que aborda la cuantificación, monitoreo y reporte de emisiones de GEI a nivel organizacional. Su estructura permite a las organizaciones identificar las fuentes de emisiones, establecer límites claros y adoptar un enfoque sistémico de mejora continua, promoviendo la eficiencia energética y la sostenibilidad ambiental de las organizaciones en la lucha contra el cambio climático (International Dynamic Advisors, 2020).

- **PAS 2050:** La norma PAS 2050, fue desarrollada por el British Standards Institution, y se centra en la cuantificación de las emisiones de GEI a lo largo del ciclo de vida de productos y servicios. Este estándar ofrece un marco para evaluar las cadenas de suministro mediante un enfoque sistemático que distingue entre ciclos de vida orientados a empresas (B2B) y ciclos orientados al consumidor final (B2C). Aunque su alcance principal es la evaluación de emisiones, también promueve la transparencia y la identificación de oportunidades para la reducción de impactos ambientales (Asociación Española para la Calidad [AEC], 2024; Solano Quesada & Ortiz Malavassi, 2016, pp. 4–6).

- **PAS 2060:** La Norma PAS 2060 es una extensión de la PAS 2050, enfocada específicamente en la neutralidad de carbono. Este estándar guía a las organizaciones en el cálculo, reducción y compensación de emisiones, proporcionando un marco para alcanzar y demostrar la neutralidad. Incluye requisitos específicos para declarar intenciones y validar compromisos, fomentando la implementación de estrategias

integrales que aborden tanto la mitigación como la compensación de emisiones (Romero Pereira et al., 2020, pp. 5–6).

- **Bilan Carbone:** Esta metodología fue desarrollada por la Agencia de Medio Ambiente y Energía de Francia - ADEME, se destaca por su enfoque integral para estimar la huella de carbono y su compatibilidad con normas internacionales como la ISO 14064 y el GHG Protocol. Este marco metodológico permite identificar y cuantificar emisiones en diversos sectores, desde industrias hasta servicios públicos, y aunque inicialmente concebida para el contexto francés, su flexibilidad la hace aplicable a nivel global, facilitando la evaluación de emisiones en distintos contextos organizacionales (Ihobe & Gobierno Vasco, 2013, p. 18).

Conforme a lo expuesto, la huella de carbono se presenta como un indicador de sostenibilidad clave, al permitir evaluar cómo una actividad, producto, evento o entidad impacta el cambio climático a lo largo de su ciclo de vida. En este sentido, se constituye en una herramienta fundamental para medir, reducir y neutralizar las emisiones de gases de efecto invernadero, contribuyendo de manera directa a mitigar los efectos del cambio climático (International Dynamic Advisors, 2020, p. 1).

6.5 Factores que influyen en la huella de carbono de las PTARs.

La huella de carbono de las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) es un aspecto crítico en la evaluación de su impacto ambiental. Entre los factores influyentes se encuentran la cantidad de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), el consumo de energía, la eficiencia energética, el uso de productos químicos y la gestión de lodos. Según Grillenwater (2008), las PTAR son responsables principalmente de emisiones significativas de metano (CH_4) y óxido nitroso (N_2O), ambos con un potencial de calentamiento global (PCG) mucho mayor que el del CO_2 . En algunas cuencas, como la del río Bogotá, el CH_4 puede representar hasta el 82 % de las emisiones (Bohórquez, 2020).

6.5.1 Variables Críticas

La cantidad de GEI emitidos por las PTAR es un indicador clave de su huella de carbono. Investigaciones han demostrado que las operaciones y los procesos anaerobios pueden generar volúmenes significativos de CH_4 si no se gestionan adecuadamente (Paredes, Güereca, & Noyola, 2018). En Colombia, se ha observado que las emisiones combinadas de

CH₄ y CO₂ constituyen más del 90 % del total de GEI generados por estas plantas (Bohórquez, 2020), lo que evidencia la necesidad de implementar tecnologías y prácticas que minimicen estas emisiones.

El consumo energético es uno de los factores críticos. Mejorar la eficiencia energética puede reducir hasta un 30 % el consumo eléctrico asociado al funcionamiento de las plantas (SEDAPAL, 2021), lo que se traduce en un tratamiento más sostenible y eficiente.

El tipo y la cantidad de productos químicos, así como el uso de combustibles fósiles, impactan de manera significativa la huella de carbono, dado que su producción y consumo pueden incrementar las emisiones totales (Paredes, Güereca, & Noyola, 2018). Desde esta perspectiva, resulta esencial seleccionar insumos y fuentes energéticas que minimicen el impacto ambiental sin comprometer la calidad del tratamiento.

La gestión de lodos constituye otro factor determinante, ya que una disposición inadecuada puede incrementar la liberación de emisiones a la atmósfera (Paredes, Güereca, & Noyola, 2018). Una gestión adecuada de estos procesos, que considere también las implicaciones logísticas asociadas, resulta imprescindible para mitigar la huella de carbono.

6.5.2 Factores adicionales

Los sistemas de tratamiento varían según la tecnología; los sistemas aerobios, por ejemplo, pueden generar más CH₄ si no se manejan apropiadamente (Paredes, Güereca, & Noyola, 2018). Además, el IPCC proporciona directrices para estimar estas emisiones basándose en el consumo y el tipo de tecnología (SEDAPAL, 2021), lo cual es fundamental para evaluar el impacto real y diseñar estrategias de mitigación.

El PCG mide el impacto relativo de los diferentes GEI a lo largo de 100 años; por ejemplo, el CH₄ es ~21 veces y el N₂O ~310 veces más potente que el CO₂ (IPCC, 2007). Esto refuerza la necesidad de focalizar las acciones en los gases de mayor impacto potencial.

En este sentido, los factores críticos relacionados con la huella de carbono en las PTAR son complejos e interdependientes. La evaluación continua y la mejora en la gestión energética y química son esenciales para reducir los impactos ambientales del sector.

6.6 Estrategias de mitigación: Buenas prácticas para reducir la huella de carbono en las PTAR

Reducir la huella de carbono en las PTAR es clave para mitigar su impacto ambiental. Las estrategias disponibles incluyen la optimización de fuentes de emisiones, la eficiencia en el uso de productos químicos, la integración de energías limpias y la mejora energética. Estas

prácticas no solo impulsan la sostenibilidad, sino también beneficios económicos a largo plazo. Paredes, Güereca & Noyola (2018) destacan que la aplicación de tecnologías adecuadas y la gestión eficiente son fundamentales para reducir significativamente las emisiones de GEI.

Una estrategia central es identificar y controlar las fuentes de emisión mediante un diseño y operación optimizados, complementados con monitoreo continuo para detectar fugas o ineficiencias. La captura y aprovechamiento del biogás generado en procesos anaerobios puede reducir sustancialmente las emisiones de CH₄ (Myhre, 2013). Además, se recomienda realizar auditorías energéticas periódicas para identificar oportunidades de mejora (Paredes, Güereca, & Noyola, 2018).

La selección de productos químicos menos contaminantes y su dosificación eficiente es clave. Capacitar al personal contribuye a evitar sobredosis con el uso de los mismos y a reducir costos operativos (Grillenwater, 2008). También pueden emplearse tecnologías alternativas, como sistemas electroquímicos (Fayez, 2011).

La integración de energías renovables (solar, eólica, biogás) en las operaciones de las PTAR reduce significativamente la dependencia de combustibles fósiles. Por ejemplo, los paneles solares pueden cubrir parte del consumo energético (SEDAPAL, 2021), y el biogás puede ser utilizado como fuente energética interna (Paredes, Güereca, & Noyola, 2018). Esto mejora la sostenibilidad y genera ahorros.

El uso de combustibles más limpios (biogás, hidrógeno verde, gas natural comprimido) ayuda a reducir las emisiones de CO₂. Según el Ministerio de Vivienda (2021), la transición del gas natural al biogás es viable, y el hidrógeno verde es prometedor como solución libre de carbono (Chai, 2015).

La renovación tecnológica es esencial: sistemas de aeración de bajo consumo, bombas eficientes y tecnologías avanzadas (membranas, reactores de lecho móvil) pueden reducir entre un 20 % y 30 % el consumo energético y emisiones (López, 2020). El uso de sistemas inteligentes de monitoreo y control también optimiza los procesos (García, 2021).

Adicionalmente, el uso de luminarias LED y sistemas automatizados ayuda a gestionar el consumo energético en tiempo real (Paredes, Güereca, & Noyola, 2018). La valorización de residuos, mediante la reutilización de biosólidos o su conversión a biogás, promueve la economía circular y ofrece beneficios ambientales y económicos (CONAGUA, 2016).

Conforme con lo expuesto, las estrategias de mitigación deben adoptarse de forma integral, combinando tecnologías avanzadas y prácticas operativas eficientes, para lograr un impacto ambiental y económico positivo a largo plazo.

6.7 Mecanismos de compensación de emisiones.

La compensación de emisiones permite mitigar el impacto ambiental generando reducciones equivalentes de CO₂ en otros lugares. Los bonos y créditos de carbono se utilizan para financiar proyectos ambientales que contribuyen a neutralizar CO₂ (ClimateTrade, 2023) y también para fomentar el desarrollo sostenible y la justicia social (Bioflich, 2023).

Estos créditos representan una tonelada métrica de CO₂ evitada o removida, y se certifican según estándares internacionales verificados por entidades acreditadas (Pole, 2023). Los mercados regulado y voluntario ofrecen diferentes vías para su adquisición (EOS Data Analytics, 2023), ayudando a las empresas a cumplir objetivos ambientales y a mejorar su imagen corporativa.

La reforestación y el secuestro de carbono permiten absorber CO₂ mediante el crecimiento de árboles, restaurar ecosistemas y mejorar la biodiversidad, siempre con la participación comunitaria (Carbón Neutral Plus, 2023).

Invertir en proyectos renovables (solar, eólica, biogás) también genera créditos de carbono al evitar emisiones, y promueve empleo e innovación local (Paredes, Güereca, & Noyola, 2018). Por ejemplo, la energía eólica podría evitar hasta 3,3 Gt CO₂ para 2030 (Global Wind Energy Council, 2021), lo que evidencia su gran potencial contra el cambio climático.

Estas inversiones están alineadas con el Acuerdo de París y el objetivo de limitar el aumento de la temperatura a 1,5 °C (IPCC, 2007). Asimismo, pueden ser económicamente rentables, dada la creciente demanda de energía limpia.

Por último, la eficiencia energética y la valorización de residuos (biosólidos o biogás) optimizan el uso de recursos y cierran ciclos productivos, favoreciendo la economía circular (Grillenwater, 2008; Paredes, 2016); así, la compensación mediante créditos, proyectos forestales y renovables, y buenas prácticas operativas, configuran un enfoque integral y efectivo para mitigar el impacto ambiental del sector del saneamiento.

6.8 El rol dual de las PTAR y las tipologías de emisiones de GEI asociadas

En consonancia con lo expuesto por Karakas et al.(2024, p. 1) en su artículo "*Carbon footprint analysis of advanced biological wastewater treatment plant*"; las PTAR tienen un papel dual en el cambio climático: por un lado, como generadoras de emisiones, y por otro, como posibles mitigadoras a través de tecnologías avanzadas; razón por la cual es crucial identificar y estudiar las fuentes de GEI en cada tipo de tratamiento, con el fin de mejorar su desempeño y mitigar los efectos negativos de sus operaciones sobre el cambio climático, toda vez que este es el punto de partida para hacer que estas estaciones depuradoras sean lo más sostenibles

posible (Boiocchi et al., 2023, p. 275). En este contexto de gestión ambiental, la cuantificación de la huella de carbono en las plantas de tratamiento de aguas residuales se constituye en un indicador clave para evaluar su impacto, especialmente en aquellas que procesan efluentes con alta carga orgánica, pues la remoción y biodegradación de la materia orgánica impactan directamente en la emisión de GEI (Cristancho Montenegro et al., 2019, pp. 1–3).

Este proceso de medición, como lo expuso De Haas. (2004, pp. 5–7) en su artículo sobre gestión de aguas residuales: Evaluación de riesgos y triple resultado, presentado en la conferencia de la Agencia para la Protección Ambiental del Gobierno de los Estados Unidos [EPA], se lleva a cabo mediante metodologías que consideran las diferentes fuentes de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), Directas, Indirectas y Derivadas. Las emisiones directas provienen de los procesos de tratamiento de aguas residuales en los que se produce la oxidación de la materia orgánica y la conversión de compuestos nitrogenados, incluyendo gases como el óxido nitroso (N_2O), el metano (CH_4) y el dióxido de carbono (CO_2), los cuales se generan durante el tratamiento biológico de las aguas residuales y lodos, liberándose posteriormente a la atmósfera (Li et al., 2023, pp. 5–8). Por otro lado, según Maktabifard et al. (2022, p. 3) las emisiones indirectas se asocian al consumo de energía en diversos sistemas electromecánicos, como equipos de mezcla, aireación, bombeo y deshidratación, uso de productos químicos, el consumo de energía térmica y el uso de combustibles fósiles para efectos de logística y transporte. Mientras que de acuerdo con Bosco Mofatto et al. (2024, pp. 2–3), las emisiones derivadas o involucradas, son aquellas que provienen de fuentes por fuera de la gestión directa de la PTAR, como son la incineración de lodos y la disposición final de los efluentes, procesos que a pesar de no desarrollarse in situ también contribuyen a las emisiones de GEI de los sistemas de saneamiento, según lo confirmaron Boiocchi et al. (2023, pp. 276–277) en su investigación “**A Study on the Carbon footprint Contributions from a large Wastewater Treatment Plant**” adelantada en una gran estación de tratamiento de aguas residuales en el centro de Italia.

6.9 Metodologías de medición de la huella de carbono en PTAR con afluentes orgánicos

El análisis y medición de la huella de carbono han sido abordados mediante diversas metodologías y protocolos estandarizados a nivel internacional (Ihobe & Gobierno Vasco, 2013, p. 5). Entre los enfoques más utilizados en plantas de tratamiento de aguas residuales se encuentran los métodos basados en factores de emisión (Karakas et al., 2024; Li et al., 2023), la evaluación del ciclo de vida (LCA, por sus siglas en inglés) (He et al., 2023, p. 2; Wang et al.,

2023, p. 3) y los modelos empíricos de optimización. Estos últimos, según los estudios de Caniani et al. (2015, p. 2) y Kim et al. (2015, p. 47), han demostrado ser herramientas eficaces para la cuantificación de emisiones a partir de parámetros operativos. Además, Abyar & Nowrouzi (2023, p. 2) confirman que estos modelos pueden aplicarse exitosamente en plataformas de simulación, como GPS-X 8.0 y otros productos de Hydromantis, permitiendo estimar las emisiones sin la necesidad de recurrir a modelados complejos.

Uno de los enfoques más comunes para estimar las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en plantas de tratamiento de aguas residuales es el uso de factores de emisión, un método ampliamente respaldado por las Directrices IPCC 2006 para Inventarios Nacionales de GEI. Este enfoque ha sido aplicado en numerosos estudios debido a su accesibilidad y facilidad de implementación (Karakas et al., 2024, p. 3). Por ejemplo, Qiu et al. emplearon estos factores para analizar las emisiones en cinco grandes PTARs de China, examinando su variabilidad espacial y temporal con el fin de identificar posibles patrones (Li et al., 2023, pp. 1–2). Sin embargo, a pesar de su practicidad, este método ofrece estimaciones generales que pueden carecer de precisión cuando se enfrentan a condiciones operativas cambiantes o específicas de cada planta.

La estandarización internacional ha sido clave para establecer marcos metodológicos en la medición de la huella de carbono. Normativas como el GHG Protocol, ISO 14064/67 y PAS 2050 ofrecen lineamientos reconocidos para su cuantificación, destacándose el enfoque de ciclo de vida y la contabilidad de emisiones en productos, cadenas de valor y proyectos (Boiocchi et al., 2023, p. 276).

El análisis del ciclo de vida [LCA] ha sido identificado como una metodología fundamental para la evaluación de las emisiones de GEI en las PTAR. Este enfoque permite evaluar no solo las emisiones directas e indirectas, sino también otros impactos ambientales como el agotamiento de recursos, la toxicidad humana y la acidificación del medio ambiente (Wang et al., 2024, p. 3). Dado que el LCA proporciona una visión integral de los impactos ambientales, se ha convertido en un referente en la medición de la huella de carbono. En este contexto, herramientas como SimaPro® (v.9.3.0.3) y la metodología ReCiPe 2016 Midpoint (I) han sido aplicadas para evaluar las emisiones de GEI en el ciclo de vida de las PTAR. Sin embargo, aunque el LCA ofrece una perspectiva detallada, su aplicación puede ser compleja y demandar una alta cantidad de datos específicos (He et al., 2023, p. 3).

Para complementar las limitaciones de los factores de emisión y el LCA, se han desarrollado modelos empíricos que calculan las emisiones de GEI considerando parámetros operativos y su variabilidad. Por ejemplo, Monteith et al., p. (2005, p. 7) propusieron modelos estáticos que

permiten estimar una tasa fija de emisiones CO₂-equivalente por metro cúbico tratado en un período de tiempo determinado, en función de parámetros operacionales estándar y sin evolución temporal, aunque su aplicación solo proporciona una visión general sin analizar en detalle cada fuente de emisión dentro de la planta (Li et al., 2023, p. 2). No obstante, otros modelos empíricos dinámicos como los enfoques usados por Flores-Alsina et al., p. (2012, p. 1) han demostrado su utilidad al incorporar factores como reacciones microbianas y la demanda energética, permitiendo una estimación más precisa de las emisiones tanto in situ como fuera del sitio (Abyar & Nowrouzi, 2023, p. 2).

Mientras que los modelos empíricos permiten una aproximación predictiva, la monitorización directa de emisiones se plantea como una estrategia esencial para la evaluación precisa de las emisiones de GEI en PTAR. Este método, complementado con modelado matemático, permite identificar las principales fuentes de emisiones y evaluar la efectividad de medidas de disminución (Abyar & Nowrouzi, 2023, p. 6).

De manera complementaria, el análisis de la huella de carbono en PTAR también se ha enriquecido mediante la construcción de escenarios basados en datos recopilados de diversas tecnologías de tratamiento y disposición. Estos escenarios permiten identificar áreas críticas de emisión bajo distintas condiciones operativas, y su aplicación, fundamentada en datos y metodologías validadas, contribuye al rigor del análisis (Sun et al., 2024, p. 2).

La medición y análisis de la huella de carbono en PTAR abarca diversas metodologías, cada una con características y aplicaciones específicas. Los factores de emisión, ampliamente utilizados por su simplicidad y facilidad de aplicación, ofrecen estimaciones generales, pero pueden carecer de precisión en escenarios con alta variabilidad operativa (Marinelli et al., 2021, p. 2). El Análisis de Ciclo de Vida (LCA), aunque más complejo y demandante en términos de datos, proporciona una visión integral de los impactos ambientales a lo largo de toda la cadena de valor (Ihobe S.A, 2019, p. 4). Los modelos empíricos, al incorporar parámetros operativos y reacciones bioquímicas, permiten un cálculo más ajustado a condiciones específicas de cada planta (Caniani et al., 2015, p. 3), mientras que la monitorización directa de emisiones se posiciona como la estrategia más precisa, aunque su implementación conlleva mayores costos y requerimientos tecnológicos (ORI ALNITAK., 2025, p. 3). La elección del método más adecuado dependerá del nivel de detalle requerido, los recursos disponibles y el objetivo específico del análisis, ya sea cumplimiento normativo, optimización operativa o reducción estratégica de emisiones.

6.10 Gestión de Proyectos Sostenibles para la Reducción de la Huella de Carbono

En el contexto actual de emergencia climática, la sostenibilidad ha adquirido un rol estratégico en la gestión de proyectos, especialmente en sectores con alta demanda energética. La gestión de proyectos sostenibles se presenta no solo como una respuesta ética a los desafíos medioambientales, sino como una herramienta esencial para asegurar la viabilidad a largo plazo de las organizaciones y mitigar su impacto ecológico (González et al., 2023, p. i; Institute for Project Management, 2025). Este enfoque implica una evolución del paradigma tradicional centrado en el cumplimiento de plazos, costos y alcance, hacia uno más amplio que integra las dimensiones ambiental, social y económica durante todo el ciclo de vida del proyecto (Carboni et al., 2018, p. 12; GPM LATAM, 2025; Omamode et al., 2024, p. 656). La importancia estratégica de este enfoque radica en su capacidad para alinear los objetivos organizacionales con los compromisos globales de sostenibilidad, como la reducción de la huella de carbono. En este sentido, marcos como PRiSM [Projects integrating Sustainable Methods] han sido desarrollados para ofrecer estructuras metodológicas que incorporen criterios sostenibles desde la concepción hasta el cierre del proyecto (Carboni et al., 2018, p. 29). El Estándar P5 —Personas, Planeta, Prosperidad, Proceso y Producto— sirve como base para evaluar el impacto integral de los proyectos, promoviendo así una toma de decisiones que contemple el bienestar social, la salud ambiental y el crecimiento económico equitativo (González et al., 2023, p. 4).

Los beneficios derivados de la implementación de la gestión de proyectos sostenibles son múltiples y tangibles. Desde el punto de vista ambiental, se facilita la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero mediante estrategias como el diseño energético eficiente, la selección de materiales de baja emisión, y la gestión de residuos bajo principios de economía circular (Carboni et al., 2018, p. 109; Institute for Project Management, 2025). Económicamente, estas prácticas pueden generar ahorros a largo plazo mediante la optimización del uso de recursos, el acceso a incentivos fiscales, y la minimización del riesgo regulatorio. Socialmente, las organizaciones mejoran su reputación, fortalecen las relaciones con sus partes interesadas y aumentan su atractivo para inversores y consumidores conscientes de la sostenibilidad (Institute for Project Management, 2025, pp. 664–667; Omamode et al., 2024).

Sin embargo, la adopción de este enfoque no está exenta de desafíos. Uno de los principales obstáculos radica en los costos iniciales más elevados asociados a tecnologías limpias, materiales sostenibles y procesos innovadores (Institute for Project Management, 2025). A esto se suma la resistencia al cambio dentro de las organizaciones, particularmente

por parte de equipos acostumbrados a enfoques convencionales. Además, persiste una limitada capacidad para cuantificar con precisión los beneficios ambientales y sociales, lo cual dificulta la toma de decisiones informadas y la justificación de estas prácticas ante actores clave. La gestión de proyectos sostenibles enfrenta desafíos significativos, como la necesidad de adaptarse a regulaciones cambiantes [Evolving Regulations], lo que puede obstaculizar la homogeneidad de estándares en la industria. Superar estas y otras barreras identificadas, tales como la resistencia al cambio o los costos iniciales elevados, requiere la implementación de políticas claras, una formación continua y un liderazgo comprometido con la integración de prácticas sostenibles (Institute for Project Management, 2025).

En suma, la gestión de proyectos sostenibles constituye un pilar fundamental para afrontar la crisis climática desde la práctica organizacional. Su integración efectiva, aunque desafiante, ofrece una oportunidad invaluable para transformar los modelos de producción y operación hacia esquemas más resilientes, eficientes y respetuosos con el entorno. Además, esta perspectiva promueve una alineación directa con los Objetivos de Desarrollo Sostenible, al considerar de manera integral los impactos ambientales, sociales y económicos a lo largo del ciclo de vida del proyecto, y al incorporar prácticas como la gestión sostenible de recursos, la participación de las partes interesadas y la gestión de riesgos (Lawrence, 2024, p. 44). En este sentido, la medición y reducción de la huella de carbono, en este marco, no es solo una métrica ambiental, sino un indicador estratégico del compromiso organizacional con un futuro verdaderamente sostenible (Institute for Project Management, 2025).

6.11 Factores organizacionales que impulsan estrategias sostenibles basadas en proyectos

En el ámbito de la gestión sostenible, se reconoce que la capacidad de una organización para adoptar estrategias basadas en proyectos depende en gran medida de factores internos como el liderazgo, la cultura, la disponibilidad de recursos y los sistemas de gobernanza. La literatura especializada advierte que implementar proyectos de sostenibilidad no es fácil y requiere estructuras organizacionales preparadas para integrar objetivos ambientales y sociales en la práctica cotidiana (Carboni et al., 2018, p. vii; González et al., 2023, p. 5). En este contexto, el Modelo EFQM constituye un referente ampliamente reconocido para analizar la capacidad organizacional de generar valor sostenible a partir de la integración de variables que integran liderazgo, estrategia, cultura, recursos, procesos y resultados (European Foundation

for Quality Management, 2024, pp. 6–10). Este marco concibe la sostenibilidad no como un añadido, sino como un elemento estructural que permite a las organizaciones mantener un desempeño de largo plazo mientras responden a las expectativas ambientales, sociales y económicas de sus grupos de interés (Calvo Maguregi, 2020, p. 8).

En este sentido, diversos estudios señalan que la adopción de estrategias sostenibles se facilita cuando existen factores internos habilitantes, los cuales pueden agruparse en seis variables derivadas de las tres dimensiones clave del modelo EFQM. Primero, la dirección basada en el liderazgo, que se traduce en el compromiso explícito de la alta dirección con los objetivos climáticos y la capacidad de orientar el cambio organizacional hacia la sostenibilidad (EFQM, 2024, p. 20). Segundo, la dirección con enfoque en la estrategia, que alude a la coherencia entre la visión institucional y las metas ambientales, garantizando que los proyectos y operaciones se enmarquen en una hoja de ruta estratégica de valor sostenible (EFQM, 2024, pp. 21–23).

En tercer lugar, se identifica la ejecución fomentada por la cultura organizacional, entendida como la disposición organizacional para adoptar nuevas prácticas basadas en la innovación, el pensamiento disruptivo y la superación de resistencias internas, elementos cruciales en la transición hacia operaciones fundadas en modelos de negocios responsables (EFQM, 2024, p. 38).

En cuarto lugar, se tiene a la ejecución basada en la gestión de recursos, que contempla la disponibilidad de capacidades técnicas, humanas y financieras para implementar medidas con enfoque sostenible (EFQM, 2024, p. 39). A ello se suma la ejecución sustentada en procesos, donde la integración de criterios ambientales en la operación permite que las estrategias se materialicen en la práctica diaria (EFQM, 2024, p. 38).

Finalmente, en el bloque de resultados conforme con la autoevaluación, se enfatiza la necesidad de medir percepciones, aprendizajes y mejoras continuas, de modo que la organización no solo despliegue proyectos sostenibles, sino que evalúe de manera periódica su efectividad y capacidad de generar valor compartido (EFQM, 2024, pp. 8–9).

En línea y de manera complementaria, los estándares internacionales de gestión de proyectos sostenibles —como la Guía GPM y el Estándar P5— refuerzan esta lógica al destacar que los proyectos deben concebirse como instrumentos de cambio que integren variables en análisis de enfoques basados en personas, planeta, prosperidad, procesos y productos [P5], asegurando la coherencia entre el diagnóstico organizacional y la

implementación de medidas con enfoque sostenible (Carboni et al., 2018, p. 13; González et al., 2023, pp. 4–7).

Bajo ese entendido, los factores organizacionales derivados del modelo EFQM y articulados con los estándares de gestión sostenible proporcionan el andamiaje necesario para que una empresa no solo formule, sino que también ejecute con éxito estrategias basadas en proyectos que transformen los desafíos globales en oportunidades para un futuro sostenible (EFQM, 2024, p. 3).

6.12 Selección y Priorización de Proyectos en Función de Objetivos de Reducción de Emisiones

La selección y priorización de proyectos con enfoque en sostenibilidad se ha convertido en una necesidad estratégica para las organizaciones que buscan reducir su impacto ambiental y avanzar hacia objetivos climáticos ambiciosos, como la neutralidad en carbono (Institute for Project Management, 2025). En este contexto, la gestión de portafolio de proyectos (Project Portfolio Management, PPM) se posiciona como una herramienta clave para alinear las iniciativas corporativas con los compromisos institucionales de reducción de emisiones y desarrollo sostenible. El PPM permite canalizar de manera eficaz los recursos hacia proyectos que no solo generan beneficios económicos, sino que también maximizan el impacto ambiental positivo y responden a criterios de responsabilidad social y ambiental (Green Project Management, 2024).

El proceso de selección debe sustentarse en un conjunto de criterios integrados que consideren tanto el potencial cuantitativo como cualitativo de reducción de gases de efecto invernadero (GEI) (Institute for Project Management, 2025). Uno de los factores más determinantes es la capacidad del proyecto para reducir toneladas equivalentes de CO₂ (CO₂e) de manera medible y verificable, lo que exige la implementación de metodologías estandarizadas para la estimación de emisiones evitadas (WRI & WBCSD, 2005, p. 14,17). Esta evaluación técnica debe complementarse con un análisis de la alineación estratégica del proyecto con los planes corporativos de sostenibilidad, particularmente con metas basadas en la ciencia como las propuestas por la iniciativa Science Based Targets (SBTi), que aseguran la coherencia con los umbrales de temperatura establecidos por el Acuerdo de París (100% Renewables, 2022, p. 4; SBTi ©, 2025).

Además, la viabilidad técnica, económica y social del proyecto es un factor fundamental. Este criterio considera no solo la factibilidad operativa y los costos asociados, sino también los

beneficios financieros en el largo plazo y la aceptación por parte de las partes interesadas, incluyendo comunidades locales y reguladores (DNP, 2017, p. 25). En línea con enfoques como el de Projects Integrating Sustainable Methods (PRiSM), también deben valorarse los co-beneficios ambientales y sociales, tales como la mejora de la calidad del aire, la salud pública, la biodiversidad o la generación de empleo verde. Estos efectos sinérgicos fortalecen el valor integral de cada iniciativa y permiten tomar decisiones más equilibradas entre lo económico, lo ambiental y lo social (Carboni et al., 2018, pp. 12–14; González et al., 2023, pp. 1–2).

La priorización efectiva requiere, además, el uso de métricas e indicadores clave que apoyen la comparación entre proyectos. El coste por tonelada de CO₂e evitada es una de las métricas más utilizadas para evaluar la eficiencia económica de las opciones disponibles (Green Project Management, 2024). Asimismo, el retorno de inversión (ROI) que incorpora variables ambientales facilita una evaluación holística del valor generado (Iseazy, 2024). Otras métricas relevantes incluyen la intensidad de carbono (kg CO₂e por unidad de producción), que permite comparar la eficiencia relativa de distintos proyectos, y los indicadores clave de desempeño ambiental (KPIs), como el consumo de energía, los residuos generados o las emisiones por unidad funcional (Institute for Project Management, 2025; Leaf, 2024).

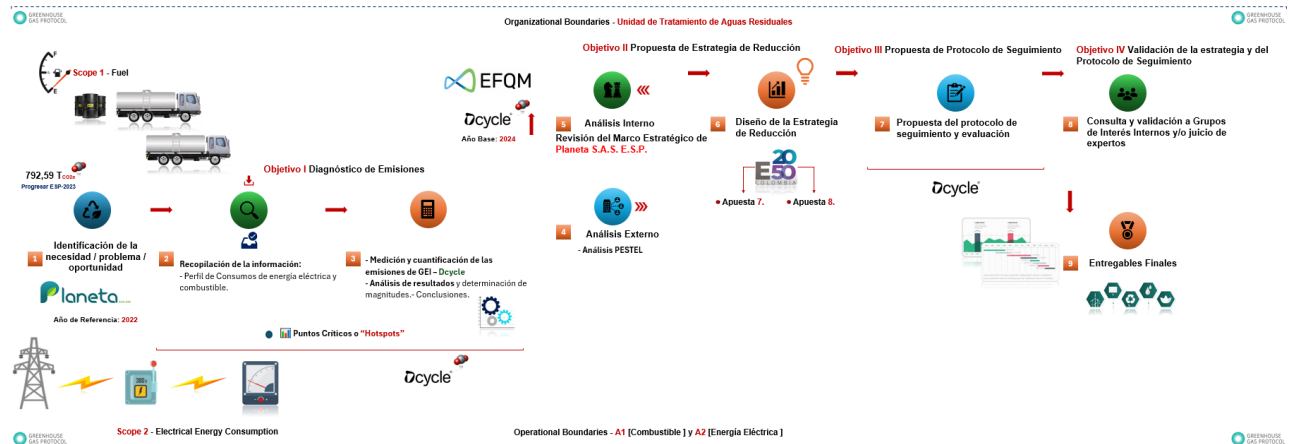
Herramientas de apoyo como las curvas de coste marginal de abatimiento (Marginal Abatement Cost Curve, MACC) ofrecen representaciones visuales que permiten priorizar proyectos según su rentabilidad y facilidad de implementación. Estas curvas ayudan a identificar opciones de “ganancia rápida” con alto impacto y bajo coste, así como iniciativas estructurales que, aunque más costosas, son esenciales para alcanzar reducciones sostenidas en el tiempo (Aligned Incentives, 2024). Complementariamente, el uso de matrices de priorización que combinan impacto potencial y complejidad operativa permite una clasificación estratégica y transparente de las iniciativas, facilitando la toma de decisiones informadas y sostenibles (Asana, 2025; Promethean, 2024).

En suma, incorporar criterios robustos y herramientas analíticas en la selección y priorización de proyectos es esencial para construir un portafolio que contribuya de manera efectiva a los objetivos climáticos de las organizaciones. La integración transversal de la sostenibilidad en las decisiones estratégicas del portafolio no solo mejora la eficiencia en el uso de los recursos, sino que fortalece la legitimidad institucional frente a sus grupos de interés y posiciona a la organización como un actor comprometido con la acción climática (Green Project Management, 2024; Institute for Project Management, 2025).

7. Diseño Metodológico

Figura 5

Secuencia metodológica para el diseño de la estrategia de reducción de la huella de carbono en la PTAR analizada.



Fuente: Elaboración propia con base en los objetivos específicos de la investigación, contemplando la lógica metodológica del estudio orientado al diseño de una estrategia de reducción de huella de carbono en el proceso de tratamiento de aguas residuales².

El diseño metodológico de este trabajo se estructura en una secuencia lógica de fases que articulan de manera directa los objetivos específicos propuestos para la investigación. Esta organización metodológica permite abordar el estudio de manera sistemática, asegurando la coherencia entre el diagnóstico inicial, el análisis contextual y organizacional, el diseño de la estrategia de reducción de emisiones, y la posterior formulación del protocolo de seguimiento y validación. Cada fase responde a una lógica progresiva que integra, de forma complementaria, insumos técnicos y organizacionales, orientados a la construcción de una propuesta de intervención pertinente y realista, fundamentada y contextualizada a las particularidades del proceso de tratamiento de aguas residuales desarrollado por PLANETA S.A.S E.S.P.

Tabla 2

Fases metodológicas del estudio y su correspondencia con los objetivos específicos

² **Nota:** Los logos del GHG Protocol, Dcycle, EFQM (European Foundation for Quality Management), Estrategia E2050 Colombia y PLANETA S.A.S E.S.P se incluyen con propósitos meramente ilustrativos y académicos, con el fin de representar las herramientas y categorías de análisis integradas en la metodología de esta investigación.

Fase metodológica	Descripción general	Objetivo específico asociado
Fase I. Diagnóstico de emisiones	Cuantificación de las emisiones GEI bajo control operacional [Alcances 1 y 2] y caracterización de los factores críticos del proceso de tratamiento de aguas residuales.	1
Fase II. Formulación de la estrategia	Diseño de la estrategia de reducción de huella de carbono, integrando análisis técnico, económico y de gestión organizacional.	2
Fase III. Diseño del protocolo de seguimiento	Propuesta de un protocolo de monitoreo que permita evaluar la efectividad y consistencia de la estrategia con base en indicadores verificables.	3
Fase IV. Validación técnica y gerencial	Evaluación de la viabilidad de la estrategia y del protocolo de seguimiento mediante juicio experto y coeficiente V de Aiken.	4

Fuente: Elaboración propia con base en los objetivos específicos de la investigación.

En este marco, la metodología adoptada se sustenta en un enfoque mixto, combinando técnicas de análisis cuantitativo y cualitativo que permiten comprender integralmente tanto la dimensión técnica de las emisiones como las condiciones institucionales que inciden en su gestión. A lo largo de cada fase, se aplicarán modelos de referencia y una plataforma certificada que proporcionan soporte metodológico y trazabilidad a los resultados obtenidos. A partir de esta lógica de construcción, el presente capítulo describe los componentes metodológicos específicos que orientan el desarrollo del estudio, incluyendo el tipo de investigación, los enfoques de análisis interno y externo, la caracterización de la población y muestra, así como las variables clave asociadas a los factores técnicos y organizacionales definidos para cada etapa.

7.1. Tipo de Investigación

La presente investigación se enmarca en el enfoque aplicado, dado que busca desarrollar una solución concreta a una problemática claramente definida en la empresa PLANETA S.A.S E.S.P. A diferencia de la investigación pura, cuyo interés principal radica en la generación de conocimiento teórico sin una aplicación inmediata, la investigación aplicada se orienta a resolver necesidades reales mediante la transferencia de conocimiento científico (Bernal Torres, 2010, p. 10; Duoc UC., 2024). En este caso, se busca diseñar una estrategia para

reducir la huella de carbono asociada al proceso de tratamiento de aguas residuales de la organización, lo que implica una articulación directa entre teoría y práctica, con miras a generar impactos positivos y sostenibles.

Desde la perspectiva del nivel de profundidad, y conforme a la clasificación propuesta por Dahnke (1986), el estudio se tipifica como una investigación descriptiva, en tanto pretende diagnosticar y caracterizar el estado actual del proceso de tratamiento de aguas residuales de la empresa, específicamente en lo que respecta a las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) generadas bajo control operacional. Estas incluyen, por un lado, las emisiones directas de alcance 1, derivadas del consumo de combustibles fósiles por la flota que transporta aguas residuales y lodos hasta la planta, y por otro, las emisiones indirectas de alcance 2, asociadas al consumo eléctrico adquirido para la operación del sistema de tratamiento en planta. Esta aproximación se alinea con lo propuesto por Hernández Sampieri et al., p. (1991, p. 71), en cuanto a que los estudios descriptivos examinan diferentes dimensiones del fenómeno, en este caso, circunscritas a las principales fuentes de emisión operativa directa e indirecta. Cabe señalar que, si bien el estudio integra elementos interpretativos, no corresponde a una investigación explicativa, ya que no busca establecer causas profundas del fenómeno; tampoco es exploratoria, dado que el problema ha sido claramente delimitado. Asimismo, no se configura como un estudio correlacional, puesto que no pretende medir relaciones estadísticas entre variables, sino fundamentar una propuesta de intervención estratégica coherente con el diagnóstico realizado.

