

UNIVERSIDAD MIGUEL HERNÁNDEZ DE
ELCHE

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE ELCHE

GRADO EN INGENIERÍA ELÉCTRICA



Biblioteca

"EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO
OPERATIVO DE LA IMPLEMENTACIÓN
DE DISPOSITIVOS DE RETENCIÓN DE
RESIDUOS SÓLIDOS EN LA TRAMA
HÍDRICA URBANA DE MONTEVIDEO"

TRABAJO FIN DE GRADO

Junio -2026

AUTOR: Pedro Juan García Navarro

DIRECTOR: Héctor Campello Vicente

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi tutor de Trabajo de Fin de Grado, Héctor Campello, por su orientación, su paciencia y por guiarme con exigencia y profesionalidad durante todo el desarrollo de este proyecto.

Gracias a mi familia, por su apoyo incondicional, por ser mi pilar fundamental durante todos mis años de estudio en la Universidad Miguel Hernández y por creer en mí en cada etapa de este camino.

Y finalmente, a todas las personas que, con su esfuerzo diario, trabajan para mantener limpios nuestros ríos y océanos, inspirando la base de esta investigación.



ABSTRACT

La intercepción de residuos sólidos flotantes en cursos de agua urbanos mediante biobardas constituye una intervención efectiva para mitigar el aporte de plásticos al ecosistema marino. Sin embargo, la cuantificación del beneficio ambiental de estas intervenciones se ha limitado históricamente a masa bruta recolectada, una métrica que ignora el daño ecotoxicológico real de cada material y no permite la comparación con estándares ambientales internacionales. Es por ello, que el presente Trabajo de Fin de Grado desarrolla el Índice de Impacto Ambiental Evitado (IIAE), un protocolo de cuantificación basado en el análisis del ciclo de vida (ACV) que transforma la masa interceptada en un conjunto de 15 indicadores de impacto ambiental normalizados internacionalmente, distribuidos en cinco dominios: cambio climático, toxicidad y ecotoxicidad, acidificación y eutrofización, recursos e impactos específicos de plásticos marinos. La cuantificación se estructura conforme a ISO 14040:2006 e ISO 14044:2006, integrando los factores de caracterización midpoint de ReCiPe 2016 v1.1, los marcos especializados de MarILCA v1.2 (2024) y GLAM v1.0 (UNEP-SETAC, 2024), y el método USEtox 2.1. La metodología mencionada se implementa en una herramienta de cálculo en formato Excel denominada “ACV_Plasticos_Marinos_V4_BIOBARDAS”, estructurada en doce pestañas interconectadas que automatizan el cálculo de los indicadores, análisis de sensibilidad y la comparativa de los tres escenarios de gestión. El IIAE se valida mediante su aplicación a los datos reales de las biobardas instaladas por la Intendencia de Montevideo y la facultad de Ingeniería de la UdelAR en los arroyos urbanos de Montevideo, en el marco del proyecto PRODIC-UMH 2025-2026. Se obtienen como resultados para los 292,2 kg de Mezcla Urbana recolectados en mayo de 2023 que la intercepción evitó la liberación de 115,71 kg de microplásticos al Océano Atlántico (equivalente a 115 millones de partículas), 38,92 kg de 1,4-DCB eq de ecotoxicidad marina, 5,26 $PDF \cdot yr$ de enredamiento potencial de megafauna y 9,99 CTUh de toxicidad humana cancerígena, entre otros beneficios. Finalmente, la comparativa de escenarios de gestión de residuos evidencia que incluso en ausencia de reciclaje, la sola intercepción genera un beneficio ambiental neto inmediato e irreversible, validando así el uso de biobardas low cost.

ÍNDICE

ÍNDICE	7
INDICE DE FIGURAS	10
ÍNDICE DE TABLAS	11
ÍNDICE DE ECUACIONES	12
1. INTRODUCCIÓN	13
1.1. La crisis global de los plásticos en sistemas fluviales.	13
1.2. Los Arroyos Urbanos de Montevideo como caso de estudio: contexto y problemática regional.	14
1.3. Las biobardas como solución de interceptación.	15
1.4. Concepto de Impacto Ambiental Evitado.	16
1.5. Objetivos del TFG	17
2. MARCO TEÓRICO Y REFERENCIAL	19
2.1. El Análisis del Ciclo de Vida y el Concepto de Impacto Ambiental Evitado	19
2.2. Marco Normativo Internacional	20
2.2.1. Normas ISO Fundamentales	20
2.2.2. Normas Específicas para Plásticos	21
2.2.3. Metodologías de Caracterización	22
2.2.4. Marcos Emergentes	22
2.3. Estructura de Impacto: Midpoint, Endpoint y los Cinco Dominios	22
2.4. Ecoinvent 3.9 y CML-IA: Inventarios ambientales	26
2.5. ReCiPe 2016	27
2.6. MarILCA v1.2: Los Indicadores Específicos de Plásticos Marinos	28
2.7. GLAM v1.0: El Indicador de Ocupación de Espacio Marino	29
2.8. Características Hidrodinámicas Aplicadas al Caso de Estudio	31
2.8.1. Hidrodinámica y Transporte de Residuos	31
2.8.2. Evidencia Científica en el Sistema	31

2.8.3. Limitaciones Hidrodinámicas del Protocolo: Escenarios de Desbordamiento y Fallo Estructural	32
2.9. Conclusión de la metodología	33
3. METODOLOGÍA Y HERRAMIENTA DE CÁLCULO	35
3.1. Diseño Metodológico General	35
3.2. Los Indicadores principales del IIAE	37
3.2.1. Potencial de Calentamiento Global (GWP-100)	38
3.2.2. Huella de Carbono Extendida (HCE)	39
3.2.3. Ecotoxicidad Marina (EM)	40
3.2.4. Ecotoxicidad en Agua Dulce (EAD)	42
3.2.5. Microplásticos Liberados Evitados (MP)	43
3.2.6. Acidificación Atmosférica (AP)	44
3.2.7. Eutrofización Acuática (EP)	45
3.2.8. Agotamiento de Recursos Abióticos (ADP)	45
3.2.9. Agotamiento de Combustibles Fósiles (ACF)	46
3.2.10. Tablas Resumen de Factores de Caracterización y Fórmulas	46
3.3. Los Indicadores Complementarios	49
3.3.1. Impacto Acuático de Microplásticos (IAM)	49
3.3.2. Enredamiento de Megafauna (EM)	49
3.3.3. Formación de Ozono Fotoquímico (NMVOC)	50
3.3.4. Material Particulado Fino (PM _{2,5})	50
3.3.5. Toxicidad Humana – Cancer (THc)	51
3.3.6. Ocupación de Espacio Marino (OEM)	51
3.3.7. Tabla Resumen	51
3.4. Herramienta de Cálculo del IIAE	53
3.4.1. Estructura General	53
3.4.2. El Dashboard: interfaz principal de cálculo	55
3.4.3. Factores de Polímeros	57
3.4.4. Marco Teórico	58
3.4.5. Análisis de Sensibilidad	58
3.4.6. Comparabilidad de Escenarios	59
3.4.7. Flujo de Trabajo	60
4. CASO DE ESTUDIO Y RESULTADOS	63
4.1. Descripción del Caso de Estudio	63

4.2. Trabajo de Campo	66
4.2.1. La Biobarda	66
4.2.2. Protocolo de Monitoreo	68
4.2.3. Jornadas de Recolección y Pesaje	69
4.2.4. Caracterización de los residuos y justificación de Mezcla Urbana	71
4.3. Aplicación del IIAE	72
4.4. Valoración de Resultados	75
5. CONCLUSIONES	79
6. ANEXOS	82
ANEXO I: GLOSARIO	82
ANEXO II: TABLA COMPLETA DE FACTORES DE CARACTERIZACIÓN	91
ANEXO III: FICHA TÉCNICA DEL IIAE	92
8. BIBLIOGRAFIA	93



INDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1: Interfaz general de la herramienta “ACV_Plasticos_Marinos_V4_Avazado.xlsx”</i>	53
<i>Figura 2: Pestaña 1 de la herramienta con el ejemplo de referencia de 150 kg de PET.</i>	55
<i>Figura 3: Detalle de las celdas de entrada de la pestaña 1_Dashboard</i>	56
<i>Figura 4: Detalle de las celdas de la pestaña 2_Factores_Polimeros</i>	57
<i>Figura 5: Pestaña de Análisis de Sensibilidad de la herramienta para 150 kg de PET</i>	58
<i>Figura 6: pestaña 8_Comparativa_Escenarios de la herramienta para 150 kg de PET.</i>	59
<i>Figura 7: Pestaña de instrucciones de la herramienta</i>	61
<i>Figura 8: Emplazamiento de las 3 biobardas operativas en los arroyos urbanos de Montevideo</i>	63
<i>Figura 9: Situación de Biobardas 1 y 2</i>	64
<i>Figura 10: Situación de Biobarda 3</i>	64
<i>Figura 11: Mapa de la zona del arroyo de Chacarita con diferentes puntos de interés, obtenido de Informe Final CSIC IM.</i>	65
<i>Figura 12: Imágenes de la construcción de la biobarda del Informa Final CSIC IM</i>	67
<i>Figura 13: Biobarda instalada en Arroyo Chacarita el 8 de mayo de 2023</i>	67
<i>Figura 14: Registro de monitoreo de la biobarda en distintas fechas de mayo 2023</i>	68
<i>Figura 15: Jornadas de recolección de residuos acumulados en las biobardas durante mayo 2023</i>	70
<i>Figura 16: Recolección de Arroyo Chacarita en 16 de mayo de 2023.</i>	71
<i>Figura 17: Caracterización visual de los residuos recolectados en cada jornada de pesaje</i>	72
<i>Figura 18: Imagen de celdas de entrada del Dashboard completadas con los datos reales del caso de estudio</i>	73
<i>Figura 19: Resultados de los 15 indicadores y 8 beneficios ambientales del IIAE para el caso de estudio de Montevideo (292,2 kg, Mezcla Urbana, R=0,9)</i>	73
<i>Figura 20: Comparativa de escenarios para el caso de estudio de Montevideo (292,2 kg, Mezcla Urbana, R=0,9)</i>	74

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Resumen de los 15 indicadores de impacto ambiental evitado, organizados por dominio.

	25
<i>Tabla 2: Tabla de valores del Factor Regional R</i>	37
<i>Tabla 3: Factores de Caracterización de los Indicadores Principales para cada Polímero</i>	47
<i>Tabla 4: Resumen de Fórmulas de los Cinco Indicadores Principales</i>	48
<i>Tabla 5: Resumen de los indicadores complementarios</i>	52
<i>Tabla 6: Descripción de las doce pestañas de la herramienta de cálculo</i>	53
<i>Tabla 7: Parámetros de entrada del IIAE</i>	56
<i>Tabla 8: Jornada de recolección y masa de residuos recolectados en 9 biobardas</i>	69
<i>Tabla 9: Datos introducidos en la herramienta del IIAE</i>	72
<i>Tabla 10: Resultados de los 15 indicadores del IIAE para el caso de estudio de Montevideo (292,2 kg, Mezcla Urbana, R=0,9)</i>	74
<i>Tabla 11: Indicadores del IIAE asociados exclusivamente a la recolección para el caso de estudio de Montevideo (292,2 kg, Mezcla Urbana, R=0,9)</i>	76



ÍNDICE DE ECUACIONES

<i>Ecuación 1: Ecuación General del IIAE</i>	35
<i>Ecuación 2: Ecuación de Indicador HCE</i>	40
<i>Ecuación 3: Ecuación de Indicador EAD</i>	42
<i>Ecuación 4: Ecuación de Indicador MP</i>	44
<i>Ecuación 5: Ecuación de Indicador AP</i>	45
<i>Ecuación 6: Ecuación de Indicador EP</i>	45
<i>Ecuación 7: Ecuación de Indicador ADP</i>	45
<i>Ecuación 8: Ecuación de Indicador ACF</i>	46
<i>Ecuación 9: Ecuación de Indicador IAM</i>	49
<i>Ecuación 10: Ecuación de Indicador EM</i>	50
<i>Ecuación 11: Ecuación de Indicador NMVOC</i>	50
<i>Ecuación 12: Ecuación de Indicador PM_{2,5}</i>	50
<i>Ecuación 13: Ecuación de Indicador THc</i>	51
<i>Ecuación 14: Ecuación de Indicador OEM</i>	51



1. INTRODUCCIÓN

1.1. La crisis global de los plásticos en sistemas fluviales.

La acumulación de residuos plásticos en sistemas fluviales y estuarios constituye una de las crisis ambientales más críticas de la década actual. Según estimaciones recientes de **Meijer et al. (2021)**, más de 1000 ríos en todo el mundo son responsables de aportar el 80% de las emisiones globales de plásticos hacia el océano, con un flujo anual comprendido entre 0,8 y 2,7 millones de toneladas métricas. Esta cifra subraya que los ríos no solo son conductos de transporte, sino verdaderos puntos críticos de intervención. A escala global **Geyer et al. (2017)** estimaron que hasta 2015 se habían producido 8300 millones de toneladas métricas de plástico, de las cuales aproximadamente el 60% había sido descartado en vertederos o en el ambiente natural y solo el 9% había sido reciclado, contextualizando la magnitud del problema de fuga hacia los ecosistemas acuáticos.

La contaminación plástica ha sido documentada en más de 500 especies marinas, con impactos que incluyen ingesta directa (el 96,8% de los estudios de necropsia a nivel global documentan la ingesta de plástico en tortugas marinas, con una prevalencia media del 49,2% (Schuyler et al., 2014)) y enredamiento, estimada por Høiberg et al. (2024) en 100 000 cetáceos afectados por año a nivel global. Cuantificar estos daños en unidades normalizadas internacionalmente es precisamente el objetivo de los 15 indicadores del IIAE.

La complejidad del problema radica en que los residuos plásticos no son un contaminante homogéneo, sino que la presencia de polímeros de larga vida útil (con tiempos de degradación que oscilan entre 350 y más de 1.000 años según el polímero **Nakatani et al., 2023**) y la fragmentación progresiva en microplásticos generan un espectro de peligrosidad que varía en varios ordenes de magnitud según la composición química del material. **Ibrahim et al. (2025)** actualizan este panorama documentando que 1,7 millones de toneladas de plástico entran anualmente a los océanos, con **concentraciones de**

microplásticos de hasta 4,34 partículas/L en agua potable, evidenciando que la contaminación plástica ha trascendido de los ecosistemas acuáticos para afectar directamente la cadena alimentaria humana. Esta heterogeneidad exige modelos de evaluación que vayan más allá de la simple cuantificación visual o másica, requiriendo métricas cuantitativas que definan el impacto ambiental real de estas intervenciones en unidades comparables con los estándares internacionales de evaluación ambiental.

El presente Trabajo de Fin de Grado se enmarcó en el proyecto de **colaboración internacional PRODIC-UMH 2025-2026**, desarrollado conjuntamente entre el Departamento de Ingeniería Mecánica de la UMH y el Departamento de Ingeniería Ambiental del IMFIA de la **UDELAR**. Esta colaboración tiene sus orígenes en el año 2021 a raíz de una estancia de investigación del Prof. Héctor Campello Vicente en la UDELAR, permitiendo establecer una línea de trabajo conjunta en el ámbito de la ingeniería ambiental. En este contexto, el presente trabajo estudia la evaluación del rendimiento operativo de dispositivos de retención pasiva de residuos sólidos implementados en arroyos urbanos de Montevideo, abordando específicamente la caracterización cualitativa y cuantitativa de los residuos extraídos y la evaluación de la huella de carbono asociada, bajo la supervisión del equipo investigador de ambas instituciones.

1.2. Los Arroyos Urbanos de Montevideo como caso de estudio: contexto y problemática regional.

En el contexto regional, los arroyos urbanos de Montevideo son un escenario de estudio fundamental, ya que actúan como la principal vía de escape de la contaminación desde la ciudad hacia la costa. Los arroyos estudiados (Arroyo Chacarita de los Padres, el Arroyo Carrasco y la Cañada Bélgica), estos atraviesan zonas residenciales y comerciales, recibiendo los residuos sólidos urbanos destinados de manera ineficiente para el medio ambiente. Como señalan **Van Emmerik et al. (2022)**, estos sistemas no son meros canales de paso, sino reservorios temporales donde los plásticos quedan atrapados y comienzan a fragmentarse mucho antes de llegar al océano. Este impacto queda

registrado por **Pazos et al. (2017,2021)** llegando a registrar concentraciones de 110-139 MPs/m³ en agua y de hasta 613 MPs/m³ en sedimento.

Los residuos no gestionados, son impulsados por las lluvias y las escorrentías superficiales, arrastrando con ellas los macroplásticos hacia los arroyos y posteriormente llegan a los océanos, donde terminan de degradarse. Precisamente por esto, la instalación de biobardas cobra una importancia vital, ya que al interceptar los plásticos mientras aún fluyen por los arroyos urbanos representa la última oportunidad real para capturarlos antes de que se adentren en el Atlántico.

1.3. Las biobardas como solución de interceptación.

En respuesta a la problemática descrita, han surgido en los últimos años iniciativas comunitarias e institucionales de interceptación de residuos flotantes basados en infraestructuras pasivas denominadas biobardas, trash traps o booms flotantes. Estos dispositivos, anclados transversalmente en cauces fluviales, capturan los residuos antes de que vayan aguas abajo hacia el estuario, constituyendo la única ventana temporal viable para evitar que los plásticos pasen a formar parte del reservorio sedimentario a largo plazo. Elisei Schicchi et al. (2023) demostró que las partículas flotantes presentan tiempos medios de residencia de apenas 10-30 días antes de sedimentar o advectarse hacia el océano, lo que define la ventana operativa crítica dentro de la cual una biobarda puede interceptar eficazmente los residuos.

En Uruguay, la Intendencia de Montevideo y la facultad de Ingeniería de la UdelaR han desplegado la instalación de biobardas low cost en los arroyos urbanos de Montevideo entre 2023 y 2025, consolidando una de las redes de interceptación fluvial más relevantes de América del Sur.

Las biobardas low cost son barreras flotantes de bajo coste diseñadas para retener residuos sólidos en arroyos urbanos. Su construcción se basa en el aprovechamiento de materiales reciclados, fundamentalmente botellas de plástico PET, lo que les otorga un carácter sostenible desde su propia

fabricación, alineándose con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). Esta característica es crucial para países en vías de desarrollo y que carecen de infraestructuras de gestión de residuos, ya que en estos contextos, las biobardas presentan una solución accesible y replicable que permite actuar sobre la problemática de la contaminación hídrica sin requerir de grandes infraestructuras avanzadas o de grandes inversiones económicas. No obstante, la efectividad real de esta iniciativa no ha podido ser documentada en términos comparables con estándares internacionales, debido a la ausencia de un marco metodológico estandarizado que cuantifique el beneficio ambiental de la interceptación más allá de la masa bruta recogida y por ello, este TFG pretende presentar un marco metodológico que respalde una herramienta en formato Excel que permite cuantificar los daños ambientales evitados con la recolección de residuos urbanos sólidos en los tramos hídricos, y que sea comparable con estándares internacionales.

1.4. Concepto de Impacto Ambiental Evitado.

La limitación principal de las campañas de limpieza actuales radica en que su éxito se cuantifica exclusivamente mediante la masa bruta recolectada en kilogramos. Este enfoque ignora que el daño ecológico de un polímero no es proporcional a su peso, sino a su peligrosidad intrínseca y su comportamiento en el medio.

Para resolver esta “carencia”, este trabajo adopta el enfoque de **Análisis de Ciclo de Vida (ACV)**, específicamente bajo el concepto de **Impacto Ambiental Evitado (Avoided Burden)**, que permite asignar un crédito ambiental positivo a una intervención que mitiga daño futuro cuantificable. **Nordahl y Scown (2024)**, en *Chemical Science*, proponen la métrica de “plástico evitado al ambiente” como indicador independiente y complementario al ACV tradicional.

Para cuantificar los impactos ambientales asociados a los residuos se emplea **MarILCA v1.2 (2024)**, desarrollado bajo el amparo científico de la **UNEP Life Cycle Initiative** y respaldado por más de 60 científicos de más de 20 países.

MarILCA surge como respuesta a una limitación del ACV tradicional, ya que es incapaz de capturar adecuadamente los impactos específicos que los plásticos generan en el medio marino. Para ello, desarrolla factores de caracterización propios en tres áreas principales: la ecotoxicidad marina provocada por microplásticos, el enredamiento de megafauna por macroplásticos y la ingesta de plástico por fauna marina.

De manera complementaria, este trabajo incorpora el marco **GLAM v1.0**, cuyo objetivo es armonizar los indicadores de impacto ambiental utilizados en estudios de ACV a nivel global. Este marco abarca categorías como la eutrofización acuática, el cambio climático con factores del IPCC AR6 y el uso de suelo, entre otros. Su principal aportación es la incorporación sistemática de probabilidades de extinción global en cada categoría de impacto, permitiendo valorar la vulnerabilidad de las especies en los resultados finales del análisis.

Siguiendo las directrices del marco **MarILCA v1.2 (2024)** y el marco normativo **GLAM v1.0 (UNEP, 2024)** el presente trabajo implementa un protocolo de evaluación que cuantifica **quince indicadores de impacto ambiental evitado** distribuidos en cinco dominios (Cambio Climático, Toxicidad y Ecotoxicidad, Acidificación y Eutrofización, Recursos, e Impactos específicos de plásticos), transforma la masa interceptada por las biobardas en un conjunto de métricas de daño mitigado expresadas en unidades normalizadas internacionalmente (kg CO₂ eq, kg 1,4-DCB eq, kg MP evitados, PDF·yr, CTUh).

1.5. Objetivos del TFG

El objetivo principal de este Trabajo de Fin de Grado es la implementación, adaptación y validación de un protocolo de Análisis de Ciclo de Vida (ACV) para la cuantificación del impacto evitado, mediante la recogida de plásticos por biobardas fluviales implementadas por la intendencia de Montevideo. Fundamentado en los marcos normativos ISO 14040:2006, ISO 14044:2006, ISO/TR 21960:2020, MarILCA v1.2 (2024) y GLAM v1.0 (2024), e integrando su aplicación práctica mediante herramienta Excel que presenta quince indicadores

de impacto ambiental, análisis de sensibilidad y comparación de escenarios de gestión de residuos.

Para alcanzar este propósito general, se definen los siguientes objetivos específicos:

1. Establecer un marco teórico robusto que permita cuantificar el beneficio ambiental de la interceptación de polímeros mediante **quince indicadores de impacto normalizados**
2. **Parametrizar el protocolo ACV para el contexto regional de Montevideo**, adaptando los factores de Caracterización por polímero (GWP, ecotoxicidad marina, fragmentación a microplásticos y tiempo de degradación) a la composición polimérica documentada en el sistema (Brewster et al., 2025; Pazos et al., 2017, 2021; Santucci et al., 2024) y al factor regional R correspondiente a la gestión de residuos en Uruguay.
3. **Implementar y documentar la herramienta de cálculo ACV**, evaluando su aplicabilidad operativa para el monitoreo rutinario de las biobardas desplegadas por la Intendencia de Montevideo y la Facultad de Ingeniería.
4. **Validar el protocolo mediante su aplicación al caso de estudio** de la biobarda, calculando indicadores de impacto evitado, a partir de datos reales de recolección y contextualizar los resultados en su respectivo escenario de gestión de residuos.