En cuanto a la fuente y tratamiento de los datos, la investigación adopta un enfoque mixto, integrando técnicas tanto cuantitativas como cualitativas. Esta elección metodológica responde a la necesidad de abordar el objeto de estudio de forma integral, dada su complejidad e implicaciones organizacionales (Universidad Veracruzana, 2012, p. 12). Los datos cuantitativos se derivarán del análisis de las emisiones de Alcance 1 y 2 correspondientes al año 2024, estimadas con base en los perfiles de consumo de combustibles fósiles y energía eléctrica registrados por la empresa, utilizando para ello la plataforma certificada Dcycle. Los datos cualitativos se obtendrán mediante un instrumento de encuesta, acercamientos funcionales, la revisión documental y la observación de prácticas internas, lo que permitirá comprender los factores operativos que inciden en el fenómeno en estudio.

Desde el punto de vista del razonamiento lógico, el proceso investigativo se sustenta en una lógica deductiva, ya que parte de principios generales —como los postulados sobre gestión ambiental y mitigación de impactos climáticos— para su aplicación en un contexto particular

(Bernal Torres, 2010, p. 59), siendo este, para el presente estudio, el tratamiento de aguas residuales en PLANETA S.A.S E.S.P.

Finalmente, en cuanto a su temporalidad, el estudio se clasifica como transversal, dado que se ejecuta en un momento específico del tiempo, sin contemplar un seguimiento longitudinal en su etapa de análisis; sin embargo, sí se proyectará un protocolo de seguimiento posterior, el cual será recomendado a la empresa como parte de la propuesta de intervención.

7.2. Análisis externo

Para el desarrollo del diagnóstico externo, se empleará el análisis PESTEL como herramienta metodológica, dado que permite identificar, de manera estructurada, las variables del entorno macroeconómico que podrían incidir en la formulación y puesta en marcha de una estrategia empresarial (Amador-Mercado, 2022, pp. 1–2; Steffens, 2020, p. 5). Esta metodología resulta particularmente pertinente para el caso de PLANETA S.A.S E.S.P, al facilitar la exploración de factores externos que podrían representar riesgos u oportunidades en la implementación de medidas orientadas a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) bajo control operacional, particularmente aquellas asociadas al consumo de energía eléctrica en la planta de tratamiento [Alcance 2] y al uso de combustibles fósiles en las operaciones de transporte de aguas residuales [Alcance 1].

El análisis PESTEL comprende seis dimensiones fundamentales: Político, Económico, Social, Tecnológico, Ecológico y Legal (Steffens, 2020, pp. 11–14). En el contexto de esta investigación, se prevé que la aplicación del modelo permita identificar y clasificar variables críticas dentro de cada dimensión, las cuales podrán interpretarse como amenazas o como oportunidades para la adopción de una eventual estrategia de sostenibilidad en la empresa.

7.3. Análisis interno

El análisis interno de la presente propuesta de intervención se abordará mediante un enfoque metodológico combinado, que integrará dos componentes principales:

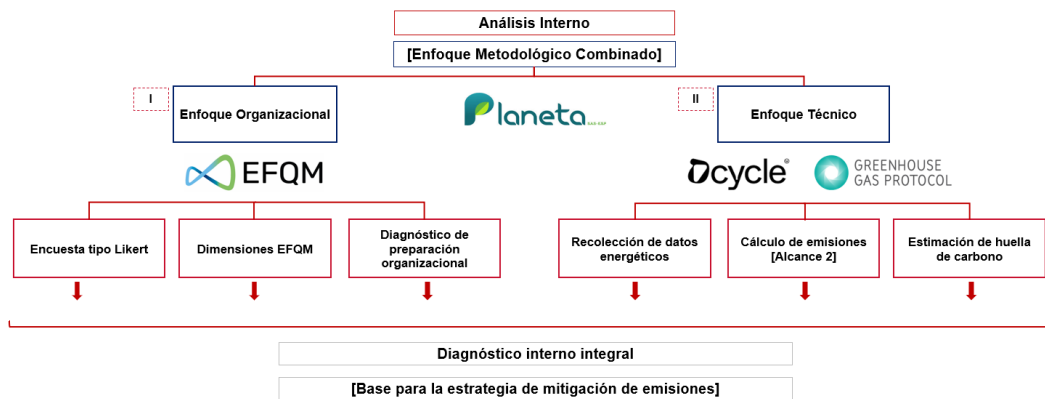
- Un instrumento de diagnóstico organizacional diseñado específicamente para este caso, tomando como referencia metodológica el Modelo EFQM 2025, y
- Un análisis técnico de cuantificación de emisiones a través de la plataforma Dcycle.

El modelo EFQM se empleará como marco estructural de referencia organizacional, y no como herramienta de aplicación directa, con el fin de asegurar un enfoque metodológico

consistente, alineado con los principios de excelencia organizacional y sostenibilidad, adaptado a la realidad operativa de PLANETA S.A.S E.S.P.

Figura 6

Enfoque combinado para el análisis interno: Integración del Modelo EFQM 2025 y la plataforma Dcycle.



Fuente: Elaboración propia basada en el diseño metodológico adaptado para el presente estudio, integrando el Modelo EFQM 2025 y la plataforma Dcycle para el análisis interno de PLANETA S.A.S E.S.P. ³

La elección del EFQM Model responde a su carácter integrador y a su capacidad para evaluar, desde una perspectiva sistémica, los factores organizacionales que determinan el desempeño sostenible y la transformación operativa. Según lo establece la Fundación Europea para la Gestión de la Calidad, el Modelo EFQM proporciona un marco conceptual que ayuda a las organizaciones a comprender su ecosistema, su propósito y cómo generar valor sostenible (European Foundation for Quality Management, 2024, p. 16). En este sentido, se adoptarán como referencia los criterios de evaluación relacionados con los bloques o ejes de Dirección, Ejecución y Resultados (EFQM, 2024, pp. 10–11), seleccionando como referente únicamente aquellos elementos del modelo que se consideren pertinentes para valorar el nivel de preparación de la organización frente a la eventual adopción de una estrategia de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero.

³ **Nota:** Los logos de PLANETA S.A.S E.S.P, EFQM (European Foundation for Quality Management), Dcycle y Greenhouse Gas Protocol (GHG Protocol) se incluyen con propósitos meramente ilustrativos y académicos, con el fin de representar las herramientas y enfoques metodológicos integrados en el análisis interno de esta investigación.

El instrumento de análisis interno se estructurará como una encuesta tipo Likert, orientada a captar percepciones y valoraciones de actores clave dentro de la organización, tales como líderes de proceso y representantes de la alta dirección. Las preguntas estarán agrupadas en torno a dimensiones organizacionales inspiradas en los criterios del modelo EFQM: liderazgo transformacional, alineamiento estratégico, cultura organizacional hacia la sostenibilidad, disponibilidad de recursos y gestión de procesos críticos (EFQM, 2024, pp. 20–21). Este enfoque permitirá identificar fortalezas y limitaciones en áreas que potencialmente pueden incidir en la capacidad organizacional para adoptar una estrategia de sostenibilidad operativa y ambiental.

La recolección de información se realizará mediante acercamientos funcionales con personal interno, quienes completarán el instrumento de manera voluntaria, garantizando la confidencialidad y el tratamiento ético de los datos. El análisis posterior de los resultados se llevará a cabo a través de una sistematización de tendencias por dimensión, orientada a reconocer el grado de alineación organizacional con los requerimientos asociados a la adopción de una estrategia de mitigación ambiental.

Paralelamente, y como eje metodológico concurrente dentro del diagnóstico interno, se realizará un análisis técnico de las emisiones actuales de gases de efecto invernadero de alcance 1 y 2, en relación con los aspectos operativos implicados en el proceso de tratamiento de aguas residuales desarrollado en planta. Para ello, se empleará la plataforma digital Dcycle, herramienta desarrollada conforme a los lineamientos del Greenhouse Gas Protocol, estándar internacional ampliamente reconocido para la medición y reporte de emisiones corporativas (Dcycle, 2025a). La estimación de la huella de carbono será ejecutada siguiendo los factores de emisión del IPCC Sixth Assessment Report (2023) y conforme a los principios de la norma ISO 14064, lo que otorga confiabilidad técnica y trazabilidad a los resultados. Así mismo, Dcycle cuenta con la verificación de TÜV Rheinland según la norma ISO 14064, lo que refuerza su validez metodológica y respalda su confiabilidad para medir emisiones en contextos empresariales (Dcycle, 2025b).

Los datos requeridos para la operación de esta herramienta serán recolectados directamente en la empresa, mediante consultas técnicas y revisión de documentos que incluyan registros de consumo energético, volúmenes de combustible, características de la infraestructura, planes operativos y documentos estratégicos. La plataforma permitirá estimar de manera confiable la huella de carbono de los procesos bajo control operacional, estableciendo así un punto de partida técnico para la formulación posterior de una estrategia de

reducción de emisiones, cuya naturaleza y alcance serán definidos a partir del análisis de los resultados obtenidos.

Este enfoque metodológico integrador que combinará un análisis organizacional cualitativo bajo el marco EFQM con una medición técnica estandarizada de emisiones mediante Dcycle, permitirá realizar un diagnóstico profundo, multidimensional y coherente con el propósito general del presente trabajo. En particular, facilitará valorar de forma estructurada la preparación real de PLANETA S.A.S E.S.P para adoptar una propuesta estratégica de reducción de emisiones, desde una perspectiva que conjuga capacidades institucionales, cultura organizacional, gobernanza y desempeño ambiental.

7.4. Población, muestra y ficha técnica

El instrumento de diagnóstico organizacional diseñado para esta investigación será aplicado a un grupo específico de colaboradores de PLANETA S.A.S E.S.P, seleccionado intencionalmente con base en criterios estratégicos, de acuerdo con los objetivos del análisis interno. La población total de la empresa asciende a 81 colaboradores; sin embargo, dado que el propósito del instrumento es evaluar el nivel de preparación institucional para la adopción de una estrategia de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero generadas bajo su control operacional —específicamente las de alcance 1, asociadas al consumo de combustibles fósiles por la flota de transporte, y las de alcance 2, derivadas del consumo eléctrico en la planta de tratamiento—, la aplicación del instrumento se concentrará en aquellos actores que poseen una visión integral y estratégica del funcionamiento organizacional.

En este sentido, se define como población objetivo un subconjunto conformado por 15 colaboradores, pertenecientes a la alta dirección, líderes de proceso y áreas transversales clave. Esta selección responde a su conocimiento técnico, su rol estratégico dentro de la organización y su acceso directo a información crítica para el diagnóstico organizacional, aspectos indispensables para el enfoque del presente trabajo.

El método de selección corresponde a un muestreo no probabilístico por juicio, al tratarse de un censo dirigido al total de individuos que cumplen con los criterios establecidos dentro del grupo objetivo (Hernández Sampieri et al., 2010, p. 580). Esta decisión metodológica permite garantizar la pertinencia y calidad de la información recolectada, considerando que no se busca una representación estadística del total de colaboradores de la empresa, sino una visión focalizada, experta y funcionalmente alineada con los requerimientos del diagnóstico estructurado bajo el Modelo EFQM 2025.

A continuación, se presenta la ficha técnica del proceso de levantamiento de información asociado a la aplicación del instrumento.

Tabla 3

Ficha técnica para el levantamiento de la información.

Elemento	Detalle
Lugar de aplicación	Madrid, Cundinamarca
Perfil de los participantes	Alta dirección, líderes de proceso, profesionales de áreas transversales
Población objetivo	15 colaboradores con roles estratégicos
Técnica de muestreo	Muestreo no probabilístico por juicio
Tamaño de la muestra	15 personas [Censo del grupo objetivo]
Nivel de confianza / error	No aplica, por tratarse de muestreo no probabilístico
Medio de recolección	Plataforma digital [Formulario electrónico tipo Likert autoadministrado]

Fuente: Elaboración propia con base en información corporativa.

7.5. Identificación de las variables del diagnóstico organizacional

Con base en los lineamientos teóricos del Modelo EFQM 2025 desarrollados en el marco teórico, se definen las variables organizacionales que orientan el diagnóstico interno de esta investigación. Estas variables permitirán valorar el nivel de preparación institucional de la empresa PLANETA S.A.S E.S.P para adoptar una estrategia de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero bajo control operacional, es decir, aquellas correspondientes al alcance 1 (consumo de combustibles fósiles por la flota de transporte) y al alcance 2 (consumo eléctrico en la operación de la planta de tratamiento de aguas residuales).

Las dimensiones seleccionadas se estructuran a partir de los bloques conceptuales del Modelo EFQM —Dirección, Ejecución y Resultados— y se adaptan a las características particulares del objeto de estudio. Cada dimensión ha sido operacionalizada en variables específicas, entendidas como atributos organizacionales críticos que inciden en la capacidad de la empresa para integrar prácticas sostenibles y abordar una estrategia climática. A su vez, estas variables se medirán mediante indicadores asociados, formulados en ítems tipo Likert, orientados a captar percepciones clave del personal con rol estratégico.

A continuación, se describen las variables principales que conformarán el instrumento de diagnóstico, junto con sus indicadores asociados:

Tabla 4

Dimensiones organizacionales e indicadores asociados del instrumento de diagnóstico
[adaptación del Modelo EFQM 2025]

Dimensión EFQM Adaptada	Variable Evaluada	Indicador Asociado [Tipo Likert]
Dirección – Liderazgo	Compromiso de la alta dirección con la sostenibilidad y la reducción de emisiones	Nivel de involucramiento de la alta dirección en iniciativas ambientales de mitigación
Dirección – Estrategia	Coherencia entre la estrategia institucional y las metas climáticas	Grado en que la estrategia institucional incorpora metas de sostenibilidad
Ejecución – Cultura	Disposición organizacional hacia la sostenibilidad y el cambio	Percepción sobre apertura cultural a prácticas de mejora ambiental
Ejecución – Recursos	Disponibilidad de capacidades técnicas, humanas y financieras para la sostenibilidad ambiental	Existencia de recursos y capacidades internas para implementar acciones de mitigación
Ejecución – Procesos	Integración de criterios ambientales en los procesos operativos críticos	Presencia de buenas prácticas en transporte y operación de la PTAR
Resultados – Evaluación	Disposición institucional a evaluarse y mejorar en materia de sostenibilidad ambiental	Nivel de apertura a procesos de autoevaluación, aprendizaje y mejora continua

Fuente: Elaboración propia con base en (EFQM, 2024, pp. 10–21).

Estas variables permitirán establecer una línea base sobre el grado de preparación organizacional en relación con los requerimientos que demanda una estrategia de mitigación efectiva y realista, en función de los recursos y capacidades actuales. Cada variable será medida mediante indicadores asociados, evaluados a través de una escala tipo Likert de cinco puntos, que recogerá percepciones sobre el nivel de alineación institucional con prácticas sostenibles. Los resultados obtenidos mediante su aplicación constituirán un insumo clave para fundamentar técnicamente la formulación de la propuesta estratégica de reducción de emisiones, contribuyendo a su pertinencia, coherencia y alineación con las condiciones reales de la organización.

7.6. Instrumento de diagnóstico organizacional

El instrumento de medición propuesto para el análisis interno de esta investigación corresponde a una encuesta tipo Likert autoadministrada en formato digital, orientada a diagnosticar el nivel de preparación institucional de la empresa PLANETA S.A.S E.S.P frente a la eventual adopción de una estrategia de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero bajo control operacional [alcance 1: consumo de combustibles fósiles por su flota logística, y alcance 2: consumo eléctrico en planta].

El diseño de este instrumento se fundamenta en una adaptación metodológica del Modelo EFQM 2025, adoptado como marco de referencia para estructurar dimensiones organizacionales relevantes para la sostenibilidad. En este orden de ideas, es procedente aclarar que el referido modelo no se aplicará como una herramienta de evaluación directa, sino como una guía o framework conceptual para modelar un instrumento propio, contextualizado a las necesidades de esta investigación y alineado con los principios de excelencia organizacional, transformación operativa y creación de valor sostenible (European Foundation for Quality Management, 2024, pp. 5–11).

En este sentido, el instrumento propuesto toma como base los tres bloques del modelo [*Dirección, Ejecución y Resultados*] y mapea criterios específicos del marco EFQM con el fin de establecer la correspondencia entre estos y las precisas variables definidas para el diagnóstico. La siguiente tabla presenta esta relación:

Tabla 5

Correspondencia entre los criterios EFQM 2025 y dimensiones del instrumento de diagnóstico organizacional propuesto.

Bloque EFQM	Criterio EFQM	Dimensión del instrumento
Dirección	Criterio 1: Propósito, Visión y Estrategia	Alineamiento estratégico con metas de sostenibilidad
Dirección	Criterio 2: Cultura organizacional y liderazgo	Liderazgo transformacional; cultura organizacional sostenible
Ejecución	Criterio 4: Crear valor sostenible	Disponibilidad de recursos técnicos, humanos y financieros
Ejecución	Criterio 5: Gestionar el funcionamiento y la transformación	Gestión de procesos críticos (transporte y operación de PTAR)
Resultados	Criterio 6: Percepción de los grupos de interés	Disposición institucional a la autoevaluación y mejora continua

Fuente: Elaboración propia con base en EFQM (2024).

El cuestionario se estructura en seis apartados, cada uno correspondiente a una dimensión organizacional clave, operacionalizada como variable de análisis. Cada apartado contiene entre tres y cuatro ítems formulados como afirmaciones que se valoran mediante una escala de Likert de cinco puntos [1 = Totalmente en desacuerdo; 5 = Totalmente de acuerdo], lo que permite recoger de manera estandarizada la percepción del personal estratégico respecto a factores que se consideran críticos para la implementación de una estrategia con enfoque en sostenibilidad.

La decisión de estructurar el instrumento en 20 ítems distribuidos en seis dimensiones responde a criterios de pertinencia, cobertura temática y claridad operativa. Este enfoque se alinea con experiencias previas documentadas en la literatura sobre diagnóstico organizacional, donde modelos ampliamente reconocidos, como el de Weisbord (1976) y su extensión por Preziosi (1980), operan con un rango de 30 a 35 ítems para evaluar múltiples dimensiones estructurales y actitudinales mediante escalas Likert (Lok & Crawford, 2000, p. 111). En el caso del presente estudio, se opta por una adaptación focalizada a las condiciones de la organización intervenida, considerando la necesidad de mantener un equilibrio entre profundidad diagnóstica y factibilidad de aplicación. Estudios como los de Lok y Crawford (2000) y Zhang et al. p. (2016, p. 3) respaldan este tipo de aproximaciones. Así mismo, la literatura sobre instrumentos de evaluación cultural, como el OCAI [Organizational Culture Assessment Instrument] (Cameron & Quinn, 2006, pp. 25–30) el cual suele estar compuesto de 24 ítems, también valida la construcción de instrumentos autoadministrados acotados, fundamentados conceptualmente y ajustados al objeto de estudio, como lo sugirieron Cancino Cancino y Vial Aliaga (2022).

Tabla 6

Estructura del instrumento de diagnóstico organizacional propuesto [Encuesta tipo Likert]

Dimensión EFQM Adaptada	Variable evaluada	Nº de ítems
Dirección – Liderazgo	Compromiso de la alta dirección con la sostenibilidad y la reducción de emisiones	4
Dirección – Estrategia	Coherencia entre la estrategia institucional y las metas climáticas	4
Ejecución – Cultura	Disposición organizacional hacia la sostenibilidad y el cambio	3
Ejecución – Recursos	Disponibilidad de capacidades técnicas, humanas y financieras para la sostenibilidad ambiental	3
Ejecución – Procesos	Integración de criterios ambientales en los procesos operativos críticos	3
Resultados – Evaluación	Disposición institucional a evaluarse y mejorar en materia de sostenibilidad ambiental	3

Fuente: *Elaboración propia con base en EFQM (2024).*

Con el instrumento basado en esta estructura se busca capturar percepciones cualificadas de actores clave sobre el estado actual de la organización en relación con sus capacidades estratégicas, culturales, operativas y de mejora continua para emprender un camino de sostenibilidad ambiental específicamente en la reducción de emisiones de carácter operacional. La información recogida permitirá identificar patrones de alineación o brechas respecto a los requisitos que demanda una estrategia de mitigación de emisiones efectiva, y se constituirá en un insumo técnico esencial para sustentar el diseño de la propuesta de intervención.

7.7. Validación del instrumento de diagnóstico organizacional

La validez de contenido del instrumento se establecerá mediante juicio de expertos, con el fin de garantizar que cada ítem del cuestionario sea claro, pertinente y coherente con la variable que pretende medir. El proceso se desarrollará por dos vías complementarias: una revisión interna por parte de los directivos de la empresa, orientada a verificar la adecuación del lenguaje y la coherencia con los lineamientos institucionales; y una revisión externa a cargo de **expertos** con experiencia en gestión organizacional y sostenibilidad, quienes evaluarán la pertinencia técnica de cada ítem.

Para la segunda instancia se aplicará el coeficiente V de Aiken como método de valoración cuantitativa, utilizando una escala ordinal de cinco niveles que permitirá estimar la validez de contenido de cada ítem. La revisión incluirá observaciones cualitativas y recomendaciones de ajuste, que serán incorporadas en la versión definitiva del cuestionario.

Este procedimiento asegurará la consistencia metodológica del instrumento y su alineación con el propósito del diagnóstico organizacional. Los resultados consolidados de la validación se presentarán en el capítulo de diagnóstico organizacional, junto con la descripción del proceso de aplicación y análisis de los datos obtenidos.

7.8. Variables e instrumento para el análisis de emisiones

En el marco del análisis técnico previsto para la estimación de emisiones de gases de efecto invernadero [GEI] bajo control operativo, se utilizará la herramienta digital certificada Dcycle, una plataforma especializada en gestión de sostenibilidad y cálculo de huella de carbono (Dcycle, 2024). Esta herramienta opera conforme a la metodología establecida por el Greenhouse Gas Protocol [GHG Protocol], estándar internacional desarrollado por el World Resources Institute [WRI] y el World Business Council for Sustainable Development [WBCSD],

ampliamente reconocido para la medición, reporte y gestión de emisiones corporativas (World Resources Institute, 2011).

Ahora bien, de acuerdo con el alcance metodológico delimitado para el presente estudio, el análisis técnico detallado se centrará exclusivamente en las emisiones bajo control operacional de la PTAR, es decir, las correspondientes a:

- **Alcance 1:** Emisiones directas originadas por el consumo de combustibles fósiles en la flota vehicular utilizada para el transporte de aguas residuales y lodos hacia la planta de tratamiento.
- **Alcance 2:** Emisiones indirectas generadas por el consumo de energía eléctrica adquirida de la red, utilizada en los procesos operativos de la planta de tratamiento de aguas residuales.

Bajo ese entendido, el instrumento técnico de medición, operado a través de Dcycle, contemplará tanto las variables técnicas operativas como los parámetros de cálculo asociados, definidos con base en el marco metodológico del GHG Protocol previamente expuesto en la revisión teórica y adaptados al contexto específico de la empresa intervenida. Estos elementos se detallan a continuación.

Tabla 7

Variables técnicas y parámetros de cálculo asociados para el análisis de emisiones bajo control operacional [Alcance 1 y Alcance 2]

Categoría de Emisión	Elemento Técnico	Definición Operacional	Unidad de Medida	Fuente/Metodología Principal	Fuente Principal de Emisión	Alcance	Tipo de Elemento
Combustión Móvil [Vehículos Operativos]	Tipo de combustible	Tipo de combustible utilizado por la flota logística.	N/A	GHG Protocol + IPCC AR6	Vehículos [Diésel/AC PM]	1	Variable técnica
	Consumo de combustible en flota logística	Volumen de combustible fósil consumido por los vehículos operativos.	L	Registros internos, guía MITECO/Ecoinvent	Vehículos [Diésel/AC PM]	1	Variable técnica
	Factor de emisión por tipo de combustible	Coefficiente que relaciona el volumen de combustible fósil consumido con la cantidad estimada de emisiones de	kg CO ₂ eq/L	IPCC AR6, parámetros Dcycle	N/A	1	Parámetro de cálculo

Categoría de Emisión	Elemento Técnico	Definición Operacional	Unidad de Medida	Fuente/Metodología Principal	Fuente Principal de Emisión	Alcance	Tipo de Elemento
		CO ₂ eq generadas.					
Consumo Eléctrico	Consumo de energía eléctrica	Total de energía eléctrica consumida por la planta durante el periodo de análisis.	kWh	Registros internos, Ecoinvent 3.9.1 [Local Base]	Red eléctrica nacional	2	Variable técnica
	Factor de emisión según mix energético	Índice de emisiones asociadas al suministro eléctrico del operador local, en función del mix energético disponible, expresado en kg CO ₂ eq por kWh consumido.	kg CO ₂ eq/kWh	GHG Protocol Scope 2 Guidance, UPME, parámetros Dcycle	N/A	2	Parámetro de cálculo
General [Alcance 1 y 2]	Tasas de intensidad de emisiones	Relación entre emisiones generadas y unidad funcional [Ej: m ³ agua tratada].	N/A	Indicadores internos de desempeño ambiental	N/A	1 y 2	Variable derivada

Fuente: Elaboración propia con base en un informe modelo de Impacto Medioambiental generado por la plataforma Dcycle, utilizando parámetros metodológicos del GHG Protocol, IPCC AR6, Ecoinvent 3.9.1, MITECO, UPME y EXIOBASE 3.8.2 (Dcycle, 2025b).^{4,5}

⁴ Esta tabla presenta solo las variables asociadas a emisiones de Alcance 1 y 2 bajo control operativo directo de PLANETA S.A.S E.S.P., objeto del análisis de esta investigación. En Alcance 1 se incluyen variables por combustión de combustibles fósiles en vehículos propios; se excluyen otras fuentes por limitaciones de información. En Alcance 2 se consideran únicamente variables del consumo de electricidad en planta. Las variables de Alcance 3 no se incluyen, ya que su estimación en la plataforma Dcycle fue exclusivamente informativa, conforme a los límites operacionales y el carácter voluntario establecidos por el GHG Protocol (World Resources Institute, 2004, pp. 22–23).

⁵ Ecoinvent, MITECO, UPME y EXIOBASE son bases de datos reconocidas internacionalmente que proporcionan factores de emisión y datos ambientales necesarios para calcular la huella de carbono. Estas fuentes son integradas por la plataforma Dcycle (versión 2025b) para estimar las emisiones de gases de efecto invernadero conforme a estándares como el GHG Protocol.

Estas variables serán calculadas mediante los módulos automatizados de la plataforma Dcycle, que incorpora los factores de emisión más recientes del IPCC Sixth Assessment Report (2023), siguiendo los lineamientos técnicos del GHG Protocol y con trazabilidad bajo la norma ISO 14064. Adicionalmente, Dcycle cuenta con verificación externa por parte de TÜV Rheinland, lo que refuerza la confiabilidad metodológica de los resultados (Dcycle, 2024, 2025a). La información requerida será recolectada directamente en la empresa mediante revisión documental, registros de consumo y facturación energética, consumos de combustible y datos operativos asociados a las unidades de transporte. Estos insumos serán integrados en la plataforma para estimar automáticamente las toneladas de CO₂ equivalente [tCO₂eq] emitidas por cada fuente bajo control operacional.

La estimación de emisiones permitirá establecer una línea base técnica de referencia para el proceso de tratamiento de aguas residuales, que servirá como insumo central para la formulación de la estrategia de reducción propuesta. Este análisis será complementado con el diagnóstico organizacional, permitiendo una valoración integral de la preparación institucional para adoptar una estrategia de reducción de huella de carbono bajo control operacional, con un enfoque sostenible y escalable.

8. Diagnóstico Organizacional

El presente capítulo desarrolla el diagnóstico organizacional, concebido como la fase analítica que permite comprender integralmente las condiciones internas y externas que influyen en la gestión ambiental de la empresa.

Para tal propósito, el diagnóstico se estructura en dos niveles complementarios:

- Análisis externo, orientado a reconocer los factores del entorno que configuran el contexto estratégico en el cual la organización opera.
- Análisis interno, enfocado en comprender la realidad operativa de la empresa desde dos perspectivas interdependientes: el análisis técnico de las emisiones operacionales y la evaluación del nivel de preparación organizacional frente a la adopción de una ruta estratégica de mitigación.

Esta estructura permite articular el contexto y las capacidades institucionales como insumo para la formulación de la estrategia de mitigación.

8.1. Análisis externo

En coherencia con lo descrito en el capítulo de diseño metodológico, el diagnóstico externo del presente trabajo se desarrolló mediante el modelo PESTEL, herramienta ampliamente utilizada en la planeación estratégica para identificar los factores del entorno que pueden influir en el desempeño organizacional. Su aplicación permitió examinar las condiciones políticas, económicas, sociales, tecnológicas, ecológicas y legales que conforman el contexto en el que la empresa desarrolla sus operaciones.

El propósito de este análisis fue reconocer las condiciones y tendencias del entorno que pueden favorecer o limitar la implementación de medidas de reducción de huella de carbono, aportando insumos objetivos para la toma de decisiones estratégicas.

Desde un enfoque de investigación aplicada, este proceso se fundamenta en la recopilación y análisis de evidencia empírica proveniente de fuentes reales y observables del contexto organizacional, entendida —según Sampieri Hernández et al. (2014, p. 69) — como los datos de la realidad que respaldan afirmaciones verificables. De esta manera, se busca interpretar las relaciones entre las variables del entorno y la acción empresarial a partir de información comprobable y contextualizada.

En este sentido, el análisis se basó en la revisión documental de fuentes oficiales, reportes sectoriales y literatura especializada, consolidando un panorama actualizado sobre el entorno macroeconómico y regulatorio que incide en la sostenibilidad de la empresa. Las tendencias y

evidencias que sustentan este diagnóstico se encuentran ampliadas en el *Anexo Técnico – Diagnóstico PESTEL*, el cual sirvió de base para la síntesis presentada a continuación.

Tabla 8

Síntesis de factores PESTEL y señales estratégicas derivadas del diagnóstico del entorno externo

Dimensión	Variable de análisis	Señales y escenarios del entorno
Política	Políticas públicas sobre transición energética y eficiencia operacional.	La continuidad de incentivos gubernamentales, la ley 1715 de 2014 y los programas de transición energética refuerzan un contexto favorable para proyectos de eficiencia energética y movilidad sostenible.
Económica	Costos energéticos, precios de combustibles y acceso a financiamiento verde.	El aumento sostenido de las tarifas eléctricas genera presiones económicas sobre las operaciones, mientras que los incentivos tributarios y las líneas de crédito climático abren oportunidades para adoptar tecnologías más eficientes y reducir costos a mediano plazo
Social	Conciencia ambiental y expectativas de sostenibilidad de la comunidad y los clientes.	Se observa un mayor interés público por la responsabilidad ambiental y la adopción de prácticas sostenibles, lo que incrementa la exigencia hacia las empresas en materia de transparencia y desempeño ambiental.
Tecnológica	Acceso a tecnologías limpias, energías renovables y soluciones de eficiencia logística.	Los avances en energía solar, almacenamiento y vehículos de bajas emisiones consolidan un entorno tecnológico habilitante que facilita la modernización progresiva de las operaciones.
Ecológica	Compromisos internacionales y nacionales de mitigación de GEI.	La Ley 1844 de 2017, la Estrategia Climática de Largo Plazo [E2050] y las Contribuciones Determinadas a Nivel Nacional [NDC] establecen un marco ecológico que impulsa la descarbonización empresarial y la gestión de emisiones.
Legal	Normativa ambiental y requisitos de reporte y transición energética.	La actualización de normas sobre eficiencia energética [Ley 2099 de 2021], transparencia y reporte de GEI proyecta un marco regulatorio más exigente, que demanda fortalecimiento institucional y anticipación estratégica.

Fuente: Elaboración propia con base en Steffens (2020) y Amador-Mercado (2022).

El análisis cualitativo permitió identificar que los factores político, tecnológico y ecológico constituyen condiciones habilitantes para la adopción temprana de medidas de mitigación, mientras que los factores económico, social y legal requieren seguimiento continuo por su variabilidad e impacto potencial sobre la viabilidad de los proyectos.

Estas señales pueden ayudar a complementar el enfoque para definir criterios de activación y priorización de acciones dentro de la estrategia de reducción de emisiones.

8.2. Análisis interno: Huella de carbono

En concordancia con lo dispuesto en el capítulo de diseño metodológico, este apartado presenta los resultados del análisis interno asociado a la huella de carbono operacional, correspondiente al componente técnico del enfoque metodológico combinado adoptado para esta investigación.

Dicho análisis comprende la cuantificación y caracterización de las emisiones de gases de efecto invernadero [GEI] de alcance 1 y 2, con una comparativa descriptiva entre los años 2022 y 2024, seguida de un desglose específico para el periodo 2024 que aborda tanto las emisiones derivadas del consumo de combustible en fuentes móviles como las asociadas al consumo eléctrico en la planta de tratamiento de aguas residuales.



8.2.1. Contraste de la huella de carbono corporativa [2022 vs. 2024]

Como punto de partida del análisis técnico, se presenta una comparación estructurada de la huella de carbono corporativa de PLANETA S.A.S E.S.P correspondiente a los años base 2022 y 2024. Esta comparación busca, por un lado, caracterizar la evolución interanual de las emisiones de gases de efecto invernadero [GEI] y, por otro, sustentar la identificación de fuentes prioritarias de intervención, en consonancia con el principio de control operacional que orienta esta investigación. Este análisis preliminar de contraste, alineado con los lineamientos del Greenhouse Gas Protocol, contempla los tres alcances [1, 2 y 3], considerando los cambios metodológicos y operativos entre ambos periodos.

En cuanto a la metodología y fuentes de datos empleadas, para la medición de emisiones del año 2022 se utilizó la herramienta pública CarbonFootprint.com, mientras que para el ejercicio de estimación del inventario de emisiones del periodo 2024 se optó por la plataforma Dcycle, certificada por TÜV Rheinland bajo la norma ISO 14064, garantizando así una mayor trazabilidad y precisión técnica. Los potenciales de calentamiento global [GWP] considerados en el informe de emisiones del 2022 corresponden al Quinto Informe del IPCC [AR5] mientras que para el cálculo de emisiones del periodo base 2024 coinciden con los registrados en el Sexto Informe [AR6], ambos a un horizonte de 100 años. Es procedente precisar que, para el estudio del año 2024, se ampliaron los límites de las emisiones corporativas al incluir no solo las de la planta de tratamiento y la sede administrativa, sino también las de la bodega, lo que difiere del informe de 2022, que únicamente consideraba las emisiones de la planta de tratamiento y la oficina administrativa.

Tabla 9

Parámetros de cuantificación de emisiones de gases de efecto invernadero para el periodo 2022 - 2024.

Año	Herramienta de Cálculo	Parámetros		
		Potenciales de calentamiento	Límite organizacional	Cobertura Alcance 3
2022		IPCC AR5 [100 años]	Control operativo [Planta + Oficina Administrativa]	Modalidad Informativo: Movilidad, residuos, papel.
2024		IPCC AR6 [100 años]	Control operativo [Planta + Oficina Administrativa + Bodega]	Modalidad Informativo: Movilidad, compras, agua, residuos.

Fuente: Elaboración propia a partir del análisis de los parámetros de las plataformas Dcycle y CarbonFootprint.com.

Los resultados comparativos, presentados a continuación, evidencian un aumento absoluto de 186,17 toneladas de CO₂ equivalente [t CO₂eq], lo que representa un incremento del 23,5 % entre ambos periodos. No obstante, la estructura porcentual de las emisiones por alcance se conserva prácticamente intacta: cerca del 75 % corresponde a emisiones de Alcance 1, alrededor del 5 % al Alcance 2 y aproximadamente el 20 % a emisiones indirectas de Alcance 3 por fuera del control operativo de la empresa.

Tabla 10

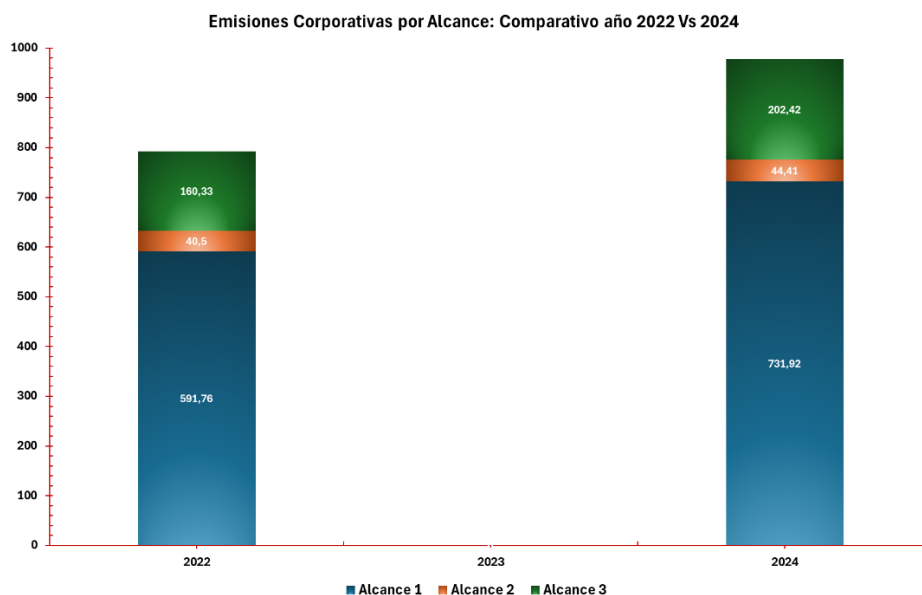
Síntesis del Inventario comparativo de emisiones de gases de efecto invernadero por alcance para los años 2022 y 2024.

Año	Alcance 1		Alcance 2		Alcance 3		Total [t CO ₂ eq]
	Emisiones [t CO ₂ eq]	[%]	Emisiones [t CO ₂ eq]	[%]	Emisiones [t CO ₂ eq]	[%]	
2022	591,76	74,70%	40,5	5,10%	160,33	20,20%	792,59
2024	731,92	74,80%	44,41	4,50%	202,42	20,70%	978,76

Fuente: Elaboración propia con base en el estudio de huella de carbono realizado por Progresar ESP (2023) y los Informes GHG Protocol e Impacto Medioambiental exportados de la plataforma Dcycle para el año 2024 ^{6,7}.

Figura 7

Distribución porcentual comparativa de las emisiones de GEI por alcance [Periodos 2022 vs. 2024].



Fuente: Elaboración propia con datos del estudio de huella de carbono de Progresar ESP (2023) y los Informes GHG Protocol e Impacto Medioambiental de la plataforma ⁸.

⁶ Aunque los inventarios de emisiones emplean factores de emisión provenientes de distintos años y fuentes —UPME (2014) para 2022, e IPCC AR6 junto con bases integradas en Dcycle para 2024—, en esta etapa del análisis se comparan los resultados reportados originalmente, sin realizar un recálculo retrospectivo [ex post]. Esta decisión responde al enfoque de preservar la trazabilidad y consistencia de los reportes tal como fueron generados en su momento. La utilización de factores de emisión distintos (por ejemplo, AR5 vs. AR6) puede introducir una posible variabilidad en los resultados del orden de ± 2 %, aunque sin comprometer la validez de las tendencias observadas.

⁷ Se asume que la flota móvil reportada en el Alcance 1 está operativamente vinculada a la prestación de servicios de recolección y transporte de aguas residuales y lodos que alimentan la PTAR, conforme al alcance operacional de la empresa en ambos inventarios. Aunque entre 2022 y 2024 se reemplazaron 3 de los 19 vehículos originalmente reportados, se considera que sus características y funciones son equiparables para efectos de análisis, por lo que no se introduce ajuste adicional en la comparación.

⁸ La estructura de la huella de carbono por alcances se mantiene notablemente estable entre 2022 y 2024 — ≈ 75 % Alcance 1; ≈ 5 % Alcance 2; ≈ 20 % Alcance 3—, lo que sugiere una configuración operativa consistente en términos relativos. No obstante, la magnitud absoluta de las emisiones presenta un aumento aproximado del 23 %, impulsado principalmente por el mayor uso de combustibles fósiles en actividades operativas. Esta dinámica evidencia una estabilidad estructural en la distribución de fuentes emisoras, pero con un crecimiento sostenido en intensidad.

Ahora bien, considerando que el objetivo es caracterizar exclusivamente la dinámica operativa del proceso de tratamiento de aguas residuales, el siguiente análisis se limita a las variables energéticas directamente asociadas a su funcionamiento: el consumo de combustible en fuentes móviles y el consumo eléctrico adquirido de la red. Con este fin, se excluyen las emisiones derivadas de fuentes no representativas de dicha operación, como la combustión estática del área de compostaje equivalente a 177,77 t CO₂eq y las 12,43 t CO₂eq asociadas a la recarga de extintores para el año base 2024, junto con sus equivalentes históricos para el periodo 2022. En este contexto, y dado que el inventario elaborado por la empresa Progresar S.A.S. E.S.P. consolidó las emisiones directas [Alcance 1] sin diferenciar entre fuentes móviles y fijas, se aplica una disgregación proporcional para el año 2022 basada en el consumo de diésel reportado. Así, se asigna aproximadamente el 78,8 % del ACPM total —equivalente a 50.143 galones— a fuentes móviles operativas de la PTAR, y el 21,2 % restante —13.533 galones— a fuentes fijas vinculadas al proceso de compostaje desarrollado en el año 2022. Esta depuración metodológica permite establecer un escenario objetivo y equiparable para el análisis de las emisiones operacionales estrictamente asociadas al tratamiento de aguas residuales, como se detalla a continuación:

Tabla 11

Intensidad de emisiones operacionales por caudal de agua tratada [Periodos 2022 vs. 2024].

Año	Emisiones Operacionales (Vehículos y Electricidad de PTAR) [t CO ₂ eq]	Caudal Tratado [m ³]	Intensidad [t CO ₂ eq/m ³]	kg CO ₂ eq/m ³
2022	486.28	109 212,36	0,00445	4,45
2024	586,01	124 104,96	0,00472	4,72

Fuente: Elaboración propia a partir de datos del inventario de emisiones y registros de caudal de la planta de tratamiento.^{9,10}.

⁹ Dado que en 2022 no se contaba con datos desagregados del consumo eléctrico entre los procesos administrativos y operativos de la PTAR —en parte porque el consumo de la sede administrativa estaba incluido en el canon de arrendamiento y no se reportaba de forma separada—, se empleó una estimación aproximada (proxy), asignando de forma conservadora el 100 % del consumo total al proceso de tratamiento. Considerando que en 2024 las sedes no operativas representan aproximadamente 0,12 t CO₂eq (equivalente al 0,27 % del total de Alcance 2), se estima que el sesgo potencial introducido es marginal y no altera de forma significativa la señal de tendencia.

¹⁰ En el inventario de 2022, las emisiones asociadas al proceso de compostaje fueron excluidas mediante una partición proporcional del consumo de ACPM, con el fin de aislar la evaluación de la eficiencia hidráulica de la PTAR. Para el periodo 2024, el desglose realizado en Dcycle revela que la combustión fija atribuida al compostaje asciende a 177,77 t CO₂eq, una cantidad relevante dentro de la huella corporativa total. Sin embargo, estas emisiones incorporan en el análisis del desempeño de la línea de tratamiento de aguas residuales, ya que su inclusión podría diluir señales clave y dificultar la formulación de medidas de mitigación específicas para el proceso evaluado.

La variación observada entre ambos años muestra un aumento de intensidad [ΔI] de 0,00027 t CO₂eq/m³, equivalente al +6,06 %, lo que indica que el mayor caudal tratado en 2024 [+13,6 %] no logró compensar completamente el incremento de emisiones operativas del proceso de tratamiento de aguas residuales [+ 20,5 %], en especial en lo que respecta al consumo de diésel por parte de la flota de transporte. Este hallazgo confirma que la eficiencia operativa de la planta, en términos de intensidad de emisiones, se ha visto afectada principalmente por el comportamiento del Alcance 1 móvil.

Desde una perspectiva analítica, los resultados permiten extraer conclusiones relevantes para la gestión climática de la organización. En primer lugar, se ratifica el predominio de las emisiones derivadas del transporte, que representan cerca del 75 % de la huella total, consolidándose como la fuente de mayor impacto bajo control directo. El salto de aproximadamente 90 t CO₂eq en las emisiones móviles de la PTAR [de 451,11 t a 541,72 t CO₂eq] constituye el factor dominante en el deterioro de la intensidad. Dado que las emisiones asociadas al consumo de combustibles móviles representan la mayor contribución dentro de la huella total, este frente podría constituir una oportunidad significativa de intervención, ya sea mediante renovación tecnológica, mantenimiento preventivo o transición energética; este enfoque sugiere con claridad la priorización del bloque centrado en fuentes móviles, sin embargo, dependerá de un análisis más detallado frente a su posibilidad de abordaje.

En segundo lugar, aunque las emisiones del Alcance 2 continúan representando una fracción menor del total [<5 %], su incremento cercano al 10 % [de 40,50 t a 44,29 t CO₂eq] guarda una relación directa con la expansión operativa de la planta y la demanda energética asociada. Si bien este componente tiene un peso limitado en la huella agregada, su carácter recurrente lo convierte en un factor estratégico desde la óptica de costos operativos y competitividad a largo plazo. En este sentido, el consumo eléctrico específico por metro cúbico tratado podría emerger como un indicador clave de eficiencia y resiliencia, con posibles oportunidades de mejora mediante sustitución parcial por fuentes renovables. Esta línea de acción podría direccionar hacia una potencial priorización del bloque enfocado en el consumo energético de la PTAR, no solo por su incidencia creciente, sino por su alta viabilidad técnica y económica de intervención en el corto y mediano plazo, en línea con una transición energética gradual y una mejora sostenida de la eficiencia operativa.

En tercer lugar, el aumento del Alcance 3 [~26 %] responde fundamentalmente a la inclusión de nuevas categorías de análisis y al cambio metodológico en los factores de emisión empleados [IPCC AR6]. Aunque no constituye el foco inmediato de la presente investigación,

se reconoce su creciente relevancia en el perfil de emisiones corporativas, por lo que se propone su monitoreo sistemático en futuras actualizaciones del inventario.

Bajo ese entendido, la evolución de la intensidad operativa reafirma la necesidad de una intervención sinérgica sobre los principales vectores de emisiones bajo control directo. A partir del análisis detallado que se presenta a continuación para ambos frentes —fuentes móviles y consumo energético de planta— será posible identificar con mayor precisión cuál de ellos ofrece mayor viabilidad y oportunidad de intervención en el corto y mediano plazo.

8.2.2. Transparencia del inventario: Exclusiones y medidas de mitigación

El inventario desarrollado en el presente estudio se elaboró conforme al principio de materialidad y al enfoque de control operacional establecidos por el *GHG Protocol*, priorizando las fuentes con mayor incidencia y trazabilidad dentro del proceso operativo de la planta [Alcances 1 y 2]. Esta delimitación responde al principio de transparencia y disponibilidad de datos, según el cual se privilegia la cuantificación de aquellas emisiones para las que se dispone de información verificable y consistente, evitando introducir incertidumbre o sesgos metodológicos en los resultados esperados (World Resources Institute, 2004, pp. 9–10).

Bajo este criterio, se optó por no incluir fuentes que, si bien son teóricamente relevantes, no cuentan con trazabilidad suficiente ni respaldo técnico para una cuantificación confiable. Tal es el caso de las emisiones fugitivas por recarga de gases refrigerantes; las emisiones biogénicas de CO₂, que pueden ser reportadas de manera separada al formar parte de un ciclo cerrado del carbono (World Resources Institute, 2015, p. 61); y las emisiones biogénicas de CH₄ y N₂O, cuya estimación requiere información técnica aún no disponible en la empresa. De igual manera, las emisiones de Alcance 3 se trataron únicamente de forma informativa, atendiendo a su carácter voluntario dentro del marco metodológico del protocolo y a las limitaciones actuales de trazabilidad de datos en la cadena de suministro indirectas (World Resources Institute, 2015, pp. 5–6).

En este sentido, se reconoce que las exclusiones mencionadas podrían generar una subestimación parcial de la huella total corporativa; no obstante, ello no afecta la representatividad ni la solidez técnica del inventario, el cual se centró en las fuentes de mayor incidencia y trazabilidad dentro de los precisos límites operacionales definidos para el presente estudio. Las fuentes incluidas reflejan el comportamiento de los procesos bajo control directo de la organización y proporcionan una base metodológica transparente para el diseño de la estrategia de mitigación. Cabe resaltar que la medición fue gestionada mediante una

plataforma certificada por TÜV Rheinland en ISO 14064, alineada con el *GHG Protocol* y que emplea factores de emisión de la sexta edición del IPCC, lo que refuerza la consistencia y verificabilidad de los resultados. Este enfoque asegura la coherencia con los principios de materialidad y transparencia establecidos por el *GHG Protocol*, priorizando la calidad y trazabilidad de los datos frente a una cobertura total que, en las condiciones actuales, podría incrementar la incertidumbre.

Para minimizar el efecto de las exclusiones y fortalecer la completitud del inventario en futuras mediciones, se recomienda a la empresa avanzar gradualmente en las siguientes líneas de acción:

- Actualizar anualmente el inventario, incorporando una bitácora de factores de emisión y fuentes con su respectiva calificación de calidad de datos [DQI], que permita documentar y validar la trazabilidad de la información empleada.
- Registrar sistemáticamente los eventos no cuantificados actualmente, tales como recargas de refrigerantes o mantenimientos con potenciales fugas, con el fin de disponer de datos consistentes para su inclusión posterior.
- Integrar progresivamente las emisiones biogénicas de CH₄ y N₂O, una vez se disponga de insumos técnicos confiables y metodológicamente compatibles con las guías del *GHG Protocol*.
- Realizar una evaluación preliminar de fuentes indirectas [Alcance 3] que resulten más relevantes para la empresa —como transporte tercerizado o adquisición de insumos críticos—, las cuales podrán reportarse de manera informativa mientras se consolida la trazabilidad requerida.
- Integrar toda la información a la plataforma Dcycle de manera oportuna, identificando las lagunas de datos y fortaleciendo la trazabilidad de las fuentes excluidas para la mejora continua del inventario, aprovechando además el módulo de proyectos para estructurar y monitorear las iniciativas de mitigación.

Este enfoque gradual y realista refuerza la coherencia metodológica, promueve la mejora continua del inventario y fortalece la gobernanza de datos corporativos, asegurando que las futuras actualizaciones reflejen con mayor precisión el desempeño ambiental integral de la organización.

8.2.3. Emisiones de alcance 1 por consumo de combustible

En el análisis interanual presentado en el bloque anterior, se evidenció un incremento del 6,06 % en la intensidad de emisiones de la PTAR [de 4,45 a 4,72 kg CO₂eq/m³], atribuible principalmente al mayor consumo de diésel en la flota vehicular. Este comportamiento justifica la necesidad de desagregar con mayor detalle las emisiones del Alcance 1, específicamente aquellas derivadas de fuentes móviles, las cuales constituyen la fracción más significativa y representan el principal desafío dentro del control operativo de la empresa.

Según el inventario del año 2024 consolidado, la huella total corporativa de PLANETA S.A.S E.S.P asciende a 978,76 t CO₂eq, considerando las emisiones de los tres alcances. De este total, el Alcance 1 representa 731,92 t CO₂eq, distribuidos entre combustibles fósiles utilizados en fuentes móviles y fijas bajo control directo. Sin embargo, al depurar este valor y excluir las emisiones correspondientes a la combustión estática del área de compostaje [177,77 t CO₂eq] y las asociadas a la recarga de extintores [12,43 t CO₂eq], se obtiene que las emisiones atribuibles exclusivamente a la operación de los 19 camiones que transportan aguas residuales y lodos a la PTAR ascienden a 541,72 t CO₂eq.

Este subconjunto de emisiones móviles adquiere una relevancia estratégica evidente al representar:

- Poco más del 55 % del inventario corporativo total [978,76 t CO₂eq], y
- Más del 92 % de las emisiones operativas de la PTAR —que totalizan 586,01 t CO₂eq entre flota y consumo eléctrico— se atribuyen al uso de diésel en los vehículos, lo que evidencia su peso dominante en el proceso de tratamiento de aguas residuales.

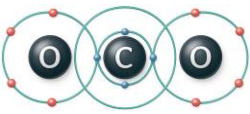


Estos datos confirman que el transporte de residuos líquidos mediante flota pesada constituye el principal punto crítico de impacto climático en el proceso operativo central de la empresa, y por tanto, el foco prioritario de análisis en este segundo bloque.

Para la estimación de las emisiones directas derivadas del consumo de diésel en la flota de transporte de residuos líquidos hacia la PTAR, se consideraron los tres gases de efecto invernadero regulados por la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático [CMNUCC] —CO₂, CH₄ y N₂O—, aplicando los factores de emisión establecidos por el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico [MITECO], con base en los volúmenes de combustible consolidados en la plataforma Dcycle para el año base 2024. El dióxido de carbono [CO₂] representa la mayor proporción del total con 533,43 t CO₂eq [98,5 %], seguido por el óxido nitroso [N₂O] con 7,99 t CO₂eq [1,48 %] y el metano [CH₄] con 0,29 t CO₂eq [0,05 %]. Aunque estos dos últimos gases se emiten en menores cantidades, su

inclusión en el inventario obedece a su elevado potencial de calentamiento global, en conformidad con los lineamientos del GHG Protocol. La tabla 11 resume el desglose técnico de estas emisiones por tipo de gas, fórmula estructural, factor de emisión aplicado y resultado final expresado en unidades de CO₂ equivalente.

Tabla 12

Factores de emisión y estimación de emisiones GEI por consumo de diésel [CO₂, CH₄, N₂O]

Gas de Efecto Invernadero [GEI]	Fórmula Estructural	Factor de Emisión [kg/lt]	Factor de Emisión [kg/gal]	Emisión [kg CO ₂ eq] = Diésel x Factor	Emisión [t CO ₂ eq] = Diésel x Factor
Dióxido de carbono CO ₂		2,407	9,114	533430,0937	533,43
Metano CH ₄		0,049	0,1855	294,4563519	0,294
Óxido Nitroso N ₂ O		0,134	0,5072	7992,89963	7,99

Fuente: Elaboración propia con base en la información registrada en los informes de Dcycle y los factores de emisión del MITECO (Dcycle, 2025b) ¹¹

8.2.3. Concentración de emisiones por vehículo según el principio de Pareto

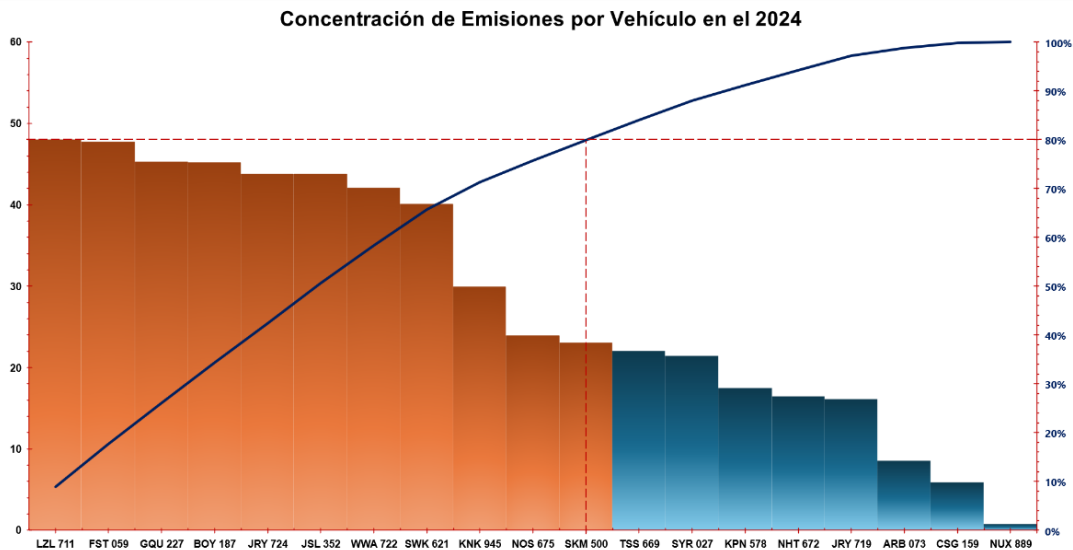
Con el propósito de obtener una comprensión preliminar sobre la distribución de las emisiones generadas por la flota de camiones durante el año 2024, se llevó a cabo, en primera instancia, un análisis de Pareto orientado a identificar en qué proporción de los 19 vehículos involucrados se concentra la mayor cantidad de emisiones o el mayor porcentaje de los efectos ambientales. El objetivo de este ejercicio no es definir de forma inmediata cuáles fuentes deberán ser priorizadas desde un enfoque holístico y estratégico, sino más bien, observar cómo se agruparon las contribuciones individuales a las emisiones generales de alcance 1

¹¹ La tabla fue elaborada con base en los datos proporcionados por Dcycle (2025) y los factores de emisión oficiales del MITECO. Las ilustraciones de las estructuras moleculares [CO₂, CH₄, N₂O] son representaciones originales del autor, creadas con fines educativos a partir de referencias conceptuales y vectores de dominio público, así como ilustraciones comunes en la literatura de química orgánica. Se reconoce la autoría original de las fuentes consultadas y se respetan los derechos de propiedad intelectual

derivadas del consumo de combustible en los vehículos asociados al proceso de tratamiento de aguas residuales, de acuerdo con su realidad operativa durante el periodo analizado.

Figura 8

Distribución acumulada de las emisiones de alcance 1 por vehículo según el principio de Pareto [2024]



Fuente: Elaboración propia con base en datos de emisiones Alcance 1 reportados en la plataforma Dcycle.¹²

En el diagrama de Pareto resultante [Figura 8] se evidenció una concentración significativa de las emisiones de alcance 1 para el año base 2024. En concreto, el 79,92 % de las emisiones totales asociadas a la flota vehicular se concentró en el 57,89 % de los vehículos, lo cual equivale a 11 de las 19 unidades móviles evaluadas. Si bien esta visualización ofrece una primera y valiosa aproximación a la distribución de la carga de emisiones entre los distintos activos, es fundamental reconocer que un análisis sustentado únicamente en los valores absolutos de emisiones y consumo de diésel brinda una perspectiva parcial. Factores como la intensidad de uso —estrechamente ligada a las características operativas y técnicas de cada unidad— así como el patrón de uso estacionario por efectos del bombeo mediante sistemas Power Take-Off [PTO], pueden modificar sustancialmente la lectura comparativa entre vehículos y conducir a una priorización inexacta si no son debidamente considerados.

¹² Los valores de emisiones corresponden a datos extraídos del informe de Gases de Efecto Invernadero (GEI) de Dcycle para el año 2024. Cada vehículo es identificado por su número de matrícula o placa.

En consecuencia, para sustentar decisiones estratégicas bajo un enfoque de eficiencia técnica, ambiental y económica, se requiere un análisis complementario de carácter multicriterio que integre estas variables contextuales y permita clasificar de forma más precisa los activos con mayor potencial de mejora.

8.2.4. Propósito del Índice Compuesto de Eficiencia Relativa [ICE^r]

El propósito del ICE^r es diagnosticar, bajo un enfoque multicriterio, el desempeño relativo de los vehículos de la PTAR responsables de las emisiones directas [alcance 1], superando los sesgos que pueden derivarse del análisis fragmentado de datos brutos, particularmente cuando se ignoran las condiciones operativas diferenciales de cada unidad. En efecto, métricas simples como el consumo total de combustible o la distancia recorrida pueden inducir interpretaciones erróneas si no se consideran variables estructurales como el tipo de operación, la intensidad de uso o el grado de obsolescencia tecnológica.

En respuesta a esta problemática, el ICE^r se concibe como un índice compuesto que integra múltiples indicadores sin unidades comunes —eficiencia en movimiento, eficiencia en operación estacionaria, condición tecnológica e impacto económico—, los cuales son normalizados y ponderados para permitir una comparación justa entre unidades heterogéneas. Este enfoque se sustenta en la definición ampliamente aceptada de los indicadores compuestos como herramientas que permiten medir conceptos multidimensionales complejos a través de la combinación sistemática de indicadores individuales (OECD, 2008, p. 13; Zhou et al., 2018, p. 10).




La aplicación de un índice de este tipo no solo contribuye a evitar el espejismo analítico de los datos simples, sino que permite establecer prioridades objetivas para intervenciones como recambio, retrofit o mantenimiento, alineando criterios ambientales, técnicos y económicos. Además, los indicadores compuestos tienen la ventaja de ajustarse a problemáticas específicas, normalizar resultados, y facilitar comparaciones cuando son validados adecuadamente (Blasco-Blasco et al., 2020, p. 2).

8.2.5. Segmentación operativa de la flota

Debido a que los vehículos de la PTAR cumplen funciones técnicas diferenciadas, no es metodológicamente válido evaluarlos bajo un único criterio uniforme. Por ello, se implementó una segmentación operativa que clasifica las 19 unidades de la flota en tres grupos según su nivel de estacionariedad funcional: Alta, Media o Baja. Esta clasificación se basa en la carrocería del vehículo, presencia de bomba de vacío y su rol operativo dentro del proceso de transporte de aguas residuales y lodos, tal y como se expone en la siguiente tabla:

Tabla 13

Clasificación de vehículos según tipo de estacionariedad

Tipo de Estacionariedad	Descripción	Tipo de vehículo
Alta	Vehículos tipo Vac-Con/Vactor, cuyo consumo de diésel se concentra en modo estacionario mediante el uso intensivo bombas de vacío operadas por sistemas Power Take-Off [PTO].	
Media	Tanques Cisterna, que combinan operación en ruta con uso moderado de PTO.	
Baja	Furgón y planchón, empleados principalmente en el transporte lineal con bidones sin utilización de equipos auxiliares o forzados.	

Fuente: Elaboración propia con base en información proporcionada por el área de Logística y adaptada para efectos del presente estudio.^{13,14}

Aunque esta etiqueta no ingresa como variable matemática directa en el cálculo del índice ICE^r , su uso es clave para interpretar adecuadamente los resultados y evitar errores de diagnóstico. Vehículos con un elevado consumo estacionario pueden presentar métricas menos favorables en eficiencia de movimiento, y en consecuencia una mayor cantidad de emisiones, sin que ello implique de manera definitiva un desempeño ineficiente, sino una función operativa distinta. La segmentación, por tanto, permite evitar comparaciones inapropiadas y sustenta decisiones de priorización técnica bajo una lectura ajustada a la realidad funcional de cada activo.

8.2.6. Indicadores que componen el ICE^r

Para efectos del presente estudio, el Índice Compuesto de Eficiencia Relativa [ICE^r] se estructura a partir de cuatro indicadores clave que permiten evaluar desde múltiples ángulos el desempeño de cada vehículo respecto a sus emisiones operativas directas. Estos indicadores fueron seleccionados por su capacidad para capturar dimensiones complementarias de eficiencia: ambiental, funcional, tecnológica y económica. Dado que las unidades de medida son heterogéneas, cada indicador es homologado a puntuación z- y luego ponderado de forma equitativa con un peso del 25 % para construir el índice final.

¹³ La segmentación operativa permite comprender conceptualmente el desempeño técnico y ambiental de cada vehículo dentro del marco de su realidad funcional, evitando juicios comparativos errados que puedan surgir por diferencias inherentes en el tipo de operación.

¹⁴ Las representaciones gráficas de los vehículos son vectores con licencia de uso gratuito con fines académicos. Se reconoce la autoría de Freepik.com (2023) por la referencia conceptual utilizada.

Tabla 14

Indicadores del ICE^r: definición, fórmula base y propósito funcional

Código	Indicador	Fórmula base	Unidades	Propósito
E1	Emisión por kilómetro	$E_1 = \frac{kg\ CO_2e_{Anual}}{km\ Recorridos}$	kg CO ₂ eq km ⁻¹	Este indicador cuantifica la emisión directa de GEI por unidad de distancia recorrida. Este valor permite evaluar la eficiencia ambiental en desplazamiento, independientemente de la intensidad operativa dentro de su segmento funcional.
E2	% PTO [Consumo estacionario]	$E_2 = \frac{gal\ PTO}{gal\ Facturados\ Totales}$	%	Mide la proporción de diésel utilizada en modo PTO, representando el consumo energético con el vehículo detenido durante operaciones de succión o bombeo, penalizando aquellas unidades con alta estacionariedad relativa.
E3	Índice de obsolescencia	$E_3 = \frac{2025 - Año\ Modelo}{10} + \begin{cases} 1 \rightarrow \text{sin norma Euro} \\ 0 \rightarrow \text{con norma Euro} \end{cases}$	Adimensional	Captura la edad tecnológica de la unidad y su cumplimiento con las normas de emisiones, sumando +1 si no tiene certificación Euro, lo que representa 10 años adicionales de obsolescencia.
E4	Emisión por unidad monetaria del gasto	$E_4 = \frac{kg\ CO_2e_{Anual}}{Costo\ [COP]diésel\ con\ IVA}$	kg CO ₂ eq COP ⁻¹	Este indicador permite vincular el impacto ambiental [emisiones anuales de CO ₂] con su correspondiente presión económica por el costo diésel consumido en pesos colombianos con IVA.

Fuente: Elaboración propia conforme con la realidad operativa de los vehículos analizados^{15,16,17}.

Ahora bien, conforme con los criterios técnicos expuestos, la siguiente tabla presenta los resultados observados para cada uno de los 19 vehículos auditados, discriminados conforme con su segmento operativo [Alta, Media y Baja estacionariedad]. Esta base sirve como insumo para la posterior estimación del ICE_r, que se calculará a nivel global, y que será interpretado posteriormente de forma estratégica y conforme con la realidad funcional de cada vehículo.

Tabla 15

Resultados de los indicadores E₁–E₄ por vehículo

Matrícula	Segmento	E1 = Emisión por kilómetro	E2 = % PTO [Consumo estacionario]	E3 = Índice de obsolescencia	E4 = Emisión por peso del gasto
ARB 073	Media	0,6640	0,00036%	5	0,000998
BOY 187	Media	0,8439	0,00027%	3	0,001012
CSG 159	Media	0,3740	0,00025%	3,7	0,001002
FST 059	Media	0,8338	0,00032%	3,4	0,001018
GQU 227	Alta	2,0916	31,93033%	2,6	0,001015
JRY 719	Baja	0,4394	0,00030%	1,4	0,001013
JRY 724	Media	0,8075	0,27426%	0,5	0,001005
JSL 352	Alta	2,4394	41,79550%	2,9	0,001010
KNK 945	Media	0,5054	0,27353%	0,3	0,001023
KPN 578	Alta	1,6416	13,27074%	2,6	0,000982
LZL 711	Media	0,6390	0,00029%	0,2	0,001008

¹⁵ El índice de obsolescencia se basa en la práctica de normalizar la vida útil de los vehículos en unidades de 10 años, un umbral de envejecimiento funcional y ambiental reconocido en la literatura. Esto se sustenta en precedentes técnicos, como la prohibición de circulación para vehículos diésel de más de 10 años en zonas como Delhi, India (Ministry of Road Transport & Highways, 2024), y la recomendación de eliminar vehículos pesados diésel a partir de los 14 años (GIZ, 2021).

¹⁶ Para el cálculo del indicador E3, se optó por escalar la edad del vehículo en décadas en lugar de años exactos. Si se incorporara la edad en años [0–40], su z-score dominaría el promedio, sesgando el resultado final. Escalar en décadas sitúa la distribución de esta variable en el mismo orden de magnitud que los demás componentes del índice.

¹⁷ El índice de obsolescencia aplica una penalización a los vehículos sin una norma de emisión Euro asignada, sumando una unidad adicional al índice compuesto. Esta penalización se justifica por la necesidad de adoptar estándares de emisión más rigurosos, como mínimo Euro 4/IV, para reducir contaminantes como el óxido de nitrógeno (NO_x), las partículas (PM) y el carbono negro (UNEP; & CCAC, 2025). Históricamente, las tecnologías pre-Euro III presentan límites de emisión considerablemente más laxos. La adopción de tecnologías Euro VI para vehículos diésel, que será obligatoria a partir de 2035 en Colombia de conformidad con lo dispuesto en la Ley 1972 de 2019, subraya la insuficiencia de los estándares anteriores para proteger la salud y el ambiente (Congreso de Colombia, 2019). Esta penalización asegura que los vehículos altamente contaminantes no sean subvalorados en el análisis.

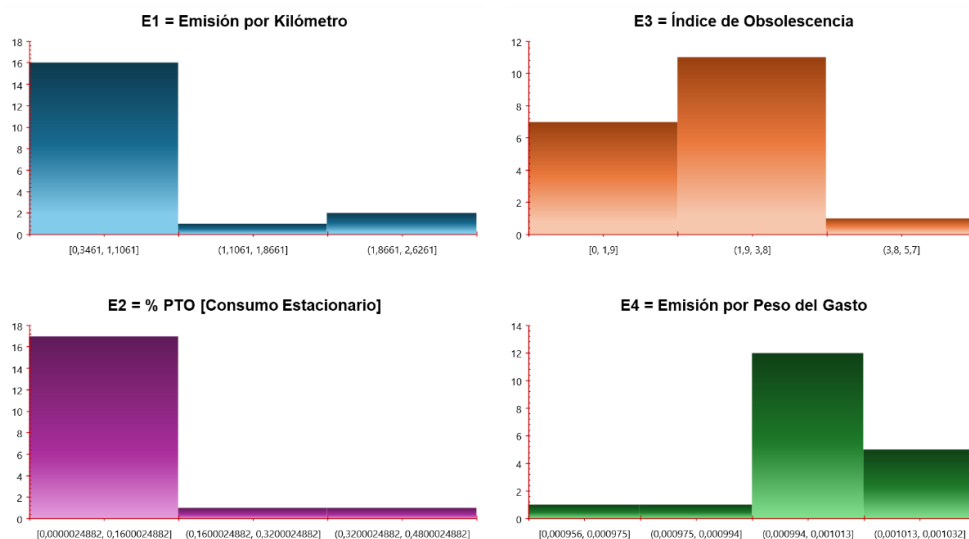
Matrícula	Segmento	E1 = Emisión por kilómetro	E2 = % PTO [Consumo estacionario]	E3 = Índice de obsolescencia	E4 = Emisión por peso del gasto
NHT 672	Media	0,3958	0,00026%	0,1	0,001005
NOS 675	Media	0,4647	0,00027%	0,2	0,001005
NUX 889	Baja	0,3461	0,00152%	0	0,000956
SKM 500	Media	0,6797	0,00032%	3	0,001006
SWK 621	Media	1,0843	0,00031%	2,9	0,001016
SYR 027	Media	0,7274	0,30121%	3,2	0,001008
TSS 669	Media	0,6549	0,00028%	2	0,001014
WWA 722	Media	0,9967	0,00032%	2,2	0,001001

Fuente: Elaboración propia con base en datos exportados de los informes de emisiones de Dcycle y en información corporativa recopilada.¹⁸

Con el fin de visualizar la distribución empírica de los datos y la presencia de asimetrías y valores atípicos, a continuación se exponen los histogramas de los indicadores E₁–E₄. Este análisis visual de los datos brutos sustenta la necesidad de aplicar un enfoque de normalización, previa a la homologación y al cálculo del ICE_r, lo que permite obtener una comparabilidad adecuada frente a estas características.

Figura 9

Distribuciones univariadas de los indicadores E₁–E₄ que serán empleados en la construcción del ICE_r



¹⁸ Para la estimación del índice E₄, se utilizó el valor nominal del combustible en el año base [2024] facturado por empresa, sin ajustes por inflación, con el fin de reflejar con la mayor precisión posible la carga financiera efectiva del período analizado.

Fuente: Elaboración propia con base en los datos brutos de los indicadores E_1 – E_4 , insumo para el diagnóstico multicriterio de los vehículos auditados ¹⁹.

En la figura se observa una asimetría positiva en E_1 [emisiones por km], atribuida principalmente a vehículos tipo Vac-Con/Vactor, y una asimetría extrema en E_2 [% de uso del PTO], con alta concentración de valores cercanos a 0 % y unos pocos casos significativamente elevados conforme con la naturaleza operativa de los vehículos con alto uso de bombas de vacío, lo que revela una distribución fuertemente sesgada a la derecha. El indicador E_3 [obsolescencia normativa] muestra valores discretos por su naturaleza categórica [edad y norma Euro], mientras que E_4 [emisión por peso gastado en combustible] presenta una leve asimetría con sesgo negativo. Este comportamiento no normal —particularmente evidente en la cola derecha de E_2 — justifica el uso de estrategias de normalización previas a la integración de los indicadores en el índice compuesto.

8.2.7. Normalización estadística: Z-score y transformación de Blom

Dado que las métricas E_1 a E_4 utilizadas para evaluar el desempeño de los 19 vehículos auditados presentan escalas distintas y unidades no comparables, se implementó un proceso de normalización estadística a partir de dos enfoques complementarios: primero, mediante puntuaciones estándar [z-scores clásico], considerando la distribución original de los resultados de las variables heterogéneas; y posteriormente, mediante el Método de Blom (1958), una transformación por rangos que aproxima los datos a una distribución normal estándar (Blom, 1958, pp. 70–71; Hong, 2013, p. 73). Esta doble normalización se aplicó previo al cálculo del índice compuesto ICER, con el fin de integrar criterios ambientales [emisiones de CO_2], funcionales [uso de PTO], tecnológicos [obsolescencia] y económicos [impacto financiero] en una escala común, garantizando equidad y comparabilidad en la agregación multicriterio.

Para el primer análisis, el procedimiento inicial de normalización se realizó mediante puntuaciones z , definidas según la expresión clásica:

$$Z_{E_i} = \frac{x - \mu}{\sigma}$$

donde x representa el valor observado, μ la media aritmética del grupo y σ la desviación estándar (NYU Stern, 2023, p. 4). Este procedimiento cuantifica la posición relativa de cada

¹⁹ En la figura cada panel muestra un histograma con la distribución univariada correspondiente a uno de los indicadores E_1 – E_4 empleados en el análisis. En el eje X se representan los intervalos o rangos de clase [Bins] definidos para cada variable, mientras que el eje Y indica el conteo de vehículos que se encuentran en cada intervalo. Esta visualización permite visualizar de manera preliminar la forma empírica de las distribuciones y resaltar posibles patrones como la concentración de valores, la presencia de asimetrías [notablemente en E_1 y E_2] y la naturaleza discreta de E_3 .

observación respecto al comportamiento central de su conjunto de datos, expresada en unidades de desviación (Tipiani & Arce, 2025, p. 1).

Si bien su interpretación probabilística es exacta únicamente bajo distribuciones normales, su aplicación puede extenderse de forma válida a datos con distribuciones no normales cuando el objetivo no es la prueba de hipótesis o la inferencia estadística, sino la estandarización relativa y la identificación de valores atípicos o outlier (NYU Stern, 2023, p. 5) como en el presente caso. En este sentido, el z-score continúa siendo una herramienta útil para comparar observaciones dentro de contextos heterogéneos, siempre que se apliquen con criterio sus limitaciones (FasterCapital, 2025).