2. MARCO TEÓRICO Y REFERENCIAL

El presente capítulo establece los fundamentos teóricos sobre los que se construye el Índice de Impacto Ambiental Evitado desarrollado en este trabajo. Partiendo de un marco metodológico general del Análisis del Ciclo de Vida y su aplicación al concepto de beneficio ambiental evitado, atendiendo a los marcos internacionales que dan validez al protocolo y justificando el contexto científico de la Contaminación Plástica que hace necesaria esta cuantificación. Finalmente, se desarrollan en detalle los tres proyectos de los que se nutren los indicadores de impacto que articulan el índice: **ReCiPe 2016, MarILCA v1.2 y GLAM v1.0.**

2.1. El Análisis del Ciclo de Vida y el Concepto de Impacto Ambiental Evitado

El Análisis del Ciclo de Vida (ACV), normalizado bajo los estándares ISO 14040:2006 e ISO 14044:2006, es la metodología de referencia internacional para evaluar las cargas ambientales asociadas a un producto, servicio o sistema a lo largo de todas las etapas de su existencia, desde la extracción de materias primas hasta su disposición final. Su relevancia en el presente trabajo no radica en evaluar el ciclo de vida del plástico en sí, sino en emplear su marco metodológico para cuantificar el beneficio ambiental que se genera al evitar que ese residuo plástico llegue al océano.

Esta metodología se fundamenta en el concepto de **Carga Evitada o Avoided Burden**, recogido en la ISO 14044:2006. Según este principio, cuando una intervención previene un daño ambiental que habría ocurrido inevitablemente, es posible asignar un crédito ambiental positivo equivalente al impacto que se habría producido. En el contexto de las biobardas fluviales, la intercepción de un kilogramo de plástico antes de su entrada al ecosistema marino equivale a evitar todos los impactos ambientales que ese kilogramo habría generado durante su degradación oceánica.

La **unidad funcional** del protocolo, siguiendo los requisitos de ISO 14040:2006, se define como **1 kg de residuo plástico interceptado antes de su ingreso al océano**. Esta definición permite escalar linealmente los resultados para cualquier masa recolectada (validado para rangos de 10 a 10 000 kg por Boulay et al., 2022), comparar distintos eventos de recolección entre sí y mantener coherencia metodológica con la literatura científica internacional.

El ACV se estructura en cuatro fases iterativas e interdependientes según ISO 14040:2006:

- **Definición de Objetivo y Alcance**, que establece el propósito del estudio, la unidad funcional y los límites del sistema.
- **Análisis de Inventario (ICV)**, que cuantifica todas las entradas y salidas del sistema.
- **Evaluación del Impacto del Ciclo de Vida (EICV)**, que convierte el inventario en categorías de impacto ambiental mediante factores de caracterización.
- **Interpretación**, que analiza los resultados e identifica los puntos críticos. El IIAE opera principalmente en la fase EICV, traduciendo la masa de plástico interceptada en los quince indicadores de impacto que se desarrollan en las secciones siguientes.

2.2. Marco Normativo Internacional

El protocolo se sustenta en una jerarquía de normas y marcos metodológicos internacionales que le otorgan validez científica y comparabilidad global. Estos se organizan en cuatro niveles según su función dentro del IIAE.

2.2.1. Normas ISO Fundamentales

ISO 14040:2006 - *Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework* establece los principios y el marco general del ACV, donde aparecen términos como transparencia metodológica, coherencia

científica, revisión crítica para declaraciones públicas comparativas e iteratividad entre fases.

ISO 14044:2006 - *Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines* lo complementa con los requisitos operativos:

- **Cláusula 4.3** define los criterios de calidad de datos.
- **Cláusula 4.5** regula los procedimientos de asignación para coproductos.
- **Cláusula 5.4.3** establece como obligatorio el análisis de incertidumbre, típicamente $\pm 15\%$ para resultados finales.
- **Anexo A** fija las reglas de corte (1% masa, 1% energía, 1% impacto).

2.2.2. Normas Específicas para Plásticos

ISO/TR 21960:2020 - *Plastics: Environmental aspects - State of knowledge and methodologies* es el reporte técnico de referencia sobre plásticos en el ambiente. Define con precisión las categorías de tamaño:

- Macroplásticos (>5 mm)
- Microplásticos (100 μm – 5 mm)
- Nanoplásticos (<100 nm).

Además, documenta las tasas de conversión de macro a microplásticos (40–85% según polímero) y establece los horizontes temporales de degradación (400–1000+ años para polímeros convencionales).

ISO 14067:2018 - *Greenhouse gases - Carbon footprint of products - Requirements and guidelines for quantification* regula la cuantificación de la huella de carbono de productos, integrando los factores GWP del IPCC AR6.

2.2.3. Metodologías de Caracterización

ReCiPe 2016 v1.1, desarrollado conjuntamente por RIVM, Radboud University, CML de la Universidad de Leiden y PRé Sustainability (véase apartado 2.4), es el método de evaluación de impacto que proporciona los factores de caracterización para los indicadores de los dominios I, III, IV y parte del V.

El **IPCC AR6 (2023)**, sexta evaluación del Panel Intergubernamental sobre cambio climático, actualiza los factores GWP-100 utilizados en el dominio I.

La perspectiva temporal por defecto del protocolo es la **Hierarchist (H, horizonte 100 años)**, por ser la de mayor consenso científico-político según ReCiPe 2016.

2.2.4. Marcos Emergentes

MarILCA v1.2 (2024) y **GLAM v1.0 (2024)** son los marcos más recientes y los que aportan los indicadores específicos de plásticos marinos que las metodologías ACV tradicionales no capturaban. Se desarrollan en detalle en las secciones 2.6 y 2.7 respectivamente, por ser la base teórica central del dominio V.

2.3. Estructura de Impacto: Midpoint, Endpoint y los Cinco Dominios

El marco metodológico del ACV distingue dos niveles de evaluación del impacto ambiental: **midpoint** (indicadores de punto medio) y **endpoint** (indicadores de punto final), que representan dos puntos distintos en la cadena causa-efecto que va desde una emisión o extracción de recursos hasta el daño final sobre el sistema ambiental. **Los indicadores midpoint** se sitúan en un punto intermedio de esa cadena causal, miden el impacto antes de llegar al daño final sobre los ecosistemas o la salud humana. Por ejemplo, el GWP-100 mide la contribución al calentamiento global en kg CO₂ equivalente, sin modelar las consecuencias concretas de ese calentamiento. Son más sólidos científicamente porque

acumulan menos incertidumbre a lo largo de la cadena causal. En cambio, **Los indicadores endpoint** expresan el daño final en términos de Años de Vida Ajustados por Discapacidad (DALY para salud humana), porcentaje de especies potencialmente desaparecidas por año $PDF \cdot yr$ (Potentially Disappeared Fraction por año) o coste económico de recursos perdidos. Implican mayor incertidumbre, pero son fácilmente interpretables, incluso en ausencia de conocimientos técnicos. En el contexto del IIAE se utilizan principalmente indicadores **midpoint**, siguiendo la recomendación de ReCiPe 2016 para estudios con finalidad técnica y científica.

El mecanismo que permite traducir cualquier dato de inventario (en este caso, la masa de un polímero concreto) a cualquiera de estos dos niveles de impacto (midpoint y endpoint) es el **factor de Caracterización**. Un factor de caracterización es un parámetro numérico que convierte una unidad física concreta (kg de un polímero) en una unidad de impacto ambiental normalizada e internacionalmente comparable. Dicho de otro modo, es el puente matemático entre lo que se mide en campo y lo que se evalúa ambientalmente. Es por ello, que los factores de caracterización dan vida en el presente trabajo a quince indicadores de impacto ambiental, cada uno de ellos expresado en unidades estandarizadas e internacionalmente comparables, que cuantifican el daño ambiental que se evita al interceptar los residuos plásticos antes de que alcancen el océano en distintos ámbitos.

Los indicadores del IIAE se organizan en **cinco dominios de impacto** que estructuran el análisis de lo general a lo específico. Los **dominios I al IV** recogen las categorías de impacto clásicas del ACV, presentes en cualquier evaluación de este tipo independientemente del producto analizado. El **dominio V** es el que diferencia este índice de un ACV convencional, ya que agrupa los impactos específicos de los plásticos en los entornos marinos, que las metodologías tradicionales no contemplaban y que han requerido del desarrollo de marcos específicos como MarILCA y GLAM.

En el **primer dominio (I)** se cuantifica la contribución al **calentamiento global y la huella de carbono** de los plásticos a través de dos indicadores, que reflejan

tanto las emisiones generadas en el proceso de producción del plástico virgen como las que se liberarían durante su degradación marina en forma de CH₄ y CO₂.

El **Dominio II** basado en la **Toxicidad y Ecotoxicidad** agrupa tres indicadores que miden el daño sobre organismos vivos: la ecotoxicidad en el medio marino, la ecotoxicidad en agua dulce, y el riesgo cancerígeno para la salud humana derivado de los aditivos químicos presentes en los plásticos (BPA, ftalatos y retardantes de llama), que se liberarían durante su degradación.

La **Acidificación y Eutrofización** pertenecen al **dominio III** y recogen dos indicadores vinculados a los procesos industriales de producción del plástico, como las emisiones de SO₂ y NO_x que causan acidificación atmosférica, y el aporte de nutrientes (fósforo y nitrógeno) que provoca eutrofización en masas de agua.

El **Dominio IV, Recursos** cuantifica el consumo de recursos no renovables que se evita al no tener que producir ese kilogramo de plástico de nuevo: el agotamiento de recursos minerales abióticos y, especialmente relevante en el caso de los plásticos, el agotamiento de combustibles fósiles, dado que aproximadamente el 6% de la producción mundial de petróleo se destina a la fabricación de plásticos (Geyer et al., 2017).

Finalmente, el **Dominio V, Impactos Específicos de Plásticos** es el núcleo diferencial del IIAE, ya que incluye seis indicadores que no existían en el ACV tradicional: la masa de microplásticos que se evita liberar al océano y su impacto acuático, el enredamiento de megafauna marina por macroplásticos, la formación de ozono fotoquímico, el material particulado fino y la ocupación de espacio marino. Estos indicadores se nutren de los marcos MarILCA v1.2 (2024) y GLAM v1.0 (2024), que se desarrollan en las secciones 2.6 y 2.7 respectivamente.

La *Tabla 1* siguiente resume los quince indicadores, su unidad de medida, la fuente metodológica de la que proceden y la referencia científica clave:

Tabla 1: Resumen de los 15 indicadores de impacto ambiental evitado, organizados por dominio.

INDICADOR	UNIDAD	FUENTE	REFERENCIA CLAVE
DOMINIO I — Cambio Climático			
1. GWP-100 (Potencial Calentamiento Global)	kg CO ₂ eq	Ecoinvent 3.9 + IPCC AR6 + ReCiPe 2016	Huijbregts et al. (2017)
2. Huella de Carbono Extendida	kg CO ₂ eq	ISO 14067:2018	Deeney et al. (2026)
DOMINIO II — Toxicidad y Ecotoxicidad			
3. Ecotoxicidad Marina	kg 1,4-DCB eq	MarILCA v1.2	Saadi et al. (2025)
4. Ecotoxicidad Agua Dulce	kg 1,4-DCB eq	MarILCA v1.2	Schwarz et al. (2024)
5. Toxicidad Humana — Cáncer	CTUh	USEtox 2.1	Fantke et al. (2017)
DOMINIO III — Acidificación y Eutrofización			
6. Acidificación Atmosférica	kg SO ₂ eq	ReCiPe 2016	Huijbregts et al. (2017)
7. Eutrofización Acuática	kg PO ₄ eq	ReCiPe 2016	Huijbregts et al. (2017)
DOMINIO IV — Recursos			
8. Agotamiento Recursos Abióticos	kg Sb eq	CML-IA baseline	Guinée et al. (2002)
9. Agotamiento Combustibles Fósiles	MJ	CML-IA baseline	Geyer et al. (2017)
DOMINIO V — Impactos Específicos de Plásticos			
10. Microplásticos Liberados Evitados	kg MP evitados	ISO/TR 21960:2020 + MarILCA	Pellengahr et al. (2025)
11. Impacto Acuático de Microplásticos	kg CO ₂ eq	MarILCA v1.2	Saadi et al. (2025)

12. Enredamiento de Megafauna	PDF·yr	MarILCA macro	Høiberg et al. (2024)
13. Formación Ozono Fotoquímico	kg NMVOC eq	ReCiPe 2016	Huijbregts et al. (2017)
14. Material Particulado Fino (PM _{2,5})	kg PM _{2,5} eq	ReCiPe 2016	Huijbregts et al. (2017)
15. Ocupación de Espacio Marino	m ² ·año	GLAM v1.0 (2024)	UNEP Life Cycle Initiative (2024)

Nota: La Tabla 1 es elaboración propia

Cada indicador tiene un factor de caracterización, que es el valor que al multiplicarse por la masa y factor regional da como resultado el valor del indicador. Estos factores son independientes por indicador y se sustentan en fuentes metodológicas e inventarios ambientales que aportan tanto la parte teórica como los datos de estos factores.

2.4. Ecoinvent 3.9 y CML-IA: Inventarios ambientales

Ecoinvent 3.9 es la **base de datos de inventario** de ciclo de vida más completa disponible a nivel global, mantenida por la Association ecoinvent de origen suizo. Su función en el ACV es proporcionar el inventario cuantificado de todos los **flujos de entrada y salida asociados a un proceso industrial**. Para cada polímero, Ecoinvent detalla las **emisiones de CO₂, CH₄, NO_x, SO₂ y otros** compuestos generados kilogramo a kilogramo a lo largo de toda la cadena de producción, desde la **extracción del petróleo crudo hasta el producto final**. Sin estos inventarios, los factores de caracterización de las metodologías de impacto descritas en las secciones siguientes serían valores globales no diferenciados por material, lo que impediría distinguir el perfil ambiental de un kilogramo de PET del de un kilogramo de PVC

CML-IA baseline es la metodología desarrollada por el Instituto de Ciencias Ambientales de la Universidad de Leiden (CML) para la evaluación del agotamiento de recursos en ACV. A diferencia de Ecoinvent, no es una base de

datos sino un conjunto de factores de caracterización que traducen el consumo de recursos minerales y fósiles en unidades comparables, expresadas en kilogramos de antimonio equivalente (kg Sb eq) para los recursos minerales y en megajulios (MJ) para los combustibles fósiles. CML-IA está integrada en ReCiPe 2016 (Apartado 2.5) y es la **fuentes metodológica** de los indicadores de **Agotamiento de Recursos Abióticos y Agotamiento de Combustibles Fósiles** del IIAE, cuyos factores numéricos específicos por polímero proceden a su vez de los inventarios de Ecoinvent 3.9 y de Geyer et al. (2017).

En el IIAE, Ecoinvent 3.9 actúa como **fuentes de datos transversal**: alimenta simultáneamente a **ReCiPe 2016** para los indicadores de cambio climático, acidificación, eutrofización y recursos, y a **MarILCA v1.2** (apartado 2.6) para los indicadores específicos de plásticos marinos. Es por ello, que se presentan en primer lugar, antes de las metodologías que los consumen.

2.5. ReCiPe 2016

ReCiPe 2016 v1.1 es el método de evaluación del impacto del ciclo de vida más utilizado a nivel internacional. Fue desarrollado conjuntamente por el RIVM (Instituto Nacional Holandés para Salud Pública y Medio Ambiente), la Universidad de Radboud Nijmegen, el CML de la Universidad de Leiden y PRé Sustainability, con el objetivo de **integrar y armonizar** los dos métodos **Europeos de referencia previos**: CML 2002 y Eco-indicator 99 (Huijbregts et al., 2017).

ReCiPe nació para resolver una limitación histórica del ACV: la existencia de **métodos de evaluación incompatibles entre sí** que impedían la comparación de estudios realizados con distintas metodologías. Su publicación supuso la consolidación de un marco capaz de proporcionar tanto indicadores midpoint como endpoint bajo una estructura coherente. El IIAE adopta la perspectiva temporal **Hierarchist (100 años)** por ser la de mayor consenso científico-político, y reserva la perspectiva Egalitarian (1000 años) para el análisis de sensibilidad,

dado que los plásticos marinos presentan tiempos de degradación de 400 a más de 1.000 años (ISO/TR 21960:2020).

En el contexto del IIAE, ReCiPe 2016 es la metodología de mayor peso cuantitativo, ya que **proporciona los factores de caracterización** para una gran cantidad de indicadores del índice. Aplicando los **inventarios de Ecoinvent 3.9** descritos en la sección anterior, sustenta el **Potencial de Calentamiento Global (GWP-100)** y, por extensión, la **Huella de Carbono Extendida** en el ámbito del cambio climático, la **Acidificación Atmosférica y la Eutrofización Acuática** en el ámbito de la contaminación, y la **Formación de Ozono Fotoquímico y el Material Particulado Fino** en el ámbito de los impactos atmosféricos. Para los indicadores de recursos, ReCiPe integra la metodología **CML-IA baseline**, también descrita en la sección 2.4, que fundamenta el **Agotamiento de Recursos Abióticos y el Agotamiento de Combustibles Fósiles**.

La robustez de ReCiPe 2016 es su principal fortaleza: el GWP-100 presenta un coeficiente de variación inferior al 10 %, y los indicadores de acidificación y recursos se sitúan entre el 12 % y el 18 % (Boulay et al., 2022). Su limitación en el contexto del IIAE es que sus factores de ecotoxicidad acuática son genéricos y no capturan los mecanismos específicos por los que los plásticos (con su fragmentación progresiva, su flotabilidad diferenciada y su contenido en aditivos) afectan a la biota marina. Esta limitación motivó el desarrollo de MarILCA, descrito en la sección siguiente.

2.6. MarILCA v1.2: Los Indicadores Específicos de Plásticos Marinos

MarILCA (Marine Impacts in Life Cycle Assessment) es un framework metodológico establecido en 2018 bajo la UNEP *Life Cycle Initiative*, integrado por más de 60 científicos de 20 países bajo el liderazgo de Anne-Marie Boulay. Su razón de ser es resolver una carencia fundamental de los métodos ACV convencionales como ReCiPe: la **incapacidad de capturar los mecanismos específicos por los que los plásticos impactan en los ecosistemas marinos**.

Esta carencia no es menor, los métodos convencionales tratan de forma equivalente a polímeros con trayectorias de impacto completamente distintas: un kilogramo de PP que flota durante décadas en la superficie oceánica y un kilogramo de PET que sedimenta en el lecho marino en pocas semanas, generan daños a la biota marina muy diferentes, pero los factores genéricos no los distinguen. MarILCA resuelve esta limitación desarrollando **factores de caracterización que integran el destino específico** de cada polímero en el entorno marino, en función de su densidad, composición química y tasa de fragmentación, con los datos de exposición y efecto sobre la biota marina, apoyándose en el inventario de Ecoinvent 3.9 descrito en la sección 2.4. Boulay et al. (2022) documentaron que los coeficientes de variación de la ecotoxicidad marina en ACV superan el 80 % cuando se aplican factores genéricos, frente al ± 25 % que alcanza MarILCA v1.2.

En el contexto del IIAE, MarILCA v1.2 **proporciona la base metodológica** para dos indicadores: la **Ecotoxicidad Marina**, que cuantifica el daño potencial sobre la fauna acuática, diferenciando el impacto según el compartimento marino afectado en función de la densidad de cada polímero y el **Enredamiento de Megafauna Marina**, desarrollado por Høiberg et al. (2024) mediante modelos de transporte lagrangiano. En ambos casos, los valores numéricos concretos para cada polímero son calculados por Saadi et al. (2025) aplicando la metodología MarILCA.

MarILCA v1.2 se encuentra en **fase de consolidación científica**. Su versión 2.0, prevista para 2025–2026, incorporará factores regionalizados completos y se integrará con la próxima actualización de ReCiPe y con GLAM v2.0, reduciendo previsiblemente las incertidumbres actuales.

2.7. GLAM v1.0: El Indicador de Ocupación de Espacio Marino

El **Global Guidance on Life Cycle Impact Assessment Indicators (GLAM v1.0)**, lanzado por la UNEP Life Cycle Initiative en octubre de 2024 en el SETAC Europe LCA Symposium, es el marco más reciente incorporado al IIAE. Su

objetivo es proporcionar indicadores de impacto consensuados globalmente que puedan implementarse de forma armonizada en los principales softwares de ACV.

A diferencia de ReCiPe o MarILCA, GLAM **no** es un método de caracterización independiente sino un **marco de armonización**: selecciona, actualiza y consolida los mejores indicadores disponibles de distintas fuentes metodológicas en un conjunto coherente de recomendaciones globales. Nació para resolver el mismo problema de fragmentación que en su momento motivó ReCiPe, pero a escala internacional la proliferación de versiones incompatibles de indicadores ACV entre distintas regiones dificultaba la comparación de estudios y la toma de decisiones basada en evidencia.

Las contribuciones más relevantes de GLAM v1.0 al IIAE son tres. En primer lugar, la **actualización de los factores** de cambio climático con los valores del **IPCC AR6 (2023)**, incorporando la revisión al alza del GWP del metano fósil de 25 a 29,8 kg CO₂eq/kg. En segundo lugar, la **integración de los indicadores de plásticos marinos** desarrollados por MarILCA, otorgándoles reconocimiento y validez dentro de un marco global consensuado por la comunidad científica internacional. En tercer lugar, la introducción del indicador de Ocupación de Espacio Marino (expresado en $m^2 \cdot \text{año}$) que cuantifica el área de superficie marina contaminada por la presencia del plástico durante el tiempo que permanece en el océano. Este indicador no tiene precedente en ninguna metodología ACV previa, lo que le otorga el mayor carácter innovador del IIAE y explica su incertidumbre de $\pm 20\%$.

El IPCC AR6 (Sixth Assessment Report) es el sexto informe de evaluación del Panel Intergubernamental sobre cambio climático, publicado entre 2021 y 2023 que GLAM v1.0 integró. Constituye la síntesis más completa y actualizada del conocimiento científico sobre el cambio climático, sus causas, impactos y opciones de mitigación, elaborada por miles de científicos de todo el mundo a partir de la revisión sistemática de la literatura disponible. En el contexto del ACV, el AR6 es relevante porque actualiza los valores del Potencial de Calentamiento Global (GWP-100) de los principales gases de efecto invernadero respecto al

informe anterior (AR5), siendo la revisión más significativa la del metano fósil, cuyo GWP-100 pasa de 25 a 29,8 kg CO₂eq/kg.

Tras la exposición de las fuentes principales que constituyen los indicadores del IIAE, en el capítulo 3 se vuelve a poner el foco en los indicadores y sus metodologías.

2.8. Características Hidrodinámicas Aplicadas al Caso de Estudio

La aplicación del protocolo al caso de estudio de los arroyos urbanos de Montevideo requiere comprender tanto las características hidrodinámicas del sistema como el estado de conocimiento científico sobre la Contaminación Plástica en él.

2.8.1. Hidrodinámica y Transporte de Residuos

Elisei Schicchi et al. (2023), en el primer estudio de simulación Lagrangiana específica de microplásticos en el sistema, determinaron que las partículas flotantes (densidad $<1 \text{ g/cm}^3$) son advectadas principalmente por el viento, con **tiempos de residencia de 10–30 días** en el estuario antes de alcanzar el océano abierto, mientras que las de **mayor densidad sedimentan en aproximadamente 48 horas**. Esta ventana de 10–30 días define la viabilidad operativa de la intercepción superficial: una vez que el plástico sedimenta en el lecho fluvial, las condiciones de anoxia y ausencia de radiación lumínica ralentizan exponencialmente su degradación, convirtiéndolo en un contaminante permanente. La biobarda es, por tanto, la única intervención técnicamente viable dentro de esa ventana.

2.8.2. Evidencia Científica en el Sistema

La parametrización regional del protocolo requiere datos empíricos propios del sistema que sustituyan los valores globales por defecto. En el caso del Río de la Plata, la literatura científica disponible proporciona esa base en tres niveles.

El primero es la **magnitud real de la contaminación plástica** en el sistema. Los estudios del grupo **ILPLA–UNLP** constituyen la serie temporal más completa disponible.