En este estudio, el uso del z-score no tiene por objeto establecer significancia estadística ni derivar probabilidades, sino:

- Homologar las métricas E_1 – E_4 para llevarlas a una escala común centrada en su media y expresada en unidades relativas de desviación estándar, facilitando su comparación directa.
- Detectar unidades vehiculares con desempeño atípico respecto a su segmento funcional y realidad operativa.
- Facilitar la construcción del índice compuesto ICE^r de manera objetiva, a partir de las cuatro métricas heterogéneas consideradas y eliminando el sesgo derivado de las diferencias de magnitud entre indicadores.

Ahora bien, entendiendo los posibles efectos de sesgo derivados de la asimetría observada con antelación en las métricas E_1 , E_2 y E_4 , se complementó el análisis mediante la Transformación de Puntuación Normal de Blom (1958). Esta técnica, basada en la ordenación por rangos, asigna a cada valor su posición relativa dentro del conjunto de datos ordenados y la transforma en un valor aproximado del cuantil correspondiente de una distribución normal estándar, sin modificar la distribución original de la muestra ni asumir que ésta sea normal.

En particular, para cada uno de los resultados obtenidos en los cuatro indicadores, la puntuación transformada se calculó mediante la expresión depurada a continuación:

$$Z_i = \Phi^{-1} \left[\frac{R_i - \alpha}{n + 1 - 2\alpha} \right]$$

$$Z_i = \Phi^{-1} \left[\frac{R_i - \left[\frac{3}{8} \right]}{n + \left[\frac{1}{4} \right]} \right]$$

$$Z_i = \Phi^{-1} \left[\frac{R_i - 0,375}{n + 0,25} \right]$$

Donde R_i es el rango ascendente del valor dentro del conjunto de datos [con tamaño $n=19$], Φ^{-1} es la inversa de la función de distribución acumulada normal estándar y α es un parámetro recomendado por Blom [generalmente 0,375] para lograr una buena aproximación. Esta transformación genera puntuaciones cuasi-normales [media ≈ 0 , desviación estándar ≈ 1] que reducen la influencia de valores extremos, estabilizan la varianza, y permiten aplicar umbrales de decisión basados en desviación estándar con mayor solidez teórica (EPA, 2009, p. 132; Yilmaz & Kara, 2024, pp. 301–303).

La aplicación del método de Blom busca expresar cada indicador en una escala común de referencia basada en cuantiles normales estándar, facilitando la comparación entre métricas heterogéneas sin necesidad de asumir normalidad en los datos originales ni transformar directamente su distribución. Esto ayuda a reducir el efecto desproporcionado de valores atípicos extremos en la ponderación relativa como los asociados a un consumo estacionario [PTO] desproporcionado y mejora la validez y transparencia metodológica del análisis de severidad relativa.

Además, al trabajar con estas puntuaciones en escala normal estándar, se facilita la aplicación de criterios de decisión basados en umbrales tipo $\mu \pm \sigma$, incluso en contextos donde la normalidad estricta no se cumple, aportando mayor rigor y consistencia al proceso de priorización multicriterio.

A continuación, se presentan los resultados estandarizados de las métricas E_1 a E_4 bajo los métodos de *z-score* clásico y de transformación inversa-normal por rangos de Blom, a fin de contrastar su efecto en la priorización relativa de los 19 vehículos auditados.

Tabla 16

Comparación de puntuaciones estandarizadas bajo enfoques Z-score clásico y Blom's Normal Scores para las métricas E_1 – E_4

Matrícula	Z-Score				Blom's Method			
	z E1	z E2	z E3	z E4	z E1	z E2	z E3	z E4
ARB 073	-0,37	-0,40	2,05	-0,52	-0,13	0,26	1,85	-1,10
BOY 187	-0,06	-0,40	0,65	0,50	0,55	-0,88	0,62	0,40
CSG 159	-0,89	-0,40	1,14	-0,20	-1,38	-1,85	1,38	-0,71
FST 059	-0,07	-0,40	0,93	0,87	0,40	0,00	1,10	1,38
GQU 227	2,16	2,36	0,37	0,69	1,38	1,38	0,07	0,88
JRY 719	-0,77	-0,40	-0,46	0,52	-0,88	-0,40	-0,40	0,55
JRY 724	-0,12	-0,38	-1,09	0,00	0,26	0,71	-0,55	-0,26
JSL 352	2,77	3,22	0,58	0,34	1,85	1,85	0,33	0,26
KNK 945	-0,66	-0,38	-1,23	1,21	-0,55	0,55	-0,71	1,85

Matrícula	Z-Score				Blom's Method			
	z E1	z E2	z E3	z E4	z E1	z E2	z E3	z E4
KPN 578	1,36	0,75	0,37	-1,60	1,10	1,10	0,07	-1,38
LZL 711	-0,42	-0,40	-1,30	0,22	-0,40	-0,55	-0,98	0,00
NHT 672	-0,85	-0,40	-1,37	-0,01	-1,10	-1,38	-1,38	-0,40
NOS 675	-0,73	-0,40	-1,30	-0,01	-0,71	-1,10	-0,98	-0,55
NUX 889	-0,94	-0,40	-1,44	-3,41	-1,85	0,40	-1,85	-1,85
SKM 500	-0,35	-0,40	0,65	0,04	0,00	-0,13	0,62	-0,13
SWK 621	0,37	-0,40	0,58	0,76	0,88	-0,26	0,33	1,10
SYR 027	-0,26	-0,37	0,79	0,22	0,13	0,88	0,88	0,13
TSS 669	-0,39	-0,40	-0,04	0,65	-0,26	-0,71	-0,26	0,71
WWA 722	0,22	-0,40	0,10	-0,27	0,71	0,13	-0,13	-0,88

Fuente: Elaboración propia con base en las métricas E_1 [Emisión por kilómetro], E_2 [Consumo estacionario PTO], E_3 [Índice de obsolescencia] y E_4 [Emisión por peso gasto en Diesel].

Para complementar el análisis detallado en la tabla, a continuación se presentan los gráficos de densidad de distribución que ilustran el comportamiento de las puntuaciones estandarizadas obtenidas con ambos métodos.

Figura 10

Comparación de las puntuaciones estandarizadas para los indicadores homologados E_1 – E_4 mediante los métodos de z-score clásico y de Blom.



Fuente: Elaboración propia a partir de las puntuaciones estandarizadas obtenidas de los indicadores E_1 – E_4 bajo los enfoques de Z-score clásico y de Blom.

El análisis visual de estos gráficos revela que, mientras que las puntuaciones del z-score clásico tienden a mostrar distribuciones con sesgos, las puntuaciones del método de Blom se distribuyen de manera más uniforme. Esta característica valida el uso de la aproximación de Blom como una técnica de normalización adecuada, ya que mitiga de forma efectiva los sesgos derivados de la asimetría observada en los datos brutos.

8.2.8. Índice compuesto de eficiencia relativa: Diseño y criterios de priorización

Con el fin de jerarquizar técnicamente las intervenciones sobre la flota, se construyó un Índice Compuesto de Eficiencia Relativa [ICE^r] que integra, en una sola métrica, las cuatro dimensiones homologadas: las emisiones relativas de CO₂ por unidad de desplazamiento [E₁], el consumo estacionario de combustible fósil en modo Power Take-Off [E₂], el nivel de obsolescencia tecnológica [E₃], y el impacto económico por unidad de emisión [E₄]. Cada uno de estos indicadores se transformó a puntuaciones homologadas [z-score clásico y Blom's Normal Scores] para eliminar las diferencias de escala y permitir su comparación directa. Luego para cada uno de los dos enfoques considerados se calculó el índice ICE^r como el promedio aritmético simple de estas puntuaciones, con una ponderación uniforme del 25 % para cada variable analizada:

$$ICE^r = \frac{z[E_1] + z[E_2] + z[E_3] + z[E_4]}{4}$$

Este enfoque dual refuerza el diagnóstico de las fuentes móviles de emisión al contrastar dos métodos de estandarización complementarios. El z-score clásico permite homologar variables heterogéneas y medir desviaciones relativas, pero puede ser sensible a distribuciones no normales o datos con colas sesgadas (FasterCapital, 2025; NYU Stern, 2023). En contraste, el Método de Blom (1958) asigna a cada observación un cuantil esperado bajo una distribución normal estándar según su rango, sin asumir normalidad en los datos originales. Aunque no garantiza normalidad exacta, esta transformación aproxima los datos a un patrón cuasi-normal, permitiendo aplicar umbrales de severidad con mayor precisión metodológica. Por ello, la combinación de ambos métodos no solo es válida, sino recomendable para una priorización más sólida y transparente (Yılmaz & Kara, 2024, pp. 301–303).

Ahora bien, para clasificar a las fuentes móviles de emisión según su prioridad de intervención, se adoptó la regla empírica estadística basada en la media y la desviación estándar del ICE^r, tal y como se expone a continuación:

- Acción inmediata → $ICE^r > \mu + \sigma$

- Diagnóstico / Plan de Mejora $\rightarrow \mu \leq ICE^r \leq \mu + \sigma$
- Mantener y Monitorizar $\rightarrow ICE^r < \mu$

Este umbral permite identificar desviaciones significativas como indicadores de comportamiento fuera de norma, incluso en contextos no normales, siempre que el objetivo no sea inferencia estadística sino priorización relativa (NYU Stern, 2023).

Adicionalmente, previo a la evaluación de los criterios de severidad, se incorporó una cláusula de corrección estructural que reclasifica automáticamente en la categoría de Acción inmediata a cualquier unidad con un índice de obsolescencia $E3 > 3,5$. Este umbral corresponde, en términos generales, a vehículos anteriores a la primera normativa Euro [anteriores a 1993], o aquellos que no cumplen con estándares de emisiones actuales. La justificación de este umbral se basa en cuatro factores clave:

1. La subutilización puede extender artificialmente el ciclo de vida del activo, sin reflejar su verdadera eficiencia estructural ni reducir significativamente sus costos de mantenimiento (Amper Technologies, 2025).
2. La aceleración del cambio tecnológico reduce la utilidad relativa de tecnologías más antiguas, incluso si su rendimiento operativo puntual parece aceptable (Barreca & Kateregga, 2000).
3. La obsolescencia tecnológica de vehículos con tecnologías de emisión antiguas [$\bar{x} = 18$ años] genera un mayor impacto negativo en términos de emisiones contaminantes y una menor eficiencia en el consumo de combustible, lo que justifica su priorización para la renovación de flota (GIZ, 2021, p. 13).
4. Ignorar estos factores puede inducir una sobreestimación de la vida útil y del valor económico residual, afectando negativamente la planificación de renovación tecnológica (Barreca & Kateregga, 2000).

Con esta medida se busca evitar que vehículos con eficiencia aparente pero con alta obsolescencia tecnológica permanezcan en operación más allá de su utilidad técnica, económica y ambiental real.

En virtud de lo expuesto, y con base en las premisas técnicas expuestas, se estimaron los valores del ICE^r conforme con los dos enfoques y para cada uno de los 19 vehículos, así como su clasificación según los umbrales de severidad definidos.

Tabla 17

Resultados en paralelo del ICE^r y su asignación de severidad, obtenidos mediante los métodos de z-score clásico y aproximación de Blom.

Matrícula	Segmento	Total Emisiones [t CO ₂ eq]	Z-Score		Blom's Method	
			ICE ^r [Clásico]	Severidad [Clásico]	ICE ^r [Blom]	Severidad [Blom]
ARB 073	Media	8,57	0,188	Acción Inmediata	0,220	Acción Inmediata
BOY 187	Media	45,22	0,175	Diagnóstico	0,172	Diagnóstico
CSG 159	Media	5,85	-0,086	Acción Inmediata	-0,638	Acción Inmediata
FST 059	Media	47,73	0,333	Diagnóstico	0,718	Acción Inmediata
GQU 227	Alta	45,32	1,395	Acción Inmediata	0,925	Acción Inmediata
JRY 719	Baja	16,10	-0,280	Mantener	-0,285	Mantener
JRY 724	Media	43,79	-0,397	Mantener	0,040	Diagnóstico
JSL 352	Alta	43,76	1,728	Acción Inmediata	1,072	Acción Inmediata
KNK 945	Media	29,94	-0,263	Mantener	0,285	Diagnóstico
KPN 578	Alta	17,48	0,221	Diagnóstico	0,221	Diagnóstico
LZL 711	Media	48,00	-0,475	Mantener	-0,483	Mantener
NHT 672	Media	16,44	-0,657	Mantener	-1,062	Mantener
NOS 675	Media	23,92	-0,609	Mantener	-0,834	Mantener
NUX 889	Baja	0,79	-1,547	Mantener	-1,284	Mantener
SKM 500	Media	23,08	-0,013	Mantener	0,091	Diagnóstico
SWK 621	Media	40,12	0,329	Diagnóstico	0,512	Diagnóstico
SYR 027	Media	21,42	0,095	Diagnóstico	0,507	Diagnóstico
TSS 669	Media	22,07	-0,047	Mantener	-0,132	Mantener
WWA 722	Media	42,11	-0,090	Mantener	-0,045	Mantener

Fuente: Elaboración propia con base en los puntajes z estimados mediante los enfoques Z-score y Blom, y en los criterios de decisión definidos por umbrales σ .

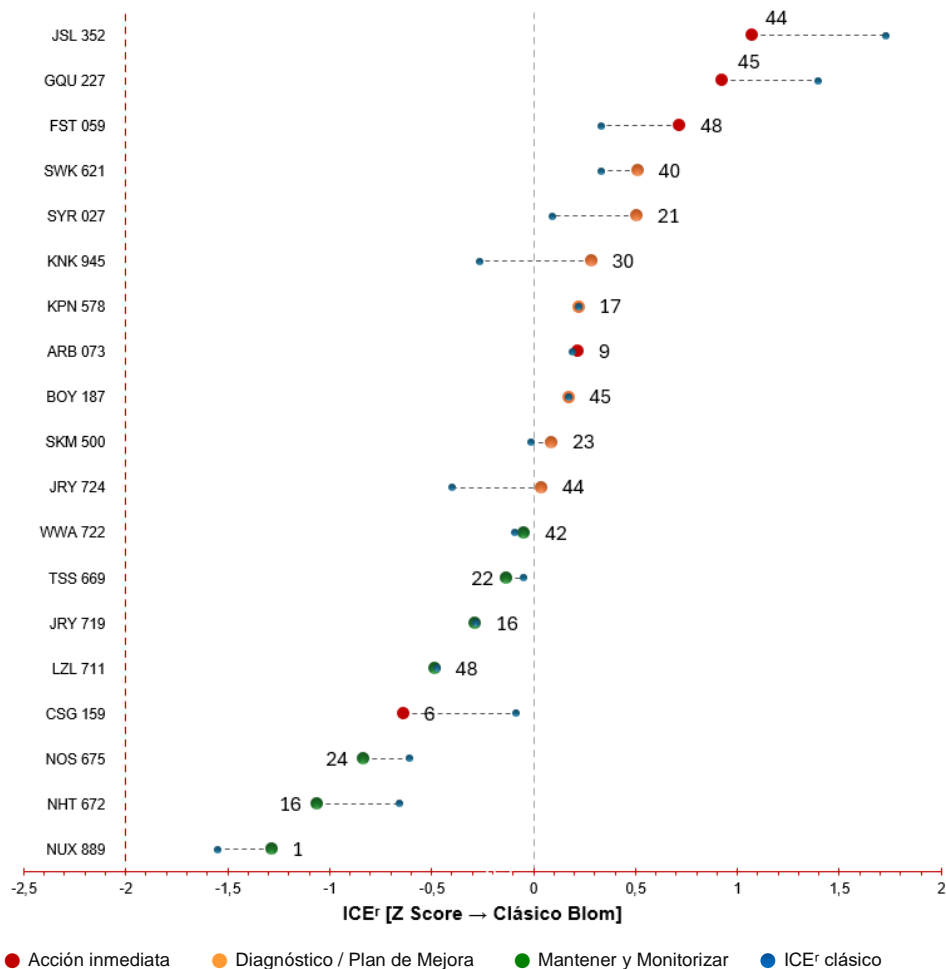
A partir de los resultados detallados en la precitada tabla, y conforme con el enfoque del Z-Score clásico, se observa que el 47 % de la flota presenta alguna condición de severidad considerable. En particular, cuatro vehículos —equivalentes al 20 % del parque móvil— concentran más de 103 toneladas de CO₂eq, y presentan el mayor potencial estratégico de intervención, por lo que dentro de este primer análisis fueron clasificados como de “Acción inmediata”, mientras que otros cinco [5] acumulan casi 172 toneladas adicionales bajo la categoría de “Diagnóstico / Plan de mejora”. En conjunto, estas nueve unidades explican aproximadamente el 50,85 % de las emisiones móviles totales del proceso.

Ahora bien, aplicando la transformación inversa-normal de Blom a los cuatro indicadores [E₁–E₄] y recalculando el índice compuesto ICE^r, se obtuvieron cinco vehículos [26 % de la flota] en categoría “Acción inmediata” —JSL 352, GQU 227, ARB 073, CSG 159 y FST 059—

los cuales en conjunto concentraron poco más de 151 t CO₂eq [casi el 28 % de las emisiones operacionales móviles del periodo 2024]. Siete unidades adicionales [Aproximadamente el 37 %] quedaron en “Diagnóstico/Plan de mejora” y explican otro [41 % del impacto operacional]; el resto se conservan en “Mantener y Monitorizar”. Bajo ese entendido, el nuevo esquema confirma los focos críticos detectados con el z-score clásico, pero corrige la subestimación causada por la cola derecha de E₂ [% PTO] y por tanto, la unidad tipo Vac-Con identificada con la matrícula FST 059 asciende a la máxima categoría de intervención y se reevalúa la prioridad de los camiones [JRY 724, KNK 945, SKM 500], los cuales pasan a modo “Diagnóstico/Plan de mejora”, lo que refina la priorización sin alterar la estrategia general de intervención sobre los principales emisores tal y como se observa en los desplazamientos de la siguiente grafica dumbbell.

Figura 11

Desplazamiento del ICE^r por vehículo tras la transformación inversa-normal de Blom.



Fuente: Elaboración propia a partir de los valores del ICE^r obtenidos mediante los enfoques Z-score clásico y Aproximación de Blom.²⁰

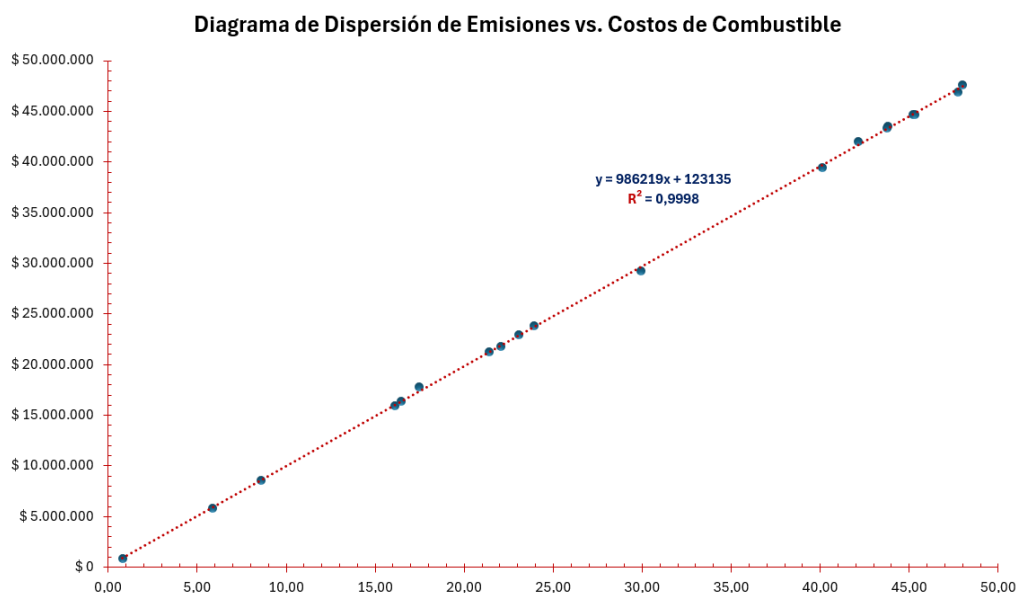
Por tanto, y dado que ambos enfoques convergen en los principales focos estratégico, pero el método Blom mitiga el sesgo por asimetría, las acciones estratégicas de reducción se priorizarán con base en la clasificación Blom, mientras que los resultados del z-score clásico se conservan como referencia de validación metodológica.

8.2.9. Costo marginal de las emisiones de alcance 1

Una vez realizado el análisis de regresión lineal entre las emisiones de CO₂eq de Alcance 1 por combustible y los costos del diésel para el periodo 2024, se identificó la ecuación de la recta de mejor ajuste, como se ilustra en el siguiente diagrama de dispersión.

Figura 12

Diagrama de dispersión: Relación entre emisiones de GEI de Alcance 1 y costos de diésel, 2024.



Fuente: Elaboración propia a partir de los registros de consumo de combustible y los datos del inventario de emisiones de GEI de la organización [2024].

²⁰ El gráfico tipo dumbbell muestra el desplazamiento del valor del ICE^r tras aplicar la transformación de Blom. En el eje Y se listan las matrículas, ordenadas de mayor a menor según su ICE^r-Blom; en el eje X, cada línea conecta el valor del ICE^r clásico [punto azul] con el estimado mediante Blom [círculo]. El color del círculo indica la severidad final [rojo = Acción inmediata; ámbar = Diagnóstico/Plan de mejora; verde = Mantener], y la etiqueta señala las emisiones totales [t CO₂eq] de cada unidad. Los desplazamientos amplios entre punto y círculo evidencian la sensibilidad del resultado a la asimetría de los datos, mientras que la ausencia de desplazamiento indica consistencia diagnóstica entre ambos enfoques.

La pendiente de esta ecuación, con un valor de \$986.219 por tonelada de CO₂eq, representa el costo marginal de las emisiones. Este valor empírico significa que, bajo las condiciones operativas de la flota en el periodo analizado, cada tonelada de CO₂eq evitada mediante la reducción del consumo de diésel se traduce en un ahorro financiero de aproximadamente un millón de pesos. Este hallazgo resalta la relación directa entre la eficiencia de la flota y el desempeño económico, ofreciendo una métrica clave para la gestión de costos y el desempeño ambiental.

8.2.10. Emisiones de alcance 2 por consumo de energía eléctrica

Este apartado presenta la caracterización y diagnóstico de las emisiones de gases de efecto invernadero de Alcance 2, asociadas al consumo de energía eléctrica de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales durante el año 2024, bajo el enfoque de control operacional. El cálculo se realizó utilizando el método location-based, el cual estima las emisiones en función del promedio de la matriz eléctrica nacional del país donde se consume la energía, y el factor de emisión correspondiente a la red eléctrica de Colombia [$EF = 0,2637119688 \text{ kg CO}_2\text{eq/kWh}$], tomado de la base de datos Ecoinvent 3.9.1 e incorporado en la plataforma Dcycle.

La información de consumo proviene de los registros mensuales de facturación eléctrica de la PTAR, los cuales incluyen valores de energía en kWh y costos históricos “todo incluido” suministrados por la empresa. Estos datos fueron ingresados en Dcycle, plataforma certificada conforme al GHG Protocol, a través de la cual se estimó la huella de carbono de alcance 2 y se generaron los reportes de GEI e impactos utilizados en este apartado.

La operación de la PTAR se desarrolla en un régimen continuo de tres turnos diarios — 06:00 a 14:00, 14:00 a 22:00 y 22:00 a 06:00—, con una duración efectiva aproximada de 6 a 6,5 horas por turno. El tratamiento se detiene temporalmente para ejecutar ciclos de retrolavado y purga, lo que genera pausas de 1,5 a 2 horas por bache. Cada bache corresponde al procesamiento de 20.000 litros en los tanques de tratamiento. Este patrón operativo implica un funcionamiento promedio de 20 horas diarias, lo que, junto con la estabilidad del costo unitario de la energía, explica en gran medida el comportamiento relativamente constante del consumo mensual observado en la serie 2024.

El análisis se enfoca exclusivamente en la PTAR, excluyendo tanto la sede administrativa como la bodega, y se basa en una serie mensual completa —de enero a diciembre— sin vacíos

de información, lo que garantiza la integridad y trazabilidad de los datos evaluados, como se evidencia en la tabla a continuación.

Tabla 18

Relación de consumos de energía eléctrica, costos y emisiones de CO₂eq para el periodo 2024

Mes	Consumo [kWh]	Costo Facturado [\$]	Costo unitario [\$/kWh]	Emisiones [tCO ₂ eq]
Enero	15.180	16.203.380	1.067	4
Febrero	11.580	12.758.840	1.102	3,05
Marzo	12.960	13.821.320	1.066	3,42
Abril	12.850	13.717.810	1.068	3,39
Mayo	14.760	16.454.700	1.115	3,89
Junio	16.380	18.167.320	1.109	4,32
Julio	11.400	12.070.910	1.059	3,01
Agosto	15.240	15.571.610	1.022	4,02
Septiembre	12.840	13.759.890	1.072	3,39
Octubre	15.540	16.915.200	1.088	4,1
Noviembre	13.740	14.197.200	1.033	3,62
Diciembre	15.480	16.078.770	1.039	4,08
Total	167.950	179.716.950	12.840	44,29

Fuente: Elaboración propia con base en los registros de facturación eléctrica suministrados por la empresa y los cálculos de emisiones efectuados en la plataforma Dcycle, correspondientes al periodo enero–diciembre de 2024. ²¹

En conjunto, la PTAR registró en 2024 un consumo eléctrico anual de 167.950 kWh, que generó 44,29 tCO₂eq bajo el enfoque *location-based*. El gasto asociado ascendió a \$179.716.950 COP, con un costo unitario medio de \$1.070 /kWh, lo que refleja un comportamiento tarifario estable y un nivel de consumo que constituye la línea base para la gestión del Alcance 2.

8.2.11. Análisis descriptivo y medidas de variabilidad

Para lograr una comprensión más certera de la línea base de consumo energético y sus emisiones asociadas, se calcularon las principales medidas de tendencia central y de

²¹ El cálculo de las emisiones de CO₂ equivalente se realizó bajo el enfoque *location-based*, el cual estima las emisiones indirectas de Alcance 2 en función del promedio del mix eléctrico nacional. Para el caso de Colombia, se aplicó un factor de emisión de 0,2637119688 kg CO₂eq/kWh, tomado de la base de datos Ecoinvent 3.9.1 e incorporado en la plataforma Dcycle, conforme a los lineamientos del GHG Protocol.

dispersión para el periodo 2024. Estos estadísticos, resumidos en las siguientes tablas, proporcionan una visión concisa de los patrones operativos de la PTAR.

Tabla 19

Estadísticos de la serie mensual [kWh de la PTAR, 2024]

Métrica	Fórmula	Resultado
Media [kWh/mes]	$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$	13.996 kWh/mes
Desviación estándar [kWh]	$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n [x_i - \bar{x}]^2}$	1.656 kWh
Coefficiente de variación [CV]	$CV = \frac{s}{\bar{x}} \times 100\%$	11,83 %
Mediana [Q ₂] [kWh]	$\tilde{x} = \frac{x_{(\frac{n}{2})} + x_{(\frac{n}{2}+1)}}{2}$, [Sobre los datos ordenados]	14.250 kWh
Rango [kWh]	$R = \max(x) - \min(x)$	4.980 kWh

Fuente: Elaboración propia a partir de los registros de facturación eléctrica del 2024 y las estimaciones de emisiones de la plataforma Dcycle.

Tabla 20

Estadísticos de la serie mensual de emisiones [tCO₂e, PTAR 2024]

Métrica	Fórmula	Resultado
Media [tCO ₂ e/mes]	$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$	3,691 t/mes
Desviación estándar [tCO ₂ e]	$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n [x_i - \bar{x}]^2}$	0,437 t
Coefficiente de variación [CV]	$CV = \frac{s}{\bar{x}} \times 100\%$	11,83 %
Mediana [Q ₂] [tCO ₂ e]	$\tilde{x} = \frac{x_{(\frac{n}{2})} + x_{(\frac{n}{2}+1)}}{2}$, [Sobre los datos ordenados]	3,758 t
Rango [kWh] [tCO ₂ e]	$R = \max(x) - \min(x)$	1,313 t

Fuente: Elaboración propia en base a la facturación eléctrica del 2024 y los datos de emisiones de Dcycle.

Las tablas revelan una fuerte correlación y consistencia entre el consumo de energía y las emisiones. La media de consumo de 13,996 kWh/mes y la media de emisiones de 3,691 tCO₂e/mes establecen los valores centrales de la operación. El Coeficiente de Variación [CV] de 11.83% en ambas series indica que las fluctuaciones mensuales son relativamente bajas en

Fuente: Elaboración propia a partir de registros de consumo eléctrico 2024 de la PTAR, y basado en el método intercuartílico de Tukey (1977).

- El Q_1 [Percentil 25%] se determinó como el promedio de los valores en las posiciones 3 y 4 del conjunto ordenado, toda vez que $0,25 \times 12 = 3$. esto corresponde a la media aritmética en los siguientes términos:

$$Q_1 = \frac{[12.840 + 12.850]}{2} = 12.845 \text{ kWh}$$

- El Q_3 [Percentil 75%] se obtuvo promediando los valores en las posiciones 9 y 10 dado que $0,75 \times 12 = 9$. Esto corresponde a:

$$Q_3 = \frac{[15.240 + 15.480]}{2} = 15.360 \text{ kWh}$$

Con estos resultados, el rango es:

$$IQR = 15.360 - 12.845 = 2515 \text{ kWh}$$

El valor del IQR [2,515 kWh] mide la dispersión del 50% central de los datos. Este rango abarca el 50% de los valores situados entre el primer cuartil [Q_1] y el tercer cuartil [Q_3], y no debe confundirse con la mediana [Q_2] (Belver, 2023; Oracle EPM Planning, 2024). Este intervalo indica la variabilidad de los consumos energéticos en los meses de operación más típicos de la PTAR.

El hecho de que el IQR sea relativamente bajo en comparación con el rango total de consumo [4,980 kWh] es un hallazgo significativo. Mientras que el rango total mide la diferencia entre el valor máximo y el mínimo de los datos [16.380 kWh – 11.400 kWh], el IQR refleja el rango en el que se encuentran el 50% de los valores centrales de los datos. Un IQR bajo como el obtenido indica que la mayoría de los consumos de energía se agrupan cerca de la mediana [Segundo cuartil Q_2], lo que sugiere que no hay grandes fluctuaciones en los consumos de energía durante los meses más representativos de operación.

Este bajo nivel de dispersión en el centro de los datos sugiere una alta consistencia en el núcleo de la operación, y permite inferir que las variaciones mensuales no son fluctuaciones erráticas, sino cambios graduales y predecibles. Esta consistencia se traduce directamente en una relación fuertemente proporcional y predecible entre el consumo de energía y las emisiones de CO_2eq , lo que facilita la modelación y el pronóstico de la huella de carbono.

Seguidamente, se calcularon los límites de detección de valores atípicos así:

$$\text{Límite inferior} = 12.845 - [1,5 \times 2515] = 9.073 \text{ kWh}$$

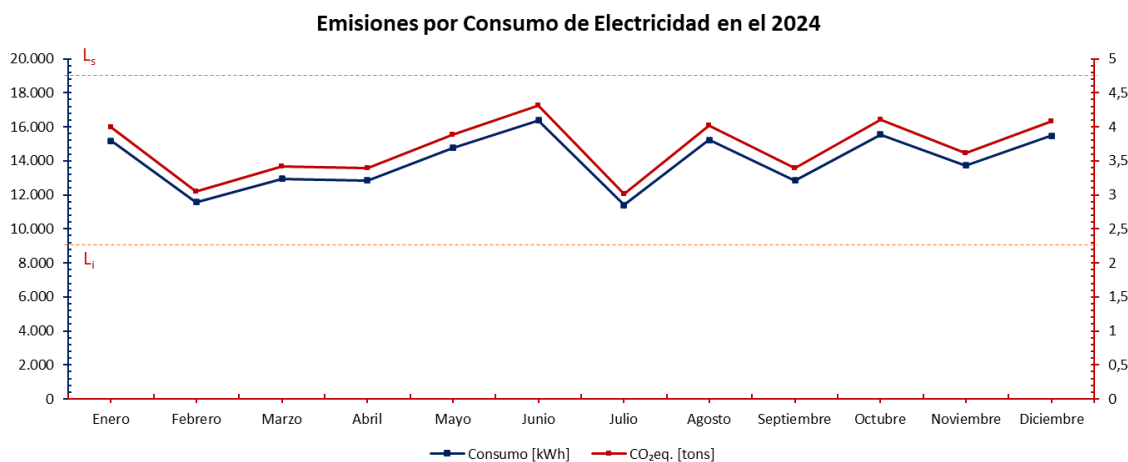
$$\text{Límite superior} = 15.360 + [1,5 \times 2515] = 19.133 \text{ kWh}$$

Conforme a los umbrales de detección de valores atípicos, ningún mes del periodo 2024 presentó consumos fuera de los límites de 9,073 kWh y 19,133 kWh. Este hallazgo es un indicador sólido de la estabilidad operativa de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales durante todo el periodo. La ausencia de valores atípicos [outliers] implica que no se detectaron picos o caídas abruptas de consumo que pudieran sugerir fallos en equipos, drenado de energía inesperado o ineficiencias operativas significativas.

Esta consistencia en el consumo de energía se traduce directamente en una variación controlada y predecible de las emisiones indirectas de CO₂eq. Por lo tanto, la línea base de emisiones de 2024 puede ser establecida con un alto grado de confianza, ya que se basa en un año de operación sin anomalías estadísticas. La aplicación del método IQR no solo valida la consistencia de los datos, sino que también establece un marco de referencia que puede ser utilizado para la detección temprana de desviaciones relevantes, respaldando así la toma de decisiones estratégicas orientadas a la gestión energética y a la reducción de la huella de carbono.

Figura 14

Distribución mensual del consumo eléctrico y emisiones indirectas de CO₂eq en el 2024, con umbrales de detección de valores atípicos [Método IQR]



Fuente: Elaboración propia con base en datos de consumo eléctrico de la empresa y cálculos de emisiones en Dcycle, aplicando el método IQR para el periodo 2024.^{22,23}

8.2.13. Indicadores de intensidad operativa de la línea base 2024

Los indicadores de intensidad operativa, presentados en la siguiente tabla, relacionan el desempeño ambiental y económico con el volumen de agua tratada, proporcionando una métrica de eficiencia clave para la gestión de la PTAR.

Tabla 21

Síntesis de métricas de intensidad operativa para la línea base 2024

Indicador	Fórmula	Resultado
Energía específica [kWh/m ³]	$\frac{kWh_{Totales}}{m_{Treatles}^3}$	1,353 kWh/m ³
Intensidad de carbono [kgCO ₂ e/m ³]	$\frac{kWh_{Totales} \times EF}{m_{Treatles}^3}$	0,357 kgCO ₂ eq/m ³
Intensidad económica [COP/m ³]	$\frac{Costos kWh_{Totales}}{m_{Treatles}^3}$	\$ 1.448,10 /m ³

Fuente: Elaboración propia con base en los registros de consumo energético, volumen de agua tratada y costos operativos de la PTAR durante 2024.

La energía específica de 1.353 kWh/m³ y la intensidad de carbono de 0.357 kgCO₂eq/m³ son indicadores directos de la eficiencia energética y ambiental de la planta por cada metro cúbico de agua tratada. Estos valores sirven como punto de referencia para monitorear el desempeño futuro y para comparar la eficiencia de la PTAR con estándares de la industria, permitiendo establecer metas objetivas para la reducción de la huella de carbono. La intensidad económica de 1,448.10/m³ complementa el análisis, vinculando la eficiencia energética con el impacto en los costos operativos.

²² Para evaluar la estabilidad de la serie mensual de consumos eléctricos [2024] se aplicó el método del rango intercuartílico [IQR], con cuartiles definidos mediante hinges de Tukey. Se obtuvo Q1=12.845 kWh, Q2=14.250 kWh, Q3=15.360 kWh, por lo que IQR=2.515 kWh. Los límites de Tukey resultaron 9.072,5–19.132,5 kWh, dentro de los cuales se encuentran todos los meses; no se identificaron valores atípicos. El IQR relativamente bajo frente al rango total [4.980 kWh] confirma variabilidad moderada en torno a la mediana, consistente con una operación estable; dado que las emisiones de Alcance 2 son proporcionales al consumo [EF constante], esta estabilidad se refleja linealmente en las emisiones.

²³ Nota metodológica: existen definiciones alternativas basadas en percentiles con interpolación [p. ej., en Microsoft Excel las funciones QUARTILE.INC/EXC]. En esta serie con [n=12] dichas variantes producen valores muy próximos [p. ej., con QUARTILE.INC: Q1≈12.847,5 kWh, Q3≈15.300 kWh, IQR≈2.452,5 kWh], con diferencias <1% en Q1/Q3 y ≈5% en el IQR, que no alteran los límites de decisión ni la conclusión de “sin outliers”.

8.2.14. Análisis de la relación costo-emisiones

Para complementar el análisis descriptivo, se calculó el coeficiente de correlación de Pearson (r) entre las emisiones indirectas de CO₂eq y los costos de energía. El resultado, $r \approx 0.971$, indica una relación lineal muy fuerte entre ambas variables.

Este alto coeficiente de correlación no establece una causalidad directa entre los costos y las emisiones, pero sí documenta y cuantifica una relación intrínseca ya conocida: las emisiones indirectas son proporcionales al consumo de kWh, y los costos son una función directa de esos mismos kWh consumidos. En consecuencia, esta correlación valida que cualquier estrategia de reducción de consumo energético no solo impactará positivamente en la huella de carbono, sino que también generará un ahorro económico proporcional. Por lo tanto, el análisis de la correlación costo-emisiones proporciona una base sólida para proponer decisiones estratégicas que simultáneamente optimicen el desempeño ambiental y financiero de la PTAR.