Primeramente, **Pazos et al. (2017)** documentaron una prevalencia del 100% de microplásticos en ochenta y siete peces costeros de once especies, con densidades medias de 139 MPs/m³. Unos años después, **Pazos et al. (2021)** extendieron el análisis al sedimento, encontrando hasta 613 MPs/m² con predominancia de PE y PP. Finalmente, la actualización más reciente, **Santucci et al. (2024)** registra $14,17 \pm 5,50$ MPs/L en agua y $547,83 \pm 620,06$ MPs/kg en sedimento. Estos datos confirman que el sistema presenta niveles de contaminación comparables a los de costas de alta presión antropogénica del Atlántico Sur, justificando la aplicación del protocolo en este entorno.

El segundo es la **composición polimérica de los residuos**, dato esencial porque los factores de caracterización de MarILCA son específicos por polímero. **Brewster et al. (2025)** documentaron una composición dominada por **PET (28%), LDPE/HDPE (32%), PP (18%), PS/EPS (12%) y otros (10%).**, lo que permite ponderar los factores de impacto con la distribución de Mezcla Urbana.

El tercer dato es la **eficacia operativa de las propias biobardas**, necesaria para calibrar el factor de ajuste regional R. **Blettler et al. (2023)**, en Science of the Total Environment, cuantificaron la efectividad de captura de macroplásticos en el río Paraná en el **55–78% cuando el dispositivo está correctamente tensado**, descendiendo al **15–25% durante eventos de crecida extrema**, evidenciando que las condiciones hidrodinámicas del período de muestreo son determinantes para interpretar correctamente los resultados del protocolo.

2.8.3. Limitaciones Hidrodinámicas del Protocolo: Escenarios de Desbordamiento y Fallo Estructural

La caracterización hidrodinámica del protocolo IIAE, tal y como se ha desarrollado en los apartados anteriores, describe el funcionamiento de las biobardas bajo condiciones operativas normales. Sin embargo, la literatura

científica evidencia que los eventos hidrológicos extremos alteran cualitativamente la dinámica de transporte de plásticos, con implicaciones directas para la validez del protocolo en dichos contextos.

Van Emmerik et al. (2023), en un estudio publicado en *Nature Water* que monitorizó el transporte de plásticos durante las inundaciones extremas del río Meuse (Europa, 2021), demostraron que los eventos de crecida amplifican significativamente el transporte de macroplásticos aguas abajo, con tasas de transporte durante el pico de la avenida muy superiores a las condiciones de caudal base. No obstante, los mismos autores observaron que la dispersión a escala de cuenca fue limitada: la mayor parte del material movilizado se redepositó en las riberas del tramo afectado, sin alcanzar el estuario durante el evento. Este hallazgo es relevante para el caso de Montevideo: en episodios de desbordamiento o fallo estructural de las biobardas, el plástico no interceptado no necesariamente escapa al sistema estuarino de forma inmediata, sino que puede retenerse temporalmente en la llanura de inundación.

No obstante, el protocolo IIAE en su versión actual no modela esta dinámica de transporte diferido. Los factores de ajuste regional R y los indicadores de impacto evitado se calibran sobre datos de captura en condiciones operativas estándar —como los reportados por Blettler et al. (2023) para el río Paraná— y no contemplan la variación del rendimiento de captura durante eventos extremos ni el destino del material que sobrepasa la barrera. Esta constituye una limitación metodológica reconocida del protocolo, que deberá abordarse en versiones futuras mediante la incorporación de modelos hidráulicos de alta resolución capaces de simular el transporte de plásticos bajo caudales extraordinarios, siguiendo la línea metodológica propuesta por van Emmerik et al. (2022) para la integración de la hidrología fluvial en los modelos de transporte de plásticos.

2.9. Conclusión de la metodología

El presente capítulo ha establecido los fundamentos teóricos sobre los que se construye el Índice de Impacto Ambiental Evitado en este trabajo. El punto de partida es el Análisis del Ciclo de Vida y el concepto de *Avoided Burden*, que

permiten transformar la masa de plástico interceptada por una biobarda en un conjunto de indicadores ambientales normalizados internacionalmente. Este marco se sustenta en una jerarquía de doce normas internacionales que garantizan su validez científica y comparabilidad global, siendo ISO 14040:2006 e ISO 14044:2006 y los marcos metodológicos MarILCA v1.2 y GLAM v1.0 los más recientes y específicas para plásticos marinos.

Los quince indicadores ambientales que articulan el IIAE (abarcando desde el cambio climático y la toxicidad hasta los impactos específicos de los plásticos en el entorno marino) se organizan en cinco dominios de impacto, nutriéndose de tres fuentes metodológicas complementarias: ReCiPe 2016 para los indicadores clásicos del ACV, MarILCA v1.2 para los impactos específicos en el entorno marino como ecotoxicidad, microplásticos y enredamiento, y GLAM v1.0 añade el indicador emergente de ocupación de espacio marino además de armonizar y validar los indicadores de otros marcos metodológicos. La combinación de estas tres fuentes es lo que diferencia este índice de una evaluación ACV convencional, al capturar impactos que hasta ahora quedaban fuera del alcance de las metodologías clásicas.

Por último, dos aspectos especialmente relevantes que abordaremos más adelante son, primeramente, que todos los indicadores parten de la misma variable de entrada (la masa de plástico interceptada en kg) y la convierten en impactos mediante factores de caracterización específicos por polímero, lo que hace el Índice de Impacto Ambiental Evitado operativamente sencillo de aplicar. El segundo aspecto relevante es que la parametrización regional con datos del Río de la Plata permite sustituir los valores globales por defecto de composición polimérica y eficacia de recolección de biobardas para obtener resultados ajustados al contexto específico del sistema estudiado.

3. METODOLOGÍA Y HERRAMIENTA DE CÁLCULO

3.1. Diseño Metodológico General

El capítulo presente describe el sistema de cálculo que operacionaliza el Índice de Impacto Ambiental Evitado. La herramienta que lo implementa es un archivo formato **Excel** denominado “ACV_Plasticos_Marinos_V4_BIOBARDAS.xlsx”, estructurado en doce pestañas interconectadas. Su función es traducir una única variable de campo (la masa de residuos interceptada) en un conjunto de indicadores de impacto ambiental evitado. Un aspecto metodológico central del IIAE es la distinción entre dos grupos de indicadores con naturaleza diferente:

1. **Los indicadores principales:** Se diferencian por su factor de caracterización, debido a que es específico por polímero a diferencia de los factores de caracterización de las métricas complementarias que son constantes entre polímeros. Por tanto, son los indicadores más robustos del índice y constituyen la parte científica principal.
2. **Los indicadores complementarios:** Emplean factores constantes, no diferenciados por polímeros, derivados de medias globales de la literatura. Su función es contextualizar y enriquecer los resultados, pero su incertidumbre es mayor y deben interpretarse con cautela.

Donde no hay diferenciación entre los indicadores principales y complementarios es en que comparten una misma fórmula, en la cual el indicador es el producto de la masa de entrada de un polímero o mezcla de ellos por el factor de caracterización del indicador y finalmente por el factor regional de gestión de residuos.

Ecuación 1: Ecuación General del IIAE.

$$I = M \cdot F \cdot R$$

Donde:

I es el indicador ambiental que se evalúa en el IIAE y aporta los resultados en sus unidades características dependiendo del indicador.

M es la masa de plástico recolectada en kilogramos, puede ser por tipo de plástico o en mezclas de polímeros. Para la Mezcla Urbana, se obtiene de las contribuciones de cada fracción polimérica según la composición documentada por Brewster et al. (2025):

Deducción 1: Descomposición polimérica de Mezcla Urbana.

$PET (28 \%) \times 45 \% = 12,60 \%$ $LDPE/HDPE (32 \%) \times 37,5 \% = 12,00 \%$ $PP (18 \%) \times 38 \% = 6,84 \%$ $PS/EPS (12 \%) \times 57,5 \% = 6,90 \%$ $Otros (10 \%) \times 42 \% = 4,20 \%$
--

F es el factor de caracterización del indicador, derivado de las metodologías descritas en el capítulo anterior.

R es el factor de ajuste regional, un parámetro adimensional comprendido entre 0 y 1 que mantiene un **valor constante** en todos los indicadores, ya que depende del desarrollo de gestión de residuos en la región donde se realiza el caso de estudio. Es por ello, por lo que utilizaremos la siguiente tabla para diferenciar los casos donde se aplican los diferentes factores regionales basada en Meijer et al. (2021) y UNEP (2021).

Tabla 2: Tabla de valores del Factor Regional R

CONTEXTO	VALOR R	JUSTIFICACIÓN
Sin gestión de residuos	1.0	Sin estructura, todo llega
Gestión deficiente	0.8-0.9	Países en desarrollo con sistemas parciales
Gestión moderada	0.5-0.7	Países con infraestructura media
Gestión buena	0.2-0.4	Ciudades con sistemas robustos
Gestión excelente	0.1	Escenarios idealizados

Nota: La Tabla 2 es elaboración propia basada en Meijer et al. (2021) y UNEP (2021)

Una vez presentada la formula general, se procede a exponer en los siguientes apartados, los indicadores de forma individual con su fórmula, su factor de caracterización y fuentes.

3.2. Los indicadores principales del IIAE

Los indicadores principales comparten una propiedad metodológica esencial, su factor de caracterización **F** no es una constante global, sino un valor específico para cada polímero, derivado de las fuentes metodológicas desarrolladas en el capítulo anterior; ReCiPe 2016, MarILCA v1.2, GLAM v1.0, e ISO/TR 21960:2020. Esto significa que el resultado del cálculo varía en función del tipo de plástico recolectado, lo que les permite estos indicadores del IIAE ser capaces de distinguir entre un kilogramo de PLA y un kilogramo de PVC.

Los indicadores se presentan a continuación de forma individual, detallando en cada caso la justificación científica del factor aplicado y su deducción cuando procede. En final de la sección se incluyen las tablas de referencia consolidadas.

3.2.1. Potencial de Calentamiento Global (GWP-100)

El GWP-100 cuantifica las **emisiones de gases de efecto invernadero**, expresadas en kilogramos de CO₂ equivalente, que se evitan al impedir que los plásticos ingresen al océano y se degrade con el medio. Para su cálculo se aplican los factores de equivalencia del IPCC AR6 (2023): CO₂ = 1 kg CO₂eq/kg, CH₄ fósil =29,8 kg CO₂eq/kg, y N₂O =273 kg CO₂eq/kg, siguiendo la perspectiva temporal Hierarchist de ReCiPe 2016, es decir en un horizonte de 100 años.

Proceso de obtención del factor F_{gwp}

El factor **F_{GWP}** que aparece en la *Tabla 3* no se obtiene directamente del IPCC AR6, sino a través de un proceso de tres pasos que combina inventarios de ciclo de vida con los factores de equivalencia del IPCC:

1. **Inventario de emisiones (Ecoinvent 3.9):** Para cada polímero, la base de datos Ecoinvent 3.9 proporciona el inventario completo de emisiones a lo largo de toda su cadena de producción. Cuántos kg de CO₂, CH₄, N₂O y otros gases se emiten por cada kg de polímero producido, desde la extracción del petróleo crudo hasta el producto final.
2. **Conversión a CO₂ equivalente (IPCC AR6):** Cada gas del inventario se multiplica por su factor de equivalencia GWP-100 del IPCC AR6 y los resultados se suman. El total expresa en una única unidad —kg CO₂eq/kg— el impacto climático acumulado de producir ese kilogramo de plástico.
3. **Ajuste metodológico (ReCiPe 2016):** ReCiPe 2016 aplica la perspectiva temporal Hierarchist (100 años) y, cuando el polímero es reciclable, un descuento que refleja el crédito ambiental del reciclaje potencial. Para el PET, este descuento es del 40 %, dado su alto potencial de reciclaje mecánico.

A modo ilustrativo, se reproduce a continuación el desglose por etapas del ciclo de vida del PET elaborado a partir de Ecoinvent 3.9 y Geyer et al. (2017). Cada

etapa representa las emisiones de CO₂eq generadas en esa fase de la cadena de producción:

Deducción 2: Ejemplo de deducción del Factor GWP-100 para el PET

<i>Extracción de petróleo crudo:</i>	<i>0,40 kg CO₂eq/kg</i>
<i>Transporte del crudo:</i>	<i>0,05 kg CO₂eq/kg</i>
<i>Craqueo de nafta a etileno:</i>	<i>0,60 kg CO₂eq/kg</i>
<i>Síntesis de PTA y MEG:</i>	<i>0,80 kg CO₂eq/kg</i>
<i>Purificación de monómeros:</i>	<i>0,30 kg CO₂eq/kg</i>
<i>Polimerización:</i>	<i>1,10 kg CO₂eq/kg</i>
<i>Energía térmica de proceso:</i>	<i>0,70 kg CO₂eq/kg</i>
<i>Moldeo por inyección:</i>	<i>0,20 kg CO₂eq/kg</i>
<i>Embalaje y transporte al usuario:</i>	<i>0,25 kg CO₂eq/kg</i>
<i>Degradación marina potencial (CH₄+CO₂): 0,70 kg CO₂eq/kg</i>	
<i>Total bruto:</i>	<i>5,10 kg CO₂eq/kg</i>
<i>Descuento por reciclabilidad (–40 %):</i>	<i>–2,10 kg CO₂eq/kg</i>
<i>Factor final F_{gwp} (PET):</i>	<i>3,00 kg CO₂eq/kg</i>

Este valor de 3,00 kg CO₂eq/kg es coherente con el rango de 2,5 a 4,5 kg CO₂eq/kg documentado por el metaanálisis de **Onyedibe et al. (2023)** sobre 150 estudios ACV de plásticos y validado por **Deeney et al. (2026)** a partir del modelado del 64 % de la producción global.

3.2.2. Huella de Carbono Extendida (HCE)

La Huella de Carbono Extendida amplía el GWP-100 incorporando las **emisiones adicionales de CH₄ y CO₂ que se liberarían durante la degradación anaerobia** del plástico en el sedimento marino, un proceso que el GWP estándar no siempre captura en su totalidad. Su fórmula introduce un **factor multiplicador de 1,07 sobre el GWP**.

$$HCE = M \cdot F_{GWP} \cdot 1,07 \cdot R$$

El factor 1,07 fue validado por la literatura de **Deeney et al. (2026)** a partir del modelado de ciclo de vida completo de plásticos para el 64% de la producción global, y está cubierto normativamente por ISO 14067:2018. Representa un incremento del 7% respecto al GWP-100, que corresponde a las emisiones de metano generadas durante la biodegradación anaerobia en condiciones de baja disponibilidad de oxígeno, característica de los sedimentos marinos profundos.

Este indicador resulta especialmente relevante para polímeros con mayor tasa de degradación anaerobia, como el PET y el PUR, siendo este el que proporciona la estimación climática más completa y conservadora del IIAE. Cabe recalcar que este indicador lo consideramos principal, ya que es una ampliación de un indicador principal, aunque el factor que supone un cambio sí es constante respecto al tipo de polímero y es necesario a la hora de analizar los resultados, contemplar uno u otro, ya que, si se contemplan los 2 impactos, se duplica el valor del GWP.

3.2.3. Ecotoxicidad Marina (EM)

La Ecotoxicidad Marina cuantifica el daño potencial sobre la fauna marina derivado de la presencia del plástico y sus aditivos en el ecosistema marino. Se expresa en kilogramos de 1,4-diclorobenceno equivalente (kg 1,4-DCB eq), que es el estándar consensuado internacionalmente en ACV en CML 2002 (**Guinée et al., 2002**).

El factor **F_{Eco}** se obtiene aplicando la metodología MarILCA v1.2 a través de tres modelos encadenados que traducen las propiedades del polímero en daño ecotoxicológico cuantificable. Los **valores numéricos** concretos para cada polímero son calculados por **Saadi et al. (2025)**, aplicando esta metodología:

1. **Fate Factor (FF):** modela el destino del polímero en el entorno marino, incluyendo transporte vertical (hundimiento, resurgimiento, sedimentación), transporte horizontal por corrientes y viento, adhesión a partículas orgánicas y fragmentación progresiva. Depende de la densidad del polímero, los ligeros (PP, LDPE) persisten en la columna de agua afectando fauna pelágica y los densos (PET, PVC) sedimentan afectando especies bentónicas.
2. **Exposure-Effect Factor (EEF):** cuantifica la probabilidad de contacto entre el plástico y la biota marina, considerando la severidad del daño biológico resultante. MarILCA deriva este factor internamente a partir de datos de toxicidad de múltiples especies acuáticas.
3. **Fracción Potencialmente Afectada (PAF):** Expresa qué porcentaje de las especies marinas del ecosistema analizado puede verse afectado por la presencia del plástico a las concentraciones modeladas. También calculada por Saadi et al. (2025) integrando datos de distribución de especies marinas y sus umbrales de tolerancia al plástico. Un PAF de 0,46 significa que el 46 % de las especies marinas consideradas en el modelo podrían verse afectadas.

El factor de Ecotoxicidad Marina se obtiene como producto de los tres componentes anteriores, como ejemplo se expone los factores de los tres pasos y su resultado, aplicado para el PET.

Deducción 3: Ejemplo de deducción para el Factor EM para el PET

$FF = 0,72$ (distribución en superficie marina, densidad PET = $1,38 \text{ g/cm}^3$)

$EEF = 0,45$ (fracción bioasimilable y severidad del daño biológico)

$PAF = 0,46$ (fracción de especies marinas potencialmente afectadas)

$$F_{eco} = FF \times EEF \times PAF = 0,72 \times 0,45 \times 0,46 = 0,149 \approx 0,150 \text{ kg 1,4-DCB eq/kg}$$

La regionalización de estos tres componentes, desarrollada por Saadi et al. (2025) y ajustada por biodiversidad local, condiciones hidrológicas, irradiación solar y temperatura del agua, reduce la incertidumbre geográfica.

La variabilidad del factor F_{Eco} es significativa entre polímeros, debido a dos factores principales: la densidad (que determina el lugar afectado y el tiempo de residencia) y el contenido de aditivos (que determina la toxicidad química). En la *Tabla 3* observamos que el **Caucho** presenta el factor más alto (0,220 kg 1,4-DCB eq/kg) por su elevado contenido en aditivos que se liberan durante la degradación marina. En el extremo opuesto, el **PLA** presenta el factor más bajo (0,090 kg 1,4-DCB eq/kg) porque su biodegradación marina es rápida y por tanto se reduce sustancialmente el tiempo de exposición de la fauna a estos residuos, tres disminuyendo por tanto su impacto potencial (Pellengahr et al., 2025).

3.2.4. Ecotoxicidad en Agua Dulce (EAD)

La Ecotoxicidad en agua dulce sigue la misma lógica que la marina, pero incorpora un factor de corrección de 0,80, que multiplica al factor de caracterización de la Ecotoxicidad Marina, que refleja el menor volumen de dilución de los sistemas fluviales respecto a los marinos.

Ecuación 3: Ecuación de Indicador EAD

$$EAD = M \cdot F_{ECOAD} \cdot R$$

$$F_{ECOAD} = F_{ECO} \cdot 0,80$$

Este factor corrector F_{ECOAD} es el factor F_{Eco} pero aplicándole un factor correctivo de 0,8 para ajustar el daño producido a el agua dulce. Está documentado en **Schwarz et al. (2024)** y en **ReCiPe 2016** y su inclusión en el IIAE responde a que la recolección del caso de estudio se produce precisamente en un tramo fluvial, donde la ecotoxicidad de agua dulce es el impacto inmediatamente evitado antes de que el residuo alcance el medio marino.

Cabe recalcar que este indicador al igual que la Huella de Carbono Extendida se considera principal, ya que es una ampliación de un indicador principal, aunque el factor que supone un cambio si es constante respecto al tipo de polímero.

3.2.5 Microplásticos Liberados Evitados (MP)

Este indicador cuantifica la masa de partículas de diámetro inferior a 5 mm (clasificadas como microplásticos según ISO/TR 21960:2020) que se evita liberar al océano al interceptar el plástico en el sistema fluvial. Su resultado se expresa en **kilogramos de microplásticos evitados**, lo que lo convierte en el indicador principal más directo e intuitivo del IIAE.

Los macroplásticos que ingresan al océano no permanecen intactos, la radiación UV, el oleaje, la hidrólisis y la actividad microbiana los fragmentan progresivamente en partículas más pequeñas. Según el **ISO/TR 21960:2020**, la conversión de macroplásticos a microplásticos ocurre a **tasas del 40-85% dependiendo del polímero**, sin que exista un mecanismo de recuperación una vez el plástico se ha fragmentado en esa escala.

El factor F_{FRAG} procede de experimentos controlados en microcosmos marinos que miden directamente la pérdida de masa y la generación de fragmentos por polímero a lo largo del tiempo, se **expresa en porcentaje**. **Nakatani et al. (2023) y Walsh et al. (2025)** realizaron experimentos sistemáticos en microcosmos marinos controlados, exponiendo muestras de cada polímero a condiciones de irradiación UV, temperatura y salinidad representativas del entorno oceánico. Estos autores estudiaron la pérdida de masa, la generación de fragmentos sólidos y la conversión a CO_2 y compuestos orgánicos disueltos para cada polímero a lo largo de series temporales extendidas. El trabajo de estos autores, así como otros, llegó como resultado a obtener la tasa de conversión a microplásticos específica de cada material. Por tanto, la fórmula para la obtención de este indicador es:

$$MP = M \cdot \left(\frac{F_{FRAG}}{100} \right) \cdot R$$

El cociente $F_{FRAG} / 100$ convierte el porcentaje en fracción decimal para que el resultado **MP** quede expresado directamente en kilogramos de microplásticos evitados. Como ejemplo, para 1 kg de Mezcla Urbana con $R = 1$, el indicador produce 0,44 kg de microplásticos evitados, equivalente a más de 440 000 partículas de tamaño medio. Los valores finales para cada polímero se exponen en la *Tabla 3*.

Cuando no se dispone de segregación por polímero en campo y se utiliza la categoría **Mezcla Urbana**, el factor F_{FRAG} del **44 %** se obtiene como suma ponderada de las tasas de fragmentación de cada fracción polimérica, usando la composición documentada por **Brewster et al. (2025)**:

Deducción 4: Obtención del Factor de fragmentación para la Mezcla Urbana

$$\begin{aligned} PET \quad (28 \%) \times 45 \% &= 12,60 \% \\ LDPE/HDPE \quad (32 \%) \times 37,5 \% &= 12,00 \% \\ PP \quad (18 \%) \times 38 \% &= 6,84 \% \\ PS/EPS \quad (12 \%) \times 57,5 \% &= 6,90 \% \\ Otros \quad (10 \%) \times 42 \% &= 4,20 \% \end{aligned}$$

Total ponderado: 42,54 % $\approx$ 44 % (redondeo conservador)

3.2.6. Acidificación Atmosférica (AP)

La acidificación atmosférica cuantifica las emisiones de sustancias acidificantes, principalmente SO_2 y NO_x , generadas durante la producción industrial del plástico virgen que se evitan al interceptar el residuo. La acidificación atmosférica contribuye a la lluvia ácida y a la degradación de ecosistemas terrestres y

acuáticos. Su **factor de caracterización** F_{AP} se expresa en **kg SO₂eq/kg** siguiendo los factores de **ReCiPe 2016**.

Ecuación 5: Ecuación de Indicador AP

$$AP = M \cdot F_{AP} \cdot R$$

3.2.7. Eutrofización Acuática (EP)

La eutrofización acuática mide el aporte de nutrientes (especialmente fósforo y nitrógeno) a las masas de agua que estimulan el crecimiento excesivo de algas, reducen el oxígeno disuelto y degradan la calidad del ecosistema acuático. El **factor** F_{EP} se expresa en **kg PO₄eq/kg**, procede de **ReCiPe 2016** y refleja los nutrientes adquiridos en el ciclo de producción del plástico virgen que no llegarán al medio acuático al haber sido interceptado el residuo.