8.2.15. Estimación del ahorro potencial por tonelada de CO₂eq evitada

Con el propósito de cuantificar el ahorro potencial en costos de energía eléctrica por cada tonelada de CO₂eq evitada [emisiones indirectas de Alcance 2], se aplicó un modelo de regresión lineal simple. Este enfoque busca establecer una relación cuantitativa entre el costo mensual de la electricidad [variable dependiente, Y] y el total de emisiones mensuales [variable independiente, X].

Este planteamiento proviene de la formulación general de un modelo de regresión lineal simple:

$$Y = \alpha + \beta X + \varepsilon$$

Donde Y es la variable respuesta [costo mensual], X la variable explicativa [emisiones mensuales], α el intercepto [costo estimado cuando las emisiones son cero], β la pendiente o coeficiente de regresión, y ε el término de error aleatorio. Según la teoría, este tipo de modelo permite estimar el cambio promedio en Y por cada unidad de cambio en X bajo los supuestos de Gauss–Markov, garantizando que β sea una estimación insesgada y eficiente (De Lucas Coloma, 2018).

Para el presente análisis, el modelo específico se expresa en los siguientes términos:

$$\text{Costo} = \alpha + \beta tCO_{2eq}$$

Donde:

α = Intercepto, representa el costo estimado cuando las emisiones son cero [\$/COP].

β = Pendiente, representa el costo marginal por tonelada de CO₂eq [\$/COP/tCO₂e].

tCO_{2eq} = Emisiones indirectas mensuales de alcance 2.

Al aplicar el modelo a los 12 meses del periodo 2024, se obtuvieron los siguientes resultados:

$$\beta \approx \frac{\$ 4.110.880,71}{tCO_{2eq}}$$

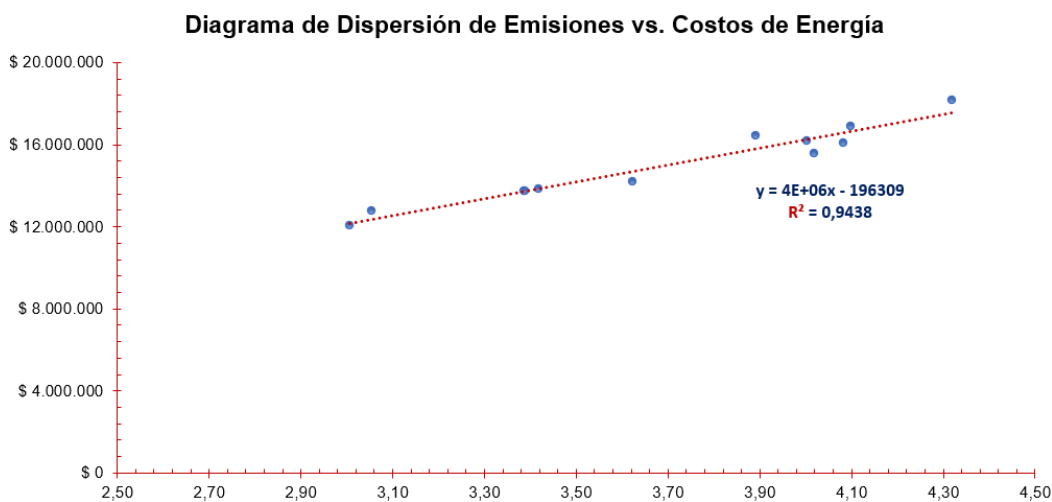
$$\alpha \approx \$ - 196.309$$

$$R^2 \approx 0,944 ; r \approx 0,944$$

El coeficiente de determinación R^2 indica que el 94,4 % de la variabilidad observada en el costo mensual está estadísticamente asociada con la variabilidad en las emisiones, dado que ambas dependen directamente del consumo eléctrico operativo [kWh]. Bajo ese entendido, y conforme con lo que se observa en la gráfica de a continuación, el coeficiente de correlación $r \approx 0,971$ confirma que existe una relación lineal muy fuerte entre ambas variables, sin que ello implique una relación causa–efecto directo.

Figura 15

Modelo de Regresión Lineal asociado a los Costos de Energía en función de las Emisiones de CO_{2eq}



Fuente: Elaboración propia a partir de los registros de facturación eléctrica de la empresa y los cálculos de emisiones indirectas de la plataforma Dcycle.

Así las cosas, el modelo ajustado se resume en la siguiente ecuación:

$$Costo = -196.309 + 4.110.880,71 \cdot tCO_{2eq}$$

Bajo este planteamiento, el coeficiente asociado a tCO_{2eq} indica que, en las condiciones observadas durante 2024, cada tonelada de CO_{2eq} evitada —mediante la reducción del consumo eléctrico de red— se traduce en un ahorro aproximado de 4.110.880 millones de pesos a precios constantes respecto al periodo analizado.

Esta estimación empírica coincide con la deducción teórica basada en la relación de las siguientes expresiones:

$$tCO_{2eq} = \frac{\text{Factor de Emisión [EF]}}{1000} \cdot kWh \quad \text{y} \quad \text{Costo} = P \cdot kWh$$

$$\frac{\text{Costo}}{tCO_{2eq}} = \frac{P}{\frac{EF}{1000}} = \frac{1000 \cdot P}{EF}$$

Sustituyendo:

- $P \approx \$ 1.070/kWh$ [Precio unitario medio en el 2024]
- $EF = 0,2637119688 \text{ kgCO}_{2eq}/kWh$

Se obtiene:

$$\beta_{teórico} \approx \frac{1000 \cdot 1070}{0,2637119688} \approx \$ 4.057.408/tCO_{2eq}$$

Por tanto, se puede señalar que el modelo presenta un elevado ajuste estadístico [$R^2 \approx 0,944$], lo que refleja que la variabilidad en el costo mensual de la electricidad está fuertemente asociada a la variabilidad en las emisiones indirectas de Alcance 2, ambas determinadas por el consumo eléctrico operativo. El coeficiente estimado para tCO_{2eq} indica que, bajo las condiciones observadas en el 2024, cada tonelada de CO_{2eq} evitada mediante la reducción de kWh de la red se traduce en un ahorro cercano a 4,11 millones pesos a precios constantes del periodo. Este valor empírico coincide estrechamente con la deducción teórica $\beta_{teórico} \approx \$ 4.06/tCO_{2eq}$ derivada de la relación entre el precio unitario medio de la energía y el factor de emisión de la red eléctrica nacional, con una diferencia relativa del [$\approx 1,3\%$] atribuible a la baja variabilidad mensual del precio [$CV \approx 2,8\%$]. La consistencia entre la evidencia empírica y la formulación teórica, respaldan el uso de este enfoque como herramienta práctica para monetizar potenciales reducciones de emisiones, proyectar escenarios de ahorro derivados de medidas de eficiencia energética e integrar la relación costo-emisiones en la priorización de estrategias de mitigación en la PTAR.

8.3 Análisis interno: Nivel disposición y preparación organizacional

En coherencia con el enfoque metodológico combinado adoptado para el análisis interno, el presente apartado desarrolla el componente organizacional, orientado a evaluar el nivel de preparación y disposición de PLANETA S.A.S. E.S.P para adoptar e implementar una

estrategia de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero [GEI] en sus procesos críticos de tratamiento de aguas residuales.

En particular, el análisis busca identificar las fortalezas y áreas en consolidación dentro de la organización, con el fin de determinar las condiciones institucionales que facilitarían la ejecución de proyectos de mitigación en los alcances 1 y 2 definidos por el GHG Protocol.

Para este fin, se aplicó un instrumento de encuesta con escala tipo Likert de 5 puntos [1 = “totalmente en desacuerdo”, 5 = “totalmente de acuerdo”], elaborado ad hoc con base en el Modelo EFQM 2025. Los resultados se procesaron mediante estimación de medias y cálculo de intervalos de confianza al 95 % [IC95%], utilizando la corrección de t-Student por el tamaño muestral [n = 15]²⁴. Esta técnica permite interpretar la estabilidad de las medias obtenidas y estimar el rango de valores en el que, con un 95 % de confianza, se encuentra la verdadera media poblacional (Newbold et al., 2013, p. 403).

Para efectos de interpretación, se definió un criterio de clasificación con umbral en el valor 4,0 de la escala Likert, entendido como el punto de transición entre una posición neutral (valor 3) y una valoración afirmativa [“de acuerdo”]. Este anclaje se encuentra en consonancia con enfoques de análisis ampliamente utilizados en estudios de encuestas, como el “Top Two Box” [Las 2 opciones más altas T2B], que considera las dos categorías superiores de la escala [4 y 5] como indicadores de una valoración positiva (SurveyMonkey Enterprise, 2024). A partir de este marco se establecieron las siguientes categorías:

- Fortaleza: cuando el IC95% se ubica totalmente por encima de 4,00.
- En consolidación: cuando el IC95% incluye el valor 4,00 en su rango.
- Brecha: cuando el IC95% se sitúa completamente por debajo o igual a 4,00.

Este marco analítico permite una lectura objetiva del nivel de disposición organizacional, identificando tanto las palancas de acción inmediata como las brechas relativas que requieren planes de consolidación a corto y mediano plazo.

8.3.1. Resultados de la validación del instrumento de diagnóstico

En concordancia con las orientaciones metodológicas institucionales, el instrumento de diagnóstico organizacional propuesto fue sometido a un proceso formal de validación previo a su aplicación, con el propósito de garantizar que cada ítem diseñado fuera claro, pertinente y

²⁴ Los resultados de la encuesta, previamente anonimizados para garantizar la confidencialidad de los participantes, se conservan como evidencia disponible para los jurados. Esta información constituye la base para el análisis cuantitativo de medias e intervalos de confianza.

coherente con la variable que pretende medir, así como adecuado al contexto técnico y organizacional específico de la empresa PLANETA S.A.S E.S.P.

El proceso de validación se ejecutó mediante un enfoque funcional, orientado a la práctica, y se llevó a cabo por dos vías complementarias. En primer lugar, se realizó una revisión preliminar por parte de los patrocinadores del proyecto de investigación, representados por el Gerente General y el Gerente de Operaciones y Comercial de la empresa, quienes examinaron aspectos relacionados con la claridad, redacción y coherencia general del instrumento, con el objetivo de verificar su adecuación al lenguaje organizacional y su alineación con los lineamientos institucionales vigentes.

En segundo lugar, el cuestionario fue evaluado por dos expertos externos, seleccionados por su trayectoria y pertinencia en relación con el objeto de estudio. El primero de ellos cuenta con amplia experiencia en procesos de formación académica, investigación aplicada y gestión de organizaciones públicas y privadas; el segundo se desempeña en un cargo directivo dentro de una entidad pública encargada de la gestión ambiental y los recursos naturales renovables en su jurisdicción, aportando una visión técnica alineada con los retos de sostenibilidad que aborda este proyecto²⁵.

Para esta segunda validación, se utilizó una versión simplificada del coeficiente V de Aiken, aplicado a los 20 ítems del cuestionario. Cada experto valoró individualmente el grado de pertinencia de los ítems frente a la variable que buscaban medir, mediante una escala ordinal de cinco niveles [1 = No pertinente, 5 = Muy pertinente]. El resultado obtenido fue un valor global del coeficiente V de Aiken de $V = [0,96]$, lo cual indica un nivel adecuado de validez de contenido en cuanto a la claridad, pertinencia y coherencia de los ítems respecto a las variables evaluadas²⁶. Esta valoración se considera apropiada conforme con los parámetros establecidos por la literatura académica, que sugieren un valor mínimo de $V \geq 0,70$ como umbral de aceptación (Maldonado Mera, 2020, p. 21; Torres-Malca et al., 2022, p. 273).

Ambas instancias utilizaron formatos de validación diseñados por el equipo de investigación, mediante los cuales se registraron observaciones, comentarios y la aprobación formal del

²⁵ *Los formatos de validación, firmados por los jueces expertos, directivos y el equipo de trabajo, se conservan como evidencia documental para revisión del jurado; sin embargo, no se incluyen en los anexos públicos en observancia de la confidencialidad de los participantes y de la protección de sus datos personales, conforme a la ética en investigación y la normativa de hábeas data.*

²⁶ *La base de datos con los resultados numéricos emitidos por los jueces expertos reposa en los anexos técnicos de este trabajo, donde se presenta como evidencia documental que asegura la transparencia y la trazabilidad del proceso de validación.*

instrumento. Este procedimiento ético y metodológico no solo refuerza la validez de contenido, sino que proporciona evidencia documental que respalda la confiabilidad del cuestionario como herramienta para diagnosticar la preparación institucional de la empresa frente a la eventual adopción de una estrategia con enfoque sostenible en reducción de emisiones bajo control operacional.

8.3.2. Fiabilidad del instrumento [α de Cronbach]

Previo al análisis de resultados, se evaluó la consistencia interna del cuestionario aplicado con el fin de comprobar la fiabilidad estadística del instrumento. Para ello, se utilizó el coeficiente α de Cronbach, ampliamente reconocido como indicador de homogeneidad entre los ítems de una misma dimensión (Loewenthal & Lewis, 2001, p. 8).

Los valores de α obtenidos por dimensión oscilaron entre 0,62 y 0,81, lo cual se considera aceptable en estudios de carácter diagnóstico y exploratorio, donde la finalidad es identificar tendencias y no necesariamente establecer modelos predictivos de alta precisión.

Adicionalmente, el coeficiente α global alcanzó un valor de 0,9003, lo que indica un nivel de fiabilidad muy alto para el instrumento en su conjunto.

De acuerdo con la literatura metodológica, valores de $\alpha \geq 0,60$ se interpretan como puntuaciones con consistencia interna suficiente para escalas iniciales de carácter aplicado a instrumentos de diagnóstico exploratorio, mientras que valores cercanos o superiores a 0,80 reflejan una alta fiabilidad (Frías-Navarro, 2022, pp. 11–12).

Además, como señalan Loewenthal & Lewis (2001), en escalas breves con menos de 10 ítems por dimensión, valores de α cercanos a 0,60 pueden considerarse adecuados, dado que la longitud de la prueba influye en el nivel alcanzado por este coeficiente. Este criterio resulta pertinente en el presente caso, pues aunque el instrumento cuenta con 20 ítems en total, cada dimensión agrupa entre 3 y 4 preguntas. Por tanto, los valores obtenidos a nivel global y por dimensión confirman que los ítems de cada bloque miden constructos coherentes y que las medias calculadas son estadísticamente confiables para el propósito de este diagnóstico organizacional.

Tabla 22

Fiabilidad por dimensión según el coeficiente α de Cronbach

Métrica	Dirección – Liderazgo	Dirección – Estrategia	Ejecución – Cultura	Ejecución – Recursos	Ejecución – Procesos	Resultados – Evaluación
Suma de las Varianzas de cada Ítem $\Sigma\sigma^2$	1,47	1,05	0,93	0,68	1,16	1,20

Métrica	Dirección – Liderazgo	Dirección – Estrategia	Ejecución – Cultura	Ejecución – Recursos	Ejecución – Procesos	Resultados – Evaluación
Varianza de la Suma de las Puntuaciones σ^2_t	2,91	2,25	1,58	0,96	2,25	2,60
Cronbach α	0,66	0,71	0,62	0,66	0,73	0,81

Fuente: Elaboración propia con base en los resultados de la encuesta diagnóstica basada en el modelo EFQM (2025).²⁷

8.3.3. Resultados por dimensión

El cuestionario aplicado se diseñó en torno a seis dimensiones que estructuran la disposición organizacional hacia la sostenibilidad, cada una asociada a un constructo específico y a un conjunto de ítems. Para cada dimensión se calculó la media aritmética $[\bar{x}]$ como medida central, acompañada de su intervalo de confianza al 95 % [IC95%], lo cual permite apreciar la precisión estadística de la estimación y su clasificación interpretativa según el umbral definido en 4,0.

Tabla 23

Resultados del diagnóstico organizacional según dimensiones del modelo EFQM 2025 adaptado [n = 15].

Dimensión	Variable (constructo)	Media	IC95%	Clasificación
Dirección – Liderazgo	Compromiso de la alta dirección con la sostenibilidad y la reducción de emisiones	4,35	[4,11; 4,59]	Fortaleza
Dirección – Estrategia	Coherencia entre la estrategia institucional y las metas climáticas	4,37	[4,15; 4,58]	Fortaleza
Ejecución – Cultura	Disposición organizacional hacia la sostenibilidad y el cambio	4,18	[3,94; 4,42]	En consolidación
Ejecución – Recursos	Disponibilidad de capacidades técnicas, humanas y financieras para la sostenibilidad	4,4	[4,21; 4,59]	Fortaleza
Ejecución – Procesos	Integración de criterios ambientales en los procesos operativos críticos	4,49	[4,20; 4,78]	Fortaleza

²⁷ La estimación del coeficiente α se realizó a partir de las varianzas de cada ítem y de la varianza de la suma de las puntuaciones de cada dimensión. De acuerdo con la literatura metodológica (George & Mallery, 2003; Frías-Navarro, 2011; Loewenthal, 2001), valores de $\alpha \geq 0,60$ son considerados aceptables en escalas breves con fines exploratorios, mientras que $\alpha \geq 0,80$ indican una alta consistencia interna.

Dimensión	Variable (constructo)	Media	IC95%	Clasificación
Resultados – Evaluación	Disposición institucional a evaluarse y mejorar en materia de sostenibilidad ambiental	4,24	[3,94; 4,55]	En consolidación

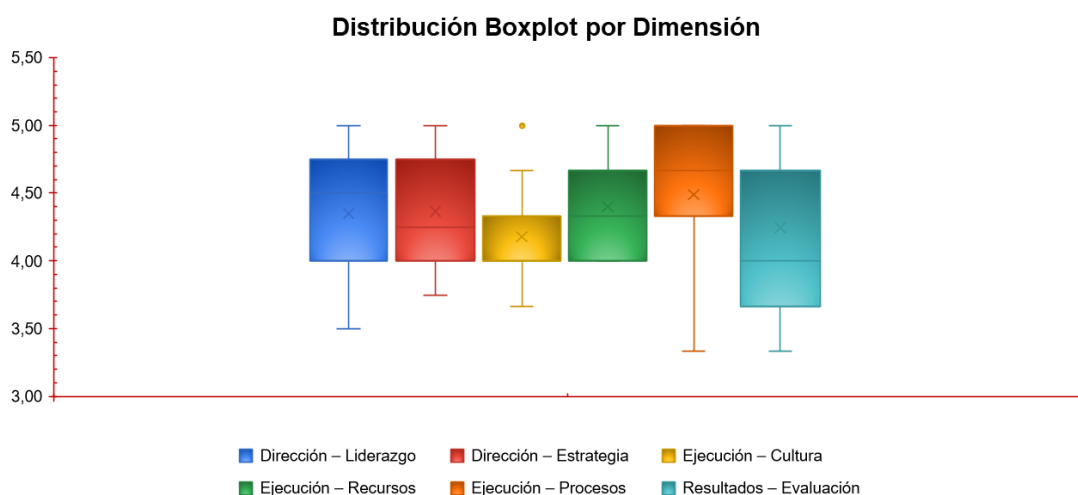
Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados de la encuesta diagnóstica, diseñada con base en el Modelo EFQM 2025.

En consonancia con la precitada tabla, La siguiente figura complementa la lectura mediante diagramas de caja [boxplots], que ilustran la distribución de las respuestas por dimensión, mostrando medianas, rangos intercuartílicos y valores atípicos. Esta representación permite identificar simultáneamente áreas con alta consistencia en las percepciones y aquellas donde persiste mayor heterogeneidad, hallazgos que se profundizaron y validaron con insights cualitativos recolectados en acercamientos internos posteriores a la encuesta con los participantes. Esto orienta la interpretación de cada variable, tal y como se señala a continuación:

Figura 16

Distribución de puntajes por dimensión del diagnóstico EFQM adaptado

Fuente: elaboración propia a partir de la encuesta diagnóstica (2025).



Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados de la encuesta diagnóstica, diseñada con base en el Modelo EFQM 2025.

▪ **Dirección – Liderazgo**

El compromiso de la alta dirección con la sostenibilidad y la reducción de emisiones alcanza una media de 4,35 y un IC95% [4,11 – 4,59], con baja dispersión. Esto refleja un consenso alto entre los informantes sobre la existencia de este compromiso. Esta percepción se alinea con la

opinión de los participantes, que consideran que la dirección ha comunicado de forma consistente la importancia de las iniciativas de sostenibilidad.

- **Dirección – Estrategia**

La coherencia entre la estrategia institucional y las metas climáticas obtiene una media de 4,37 y un C95% [4,15–4,58]. Los resultados reflejan percepciones compactas y positivas, lo que sugiere que la sostenibilidad se encuentra integrada en el marco estratégico corporativo. Esta integración es valorada por los encuestados, quienes perciben que las metas ambientales están alineadas con los objetivos generales de la organización.

- **Ejecución – Cultura**

La disposición organizacional hacia la sostenibilidad y el cambio presenta una media de 4,18 y un IC95% [3,94–4,42], con una mayor dispersión y la presencia de posturas neutras. Esta variabilidad en las respuestas sugiere que, si bien existe una apertura general al cambio, la apropiación cultural no es uniforme en todas las áreas de la organización. Tal como lo mencionan algunos de los participantes, la sostenibilidad no se percibe aún como una responsabilidad compartida por todos los empleados, lo que indica la necesidad de fortalecer los procesos de sensibilización y alineación interna.

- **Ejecución – Recursos**

La disponibilidad de capacidades técnicas, humanas y financieras para la sostenibilidad alcanza una media de 4,40 y un IC95% [4,21–4,59], con respuestas homogéneas. Esto refleja una percepción consistente de que la organización cuenta con el soporte técnico, talento humano y respaldo presupuestal necesarios para implementar acciones ambientales. En general, los encuestados coinciden en que la organización ha destinado los recursos adecuados para avanzar en sus objetivos de sostenibilidad.

- **Ejecución – Procesos**

La integración de criterios ambientales en los procesos operativos críticos obtiene la calificación más alta, con una media de 4,49 y un IC95% [4,20–4,78]. Este resultado evidencia un alto grado de acuerdo en que la sostenibilidad ya se encuentra incorporada en algunas acciones operativas como el tratamiento de aguas residuales, en ciertas prácticas de movilidad de la flota vehicular, y la gestión de residuos bajo un enfoque de economía circular. La percepción general es que estos procesos están relativamente establecidos y que su implementación es eficaz en la operación cotidiana.

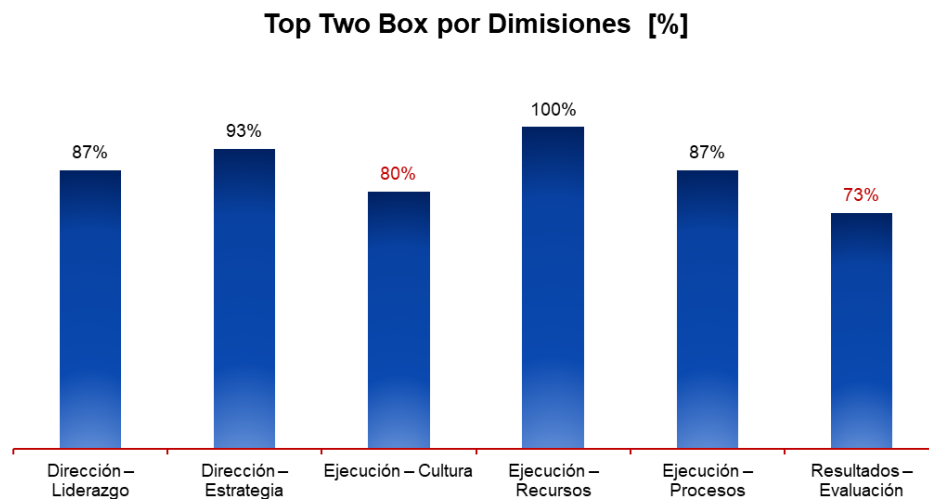
- **Resultados – Evaluación**

La disposición institucional a evaluarse y mejorar en materia de sostenibilidad ambiental registra una media de 4,24 y un IC95% [3,94–4,55], con una mayor variabilidad en las respuestas. Esto refleja la existencia de mecanismos de seguimiento y mejora, aunque la percepción es que su implementación es desigual entre las áreas. Tal como lo expresan algunos de los participantes, la falta de una retroalimentación sistemática sobre el desempeño ambiental de cada equipo genera esta heterogeneidad en las respuestas, lo que destaca la necesidad de fortalecer la regularidad del ciclo de retroalimentación para asegurar una aplicación más uniforme y equitativa.

En conjunto, los hallazgos muestran que la organización presenta fortalezas en el compromiso de la alta dirección, la coherencia estratégica, la disponibilidad de recursos y la integración de criterios ambientales en procesos críticos. La consistencia de estos resultados se refuerza al analizar el siguiente gráfico Top Two Box, una técnica que permite resumir las respuestas positivas en un solo número para resaltar los valores decisivos de una manera sencilla (SurveyMonkey Enterprise, 2024).

Figura 17

Porcentaje de las dos respuestas más favorables [Top Two Box] por dimensión.



Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados de la encuesta diagnóstica.

Bajo ese entendido, y considerando el alcance y limitaciones del instrumento para capturar solo las percepciones internas de los colaboradores, la disposición cultural hacia la sostenibilidad y la evaluación de resultados se ubican en la categoría de consolidación. Este hallazgo señala la necesidad de reforzar los procesos de sensibilización y de institucionalizar

mecanismos de seguimiento que garanticen una mayor homogeneidad en la disposición organizacional.

8.3.4. Síntesis global del nivel de preparación organizacional

Dado que la consistencia interna del instrumento es excelente conforme con el Alfa Cronbach global [$\alpha = 0,9003$], lo que indica que sus ítems miden un mismo constructo de manera confiable, se procedió a construir un Índice de Disposición Organizacional [IDO]. Este se entiende como el promedio descriptivo de los puntajes globales del instrumento [20 ítems distribuidos en seis dimensiones] y sintetiza en un único valor el nivel de preparación y disponibilidad institucional frente a la sostenibilidad ambiental y la reducción de emisiones de carbono y acorde con el umbral previamente adoptado.

Los resultados muestran un IDO de 4,34, con mediana de 4,21 y desviación estándar de 0,347. El IC95% [4,15–4,53] sugiere que, incluso en el escenario menos favorable, el nivel de disposición se mantiene por encima del umbral de referencia [4,0].

Tabla 24

Estadísticos descriptivos globales del Índice de Disposición Organizacional (IDO)

Estadístico	Valor
IDO Global [Media]	4,34
Mediana Global	4,21
Desviación Estándar Global	0,347
Q1 [25 %]	4,07
Q3 [75 %]	4,60
IQR	0,53
n	15
Error estándar Global	0,09
Intervalo de Confianza 95 %	[4,15 – 4,53]

Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados de la encuesta diagnóstica, diseñada con base en el Modelo EFQM 2025.

Conforme con lo expuesto es posible concluir que la organización posee un nivel de disposición alto, sustentado en el compromiso directivo, la coherencia estratégica y los recursos disponibles. Sin embargo, persisten retos en la consolidación cultural y en la evaluación sistemática de resultados, que deben fortalecerse a nivel interno para garantizar una mejor preparación integral.

9. Plan de Intervención: Estrategia y despliegue operacional

Este capítulo desarrolla el plan de intervención propuesto para la empresa PLANETA S.A.S E.S.P, orientado a la reducción de las emisiones operacionales de la PTAR.

La propuesta se estructura en dos bloques complementarios:

- El primero [9.1] presenta el marco estratégico, donde se formulan los principios, metas y criterios que guían la propuesta de mitigación.
- El segundo [9.2] aborda la operacionalización de la estrategia, donde se describen las acciones, recursos, tiempos y mecanismos de control que materializan dicha estrategia.

Esta estructura mantiene la relación natural entre estrategia y plan, en la que la estrategia define el qué y el por qué, mientras que el plan consolida el cómo, cuándo y con qué medios se ejecutará su implementación, asegurando trazabilidad con el propósito de la intervención y dando cumplimiento directo al segundo objetivo específico, orientado a generar una propuesta estratégica de reducción de emisiones adaptada al contexto operativo de la planta.

9.1. Marco estratégico de intervención

El presente bloque define el marco estratégico que orienta el plan de intervención propuesto, estructurado a partir del diagnóstico técnico y organizacional previamente desarrollado. Su propósito es establecer las bases conceptuales y direccionales que guían la reducción de la huella de carbono en el proceso de tratamiento de aguas residuales de PLANETA S.A.S E.S.P, bajo el principio de adaptación contextual y en coherencia con los objetivos corporativos de sostenibilidad y las metas nacionales de mitigación definidas en la Estrategia Climática de Largo Plazo de Colombia [E2050].

Este marco se fundamenta en una comprensión integral de la realidad operativa de la planta, en la que confluyen factores tecnológicos, financieros y organizacionales que determinan la factibilidad de las acciones de mitigación. A partir de esta lectura sistémica, se precisan el propósito general, la meta funcional, y la alineación estratégica con las políticas y marcos de referencia superiores, configurando así la ruta que articula la toma de decisiones con la planeación operativa y la gestión de proyectos sostenibles.

Finalmente, se introduce la Curva de Costo Marginal de Abatimiento [MACC] como instrumento de priorización, la cual permite jerarquizar las alternativas de reducción de emisiones de acuerdo con su impacto ambiental y su viabilidad económica, asegurando que la estrategia se sustente en criterios objetivos y en una lógica de optimización de recursos.

9.1.1. Propósito general:

La estrategia define la dirección, las metas y la hoja de ruta para la reducción de las emisiones operacionales en la PTAR intervenida, conforme con la materialidad identificada en sus dos frentes principales: el consumo de combustible de las unidades móviles con mayor criticidad [A1] y el consumo de energía eléctrica proveniente de la red [A2]. Asimismo, deja explícito el puente hacia un protocolo de seguimiento sustentado en métricas objetivas, orientadas a determinar el potencial real de mitigación de las iniciativas priorizadas y su capacidad de traducirse en generación de valor para la empresa.

9.1.2. Meta funcional:

Con base en la línea base de 586,01 tCO₂eq de emisiones operacionales de alcance 1 y 2 de la PTAR, y considerando las limitaciones técnicas ampliamente documentadas en la literatura especializada —según las cuales las alternativas de mitigación en plantas de tratamiento de aguas residuales son restringidas y cada tonelada de CO₂eq evitada puede implicar costos marginales elevados y dependientes de inversiones escalonadas en tecnología o rediseño de procesos—, se estableció como meta de referencia [North Star] una reducción en el rango de -10% a -11% respecto al escenario 2024, equivalente a entre 58,6 y 64,5 tCO₂eq anuales al horizonte 2030.

Esta meta se definió bajo un criterio conservador y objetivo, sustentado en el potencial de mitigación alcanzable mediante iniciativas técnicamente viables en los dos frentes críticos identificados:

- Emisiones A1 por consumos de combustibles de vehículos priorizados: Proyecto de recambio escalonado de unidades en el Top-5 de criticidad.
- Emisiones A2 por consumo de electricidad de la red: Proyecto de autogeneración fotovoltaica On-Grid.

9.1.3 Alineación con estrategias de orden superior:

La estrategia se alinea con los objetivos de planeación corporativa de la empresa, centrados en el cumplimiento de los lineamientos en gestión ambiental y mitigación del cambio climático, así como en la orientación de sus actividades hacia la sostenibilidad y la economía circular (PLANETA S.A.S E.S.P, 2024).

De manera complementaria, se alinea con la Estrategia Climática de Largo Plazo de Colombia, que traza la ruta hacia la neutralidad de carbono para el 2050. Por un lado, el proyecto de autogeneración fotovoltaica on-grid [A2] se alinea con la Apuesta 7: matriz energética diversificada, mientras que el recambio escalonado de las cinco unidades críticas

[A1] responde a la Apuesta 8: movilidad e infraestructura sostenibles, la cual orienta a las organizaciones hacia la eficiencia y renovación tecnológica (Gobierno de Colombia, 2021a).

9.1.4. Priorización del portafolio mediante Curva de Costo Marginal de Abatimiento [MACC]

La priorización de las iniciativas de reducción a proponerse se fundamenta en la aplicación del concepto de Curva de Costo Marginal de Abatimiento [MACC], herramienta reconocida por su utilidad para jerarquizar proyectos de mitigación en función del costo por tonelada de CO₂eq evitada y del potencial de reducción alcanzable (Kesicki, 2011; WayCarbon, 2022). Esta representación permite identificar de manera ordenada cuáles acciones resultan más costo-efectivas y en qué magnitud contribuyen al abatimiento total, lo que facilita la toma de decisiones estratégicas en contextos organizacionales con restricciones presupuestales²⁸.

En este caso se evaluaron dos iniciativas de proyecto bajo control operativo de PLANETA S.A.S. E.S.P, simulando la inversión total de cada una de las iniciativas: La autogeneración fotovoltaica en la PTAR [A2] y el recambio de los cinco vehículos priorizados en el Top-5 de criticidad técnico-operativa y ambiental [A1]. Bajo ese entendido, para cada alternativa se estimó:

1. El abatimiento anual de emisiones, expresado como:

$$\Delta t_i = \left[tCO_{2eq} / \text{año} \right]$$

2. El costo neto anual, definido como:

$$C_i = CAPEX \text{ anualizado} + O\&M - Ahorros$$

3. El costo marginal de abatimiento, calculado según:

$$MACC = \frac{C_i}{\Delta t_i} \left[\$ / tCO_{2eq} \right]$$

En consecuencia, el orden de ejecución sugerido del portafolio se establece de menor a mayor valor de MACC, ponderando además el volumen de reducción que cada iniciativa aporta dentro del horizonte de análisis conforme con las siguientes precisiones:

En cuanto al proyecto de recambio de vehículos en el Top-5 de criticidad, dado que las unidades con matrícula ARB-073 y CSG-159 presentaron en 2024 un consumo por debajo del percentil 25 de su segmento de “Media Estacionariedad”, para el cálculo prospectivo de la MACC se normalizó su actividad base sustituyendo el consumo observado por un valor

²⁸ Alcance del análisis MACC se circunscribe al ámbito energético-financiero comparable: el costo neto anual considera CAPEX anualizado y ahorros de diésel/energía. No se incorporan co-beneficios operativos [p. ej., productividad, disponibilidad, ingresos o ahorros de mantenimiento], a fin de preservar la comparabilidad de los resultados.

representativo del segmento: La mediana [$M_e = L_{Rep} = 14.345,04 \text{ L/año}$] del consumo real facturado en litros del propio segmento operativo, excluyendo las 2 unidades subutilizadas. Esta normalización no altera el inventario histórico del 2024 ni las emisiones reportadas; se emplea únicamente para estimar el potencial de abatimiento del recambio.

Posteriormente, se estimó la mejora media en el consumo de combustible en $\Delta L = -9\%$ [con rango de sensibilidad del 6% al 12%], correspondiente exclusivamente al reemplazo de las cinco unidades críticas pre-Euro por modelos de nueva generación. Este ahorro se atribuye a avances tecnológicos de los fabricantes, como la turbo alimentación, la gestión eficiente de los motores (p. ej., “Modo Eco”) y mejoras aerodinámicas. El supuesto planteado se alinea con el marco regulatorio de la Unión Europea y con la evidencia técnica basada en el simulador VECTO [Vehicle Energy Consumption Calculation Tool] ; en particular, los estudios del International Council on Clean Transportation reportan potenciales de reducción mayores [$\approx 23\text{--}27\%$] cuando se aplican paquetes de tecnologías en vehículos con ciclos de largo recorrido, valores que no se trasladan linealmente a un uso urbano/operativo como el de este caso, por lo que aquí se acota la mejora a un rango conservador de 6–12% con 9% como valor central, evitando así recurrir a extrapolaciones simplistas derivadas de afirmaciones comerciales aisladas de algunos fabricantes (Delgado et al., 2017, p. 3; UPME, 2025, pp. 5–6)²⁹. De otra parte, y para completar el análisis, se adoptaron los siguientes criterios de modelación:

- Vida económica: 12 años (GIZ, 2021, p. 12; Ministry of Road Transport & Highways, 2024, p. 18)³⁰.
- Actualización del CAPEX: $\text{Precio Futuro}_t = \text{Precio Base}_{2025} \times [1 + i]^n$, donde $i = 4,5$ & $n = 1$ para el periodo $t_1 = 2026$ ³¹.

²⁹ La mejora en la eficiencia del consumo de combustible, estimada en un 9% [valor central; sensibilidad 6–12%] con base en evidencia técnica ICCT/VECTO para paquetes de eficiencia en vehículos pesados), se debe a la optimización de los sistemas de gestión del motor y la implementación de tecnologías como el modo Eco. Estas funciones ajustan la respuesta del acelerador y otros parámetros del vehículo para reducir el consumo, lo cual es una característica común en los modelos recientes (International Council on Clean Transportation, 2017). Es procedente precisar que este porcentaje no se extrapola al resto de la flota. La reducción global en la PTAR dependerá de la participación del Top-5 en el consumo total anual y de la fecha de entrada en operación de cada reemplazo [prorrateso en el primer año].

³⁰ El período de 12 años como vida económica se seleccionó considerando prácticas de sostenibilidad y economía circular para el sector automotor (GIZ, 2021, p. 12; Ministry of Road Transport & Highways, 2024, p. 18).

³¹ Para la proyección del valor futuro de los vehículos se utilizó una tasa de inflación anual del 4,5%, basada en las cifras oficiales actuales y proyecciones del Banco de la República y DANE para Colombia en 2025 y años próximos (Presidencia de la República de Colombia, 2025).