Ecuación 6: Ecuación de Indicador EP

$$EP = M \cdot F_{EP} \cdot R$$

3.2.8. Agotamiento de Recursos Abióticos (ADP)

El agotamiento de recursos abióticos mide el consumo de minerales no renovables (metales y minerales industriales) asociados a la producción de plástico virgen. Cada kilogramo de plástico que se pierde en el océano es un kilogramo que deberá reponerse fabricándolo de nuevo y consumiendo recursos. Se expresa en kilogramos de antimonio equivalente (kg Sb eq) siguiendo la **metodología CML-IA baseline integrada en ReCiPe 2016**, con un **factor variable** por polímero que se expresa en **kg Sb eq/kg**.

Ecuación 7: Ecuación de Indicador ADP

$$ADP = M \cdot F_{ADP} \cdot R$$

3.2.9. Agotamiento de Combustibles Fósiles (ACF)

El agotamiento de combustibles fósiles refleja la energía fósil consumida en la producción del plástico interceptado que se considera conservada al evitar la necesidad de fabricar de nuevo. **Geyer et al. (2017)** documentan que aproximadamente el 6 % de la producción mundial de petróleo se destina a la fabricación de plásticos. El factor de **76 MJ/kg procede de Ecoinvent 3.9** y representa la energía fósil total incorporada en un **kilogramo de plástico virgen promedio**.

Finalmente, el ACF es el último en unirse a la categoría de indicador principal, ya que al igual que los últimos mencionados, se beneficia de una actualización de la herramienta, la cual añade la capacidad de distinción por polímeros de 4 antiguas métricas adicionales (AP, EP, ADP y ACF). El factor F_{ACF} antes de la actualización poseía un valor de 76 MJ/kg, obtenido de la media global.

Ecuación 8: Ecuación de Indicador ACF

$$ACF = M \cdot F_{ACF} \cdot R$$

3.2.10. Tablas Resumen de Factores de Caracterización y Fórmulas

La *Tabla 3* consolida los factores de caracterización de los indicadores principales con factores específicos para cada polímero para doce polímeros o categorías de mezcla disponibles en la herramienta.

También se presenta la *Tabla 4*, que recoge las fórmulas operativas de los indicadores, con la deducción aplicada, la incertidumbre estimada y las referencias.

Tabla 3: Factores de Caracterización de los Indicadores Principales para cada Polímero

Polímero	GWP-100 (kg CO ₂ /kg)	Ecotox Marina (kg 1,4-DCB/kg)	Ecotox Agua Dulce (kg 1,4-DCB/kg)	Fragm. MP (%)	AP (kg SO ₂ /kg)	EP (kg PO ₄ /kg)	ADP (kg Sb/kg)	Comb.Fósiles (MJ/kg)
PET	3,000	0,150	0,120	45,000	0,009	0,012	0,035	76,000
HDPE	2,800	0,120	0,096	35,000	0,008	0,011	0,032	73,000
LDPE	3,100	0,140	0,112	40,000	0,009	0,012	0,034	78,000
PP	2,900	0,130	0,104	38,000	0,008	0,012	0,033	75,000
PVC	4,200	0,180	0,144	50,000	0,013	0,018	0,048	57,000
PS	3,300	0,160	0,128	55,000	0,009	0,013	0,036	87,000
EPS	3,350	0,165	0,132	60,000	0,009	0,013	0,037	88,000
PA (Nylon)	7,200	0,200	0,160	30,000	0,021	0,029	0,078	120,000
PC	5,100	0,190	0,152	35,000	0,015	0,021	0,056	100,000
PUR	4,500	0,170	0,136	42,000	0,013	0,018	0,049	90,000
PLA	2,100	0,090	0,072	65,000	0,006	0,009	0,024	54,000
Caucho (TRWP)	3,800	0,220	0,176	25,000	0,011	0,016	0,043	80,000
Mezcla Urbana	3,200	0,148	0,118	44,000	0,009	0,013	0,035	78,000
Mezcla Industrial	3,500	0,160	0,128	42,000	0,010	0,014	0,038	83,000
Mezcla (default)	3,200	0,148	0,118	44,000	0,009	0,013	0,035	78,000

Nota: La Tabla 3 es de elaboración propia basada en los marcos metodológicos mencionados en el capítulo 2

Tabla 4: Resumen de Fórmulas de los Cinco Indicadores Principales

Indicador	Fórmula Matemática	Incertidumbre	Referencia
GWP-100	$GWP = M \cdot F_{GWP} \cdot R$	±10%	IPCC AR6 (2023); ReCiPe 2016; Ecoinvent 3.9.
Huella de Carbono Extendida	$HCE = M \cdot F_{GWP} \cdot 1,07 \cdot R$	±15%	ISO 14067:2018; Deeney et al. (2026)
Ecotoxicidad Marina	$EM = M \cdot F_{ECO} \cdot R$	±25%	MarLCA v1.2; Saadi et al. (2025)
Ecotoxicidad en Agua Dulce	$EAD = M \cdot F_{ECOAD} \cdot R$	±30%	MarLCA v1.2; Schwarz et al. (2024)
Microplásticos Evitados	$MP = M \cdot \left(\frac{F_{FRAG}}{100}\right) \cdot R$	±20%	ISO/TR 21960:2020; UNEP 2021; Pellengahr et al. (2025)
Acidificación Atmosférica	$AP = M \cdot F_{AP} \cdot R$	±15%	ReCiPe 2016 v1.1; Huijbregts et al. (2017)
Eutrofización Acuática	$EP = M \cdot F_{EP} \cdot R$	±18%	ReCiPe 2016 v1.1; Huijbregts et al. (2017)
Agotamiento de Recursos Abióticos	$ADP = M \cdot F_{ADP} \cdot R$	±18%	CML-IA baseline; Guinée 2002
Agotamiento de Combustibles Fósiles	$ACF = M \cdot F_{ACF} \cdot R$	±25%	CML-IA baseline ; Geyer et al (2017)

Nota: La Tabla 4 es de elaboración propia y resume el apartado 3.2

3.3. Los Indicadores Complementarios

Además de los indicadores principales, la herramienta calcula los indicadores complementarios que completan los resultados ambientales de cada recolección. Como se señaló en la sección 3.1, estos indicadores emplean factores constantes no diferenciados por polímero. Su función es contextualizar los resultados y enriquecer su comunicación, especialmente ante audiencias no técnicas.

A continuación, se describe brevemente cada uno de los indicadores, incluyendo al final del apartado una tabla resumen con todos los indicadores, sus fórmulas, unidades y niveles de incertidumbres.

3.3.1. Impacto Acuático de Microplásticos (IAM)

El IAM complementa al indicador núcleo de Microplásticos Liberados Evitados al expresar el daño ambiental acuático de esas partículas en kilogramos de CO₂ equivalente, lo que facilita su comparación con otros indicadores del índice. El **factor de 0,25 kg CO₂eq/kg** procede del modelado multimedia de Saadi et al. (2025) y representa el impacto acuático integrado de los microplásticos generados por fragmentación de un kilogramo de plástico en el entorno marino.

Ecuación 9: Ecuación de Indicador IAM

$$IAM = M \cdot 0,25 \cdot R$$

3.3.2. Enredamiento de Megafauna (EM)

El enredamiento de megafauna expresa la fracción de especies de megafauna marina (tortugas, cetáceos, focas y aves) potencialmente desaparecidas por año como consecuencia del enredamiento con macroplásticos. **Se expresa en PDF·yr (Potentially Disappeared Fraction por año).** El **factor de 0,02 PDF·yr/kg** fue desarrollado por Høiberg et al. (2024) aplicando un modelo de transporte lagrangiano de cinco años para estimar la distribución geográfica del plástico y su probabilidad de encuentro con fauna vulnerable.

$$EM = M \cdot 0,02 \cdot R$$

3.3.3. Formación de Ozono Fotoquímico (NMVOC)

Este indicador es capaz de expresar las emisiones de compuestos orgánicos volátiles no metánicos (NMVOC) generadas durante la producción del plástico virgen que contribuyen a la formación de ozono troposférico, con efectos negativos sobre la salud humana y los ecosistemas. El **factor de 0,018 kg NMVOC eq/kg** procede de **ReCiPe 2016**.

$$NMVOC = M \cdot 0,018 \cdot R$$

3.3.4. Material Particulado Fino (PM_{2,5})

El material particulado fino cuantifica las emisiones de partículas de **diámetro inferior a 2,5 micrómetros** generadas durante la cadena de producción del plástico virgen. Las partículas PM_{2,5} penetran en los alvéolos pulmonares y están asociadas a enfermedades respiratorias y cardiovasculares. El **factor de 0,0045 kg PM_{2,5}eq/kg** procede de **ReCiPe 2016** y representa las emisiones de material particulado fino por kilogramo de plástico producido a escala global.

$$PM_{2,5} = M \cdot 0,0045 \cdot R$$

3.3.5. Toxicidad Humana – Cancer (THc)

La toxicidad humana asocia los polímeros con el riesgo cancerígeno asociado a los aditivos que tienen presentes (BPA, ftalatos como DEHP, DBP y retardantes de llama) y que se liberarían durante su degradación marina. Se expresa en Unidades Tóxicas Comparativas para humanos (CTUh) siguiendo el modelo **USEtox 2.1, un marco consensuado por UNEP y SETAC** para la evaluación de toxicidad humana en ACV. El **factor de 0,038 CTUh/kg** se fundamenta en **Hahladakis et al. (2018)**.

Ecuación 13: Ecuación de Indicador THc

$$THc = M \cdot 0,038 \cdot R$$

3.3.6. Ocupación de Espacio Marino (OEM)

Finalmente, este último indicador proporciona una medición aproximada de la superficie marina contaminada por la presencia del plástico, durante el tiempo que permanece en el océano antes de degradarse. Se expresa en **metros cuadrados por año (m²·año)** y su **factor es de 2,3 m²·año/kg** procedente de **GLAM v1.0 (2024)**. Además, cabe recalcar que integra tanto la dispersión superficial del material como su persistencia temporal.

Ecuación 14: Ecuación de Indicador OEM

$$OEM = M \cdot 2,3 \cdot R$$

3.3.7. Tabla Resumen

Se presenta a modo de resumen la *Tabla 5* que consolida los indicadores complementarios con sus fórmulas, unidades, incertidumbre estimada, descripción resumida y fuente del factor.

Tabla 5: Resumen de los indicadores complementarios

Indicador	Fórmula	Unidad	Incert.	Fuente
Impacto Acuático de Microplásticos	$IAM = M \cdot 0,25 \cdot R$	kg CO ₂ eq	±30 %	Saadi et al. (2025)
Enredamiento de Megafauna	$EM = M \cdot 0,02 \cdot R$	PDF·yr	±35 %	Høiberg (2024)
Formación Ozono Fotoquímico	$NMVOC = M \cdot 0,018 \cdot R$	kg NMVOC eq	±15 %	ReCiPe 2016
Material Particulado Fino (PM _{2,5})	$PM_{2,5} = M \cdot 0,0045 \cdot R$	kg PM _{2,5} eq	±18 %	ReCiPe 2016
Toxicidad Humana – Cáncer	$THc = M \cdot 0,038 \cdot R$	CTUh	±25 %	USEtox 2.1; Hahladakis et al. (2018)
Ocupación de Espacio Marino	$OEM = M \cdot 2,3 \cdot R$	m ² ·año	±20 %	GLAM v1.0 (2024)

Nota: La Tabla 5 es de elaboración propia y resume el apartado 3.3.

Una vez finalizados los apartados de 3.2 y 3.3, donde se han presentado en detalle todos los indicadores del IIAE, se avanza al siguiente apartado donde se presenta la herramienta que automatiza los cálculos anteriores, para dar facilidad a los usuarios no técnicos.

3.4. Herramienta de Cálculo del IIAE

Los indicadores y factores descritos en las secciones anteriores se implementan en una herramienta de cálculo desarrollada en Microsoft Excel denominada “ACV_Plasticos_Marinos_V4_BIOBARDAS.xlsx”. Su propósito es traducir los datos obtenidos en campo en los quince indicadores de impacto ambiental evitado de forma automática, siguiendo los requisitos de comparabilidad y validez internacional. La herramienta está diseñada para ser operativa e intuitiva, facilitando su uso ante cualquier usuario.

3.4.1. Estructura General

La herramienta se organiza en doce pestañas interconectadas, cada una con una función específica dentro del IIAE. La *Figura 1* muestra la vista general del archivo con las pestañas visibles en la barra lateral.

Parámetro	Valor de entrada	Descripción / Instrucción
B5 — Masa plástica recolectada (kg)	100	Número mayor a 0 (kg de plásticos seco pesado en campo)
B6 — Tipo de plástico	PVC	Seleccionar de la lista desplegable
B7 — ID / Nombre de la biobarda	BB-BioValencia	Texto libre — > es: BB-BioValencia, BB-Algudene
B8 — Fecha de recolección	2026-05-10	Formato YYYY-MM-DD
B9 — Región geográfica	América Latina	América Latina / Europa / Asia / África / Oceanía
B10 — Factor regional R (0.0 – 1.0)	0.9	0 si no recomendado para biobardas (operación parcial)
B11 — Incertidumbre de medición (%)	5	5 % por defecto según ISO 14044

Factor	Valor	Unidad
GWP polímero (kg CO ₂ -eq)	4.200	kg CO ₂ -eq
Ecotox. marina (kg 1.4-OCB/kg)	0.180	kg 1.4-OCB/kg
Ecotox. agua dulce (kg 1.4-OCB/kg)	0.144	kg 1.4-OCB/kg
Fragmentación microplásticos (%)	50.000	%
Tiempo degradación (años)	1000.000	años
Densidad (g/cm ³)	1.380	g/cm ³
Factor regional R	0.900	0 – 1

#	Indicador	Resultado	Unidad	Fórmula aplicada	Incertidumbre	Marco normativo
1	GWP-100 = Carbón	378.800	kg CO ₂ -eq	$M \times GWP_{100} \times R$	<10%	IPCC AR6 2023
2	Huella Carbóno Este	404.46	kg CO ₂ -eq	$M \times GWP_{100} \times 1.07 \times R$	<10%	ISO 14067 2018
3	Ecotoxicidad Marina	16.20	kg 1.4-OCB eq	$M \times Ecotox_{m} \times R$	<25%	MarLCA v1.2 (2024)
4	Ecotoxicidad Agua C	12.96	kg 1.4-OCB eq	$M \times Ecotox_{a} \times R$	<30%	MarLCA v1.2 (2024)
5	Acidificación Atmos	1.17	kg SO ₂ -eq	$M \times AP_factor \times R$	<15%	RaCPe 2016 v1.1
6	Eutrofización Acuati	1.82	kg PO ₄ -eq	$M \times EP_factor \times R$	<15%	RaCPe 2016 v1.1
7	Agotamiento Recurs	4.32	kg Sb eq	$M \times ADP_factor \times R$	<10%	RaCPe 2016 v1.1
8	Combustibles Fósil	5.120.00	kg MP	$M \times MJ_factor \times R$	<10%	Open 2017 Sci Adv
9	Microplásticos Liber	45.00	kg MP	$M \times (frag/100) \times R$	<20%	MarLCA v1.2 (2024)
10	Impacto Acústico de	22.50	kg CO ₂ -eq	$M \times 0.25 \times R$	<30%	GLAM v1.0 (2024)
11	Enredamiento Mieg	1.80	PDF g/l	$M \times 0.32 \times R$	<25%	GLAM v1.0 / MarLCA
12	Formación Ozono F	1.62	kg MMOC eq	$M \times 0.018 \times R$	<15%	RaCPe 2016 v1.1
13	Material Particulado	0.41	kg PM2.5 eq	$M \times 0.0040 \times R$	<15%	RaCPe 2016 v1.1
14	Toxicidad Humana C	3.42	CTUh	$M \times 0.038 \times R$	<25%	USEtox 2.1

Figura 1: Interfaz general de la herramienta “ACV_Plasticos_Marinos_V4_Avazado.xlsx”

Seguidamente se muestra la *Tabla 6* que describe la función de cada una de las pestañas de la herramienta.

Tabla 6: Descripción de las doce pestañas de la herramienta de cálculo

Pestaña	Función
1_Dashboard	Interfaz principal de cálculo. Contiene las celdas de entrada y genera automáticamente los 15 indicadores y 8 beneficios ambientales.,
2_Factores_Polimeros	Tabla de factores de caracterización para 15 polímeros. Es la <i>Tabla 3</i> que da valores a F_{GWP} , F_{ECO} , F_{ECOAD} , F_{FRAG} , F_{AP} , F_{EP} , F_{ADP} y F_{ACF} que se vinculan al Dashboard.
3_Normas_ISO	Descripción técnica de las 12 normas y marcos metodológicos aplicados (ISO, ReCiPe, MarILCA, GLAM, IPCC).
4_Referencias_JCR	Base bibliográfica con 21 estudios científicos: revista, factor de impacto, DOI y resumen de contribución.
5_Metodologia_Calculo	Fórmulas detalladas, deducciones matemáticas y supuestos científicos.
6_Supuestos_Limitaciones	Documentación explícita de los 8 supuestos críticos y 3 limitaciones conforme a ISO 14044:2006.
7_Analisis_Sensibilidad	Cálculo automático de tres escenarios (optimista –20 %, base, pesimista +20 %) para los indicadores.
8_Comparativa_Escenarios	Comparación de tres alternativas de gestión: reciclaje + recolección, recolección y sin intervención.
9_Registro_Historico	Acumulación de hasta 100 evaluaciones con sus datos de campo y resultados principales. Permitiendo el seguimiento.
10_Glosario	Diccionario de 40 términos técnicos de ACV y plásticos marinos.
11_Proyecto_Biobardas	Contexto específico del proyecto de Montevideo: sistema hídrico evaluado, datos de residuos, referencias del proyecto.
12_Instrucciones	Guía paso a paso de uso de la herramienta dirigida al usuario de campo.

Nota: La tabla es de elaboración propia siguiendo la herramienta del IIAE

3.4.2. El Dashboard: interfaz principal de cálculo

La pestaña 1 Dashboard es la interfaz central de la herramienta. En ella convergen los datos de entrada del usuario y los resultados calculados automáticamente. La *Figura 2* muestra una vista completa del Dashboard con el ejemplo de referencia activo.

ACV PLÁSTICOS MARINOS — BIOBARDAS MONTEVIDEO · DASHBOARD PRINCIPAL						
Versión 4.0 ISO 14040/44 2006 + GLAM v1.0 (UNEP-SETAC 2024) + MarILCA v1.2 (2024) + ReCiPe 2016 v1.1 + IPCC AR6 (2023)						
SECCIÓN A — DATOS DE ENTRADA (editar únicamente celdas amarillas)						
Parámetro	Valor de entrada	Descripción / Instrucción				
B5 — Masa plástico recolectado (kg)	150	Número mayor a 0 (kg de plástico seco pesado en campo)				
B6 — Tipo de plástico	PET	Seleccionar de la lista desplegable				
B7 — ID / Nombre de la biobarda	BB-BajoValencia	Texto libre — p.ej. BB-BajoValencia, BB-Miguelete				
B8 — Fecha de recolección	2026-05-10	Formato YYYY-MM-DD				
B9 — Región geográfica	América Latina	América Latina / Europa / Asia / África / Oceanía				
B10 — Factor regional R (0.0 – 1.0)	0,9	0.9 recomendado para Montevideo (gestión parcial)				
B11 — Incertidumbre de medición (%)	5	5 % por defecto según ISO 14044				
SECCIÓN B — FACTORES APLICADOS (calculados automáticamente — no editar)						
Factor	Valor	Unidad				
GWP polímero (kg CO ₂ /kg)	3,000	kg CO ₂ /kg				
Ecotox. marina (kg 1,4-DCB/kg)	0,150	kg 1,4-DCB/kg				
Ecotox. agua dulce (kg 1,4-DCB/kg)	0,120	kg 1,4-DCB/kg				
Fragmentación microplásticos (%)	45,000	%				
Tiempo degradación (años)	600,000	años				
Densidad (g/cm³)	1,380	g/cm³				
Factor regional R	0,900	0 – 1				
SECCIÓN C — 15 INDICADORES DE IMPACTO EVITADO (ISO 14044 + ReCiPe 2016 v1.1 + GLAM v1.0 + IPCC AR6 + MarILCA v1.2)						
#	Indicador	Resultado	Unidad	Fórmula aplicada	Incertidumbre	Marco normativo
1	GWP-100 — Calentamiento global	405,00	kg CO ₂ eq	$M \times GWP \times R$	±10%	IPCC AR6 2023
2	Huella Carbono Externa	433,35	kg CO ₂ eq	$M \times GWP \times 1.07 \times R$	±12%	ISO 14067:2018
3	Ecotoxicidad Marina	20,25	kg 1,4-DCB eq	$M \times Ecotox_m \times R$	±25%	MarILCA v1.2 (2024)
4	Ecotoxicidad Agua Dulce	16,20	kg 1,4-DCB eq	$M \times Ecotox_ad \times R$	±30%	ReCiPe 2016 v1.1
5	Acidificación Atmosférica	1,15	kg SO ₂ eq	$M \times AP_factor \times R$	±15%	ReCiPe 2016 v1.1
6	Eutrofización Acuática	1,62	kg PO ₄ eq	$M \times EP_factor \times R$	±18%	ReCiPe 2016 v1.1
7	Agotamiento Recursos	4,73	kg Sb eq	$M \times ADP_factor \times R$	±12%	ReCiPe 2016 v1.1
8	Combustibles Fósiles	10.260,00	MJ	$M \times MJ_factor \times R$	±10%	Geyer 2017 Sci Adv.
9	Microplásticos Liberados	60,75	kg MP	$M \times (Frag\%/100) \times R$	±20%	MarILCA v1.2 (2024)
10	Impacto Acuático de Nutrientes	33,75	kg CO ₂ eq	$M \times 0.25 \times R$	±30%	GLAM v1.0 (2024)
11	Enredamiento Megafauna	2,70	PDF.yr	$M \times 0.02 \times R$	±35%	GLAM v1.0 / MarILCA
12	Formación Ozono Potencial	2,43	kg NMVOC eq	$M \times 0.018 \times R$	±15%	ReCiPe 2016 v1.1
13	Material Particulado	0,61	kg PM2.5 eq	$M \times 0.0045 \times R$	±18%	ReCiPe 2016 v1.1
14	Toxicidad Humana Crónica	5,13	CTUh	$M \times 0.038 \times R$	±25%	USEtox 2.1
15	Ocupación Espacio	310,50	m².año	$M \times 2.3 \times R$	±20%	GLAM v1.0 (2024)
SECCIÓN D — BENEFICIOS AMBIENTALES CUANTIFICADOS (para comunicación científica y pública)						
#	Beneficio	Valor	Unidad	Equivalencia práctica	Fuente	
1	Emisiones de CO ₂ evitadas	405,00	kg CO ₂ eq	88,0435 km en auto	IPCC AR6	
2	Fauna marina protegida	378,00	individuos	378,0 individuos (peces/aves/tortugas)	Simon 202	
3	Microplásticos evitados	60,75	kg MP	60750000,0 partículas estimadas	MarILCA v	
4	Área marina protegida	203,38	m²	0.000 hectáreas	GLAM v1.0	
5	Combustibles fósiles evitados	228,00	kg petróleo eq	190,00 litros de gasolina	Geyer 201	
6	Agua ahorrada	2.322,00	litros	15,4800 duchas de 10 min	ISO 14046	
7	Energía ahorrada	10.260,00	MJ	0.003 MWh	Geyer 201	
8	Aditivos tóxicos no liberados	10,80	kg	011 kg (ftalatos, BPA, retardantes llama)	Hahladakis	

Figura 2: Pestaña 1 de la herramienta con el ejemplo de referencia de 150 kg de PET.

El Dashboard se divide en dos zonas claramente diferenciadas. La zona superior contiene los siete parámetros de entrada que el usuario debe completar a partir de los datos obtenidos en campo. La zona inferior muestra los quince indicadores de impacto y ocho beneficios ambientales, ambos calculados automáticamente.

La *Figura 3* muestra en detalle la zona del Dashboard, donde se introducen los datos de entrada obtenidos en campo.

SECCIÓN A — DATOS DE ENTRADA (editar únicamente celdas amarillas)		
Parámetro	Valor de entrada	Descripción / Instrucción
B5 — Masa plástico recolectado (kg)	150	Número mayor a 0 (kg de plástico seco pesado en campo)
B6 — Tipo de plástico	PET	Seleccionar de la lista desplegable
B7 — ID / Nombre de la biobarda	BB-BajoValencia	Texto libre — p.ej. BB-BajoValencia, BB-Miguelete
B8 — Fecha de recolección	2026-05-10	Formato YYYY-MM-DD
B9 — Región geográfica	América Latina	América Latina / Europa / Asia / África / Oceanía
B10 — Factor regional R (0.0 – 1.0)	0.9	0.9 recomendado para Montevideo (gestión parcial)
B11 — Incertidumbre de medición (%)	5	5 % por defecto según ISO 14044
SECCIÓN B — FACTORES APLICADOS (calculados automáticamente — no editar)		
Factor	Valor	Unidad
GWP polímero (kg CO ₂ /kg)	3,000	kg CO ₂ /kg
Ecotox. marina (kg 1,4-DCB/kg)	0,150	kg 1,4-DCB/kg
Ecotox. agua dulce (kg 1,4-DCB/kg)	0,120	kg 1,4-DCB/kg
Fragmentación microplásticos (%)	45,000	%
Tiempo degradación (años)	600,000	años
Densidad (g/cm ³)	1,380	g/cm ³
Factor regional R	0,900	0 – 1

Figura 3: Detalle de las celdas de entrada de la pestaña 1_Dashboard

La *Tabla 7* describe cada uno de los siete parámetros de entrada, sus criterios de validación y valores de ejemplo.

Tabla 7: Parámetros de entrada del IIAE

Celda	Parámetro	Validación	Valor Ejemplo	Descripción
B5	Masa recolectada en kg	> 10 kg	150 kg	Variable primaria de campo. Se recomienda masa seca. Es la única variable que proviene directamente del trabajo de campo.
B6	Tipo de Plástico	Lista desplegable (15 opciones)	PET	Si no hay segregación por polímero, usar Mezcla Urbana.
B7	ID/Nombre de la biobarda	Texto libre	BB-BajoValencia	Identificación del sitio. No afecta al cálculo; sirve para el registro histórico y la trazabilidad.
B8	Fecha de recolección	Formato AAAA-MM_DD	2026-05-10	Registro temporal del evento de campo. Permite ordenar las evaluaciones en el registro histórico.
B9	Región geográfica	Lista desplegable	América Latina	Contexto geográfico. Base para la aplicación de futuros factores regionalizados de MarILCA v2.0.

B10	Factor de gestión de residuos (R)	Entre 0 y 1	0,9	Probabilidad de que el plástico hubiera alcanzado el océano sin intervención. Véase <i>Tabla 2</i> de la sección 3.1.
B11	Incertidumbre de medición	Positivo y en %	5%	Error instrumental de la balanza de campo. Se propaga al intervalo de confianza final de los indicadores.

Nota: La tabla es de elaboración propia siguiendo la herramienta del IIAE

De los siete parámetros, tres tienen un papel determinante en el cálculo. Las celdas B5, B6 y B10 influyen directamente en el cálculo, mientras que las demás son meramente para mantener registrados datos importantes.

3.4.3. Factores de Polímeros

En la pestaña 2 Factores Polimeros, se presentan los factores que vimos en la *Tabla 3*, con otros datos de interés. Esta pestaña está interconectada al dashboard para agilizar la vista del usuario y permite de este modo el cálculo automático sin intermediaciones.

Se muestra en la *Figura 4* la pestaña 2 Factores Polimeros.

TABLA DE FACTORES POR POLIMERO — ReCiPe 2016 v1.1 + MarILCA v1.2 (2024) + GLAM v1.0 (2024) + IPCC AR6 (2023)											
Fuentes: Huijbregts et al. 2017 Boulay et al. MarILCA v1.2 GLAM (UNEP-SETAC Oct 2024) IPCC AR6 WG1 (2023) Walsh et al. 2025 Brewster et al. 2025											
Polimero	GWP-100 (kg CO ₂ /kg) IPCC AR6	Ecotox Marina (kg 1,4-DCB/kg) MarILCA v1.2	Ecotox Agua Dulce (kg 1,4-DCB/kg)	Fragm. MP (%) Schwarz/ Walsh	T. Degr. (años)	Densidad (g/cm ³)	AP (kg SO ₂ /kg) ReCiPe	EP (kg PO ₄ /kg) ReCiPe	ADP (kg Sb/kg) ReCiPe	Comb.Fós iles (MJ/kg) Geyer	Notas científicas
PET	3,000	0,150	0,120	45	600	1,38	0,0085	0,0120	0,0350	76	/P IPCC AR6; ecotox MarILCA v1.2; frag Schwarz 2024
HDPE	2,800	0,120	0,096	35	800	0,95	0,0080	0,0110	0,0320	73	Menor ecotox por ausencia de plastificantes
LDPE	3,100	0,140	0,112	40	500	0,92	0,0088	0,0120	0,0340	78	Alta fragmentación en ambiente marino; Walsh 2025
PP	2,900	0,130	0,104	38	450	0,91	0,0084	0,0120	0,0330	75	Cinética lineal sin fragmentación; Tuttle 2024
PVC	4,200	0,180	0,144	50	1000	1,38	0,0130	0,0180	0,0480	57	Alto GWP por producción con cloro; aditivos tóxicos
PS	3,300	0,160	0,128	55	400	1,05	0,0092	0,0130	0,0360	87	Alta fragmentación; nanoplasticos; Nakatani 2023
EPS	3,350	0,165	0,132	60	350	0,02	0,0094	0,0130	0,0370	88	Fragmentación máxima; alta dispersión por flotabilidad
PA (Nylon)	7,200	0,200	0,160	30	900	1,14	0,0210	0,0290	0,0780	120	GWP muy alto; fuente principal redes pesqueras
PC	5,100	0,190	0,152	35	850	1,20	0,0148	0,0210	0,0560	100	IPA en monómero; riesgo endocrino Hahladakis 2018
PUR	4,500	0,170	0,136	42	700	0,03	0,0130	0,0180	0,0490	90	Espuma ligera; alta migración aditivos acuático
PLA	2,100	0,090	0,072	65	60	1,24	0,0063	0,0090	0,0240	54	Degradación rápida; bioplástico; Pellengahr 2025
Caucho (TRWP)	3,800	0,220	0,176	25	1200	1,10	0,0112	0,0160	0,0430	80	NP incluido GLAM v1.0; Schwarz 2024 SSD actualizado
Mezcla Urbana	3,200	0,148	0,118	44	650	1,05	0,0091	0,0130	0,0350	78	6PET, 32%LDPE/HDPE, 18%PP, 12%PS; Brewster 2025
Mezcla Industrial	3,500	0,160	0,128	42	750	1,15	0,0100	0,0140	0,0380	83	Factor intermedio; validado Cissé 2024 Mozambique
Mezcla (default)	3,200	0,148	0,118	44	650	1,05	0,0091	0,0130	0,0350	78	ual Mezcla Urbana; recomendado ISO 14044 §4.2.3.6

Figura 4: Detalle de las celdas de la pestaña 2_Factores_Polimeros

3.4.4. Marco Teórico

En las pestañas 3 Normas ISO, 4 Referencias JCR, 5 Metodología Calculo y 6 Supuestos Limitaciones se presenta la parte teórica que tiene detrás la herramienta. En el capítulo 2: Marco teórico y referencial, se habla extensamente del contenido de estas pestañas. Se añaden a la herramienta, para facilitar al usuario las fuentes metodológicas y breves resúmenes de los aspectos importantes sin tener que acceder a la memoria del proyecto.

3.4.5. Análisis de Sensibilidad

La pestaña 7 Analisis Sensibilidad implementa el requisito de análisis de incertidumbre de la cláusula 5.4.3 de ISO 14044:2006. Para cada indicador calcula automáticamente tres escenarios (optimista, base y pesimista) aplicando rangos de variación del $\pm 20\%$ sobre los factores de caracterización: un escenario optimista (-20%), el escenario base con valores centrales de la *Tabla 3*, y un escenario pesimista ($+20\%$). Los resultados se actualizan automáticamente al modificar cualquier parámetro del Dashboard, por lo que siempre reflejan el caso de estudio activo. En la *Figura 5* se muestra la pestaña mencionada.

ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD — ISO 14044 Cláusula 5.4.3 (escenarios $\pm 20\%$ sobre factores críticos)							
Los resultados provienen del Dashboard (1_Dashboard). Cambiar entradas allí actualiza automáticamente.							
Indicador	Unidad	Optimista (-20%)	Base (valor central)	Pesimista (+20%)	Variación (rango)	IC 80%	Robustez
GWP-100	kg CO ₂ eq	324,00	405,00	486,00	162,00	324,000 – 486,000	Alta
Huella Carbono Extendida	kg CO ₂ eq	346,68	433,35	520,02	173,34	346,68000 – 520,02000	Alta
Ecotoxicidad Marina	kg 1,4-DCB eq	16,20	20,25	24,30	8,10	16,2000 – 24,3000	Media
Ecotoxicidad Agua Dulce	kg 1,4-DCB eq	12,96	16,20	19,44	6,48	12,96000 – 19,44000	Media
Acidificación AP	kg SO ₂ eq	0,92	1,15	1,38	0,46	,91800 – 1,37700	Alta
Eutrofización EP	kg PO ₄ eq	1,30	1,62	1,94	0,65	1,29600 – 1,94400	Alta
Recursos Abióticos ADP	kg Sb eq	3,78	4,73	5,67	1,89	3,78000 – 5,67000	Alta
Combustibles Fósiles	MJ	8.208,00	10.260,00	12.312,00	4.104,00	8208,000 – 12312,000	Alta
Microplásticos Evitados	kg MP	48,60	60,75	72,90	24,30	48,6000 – 72,9000	Media
Impacto Microplásticos	kg CO ₂ eq	27,00	33,75	40,50	13,50	27,000 – 40,5000	Media
Enredamiento Megafauna	PDF.yr	2,16	2,70	3,24	1,08	2,16000 – 3,24000	Media-Baja
Ozono Fotoquímico	kg NMVOC eq	1,94	2,43	2,92	0,97	1,94400 – 2,91600	Alta
PM2.5	kg PM2.5 eq	0,49	0,61	0,73	0,24	,48600 – ,72900	Alta
Toxicidad Humana	CTUh	4,10	5,13	6,16	2,05	4,10400 – 6,15600	Media
Ocupación Espacio Marino	m².año	248,40	310,50	372,60	124,20	248,4000 – 372,6000	Media

Figura 5: Pestaña de Análisis de Sensibilidad de la herramienta para 150 kg de PET

Este análisis permite al usuario visualizar el rango de valores dentro del cual se mueve el impacto real en función de la variabilidad de los factores, proporcionando una estimación conservadora y optimista entre las que se sitúa el resultado base.

3.4.6. Comparabilidad de Escenarios

La pestaña 8 Comparativa Escenarios pone en contexto el beneficio de la interceptación comparándolo con tres alternativas posibles de gestión para el mismo lote de plástico recolectado. Los valores negativos representan beneficio ambiental evitado y los positivos daños ambientales generados.

COMPARATIVA DE 4 ESCENARIOS ALTERNATIVOS DE GESTIÓN DE RESIDUOS					
Los valores del Escenario Base se toman del Dashboard. Negativo = beneficio ambiental (impacto evitado).					
Indicador	Reciclaje + Recolección	Recolección	4. Sin intervención (PEOR)	Diferencia mejor↔peor	Unidad
GWP-100	-405,00	405,00	405,00	810,00	kg CO ₂ eq
Huella Carbono Extendida	-433,35	433,35	433,35	866,70	kg CO ₂ eq
Ecotoxicidad Marina	-20,25	-20,25	20,25	40,50	kg 1,4-DCB eq
Ecotoxicidad Agua Dulce	-16,20	-16,20	16,20	32,40	kg 1,4-DCB eq
Acidificación Atmosférica AP	-1,15	1,15	1,15	2,30	kg SO ₂ eq
Eutrofización Acuática EP	-1,62	-1,62	1,62	3,24	kg PO ₄ eq
Agotamiento Recursos Abióticos ADP	-4,73	4,73	4,73	9,45	kg Sb eq
Combustibles Fósiles Conservados	-10.260,00	10.260,00	10.260,00	20.520,00	MJ
Microplásticos Liberados Evitados	-60,75	-60,75	60,75	121,50	kg MP
Impacto Acuático de Microplásticos	-33,75	-33,75	33,75	67,50	kg CO ₂ eq
Enredamiento Megafauna	-2,70	-2,70	2,70	5,40	PDF.yr
Formación Ozono Fotoquímico	-2,43	-2,43	2,43	4,86	kg NMVOC eq
Material Particulado PM2.5	-0,61	0,61	0,61	1,22	kg PM2.5 eq
Toxicidad Humana Cancerígena	-5,13	-5,13	5,13	10,26	CTUh
Ocupación Espacio Marino	-310,50	-310,50	310,50	621,00	m².año

Figura 6: pestaña 8_Comparativa_Escenarios de la herramienta para 150 kg de PET.

Los tres escenarios responden a una lógica clara basada en la distinción entre los indicadores de protección directa del ecosistema, cuyo beneficio se materializa por el solo hecho de interceptar y recoger el residuo y los indicadores dependientes del ciclo de producción, cuyo beneficio solo se materializa si el material reciclado sustituye la producción virgen.

Sin intervención, el plástico ingresa al ecosistema acuático y genera daño en los quince indicadores durante más de 400 años según el polímero predominante (ISO/TR 21960:2020). En la **Recolección**, el plástico se intercepta antes de su ingreso al sistema acuático, evitando nueve de los quince indicadores de protección directa del ecosistema (microplásticos, ecotoxicidades, eutrofización, enredamiento, ozono, toxicidad humana y ocupación marina).

Los seis indicadores restantes que son dependientes del ciclo de producción toman valor positivo, dado que las emisiones asociadas a la fabricación original

ya ocurrieron y sin reciclaje no se evita ninguna fabricación futura. Finalmente, el escenario de **Recolección + Reciclaje**, el plástico interceptado se recicla y sustituye producción virgen, lo que produce que los quince indicadores pasan a ser beneficio neto, sumando al beneficio de la interceptación el crédito ambiental de evitar una nueva fabricación.

La diferencia entre el escenario de recolección con reciclaje y el de sin intervención representa un **beneficio ambiental total** y constituye el argumento cuantitativo más sólido para justificar cualquier esfuerzo de recolección, incluso en ausencia de reciclaje. Esto es debido a que la sola interceptación evita de forma inmediata e irreversible los impactos marinos de largo plazo, lo que posiciona a las biobardas como una intervención de alto valor ambiental con independencia de la infraestructura de valorización disponible.

3.4.7. Flujo de Trabajo

El uso de la herramienta sigue un flujo de trabajo secuencial de cinco pasos principales que conecta las distintas pestañas para darle un orden lógico. Tanto en la pestaña once de la herramienta, como en la *Figura 7*, se desglosa de manera más precisa las instrucciones de uso.

1. Introducción de datos de campo: El usuario debe completar las siete celdas de entrada de la pestaña 1 Dashboard con los datos obtenidos en la recolección.
2. Cálculo automático de resultados: La herramienta consulta automáticamente los factores de caracterización de la pestaña 2 y calcula los resultados.
3. Validación de resultados: El usuario contrasta los resultados con los rangos de referencia de la literatura disponibles en la pestaña 5 Metodología Cálculo. Si algún indicador queda fuera del rango esperado, se revisan los parámetros de entrada antes de continuar.
4. Análisis de sensibilidad y escenarios: El usuario accede a las pestañas 7 Analisis Sensibilidad y 8 Comparativa Escenarios para evaluar la robustez de los resultados y compáralos con alternativas de gestión.

5. Registro y archivo: El usuario traslada los datos clave a la pestaña 9 Registro Historico, que permite acumular hasta 100 evaluaciones y construir series temporales para el seguimiento a largo plazo.

Este flujo garantiza que cada evaluación quede completamente documentada y sea reproducible por cualquier usuario que disponga del archivo. Cumpliendo así con los requisitos de transparencia metodológica de ISO 14044:2006.

INSTRUCCIONES DE USO DEL PROTOCOLO EXCEL	
PASO 1	IR A PESTAÑA "1_Dashboard" Esta es la pestaña principal donde se realizan los calculos.
PASO 2	INGRESAR DATOS EN CELDAS AMARILLAS B5: Peso del plastico recolectado en kg B6: Tipo de plastico (menu desplegable) B7: Ubicacion (rio, canal, etc.) B8: Fecha
PASO 3	VERIFICAR CALCULOS AUTOMATICOS Todos los indicadores en filas 15-29 se calculan automaticamente. Revisar Beneficios Ambientales en la parte inferior.
PASO 4	CONSULTAR FACTORES DE CARACTERIZACION Ir a pestaña "2_Factores_Polimeros" para ver valores por tipo. Color-coded: verde = bajo impacto, rojo = alto impacto.
PASO 5	REVISAR NORMAS APLICADAS Ir a pestaña "3_Normas_ISO" para consultar marco normativo. Cada norma tiene resumen cientifico detallado.
PASO 6	CONSULTAR REFERENCIAS JCR Ir a pestaña "4_Referencias_JCR" para 20+ estudios validadores. Incluye DOI, revista, factor impacto, y resumen.
PASO 7	REVISAR METODOLOGIA Ir a pestaña "5_Metodologia_Calculo" para formulas detalladas. Cada indicador con supuesto, deduccion, incertidumbre.
PASO 8	VALIDAR SUPUESTOS Ir a pestaña "6_Supuestos_Limitaciones" para revisar criticamente. Documentar desviaciones si aplica.
PASO 9	EJECUTAR ANALISIS DE SENSIBILIDAD Ir a pestaña "7_Analisis_Sensibilidad". Comparar escenarios optimista/base/pesimista ($\pm 20\%$).
PASO 10	COMPARAR CON ESCENARIOS ALTERNATIVOS Ir a pestaña "8_Comparativa_Escenarios". Ver comparacion recoleccion vs vertedero vs incineracion vs no-intervencion.
PASO 11	REGISTRAR EVALUACION Ir a pestaña "9_Registro_Historico". Copiar datos de Dashboard a nueva fila del registro.
PASO 12	CONSULTAR GLOSARIO Ir a pestaña "10_Glosario" si hay dudas sobre terminos tecnicos.

Figura 7: Pestaña de instrucciones de la herramienta

La herramienta desarrollada constituye la materialización operativa de los marcos metodológicos del Índice de Impacto Ambiental Evitado descrito a lo

largo del capítulo anterior. A partir de una única variable de campo y de los factores de caracterización obtenidos en las metodologías, el IIAE calcula automáticamente quince indicadores de impacto distribuidos en cinco dominios ambientales, evalúa su robustez mediante el análisis de sensibilidad y contextualiza los resultados frente a alternativas de gestión.

El funcionamiento de la herramienta se muestra en el Capítulo 4 mediante su aplicación al caso real de estudio de los arroyos de Montevideo.



4. CASO DE ESTUDIO Y RESULTADOS

4.1. Descripción del Caso de Estudio

El departamento de ingeniería mecánica de la UMH, la Intendencia de Montevideo y la Facultad de Ingeniería de la Udelar pusieron en marcha entre 2023 y 2025 un programa de instalación de biobardas low cost en los afluentes urbanos de Montevideo. El proyecto contemplaba inicialmente la **instalación de diecisiete dispositivos**, de los cuales **finalmente se instalaron nueve**, quedando actualmente **tres en operación** en distintos puntos de la ciudad. Esta reducción respecto al plan inicial refleja las dificultades logísticas y de mantenimiento respecto a proyectos de interceptación fluvial en contextos urbanos del Sur Global, donde la infraestructura de gestión de residuos es limitada.

Las tres biobardas actualmente operativas se encuentran distribuidas en arroyos urbanos de distintas zonas de Montevideo, como muestra la *Figura 8*.

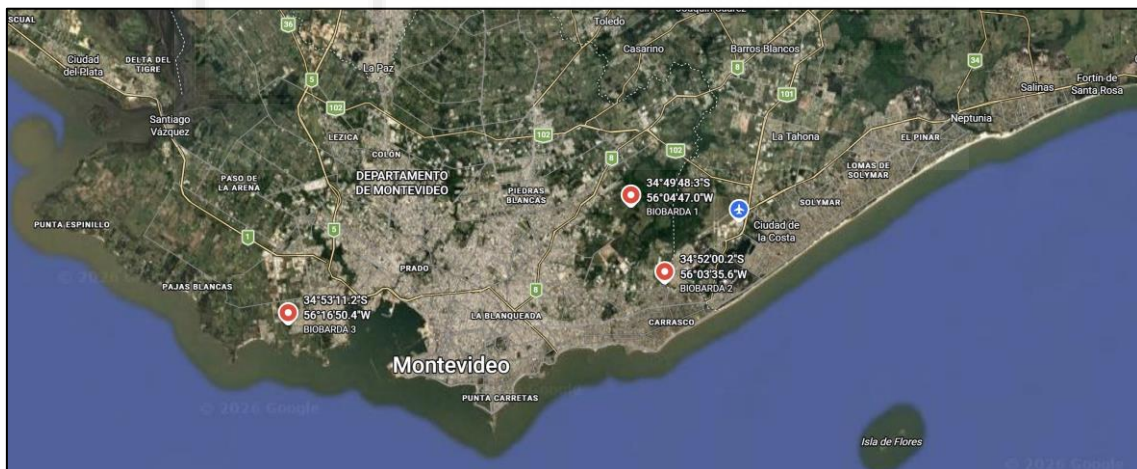


Figura 8: Emplazamiento de las 3 biobardas operativas en los arroyos urbanos de Montevideo

Sus ubicaciones son las siguientes:

- **Biobarda 1: Arroyo Chacarita de los Padres:** instalada aguas abajo de la intersección de Chacarita y Camino Dionisos, junto al Complejo Old Boys, en la zona noreste de la ciudad (*Figura 9*).

- **Biobarda 2: Arroyo Carrasco:** instalada junto al Museo y Parque Fernando García (Camino Carrasco 7445), en el entorno del Arroyo Carrasco antes de su desembocadura en el Río de la Plata (*Figura 9*).
- **Biobarda 3: Cañada Bélgica / Bajo Valencia:** instalada en la Costanera Casabó con continuación Rusia, en la zona oeste de Montevideo, próxima al estuario (*Figura 10*).