- Precio medio del diésel en 2024: 2.446 COP [\$/L (Actualizado por $[1 + i]^n$)³².
- Factor de emisión del diésel: 2,407 kgCO₂e/L³³.
- Cálculo de abatimiento por vehículo Δt_i :

$$\Delta L_i = \text{Consumo en Litros}_{2024} \times \frac{0,09}{1,09}$$

$$\Delta t_i = \frac{\Delta L_i \cdot EF_{\text{Diésel}}}{1000} \rightarrow \Delta t_i = \Delta L_i \times \frac{2,407}{1000}$$

Por su parte, el proyecto de autogeneración fotovoltaica en la PTAR se basa en su dimensionamiento técnico real, conforme con las líneas base de alcance, tiempo y costos estimadas, y presenta las siguientes especificaciones clave:

- Demanda del periodo de referencia: 167.950 kWh/año.
- Energía media estimada a generar: 4.902.780 kWh en 30 años [$\Delta_E = \sim 163.426$ kWh/año].
- Tarifa del periodo de referencia: 1.070 COP [\$/kWh].
- CAPEX estimado: \$ 358,065,025.
- Vida útil del sistema: ~ 30 años³⁴.
- Factor de emisión de red: 0,2637 kgCO₂eq/kWh.
- Abatimiento estimado: $\Delta t = \Delta_E \cdot EF_{\text{Red}} = 43,10$ tCO₂eq/año.

Ahora bien, en virtud del alcance metodológico de esta investigación, se aclara que para efectos prácticos del presente ejercicio la operación y el mantenimiento de las dos iniciativas son considerados mínimos en el escenario base de contraste O&M: 0% del CAPEX³⁵.

³² El precio del diésel se estimó en 2.446 COP/L, coherente con el promedio de la base de datos empleada y en concordancia con las referencias oficiales sobre evolución de precios del ACPM en Colombia (Ministerio de Transporte, 2023).

³³ El factor de emisión del diésel B10 utilizado se basa en la referencia oficial del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico [MITECO], conforme a los informes de Dcycle (2025)

³⁴ La vida útil del proyecto de celdas solares se estimó conforme con información técnica del fabricante del sistema fotovoltaico Shinefar.

³⁵ Es importante precisar que, conforme con el alcance metodológico de este estudio académico, tanto para la iniciativa de recambio de flota como para el proyecto fotovoltaico, se asume que los costos de O&M son cercanos a cero [O&M \approx \$0] durante el primer año de operación. Esta suposición, de carácter conservador, se fundamenta en que durante dicho periodo inicial los costos de operación en ambos casos son reducidos en comparación con los previstos para los años posteriores; sin embargo, resultan comparables a nivel de análisis estratégico de iniciativas. Bajo ese entendido, la gestión y cobertura de los costos de O&M que se presenten en años posteriores corresponderán exclusivamente a la empresa, conforme a sus planes de mantenimiento y operación vigentes en ese momento, los cuales no forman parte del alcance de este ejercicio de priorización.

Tabla 24.

Desagregación de la Flota Top-5 priorizada [cálculo individual de costos y reducción anual]

Matrícula	Emisiones [2024] t	Total Esperadas [Año 1] t	ΔtCO_2eq [t/Año]	CAPEX Anualizado [\$/Año]	Ahorro diésel [\$/Año]	Costo neto [\$/Año]
ARB-073	35,07	31,68	3,39	\$ 40.145.417	\$ 3.163.784	\$ 36.981.633
CSG-159	35,07	31,68	3,39	\$ 29.869.583	\$ 3.163.784	\$ 26.705.799
FST-059	47,73	43,12	4,62	\$ 47.895.833	\$ 4.306.338	\$ 43.589.496
GQU-227	45,32	40,93	4,38	\$ 80.116.667	\$ 4.088.366	\$ 76.028.301
JSL-352	43,76	39,63	4,12	\$ 80.116.667	\$ 3.958.422	\$ 76.158.245

Fuente: Elaboración propia en base a datos técnicos y cálculos individuales de costos y reducciones anuales de la Flota Top-5 priorizada.

En consecuencia la priorización se determina en función de la siguiente información:

Tabla 25

MACC para Proyectos de Mitigación Operacional [Portafolio A1/A2]

Proyecto	Abatimiento [tCO ₂ eq/año]	Ahorro Anual [\$]	CAPEX Anualizado [\$]	Costo Neto Anual [\$ /Año]	MACC [\$ /tCO ₂ eq]
Solar PTAR [A2]	43,10	174.865.820	11.935.501	-162.930.319	-3.780.515
Flota Top-5 [A1]	19,91	18.680.693	278.144.167	259.463.474	13.033.758

Fuente: Elaboración propia con base en cálculos de reducción, costo neto anual y costo marginal de abatimiento [MACC] ^{36,37,38}.

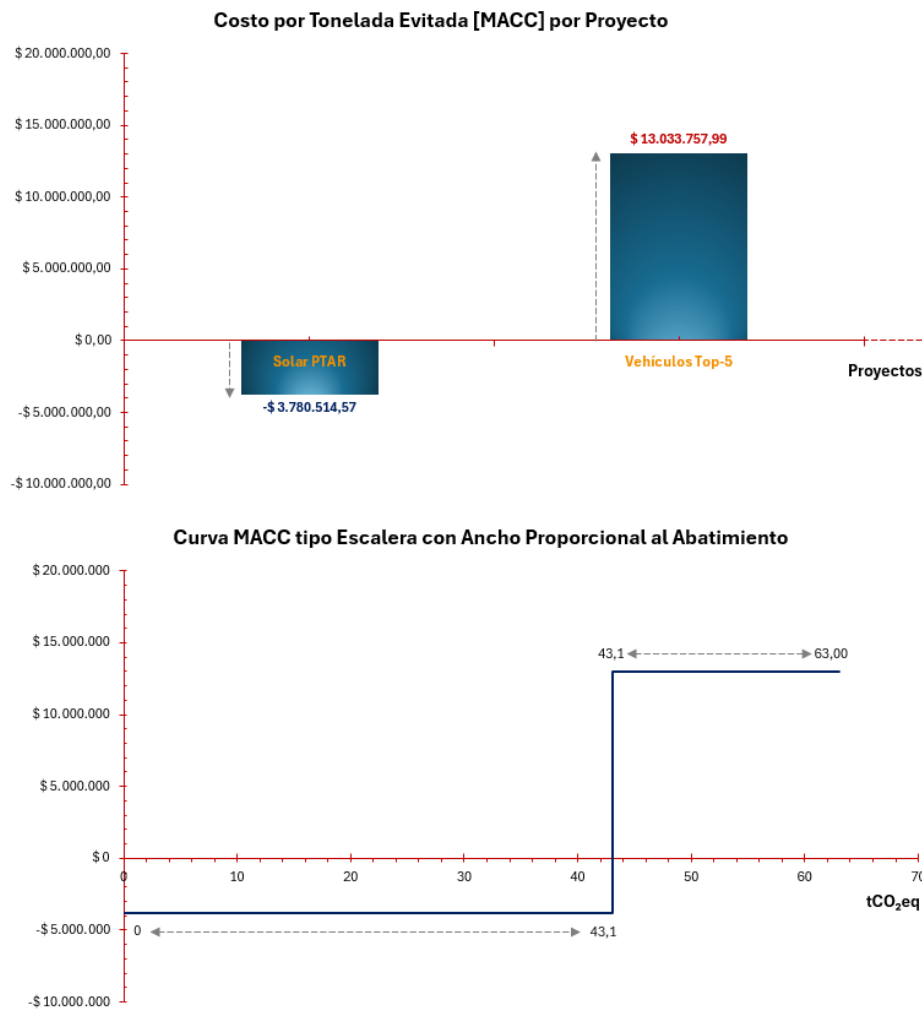
³⁶ Para este análisis, no se incluyen las emisiones asociadas con la fabricación e instalación del sistema fotovoltaico, dado que la huella de carbono de la energía solar a lo largo de su ciclo de vida es significativamente baja [aproximadamente 25-32 gCO₂eq/kWh], y la operación del sistema no genera emisiones directas considerables. Por lo tanto, el ejercicio se centra en el 100% de reducción de las emisiones de Alcance 2 al reemplazar la energía proveniente del Mix de la red por energía limpia (ONU, 2007).

³⁷ En el escenario pesimista y optimista de ahorro de combustible [Rango entre el 6 y 12%] el proyecto de recambio de la flota se mantiene con un MACC positivo [entre \$10,19 y \$18,16 M/tCO₂eq] y un abatimiento de 14,6–24,9 tCO₂eq/año, sin modificar la priorización del portafolio.

³⁸ **Nota:** El análisis financiero empleado para la priorización de proyectos en la Curva de Costo Marginal de Abatimiento [MACC] se desarrolló bajo un escenario base sin incorporar los beneficios tributarios aplicables al sistema fotovoltaico. Esta exclusión responde a una decisión metodológica orientada a mantener la homogeneidad y comparabilidad económica entre las distintas alternativas del portafolio de mitigación, dado que los incentivos previstos en la Ley 1715 de 2014 y su modificación Ley 2099 de 2021 aplican exclusivamente a proyectos de generación con Fuentes No Convencionales de Energía [FNCE] (Congreso de la República de Colombia, 2021; Ministerio de Minas y Energía, 2014).

Figura 18

Curva de Costo Marginal de Abatimiento [MACC] tipo escalera para el portafolio A1/A2



Fuente: Elaboración propia a partir del análisis de la MACC, datos del potencial de reducción y costos del escenario base.

De conformidad con la gráfica, se observa que las dos barras representan las iniciativas claramente diferenciadas: la primera con valor negativo, correspondiente al proyecto de autogeneración de energía fotovoltaica en la PTAR, que evidencia un ahorro neto por tonelada evitada, y la otra con valor positivo, asociada al recambio de los cinco vehículos priorizados por criticidad técnico-operativa y ambiental, que implica un costo por tonelada reducida. En la curva tipo “escalera”, el ancho de cada tramo refleja el potencial de abatimiento estimado de 43,1 tCO₂eq/año en el caso de la autogeneración fotovoltaica y de 19,91 tCO₂eq/año para el

recambio de la flota, mientras que la altura indica el valor del MACC correspondiente a cada iniciativa.

A partir de esta lectura, la priorización de las iniciativas del portafolio se establece en el siguiente orden:

- **Prioridad 1** – Proyecto de autogeneración fotovoltaica en la PTAR [A2]: presenta una MACC negativa [-3,78 millones \$/tCO₂eq], lo que significa que además de reducir emisiones genera ahorros netos para la organización. Al mismo tiempo, ofrece el mayor potencial de mitigación [43,1 tCO₂eq/año], por lo cual se recomienda su implementación inmediata conforme al cronograma de ejecución previsto³⁹.
- **Prioridad 2** – Proyecto de recambio de los cinco vehículos de mayor criticidad técnico-operativa y ambiental [A1]: registra una MACC positiva [13,03 millones \$/tCO₂eq], de modo que su aplicación implica un costo por tonelada evitada. No obstante, se considera necesaria su ejecución, la cual se sugiere realizar en olas o fases sucesivas, atendiendo criterios de severidad técnico-ambiental, disponibilidad presupuestal y continuidad del servicio.

9.2. Despliegue Operacional de la Estrategia

Este bloque describe el despliegue operacional de la estrategia de mitigación definida en el marco anterior, traduciendo sus lineamientos conceptuales en acciones concretas, programadas y medibles. Su propósito es detallar cómo, cuándo y con qué recursos se implementarán las iniciativas priorizadas, garantizando que el proceso de reducción de emisiones avance de manera planificada, verificable y sostenible.

A lo largo de este bloque se presentan las fases, cronogramas, costos, especificaciones técnicas y horizontes de reducción asociados a los proyectos priorizados, consolidando así el Plan de Intervención desde una perspectiva de gestión de proyectos sostenibles. De esta forma, la estrategia definida se convierte en un plan de acción tangible que integra criterios ambientales, económicos y operativos, alineado con la visión de sostenibilidad corporativa de

³⁹ El sistema fotovoltaico a proponerse se diseñará para suplir el consumo de la PTAR, cubriendo una demanda superior a la media mensual de 13.996 kWh. La energía media estimada a generar se calcula en 5.094.360 kWh a lo largo de 30 años (aproximadamente 169.812 kWh/año). Considerando el sistema de net metering, se asume que los eventuales pagos excedentes por el uso del sistema interconectado, derivados de la operación nocturna y la compensación por días nublados, serán gestionados a través de un cruce de créditos con la red eléctrica. Estos pagos adicionales se consideran relativamente conservadores frente a los ahorros económicos que el sistema genera, motivo por el cual no se han incluido en el análisis de priorización.

PLANETA S.A.S E.S.P y con las apuestas 7 [matriz energética diversificada] y 8 [movilidad e infraestructura sostenibles] de la E2050.

9.2.1. Hoja de ruta estratégica para el recambio progresivo de la flota crítica [A1]

De acuerdo con la priorización derivada de la Curva de Costo Marginal de Abatimiento [MACC] y los criterios de obsolescencia y criticidad técnico-operativa, se estructuró una hoja de ruta [Roadmap] para el proyecto A1 que organiza el recambio de los cinco vehículos en el Top-5 de prelación en cuatro fases sucesivas. El propósito es escalonar las inversiones y los beneficios de reducción, garantizando continuidad del servicio y coherencia presupuestal con el horizonte de la estrategia.

El roadmap se presenta en términos de costo y reducción comparables: por fase se reportan el CAPEX nominal del año de compra [ajustado por inflación], el abatimiento anual adicional [Δt] expresado en tCO₂eq/año y una ventana de ejecución, que define los meses dentro del año en que se realizará la compra y puesta en marcha de los vehículos. El Δt comienza a contarse a partir de la entrada en comisión de las nuevas unidades en cada fase.

Tabla 26

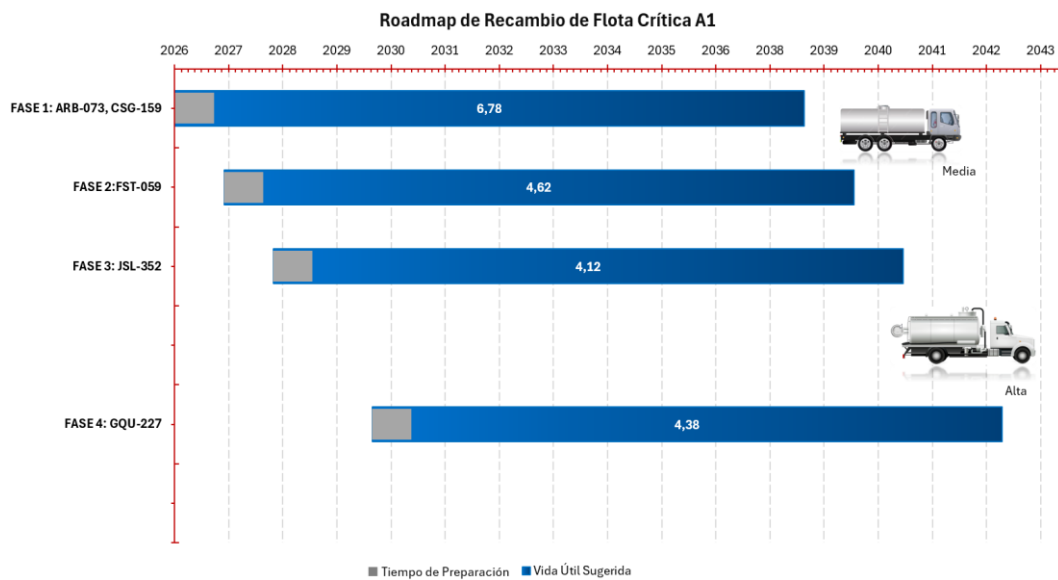
Roadmap de recambio de flota crítica A1 — fases, costos y reducción estimada.

Fase	Año de Entrada	Vehículos	CAPEX Proyectado por Año [\$]	Δt Esperado [tCO ₂ eq/Año]	Ventanas [Meses desde t ₀ =ene-2026]
F1	2026	ARB-073, CSG-159	\$ 840.180.000	6,78	0–9
F2	2027	FST-059	\$ 600.613.750	4,62	12–21
F3	2028	JSL-352	\$ 1.049.872.835	4,12	24–33
F4	2030	GQU-227	\$ 1.146.487.383	4,38	48–57

Fuente: Elaboración propia a partir de la priorización de vehículos, el escalamiento del CAPEX proyectado y el cálculo del abatimiento [Δt], considerando ventanas de ejecución de ~9 meses según experiencias previas de adquisición y metas estratégicas corporativas al 2030.

Figura 19

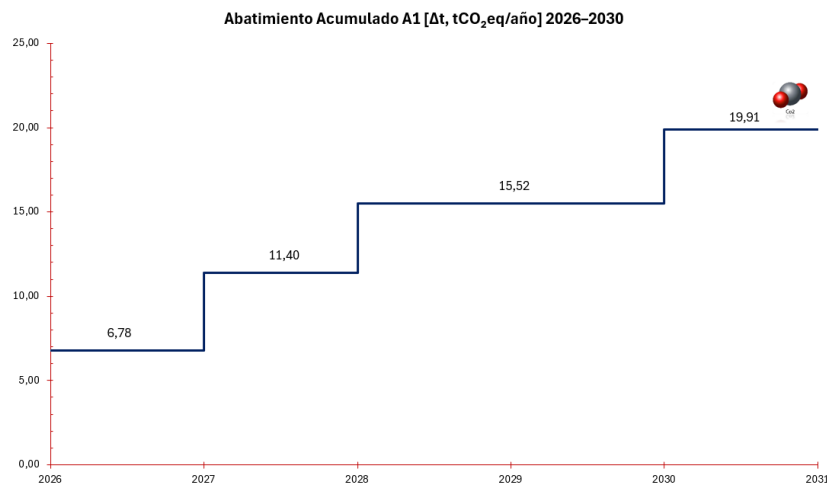
Roadmap de ejecución y beneficios del proyecto de recambio A1 [2026–2030+]



Fuente. Elaboración propia a partir del cronograma proyectado de recambio, con bloques de ejecución [~9 meses] y barras de vida útil de 12 años, rotuladas con el abatimiento anual Δt estimado por fase ⁴⁰.

El diagrama tipo Gantt muestra cuatro renglones [F1–F4], donde cada fase se representa mediante un bloque de ejecución de aproximadamente 9 meses seguido de una barra que refleja el período de generación de beneficios de reducción, conforme con una vida útil de referencia de 12 años desde la puesta en marcha. Cada barra está rotulada con el Δt anual estimado por fase [abatimiento esperado], lo que permite visualizar el escalonamiento de las “olas” y el perfil interanual de inversión.

⁴⁰ En el gráfico, los bloques en gris representan los periodos de ejecución estimados (~9 meses), mientras que las barras azules corresponden a la vida útil de referencia de 12 años para los vehículos reemplazados (GIZ, 2021, p. 12; Ministry of Road Transport & Highways, 2024, p. 18).

Figura 20Trayectoria de abatimiento acumulado A1 [Δt , tCO₂eq/año], 2026–2030

Fuente: Elaboración propia a partir de los abatimientos anuales Δt estimados por fase y su acumulación conforme al cronograma de entrada en operación proyectado para el periodo 2026–2030.

La trayectoria escalonada de abatimiento proyectada refleja cómo con cada fase se podría incrementar de manera acumulativa la reducción anual de emisiones, hasta alcanzar aproximadamente 19,91 tCO₂eq/año en 2030. Este comportamiento estimado evidencia que los beneficios no se materializarían de forma inmediata ni lineal, sino en saltos sucesivos asociados a la entrada en operación de cada reemplazo. Esta dinámica permite contrastar las metas intermedias con el horizonte estratégico al 2030 y proporciona un marco de seguimiento para evaluar el aporte incremental de cada fase dentro de la estrategia corporativa de mitigación.

En conjunto, el Roadmap sitúa el recambio donde resulta financieramente viable y ambientalmente más significativo: dos unidades de estacionariedad media en 2026 [F1], la unidad de mayor consumo relativo en 2027 [F2], y las dos unidades de alta estacionariedad en 2028 y 2030 [F3 y F4]. Se proyecta que, con esta secuencia, el proyecto A1 alcance aproximadamente 19,91 tCO₂eq/año de reducción al cierre de 2030. Este escalonamiento es coherente con la priorización MACC y, además de complementar el efecto del proyecto de autogeneración fotovoltaica en la PTAR [A2], mantiene alineación con la estrategia de sostenibilidad corporativa y con los compromisos nacionales de movilidad e infraestructura sostenibles, enmarcados en la Apuesta 8 de la Estrategia Climática de Largo Plazo de

Colombia [E2050] y en las Contribuciones Determinadas a Nivel Nacional NDC actualizadas de cara al 2030.

9.2.2. Precisiones sobre las unidades móviles con menor criticidad

En el caso de las unidades clasificadas en los grupos de “Diagnóstico” y “Mantener”, se reconoció que, si bien constituyen fuentes de emisiones considerables, no fueron objeto de iniciativas proyectizadas de recambio o sustitución dentro del umbral temporal de cara al 2030 considerado para esta estrategia. Esta decisión respondió a que sus emisiones están asociadas principalmente a patrones de uso intensivo y a la naturaleza del servicio que prestan, más que a deficiencias técnicas críticas que impliquen un recambio inmediato. A su vez, se evidenció que el menor desempeño y la subutilización relativa de las cinco unidades que sí son críticas terminan condicionando una mayor carga operativa sobre los vehículos no críticos, lo que refuerza la decisión de focalizar la intervención allí donde el impacto en reducción de emisiones y costo-efectividad es más significativo.

Bajo ese entendido, el planteamiento estratégico sobre las unidades que no forman parte del segmento de “Acción Inmediata” se limita, dentro del alcance de esta intervención, a sugerir a la empresa un seguimiento continuo y un mantenimiento preventivo periódico que aseguren la operación dentro de parámetros técnicos y ambientales estables, entendiendo estas acciones como parte de la gestión recurrente de la organización y no como nuevas iniciativas de inversión en el horizonte considerado. Este enfoque se enmarca en una perspectiva realista y objetiva, alineada con la realidad operativa, cultural y sobre todo económica de la empresa, con la que se busca evitar extrapolaciones hacia metas aspiracionales que no guardan relación con su capacidad real de ejecución. De igual manera, se dejó previsto que, en caso de observarse desvíos sostenidos o cambios operativos que alteren la contribución relativa de estas unidades, su condición deberá ser reevaluada dentro del esquema de seguimiento, pudiendo pasar a una mayor prelación de intervención si las circunstancias así lo requieren.

9.2.3. Descripción general del proyecto de autogeneración fotovoltaica [A2]

El proyecto de autogeneración fotovoltaica consiste en la instalación de un sistema solar on-grid en el predio de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de PLANETA S.A.S E.S.P, con capacidad de 126,14 kWp. La iniciativa se orienta a sustituir el consumo eléctrico de la red mediante la generación anual estimada de energía renovable, lo que permitirá reducir de manera sustancial las emisiones indirectas de alcance 2 asociadas a la operación de la planta.

La propuesta parte de la línea base 2024, en la que la demanda eléctrica de la PTAR ascendió a 167.950 kWh, equivalentes a 44,29 tCO₂eq. Frente a este referente, el sistema

proyectado busca alcanzar una cobertura cercana al 100 % de dicha demanda, con un efecto ambiental esperado de más de 40 tCO₂eq evitadas por año⁴¹.

9.2.4. Alcances del proyecto

El proyecto propuesto dentro del portafolio estratégico contempla tres dimensiones principales de alcance:

Alcance técnico: El cual incluye el diseño detallado del sistema, la adquisición de 212 módulos solares de 595 Wp y dos inversores trifásicos de 60 Kw de potencia nominal, así como su instalación para conexión a la red eléctrica. Se incorpora la puesta en marcha con pruebas eléctricas, protecciones en corriente continua y alterna, sistemas de puesta a tierra y monitoreo remoto de la producción. En principio, el proyecto no contemplará almacenamiento en baterías, y bajo ese entendido la configuración se centra en su fase inicial en maximizar el autoconsumo bajo condiciones on-grid.

Alcance ambiental: La intervención se orienta a disminuir las emisiones indirectas de alcance 2 derivadas del consumo eléctrico de la planta en un orden cercano al 97 %. El efecto residual estimado fluctúa entre [≈1,12 y 1,19 tCO₂eq/año] y se asociará a básicamente a periodos de baja radiación o mantenimientos programados.

Alcance Económico-Financiero: Para el presente proyecto se estimó una inversión inicial de aproximadamente 358 millones de pesos y costos operativos anuales del orden de 9,9 millones de pesos. Con base en la producción energética estimada, el proyecto generará un ahorro económico sostenido frente a la compra de energía de la red, lo que lo convierte no solo en una medida estratégica de mitigación, sino también de eficiencia operativa.

9.2.5. Especificaciones técnicas del proyecto

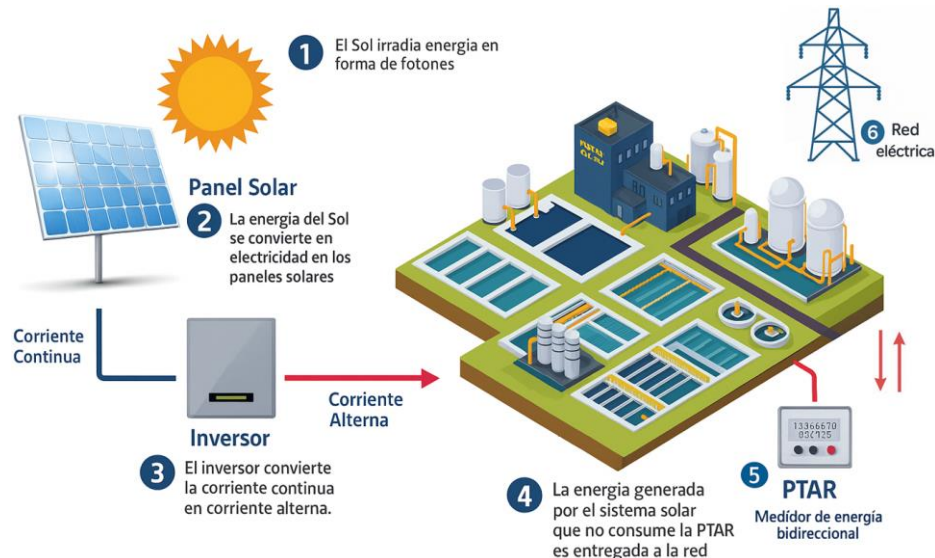
El sistema se constituirá de 212 módulos fotovoltaicos monocristalinos de 595 Wp con eficiencia del 23,03 % y garantía de desempeño lineal de hasta 30 años, cuya corriente continua se convierte mediante dos inversores trifásicos de 60 kW con eficiencia superior al 98 %. La implantación se realizará sobre un área de aproximadamente 600 m² con estructuras para intemperie y monitoreo remoto de la producción y el desempeño en tiempo real. El dimensionamiento responde a las condiciones de irradiación de la zona, priorizando el autoconsumo de la PTAR y reduciendo su dependencia de la red eléctrica. Así mismo, el diseño incorpora protecciones para sobretensión, sobrecorriente, fallas a tierra y sistema de

⁴¹ En los anexos técnicos se amplían la línea base 2024 y el dimensionamiento del sistema [126,14 kWp] que sustentan la cobertura cercana al 100 % de la demanda eléctrica de la PTAR y la reducción anual estimada [>40 tCO₂eq].

desenergización Rapid Shutdown, coherentes con el paso de corriente continua a corriente alterna (CC→CA) y la conexión a red de la PTAR.

Figura 21

Arquitectura funcional básica del sistema de autogeneración fotovoltaica



Fuente: Elaboración propia apoyada en recursos vectoriales litográficos generados con inteligencia artificial.

9.2.6. Línea base de tiempo del proyecto

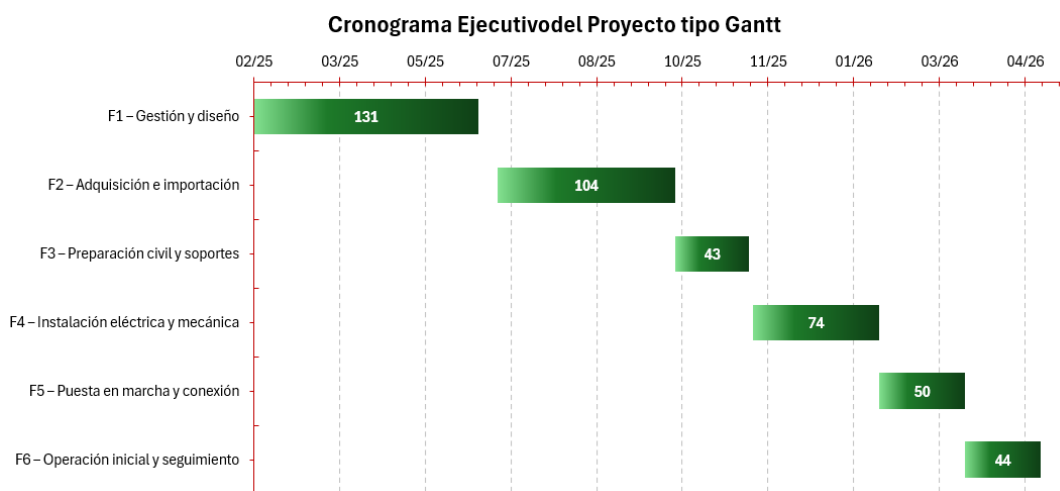
El horizonte de ejecución se ha establecido en quince meses, comprendidos entre febrero de 2025 y mayo de 2026. El cronograma se organiza en seis fases secuenciales que integran márgenes de contingencia para atender posibles imprevistos.

- **F1 – Gestión y diseño:** Que comprende la elaboración de cálculos, diseños preliminares y detallados, así como la selección de proveedores. Como hito clave esta etapa considera la aprobación del diseño y validación de la lista de materiales.
- **F2 – Adquisición e importación:** Esta contempla la compra de módulos, estructuras e inversores, logística de ingreso al país y contratación del instalador bajo normativa RETIE y cuyo hito implica equipos en sitio y formalizaciones contractuales.
- **F3 – Preparación civil y soportes:** Abarca actividades de topografía, nivelación y fundida de pilotes, en ella el principal hito es el acondicionamiento de la superficie para el montaje de los soportes.
- **F4 – Instalación eléctrica y mecánica:** Esta aborda el montaje de bastidores y módulos, tendido de cableado en corriente continua y alterna, integración de inversores y sistemas de monitoreo. Aquí el hito es que el sistema sea instalado y verificado en seco.

- **F5 – Puesta en marcha y conexión:** La cual comprende las pruebas eléctricas, radicación y aprobación de la conexión a la red, la capacitación al personal y la entrega técnica. En esta fase el hito es la entrada en operación comercial.
- **F6 – Operación inicial y seguimiento:** Incluye el monitoreo del desempeño y ajustes técnicos durante el periodo inicial de operación.

Figura 22

Cronograma ejecutivo del proyecto fotovoltaico.



Fuente. Elaboración propia a partir del cronograma proyectado para la iniciativa de autogeneración fotovoltaica⁴².

Así las cosas, el cronograma expuesto se ha constituido en la línea base para el desarrollo del proyecto y se mantiene como referencia de control, sin modificar la línea base de emisiones 2024 ni las metas de reducción establecidas.

9.2.7. Línea base de costo del proyecto

De conformidad con la línea base de consumos del año 2024, la PTAR registró una tarifa media efectiva de \$ 1.070,06/kWh. No obstante, para efectos prácticos de la modelación de este proyecto, se adopta una tarifa base de \$ 864/kWh, calculada a partir del promedio de los últimos cinco años y coherente con las cotizaciones de los proveedores consultados para esta propuesta⁴³. Esta tarifa base se emplea como insumo de cálculo que aísla el componente de

⁴² El diagrama de Gantt se aborda por fases con el fin de contar con un enfoque ejecutivo de alto nivel, en donde los bloques en color verde representan los periodos estimados de ejecución de cada fase, expresados en días calendario, mientras que la secuencia refleja la línea base de planificación en un horizonte de quince meses.

⁴³ Es procedente precisar que, de conformidad con la línea base de referencia, la tarifa eléctrica efectiva de 2024 es de \$1.070,06/kWh, la cual incluye todos los costos del servicio (generación,

generación [excluye comercialización y pérdidas], sin embargo, no tiene como fin sustituir la tarifa del escenario de referencia registrado en el periodo 2024.

Bajo estos supuestos, el proyecto prevé una inversión inicial de ≈358 millones de pesos [CAPEX] y costos operativos anuales cercanos a 9,9 millones de pesos, lo que resulta en los siguientes beneficios estimados:

- Ahorro anual: ≈179,7 millones de pesos⁴⁴.
- Periodo de recuperación simple: ≈2,4 años.
- Tasa interna de retorno [TIR]: ≈27,9 %.
- Retorno sobre la inversión [ROI, horizonte 30 años]: superior al 1000 %.
- Tarifa proyectada a 30 años [con incremento anual del 3 %]: ≈ \$2.097/kWh.

Estos resultados evidencian un diferencial favorable respecto a la compra de energía de la red y respaldan la conveniencia financiera de la intervención dentro de la estrategia de reducción de emisiones [Ver anexos técnicos]⁴⁵.

9.2.8. Incorporación de beneficios tributarios y certificaciones técnicas

De conformidad con los artículos 11 y 12 de la Ley 1715 de 2014 (Ministerio de Minas y Energía, 2014), modificados por los artículos 8 y 9 de la Ley 2099 de 2021 (Congreso de la República de Colombia, 2021), el proyecto de autogeneración fotovoltaica propuesto por **PLANETA S.A.S E.S.P** con una capacidad instalada de **126,14 kWp** puede acceder a diversos **incentivos tributarios y fiscales** aplicables a las inversiones en proyectos de generación a partir de **Fuentes No Convencionales de Energía [FNCE]**, los cuales se describen a continuación:

1. **Deducción del impuesto sobre la renta:** permite deducir hasta el **50 % del valor total invertido** en el sistema solar, distribuible durante un periodo máximo de **15 años** a partir del año gravable siguiente al inicio de operación [art. 11] (Ministerio de Minas y Energía, 2014).

transmisión, distribución, etc.). Sin embargo, para el análisis de proyectos, los proveedores de instalación suelen emplear una tarifa base histórica de los últimos 5 años, en este caso \$864/kWh, que excluye cargos adicionales como comercialización y pérdidas, y se enfoca únicamente en el costo de la generación de la energía. La adopción de esta tarifa de base técnica responde al criterio de centrar el análisis en el componente de generación, lo que facilita la optimización o negociación de estos cargos en el contexto de la viabilidad del proyecto.

⁴⁴ Con base en la línea base 2024, el ahorro anual de \$179.716.950 COP se valora con tarifa efectiva [~1.06 \$/kWh]. Si se usa la tarifa base técnica de 864 COP/kWh [comparabilidad de ofertas], el ahorro sería ≈ \$146,7 M COP

⁴⁵ En los anexos técnicos se amplía la información financiera del proyecto, incluyendo supuestos, metodología de cálculo y resultados de evaluación económica.

2. **Exclusión del IVA:** aplicable exclusivamente a la **adquisición de paneles solares, inversores, estructuras de soporte de celdas, cableado y equipos de monitoreo** directamente asociados con la generación fotovoltaica [art. 12] (Congreso de la República de Colombia, 2021; Ministerio de Minas y Energía, 2014).
3. **Depreciación acelerada:** autoriza una tasa anual de depreciación hasta del **33 %** para los activos vinculados a la generación de energía con FNCE [art. 11, párrafo 2] (Ministerio de Minas y Energía, 2014).

El acceso efectivo a estos beneficios exige que la inversión sea **evaluada y certificada por la Unidad de Planeación Minero-Energética [UPME]** como proyecto de generación a partir de FNCE, conforme al artículo 9 de la Ley 2099 de 2021 (Congreso de la República de Colombia, 2021) y al **Decreto 829 de 2020** (Presidencia de la República de Colombia, 2020). Para tal efecto, la empresa deberá presentar ante la UPME la siguiente documentación técnica y administrativa:

- **Memoria técnica** del sistema fotovoltaico [capacidad instalada, diseño eléctrico y esquema de conexión].
- **Certificación RETIE** de los equipos e instaladores.
- **Registro de conexión** ante el Operador de Red [ENEL-CODENSA].
- **RUT actualizado** con la actividad económica **CIU 3511** [Generación de energía eléctrica].
- **Concepto ambiental favorable o pronunciamiento de no requerimiento de licencia**, conforme al **Decreto 1076 de 2015** (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015), en concordancia con el **artículo 5, numeral 17 de la Ley 1715 de 2014** (Ministerio de Minas y Energía, 2014), y el **artículo 2.2.2.3.1.1** [modificado por el **Decreto 852 de 2024**], que clasifica las energías renovables como *“fuentes virtualmente no contaminantes”* y, por tanto, **no sujetas a licenciamiento ambiental** (Presidencia de la República de Colombia, 2024).

En el **análisis financiero** del proyecto adjunto [Anexo Técnico - Proyecto de Autogeneración Fotovoltaica], se adoptó un **escenario base conservador sin monetizar los beneficios tributarios**.

Esta decisión tuvo dos propósitos metodológicos fundamentales:

1. Mantener la independencia del análisis frente al momento de ejecución y los tiempos administrativos del proceso de certificación ante la UPME, y

2. Asegurar **condiciones homogéneas de comparación** entre las dos iniciativas de proyecto del portafolio de mitigación analizadas en la **Curva de Costo Marginal de Abatimiento [MACC]**, evitando distorsiones derivadas de incentivos tributarios aplicables solo a proyectos fotovoltaicos.

No obstante, si la empresa gestiona oportunamente la certificación ante la UPME y aplica los incentivos establecidos, los flujos de caja del proyecto se verían **positivamente modificados**, particularmente en:

- **Exclusión del IVA [19 %]:** Conforme al artículo 12 de la Ley 1715 modificado por el artículo 9 de la Ley 2099 (Congreso de la República de Colombia, 2021; Ministerio de Minas y Energía, 2014), el beneficio aplica únicamente sobre los equipos de generación cuyo valor dentro del presupuesto del proyecto asciende a \$101.806.578. Esto representa un ahorro estimado de aproximadamente \$ 19,34 millones de pesos, reduciendo el CAPEX total de \$ 358 millones a unos \$ 338,6 millones de pesos. Bajo este escenario, la TIR financiera se estima que se incrementaría aproximadamente del 27,9 % al 29,5 %, con una reducción del periodo de retorno de 2,4 a 2,3 años.
- **Deducción del 50 % en renta:** la aplicación de este incentivo incrementaría el flujo neto post-impuestos en los primeros años de operación, al disminuir la base gravable del impuesto de renta (Ministerio de Minas y Energía, 2014). Para una inversión de \$ 358 millones COP, el beneficio fiscal podría representar un ahorro efectivo aproximado de **\$ 62 millones COP**, distribuido en los primeros ejercicios, lo cual **mejoraría la rentabilidad efectiva y consolidaría la viabilidad financiera del sistema.**
- **Depreciación acelerada (33 %):** permite una recuperación más rápida del valor fiscal de los activos solares, al reconocer su depreciación en un periodo de aproximadamente tres años en lugar de diez (Ministerio de Minas y Energía, 2014). Al depreciar más rápido, se registran mayores gastos contables, lo que reduce la base gravable y, en consecuencia, la carga tributaria en los primeros ejercicios. Este mecanismo generaría un ahorro fiscal estimado de alrededor de \$29 millones pesos por año, con impacto positivo en la rentabilidad y la liquidez inicial del proyecto.

Conforme con lo expuesto se aclara que estos beneficios **no modifican la viabilidad técnica ni ambiental** del proyecto, pero **refuerzan su atractivo financiero y reducen el riesgo económico** asociado a la inversión inicial.

En consecuencia, se recomienda su aplicación una vez la empresa **defina el momento de**

implementación y gestione ante la UPME la correspondiente **certificación técnica**, que constituye el **aval oficial requerido por la DIAN** para la activación de los incentivos tributarios establecidos por la Ley 1715 de 2014 y la Ley 2099 de 2021 (Congreso de la República de Colombia, 2021; Ministerio de Minas y Energía, 2014).

9.2.9. Horizonte e hitos intermedios de reducción

El cumplimiento de la meta no sigue una trayectoria lineal, sino que depende de la entrada en operación de los proyectos priorizados y de su curva de maduración operativa. En este sentido, se definieron hitos intermedios que permiten verificar de manera progresiva el cierre de brechas [Gaps]:

Tabla 27

Horizonte e hitos intermedios de la estrategia de reducción de emisiones

Año	Proyectos en Operación	Enfoque de avance	Reducción Acumulada Estimada [tCO ₂ eq/año]	% Estimado vs 2024
2026	A2 [FV on-grid] + A1 → F1 [ARB-073 + CSG-159]	Puesta en marcha de autogeneración FV y primer recambio vehicular	≈ 48,1	≈ -8,21 %
2027	A2 + A1 → [F1 + F2]	A2 en operación y segundo recambio	≈ 53,1	≈ -9,06 %
2028	A2 + A1 → [F1 + F2 + F3]	A2 consolidado y tercer recambio	≈ 58,0	≈ -9,90 %
2030	A2 + A1 → [F1 + F2 + F3 + F4]	Cuarto recambio y Portafolio con North Star consolidado	≈ 63,0	≈ -10,75 %

Fuente: Elaboración propia con base en los resultados del análisis multicriterio, la curva de costo marginal de abatimiento y la proyección de reducción acumulada frente al escenario de referencia 2024.

Con este esquema, la trayectoria de reducción mantiene coherencia con la meta funcional, permitiendo a la empresa evaluar avances medibles en términos de tCO₂eq evitadas y en porcentaje de reducción frente a la línea base del año 2024.

9.2.10. Reconocimiento de incertidumbre sobre precios y factores externos

La proyección de reducción acumulada (-10,8 % a 2030) se elaboró bajo supuestos financieros y operativos estables, con una inflación media del 4,5 % (DANE, 2025) y precios de energía y combustible vigentes en 2024–2025. Sin embargo, se reconoce que dichas variables —tarifas

eléctricas, precios de combustibles y factores de emisión del sistema eléctrico nacional— pueden presentar variaciones a lo largo del horizonte analizado.

Estas posibles fluctuaciones no fueron incorporadas de manera explícita en el modelo, dado que el propósito del estudio es evaluar la viabilidad técnica y económica en un escenario base representativo y conservador. Se reconoce, por tanto, que dichas variaciones podrían generar efectos marginales sobre los resultados económicos y de reducción estimados, los cuales no fueron objeto de análisis dentro del alcance de este trabajo.

9.2.11. Análisis de riesgos del portafolio de mitigación

La evaluación de riesgos se desarrolló con el propósito de anticipar los factores que podrían afectar el cumplimiento de los objetivos técnicos, financieros, regulatorios y operativos asociados al portafolio estratégico de mitigación [A1: recambio vehicular; A2: autogeneración fotovoltaica]. La matriz correspondiente —incluida como anexo técnico— permitió identificar y valorar los principales eventos de riesgo mediante un enfoque cualitativo, considerando su probabilidad, impacto y las acciones de respuesta más adecuadas para cada caso.

En el **componente técnico**, se identificaron posibles desviaciones relacionadas con el desempeño del sistema fotovoltaico, como fallas en inversores o módulos, degradación de componentes o disparos en la interconexión con la red interna. Estos eventos podrían afectar la generación esperada de energía, por lo que se contemplan medidas preventivas centradas en rutinas de mantenimiento programado, monitoreo del rendimiento y gestión oportuna de garantías con los proveedores.

En el **ámbito financiero**, se prevén contingencias vinculadas con variaciones del dólar, tasas de interés o retrasos en los flujos de caja que podrían incidir en el CAPEX y en la secuencia de inversiones escalonadas. Como respuesta, se sugieren revisiones periódicas de los supuestos financieros, priorización de desembolsos críticos y mecanismos de aseguramiento de liquidez que reduzcan la exposición.

Desde la **perspectiva operativa**, los principales riesgos se asocian con la disponibilidad de vehículos durante el proceso de recambio y con la posibilidad de desabastecimiento de repuestos o mayores tiempos de mantenimiento. Para atender estos escenarios, se propone una programación escalonada de sustituciones, reforzando la coordinación entre las áreas de mantenimiento y logística.

En el **componente regulatorio**, se reconocen riesgos derivados de eventuales modificaciones en los incentivos a las Fuentes No Convencionales de Energía Renovable [FNCER] o en los estándares de emisiones, ante lo cual se sugiere mantener vigilancia normativa continua y articulación temprana con las autoridades competentes.

Con base en los riesgos identificados, las medidas de respuesta propuestas constituyen herramientas para anticipar o mitigar el posible impacto de los eventos analizados, y se recomienda su integración al

protocolo de seguimiento como parte del sistema de control y mejora continua de la estrategia [Ver Anexo Técnico – Matriz de Riesgos del Portafolio].

Tabla 28

Resumen cualitativo de valoración de riesgos del portafolio A1/A2

Categoría	Riesgo principal identificado	Probabilidad	Impacto	Nivel de riesgo
Técnico	Falla de inversor o módulos fotovoltaicos, subdesempeño por degradación o disparo de red interna	Media	Alta	Alto
Financiero	Variación del dólar o tasas de interés / retraso en flujo de caja para inversiones escalonadas	Media	Media	Medio
Operativo	Baja disponibilidad de vehículos / desabastecimiento de repuestos	Baja	Media	Medio-Bajo
Regulatorio	Cambios normativos que afecten beneficios FNCER o estándares de emisiones	Baja	Alta	Medio

Fuente: Elaboración propia a partir del Anexo Técnico “Matriz de Riesgos del Portafolio”.

9.3. Seguimiento, control y validación de la propuesta estratégica de mitigación

Este bloque presenta el Sistema de Seguimiento, Control y Validación de la Propuesta Estratégica de Mitigación, dando cumplimiento a los objetivos específicos tercero y cuarto de la presente investigación.

En la primera parte se expone el Protocolo de seguimiento y evaluación, concebido como la herramienta metodológica que permite monitorear el desempeño de la estrategia, su plan de operacionalización y medir su efectividad en la reducción de emisiones. Dicho protocolo se articula con algunos de los riesgos identificados en el apartado 9.2.11, a fin de monitorear criterios de desvío y mecanismos de respuesta coherentes con el portafolio A1/A2.

En la segunda parte se desarrolla la validación técnica y gerencial de la propuesta de intervención estratégica y del precitado protocolo, mediante la aplicación de juicio de expertos y del coeficiente V de Aiken, con el fin de garantizar su viabilidad operativa e institucional dentro del contexto de PLANETA S.A.S E.S.P.

9.3.1. Protocolo de seguimiento y evaluación de la estrategia de mitigación

El presente protocolo define la forma en que se verificará, de manera periódica y con base en información operacional real, la efectividad de la estrategia de mitigación planteada para la PTAR de PLANETA S.A.S E.S.P. El seguimiento se circunscribe a las fuentes bajo control operacional, específicamente la flota diésel vinculada al proceso y el consumo eléctrico de la planta. Como referencia se adopta la línea base 2024 de emisiones operacionales; como

orientación, la hoja de ruta del portafolio A1/A2; y como criterio de éxito, la convergencia progresiva hacia las metas anuales, con capacidad de ajuste frente a eventuales desviaciones.

El propósito central es comprobar mes a mes si la reducción alcanzada en la operación, conforme con el efecto de la incorporación gradual de los proyectos A1 [recambio de flota crítica] y A2 [autogeneración fotovoltaica], resulta consistente con la trayectoria prevista, de modo que se habiliten decisiones oportunas en caso de desviaciones. El alcance del protocolo abarca las emisiones asociadas al transporte propio del proceso y al consumo eléctrico de la PTAR, diferenciando los consumos de kWh de red y, cuando corresponda, de los kWh de por autogeneración de la planta de energía solar, incorporando además la dimensión hidráulica de operación a través de los caudales de entrada y salida, lo que permitirá derivar indicadores de intensidad [kWh/m³ y tCO₂eq/m³] que ofrezcan una lectura más precisa de la realidad operativa de la planta.

9.3.2. Indicadores de seguimiento y método de cálculo

La evaluación se sustenta en un conjunto de indicadores diseñados para reflejar, de manera transparente y verificable, la evolución de las emisiones operacionales y su intensidad relativa. Cada indicador cuenta con trazabilidad documental hacia las fuentes primarias de información tales como facturas de combustible y energía, lecturas de medidores, registros de odómetros y bitácoras de caudal, lo que busca asegurar la confiabilidad en la traza de la información y la generación de los cálculos. Las fórmulas empleadas son explícitas y permanecen estables en el horizonte estratégico; cuando se produzcan actualizaciones oficiales de factores de emisión, el ajuste deberá registrarse mediante control de versiones y con la correspondiente nota técnica de respaldo.

Tabla 29

Indicadores del protocolo de seguimiento y evaluación de la estrategia de mitigación en la PTAR

KPI	Fórmula de Cálculo	Unidad
Emisiones flota [Alcance 1]	$\sum \frac{(L_{mes,i} \times FE_{diésel})}{1000}$	tCO ₂ eq/mes
Emisiones electricidad [Red]	$\frac{[kWh_{Red,mes} \times FE_{Red}]}{1000}$	tCO ₂ eq/mes
Emisiones evitadas por generación solar fotovoltaica [FV]	$\frac{[kWh_{FV,mes} \times FE_{Red}]}{1000}$	tCO ₂ eq/mes
Emisiones operacionales totales	$Emisiones\ Flota + Emisiones\ Red - Emisiones\ evitadas\ FV$	tCO ₂ eq/mes

KPI	Fórmula de Cálculo	Unidad
Reducción mensual respecto al promedio de 2024 [%]	$\left[1 - \frac{Emisiones\ Operacionales_{mes}}{\left[\frac{Emisiones\ 2024}{12} \right]} \right] \times 100$	%
Reducción acumulada del año [Acu] respecto a 2024 [%]	$\left[1 - \frac{Emisiones\ Operacionales_{Acu}}{\left[\frac{Emisiones\ 2024}{12} \right]} \right] \times 100$	%
Diferencia frente a la meta [Brecha ϕ]	<i>Reducción Acumulada – Meta anual</i>	Puntos Porcentuales [PP/%]
Intensidad energética PTAR	$\frac{kWh_{Red,mes}}{m^3\ tratado,mes}$	kWh/m ³
Intensidad de GEI PTAR	$\frac{tCO_{2eq}\ Flota + tCO_{2eq}\ Energia}{m^3\ tratado,mes}$	tCO _{2eq} /m ³
Consumo específico L/100km	$\frac{Litros\ consumidos}{km\ recorridos} \times 100$	L/100 km
[%]Cumplimiento de reducción de emisiones según hoja de ruta	$\frac{Reducción\ Real\ \Delta t_{Acumulado}}{Reducción\ \Delta t_{Planificado}} \times 100$	%
Desviación respecto a la reducción planificada de GEI	$\frac{Reduc_{Observada} - Reduc_{Planeada}}{Reduc_{Planeada}} \times 100$	%

Fuente: Elaboración propia con base en la línea base 2024 de emisiones de la PTAR y en la hoja de ruta de los proyectos A1 [recambio de flota crítica] y A2 [autogeneración fotovoltaica]⁴⁶.

9.3.3. Metas anuales y criterio de semaforización

Las metas anuales de reducción se derivan de los hitos de la hoja de ruta por fases de la estrategia propuesta [A1: Proyecto de recambio progresivo de flota crítica; y A2: Proyecto de incorporación de generación solar fotovoltaica en la PTAR]. Estas metas no siguen una trayectoria lineal: El aporte de A1 aumenta gradualmente en fases u “olas” de recambio, mientras que el proyecto A2 empieza a contribuir a partir de su entrada en operación. El potencial de reducción estimado para el 2030 es de aproximadamente –10,75 % emisiones respecto a la línea base del año 2024, equivalente a ≈ 63 tCO_{2eq} por año cuando ambos

⁴⁶ Los factores de emisión corresponden a los adoptados por la plataforma Dcycle, en coherencia con el GHG Protocol y el IPCC AR6. Las fórmulas se expresan en términos simplificados para garantizar trazabilidad a datos primarios [facturas de combustible y energía, registros de odómetros y caudales tratados]. La frecuencia sugerida de medición es mensual, y la empresa deberá coordinar con los respectivos responsables de área la entrega de información en las fechas de cohorte que determine el equipo de gerencia.

proyectos estén plenamente operativos para finales del 2030, por lo que las cotas de seguimiento se contemplan entorno a ese umbral.

El cumplimiento de las metas se evaluará conforme con los hitos de reducción definidos previamente en la propuesta de estrategia de mitigación. Para cada año, la verificación se realizará mediante la diferencia entre la reducción acumulada observada y la meta anual correspondiente, de acuerdo con la siguiente expresión:

$$\text{Diferencia Frente a la meta [\%]} = \text{Reducción Acumulada [\%]} - \text{Meta anual[\%]}$$

La interpretación de resultados se apoya en un criterio de semaforización alineado con las buenas prácticas recomendadas en sistemas de gestión ambiental ⁴⁷:

- **Verde:** $\phi \geq 0 \%$ → en o por encima de la meta.
- **Ámbar:** ϕ entre -5% y $< 0 \%$ → ligeramente por debajo de la meta; lo cual sugiere realizar acciones correctivas en donde se registren brechas.
- **Rojo:** $\phi < -5 \%$ → desviación significativa; para la que se deberán activar un plan de choque con acciones concretas inmediatas.

Es procedente precisar que si el cronograma de implementación, el alcance o el desempeño real de los proyectos se modifica, las metas podrán recalibrarse, manteniendo siempre coherencia con la hoja de ruta y el esquema de priorización económico-ambiental propuesto en la estrategia de reducción.

9.3.4. Ritmo de seguimiento y entregables

Dado el alto nivel de voluntad institucional y la disponibilidad de recursos identificados en el diagnóstico organizacional previamente descritos [Índice de Disposición Organizacional, IDO = 4,34], el protocolo de seguimiento adopta un ritmo operativo mensual, trimestral y anual que aprovecha esa capacidad para garantizar el cumplimiento y la mejora continua. En el cierre mensual [día 5 hábil del siguiente periodo] se consolidan los KPIs clave, las intensidades energéticas y el estado del semáforo [valor mensual y acumulado anual]; ante desviaciones se registran y materializan hasta tres decisiones operativas inmediatas documentadas en acta con

⁴⁷ El criterio de semáforo adoptado para el seguimiento de las metas de reducción de emisiones, estableciendo un rango de tolerancia del -5% para activar alertas y planes de choque, se fundamenta en las buenas prácticas recomendadas en sistemas de gestión ambiental según la norma ISO 14001:2015 (International Organization for Standardization, 2015). Esta norma promueve el monitoreo continuo del desempeño ambiental con límites claros para la identificación de desviaciones que demanden acciones correctivas, siendo un rango del 5% una referencia técnica práctica y ampliamente adoptada en la gestión ambiental y de calidad, que equilibra la sensibilidad de alerta con la variabilidad operacional normal para evitar falsas alarmas.

responsable y plazo de entrega, las cuales estarán orientadas a la realización de correcciones [por ejemplo: verificación de datos, ajustes operativos, mantenimiento correctivo].

Para la revisión trimestral se propone un esquema de reunión de [30 a 45 minutos] en la que se presenten un resumen de los resultados de consumos específicos de combustibles de los vehículos conforme con su segmento funcional, y dos gráficos principales relacionados con la tendencia de reducción e intensidades [kWh/m³ y tCO₂eq/m³]. Además en esta reunión se podrán formalizar hasta cinco decisiones de alcance operativo y de gestión, cada una con responsable y fecha de cumplimiento, para corregir tendencias, reasignar recursos o reprogramar hitos del roadmap. Para el cierre anual se sugiere integrar resultados, lecciones aprendidas, verificación de evidencias y, si procede, la recalibración de metas en pro de mejoras para el año siguiente, manteniendo en todo momento la trazabilidad con la hoja de ruta del portafolio de los proyectos A1/A2 y la justificación técnico-financiera de los ajustes que sean pertinentes.

Este ritmo y los entregables propuestos aprovechan las fortalezas identificadas en liderazgo, estrategia, recursos y procesos, e incorporan medidas específicas para consolidar las áreas señaladas como “*En Consolidación*” [Cultura y Evaluación], toda vez que exponen potencial de mejora frente al objetivo de liderar transformaciones impulsadas por resultados sostenibles.

9.3.5. Roles y responsabilidades

El liderazgo del protocolo recae en el área de Sostenibilidad, responsable de consolidar los datos, calcular los indicadores [KPIs] y emitir los informes periódicos. La Planta deberá aportar los registros de consumo energético [kWh de red, kWh solares y caudales de entrada y salida], garantizando la validez de las mediciones. Por su parte el área de Logística reportará los litros de combustible y los kilómetros recorridos por segmento operativo; mientras que Contabilidad suministrará los costos asociados al consumo de energía y combustible. Finalmente, la Gerencia asume el rol decisor, priorizando y activando las acciones correctivas cuando el desempeño de los indicadores se ubique en las zonas ámbar o roja del semáforo de gestión.

De manera complementaria, cada mes se consolida una carpeta maestra que integra la base de datos, los soportes primarios [facturas, lecturas y reportes] y una bitácora de cambios. En esta última deberán registrarse las versiones de los factores de emisión, los ajustes metodológicos y las correcciones realizadas, dejando siempre evidencia con fecha y responsable asignado, a fin de preservar la trazabilidad y la transparencia del proceso.

9.3.6. Reglas de gestión de desvíos

Cuando un trimestre cierre en rojo, deberán activarse en un plazo máximo de 30 días un plan de acción correctivo, que puede incluir mantenimiento focalizado, programas de eco-conducción o ajustes operativos y eléctricos. Si la condición de rojo se mantiene por dos trimestres consecutivos, el protocolo exige una revisión extraordinaria y trazable de los supuestos operativos y de cálculo. Dicha revisión contempla, entre otros aspectos, la actividad operativa [kilómetros recorridos, horas en sitio con operación en PTO, m³ tratados], la calidad de los datos y de las mediciones [estado de odómetros, medidores y precisión en los registros de caudal], así como la vigencia de los cronogramas de la hoja de ruta y de los factores de emisión. Con base en esta evaluación, se decidirá mediante acta si es necesario reprogramar hitos o reforzar las medidas previstas. En contraste, un desempeño verde sostenido deberá documentarse como buena práctica y abre la posibilidad de elevar de manera prudente la meta de reducción para el año siguiente.

Este esquema de gestión de desvíos garantiza trazabilidad entre el diagnóstico, la estrategia y las decisiones tomadas, manteniendo la lógica de priorización económico-ambiental [MACC] y el despliegue progresivo de la hoja de ruta A1/A2. Con ello, se asegura la coherencia tanto con los objetivos internos de gestión ambiental de la empresa como con los compromisos nacionales de mitigación⁴⁸.

9.3.7. Validación de la viabilidad de la estrategia y del protocolo de seguimiento

Este apartado materializa el cuarto objetivo específico del estudio, verificando con criterio técnico y gerencial que la propuesta estratégica de mitigación y su protocolo de seguimiento son pertinentes, coherentes con el diagnóstico y operativamente viables dentro de las fronteras metodológicas de control operacional adoptadas por el equipo de trabajo, y conservan trazabilidad con el inventario de emisiones y con la lógica de priorización económico-ambiental definida en el estudio [portafolio de proyectos A1/A2 estructurado mediante MACC].

Para este ejercicio, se convocaron cinco evaluadores con el propósito de contrastar la factibilidad técnica y la viabilidad institucional de la estrategia. Entre ellos participaron dos expertos externos: un ingeniero con doble formación de máster en tratamiento de aguas, especializado en recursos hídricos y con experiencia en diseño hidráulico y operación de PTARs; y un segundo experto en el diseño e ingeniería de proyectos de energía renovable y

⁴⁸ Los criterios de desvío pueden verse condicionados por algunos de los eventos priorizados en el apartado 9.2.10, activando las respuestas previstas en el protocolo de seguimiento y/o los planes de respuesta que la empresa deberá perfilar conforme con los riesgos identificados.

tecnologías verdes, que ha liderado la planificación y ejecución de proyectos de sistemas de almacenamiento de energía en baterías [BESS] y plantas fotovoltaicas de gran escala. A su vez, la validación contó con la participación de tres directivos de la empresa patrocinadora: el gerente general, la gerente administrativa y financiera, y el gerente de operaciones y comercial. Cada evaluador recibió la síntesis ejecutiva de la estrategia y su secuenciación, el protocolo de seguimiento con sus indicadores, y el formato de validación compuesto por diez criterios en escala Likert de 1 a 5 con espacio para observaciones, el cual fue diligenciado y suscrito de manera independiente por cada uno de los participantes⁴⁹.

El instrumento operacionaliza diez criterios que permiten evaluar la pertinencia y solidez de la estrategia. Estos criterios abarcan, por un lado, aspectos de alineación y coherencia —como su valor estratégico, la consistencia con la planeación corporativa, los compromisos regulatorios y la realidad operativa de la planta de tratamiento—; por otro, dimensiones técnicas y financieras, que incluyen el potencial de reducción de emisiones, la integración con los análisis de costos marginales y la viabilidad de inversión [CAPEX/OPEX]; así como consideraciones de impacto y seguimiento, relacionadas con la medición en tCO₂eq, la trazabilidad de resultados, la calidad de los indicadores y la validez de los supuestos utilizados. Finalmente, se tuvo en cuenta la pertinencia del orden de priorización y la factibilidad operativa en función de la continuidad del servicio y las ventanas de intervención.

Para cada criterio se estimó el coeficiente V de Aiken y, a partir de ellos, un V Aiken global. Se utilizó una escala Likert de cinco categorías con una calificación mínima de $l = 1$, y las puntuaciones se obtuvieron conforme a la siguiente expresión:

$$V = \frac{S}{n \cdot [c - 1]} \rightarrow V = \frac{\sum r_i - l}{n \cdot [c - 1]}$$

Donde: $V \in [0,1] \rightarrow$ Coeficiente de Aiken⁵⁰.

r : Es la puntuación asignada por cada juez [1– 5].

⁴⁹ Los formatos de validación, debidamente diligenciados y suscritos por los jueces expertos, directivos de la empresa y el equipo de trabajo de la presente investigación, se mantienen como evidencia documental y están a disposición del jurado evaluador para su revisión; no obstante, estos no se adjuntan en los anexos públicos de este documento en virtud de la necesidad de proteger la confidencialidad de los participantes y sus datos personales, conforme a los principios de ética en la investigación y las regulaciones de protección de datos [Hábeas Data].

⁵⁰ Para la interpretación operativa del V de Aiken [escala 1–5], considere: $V \in [0,1]$. En este estudio: $V \geq 0,90 =$ excelente \rightarrow mantener; $0,80-0,89 =$ alta \rightarrow mantener con ajustes menores; $0,75-0,79 =$ aceptable/límite \rightarrow mantener incorporando mejoras; $0,60-0,74 =$ baja/dudosa \rightarrow revisar y replantear; $V < 0,60 =$ inaceptable \rightarrow rediseñar o descartar. Esta gradación se considera apropiada y conservadora frente a la literatura, que sugiere un umbral mínimo de aceptación $V \geq 0,70$ (Maldonado Mera, 2020, p. 21; Torres-Malca et al., 2022, p. 273).

l : Es la puntuación mínima de la escala [1].

c : Es número de categorías posibles de la escala [5].

n : Es el número de jueces válidos que respondieron cada criterio [5].

S : Es la suma de $[r_i - l]$ de los jueces válidos.

En términos cuantitativos, los resultados se consolidan en la siguiente tabla, la cual permite apreciar con claridad el nivel de consenso alcanzado por los evaluadores sobre la pertinencia y viabilidad de la estrategia, así como el valor global del instrumento.

Tabla 30

Resultados de la validación de criterios mediante coeficiente V de Aiken

Criterio	Descripción Resumida del Atributo Evaluado	V de Aiken
1	Potencial estratégico de la propuesta	1
2	Alineación con la estrategia corporativa	1
3	Coherencia con los compromisos regulatorios nacionales E2050	0,95
4	Integración técnico-financiera [MACC, CAPEX/OPEX]	1
5	Coherencia con el diagnóstico y la operación de la PTAR	0,90
6	Impacto medible en tCO ₂ eq y trazabilidad conforme con el inventario	1
7	Pertinencia del orden de priorización	1
8	Factibilidad operativa [continuidad y ventanas de ejecución]	0,95
9	Consistencia de supuestos económico-técnicos adoptados	1
10	Calidad de indicadores de seguimiento	0,95
V de Aiken Global		0,975

Fuente: Elaboración propia con base en los formatos de validación diligenciados por los cinco jueces expertos [2025].

Tanto el coeficiente V de Aiken obtenido para los diez criterios —así como su valor global— evidencian un consenso de excelente validez por parte de los evaluadores, lo cual resulta coherente con el predominio de calificaciones 4–5 en todos los criterios. Además, las retroalimentaciones convergen en tres frentes: (a) Coherencia con el diagnóstico y la operación, en la que la estrategia se considera consistente con el inventario y las restricciones de planta, destacándose la necesidad de profundizar en el futuro mejoras operacionales complementarias; (b) Priorización y factibilidad, donde el orden propuesto —MACC más potencial de abatimiento— se valora como pertinente para la realidad de la empresa, garantizando la continuidad del servicio y las ventanas de ejecución; y (c) Supuestos e indicadores, respecto de los cuales los parámetros técnico-económicos [vida útil, normalizaciones] se consideran consistentes con la línea base, señalándose la conveniencia de fortalecer algunos indicadores del protocolo para ampliar su alcance y precisión. Estas conclusiones descansan en las observaciones registradas por los evaluadores, mientras que la

validación con el criterio de V de Aiken⁵¹, junto con la evidencia consignada en los adjuntos y el encuadre metodológico del trabajo, confirma la solidez de la propuesta estratégica de mitigación.

⁵¹ *La base de datos con los resultados numéricos de las puntuaciones otorgadas por los jueces expertos se incluye íntegramente en los anexos técnicos de este trabajo, constituyéndose en soporte de transparencia y trazabilidad del proceso de validación.*

10. Conclusiones

- El diagnóstico de la huella de carbono operacional de la planta, delimitado a los vehículos diésel [Alcance 1] y al consumo de electricidad de la red [Alcance 2], reveló un incremento del 6,06 % en la intensidad de las emisiones, pasando de 4,45 kg CO₂eq/m³ en 2022 a 4,72 kg CO₂eq/m³ en 2024, con una línea base de 586,01 tCO₂eq. Este análisis confirma que la flota diésel es el principal contribuyente a la huella operacional, con vehículos que superan las 45 tCO₂eq/año; mientras que el consumo de la electricidad de red, a pesar de su menor impacto relativo, representa una oportunidad de mitigación tangible trazable mediante la autogeneración.

- La estrategia se estructuró como un portafolio escalonado que combina la autogeneración fotovoltaica [A2] y el recambio progresivo de la flota crítica [A1], priorizado mediante la Curva de Costo Marginal de Abatimiento [MACC] y soportado por el Índice Compuesto de Eficiencia Relativa [ICE^r] y la segmentación operativa de la flota. Este orden de ejecución otorga prelación a la captura de toneladas con costo marginal negativo [-3,78 millones \$/tCO₂eq] en A2 y, en segunda instancia, aborda las reducciones de costo positivo en A1 necesarias para cerrar la brecha hacia la meta funcional. El portafolio define hitos anuales y una trayectoria de reducción no lineal pero verificable [2026–2030], coherente con la rigidez técnica de una PTAR y con las capacidades reales de la empresa. En términos de generación de valor, A2 ofrece indicadores financieros favorables como un payback de ≈2,4 años, lo que respalda su prioridad; y en términos de alineación, la estrategia se articula con la política corporativa y con la E2050, particularmente con las apuestas de matriz energética diversificada y movilidad e infraestructura sostenibles. De este modo, la propuesta traduce el diagnóstico en decisiones de inversión viables y establece una hoja de ruta capaz de materializar reducciones medibles bajo el control operacional definido.

- El protocolo de seguimiento convierte la estrategia en un ciclo gerencial de control continuo, tomando como referencia la línea base de 2024 y proyectando su verificación contra metas anuales acumulativas. Su diseño incorpora KPI operativos y un sistema de semaforización que anticipa desviaciones y activa acciones correctivas en plazos definidos. Su fortaleza es la coherencia con la trayectoria escalonada 2026–2030, que establece reducciones progresivas y verificables, de modo que cada hito funcione como punto de control en tiempo real para mantener el rumbo de la estrategia. Además, el cumplimiento estricto de este protocolo condiciona el logro de dichos hitos; en este

sentido, un IDO de 4,34 refleja que la efectividad del seguimiento no depende únicamente de los mecanismos técnicos diseñados, sino también de la disposición organizacional — fortalezas existentes y brechas en cultura y evaluación sistemática— que, si se gestionan, pueden convertirse en palancas de efectividad, o en su defecto, en limitaciones.

- La validación por juicio de expertos confirmó la coherencia integral entre diagnóstico, estrategia y protocolo; el V de Aiken global de 0,975 ubicó la propuesta en un nivel de excelente validez de contenido, con consenso sobre la prioridad de A2 frente a A1, la solidez de los indicadores y la consistencia de los supuestos. Asimismo, la validación reconoció un potencial tangible de generación de valor en cuatro planos:

- **Ambiental:** reducción estimada de 63,0 tCO₂eq/año al 2030, con aportes diferenciados de A1 y A2 respecto al 2024.
- **Económico:** inicio con abatimiento de costo marginal negativo en A2, que reduce el costo medio del portafolio y genera ahorros energéticos recurrentes que respaldan financieramente las fases de A1.
- **Operativo:** ejecución escalonada que asegura continuidad del servicio mediante fases y ventanas de implementación definidas.
- **Reputacional:** integración de criterios técnicos, ambientales y financieros en decisiones alineadas con la E2050, como la descentralización hacia energías limpias y la articulación de metas climáticas en instrumentos de planeación.

- La adopción de una estrategia adaptada al contexto operativo de la empresa PLANETA S.A.S E.S.P. y a los alcances metodológicos precisados en esta intervención demuestra que es posible reducir la huella de carbono operacional asociada al proceso de tratamiento de aguas residuales en un rango funcional de -10 % a -11 % respecto al escenario de 2024. Esta reducción, equivalente a un -10,75 % al horizonte 2030, se explica por la combinación de 19,9 tCO₂eq anuales de A1 [recambio de flota crítica] y 43,1 tCO₂eq anuales de A2 [autogeneración solar]. Este resultado constituye una meta objetiva y realista, en consonancia con lo señalado en la literatura, según la cual cada tonelada de CO₂eq evitada a partir de combustibles fósiles implica costos marginales elevados y requiere inversiones escalonadas en tecnología y rediseño de procesos. En consecuencia, la investigación evidencia que el potencial de reducción se sustenta en proyectos concretos, técnicamente fundamentados y alineados con la capacidad operativa y financiera de la organización.

11. Recomendaciones

Con el propósito de fortalecer la gestión ambiental de PLANETA S.A.S E.S.P. y asegurar la sostenibilidad de la estrategia diseñada, se plantean las siguientes recomendaciones, las cuales buscan ser coherentes con el problema abordado, los objetivos definidos y los resultados obtenidos en esta investigación.

Consolidar y actualizar la línea base de emisiones.

Mantener un inventario anual de emisiones que integre los consumos de diésel y electricidad bajo control directo de la empresa, con registros mensuales de caudales de entrada y salida. Esto permitirá garantizar comparabilidad entre periodos y generar indicadores de intensidad confiables [por ejemplo, emisiones por metro cúbico tratado o por kilovatio-hora consumido]. Adicionalmente, se recomienda incluir de manera referencial las fuentes indirectas más relevantes, sin alterar el alcance de la estrategia, con el fin de contar con una visión más amplia para futuras decisiones.

Ejecutar el portafolio en coherencia con el orden de priorización propuesto.

Iniciar la implementación con el proyecto de autogeneración solar, que ofrece ahorros inmediatos y sostenibles, y posteriormente avanzar con el recambio gradual de la flota más crítica. Este proceso debe garantizar la continuidad del servicio mediante fases y periodos de implementación definidos. El programa de renovación de flota debe complementarse con mantenimiento preventivo semestral y con el monitoreo de vehículos no priorizados, de manera que puedan reevaluarse en función de su desempeño.

Adoptar el protocolo como sistema formal de control.

Integrar un tablero de seguimiento mensual, con indicadores clave y alertas visuales, a la rutina directiva de la empresa. Cada cierre debe contar con un acta y con un plan de acción obligatorio en caso de desviaciones. Para mantener la eficiencia en las operaciones móviles, se sugiere establecer planillas de despacho y reglas claras de asignación de vehículos según el tipo de servicio y los volúmenes a transportar, reduciendo kilómetros improductivos y consumo de combustible.

Fortalecer las dimensiones organizacionales.

Institucionalizar un ciclo anual de revisión externa y de mejora interna que evalúe la efectividad de la estrategia. Este debe complementarse con un programa de conducción eficiente dirigido a los operadores de la flota priorizada, y con auditorías internas que aseguren el cumplimiento del protocolo. Con estas acciones se busca consolidar una cultura de sostenibilidad sin añadir complejidad operativa innecesaria.

Escalar en coherencia con la meta funcional y la Estrategia 2050.

Alinear la meta de reducción al 2030 ($\approx -10,75\%$) con el plan operativo anual, el presupuesto y los proyectos de inversión, de modo que los hitos anuales queden vinculados al seguimiento de la alta dirección. Los aprendizajes derivados de los proyectos de autogeneración y de recambio de flota deben proyectarse como un modelo replicable para otras áreas de la organización, y como insumo para acceder a incentivos tributarios, líneas verdes de crédito y programas de apoyo disponibles en el país.

12. Referencias

- 100% Renewables. (2022). *How to Achieve Net Zero Emissions*.
<https://100percentrenewables.com.au/>
- Abyar, H., & Nowrouzi, M. (2023). A comprehensive framework for eco-environmental impact evaluation of wastewater treatment plants: Integrating carbon footprint, energy footprint, toxicity, and economic assessments. *Journal of Environmental Management*, 348. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119255>
- Aligned Incentives, L. (2024). *Cómo optimizar las curvas de costos marginales de reducción para las acciones de descarbonización*.
<https://alignedincentives.com/marginal-abatement-cost-curve-macc-decarbonization/>
- Amador-Mercado, C. Y. (2022). UNO Sapiens Boletín Científico de la Escuela Preparatoria No. 1 El Análisis PESTEL The PESTEL Analysis. In *Publicación semestral* (Vol. 4, Issue 8).
<https://repository.uaeh.edu.mx/revistas/index.php/prepa1/issue/archive>
- Amper Technologies. (2025, January 10). *Asset Utilization: How To Calculate It, Key Metrics, and More*. <https://www.amper.co/post/asset-utilization-how-to-calculate-it-key-metrics-and-more>
- Arguello, R., Delgado, R., Espinosa, M., Gonzalez, T., Sandoval, J. M., & Tecnica, N. (2022). *Análisis costo-beneficio de las opciones para alcanzar cero emisiones netas en Colombia*. <https://publications.iadb.org/es/analisis-costo-beneficio-de-las-opciones-para-alcanzar-cero-emisiones-netas-en-colombia>
- Asana. (2025, January 20). *Matriz de prioridades: cómo identificar lo que realmente importa y lograr mucho más*. https://asana.com/es/resources/priority-matrix?utm_source=chatgpt.com

- Asociación Española para la Calidad (AEC). (2024). *Norma PAS 2050 - AEC*.
Asociación Española Para La Calidad (AEC).
<https://www.aec.es/conocimiento/centro-del-conocimiento/norma-pas-2050/>
- Bao, Z., Sun, S., & Sun, D. (2016). Assessment of greenhouse gas emission from A/O and SBR wastewater treatment plants in Beijing, China. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 108, 108–114.
<https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2015.11.028>
- Bárcena, A., Samaniego, J., Miguel Galindo, L., Ferrer Carbonell, J., Eduardo Alatorre, J., Stockins, P., Reyes, O., Sánchez, L., & Mostacedo, J. (2018). *La economía del cambio climático en América Latina y el Caribe: Una visión gráfica*.
- Barreca, S. L., & Kateregga, K. A. (2000). *Technology Life-Cycles And Technological Obsolescence*. <http://www.bcri.com/Downloads/Valuation%20Paper.PDF>
- Belver, C. (2023, April 5). *Cuartiles, Deciles y Percentiles*. Centro de Aprendizaje Virtual Instituto Clavijero.
https://belver.clavijero.edu.mx/cursos/nme/semestre5/probyest_1/s3/contenidos/cuartiles_deciles_y_percentiles.html
- Bernal Torres, C. A. (2010). *Metodología de la investigación administración, economía, humanidades y ciencias sociales*.
- Blasco-Blasco, O., Rodríguez-Castro, M., & Túniz-López, M. (2020). Composite indicators as an innovative methodology for communication sciences: Implementation for the assessment of european public service media. *Profesional de La Informacion*, 29(4), 1–13.
<https://doi.org/10.3145/epi.2020.jul.37>
- Blom, G. (1958). *Statistical Estimates and Transformed Beta-Variables* (John Wiley & Sons, Ed.; 1st ed., Vol. 1).