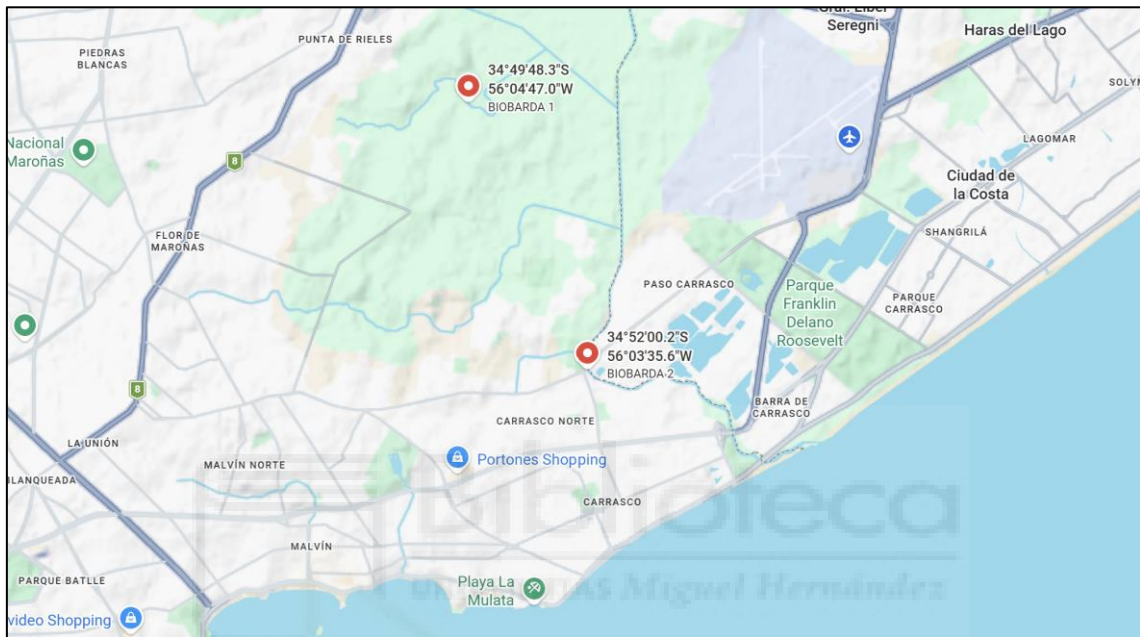


Figura 9: Situación de Biobardas 1 y 2

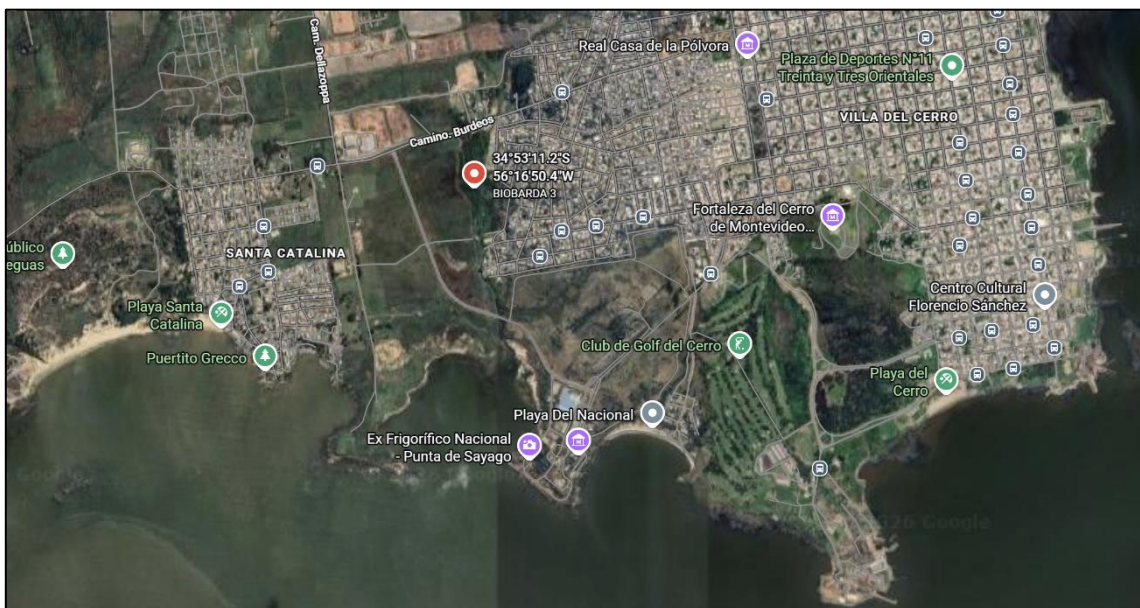


Figura 10: Situación de Biobarda 3

Esta distribución geográfica muestra dos zonas de instalación: el Arroyo Chacarita y el Arroyo Carrasco drenan zonas residenciales de densidad media-alta del norte y este de la ciudad (se muestra en la *Figura 11*), mientras que la Cañada Bélgica recorre el Bajo Valencia, un área de menor infraestructura en el oeste. Los tres sistemas desembocan directa o indirectamente en el Océano Atlántico Sur, convirtiéndolos en vectores relevantes de contaminación plástica marina.

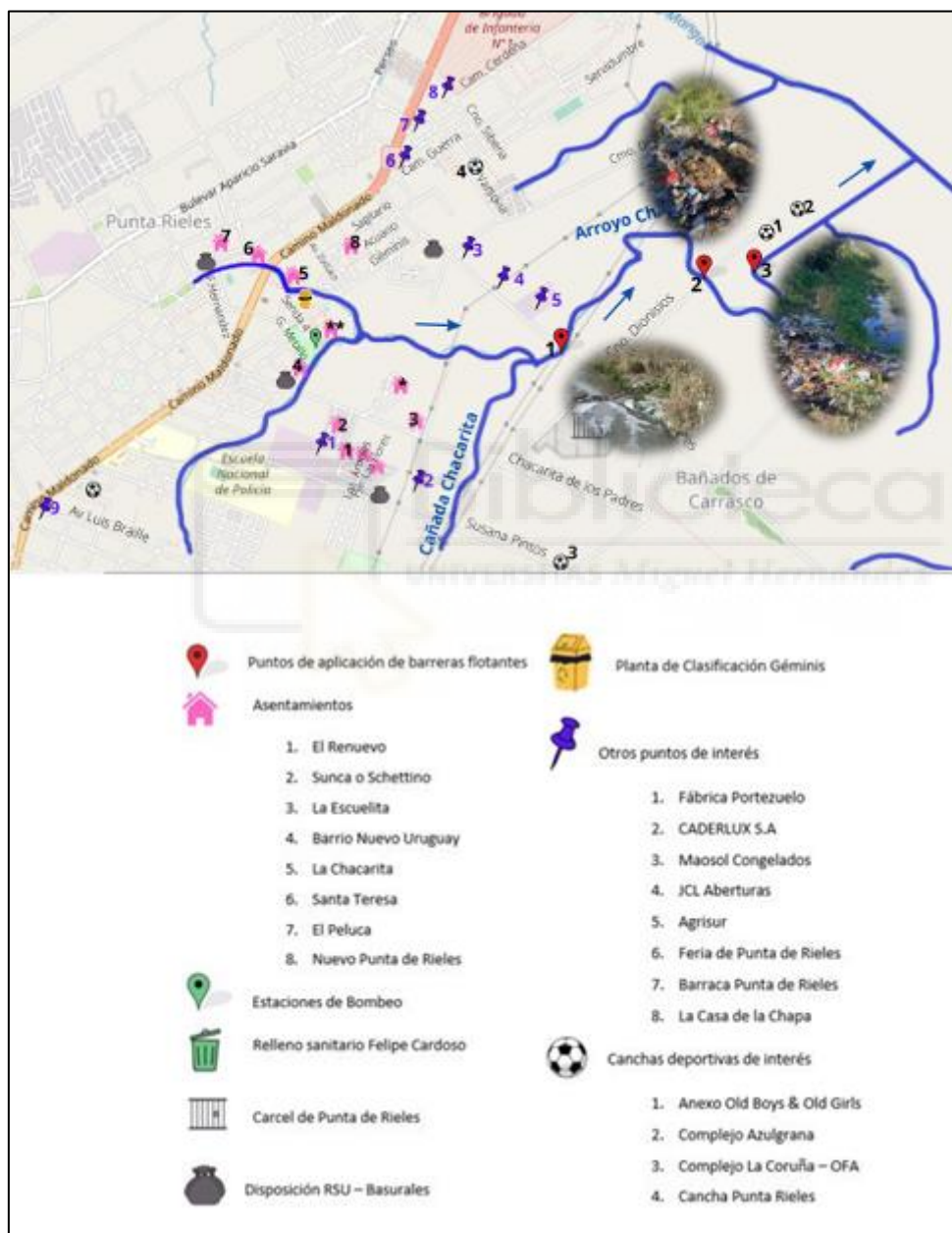


Figura 11: Mapa de la zona del arroyo de Chacarita con diferentes puntos de interés, obtenido de Informe Final CSIC IM.

El presente capítulo documenta y analiza la actividad de estas biobardas durante el mes de mayo de 2023, que son los registros que podemos hacer públicos, ya que la Intendencia de Montevideo no quiere que todos los registros de recolección sean publicados. En primer lugar, se describe el trabajo de campo realizado: el protocolo de monitoreo, las jornadas de recolección, pesaje, y la caracterización visual de los residuos. A continuación, se aplica la herramienta del IIAE a los datos reales obtenidos, calculando así los indicadores de impacto ambiental evitado. Finalmente, el capítulo cierra con la discusión de resultados, incluyendo la comparativa de escenarios de gestión para el caso específico de Montevideo.

4.2. Trabajo de Campo

4.2.1. La Biobarda

La biobarda es un **dispositivo de retención pasiva** de objetos flotantes diseñado para instalarse en sistemas fluviales urbanos. Su funcionamiento se basa en un principio simple: una barrera física anclada transversalmente al cauce intercepta los residuos sólidos que flotan antes de que avancen hacia el océano.

Una de las características más relevantes de este dispositivo desde el punto de vista de la economía circular es que **está fabricado con materiales plásticos usados y reciclados**. Esto significa que la propia herramienta de intercepción es en sí misma un producto de valorización de residuos plásticos, lo que refuerza su coherencia con los principios de sostenibilidad que persigue. Su **bajo coste de fabricación** e instalación, y la ausencia de requerimientos energéticos durante su operación lo convierten en una solución especialmente adecuada para **contextos con recursos limitados**, como los municipios del Sur Global donde la infraestructura de gestión de residuos es insuficiente. La DIA-IMFIA de la Facultad de Ingeniería UdelaR en el *Informe Final CSIC IM Gestión De Residuos Sólidos En La Trama Hídrica De Montevideo*, orientada a su reducción demostró precisamente esto, una **biobarda de 10 m** cuesta aproximadamente 2200 pesos uruguayos, que al cambio serían aproximadamente **50 euros**. Además, exponen que para el correcto funcionamiento de la biobarda se necesitan dos operarios, que revisen y mantengan la biobarda con sus

respectivos EPIS. Estos mismos operarios realizarían las tareas de recolección y pesaje. Tal como se muestra en las *Figuras 12 y 13*.



Figura 12: Imágenes de la construcción de la biobarda del Informa Final CSIC IM



Figura 13: Biobarda instalada en Arroyo Chacarita el 8 de mayo de 2023

El sistema de **3 biobardas instaladas** en los arroyos de Montevideo opera precisamente bajo esta lógica: una **inversión mínima** en dispositivos de bajo coste, **fabricados con residuos**, capaz de **interceptar cientos de kilogramos** de plástico por ciclo de recolección antes de que alcancen el ecosistema marino.

4.2.2. Protocolo de Monitoreo

El seguimiento del estado y funcionamiento de las biobardas se realizó mediante visitas periódicas al campo durante el mes de mayo de 2023. Estas visitas permitieron documentar visualmente la acumulación progresiva de residuos en los dispositivos, verificar la integridad estructural de las biobardas y determinar el momento óptimo para la recolección, como se puede observar en la *Figura 14*.

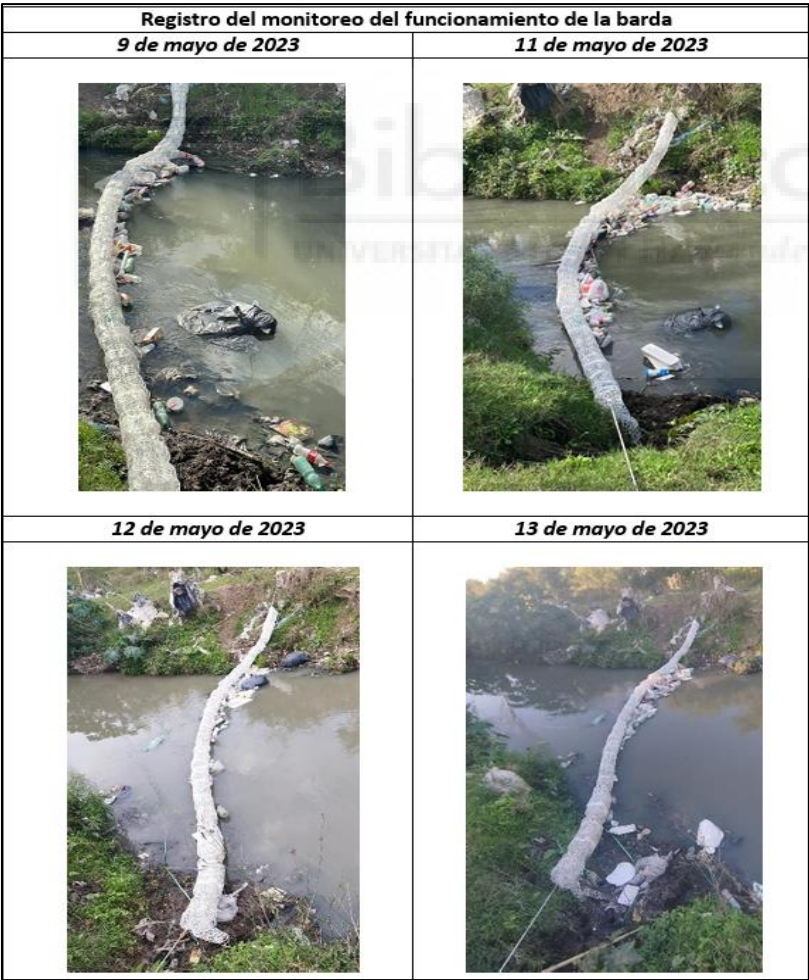


Figura 14: Registro de monitoreo de la biobarda en distintas fechas de mayo 2023

Las imágenes del monitoreo evidencian la eficacia del dispositivo como sistema de retención pasiva: en el intervalo de apenas cuatro días entre el 9 y el 13 de mayo (11 de mayo se recolecta) se observa una acumulación visible de residuos plásticos de diversa tipología, confirmando que el cauce presenta una carga de contaminación plástica significativa y continua.

4.2.3. Jornadas de Recolección y Pesaje

Durante el periodo de estudio se llevaron a cabo cuatro jornadas de recolección y pesaje de los residuos acumulados en las tres biobardas del sistema. La *Tabla 8* recoge las fechas y masas recolectadas en cada jornada.

Tabla 8: Jornada de recolección y masa de residuos recolectados en 9 biobardas

Fecha de recolección y pesaje	Masa recolectada (kg)
10-11 de mayo de 2023	43,3
16 de mayo de 2023	74,8
18 de mayo de 2023	57,5
23 de mayo de 2023	116,6
Total	292,2

Nota: La Tabla 8 se extrae del Informe Final CSIC IM de la DIA-IMFIA

El total de **292,2 kg de mezcla urbana** recolectados en un periodo de aproximadamente **dos semanas** por biobarda , sirve para plantear una media de 300 kg de mezcla urbana cada dos semanas , lo que **supondría 7800 kg de residuos recolectados al año por biobarda al año**. La variabilidad entre jornadas la asumimos a la dinámica natural de acumulación de residuos, condicionada entre otros factores por las precipitaciones previas y el caudal del arroyo, entre muchos otros. **Benítez et al. (2008)** afirman que el comportamiento de la generación de residuos sólidos domiciliarios depende de muchas variables y muchas veces la relación entre ellas no es tan directa. En la *Figura 15* se observan los residuos acumulados en la biobarda antes de su recolección y en la *Figura 16* se muestra la recolección.

<i>Jornadas de recolección de residuos</i>	
<i>10 de mayo de 2023</i>	<i>16 de mayo de 2023</i>
	
<i>18 de mayo de 2023</i>	<i>23 de mayo de 2023</i>
	

Figura 15: Jornadas de recolección de residuos acumulados en las biobardas durante mayo 2023



Figura 16: Recolección de Arroyo Chacarita en 16 de mayo de 2023.

4.2.4. Caracterización de los residuos y justificación de Mezcla Urbana

La caracterización de los residuos recolectados en cada jornada se realizó mediante inspección visual en campo. La *Figura 17* muestra el aspecto de los residuos en cada una de las cuatro jornadas de pesaje.

La inspección visual revela una composición heterogénea dominada por envases plásticos de un solo uso, bolsas, fragmentos de films y otros residuos de origen doméstico e industrial urbano. Este análisis es consistente con la composición documentada por **Brewster et al. (2025)** para canales urbanos del Sur Global y justifica la aplicación de la categoría **Mezcla Urbana** como parámetro de entrada en la herramienta del IIAE para el caso de estudio planteado. LA segregación por polímero no fue posible en campo dadas las condiciones operativas de recolección, lo que es habitual en estudios de este tipo (Brewster et al., 2025).

Una vez obtenidos todos los datos en campo, se procede a la aplicación de la herramienta del IIAE, para observar los indicadores ambientales y beneficios evitados gracias a la recolección de los residuos urbanos en los arroyos de Montevideo.

Caracterización de los residuos en cada jornada de pesaje.	
11 de mayo de 2023	16 de mayo de 2023
	
18 de mayo de 2023	23 de mayo de 2023
	

Figura 17: Caracterización visual de los residuos recolectados en cada jornada de pesaje

4.3. Aplicación del IIAE

Se aplican los datos reales obtenidos en el trabajo de campo, descritos en el apartado anterior a la herramienta en formato Excel, documentada en el capítulo 3. Los parámetros introducidos en las celdas de entrada del Dashboard se presentan en la *Tabla 9* y la *Figura 18* siguientes:

Tabla 9: Datos introducidos en la herramienta del IIAE

Celda	Parámetro	Valor
B5	Masa recolectada en kg	292,2 kg
B6	Tipo de Plástico	Mezcla Urbana
B7	ID / Nombre de la biobarda	3 BB activas
B8	Fecha de recolección	2023-05-20

B9	Región geográfica	América Latina
B10	Factor de gestión de residuos (R)	0,9
B11	Incertidumbre de medición	5%

Nota: La tabla es de elaboración propia siguiendo la herramienta del IIAE

ACV PLÁSTICOS MARINOS — BIOBARDAS MONTEVIDEO · DASHBOARD PRINCIPAL

Versión 4.0 | ISO 14040/44:2006 + GLAM v1.0 (UNEP-SETAC 2024) + MarILCA v1.2 (2024) + ReCiPe 2016 v1.1 + IPCC AR6 (2023)

SECCIÓN A — DATOS DE ENTRADA (editar únicamente celdas amarillas)

Parámetro	Valor de entrada	Descripción / Instrucción
B5 — Masa plástico recolectado (kg)	292,2	Número mayor a 0 (kg de plástico seco pesado en campo)
B6 — Tipo de plástico	Mezcla Urbana	Seleccionar de la lista desplegable
B7 — ID / Nombre de la biobarda	3 BB activas	Texto libre — p.ej. BB-BajoValencia, BB-Miguelete
B8 — Fecha de recolección	20/05/2023	Formato YYYY-MM-DD
B9 — Región geográfica	América Latina	América Latina / Europa / Asia / África / Oceanía
B10 — Factor regional R (0.0 – 1.0)	0,9	0.9 recomendado para Montevideo (gestión parcial)
B11 — Incertidumbre de medición (%)	5	5 % por defecto según ISO 14044

SECCIÓN B — FACTORES APLICADOS (calculados automáticamente — no editar)

Factor	Valor	Unidad
GWP polímero (kg CO ₂ /kg)	3,200	kg CO ₂ /kg
Ecotox. marina (kg 1,4-DCB/kg)	0,148	kg 1,4-DCB/kg
Ecotox. agua dulce (kg 1,4-DCB/kg)	0,118	kg 1,4-DCB/kg
Fragmentación microplásticos (%)	44,000	%
Tiempo degradación (años)	650,000	años
Densidad (g/cm³)	1,050	g/cm³
Factor regional R	0.900	0 – 1

Figura 18: Imagen de celdas de entrada del Dashboard completadas con los datos reales del caso de estudio

Los resultados calculados automáticamente por la herramienta para los indicadores principales y complementarios se presentan en la *Figura 19* y se recogen de forma detallada en la *Tabla 10*.

SECCIÓN C — 15 INDICADORES DE IMPACTO EVITADO (ISO 14044 + ReCiPe 2016 v1.1 + GLAM v1.0 + IPCC AR6 + MarILCA v1.2)							
#	Indicador	Resultado	Unidad	Fórmula aplicada	Incertidumbre	Marco normativo	
1	GWP-100 — Calentamiento global	841,54	kg CO ₂ eq	$M \times GWP \times R$	±10%	IPCC AR6 2023	
2	Huella Carbono Ext	900,44	kg CO ₂ eq	$M \times GWP \times 1.07 \times R$	±12%	ISO 14067:2018	
3	Ecotoxicidad Marina	38,92	kg 1,4-DCB eq	$M \times Ecotox_m \times R$	±25%	MarILCA v1.2 (2024)	
4	Ecotoxicidad Agua Dulce	31,03	kg 1,4-DCB eq	$M \times Ecotox_ad \times R$	±30%	ReCiPe 2016 v1.1	
5	Acidificación Atmosférica	2,39	kg SO ₂ eq	$M \times AP_factor \times R$	±15%	ReCiPe 2016 v1.1	
6	Eutrofización Acuática	3,42	kg PO ₄ eq	$M \times EP_factor \times R$	±18%	ReCiPe 2016 v1.1	
7	Agotamiento Recursos Fósiles	9,20	kg Sb eq	$M \times ADP_factor \times R$	±12%	ReCiPe 2016 v1.1	
8	Combustibles Fósiles	20.512,44	MJ	$M \times MJ_factor \times R$	±10%	Geyer 2017 Sci Adv.	
9	Microplásticos Liberados	115,71	kg MP	$M \times (Frag\%/100) \times R$	±20%	MarILCA v1.2 (2024)	
10	Impacto Acuático de Nutrientes	65,75	kg CO ₂ eq	$M \times 0.25 \times R$	±30%	GLAM v1.0 (2024)	
11	Enredamiento Megafauna	5,26	PDF.yr	$M \times 0.02 \times R$	±35%	GLAM v1.0 / MarILCA	
12	Formación Ozono F	4,73	kg NMVOC eq	$M \times 0.018 \times R$	±15%	ReCiPe 2016 v1.1	
13	Material Particulado	1,18	kg PM2.5 eq	$M \times 0.0045 \times R$	±18%	ReCiPe 2016 v1.1	
14	Toxicidad Humana	9,99	CTUh	$M \times 0.038 \times R$	±25%	USEtox 2.1	
15	Ocupación Espacio	604,85	m².año	$M \times 2.3 \times R$	±20%	GLAM v1.0 (2024)	
SECCIÓN D — BENEFICIOS AMBIENTALES CUANTIFICADOS (para comunicación científica y pública)							
#	Beneficio	Valor	Unidad	Equivalencia práctica	Fuente		
1	Emisiones de CO ₂ evitadas	841,54	kg CO ₂ eq	182,9426 km en auto	IPCC AR6		
2	Fauna marina protegida	736,34	individuos	736,344 individuos (peces/aves/tortugas)	Simon 2022		
3	Microplásticos evitados	115,71	kg MP	115711200,0 partículas estimadas	MarILCA v1.2 (2024)		
4	Área marina protegida	396,18	m²	0.000 hectáreas	GLAM v1.0 (2024)		
5	Combustibles fósiles evitados	455,83	kg petróleo eq	379,8600 litros de gasolina	Geyer 2017		
6	Agua ahorrada	4.523,26	litros	30,1550 duchas de 10 min	ISO 14046		
7	Energía ahorrada	20.512,44	MJ	0.006 MWh	Geyer 2017		
8	Aditivos tóxicos no liberados	21,04	kg	021 kg (ftalatos, BPA, retardantes llama)	Hahladakis et al. 2021		

Figura 19: Resultados de los 15 indicadores y 8 beneficios ambientales del IIAE para el caso de estudio de Montevideo (292,2 kg, Mezcla Urbana, R=0,9)

Tabla 10: Resultados de los 15 indicadores del IIAE para el caso de estudio de Montevideo (292,2 kg, Mezcla Urbana, R=0,9)

#	Indicador	Resultado	Unidad
1	GWP-100 — Calentamiento Global	841,54	kg CO ₂ eq
2	Huella Carbono Extendida (+degradación marina)	900,44	kg CO ₂ eq
3	Ecotoxicidad Marina (MarILCA v1.2)	38,92	kg 1,4-DCB eq
4	Ecotoxicidad Agua Dulce (ReCiPe)	31,03	kg 1,4-DCB eq
5	Acidificación Atmosférica AP (ReCiPe)	2,39	kg SO ₂ eq
6	Eutrofización Acuática EP (ReCiPe)	3,42	kg PO ₄ eq
7	Agotamiento Recursos Abióticos ADP	9,20	kg Sb eq
8	Combustibles Fósiles Conservados	20.512,44	MJ
9	Microplásticos Liberados Evitados	115,71	kg MP
10	Impacto Acuático de Microplásticos	65,75	kg CO ₂ eq
11	Enredamiento Megafauna (Høiberg 2024)	5,26	PDF.yr
12	Formación Ozono Fotoquímico (ReCiPe)	4,73	kg NMVOC eq
13	Material Particulado PM2.5 (ReCiPe)	1,18	kg PM2.5 eq
14	Toxicidad Humana Cancerígena (USEtox 2.1)	9,99	CTUh
15	Ocupación Espacio Marino	604,85	m ² .año

Nota: La tabla es de elaboración propia siguiendo la herramienta del IIAE

Finalmente, la pestaña 8 Comparativa de Escenarios contextualiza los resultados en función de la alternativa de gestión del plástico recolectado seleccionada. En la *Figura 20* se muestra la comparativa para el caso de estudio, donde los valores en negativo indican un beneficio ambiental evitado, y los valores positivos indican daño ambiental generado.