- Boiocchi, R., Viotti, P., Lancione, D., Stracqualursi, N., Torretta, V., Ragazzi, M., Ionescu, G., & Rada, E. C. (2023). A study on the carbon footprint contributions from a large wastewater treatment plant. *Energy Reports*, 9, 274–286. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2023.06.002>
- Bosco Mofatto, P. M., Cosenza, A., Di Trapani, D., Wu, L., Ni, B. J., & Mannina, G. (2024). Carbon footprint reduction by coupling intermittent aeration with submerged MBR: A pilot plant study. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 12(4). <https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.113115>
- Bosstech. (2024). *Procesos físicos y químicos en tratamiento de agua residual* Boss Tech. <https://bosstech.pe/blog/procesos-quimicos-fisicos-tratamiento-aguas-residuales/>
- Calvo Maguregi, J. A. (2020). *Claves para la evaluación de los resultados con el Modelo EFQM 2020* (Club de Excelencia en Gestión, Ed.). <https://www.clubexcelencia.org/>
- Cameron, K. S., & Quinn, R. E. (2006). *Diagnosing and Changing Organizational Culture Based on the Competing Values Framework* (Inc. John Wiley & Sons, Ed.; 10th ed.).
- Cancino Cancino, V., & Vial Aliaga, M. (2022). Organizational culture assessment instrument: systematic review of its application. *Revista Venezolana de Gerencia*, 27(97), 107–126. <https://doi.org/10.52080/rvgluz.27.97.8>
- Caniani, D., Esposito, G., Gori, R., & Mannina, G. (2015). Towards a new decision support system for design, management and operation of wastewater treatment plants for the reduction of greenhouse gases emission. *Water (Switzerland)*, 7(10), 5599–5616. <https://doi.org/10.3390/w7105599>

- Carboni, Joel., Duncan, William., Gonzalez, Monica., Milsom, Peter., & Young, Michael. (2018). *Sustainable project management : the GPM reference guide*. GPM Global.
- Cognuck González, S., & Numer, E. (2020). *Acuerdo de París para Jóvenes*.
www.unicef.org/lac
- Comisión Nacional del Agua - México. (2015). *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento: Introducción al Tratamiento de Aguas Residuales Municipales*.
www.conagua.gob.mx
- Congreso de Colombia. (2019). *Ley 1972 de 2019 “Por medio de la cual se establece la protección de los derechos a la salud y al medio ambiente sano estableciendo medidas tendientes a la reducción de emisiones contaminantes de fuentes móviles y se dictan otras disposiciones.”* <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/06/ley-1972-2019.pdf>
- Cristancho Montenegro, D. L., Gámez Posada, W., Guerra Alfaro, J. A., & Dueñas Escudero, M. F. (2019). Estimación de los gases efecto invernadero generados por las plantas de tratamiento de aguas residuales ubicadas en la cuenca del río Bogotá. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 18(34), 25–44.
<https://doi.org/10.22395/rium.v18n34a2>
- Dahnke, G. L. (1986). *La comunicación humana: ciencia social* (4th ed.).
<https://wordpress.com/es/>
- Dcycle. (2024, July 29). *Dcycle obtiene la certificación TÜV Rheinland ISO 14064*.
<https://www.dcycle.io/post/dcycle-is-certified-by-tuv-rheinland>
- Dcycle. (2025a). *Carbon footprint and greenhouse gases: Why measure them?*
www.dcycle.io/post/carbon-footprint-greenhouse-gases
- Dcycle. (2025b). *Informe de impacto medioambiental: Análisis de huella de carbono*.
<https://app.dcycle.io/dashboard/total>

- Dcycle. (2025c, April 14). *ISO 14064: La Clave para Medir y Reportar tu Huella de Carbono*. <https://www.dcycle.io/es/post/huella-carbono-iso-14064>
- De Haas, D. W. (2004). *Greenhouse gas emissions from BNR plant-Do we have the right focus?* <https://www.researchgate.net/publication/288016156>
- De Lucas Coloma, L. A. (2018). *Análisis Estadístico de las Emisiones de CO2 Por el Consumo de Combustible Gaseoso en Ecuador Mediante la Aplicación de la Regresión Lineal Simple*. www.eumed.net/rev/caribe/2018/07/combustible-gaseoso-ecuador.html
- Del Río Gamero, B. (2018). *Mitigación del cambio climático en el ciclo integral del agua: Aplicación al proceso de tratamiento de aguas residuales*.
- Delgado, O., Rodríguez, F., & Muncrief, R. (2017). *Fuel efficiency technology in European heavy-duty vehicles: Baseline and potential for the 2020–2030 time frame*. www.theicct.org
- DNP. (2017). *ABC de la Viabilidad Subdirección de proyectos e información para la inversión pública dirección de inversiones y finanzas públicas*. <https://www.dnp.gov.co/>
- Doorn, M. R. J., Towprayoon, S., Vieira, S. M. M., Irving, W., Palmer, C., Pipatti, R., & Wang Can. (2006). *Capítulo 6: Tratamiento y eliminación de aguas residuales. En Directrices del IPCC para inventarios nacionales de gases de efecto invernadero (Vol. 5, pp. 1-43)*. https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/spanish/pdf/5_Volume5/V5_6_Ch6_Wastewater.pdf
- Duoc UC. (2024, May 7). *Investigación Aplicada, Innovación y Transferencia: Diferencia entre la Investigación Básica y la Aplicada*. <https://bibliotecas.duoc.cl/investigacion-aplicada>
- EPA. (2009). *Unified guidance for statistical analysis of groundwater monitoring data*.

- Estudio Legal Hernández. (2021). *Incentivos Tributarios Energías Renovables en Colombia: Marco Legal y Normativo*. www.estudiolegalhernandez.com
- European Commission - CORDIS. (2019). *Developing online tools to monitor, control and mitigate GHG emissions in WWTPs*. <https://doi.org/10.3030/645769>
- European Foundation for Quality Management. (2024). *The EFQM Model 2025*. <https://efqm.org/es/the-efqm-model/>
- FasterCapital. (2025, April 9). *Z Score: Z Score and Skewness: Navigating the Norms of Non Normality*. <https://fastercapital.com/content/Z-Score--Z-Score-and-Skewness--Navigating-the-Norms-of-Non-Normality.html>
- Flores-Alsina, X., Arnell, M., Amerlinck, Y., Corominas, L., Gernaey, K. V, Guo, L., Lindblom, E., Nopens, I., Porro, J., Shaw, A., Vanrolleghem, P. A., & Jeppsson, U. (2012). *A dynamic modelling approach to evaluate GHG emissions from wastewater treatment plants*.
- Frías-Navarro, D. (2022). *Apuntes de estimación de la fiabilidad de consistencia interna de los ítems de un instrumento de medida*. <https://doi.org/10.17605/osf.io/kngtp>
- García Arbeláez, C., Vallejo López, G., Lou Higgins, M., & Matilde Escobar, E. (2016). *El Acuerdo de París: Así Actuará Colombia frente al Cambio Climático* (WWF-Colombia., Ed.; 1 ed.). www.wwf.org.co
- Generalitat de Catalunya. (2011). *Guía Práctica para el Cálculo de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI)*.
- GHG Protocol. (2017). *Protocolo Global para Inventarios de Emisión de Gases de Efecto Invernadero a Escala Comunitaria: Estándar de contabilidad y de reporte para las ciudades*. https://ghgprotocol.org/sites/default/files/2022-12/GHGP_GPC%20%28Spanish%29.pdf

- GIZ. (2021). *Programa Transporte Sustentable: Manual para el diseño de programas de renovación de flotas*. <https://www.giz.de/en/worldwide/33041.html>
- Gobierno de Colombia. (2020a). *Actualización de la contribución determinada a nivel nacional de Colombia (NDC)*. <https://www.minambiente.gov.co/cambio-climatico-y-gestion-del-riesgo/actualizacion-de-la-contribucion-determinada-a-nivel-nacional-ndc/>
- Gobierno de Colombia. (2020b). *Actualización de la contribución determinada a nivel nacional de Colombia (NDC)*. <https://www.minambiente.gov.co/cambio-climatico-y-gestion-del-riesgo/actualizacion-de-la-contribucion-determinada-a-nivel-nacional-ndc/>
- Gobierno de Colombia. (2021a). *Estrategia climática de largo plazo de Colombia E2050 para cumplir con el Acuerdo de París*. <https://www.minambiente.gov.co>
- Gobierno de Colombia. (2021b). *Estrategia climática de largo plazo de Colombia E2050 para cumplir con el Acuerdo de París*.
- Gobierno de Colombia. (2022). *Taxonomía Verde de Colombia*.
- González, M., Barreda De Hurtado, L., & Ramos, B. (2023). *El Estándar P5™ de GPM ® para La Sostenibilidad en la Dirección de Proyectos GPM Global Versión 3.0* (Vol. 3).
- GPM LATAM. (2025). *¿Qué es gestión de proyectos sostenibles?*
<https://gpmlatam.org/que-es-gestion-de-proyectos-sostenibles/>
- Green Climate Fund. (2020). *Acceso Directo Mejorado (EDA) – Modalidad Piloto – Directrices para la elaboración de proyectos EDA con el Green Climate Fund*.
<https://www.greenclimate.fund/document/eda-guidelines>
- Green Project Management. (2024). *Achieving Net Zero Carbon Emissions Through Project Portfolio Management and Project Selection*.

<https://blog.greenprojectmanagement.org/index.php/2024/07/17/achieving-net-zero-carbon-emissions-project-portfolio-management-project-selection/>

- Gutiérrez Jaber, I. (2024, March 2). *¿Un remedio peor que la enfermedad? La contaminación de las plantas de tratamiento de aguas residuales*. TecScience - Tecnológico de Monterrey. <https://tecscience.tec.mx/es/tecnologia/que-gases-genera-una-planta-de-tratamiento-de-aguas-residuales/>
- He, X., Li, Z., Xing, C., Li, Y., Liu, M., Gao, X., Ding, Y., Lu, L., Liu, C., Li, C., & Wang, D. (2023). Carbon footprint of a conventional wastewater treatment plant: An analysis of water-energy nexus from life cycle perspective for emission reduction. *Journal of Cleaner Production*, 429. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.139562>
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & del Pilar Baptista Lucio, M. (2010). *Metodología de la investigación* (México. McGraw Hill, Ed.; 5ta Ed.). McGraw Hill. www.FreeLibros.com
- Hernández Sampieri, Roberto., Fernández Collado, Carlos., & Baptista Lucio, Pilar. (1991). *Metodología de la investigación*. McGraw-Hill.
- Hong, H. P. (2013). Selection of regressand for fitting the extreme value distributions using the ordinary, weighted and generalized least-squares methods. *Reliability Engineering and System Safety*, 118, 71–80. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2013.04.003>
- IDEAM, Fundación Natura, PNUD, MADS, DNP, & CANCELLEERÍA. (2022). *Informe del Inventario Nacional de Gases Efecto Invernadero 1990-2018 y Carbono Negro 2010-2018 de Colombia*. www.cambioclimatico.
- Ihobe & Gobierno Vasco. (2013). *7 Metodologías para el cálculo de emisiones de gases de efecto invernadero*. 1–31.
- Ihobe S.A. (2019). *Análisis de Ciclo de Vida y Huella de Carbono*.

- Institute for Project Management. (2025, February 10). *Sustainable project management: The key to long-term success*.
<https://instituteprojectmanagement.com/blog/sustainable-project-management-the-key-to-long-term-success/>
- International Council on Clean Transportation. (2017, April 24). *Shell game? Debating real-world fuel consumption trends for heavy-duty vehicles in Europe*.
- International Dynamic Advisors. (2020). *Guía rápida de aplicación de ISO 14064-1 Sistema de Gestión Huella de Carbono*.
https://www.intedya.com/productos/Plantilla_NORMAISO14064-1.pdf
- Iseazy. (2024, March 22). *ROI en sostenibilidad: descubriendo estándares de desempeño y métricas*. https://www.iseazy.com/es/blog/roi-en-sostenibilidad/?utm_source=chatgpt.com
- Karakas, A., Tozum-Akgul, S., Komesli, O. T., & Kaplan-Bekaroglu, S. S. (2024). Carbon footprint analysis of advanced biological wastewater treatment plant. *Journal of Water Process Engineering*, 61.
<https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.105254>
- Kesicki, F. (2011). *Marginal abatement cost curves for policy making-expert-based vs. model-derived curves **.
https://www.homepages.ucl.ac.uk/~ucft347/Kesicki_MACC.pdf
- Kim, D., Bowen, J. D., & Ozelkan, E. C. (2015). Optimization of wastewater treatment plant operation for greenhouse gas mitigation. *Journal of Environmental Management*, 163, 39–48. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.07.005>
- Lawrence, A. A. (2024). The Role Of Project Management In Driving Sustainable Development Goals (Sdgs). *Issue 6. Ser*, 26, 44–49.
<https://doi.org/10.9790/487X-2606024449>

- Leaf. (2024, April 1). *Huella de carbono_ ¿en qué unidades se mide_ - Leaf Huella de Carbono*. https://leaf-si.com/unidades-de-medida-de-la-huella-de-carbono/?utm_source=chatgpt.com
- Li, Y., Gu, H., Zhao, G., Li, H., Zhang, M., Yang, X. L., & Song, H. L. (2023). Carbon accounting of A2O process based on carbon footprint in a full-scale municipal wastewater treatment plant. *Journal of Water Process Engineering*, 55. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.104162>
- Loewenthal, K. M., & Lewis, C. A. (2001). *An introduction to psychological tests and scales* (2nd ed.). <http://www.intestcom.org/>
- Lok, P., & Crawford, J. (2000). The application of a diagnostic model and surveys in organizational development. *Journal of Managerial Psychology*, 15(2), 108–124. <https://doi.org/10.1108/02683940010310319>
- Maktabifard, M., Awaitey, A., Merta, E., Haimi, H., Zaborowska, E., Mikola, A., & Małkinia, J. (2022). Comprehensive evaluation of the carbon footprint components of wastewater treatment plants located in the Baltic Sea region. *Science of the Total Environment*, 806. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150436>
- Maktabifard, M., Zaborowska, E., & Makinia, J. (2019). Evaluating the effect of different operational strategies on the carbon footprint of wastewater treatment plants – case studies from northern Poland. *Water Science and Technology*, 79(11), 2211–2220. <https://doi.org/10.2166/wst.2019.224>
- Maldonado Mera, B. D. R. (2020). Instrumento de Medición del Pensamiento Estratégico en los Rectores Universitarios. *Ciencias Administrativas*, 18, 082. <https://doi.org/10.24215/23143738e082>
- Marinelli, E., Radini, S., Foglia, A., Lancioni, N., Piasentin, A., Eusebi, A. L., & Fatone, F. (2021). Validation of an evidence-based methodology to support regional

carbon footprint assessment and decarbonisation of wastewater treatment service in Italy. *Water Research*, 207.

<https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117831>

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2024). *Gases Efecto Invernadero*. Minambiente. <https://archivo.minambiente.gov.co/index.php/mitigaci/gases-efecto-invernadero-2>

Ministerio de Educación Nacional. (2022). *Guía Cálculo de Huella de Carbono en el Ministerio de Educación Nacional*. 1–22.

Ministerio de Vivienda, C. y T. (2020). *Resolución Número 0431 del 31 agosto de 2020*. www.minvivienda.gov.co

Ministerio de Vivienda, C. y T. (2021). *Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico: Título E. Tratamiento de aguas residuales*.

<https://www.minvivienda.gov.co/sites/default/files/documentos/tituloE-28122021-final-limpio-rev.pdf>

Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (2020). *Línea de agua*. https://www.miteco.gob.es/es/agua/temas/saneamiento-depuracion/sistemas-tratamiento/linea_de_agua.html

Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (2024). *Guía para el cálculo de la huella de carbono y para la elaboración de un plan de mejora de una organización*. <https://cpage.mpr.gob.es/>

Ministry of Road Transport & Highways. (2024). *Voluntary Vehicle-Fleet Modernization Program: A guide towards setting up of Vehicle Scrappage Ecosystem*.

Monteith, H. D., Sahely, H. R., MacLean, H. L., & Bagley, D. M. (2005). A Rational Procedure for Estimation of Greenhouse-Gas Emissions from Municipal

- Wastewater Treatment Plants. *Water Environment Research*, 77(4), 390–403.
<https://doi.org/10.2175/106143005x51978>
- NASA. (2023). *La Evidencia del Cambio Climático*. <https://ciencia.nasa.gov/cambio-climatico/evidencia/>
- National Geographic. (2023, February 28). *¿Qué son los gases de efecto invernadero y cuáles son sus efectos?* National Geographic.
<https://www.nationalgeographic.es/medio-ambiente/gases-efecto-invernadero-que-son-hacen>
- Newbold, P., Carlson; William L., & Thorne; Betty M. (2013). *Estadística para negocios y economía* (Pearson, Ed.; 8 ed.). Global Edition.
- NYU Stern. (2023). 2. *Z-Scores and the Empirical Rule*.
<https://pages.stern.nyu.edu/~churvich/MBA/Handouts/02-Z-Scores.pdf>
- OCDE. (2020). *Declaración del CAD de la OCDE sobre un nuevo enfoque para adaptar la cooperación para el desarrollo a los objetivos del Acuerdo de París sobre el cambio climático*. <https://legalinstruments.oecd.org>.
- OECD. (2008). *Handbook on Constructing Composite Indicators: Methodology and User Guide*. www.oecd.org/publishing/corrigenda.
- Oficina Española del Cambio Climático OECC. (2024). *Introducción cálculo de elementos de alcance 3*.
https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/cambio-climatico/temas/mitigacion-politicas-y-medidas/introduccioncalculoelementosalcance3_tcm30-486210.pdf
- Omamode, H. O., Ndubuisi, L. N., Nsiong, L. E.-U., Valentine, I. I., & Preye, W. B. (2024). Sustainability in project management: A comprehensive review. *World Journal of Advanced Research and Reviews*, 21(1), 656–677.
<https://doi.org/10.30574/wjarr.2024.21.1.0060>

- ONU. (2007, June 1). *La promesa de la energía solar: Estrategia energética para reducir las emisiones de carbono en el siglo XXI*.
<https://www.un.org/es/chronicle/article/la-promesa-de-la-energia-solar-estrategia-energetica-para-reducir-las-emisiones-de-carbono-en-el>
- Oracle EPM Planning. (2024). *IQR (Rango intercuartílico)*.
https://docs.oracle.com/cloud/help/es/pbcs_common/PFUSU/insights_metrics_IQR.htm#PFUSU-GUID-CF37CAEA-730B-4346-801E-64612719FF6B
- ORI ALNITAK. (2025). *Medición gei calderas biomasa: hacia la sostenibilidad*.
https://orialnitak.es/medicion-reducciones-gases-gei-calderas-de-biomasa/#medicion_directa_de_emisiones
- Pachauri, R. K., Meyer, L., Allen, M. R., Barros, V. R., Broome, J., Cramer, W., Jiang, K., Jiménez Cisneros México, B., Kattsov, V., Lee, H., Minx, J., Mulugetta, Y., Brinkman, S., van Kesteren, L., Leprince-Ringuet, N., & van Boxmeer, F. (2015). *Cambio Climático 2014: Informe de Síntesis*. <http://www.ipcc.ch>.
- Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático [IPCC]. (2007). *Cambio Climático 2007: Impacto, Adaptación y Vulnerabilidad*. [Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático].
<https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2020/02/ar4-wg2-sum-vol-sp.pdf>
- Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático [IPCC]. (2013). *Cambio climático 2013: Bases físicas. Resumen para responsables de políticas, resumen técnico y preguntas frecuentes*.
- Planton, S., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S. K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., & Midgley, P. M. (2014). *Glosario del quinto informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*.

- Presidencia de la República de Colombia. (2025, August 8). *Inflación anual sigue bajando, y cerró en julio de 2025 en 4,9%, menor al 6,8% del año pasado.*
- DANE. <https://www.presidencia.gov.co/prensa/Paginas/Inflacion-anual-sigue-bajando-y-cerro-en-julio-de-2025-en-49-porciento-menor-al-68-del-ano-pasado-250808.aspx>
- Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. (2023). *El Diccionario Climático: Una guía práctica para el cambio climático.*
- https://www.undp.org/sites/g/files/zskgke326/files/2023-10/undp-the-climate-dictionary-es_0.pdf
- Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo - PNUD. (2024). *Climate Promise: ¿Qué es la mitigación del cambio climático y por qué es urgente?*
- <https://unfccc.int/es/acerca-de-las-ndc/el-acuerdo-de-paris>
- Progresar ESP. (2023). *Reporte de Huella de Carbono Corporativa de Planeta S.A.S E.S.P.*
- Promethean. (2024, July 24). *How to use an impact effort matrix for prioritization - Promethean.* https://www.prometheanworld.com/resource-center/blogs/how-to-use-an-impact-effort-matrix-to-prioritize-your-workload/?utm_source=chatgpt.com
- Ranganathan, J., Moorcroft, D., Koch, J., & Bhatia, P. (2020). *Iniciativa del Protocolo de Gases Efecto Invernadero: Estándar Corporativo de Contabilidad y Reporte.*
- Ren, Z. J., & Pagilla, K. (2022). *Pathways to Water Sector Decarbonization, Carbon Capture and Utilization.* IWA Publishing. <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>
- Romero Pereira, M. C., Salazar Henao, J. S., & Hoess, T. (2020). *Methodologies for estimating carbon footprint in higher education institutions: Exploring models for implementation at Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.*

<https://repositorio.escuelaing.edu.co/bitstream/handle/001/1898/Metodolog%C3%ADAs%20para%20la%20estimaci%C3%B3n.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Sampieri Hernández, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, P. (2014).

Metodología de la Investigación (McGraw-Hill, Ed.; 6ta ed.). McGraw-Hill.

SBTi ©. (2025). *What are Science-Based Targets?*

<https://sciencebasedtargets.org/how-it-works>

Solano Quesada, S., & Ortiz Malavassi, E. (2016). *Methodology for the quantification of the carbon footprint of buildings in Costa Rica and its application on the residential module Trópika*. <http://dx.doi.org/tm.v29i3.2889>

Steffens, G. (2020). El análisis PESTEL: Asegure la continuidad de su negocio. In Titivillus (Ed.), *Epublibre* (ePub 2, Vol. 1). Epublibre.

Sun, Y., Zuo, Y., Shao, Y., Wang, L., Jiang, L. M., Hu, J., Zhou, C., Lu, X., Huang, S., & Zhou, Z. (2024). Carbon footprint analysis of wastewater treatment processes coupled with sludge in situ reduction. *Water Research X*, 24.

<https://doi.org/10.1016/j.wroa.2024.100243>

SurveyMonkey Enterprise. (2024, April 5). *Usa la suma de las top two box en el análisis de encuestas*. <https://es.surveymonkey.com/mp/top-2-box-scores/>

Tipiani, O., & Arce, E. (2025). Development of Z-score-based models to predict perinatal mortality in pregnancies complicated by fetal growth restriction managed at a tertiary care hospital. *European Journal of Obstetrics and Gynecology and Reproductive Biology*, 313.

<https://doi.org/10.1016/j.ejogrb.2025.114612>

Torres-Malca, J. R., Vera-Ponce, V. J., Zuzunaga-Montoya, F. E., Talavera, J. E., & De La Cruz-Vargas, J. A. (2022). Content Validity by Expert Judgment of An Instrument to Measure Knowledge, Attitudes and Practices Regarding Salt

- Consumption in The Population of Peru. *Revista de La Facultad de Medicina Humana* , 22(2), 367–373. <https://doi.org/10.25176/RFMH.v22i2.4768>
- UNEP;, & CCAC. (2025). *Accelerating the Global Shift to a Cleaner On-Road Diesel Fleet: An Update of the Global Strategy to Introduce Low Sulfur Fuels and Cleaner Diesel Vehicles*. www.unep.org/transport
- United Nations Environment Programme [UNEP]. (2023). *Emissions Gap Report 2023: Broken Record – Temperatures hit new highs, yet world fails to cut emissions (again)* (14^a edición). United Nations Environment Programme. <https://doi.org/10.59117/20.500.11822/43922>
- United Nations Framework Convention on Climate Change. (2015). *Paris Agreement Spanish*.
- Universidad Veracruzana. (2012). *Historia de los Enfoques Cuantitativo, Cualitativo y Mixto: Raíces y Momentos Decisivos Introducción*. https://www.uv.mx/personal/vcarreon/files/2012/02/Historia_enfoques.pdf
- UPME. (2025). *Estándares de eficiencia energética y etiqueta para vehículos de carga en Colombia*. https://docs.upme.gov.co/Documents/Coop_internacional/Etiqueta_vehiculos_carga_2025/3/Anexo_3A_Rev_Lit_EE.pdf
- Wang, Y., Gao, W., Lv, L., Ma, X., Ren, Z., Sun, L., Liu, X., Wang, P., Sun, Z., Tian, Y., & Zhang, G. (2024). Comprehensive carbon footprint analysis of wastewater treatment: A case study of modified cyclic activated sludge technology for low carbon source urban wastewater treatment. *Science of the Total Environment*, 923. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.171550>
- Wang, Zhang, N., Xu, S., Shao, Z., Jiang, C., Yuan, H., Wang, C., Zheng, X., Chi, Y., Zhang, W., Wang, D., & Zhuang, X. (2023). Carbon footprint analysis and comprehensive evaluation of municipal wastewater treatment plants under

- different typical upgrading and reconstruction modes. *Science of the Total Environment*, 880. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163335>
- WayCarbon. (2022, April 20). *Curva MAC: ¿Qué es y cómo puede ayudar en la estrategia de reducción de emisiones?* © WayCarbon.
<https://waycarbon.com/es/blog/que-es-curva-mac/>
- World Resources Institute. (2004). *The Greenhouse Gas Protocol: A corporate accounting and reporting standard*.
- World Resources Institute. (2011, October 3). *WRI/WBCSD Greenhouse Gas Protocol (GHGP)*. <http://www.ghgprotocol.org>
- World Resources Institute. (2015). *GHG Protocol Scope 2 Guidance: An amendment to the GHG Protocol Corporate Standard*. <https://ghgprotocol.org/scope-2-guidance>
- WRI, & WBCSD. (2005). *The GHG Protocol for Project Accounting*. World Business Council for Sustainable Development ; World Resources Institute.
- Wu, Z., Duan, H., Li, K., & Ye, L. (2022). A comprehensive carbon footprint analysis of different wastewater treatment plant configurations. *Environmental Research*, 214. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.113818>
- Xu, J., Li, Y., Wang, H., Wu, J., Wang, X., & Li, F. (2017). Exploring the feasibility of energy self-sufficient wastewater treatment plants: A case study in eastern China. *Energy Procedia*, 142, 3055–3061.
<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.12.444>
- Xu, X., & Eng, B. (2011). *The Carbon Footprint Analysis of Wastewater Treatment Plants and Nitrous Oxide Emissions from Full-Scale Biological Nitrogen Removal Processes in Spain*.

- Yilmaz, A., & Kara, M. (2024). Approximations to the Moments of Order Statistics for Normal Distribution. *Pakistan Journal of Statistics and Operation Research*, 20(2), 301–309. <https://doi.org/10.18187/pjsor.v20i2.4411>
- Zhang, J., Schmidt, K., & Li, H. (2016). An integrated diagnostic framework to manage organization sustainable growth: An empirical case. *Sustainability (Switzerland)*, 8(4). <https://doi.org/10.3390/su8040301>
- Zhou, H., Yang, Y., Chen, Y., & Zhu, J. (2018). Data envelopment analysis application in sustainability: The origins, development and future directions. In *European Journal of Operational Research* (Vol. 264, Issue 1, pp. 1–16). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.06.023>
- (CONAGUA), C. N. (2016). Lineamientos para la valorización de biosólidos en plantas de tratamiento.
- Bioflicx. (2023). ¿Qué son los créditos de carbono y cómo funcionan? Obtenido de <https://bioflicx.co/soluciones-basadas-en-la-naturaleza/>
- Bohórquez, C. V. (2020). Análisis de la generación de GEI en la cuenca del río Bogotá (Colombia) y un panorama comparativo entre las cuencas de las capitales de México y Perú. *Revista Mutis*, 12(2), 45–62. Obtenido de <https://portal.amelica.org/ameli/journal/193/1932270003/html/>
- Carbón Neutral Plus. (2023). *Reforestación y captura de CO₂: claves para mitigar el cambio climático*. Obtenido de Carbón Neutral Plus: <chrome-extension://efaidnbnmnnibpcajpcgclclefindmkaj/https://www.carbonneutralplus.com/wp-content/uploads/2024/12/Caso-exito-evento-Telecom-1.pdf>
- Chai, C. Z. (2015). Carbon footprint analyses of mainstream wastewater treatment technologies under different sludge treatment scenarios in China. *Water*, 918–938. Obtenido de <https://doi.org/10.3390/w7030918>

ClimateTrade. (2023). ¿Qué es la compensación de emisiones?

EOS Data Analytics. (2023). *Mercados de carbono: tipos, funcionamiento y beneficios*.

Obtenido de EOS Data Analytics: <https://eos.com/es/blog/calculo-del-carbono-organico-en-los-suelos-ucranianos/>

Fayez, H. e. (2011). Aplicación de sistemas electroquímicos en tratamiento de aguas. *Water Research*. Obtenido de

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0043135411000182?via%3Dihub>

García, P. (2021). Tecnologías inteligentes de control y monitoreo para PTAR. *Ingeniería y Ciencia*, 101-115.

Grillenwater, M. (2008). Precursors and indirect emissions. En S. B. Eggleston (Ed.), 2006

IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories (pág. 16). IPCC. Obtenido de

<https://www.ipcc->

[nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/2_Volume2/V2_1_Ch1_Introduction.pdf](https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/2_Volume2/V2_1_Ch1_Introduction.pdf)

IPCC. (2007). *Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero*. Ginebra: Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio

Climático. Obtenido de <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/spanish/>

López, F. (2020). Renovación tecnológica para reducir la huella de carbono en PTAR: sistemas de membranas y lecho móvil. *Revista Tecnología y Medio Ambiente*, 56-70.

Ministerio de Vivienda, C. y. (2021). *Anexo 4. Ficha técnica: Gestión del biogás*. Bogotá:

Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. Obtenido de chrome-

[extension://efaidnbmnnnibpcajpcgiclfindmkaj/https://www.minvivienda.gov.co/sites/default/files/documentos/anexo-4-ficha-tecnica-gestion-del-biogas.pdf](https://efaidnbmnnnibpcajpcgiclfindmkaj/https://www.minvivienda.gov.co/sites/default/files/documentos/anexo-4-ficha-tecnica-gestion-del-biogas.pdf)

Myhre, G. e. (2013). Sistemas de captura y aprovechamiento de biogás en tratamiento de aguas residuales. *Journal of Environmental Management*. Obtenido de

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301479713004374?via%3Dihub>

- Paredes, M. (2016). Valorización de residuos en plantas de tratamiento de aguas residuales: una alternativa hacia la economía circular. *Revista de Ingeniería Ambiental UNAM AIDIS*, 45–58.
- Paredes, M. G., Güereca, L. P., & Noyola, A. (2018). *Emisiones de GEI por el sector de tratamiento de aguas residuales en México*. Ciudad de México: Instituto de Ingeniería, UNAM. Obtenido de chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgiclfefindmkaj/https://www.ema.org.mx/descargas_porta/IV2/resenas/NormatividadAmbiental/3_Guadalupe_Paredes.pdf
- Pole, S. (2023). Metodología para emisión y verificación de créditos de carbono. <https://www.southpole.com/es/blog/que-son-los-creditos-de-carbono>.
- SEDAPAL, S. d. (2021). *Informe de diagnóstico de las PTAR*. Lima: SEDAPAL.
- Global Wind Energy Council. (2021). Wind energy's role on the road to net zero. Obtenido de <https://gwec.net/global-wind-report-2021/>
- PLANETA S.A.S. (2024). *Organigrama Empresarial de PLANETA SAS*. Mosquera.
- Banco Interamericano de desarrollo (BID). (2022). *Diagnóstico del tratamiento de aguas residuales en América Latina y el Caribe*. Obtenido de <https://www.iadb.org/es/>
- Banco Interamericano de Desarrollo BID. (2022). *Gestión de residuos sólidos en América Latina y el Caribe: Diagnóstico y recomendaciones*. Obtenido de <https://publications.iadb.org/es/situacion-de-la-gestion-de-residuos-solidos-en-america-latina-y-el-caribe>
- Cámara de Comercio de Bogotá. (2021). *Informe sobre la gestión de residuos en Bogotá. Recuperado* . Obtenido de <https://bibliotecadigital.ccb.org.co/items/eb325b0e-2662-4d52-8492-4c5548daefb3>
- Environmental Protection Agency EPA. (2021). *Composting: A Guide for Food Waste Reduction*. Obtenido de <https://www.epa.gov/sustainable-management-food/composting>

- Environmental Protection Agency EPA. (2021). *Wastewater Technology Fact Sheet*. . Obtenido de <https://www.epa.gov/>
- Inter American Development Bank. (December de 1998). *Integrated Water Resources Management in Latin America and the Caribbean*. Recuperado el 2024, de <https://publications.iadb.org/en/integrated-water-resources-management-latin-america-and-caribbean>
- MADS. (2021). *Estrategia nacional de economia circular*. Obtenido de https://www.andi.com.co/Uploads/Estrategia%20Nacional%20de%20EconA%CC%83%C2%B3mia%20Circular-2019%20Final.pdf_637176135049017259.pdf
- MarketsandMarkets. (2021). *Water and Wastewater Treatment Market by Technology*. Obtenido de www.marketsandmarkets.com
- Metcalf & Eddy, Inc. (1991). *Wastewater Engineering: Treatment, Disposal, and Reuse*. En I. Metcalf & Eddy. New York: McGraw-Hill.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible MADS. (2022). *Política Nacional de Gestión Integral de Residuos*. Obtenido de https://archivo.minambiente.gov.co/images/AsuntosambientalesySectorialyUrbana/pdf/Polit%C3%ACcas_de_la_Direcci%C3%B3n/Pol%C3%ADtica_para_la_gesti%C3%B3n_integral_de__1.pdf
- Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD). (2020). *Water Governance in the Time of COVID-19: Lessons from the Pandemic*. Obtenido de <https://www.oecd.org/>
- Organization for Economic Co-operation and Development OECD. (2019). *Waste Management and the Circular Economy in Selected OECD Countries*. Obtenido de https://www.oecd.org/en/publications/waste-management-and-the-circular-economy-in-selected-oecd-countries_9789264309395-en.html
- World Bank Group. (2022). *The Role of Waste Management in Sustainable Development*. . Obtenido de <https://www.worldbank.org/en/home>

13. Anexos

Tabla 31

Documentos complementarios de la investigación

Anexo	Título	Descripción	Hipervínculo
1	Proyecto de Autogeneración Fotovoltaica en la PTAR	Documento técnico que presenta la propuesta de autogeneración eléctrica mediante energía solar fotovoltaica.	Ver documento
2	Diagnóstico PESTEL	Documento de análisis del entorno [Político, Económico, Social, Tecnológico, Ambiental y Legal – PESTEL] de la organización, que se complementa con el análisis cualitativo de evaluación de señales y escenarios.	Ver documento
3	Propuesta de Plantilla de Seguimiento Mensual a la Estrategia	Formato diseñado como ejemplo para monitorear de manera periódica los avances y resultados de la estrategia.	Ver documento
4	Rúbrica de Validación V Aiken del Instrumento de Diagnóstico Organizacional	Matriz de validación aplicada para evaluar el instrumento de diagnóstico organizacional mediante el índice V de Aiken, de conformidad con las puntuaciones asignadas por los jueces expertos.	Ver documento
5	Rúbrica de Validación V Aiken de la Estrategia 5 de Reducción de Emisiones	Matriz de validación utilizada para evaluar la estrategia escalonada de reducción de emisiones mediante el índice V de Aiken, de acuerdo con las valoraciones emitidas por expertos externos y directivos de la compañía.	Ver documento
6	Matriz de Riesgos del Portafolio	Matriz que identifica y valora potenciales riesgos técnicos, financieros, operativos y regulatorios asociados al portafolio de proyectos de autogeneración fotovoltaica y recambio escalonado de la flota.	Ver documento
7	Supuestos Financieros y Co-Beneficios Considerados	Documento que presenta los supuestos financieros y co-beneficios considerados en el proyecto fotovoltaico.	Ver documento
8	Bitácora de Factores de Emisión y Esquema de Calidad de Datos	Documento que consolida los factores de emisión y el esquema de calidad de datos (DQI) empleados por Dcycle.	Ver documento

Fuente: Elaboración propia a partir de los documentos técnicos, matrices de validación y formatos diseñados como complementos de la presente investigación.