COMPARATIVA DE 4 ESCENARIOS ALTERNATIVOS DE GESTIÓN DE RESIDUOS					
Los valores del Escenario Base se toman del Dashboard. Negativo = beneficio ambiental (impacto evitado).					
Indicador	Reciclaje + Recolección	Recolección	4. Sin intervención (PEOR)	Diferencia mejor→peor	Unidad
GWP-100	-841,54	841,54	841,54	1.683,07	kg CO ₂ eq
Huella Carbono Extendida	-900,44	900,44	900,44	1.800,89	kg CO ₂ eq
Ecotoxicidad Marina	-38,92	-38,92	38,92	77,84	kg 1,4-DCB eq
Ecotoxicidad Agua Dulce	-31,03	-31,03	31,03	62,06	kg 1,4-DCB eq
Acidificación Atmosférica AP	-2,39	2,39	2,39	4,79	kg SO ₂ eq
Eutrofización Acuática EP	-3,42	-3,42	3,42	6,84	kg PO ₄ eq
Agotamiento Recursos Abióticos ADP	-9,20	9,20	9,20	18,41	kg Sb eq
Combustibles Fósiles Conservados	-20.512,44	20.512,44	20.512,44	41.024,88	MJ
Microplásticos Liberados Evitados	-115,71	-115,71	115,71	231,42	kg MP
Impacto Acuático de Microplásticos	-65,75	-65,75	65,75	131,49	kg CO ₂ eq
Enredamiento Megafauna	-5,26	-5,26	5,26	10,52	PDF.yr
Formación Ozono Fotoquímico	-4,73	-4,73	4,73	9,47	kg NMVOC eq
Material Particulado PM2.5	-1,18	1,18	1,18	2,37	kg PM2.5 eq
Toxicidad Humana Cancerígena	-9,99	-9,99	9,99	19,99	CTUh
Ocupación Espacio Marino	-604,85	-604,85	604,85	1.209,71	m ² .año

Figura 20: Comparativa de escenarios para el caso de estudio de Montevideo (292,2 kg, Mezcla Urbana, R=0,9)

Concluida la presentación de los resultados del caso de estudio de los arroyos urbanos de Montevideo, en el siguiente apartado se valoran y discuten los resultados obtenidos.

4.4. Valoración de Resultados

Antes de interpretar los resultados, es necesario precisar el alcance metodológico de los indicadores reportados en el contexto específico de este caso de estudio. En el contexto de las biobardas de Montevideo, donde la valorización post-recolección de los residuos extraídos no es operativamente viable dada su elevada degradación y heterogeneidad, los indicadores asociados al ciclo de producción del plástico virgen (GWP-100, Huella de Carbono Extendida, Acidificación Atmosférica, Agotamiento de Recursos Abióticos y Combustibles Fósiles, y Material Particulado PM2.5) se materializan por completo únicamente si el plástico interceptado sustituye la producción virgen mediante reciclaje. Su inclusión en la herramienta responde a que el IIAE está diseñado para cualquier caso de uso, incluyendo aquellos donde el reciclaje sí esté disponible. La discusión que sigue prioriza los indicadores cuyo beneficio se materializa por el solo hecho de interceptar el residuo, con independencia de su destino posterior.

En la *Tabla 11*, se exponen todos los resultados de los indicadores del Índice de Impacto Ambiental Evitado, asociados únicamente a la recolección de los residuos.

Tabla 11: Indicadores del IIAE asociados exclusivamente a la recolección para el caso de estudio de Montevideo (292,2 kg, Mezcla Urbana, R=0,9)

#	Indicador	Resultado	Unidad
3	Ecotoxicidad Marina (MarILCA v1.2)	38,92	kg 1,4-DCB eq
4	Ecotoxicidad Agua Dulce (ReCiPe)	31,03	kg 1,4-DCB eq
6	Eutrofización Acuática EP (ReCiPe)	3,42	kg PO ₄ eq
9	Microplásticos Liberados Evitados	115,71	kg MP
10	Impacto Acuático de Microplásticos	65,75	kg CO ₂ eq
11	Enredamiento Megafauna (Høiberg 2024)	5,26	PDF.yr
12	Formación Ozono Fotoquímico (ReCiPe)	4,73	kg NMVOC eq
14	Toxicidad Humana Cancerígena (USEtox 2.1)	9,99	CTUh
15	Ocupación Espacio Marino	604,85	m ² .año

Nota: Tabla extraída de la herramienta del IIAE, pestaña 8, columna de recolección, valores en verde.

Los **indicadores ecotoxicológicos** constituyen el núcleo más sensible desde la perspectiva del valor protegido por la intervención, en el caso de estudio se evita **38,92 kg 1,4-DCB** equivalente de ecotoxicidad marina, cuantificada conforme a MarILCA v1.2 (2024), y **31,03 kg 1,4-DCB** equivalente de ecotoxicidad de agua dulce, conforme a los factores actualizados de ReCiPe 2016 v1.1 incorporados por Schwarz et al. (2024) tras la integración del modelo multimedia SimpleBox4Plastics y la actualización de las curvas de sensibilidad de especies. El daño ecotoxicológico proviene del contacto del plástico y de sus aditivos con la biota acuática, mecanismo cuya interrupción es directa por la intercepción y no requiere supuestos sobre el destino post-recolección del material. La sensibilidad metodológica de estos indicadores —con coeficientes de variación documentados entre el 25 % y el 30 % (Boulay et al., 2022)— responde al carácter emergente de los factores de caracterización para macro y microplásticos, todavía en proceso de regionalización (Louvet et al., 2026); las cifras deben interpretarse, por tanto, como estimaciones de orden de magnitud y no como valores puntuales. La ecotoxicidad de agua dulce adquiere particular relevancia para los arroyos de Montevideo, dado que las biobardas actúan precisamente en el punto donde el impacto sobre el ecosistema fluvial sería máximo, antes de la dilución en el Océano Atlántico Sur.

Eutrofización acuática y formación de ozono fotoquímico suponen, tras la intercepción, un ahorro de **3,42 kg PO₄** equivalente de eutrofización acuática y **4,73 kg NMVOC equivalente** de formación de ozono fotoquímico, computados conforme a ReCiPe 2016 v1.1. La degradación de los plásticos en el medio receptor libera fósforo y nitrógeno derivados de aditivos y de las biopelículas adheridas a su superficie, fenómeno que en canales urbanos se acopla a la carga eutrofizante ya elevada de las aguas pluviales. Por el otro lado, la formación de ozono troposférico está asociada a la emisión de compuestos orgánicos volátiles durante la degradación fotoquímica del plástico en agua, fenómeno documentado por Walsh et al. (2021) como dependiente de la formulación específica del polímero (incluyendo aditivos y peso molecular), lo que justifica el rango de incertidumbre de $\pm 15\%$ aplicado al indicador. A diferencia de las emisiones de producción, este componente está vinculado de forma directa a la degradación in situ del residuo en el cauce y, por tanto, su evitación es atribuible inequívocamente a la intercepción.

La intercepción evita la liberación al medio acuático de **115,71 kg de microplásticos** (magnitud equivalente, suponiendo una partícula media de 1 mg, aproximadamente a $1,15 \times 10^8$ partículas microplásticas) y un impacto adicional sobre la **cadena trófica acuática estimada en 65,75 kg CO₂ equivalente**, conforme al marco GLAM v1.0 (2024). Estos resultados se sustentan en la fracción de fragmentación característica de la mezcla urbana (44 %), construida a partir de la composición real documentada por Brewster et al. (2025) y de las tasas específicas por polímero actualizadas por Walsh et al. (2025). La fragmentación constituye un beneficio total, ya que se materializa por el solo hecho de interceptar el residuo antes de su entrada al sistema acuático, con independencia del destino post-recolección del material, lo que confiere a esta cuantificación una robustez metodológica especialmente alta para su comunicación científica.

En cuanto a el impacto sobre la integridad ecosistémica podemos indicar que se evitan **5,26 PDF-año de enredamiento potencial de megafauna marina** (indicador específico para macroplásticos desarrollado por Høiberg et al., 2024),

y la **ocupación potencial de 605 m²·año de espacio marino**, conforme al marco GLAM v1.0 (2024). El primero cuantifica el riesgo de enredamiento letal de tortugas, cetáceos y aves marinas asociado principalmente a bolsas, redes abandonadas y envases flotantes, y constituye el primer conjunto de factores de caracterización publicado para macroplásticos en ACV, el segundo refleja la pérdida de espacio útil para especies pelágicas y la alteración de la distribución de luz en superficie debida a residuos flotantes, así como la afectación del compartimento bentónico para los polímeros más densos (PET y PVC).

El **indicador de toxicidad humana** cancerígena, computado conforme a USEtox 2.1 (Fantke et al., 2017), asciende a **9,99 CTUh** para la masa interceptada. Este valor cuantifica el riesgo cancerígeno asociado a los aditivos presentes en los plásticos —ftalatos, BPA y retardantes de llama bromados— que se liberarían durante su degradación marina y alcanzarían la cadena alimentaria humana a través de la ingesta de pescado contaminado por bioacumulación trófica. La incertidumbre del indicador es de $\pm 25\%$ por la complejidad de los procesos de transferencia, y debe interpretarse como una estimación de orden de magnitud.

En conclusión, con una biobarda, se han recolectado casi 300 kg de mezcla urbana en apenas dos semanas. Esto representa un Impacto Ambiental Evitado altamente significativo, donde se previno la llegada al océano de 115 millones de partículas, casi 39 kg de aditivos tóxicos y además de evitar la ocupación de 605 m² de espacio marino ocupado con residuos. Estos datos demuestran la eficacia del sistema y son clave para incentivar a países en vías de desarrollo a adoptar estas barreras de intercepción pasiva, como solución para reducir la contaminación en nuestros océanos.

5. CONCLUSIONES

El presente Trabajo de Fin de Grado ha desarrollado el Índice de Impacto Ambiental Evitado (IIAE), un protocolo de cuantificación basado en el Análisis del Ciclo de Vida que permite transformar la masa de residuos plásticos interceptada por una biobarda en un conjunto de indicadores ambientales normalizados internacionalmente. El protocolo responde a una necesidad real y documentada: la ausencia de un marco metodológico estandarizado que vaya más allá de la masa bruta recolectada para cuantificar el beneficio ambiental real de las intervenciones de interceptación fluvial.

El primer objetivo específico, el establecimiento de un marco metodológico robusto, se ha completado mediante la integración de cuatro marcos metodológicos: ISO 14040:2006 e ISO 14044:2006 como un marco normativo obligatorio, ReCiPe 2016 v1.1 para los indicadores clásicos del ACV, MarILCA v1.2 (2024) para los impactos específicos de los plásticos en el medio marino, y GLAM v1.0 (UNEP-SETAC, 2024) como marco de armonización global que consolida y valida los indicadores de distintas fuentes, otorgándoles reconocimiento internacional. El resultado son quince indicadores de impacto distribuidos en cinco dominios ambientales y diferenciados metodológicamente entre indicadores principales (con factor de caracterización polímero-específico) e indicadores complementarios (con factor constante por polímero), lo que permite al IIAE distinguir el daño ambiental de un kilogramo de PVC del de PET, superando la limitación de los ACV convencionales que tratan todos los plásticos de forma equivalente.

El segundo objetivo, la parametrización del IIAE para el contexto regional de Montevideo, se ha materializado en la adopción de la categoría Mezcla Urbana como parámetro de entrada (fundamentada en la composición real documentada por Brewster et al., 2025) y en la asignación de un factor regional $R=0,9$, coherente con la cobertura parcial del sistema de gestión municipal de residuos de Montevideo conforme a la evidencia de Meijer et al. (2021). La imposibilidad operativa de segregar por polímero en las condiciones de campo reales de los

arroyos de Montevideo refuerza la pertenencia de esta categoría como opción metodológicamente robusta para entornos del Sur Global.

El tercer objetivo, la implementación y documentación de la herramienta de cálculo, se ha completado con el desarrollo de la herramienta “ACV_Plasticos_Marinos_BIOBARDAS.xlsx”, estructurada en doce pestañas interconectadas que cubren desde la interfaz de cálculo hasta el registro histórico de hasta cien evaluaciones. La herramienta está diseñada para ser operada por usuarios sin formación especializada en ACV, automatiza el cálculo de los quince indicadores, el análisis de sensibilidad y la comparativa de tres escenarios de gestión, y cumple con los requisitos de transparencia metodológica exigidos por ISO 14044:2006.

El cuarto objetivo, la validación del IIAE con datos reales del caso de estudio, se ha llevado a cabo la aplicación de la herramienta a los 292,2 kg de Mezcla Urbana recolectados en cuatro jornadas de campo en mayo de 2023 sobre las tres biobardas activas del sistema de Montevideo. Los resultados muestran que la interceptación evitó, 115,71 kg de microplásticos al Océano (equivalente a aproximadamente $1,15 \times 10^8$ partículas), 38,92 kg 1,4-DCB eq de ecotoxicidad marina, 5,26 $PDF \cdot yr$ de enredamiento potencial de megafauna y $604,85 m^2 \cdot año$ de ocupación de espacio marino. La comparativa de escenarios evidencia que incluso en ausencia de reciclaje, la sola interceptación genera un beneficio ambiental neto inmediato e irreversible sobre nueve de los quince indicadores, lo que constituye el argumento cuantitativo central para justificar el mantenimiento y la ampliación de la red de biobardas a nivel global.

El protocolo IIAE presenta limitaciones que deben tenerse en cuenta en su aplicación conforme a la cláusula 4.2.3.6 de ISO 14044:2006. En primer lugar, los factores de caracterización empleados corresponden a promedios globales no regionalizados para el Atlántico Sur, lo que introduce una incertidumbre adicional estimada en $\pm 20\%$ que se reducirá cuando estén disponibles los factores regionalizados de MarILCA v2.0. En segundo lugar, los indicadores de ecotoxicidad marina y de fragmentación a microplásticos se encuentran en fase de desarrollo metodológico activo y de revisión sistemática (Jiao et al., 2024), por lo que su verificación periódica conforme se consoliden las actualizaciones

de MarILCA, GLAM y ReCiPe constituye un requisito de buena práctica recomendado. Finalmente, Los seis indicadores dependientes del ciclo de producción plástica no son aplicables como beneficios garantizados en contextos donde el reciclaje post-recolección no esté disponible, como es el caso de estudio actual de las biobardas de Montevideo. Su inclusión en la herramienta responde a que el protocolo está diseñado para cualquier caso de uso, incluyendo aquellos donde la valorización sea factible.



6. ANEXOS

ANEXO I: GLOSARIO

1,4-DCB eq — 1,4-diclorobenceno equivalente. Sustancia de referencia internacional para la toxicidad acuática en ACV. Todos los factores de ecotoxicidad marina y de agua dulce se expresan en esta unidad para permitir la comparabilidad entre estudios.

ACV (LCA) — Análisis del Ciclo de Vida. Metodología sistemática para evaluar las cargas ambientales asociadas a un producto, servicio o sistema a lo largo de todas las etapas de su existencia, desde la extracción de materias primas hasta su disposición final. Normalizado bajo ISO 14040:2006 e ISO 14044:2006.

ADP — Abiotic Depletion Potential. Potencial de agotamiento de recursos abióticos. Cuantifica el consumo de recursos minerales no renovables expresado en kilogramos de antimonio equivalente (kg Sb eq). Metodología CML-IA baseline.

AP — Acidification Potential. Potencial de acidificación atmosférica. Cuantifica las emisiones de sustancias acidificantes —principalmente SO₂ y NO_x— expresadas en kilogramos de SO₂ equivalente (kg SO₂ eq). Fuente: ReCiPe 2016 v1.1.

Avoided Burden / Carga Evitada — Principio recogido en ISO 14044:2006 según el cual, cuando una intervención previene un daño ambiental que habría ocurrido inevitablemente, es posible asignar un crédito ambiental positivo equivalente al impacto que se habría producido. Base conceptual del IIAE.

Bioacumulación trófica — Proceso por el cual una sustancia contaminante se concentra progresivamente a lo largo de la cadena alimentaria, aumentando su concentración en los organismos de niveles tróficos superiores. En el contexto del IIAE, es la vía de exposición principal de los aditivos tóxicos del plástico hacia la salud humana: los aditivos liberados durante la degradación marina son ingeridos por el zooplancton, se transfieren a los peces y finalmente alcanzan al ser humano a través del consumo de pescado.

Biobarda — Dispositivo de retención pasiva de objetos flotantes fabricado con materiales plásticos reciclados, diseñado para instalarse transversalmente en sistemas fluviales urbanos. Intercepta los residuos sólidos flotantes antes de que

avancen hacia el estuario y el océano. No requiere aporte energético durante su operación.

Biodegradación — Proceso de descomposición de materiales orgánicos por la acción de microorganismos como bacterias y hongos. En el caso de los plásticos convencionales en medio marino, la biodegradación es extremadamente lenta debido a las bajas temperaturas, la alta salinidad y la limitada disponibilidad de oxígeno en la columna de agua.

BPA — Bisfenol A. Monómero residual presente principalmente en el policarbonato (PC) y en resinas epoxi. Actúa como disruptor endocrino y se libera durante la degradación marina del plástico. Documentado por Hahladakis et al. (2018).

CO₂ eq — CO₂ equivalente. Unidad común para comparar el efecto de calentamiento global de distintos gases de efecto invernadero, expresado en términos de la cantidad de CO₂ que produciría el mismo efecto durante un horizonte temporal determinado. Según IPCC AR6 (2023): CH₄ fósil = 29,8 CO₂ eq; N₂O = 273 CO₂ eq.

CML-IA baseline — Metodología desarrollada por el Instituto de Ciencias Ambientales de la Universidad de Leiden para la evaluación del agotamiento de recursos en ACV. Proporciona factores de caracterización que traducen el consumo de recursos minerales y fósiles en unidades comparables: kg Sb eq para recursos minerales y MJ para combustibles fósiles. Integrada en ReCiPe 2016.

CTUh — Comparative Toxic Unit for humans. Unidad de toxicidad humana utilizada en ACV. Cuantifica el riesgo cancerígeno o no cancerígeno asociado a la exposición a sustancias tóxicas. Modelo USEtox 2.1.

Dominio de impacto — Agrupación temática de los indicadores del IIAE que estructura el análisis ambiental en cinco ámbitos: Dominio I (Cambio Climático), Dominio II (Toxicidad y Ecotoxicidad), Dominio III (Acidificación y Eutrofización), Dominio IV (Recursos) y Dominio V (Impactos Específicos de Plásticos). Los dominios I a IV recogen categorías clásicas del ACV; el Dominio V es el núcleo diferencial del IIAE.

Ecoinvent — Base de datos de inventario del ciclo de vida desarrollada por el Swiss Centre for Life Cycle Inventories. Proporciona datos de emisiones y

consumos de recursos para miles de procesos industriales. Versión utilizada en el protocolo: Ecoinvent 3.9.

EICV (LCIA) — Evaluación del Impacto del Ciclo de Vida. Fase 3 del ACV que convierte los datos del inventario en categorías de impacto ambiental mediante factores de caracterización. Regulada por ISO 14044:2006 cláusula 4.4.

Endpoint — Indicador de punto final. Nivel de evaluación del impacto ambiental que expresa el daño final sobre las áreas de protección: salud humana, ecosistemas o recursos económicos. Mayor incertidumbre que los indicadores midpoint pero más comprensible para audiencias no técnicas.

EP — Eutrophication Potential. Potencial de eutrofización acuática. Mide el aporte de nutrientes —especialmente fósforo y nitrógeno— a masas de agua, expresado en kilogramos de PO_4 equivalente ($\text{kg PO}_4 \text{ eq}$). Fuente: ReCiPe 2016 v1.1.

EPS — Poliestireno expandido. Variante del PS con estructura espumada y densidad muy baja ($0,03 \text{ g/cm}^3$). Muy frágil mecánicamente, presenta la mayor tasa de fragmentación a microplásticos (60 %) entre los polímeros convencionales.

Estuario — Cuerpo de agua costero semienclausurado donde el agua dulce de los ríos se mezcla con el agua salada del mar. El Río de la Plata es uno de los estuarios más amplios del mundo, con una cuenca aportante de más de 3,2 millones de km^2 .

Exposure-Effect Factor (EEF) — Factor de exposición-efecto. Segundo componente del modelo de ecotoxicidad marina de MarILCA v1.2. Cuantifica la fracción bioasimilable del plástico por los organismos marinos y la severidad del daño biológico resultante.

Factor de caracterización — Parámetro numérico que convierte una unidad física del inventario (kg de un polímero) en una unidad de impacto ambiental normalizada e internacionalmente comparable. Es el puente matemático entre lo que se mide en campo y lo que se evalúa ambientalmente.

Factor regional R — Parámetro adimensional comprendido entre 0 y 1 que ajusta los resultados del IIAE en función de la probabilidad de que el plástico interceptado hubiera alcanzado efectivamente el ecosistema marino sin la intervención. Basado en la evidencia de Meijer et al. (2021).

Fate Factor (FF) — Factor de destino ambiental. Primer componente del modelo de ecotoxicidad marina de MarILCA v1.2. Estima cómo se distribuye el polímero entre los distintos compartimentos del entorno marino en función principalmente de su densidad.

Fotodegradación — Proceso de degradación de materiales por la acción de la radiación ultravioleta (UV). En los plásticos marinos, la fotodegradación rompe las cadenas poliméricas generando radicales libres y fragmentos de menor tamaño. Es el mecanismo dominante de fragmentación a microplásticos para la mayoría de los polímeros convencionales.

Fragmentación — Proceso por el cual los macroplásticos se dividen progresivamente en partículas de menor tamaño bajo la acción combinada de la radiación UV, el oleaje, la hidrólisis y la actividad microbiana. ISO/TR 21960:2020 establece tasas de conversión a microplásticos del 40–85 % dependiendo del polímero.

Frente salino — Zona de contacto entre masas de agua dulce y salada en un estuario, caracterizada por fuertes gradientes de salinidad y densidad. En el Río de la Plata, el frente salino de fondo actúa como barrera de convergencia que concentra los residuos flotantes en franjas de alta densidad, potenciando la efectividad de las biobardas.

GEI — Gases de Efecto Invernadero. Gases que absorben y reemiten radiación infrarroja en la atmósfera, contribuyendo al calentamiento global. Los más relevantes para los plásticos son CO₂, CH₄ y N₂O.

GLAM — Global Guidance for Life Cycle Impact Assessment Indicators. Marco de armonización global lanzado por la UNEP Life Cycle Initiative en octubre de 2024. Selecciona, actualiza y consolida los mejores indicadores de impacto disponibles de distintas fuentes metodológicas, otorga reconocimiento internacional a los indicadores de MarILCA e incorpora las actualizaciones del IPCC AR6 (2023).

GWP — Global Warming Potential. Potencial de calentamiento global. Métrica que cuantifica la contribución al cambio climático de un gas de efecto invernadero expresada en CO₂ equivalente. Fuente: IPCC AR6 (2023).

GWP-100 — GWP con horizonte temporal de 100 años. Perspectiva temporal estándar adoptada por el IPCC y utilizada como base en el IIAE conforme a la perspectiva Hierarchist de ReCiPe 2016.

HDPE — High-Density Polyethylene. Polietileno de alta densidad. Densidad 0,95 g/cm³. Usos principales: bolsas rígidas, tuberías, envases. Factor GWP: 2,80 kg CO₂eq/kg. Tasa de fragmentación: 35 %.

Hidrólisis — Proceso de degradación química en el que el agua rompe los enlaces del polímero. Especialmente activa en polímeros con grupos éster (PET, PLA) o amida (PA). Se acelera con temperatura elevada, pH extremo y presencia de catalizadores biológicos.

IIAE — Índice de Impacto Ambiental Evitado. Protocolo desarrollado en este trabajo para cuantificar, mediante ACV, los beneficios ambientales evitados por la recolección de residuos plásticos antes de su ingreso al ecosistema marino. Implementado en la herramienta Excel ACV_Plasticos_Marinos_V4_BIOBARDAS.xlsx.

IMFIA — Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental. Departamento de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República (Udelar) en Montevideo, Uruguay. Institución colaboradora en el proyecto PRODIC-UMH 2025–2026 en el que se enmarca este TFG.

ICV (LCI) — Inventario del Ciclo de Vida. Fase 2 del ACV que cuantifica todas las entradas (materias primas, energía, agua) y salidas (emisiones, residuos) del sistema analizado. Regulado por ISO 14044:2006.

ISO 14040:2006 — Norma internacional que establece los principios y el marco general del Análisis del Ciclo de Vida. Define las cuatro fases iterativas: definición de objetivo y alcance, inventario, evaluación del impacto e interpretación.

ISO 14044:2006 — Norma internacional que complementa ISO 14040 con los requisitos operativos detallados del ACV. La cláusula 5.4.3 establece la obligatoriedad del análisis de incertidumbre. Las enmiendas Amd 1:2017 y Amd 2:2020 están incorporadas en el protocolo.

ISO 14067:2018 — Norma internacional para la cuantificación y comunicación de la huella de carbono de productos. Base normativa del indicador de Huella de Carbono Extendida del IIAE.

ISO/TR 21960:2020 — Reporte técnico de referencia sobre plásticos en el ambiente. Define las categorías de tamaño de plásticos, documenta las tasas de conversión de macro a microplásticos y establece los horizontes temporales de degradación. Base normativa del indicador de Microplásticos Liberados Evitados.

LDPE — Low-Density Polyethylene. Polietileno de baja densidad. Densidad 0,92 g/cm³. Usos principales: bolsas plásticas, films de embalaje. Factor GWP: 3,10 kg CO₂eq/kg. Tasa de fragmentación: 40 %.

Macroplástico — Fragmento plástico de dimensión mayor a 5 mm, visible a simple vista y recolectable mediante biobardas. Constituye el objeto principal de la interceptación fluvial. Según Brewster et al. (2025), representa el 66 % de los residuos plásticos en sistemas fluviales urbanos del Sur Global.

MarILCA — Marine Impacts in Life Cycle Assessment. Grupo de trabajo internacional establecido en 2018 bajo la UNEP Life Cycle Initiative, integrado por más de 60 científicos de 20 países. Desarrolla factores de caracterización específicos para impactos marinos de los plásticos. Versión utilizada en el IIAE: MarILCA v1.2 (2024).

Mezcla Industrial — Categoría polimérica de la herramienta IIAE que representa la composición media de los residuos plásticos en entornos industriales, con mayor proporción de polímeros de alto rendimiento. Factor GWP ponderado: 3,50 kg CO₂eq/kg. Se utiliza cuando los residuos provienen predominantemente de actividad industrial.

Mezcla Urbana — Categoría polimérica de la herramienta IIAE que representa la composición media de los residuos plásticos en canales urbanos del Sur Global, basada en Brewster et al. (2025): PET (28 %), LDPE/HDPE (32 %), PP (18 %), PS/EPS (12 %) y otros (10 %). Se utiliza cuando no es posible la segregación por polímero en campo.

Microplásticos — Partículas plásticas de diámetro inferior a 5 mm. Según ISO/TR 21960:2020 se subdividen en grandes (1–5 mm), pequeños (100 µm–1 mm), micro (<100 µm) y nanoplásticos (<100 nm). Una vez generados en el océano, no existe mecanismo técnicamente viable de recuperación a escala.

Midpoint — Indicador de punto medio. Nivel de evaluación del impacto ambiental situado en un punto intermedio de la cadena causa-efecto, antes del daño final sobre ecosistemas o salud humana. Más robusto científicamente que los indicadores endpoint. Ejemplos: GWP-100, AP, EP.

Nanoplásticos — Partículas plásticas de diámetro inferior a 100 nm. Pueden cruzar barreras biológicas y entrar en la cadena alimentaria. Campo de investigación emergente con alta incertidumbre metodológica.

NMVOC — Non-Methane Volatile Organic Compounds. Compuestos orgánicos volátiles no metánicos. Contribuyen a la formación de ozono troposférico con efectos negativos sobre la salud humana y los ecosistemas. Expresados en kg NMVOC equivalente en ReCiPe 2016.

PA (Nylon) — Poliamida. Densidad 1,15 g/cm³. Usos principales: redes de pesca, textiles técnicos. Factor GWP más alto de la tabla (7,20 kg CO₂eq/kg). Tasa de fragmentación: 30 %.

PAF — Potentially Affected Fraction. Fracción Potencialmente Afectada. Tercer componente del modelo de ecotoxicidad marina de MarILCA v1.2. Expresa el porcentaje de especies marinas que puede verse afectado por la presencia del plástico a las concentraciones modeladas.

PC — Policarbonato. Densidad 1,20 g/cm³. Usos principales: lentes ópticas, componentes electrónicos, envases reutilizables. Factor GWP: 5,10 kg CO₂eq/kg. Contiene BPA como monómero residual.

PDF·yr — Potentially Disappeared Fraction per year. Fracción Potencialmente Desaparecida por año. Unidad de medida de los indicadores de biodiversidad en ACV. Cuantifica la fracción de especies que podría desaparecer durante un año como consecuencia del impacto evaluado.

PET — Polietileno Tereftalato. Densidad 1,38 g/cm³. Usos principales: botellas de bebidas, textiles de poliéster. Polímero más presente en canales urbanos del Sur Global (28 % según Brewster et al., 2025). Factor GWP: 3,00 kg CO₂eq/kg. Tasa de fragmentación: 45 %.

Perspectiva Hierarchist — Una de las tres perspectivas culturales de ReCiPe 2016, con horizonte temporal de 100 años. Es la perspectiva de mayor consenso científico-político y la adoptada como base en el IIAE. Las otras perspectivas son Individualist (20 años) y Egalitarian (1.000 años).

PLA — Ácido Poliláctico. Bioplástico de origen bioquímico (fermentación de maíz o caña de azúcar). Densidad 1,25 g/cm³. Factor GWP más bajo de la tabla (2,10 kg CO₂eq/kg). Tiempo de degradación marina significativamente menor que los polímeros convencionales (60 años vs 400–1.000 años).

PP — Polipropileno. Densidad 0,90 g/cm³. Usos principales: tuberías, tapas, cajas, textiles. Comportamiento singular: sigue cinética de fotodegradación lineal sin generar fragmentos sólidos detectables (Tuttle et al., 2024), mineralizándose directamente en CO₂ y compuestos orgánicos disueltos.

PRODIC-UMH — Proyecto de colaboración internacional entre el Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad Miguel Hernández de Elche (UMH) y el Departamento de Ingeniería Ambiental del IMFIA de la Universidad de la República (UdelaR), convocatoria 2025–2026. Marco institucional en el que se desarrolla el presente TFG.

PS — Poliestireno. Densidad 1,05 g/cm³. Usos principales: envases de espuma, vasos desechables. Alta tasa de fragmentación (55 %). Parte se convierte en CO₂ y compuestos orgánicos disueltos (Ward et al., 2019).

PUR — Poliuretano. Densidad 1,20 g/cm³. Usos principales: espumas de aislamiento, colchones, calzado. Alta tasa de degradación anaerobia marina, lo que hace especialmente relevante la Huella de Carbono Extendida para este polímero.

PVC — Policloruro de Vinilo. Densidad 1,40 g/cm³. Usos principales: tuberías, cables, perfiles de ventanas. Factor GWP alto (4,20 kg CO₂eq/kg) y alta ecotoxicidad (0,180 kg 1,4-DCB eq/kg) por su elevado contenido en aditivos tóxicos como ftalatos y estabilizadores de plomo.

ReCiPe 2016 — Método de evaluación del impacto del ciclo de vida desarrollado conjuntamente por el RIVM, la Universidad de Radboud Nijmegen y el CML de la Universidad de Leiden. Proporciona factores de caracterización para 18 categorías midpoint y 3 áreas de protección endpoint bajo tres perspectivas culturales. Versión utilizada: ReCiPe 2016 v1.1.

SimpleBox4Plastics (SB4P) — Modelo multimedia desarrollado para estimar la distribución de microplásticos entre compartimentos ambientales (agua superficial, agua profunda, sedimento y biota). Constituye la base del modelo de ecotoxicidad marina regionalizada utilizado por Schwarz et al. (2024) y Louvet et al. (2026) para el desarrollo de factores de caracterización específicos por polímero.

Sur Global — Término geopolítico que agrupa a los países de África, América Latina, Asia meridional y Oceanía caracterizados por economías en desarrollo y acceso limitado a infraestructuras avanzadas de gestión de residuos. En el contexto del IIAE, el Sur Global representa el ámbito prioritario de aplicación del protocolo, dado que concentra la mayor parte de las emisiones fluviales de plástico al océano (Meijer et al., 2021) y donde la disponibilidad de soluciones de bajo coste como las biobardas es más relevante.

Transporte lagrangiano — Método de modelado del movimiento de partículas en un fluido que sigue individualmente cada partícula a lo largo del tiempo. Utilizado por Høiberg et al. (2024) para modelar la distribución geográfica de macroplásticos y su probabilidad de encuentro con fauna marina.

UdelaR — Universidad de la República. Principal universidad pública de Uruguay, con sede en Montevideo. A través de su Facultad de Ingeniería e IMFIA, es la institución colaboradora del proyecto PRODIC-UMH en el que se enmarca este TFG.

Unidad funcional — Unidad de referencia que cuantifica la función del sistema analizado en un estudio ACV. En el IIAE se define como 1 kg de residuo plástico interceptado antes de su ingreso al océano, conforme a ISO 14040:2006.

USEtox — Modelo consensuado de caracterización de toxicidad humana y ecotoxicidad desarrollado bajo la iniciativa UNEP/SETAC. Proporciona los factores CTUh utilizados en el indicador de Toxicidad Humana–Cáncer del IIAE. Versión utilizada: USEtox 2.1.



ANEXO II: TABLA COMPLETA DE FACTORES DE CARACTERIZACIÓN

Polímero	GWP-100 (kg CO ₂ /kg)	Ecotox Marina (kg 1,4-DCB/kg)	Ecotox Agua Dulce (kg 1,4-DCB/kg)	Fragm. MP (%)	AP (kg SO ₂ /kg)	EP (kg PO ₄ /kg)	ADP (kg Sb/kg)	Comb.Fósiles (MJ/kg)
PET	3,000	0,150	0,120	45,000	0,009	0,012	0,035	76,000
HDPE	2,800	0,120	0,096	35,000	0,008	0,011	0,032	73,000
LDPE	3,100	0,140	0,112	40,000	0,009	0,012	0,034	78,000
PP	2,900	0,130	0,104	38,000	0,008	0,012	0,033	75,000
PVC	4,200	0,180	0,144	50,000	0,013	0,018	0,048	57,000
PS	3,300	0,160	0,128	55,000	0,009	0,013	0,036	87,000
EPS	3,350	0,165	0,132	60,000	0,009	0,013	0,037	88,000
PA (Nylon)	7,200	0,200	0,160	30,000	0,021	0,029	0,078	120,000
PC	5,100	0,190	0,152	35,000	0,015	0,021	0,056	100,000
PUR	4,500	0,170	0,136	42,000	0,013	0,018	0,049	90,000
PLA	2,100	0,090	0,072	65,000	0,006	0,009	0,024	54,000
Caucho (TRWP)	3,800	0,220	0,176	25,000	0,011	0,016	0,043	80,000
Mezcla Urbana	3,200	0,148	0,118	44,000	0,009	0,013	0,035	78,000
Mezcla Industrial	3,500	0,160	0,128	42,000	0,010	0,014	0,038	83,000
Mezcla (default)	3,200	0,148	0,118	44,000	0,009	0,013	0,035	78,000

ANEXO III: FICHA TÉCNICA DEL IIAE

Indicador	Fórmula Matemática	Incertidumbre	Referencia
GWP-100	$GWP = M \cdot F_{GWP} \cdot R$	±10%	IPCC AR6 (2023); Pellengahr et al. 2025
Huella de Carbono Extendida	$HCE = M \cdot F_{GWP} \cdot 1,07 \cdot R$	±15%	Deeney et al. (2026)
Ecotoxicidad Marina	$EM = M \cdot F_{ECO} \cdot R$	±25%	MarLCA v1.2; Saadi et al. (2025)
Ecotoxicidad en Agua Dulce	$EAD = M \cdot F_{ECOAD} \cdot R$	±30%	Schwarz et al. (2024); en ReCiPe 2016
Microplásticos Evitados	$MP = M \cdot \left(\frac{F_{FRAG}}{100}\right) \cdot R$	±20%	UNEP 2021; Walsh et al. 2025; Pellengahr 2025
Acidificación Atmosférica	$AP = M \cdot F_{AP} \cdot R$	±15%	ReCiPe 2016 v1.1
Eutrofización Acuática	$EP = M \cdot F_{EP} \cdot R$	±18%	ReCiPe 2016 v1.1
Agotamiento de Recursos Abióticos	$ADP = M \cdot F_{ADP} \cdot R$	±18%	ReCiPe 2016 v1.1
Agotamiento de Combustibles Fósiles	$ACF = M \cdot F_{ACF} \cdot R$	±25%	Geyer 2017 Science Advances
Impacto Acuático de Microplásticos	$IAM = M \cdot 0,25 \cdot R$	±30 %	Saadi et al. (2025)
Enredamiento de Megafauna	$EM = M \cdot 0,02 \cdot R$	±35 %	Høiberg (2024)
Formación Ozono Fotoquímico	$NMVOC = M \cdot 0,018 \cdot R$	±15 %	ReCiPe 2016
Material Particulado Fino (PM_{2,5})	$PM_{2,5} = M \cdot 0,0045 \cdot R$	±18 %	ReCiPe 2016
Toxicidad Humana – Cáncer	$THc = M \cdot 0,038 \cdot R$	±25 %	USEtox 2.1
Ocupación de Espacio Marino	$OEM = M \cdot 2,3 \cdot R$	±20 %	GLAM v1.0 (2024)

8. BIBLIOGRAFIA

- Meijer, L. J. J., van Emmerik, T., van der Ent, R., Schmidt, C. y Lebreton, L. (2021). More than 1000 rivers account for 80 % of global riverine plastic emissions into the ocean. *Science Advances*, 7(18), eaaz5803.
<https://doi.org/10.1126/sciadv.aaz5803>
- Geyer, R., Jambeck, J. R. y Law, K. L. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances*, 3(7), e1700782.
<https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782>
- Schuyler, Q. A., Hardesty, B. D., Wilcox, C. y Townsend, K. (2014). Global analysis of anthropogenic debris ingestion by sea turtles. *Conservation Biology*, 28(1), 129–139. <https://doi.org/10.1111/cobi.12126>
- Deeney, M., Hamelin, L., Vialle, C., Yan, X., Green, R., Yates, J. y Kadiyala, S. (2026). Global health burdens of plastics: a lifecycle assessment model from 2016 to 2040. *The Lancet Planetary Health*, 10(1), 101406.
<https://doi.org/10.1016/j.lanplh.2025.101406>
- Høiberg, M. A., Stadler, K. y Verones, F. (2024). Disentangling marine plastic impacts in life cycle assessment: spatially explicit characterization factors for ecosystem quality. *Science of the Total Environment*, 940, 175019.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.175019>
- Nakatani, J., Maruyama, T. y Moriguchi, Y. (2023). Degradation and fragmentation behavior of polypropylene and polystyrene in water. *Scientific Reports*, 13, 31488. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-31488-w>
- Ibrahim, N., Amin Abdul Rahman, A. M. N., Shafiq, M. D., Lockman, Z., Jaafar, M. y Kameda, Y. (2025). Microplastic pollution: sources, degradation mechanisms, analytical advances, and mitigation strategies for environmental sustainability. *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*, 263, 27.
<https://doi.org/10.1007/s44169-025-00098-0>
- Van Emmerik, T. et al. (2022). Riverine plastic emission and accumulation in river systems. *Nature Reviews Earth & Environment*. <https://doi.org/10.1038/s43017-022-00324-0>
- Pazos, R. S. et al. (2017). Microplastics in water and coastal fish of the Río de la Plata estuary. *Marine Pollution Bulletin*, 122(1–2), 294–300.
<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.06.007>

- Elisei Schicchi, A. et al. (2023). Lagrangian simulation of microplastic transport in the Río de la Plata system. *Marine Pollution Bulletin*, 187, 114570. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2022.114570>
- Nordahl, S. L. y Scown, C. D. (2024). Recommendations for life-cycle assessment of recyclable plastics in a circular economy. *Chemical Science*, 15, 9397–9407. <https://doi.org/10.1039/d4sc01340a>
- ISO 14040:2006. *Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework*. International Organization for Standardization.
- ISO 14044:2006 + Amd 1:2017 + Amd 2:2020. *Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines*. International Organization for Standardization.
- ISO/TR 21960:2020. *Plastics — Environmental aspects — State of knowledge and methodologies*. International Organization for Standardization.
- ISO 14067:2018. *Greenhouse gases — Carbon footprint of products — Requirements and guidelines for quantification*. International Organization for Standardization.
- Huijbregts, M. A. J. et al. (2017). ReCiPe 2016 v1.1: a harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 22, 138–147. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1246-y>
- IPCC (2023). *Climate Change 2023: Synthesis Report. Sixth Assessment Report (AR6)*. Intergovernmental Panel on Climate Change, WG1.
- MarILCA v1.2 (2024). *Marine Impacts in Life Cycle Assessment, version 1.2*. UNEP-SETAC Life Cycle Initiative Working Group. <https://marilca.org>
- GLAM v1.0 (2024). *Global Guidance for Life Cycle Impact Assessment Indicators, version 1.0.2024.10*. UNEP-SETAC Life Cycle Initiative.
- Boulay, A. M., Verones, F. y Vázquez-Rowe, I. (2022). Capabilities and deficiencies of life cycle assessment to address plastic pollution. *Frontiers in Sustainability*, 3, 1007060. <https://doi.org/10.3389/frsus.2022.1007060>
- Ecoinvent Centre (2023). *Ecoinvent Database v3.9*. Swiss Centre for Life Cycle Inventories. <https://ecoinvent.org>
- Guinée, J. B. et al. (2002). *Handbook on Life Cycle Assessment: Operational Guide to the ISO Standards*. Kluwer Academic Publishers.
- Saadi, N., Lavoie, J., Fantke, P., Redondo-Hasselerharm, P. y Boulay, A.-M. (2025). Including impacts of microplastics in marine water and sediments in life cycle assessment. *Journal of Cleaner Production*, 520, 146037. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.146037>
- Louvet, J., Quik, J. T. K. y Boulay, A. M. (2026). Regionalized characterization factors for microplastic emissions in LCA considering multimedia fate modelling.

- Journal of Cleaner Production*, 538, 147217.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.147217>
- Schwarz, A. E., Herlaar, S., Cohen, Q. M., Quik, J. T. K. et al. (2024). Microplastic aquatic impacts included in life cycle assessment. *Resources, Conservation and Recycling*, 209, 107787. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2024.107787>
- Pellengahr, F., Corella-Puertas, E., Mattelin, V., Saadi, N., Bertella, F., Boulay, A. y van der Meer, Y. (2025). Modeling marine microplastic emissions in Life Cycle Assessment: characterization factors for biodegradable polymers and their application in a textile case study. *Frontiers in Toxicology*, 7.
<https://doi.org/10.3389/ftox.2025.1494220>
- Walsh, A. N. et al. (2025). Environmental degradation and fragmentation of microplastics. *Microplastics and Nanoplastics*, 5.
<https://doi.org/10.1186/s43591-025-00118-9>
- Walsh, A. N., Reddy, C. M., Niles, S. F., McKenna, A. M., Hansel, C. M. y Ward, C. P. (2021). Plastic formulation as emerging control of photochemical fate in the ocean. *Environmental Science & Technology*, 55(18).
<https://doi.org/10.1021/acs.est.1c02272>
- Fantke, P. et al. (2017). USEtox: consensus model for human and ecological toxicity in LCA (versions 2.0 / 2.1). Technical University of Denmark — SETAC/UNEP.
- USEtox 2.1 (2019). *Human toxicity and freshwater ecotoxicity characterization model*. UNEP/SETAC. <https://usetox.org>
- Hahladakis, J. N., Veilis, C. A., Weber, R., Iacovidou, E. y Purnell, P. (2018). An overview of chemical additives present in plastics: migration, release, fate and environmental impact during their use, disposal and recycling. *Journal of Hazardous Materials*, 344, 179–199.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2017.10.014>
- Jiao, H., Ali, S. S., Alsharbaty, M. H. M., Elsamahy, T. et al. (2024). A critical review on plastic waste life cycle assessment and management: challenges, research gaps, and future perspectives. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 271, 115942. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2024.115942>
- UNEP (2021). *From Pollution to Solution: A Global Assessment of Marine Litter and Plastic Pollution*. United Nations Environment Programme.
- Pazos, R. S. et al. (2021). Microplastics in sediments of the Río de la Plata. *Science of the Total Environment*, 788, 147731.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147731>

- Brewster, C. W. et al. (2025). Assessing macroplastic debris collected from eight diverse river systems across four continents. *Journal of Environmental Management*, 391, 126354. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.126354>
- Santucci, L., Fernández-Severini, M. D., Rimondino, G. N., Colombo, C. V., Prieto, G., Forero-López, A. D. y Carol, E. S. (2024). Assessment of meso- and microplastics distribution in coastal sediments and waters at the middle estuary of the Río de la Plata, Argentina (SW Atlantic Ocean). *Science of the Total Environment*, 912, 170026. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.170026>
- Blettler, M. C. M. et al. (2023). Macroplastic capture efficiency of boom traps in fluvial systems. *Science of the Total Environment*, 857, 159299. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159299>
- DIA-IMFIA, Facultad de Ingeniería, UdelaR. *Informe Final CSIC IM. Gestión de Residuos Sólidos en la Trama Hídrica de Montevideo, Orientada a su Reducción*. Universidad de la República, Montevideo. (Documento interno, pendiente de publicación.)
- Benítez, S. O., Lozano-Olvera, G., Morelos, R. y Armijo de Vega, C. (2008). Mathematical modeling to predict residential solid waste generation. *Waste Management*, 28(Supl. 1), S7–S13. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.03.020>